

• РАДИО И СВЯЗЬ •

СПРАВОЧНИК

Г. Г. ГУРЗАДЯН
В. Г. ДМИТРИЕВ
Д. Н. НИКОГОСЯН

НЕЛИНЕЙНО-
ОПТИЧЕСКИЕ
КРИСТАЛЛЫ

СПРАВОЧНИК

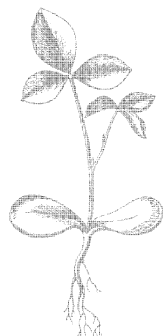
Г.Г.ГУРЗАДЯН
В.Г.ДМИТРИЕВ
Д.Н.НИКОГОСЯН

НЕЛИНЕЙНО- ОПТИЧЕСКИЕ КРИСТАЛЛЫ

СВОЙСТВА
И ПРИМЕНЕНИЕ
В КВАНТОВОЙ
ЭЛЕКТРОНИКЕ



МОСКВА „РАДИО И СВЯЗЬ”
1991



Scan AAW

ББК 32.86

Г95

УДК[681.325.5-184.4:621.3.049.771.14] (03)

Рецензент профессор И. С. Рез

Редакция литературы по электронике

Гурзадян Г. Г. и др.

Г95 Нелинейно-оптические кристаллы. Свойства и применение в квантовой электронике: Справочник/Г. Г. Гурзадян, В. Г. Дмитриев, Д. Н. Никогосян. — М.: Радио и связь, 1991. — 160 с.: ил.

ISBN 5-256-00859-5.

Приводится справочный материал по нелинейно-оптическим свойствам одноосных и двухосных кристаллов, используемых для преобразования частоты в лазерных устройствах. Рассмотрены такие типичные применения, как генерация второй гармоники, генерация суммарных и разностных частот, параметрическая генерация и др. Приводятся формулы для расчета направлений синхронизма, эффективной нелинейности кристалла и КПД преобразователей частоты.

Для инженерно-технических работников, специализирующихся в области квантовой электроники.

Г $\frac{2302030400-106}{046(01)-91}$ 87-91

ББК 32.86

ISBN 5-256-00859-5

© Гурзадян Г. Г., Дмитриев В. Г., Никогосян Д. Н.,
1991

Предисловие

За двадцать пять с лишним лет, прошедших со времени опубликования пионерских работ по нелинейной оптике П. Франкена, Дж. Джордмейна, П. Мейкера, Р. Терхюна и появления первых монографий С. А. Ахманова и Р. В. Хохлова [1*], Н. Бломбергена [2*] преобразование частоты лазерного излучения в кристаллах с квадратичной нелинейной восприимчивостью из чисто лабораторного эффекта превратилось в мощный метод, широко применяемый в современной квантовой электронике и лазерной физике в интересах самых различных отраслей науки, техники и народного хозяйства. К настоящему времени, с одной стороны, основные физические исследования в области взаимодействия световых волн в нелинейных кристаллах в значительной мере близятся к завершению, а по таким эффектам, как генерация гармоник или суммарных частот, на первое место вышли опытно-конструкторские разработки и серийное производство; с другой стороны, продолжается активный поиск высокоэффективных нелинейных материалов для преобразования оптических частот.

Поэтому своевременным и необходимым явилось создание справочника по нелинейным кристаллам. Предлагаемое издание, помимо описания свойств и применений конкретных нелинейных материалов, содержит основные формулы, позволяющие читателям с инженерно-техническим образованием производить расчет важнейших параметров нелинейных преобразователей частоты, таких как угол среза кристалла, эффективная нелинейность, эффективность преобразования и т. д.

В справочник включены имеющиеся в литературе (до 1990 года) данные о свойствах и применениях 46 нелинейных кристаллов. Глава 1 — «Введение в оптику нелинейных кристаллов» — содержит необходимые формулы для оценок или инженерного расчета нелинейных преобразователей частоты. В гл. 2 — «Нелинейно-оптические свойства кристаллов», содержащей основной справочный материал, последовательно рассмотрены одноосные, двухосные и органические нелинейные кристаллы. В гл. 3 — «Применение нелинейных кристаллов» — описаны такие применения, как генерация второй гармоники, генерация суммарной и разностной частот, параметрическая генерация света; для каждой лазерной системы указан оптимальный нелинейный кристалл.

Ссылки по тексту на прикнижный список литературы отмечены звездочками в отличие от библиографических ссылок. В связи с многочисленностью библиографических ссылок они приведены в конце книги.

Публикация рукописи одобрена Всесоюзным научно-исследовательским центром по материалам и веществам Госстандарта.

Глава 1 написана В. Г. Дмитриевым и Д. Н. Никогосяном, гл. 2 — Д. Н. Никогосяном и Г. Г. Гурздяном, гл. 3 — Г. Г. Гурздяном.

Глава 1.

Введение в оптику нелинейных кристаллов

1.1. Трехчастотные (трехволновые) взаимодействия

Преобразование частоты световой волны (умножение, деление, смешение) возможно в нелинейно-оптических кристаллах, в которых коэффициент преломления n является функцией вектора напряженности электрического поля \mathbf{E} световой волны:

$$n(\mathbf{E}) = n_0 + n_1 \mathbf{E} + n_2 \mathbf{E}^2 + \dots,$$

где n_0 — показатель преломления в отсутствие поля (эта величина используется в традиционной, «линейной» оптике); n_1 , n_2 и так далее — коэффициенты разложения $n(\mathbf{E})$ в ряд.

В нелинейной оптике вводится вектор диэлектрической поляризованности \mathbf{P} (дипольный момент единицы объема вещества), связанный с полем \mathbf{E} материальным уравнением среды [1*—4*]:

$$\mathbf{P}(\mathbf{E}) = \kappa(\mathbf{E}) \cdot \mathbf{E} = \kappa_0 \mathbf{E} + \chi^{(2)} \mathbf{E}^2 + \chi^{(3)} \mathbf{E}^3 + \dots, \quad (1)$$

где κ — диэлектрическая восприимчивость (в отсутствие поля обозначается κ_0); $\chi^{(2)}$, $\chi^{(3)}$ и так далее — коэффициенты нелинейной восприимчивости (соответственно, квадратичной, кубической и т. д.). При этом имеют место соотношения:

$$\kappa_0 = (\epsilon_0 - 1)/4\pi = (n_0^2 - 1)/4\pi;$$

$$\chi^{(2)} \simeq n_0 n_1 / 2\pi;$$

$$\chi^{(3)} \simeq n_0 n_2 / 2\pi,$$

где ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость в отсутствие поля. В общем случае анизотропных кристаллов величины n , ϵ , κ , χ являются тензорами соответствующих рангов [4*].

В этой главе мы ограничимся трехчастотными, или трехволновыми взаимодействиями, имеющими место в кристаллах с квадратичной нелинейностью ($\chi^{(2)} \neq 0$).

При распространении в таких кристаллах двух монохроматических волн с частотами ω_1 , ω_2 возникают новые световые волны с комбинационными частотами ω_3 , ω_4 :

$$\omega_3 = \omega_2 + \omega_1; \quad \omega_4 = \omega_2 - \omega_1.$$

Генерация суммарной частоты (ГСЧ) ω_3 используется для преобразования длинноволнового, например инфракрасного (ИК) излучения, в коротковолновое, например ультрафиолетовый (УФ) или видимый диапазон. Для преобразования, наоборот, коротковолнового излучения в длинноволновое используется генерация разностной частоты (ГРЧ) ω_4 . Частным случаем ГСЧ при $\omega_1 = \omega_2$ яв-

ляется генерация второй гармоники (ГВГ) $\omega_3 = 2\omega_1$; частным случаем ГРЧ при $\omega_1 = \omega_2$ является оптическое выпрямление ($\omega_4 = 0$). При использовании последовательных процессов типа ГСЧ или ГВГ возможна генерация более сложных комбинационных частот или более высоких оптических гармоник. В некотором смысле обратным эффектом ГСЧ является эффект параметрической люминесценции — возникновение двух световых волн с частотами ω_1, ω_2 (ω_1 — холостая частота, ω_2 — сигнальная частота) в поле интенсивной световой волны с частотой ω_3 (ω_3 — частота накачки).

1.2. Фазовый синхронизм

В обычных условиях все оптические среды являются слабонелинейными, т. е. имеет место неравенство $\chi^{(2)}E \ll \kappa_0$. В силу этого локальные, т. е. не накапливающиеся на достаточно больших длинах, нелинейные эффекты пренебрежимо малы. Для накопления заметных нелинейных эффектов требуется наличие фазового синхронизма:

$$k_3 = k_2 + k_1; \quad k_4 = k_2 - k_1, \quad (2)$$

где k_i — волновые векторы волн с частотами ω_i ($i=1, 2, 3, 4$), модули которых равны

$$|k_i| = k_i = \frac{\omega_i n(\omega_i)}{c} = \frac{\omega_i}{v(\omega_i)} = \frac{2\pi n_i}{\lambda_i} = 2\pi \nu_i n_i.$$

Величины v_i , $n_i = n(\omega_i)$, λ_i и ν_i являются соответственно фазовой скоростью, коэффициентом преломления, длиной волны и волновым числом на частоте ω_i .

Расположение волновых векторов при синхронизме может быть как коллинеарным (скалярный синхронизм), так и неколлинеарным (векторный синхронизм) (рис. 1).

При скалярном (коллинеарном) синхронизме для ГСЧ

$$k_3 = k_2 + k_1, \text{ или } \omega_3 n_3 = \omega_2 n_2 + \omega_1 n_1.$$

Те же соотношения для ГВГ ($\omega_1 = \omega_2$, $\omega_3 = 2\omega_1$) имеют вид:

$$k_3 = 2k_1, \text{ или } n_3 = n_1. \quad (3)$$

Физический смысл условия фазового синхронизма (2) состоит в пространственном «резонансе» взаимодействующих световых волн. Следует подчеркнуть, что в области оптической прозрачно-

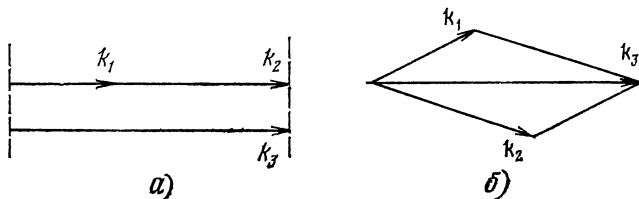


Рис. 1. Коллинеарный, или скалярный (а), и неколлинеарный, или векторный (б) синхронизмы для трехчастотных взаимодействий

ти в изотропных кристаллах (а также в анизотропных кристаллах для волн одинаковой поляризации) из-за нормальной дисперсии условие (3) никогда не выполняется ($n_1 < n_3$), использование же аномальной дисперсии практически невозможно из-за большого поглощения энергии. Выполнение условия синхронизма возможно только в анизотропных кристаллах для волн с различной поляризацией.

Необходимым и достаточным условием эффективного трехчастотного взаимодействия является сочетание ненулевой квадратичной нелинейности оптически прозрачного кристалла с наличием фазового синхронизма.

1.3. Оптика одноосных кристаллов

В одноосных кристаллах существует одно выделенное направление, называемое оптической осью кристалла (ось Z). Плоскость, содержащая ось Z и волновой вектор k световой волны, называется главной плоскостью. Луч света, поляризация которого (т. е. направление колебаний электрического вектора E) перпендикулярна главной плоскости, называется обыкновенным лучом, или о-лучом (рис. 2). Луч, поляризация которого лежит в главной плоскости, называется необыкновенным лучом, или е-лучом (рис. 3). Показатель преломления о-луча не зависит от направления распространения, а для е-луча, наоборот, зависит. Таким образом, в анизотропном кристалле показатель преломления в общем случае зависит и от поляризации света, и от направления его распространения. Разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей называется двулучепреломлением Δn . Величина Δn в направлении оптической оси Z равна нулю, а максимальна в направлениях, перпендикулярных оси Z . Показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей в плоскости, перпендикулярной оси Z , называются главными значениями и обозначаются n_o и n_e соответственно (индексы о и е ставятся внизу). Показатель преломления необыкновенной волны в общем случае является функцией угла θ между осью Z и вектором k (рис. 4) и определяется формулой

$$n^e(\theta) = n_o \sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \theta}{1 + (n_o \operatorname{tg} \theta / n_e)^2}}$$

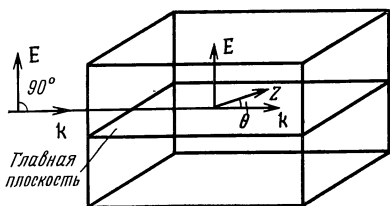


Рис. 2. Главная плоскость кристалла и обыкновенный луч

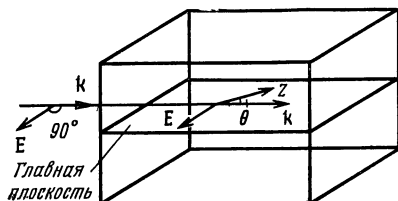


Рис. 3. Главная плоскость кристалла и необыкновенный луч

(индекс e в этом случае ставится сверху). Следующие формулы очевидны:

$$\Delta n(\theta) = n_o - n^e(\theta); \quad n^o(\theta) \equiv n_o;$$

$$n^e(0^\circ) = n_o; \quad n^e(90^\circ) = n_e;$$

$$\Delta n(90^\circ) = n_o - n_e; \quad \Delta n(0^\circ) = 0.$$

При $n_o > n_e$ кристалл является отрицательным, при $n_o < n_e$ — положительным.

Отметим, что n^e не зависит от азимутального угла φ (т. е. от угла между проекцией k на плоскость XY , перпендикулярную оси Z , и одной из осей в этой плоскости (см. рис. 4)). Индикатриса показателей преломления является сферой с радиусом n_o для обыкновенного луча и эллипсоидом вращения с полуосями n_o и n_e для необыкновенного луча (ось вращения эллипсоида и есть ось Z). В направлении оси Z сфера и эллипсоид касаются друг друга. В отрицательном кристалле эллипсоид вписан в сферу (рис. 5,а), в положительном — наоборот, сфера вписана в эллипсоид (рис. 5,б).

При распространении плоской волны в одноосном кристалле направления распространения фазы световой волны (вектор k) и энергии (вектор s) в общем случае не совпадают. Направление s можно определить как нормаль к касательной, проведенной в точку пересечения вектора k с зависимостью $n(\theta)$. Для обыкновенной волны зависимость $n(\theta)$ есть сфера с радиусом n_o , поэтому такая нормаль совпадает с направлением волнового вектора k . Для необыкновенной волны нормаль к касательной эллипсоида вращения, за исключением случаев $\theta = 0^\circ$, $\theta = 90^\circ$, не совпадает с волновым вектором k , а повернута относительно него на угол двулучепреломления

$$\rho(\theta) = \pm \arctg[(n_o/n_e)^2 \tg \theta] \mp \theta$$

(верхние знаки берутся для отрицательного кристалла, нижние — для положительного) (рис. 6).

Связь между ρ и θ может быть положена в основу простого метода ориентации одноосных монокристаллов [5*]. Пусть на входную грань кристалла длиной L падает лазерный луч с произвольной линейной поляризацией. При прохождении через кристалл этот луч разделится на два луча со взаимно перпендикулярными поляризациями, которые на выходной грани кристалла разойдутся на расстояние $\delta = L \tg \rho$ (рис. 7).

Тогда угол среза кристалла $\theta_{ср}$, т. е. угол между оптической осью кристалла (Z) и направлением нормали к поверхности кристалла (z), соответствует одному из двух значений

$$\theta_{ср}^{(1,2)} = \arctg \left\{ \frac{|(n_o/n_e)^2 - 1| \cdot L}{2\delta (n_o/n_e)^2} \pm \sqrt{\frac{[(n_o/n_e)^2 - 1]^2 L^2}{4\delta^2 (n_o/n_e)^4} - (n_e/n_o)^2} \right\}.$$

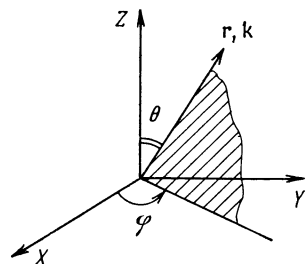


Рис. 4. Координатное пространство кристалла (r — направление распространения света, Z — оптическая ось, θ — полярный угол, φ — азимутальный угол)

Подробнее о кристаллооптике анизотропных сред см. монографию [6*].

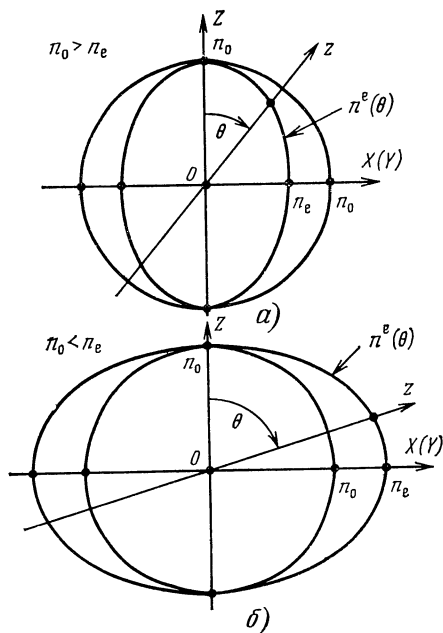
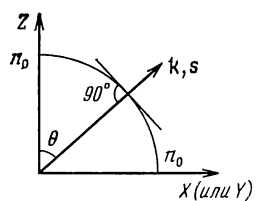
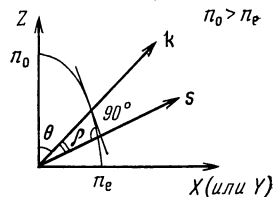


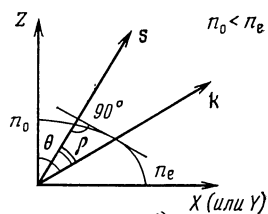
Рис. 5. Индикатрисы показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волн в отрицательном (а) и положительном (б) одноосных кристаллах



а)



б)



б)

Рис. 6. Расположение волнового (\mathbf{k}) и лучевого (\mathbf{s}) векторов в изотропной среде (а) и в анизотропных отрицательном (б) и положительном (в) одноосных кристаллах (ρ — угол двулучепреломления, или анизотропии)

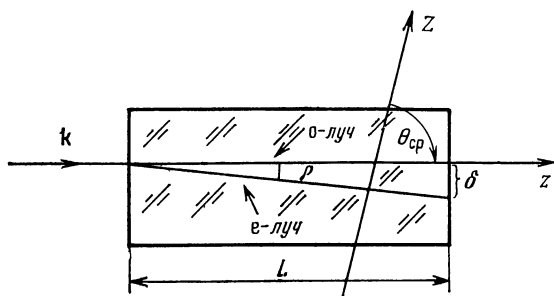


Рис. 7. К расчету угла среза θ_{cp} одноосного кристалла

1.4. Типы синхронизма в одноосных кристаллах

Для выполнения условия синхронизма при трехчастотных взаимодействиях требуется использовать волны с различной поляризацией. Рассмотрим случай ГСЧ. Если смешиваемые волны имеют одинаковые поляризации, то суммарная частота (СЧ) должна иметь перпендикулярную поляризацию; в этом случае имеет место синхронизм 1-го типа:

для отрицательного кристалла (оое-синхронизм)

$$k_{o1} + k_{o2} = k^e_3;$$

для положительного кристалла (еое-синхронизм)

$$k^e_1 + k^e_2 = k_{o3}$$

(здесь и далее первой указывается волна с меньшей частотой).

Если смешиваемые волны имеют взаимно перпендикулярные поляризации, то волна СЧ должна соответствовать:

в отрицательном кристалле — необыкновенной волне:

$$k_{o1} + k^e_2 = k^e_3, \quad k^e_1 + k_{o2} = k^e_3$$

(оое- и еое-синхронизмы соответственно);

в положительном кристалле — обыкновенной волне:

$$k_{o1} + k^e_2 = k_{o3}, \quad k^e_1 + k_{o2} = k_{o3}$$

(оое- и еое-синхронизмы соответственно). Четыре последних формулы описывают синхронизм 2-го типа. Таким образом, в отрицательных кристаллах реализуются синхронизмы вида оое, еое, оое, в положительных — синхронизмы вида еое, еое, оое. В общем случае реализуется неколлинеарный, или векторный синхронизм, частным случаем которого является коллинеарный, или скалярный синхронизм (см. рис. 1), используемый наиболее широко на практике.

Сказанное выше полностью относится и к случаю параметрической люминесценции (волна с большей частотой ω_3 является в этом случае волной накачки, две других волны — холостая ω_1 и сигнальная ω_2 — волнами параметрической люминесценции); для реализации ГРЧ в формулах этого параграфа следует произвести перестановку индексов $2 \rightarrow 4$, $3 \rightarrow 2$ или $1 \rightarrow 4$, $3 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 1$, см. формулу (2).

На рис. 8 применительно к ГВГ ($\omega_1 = \omega_2 = \omega$; $\omega_3 = 2\omega$) показано нахождение направления коллинеарного синхронизма 1-го типа в одноосном отрицательном кристалле в координатах показателей преломления (рис. 8,а)

$$n_{o1}(\omega) = n^e_3(2\omega, \theta^{(1)}_c)$$

и волновых векторов (рис. 8,б)

$$k_{o1}(\omega) + k_{o2}(\omega) = 2k_{o1}(\omega) = k^e_3(2\omega, \theta^{(1)}_c).$$

Из рис. 8 видно, что направление синхронизма 0z образуется при пересечении окружности обыкновенного показателя прелом-

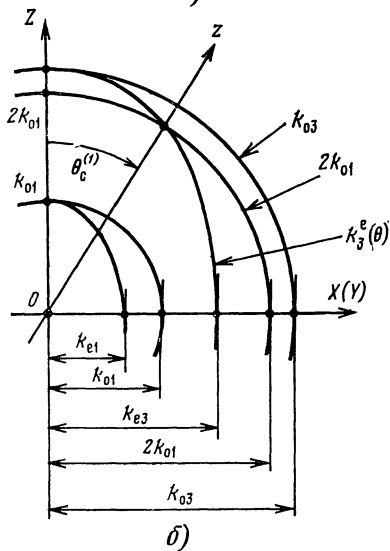
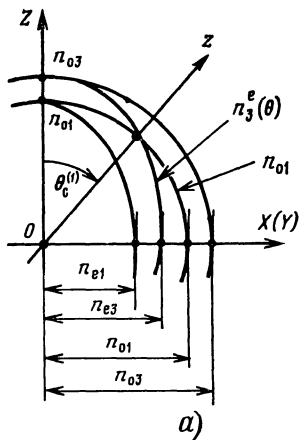


Рис. 8. Скалярный (коллинеарный) синхронизм 1-го типа (ооо) в одноосном отрицательном кристалле в координатах показателей преломления (а) и волновых векторов (б) в первом квадранте плоскости $XZ(YZ)$

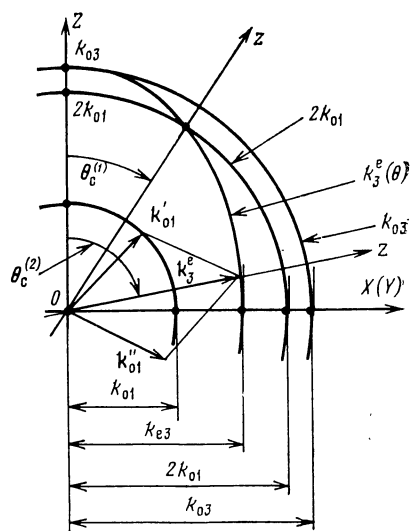


Рис. 9. Скалярный (коллинеарный) и векторный (неколлинеарный) синхронизмы 1-го типа (ооо) в одноосном отрицательном кристалле

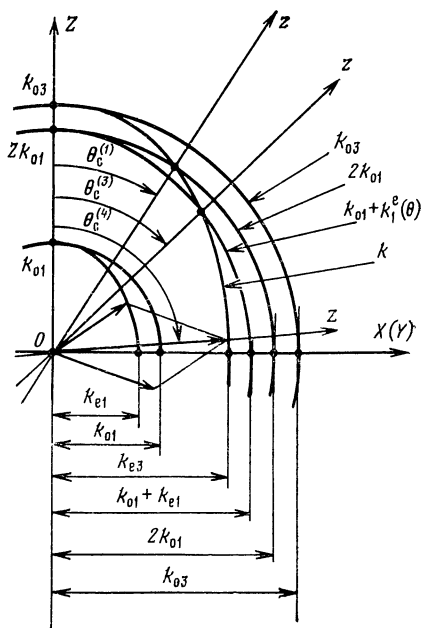


Рис. 10. Скалярные (коллинеарные) синхронизмы 1-го (ооо) и 2-го (еоо) типов, а также векторный (неколлинеарный) синхронизм 2-го типа (еоо) в одноосном отрицательном кристалле

ления на частоте ω с эллипсом необыкновенного показателя преломления на частоте 2ω (в координатах показателей преломления) или, что то же самое, при пересечении окружности $2k_{o1}$ с эллипсом k^e_3 (в координатах волновых векторов).

Векторный синхронизм 1-го типа (рис. 9) возможен лишь в области углов $\theta^{(1)}_c \leq \theta^{(2)}_c \leq \pi - \theta^{(1)}_c$ (т. е. в области своеобразной аномальной дисперсии, так как при этих углах выполняется неравенство $n^e_3 \leq n_{o1}$).

На рис. 10 показано нахождение скалярного (угол $\theta^{(3)}_c$) и векторного (угол $\theta^{(4)}_c$) фазовых синхронизмов 2-го типа для ГВГ в отрицательном одноосном кристалле. Направление синхронизма в первом случае образуется при пересечении эллипса $k^e_3(\theta)$ с эллипсом $k_{o1} + k^e_1(\theta)$. Векторный синхронизм 2-го типа возможен в области $\theta^{(3)}_c < \theta^{(4)}_c < \pi - \theta^{(3)}_c$.

Если для соответствующего типа синхронизма коллинеарный синхронизм реализуется при $\theta_c = 90^\circ$, векторный синхронизм того же типа отсутствует. Кроме того, если $\theta^{(1)}_c = 90^\circ$, то синхронизм 2-го типа отсутствует.

1.5. Расчет углов синхронизма в одноосных кристаллах

Ввиду того, что коэффициент преломления необыкновенной волны в одноосных нелинейных кристаллах определяется только полярным углом θ , то для определения направления синхронизма в одноосном кристалле достаточно найти соответствующий угол синхронизма θ_c для конкретного трехволнового взаимодействия. В табл. 1 приведены точные аналитические выражения для θ^{oee}_c , θ^{eoe}_c и θ^{eoo}_c , а также приближенные выражения для θ^{eoe}_c , θ^{eoe}_c , θ^{eoo}_c (точность определения примерно 0,1 ... 0,2°) [7*].

Отметим, что синхронизм выполняется независимо от азимутального угла ϕ , т. е. он реализуется на поверхности конуса с

Т а б л и ц а 2

Формулы для расчета углов синхронизма в одноосных нелинейных кристаллах

Одноосные кристаллы		Обозначения
отрицательные	положительные	
$\text{tg}^2 \theta^{oee}_c = \frac{1-U}{W-1}$	$\text{tg}^2 \theta^{eoo}_c \approx \frac{1-U}{U-S}$	$U = \left(\frac{A+B}{C} \right)^2, W = \left(\frac{A+B}{F} \right)^2, R = \left(\frac{A+B}{D+B} \right)^2,$ $Q = \left(\frac{A+B}{A+E} \right)^2, S = \left(\frac{A+B}{D+E} \right)^2, V = \left(\frac{B}{C-A} \right)^2,$ $Y = \left(\frac{B}{E} \right)^2, T = \left(\frac{A}{C-B} \right)^2, Z = \left(\frac{A}{D} \right)^2$
$\text{tg}^2 \theta^{eoe}_c \approx \frac{1-U}{W-R}$	$\text{tg}^2 \theta^{eoe}_c = \frac{1-V}{V-Y}$	
$\text{tg}^2 \theta^{eoe}_c \approx \frac{1-U}{W-Q}$	$\text{tg}^2 \theta^{eoo}_c = \frac{1-T}{T-Z}$	
		$A = n_{o1}/\lambda_1, B = n_{o2}/\lambda_2, C = n_{o3}/\lambda_3, D = n_{e1}/\lambda_1,$ $E = n_{e2}/\lambda_2, F = n_{e3}/\lambda_3$

углом раскрыва $2\theta_c$; в то же время эффективность процесса нелинейного преобразования в значительной мере определяется обоими углами — θ_c и φ .

1.6. Отражение и преломление световых волн на поверхности одноосного кристалла

В связи с необходимостью учета отражения и преломления световых волн на границе раздела вакуум—диэлектрик приведем формулы для углов отражения и преломления, а также коэффициентов отражения света в одноосных кристаллах для разных углов падения и поляризаций падающей из вакуума световой волны. Во всех случаях угол отражения равен углу падения.

1. Вектор \mathbf{E} перпендикулярен главной плоскости. Угол преломления ψ_0 находится из соотношения

$$\sin \alpha = n_0 \sin \psi_0,$$

где α — угол падения (рис. 11,а). Коэффициент отражения равен

$$R^o = \frac{\sin^2(\alpha - \psi_0)}{\sin^2(\alpha + \psi_0)}.$$

В случае нормального падения ($\alpha = \psi_0 = 0$)

$$R_{\alpha=0}^o = \left(\frac{n_0 - 1}{n_0 + 1} \right)^2.$$

2. Вектор \mathbf{E} лежит в главной плоскости.

Угол преломления ψ^e находится из соотношения

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \psi^e} = n^e(\theta) = n_0 \sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2(\theta_{cp} \pm \psi^e)}{1 + (n_0/n_e)^2 \operatorname{tg}^2(\theta_{cp} \pm \psi^e)}},$$

где θ_{cp} — угол среза, θ — угол между осью z и вектором \mathbf{k} в кристалле. Знак «плюс» в скобках под корнем берется, когда вектор

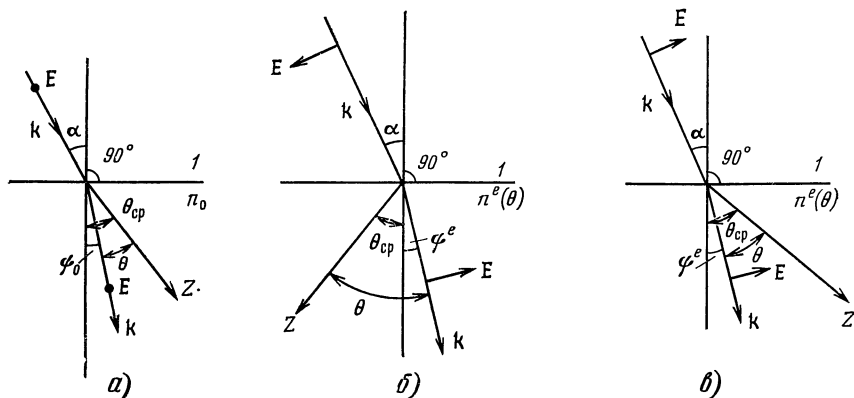


Рис. 11. Отражение и преломление волн на поверхности одноосного кристалла для волн с поляризацией, перпендикулярной главной плоскости (а), и с поляризацией, лежащей в главной плоскости (б, в)

\mathbf{k} и ось z лежат по разные стороны от нормали к плоскости падения (рис. 11,б), а минус — когда вектор \mathbf{k} и ось z лежат по одну сторону от нормали к плоскости падения (рис. 11,в). Коэффициент отражения равен

$$R^e = \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha - \psi^e)}{\operatorname{tg}^2(\alpha + \psi^e)}.$$

В случае нормального падения ($\alpha = \psi^e = 0$)

$$R_{\alpha=0}^e = \left[\frac{n^e(\theta) - 1}{n^e(\theta) + 1} \right]^2;$$

$$n^e(\theta) = n^e(\theta_{cp}) = n_o \sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \theta_{cp}}{1 + (n_o/n_e)^2 \operatorname{tg}^2 \theta_{cp}}}.$$

Коэффициенты отражения света на входной и выходной гранях одноосного кристалла, как и в случае изотропного диэлектрика, одинаковы.

Приведенные формулы применяются при расчете внешних углов поворота одноосных нелинейных кристаллов при угловой настройке на синхронизм и позволяют оценить потери на отражение.

1.7. Оптика двухосных кристаллов. Расчет углов синхронизма

Для двухосных кристаллов двухполостная поверхность зависимости показателя преломления от направления и поляризации света имеет существенно более сложную форму, чем для одноосных. Она содержит четыре точки «встречи», через которые проходят две оптические оси [6*].

Ограничимся для простоты наиболее часто используемым на практике случаем распространения излучения в координатных плоскостях XZ , YZ и XY . В этих плоскостях зависимости показателя преломления от направления распространения для двух волн с взаимно перпендикулярными поляризациями представляют собой комбинацию эллипса и окружности (рис. 12,а,б). Соотнесе-

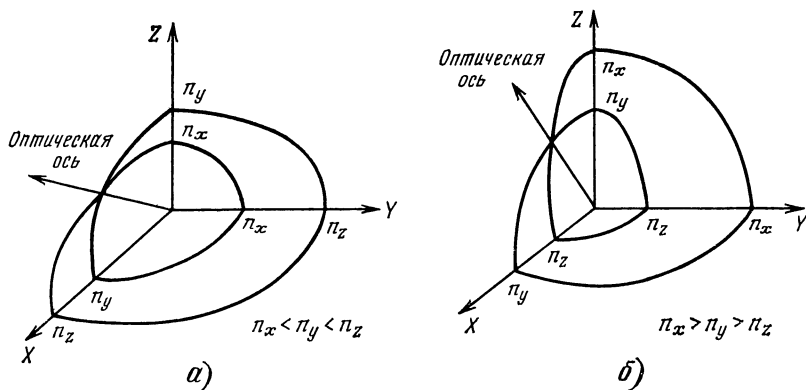


Рис. 12. Индикатрисы показателей преломления в двухосном кристалле

ние кристаллофизических (X, Y, Z) и кристаллографических (a, b, c) осей в двухосном кристалле произведем таким образом, чтобы оптические оси, направление которых задается точками пересечения эллипса и окружности, лежали бы в плоскости XZ .

Рассмотрим один из двух возможных случаев: $n_X < n_Y < n_Z$ (рис. 12,а), где n_X, n_Y, n_Z — главные значения показателей преломления. Угол V_Z , образуемый одной из оптических осей с осью Z , находится из выражения

$$\sin V_Z = \frac{n_Z}{n_Y} \sqrt{\frac{n_Y^2 - n_X^2}{n_Z^2 - n_X^2}}.$$

В плоскости XY для волны, поляризованной перпендикулярно данной плоскости, показатель преломления постоянен и равен n_Z , а для волны, поляризованной в данной плоскости, показатель преломления меняется от n_Y до n_X при изменении угла φ от 0° до 90° . Отсюда видно, что двухосный кристалл с $n_X < n_Y < n_Z$ в плоскости XY подобен отрицательному одноосному с $n_o = n_Z$ и

$$n^e = n_Y \sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}{1 + (n_Y/n_X)^2 \operatorname{tg}^2 \varphi}}.$$

В плоскости YZ для волны, поляризованной перпендикулярно этой плоскости, показатель преломления постоянен и равен n_X , в то время как для волны, поляризованной в этой плоскости, показатель преломления меняется от n_Y до n_Z при изменении угла от 0° до 90° . Отсюда следует, что двухосный кристалл с $n_X < n_Y < n_Z$ в плоскости YZ подобен положительному одноосному с $n_o = n_X$ и

$$n^e = n_Y \sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \theta}{1 + (n_Y/n_Z)^2 \operatorname{tg}^2 \theta}}.$$

Аналогично можно убедиться, что в плоскости XZ при $\theta > V_Z$ двухосный кристалл с $n_X < n_Y < n_Z$ подобен положительному одноосному кристаллу, а при $\theta < V_Z$ — отрицательному одноосному кристаллу.

Совершенно также проводится рассмотрение двухосного кристалла с $n_X > n_Y > n_Z$ (рис. 12,б). Отметим, что в этом случае угол V_Z между оптической осью и осью Z дается выражением

$$\cos V_Z = \frac{n_X}{n_Y} \sqrt{\frac{n_Y^2 - n_Z^2}{n_X^2 - n_Z^2}}.$$

Двухосный кристалл называется оптически положительным, если биссектриса острого угла между оптическими осями совпадает с n_{\max} и оптически отрицательным, если с n_{\min} .

В табл. 2 приведены формулы для расчета углов синхронизма θ (или φ) при коллинеарном распространении взаимодействующих волн в координатных плоскостях двухосного кристалла; всюду $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ [8*].

Общий подход к расчету углов синхронизма в двухосных кристаллах дан в [9*, 10*].

Формулы для расчета углов синхронизма в двухосных кристаллах при распространении излучения
в главных плоскостях

Главная плоскость	Тип взаимодействия	Формулы	Обозначения
XY	ооо	$\operatorname{tg}^2 \varphi = \frac{1-U}{W-1}$	а) $n_Z > n_Y > n_X$
	еоо	$\operatorname{tg}^2 \varphi \approx \frac{1-U}{W-R}$	
YZ	еоо	$\operatorname{tg}^2 \theta \approx \frac{1-U}{U-S}$	
	оео	$\operatorname{tg}^2 \theta = \frac{1-V}{V-Y}$	
	еоо	$\operatorname{tg}^2 \theta = \frac{1-T}{T-Z}$	

$$U = \left(\frac{A+B}{C} \right)^2, W = \left(\frac{A+B}{F} \right)^2, A = \frac{n_{Z1}}{\lambda_1}, B = \frac{n_{Z2}}{\lambda_3}, C = \frac{n_{Y3}}{\lambda_3}, F = \frac{n_{X3}}{\lambda_3}$$

$$U = \left(\frac{A+B}{C} \right)^2, W = \left(\frac{A+B}{F} \right)^2, R = \left(\frac{A+B}{D+B} \right)^2, A = \frac{n_{Y1}}{\lambda_1}, B = \frac{n_{Z2}}{\lambda_3},$$

$$C = \frac{n_{Y3}}{\lambda_3}, D = \frac{n_{X1}}{\lambda_1}, F = \frac{n_{X3}}{\lambda_3}$$

$$U = \left(\frac{A+B}{C} \right)^2, W = \left(\frac{A+B}{F} \right)^2, Q = \left(\frac{A+B}{A+E} \right)^2, A = \frac{n_{Z1}}{\lambda_1}, B = \frac{n_{Y2}}{\lambda_2},$$

$$C = \frac{n_{Y3}}{\lambda_3}, E = \frac{n_{X2}}{\lambda_2}, F = \frac{n_{X3}}{\lambda_3}$$

$$U = \left(\frac{A+B}{C} \right)^2, S = \left(\frac{A+B}{D+E} \right)^2, A = \frac{n_{Y1}}{\lambda_1}, B = \frac{n_{Y2}}{\lambda_2}, C = \frac{n_{X3}}{\lambda_3}, D = \frac{n_{Z1}}{\lambda_1}, E = \frac{n_{Z2}}{\lambda_3}$$

$$V = \left(\frac{B}{C-A} \right)^2, Y = \left(\frac{B}{E} \right)^2, A = \frac{n_{X1}}{\lambda_1}, B = \frac{n_{Y2}}{\lambda_2}, C = \frac{n_{X3}}{\lambda_3}, E = \frac{n_{Z2}}{\lambda_2}$$

$$T = \left(\frac{A}{C-B} \right)^2, Z = \left(\frac{A}{D} \right)^2, A = \frac{n_{Y1}}{\lambda_1}, B = \frac{n_{X2}}{\lambda_2}, C = \frac{n_{X3}}{\lambda_3}, D = \frac{n_{Z1}}{\lambda_1}$$

Главная плоскость	Тип взаим. моделирования	Формулы	Обозначения
XZ $\theta < V_z$	ooo	$\operatorname{tg}^2 \theta = \frac{1-U}{W-1}$	$U = \left(\frac{A+B}{C} \right)^2, W = \left(\frac{A+B}{F} \right)^2, A = \frac{n_{Y1}}{\lambda_1}, B = \frac{n_{Y2}}{\lambda_2}, C = \frac{n_{X3}}{\lambda_3}, F = \frac{n_{Z3}}{\lambda_3}$
	eoe	$\operatorname{tg}^2 \theta \approx \frac{1-U}{W-R}$	$U = \left(\frac{A+B}{C} \right)^2, W = \left(\frac{A+B}{F} \right)^2, R = \left(\frac{A+B}{D+B} \right)^2, A = \frac{n_{X1}}{\lambda_1}, B = \frac{n_{Y2}}{\lambda_2}, C = \frac{n_{X3}}{\lambda_3}, D = \frac{n_{Z1}}{\lambda_1}, F = \frac{n_{Z3}}{\lambda_3}$
	oeo	$\operatorname{tg}^2 \theta \approx \frac{1-U}{W-Q}$	$U = \left(\frac{A+B}{C} \right)^2, W = \left(\frac{A+B}{F} \right)^2, Q = \left(\frac{A+B}{A+E} \right)^2, A = \frac{n_{Y1}}{\lambda_1}, B = \frac{n_{X2}}{\lambda_2}, C = \frac{n_{X3}}{\lambda_3}, E = \frac{n_{X2}}{\lambda_2}, F = \frac{n_{Z3}}{\lambda_3}$
	ooo		
	ooo		
XZ $\theta > V_z$	eeo	$\operatorname{tg}^2 \theta \approx \frac{1-U}{U-S}$	$U = \left(\frac{A+B}{C} \right)^2, S = \left(\frac{A+B}{D+E} \right)^2, A = \frac{n_{X1}}{\lambda_1}, B = \frac{n_{X2}}{\lambda_2}, C = \frac{n_{Y3}}{\lambda_3}, D = \frac{n_{Z1}}{\lambda_1}, E = \frac{n_{Z2}}{\lambda_2}$
	oeo	$\operatorname{tg}^2 \theta = \frac{1-V}{V-Y}$	$V = \left(\frac{B}{C-A} \right)^2, Y = \left(\frac{B}{E} \right)^2, A = \frac{n_{Y1}}{\lambda_1}, B = \frac{n_{X2}}{\lambda_2}, C = \frac{n_{Y3}}{\lambda_3}, E = \frac{n_{Z2}}{\lambda_2}$
	ooo	$\operatorname{tg}^2 \theta = \frac{1-T}{T-Z}$	$T = \left(\frac{A}{C-B} \right)^2, Z = \left(\frac{A}{D} \right)^2, A = \frac{n_{X1}}{\lambda_1}, B = \frac{n_{Y2}}{\lambda_2}, C = \frac{n_{Y3}}{\lambda_3}, D = \frac{n_{Z1}}{\lambda_1}$

Главная плоскость	Тип взаимодействия	Формулы	Обозначения
XY	еео	$\operatorname{tg}^2 \varphi \approx \frac{1-U}{U-S}$	б) $n_X > n_Y > n_Z$ $U = \left(\frac{A+B}{C} \right)^2$, $S = \left(\frac{A+B}{D+E} \right)^2$, $A = \frac{n_{Y1}}{\lambda_1}$, $B = \frac{n_{Y2}}{\lambda_2}$, $C = \frac{n_{Z3}}{\lambda_3}$, $D = \frac{n_{X1}}{\lambda_1}$, $E = \frac{n_{X2}}{\lambda_2}$
	оео	$\operatorname{tg}^2 \varphi = \frac{1-V}{V-Y}$	$V = \left(\frac{B}{C-A} \right)^2$, $Y = \left(\frac{B}{E} \right)^2$, $A = \frac{n_{Z1}}{\lambda_1}$, $B = \frac{n_{Y2}}{\lambda_2}$, $C = \frac{n_{Z3}}{\lambda_3}$, $E = \frac{n_{X2}}{\lambda_2}$
	еоо	$\operatorname{tg}^2 \varphi = \frac{1-T}{T-Z}$	$T = \left(\frac{A}{C-B} \right)^2$, $Z = \left(\frac{A}{D} \right)^2$, $A = \frac{n_{Y1}}{\lambda_1}$, $B = \frac{n_{Z2}}{\lambda_2}$, $C = \frac{n_{Z3}}{\lambda_3}$, $D = \frac{n_{X1}}{\lambda_1}$
	ооо	$\operatorname{tg}^2 \theta = \frac{1-U}{W-1}$	$U = \left(\frac{A+B}{C} \right)^2$, $W = \left(\frac{A+B}{F} \right)^2$, $A = \frac{n_{X1}}{\lambda_1}$, $B = \frac{n_{X2}}{\lambda_2}$, $C = \frac{n_{Y3}}{\lambda_3}$, $F = \frac{n_{Z3}}{\lambda_3}$
YZ	еоо	$\operatorname{tg}^2 \theta \approx \frac{1-U}{W-R}$	$U = \left(\frac{A+B}{C} \right)^2$, $W = \left(\frac{A+B}{F} \right)^2$, $R = \left(\frac{A+B}{D+B} \right)^2$, $A = \frac{n_{Y1}}{\lambda_1}$, $B = \frac{n_{X2}}{\lambda_2}$, $C = \frac{n_{Y3}}{\lambda_3}$, $D = \frac{n_{Z1}}{\lambda_1}$, $F = \frac{n_{Z3}}{\lambda_3}$
	ооо	$\operatorname{tg}^2 \theta \approx \frac{1-U}{W-Q}$	$U = \left(\frac{A+B}{C} \right)^2$, $W = \left(\frac{A+B}{F} \right)^2$, $Q = \left(\frac{A+B}{A+E} \right)^2$, $A = \frac{n_{X1}}{\lambda_1}$, $B = \frac{n_{Y2}}{\lambda_2}$, $C = \frac{n_{Y3}}{\lambda_3}$, $E = \frac{n_{Z2}}{\lambda_2}$, $F = \frac{n_{Z3}}{\lambda_3}$

Главная плоскость	Тип взаимодействия	Формулы	Обозначения
XZ $\theta < V_z$	eeo	$\operatorname{tg}^2 \theta \approx \frac{1-U}{U-S}$	$U = \left(\frac{A+B}{C} \right)^2, S = \left(\frac{A+B}{D+E} \right)^2, A = \frac{n_{X1}}{\lambda_1}, B = \frac{n_{X2}}{\lambda_2}, C = \frac{n_{Y3}}{\lambda_3}, D = \frac{n_{Z1}}{\lambda_1},$ $E = \frac{n_{Z2}}{\lambda_3}$
	o eo	$\operatorname{tg}^2 \theta = \frac{1-V}{V-Y}$	$V = \left(\frac{B}{C-A} \right)^2, Y = \left(\frac{B}{E} \right)^2, A = \frac{n_{Y1}}{\lambda_1}, B = \frac{n_{X2}}{\lambda_2}, C = \frac{n_{Y3}}{\lambda_3}, E = \frac{n_{Z2}}{\lambda_3}$
	eo o	$\operatorname{tg}^2 \theta = \frac{1-T}{T-Z}$	$T = \left(\frac{A}{C-B} \right)^2, Z = \left(\frac{A}{D} \right)^2, A = \frac{n_{X1}}{\lambda_1}, B = \frac{n_{Y2}}{\lambda_2}, C = \frac{n_{Y3}}{\lambda_3}, D = \frac{n_{Z1}}{\lambda_1}$
XZ $\theta > V_z$	ooo	$\operatorname{tg}^2 \theta = \frac{1-U}{W-1}$	$U = \left(\frac{A+B}{C} \right)^2, W = \left(\frac{A+B}{F} \right)^2, A = \frac{n_{Y1}}{\lambda_1}, B = \frac{n_{Y2}}{\lambda_2}, C = \frac{n_{X3}}{\lambda_3}, F = \frac{n_{Z3}}{\lambda_3}$
	eo e	$\operatorname{tg}^2 \theta \approx \frac{1-U}{W-R}$	$U = \left(\frac{A+B}{C} \right)^2, W = \left(\frac{A+B}{F} \right)^2, R = \left(\frac{A+B}{D+B} \right)^2, A = \frac{n_{X1}}{\lambda_1}, B = \frac{n_{Y2}}{\lambda_3},$ $C = \frac{n_{X3}}{\lambda_3}, D = \frac{n_{Z1}}{\lambda_1}, F = \frac{n_{Z3}}{\lambda_3}$
	o ee	$\operatorname{tg}^2 \theta \approx \frac{1-U}{W-Q}$	$U = \left(\frac{A+B}{C} \right)^2, W = \left(\frac{A+B}{F} \right)^2, Q = \left(\frac{A+B}{A+E} \right)^2, A = \frac{n_{Y1}}{\lambda_1}, B = \frac{n_{X2}}{\lambda_3},$ $C = \frac{n_{X3}}{\lambda_3}, E = \frac{n_{Z2}}{\lambda_2}, F = \frac{n_{Z3}}{\lambda_3}$

1.8. Симметрия кристаллов и эффективные нелинейности

Для анизотропных сред коэффициенты κ_0 и $\chi^{(2)}$ в выражении (1) в общем случае являются тензорами второго и третьего рангов соответственно. В кристаллографических осях X, Y, Z , где Z — оптическая ось одноосного кристалла, тензор κ_0 и связанный с ним тензор ϵ_0 диагональны. Ненулевыми компонентами тензора ϵ_0 являются

$$\epsilon_{0\,XX} = \epsilon_{0\,YY} = n_o^2; \quad \epsilon_{0\,ZZ} = n_e^2.$$

На практике вместо тензора χ_{ijk} используется тензор d_{ijk} , причем оба тензора связаны соотношением $\chi_{ijk} = 2d_{ijk}$.

В отличие от тензора ϵ_0 , тензоры χ и d могут быть представлены только в трехмерном изображении. Обычно используется «плоская» (двумерная) запись тензора d_{ijk} в виде d_{il} , где $i = 1 \rightarrow X, 2 \rightarrow Y, 3 \rightarrow Z$, а l пробегает значения: $1 \rightarrow XX; 2 \rightarrow YY; 3 \rightarrow ZZ; 4 \rightarrow YZ = ZY; 5 \rightarrow XZ = ZX; 6 \rightarrow XY = YX$.

В этом случае соотношение (1) можно переписать в сокращенном виде (по компонентам)

$$P_i = \kappa_{0\,ih} E_h + 2d_{il} E_l^2 + \dots,$$

где E_l^2 — шестимерный вектор произведений полей (предполагается суммирование по повторяющимся индексам). Для ГВГ в матричной форме

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11}d_{12}d_{13}d_{14}d_{15}d_{16} \\ d_{21}d_{22}d_{23}d_{24}d_{25}d_{26} \\ d_{31}d_{32}d_{33}d_{34}d_{35}d_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_X^2 \\ E_Y^2 \\ E_Z^2 \\ 2E_Y E_Z \\ 2E_X E_Z \\ 2E_X E_Y \end{pmatrix}.$$

Полное число компонентов тензора квадратичной нелинейности d_{il} равно 18. В centrosymmetric кристаллах (элемент симметрии — центр) все компоненты тензора квадратичной нелинейности d_{il} равны нулю. Нецентросимметричные кристаллы, представленные 21 кристаллографическим классом из 32, почти всегда имеют один или большее число элементов симметрии (ось, плоскости различного порядка), что приводит на практике к значительному уменьшению числа независимых компонентов тензора d_{il} .

Клейнманом [11*] были установлены дополнительные условия симметрии, справедливые в случае отсутствия дисперсии электронной нелинейной поляризованности.

При выполнении этих условий (а они выполняются в большинстве практических случаев) число независимо определяемых ком-

полюсов тензора d_{il} в самом общем случае уменьшается с 18 до 10, так как

$$d_{21}=d_{16}; \quad d_{24}=d_{32};$$

$$d_{31}=d_{15}; \quad d_{13}=d_{35};$$

$$d_{12}=d_{26}; \quad d_{32}=d_{24};$$

$$d_{14}=d_{36}=d_{25}.$$

Поскольку любую линейно поляризованную волну в одноосном кристалле можно разложить на волны с «обыкновенной» и «необыкновенной» поляризациями, полезно привести компоненты единичного вектора \mathbf{p} с полярными координатами θ , φ по осям кристалла X , Y , Z (Z — оптическая ось, $|\mathbf{p}|=1$):

$$p_x^e = \cos \theta \cos \varphi; \quad p_{0x} = -\sin \varphi;$$

$$p_y^e = \cos \theta \sin \varphi; \quad p_{0y} = \cos \varphi; \quad (4)$$

$$p_z^e = -\sin \theta; \quad p_{0z} = 0.$$

Т а б л и ц а 3

Выражения для $d_{\alpha\beta}$ нелинейных кристаллов различных классов симметрии при выполнении условий Клеймана

Класс симметрии	Координатная плоскость	Тип взаимодействия	
		ооо, оео, еео	еео, еое, оее
2 $Y \parallel b$	XY	$d_{23} \cos \varphi$	$d_{36} \sin 2\varphi$
	YZ	$d_{21} \cos \theta$	$d_{36} \sin 2\theta$
	XZ		$d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta - d_{36} \sin 2\theta$
m $Y \parallel b$	XY	$d_{13} \sin \varphi$	$d_{31} \sin^2 \varphi + d_{32} \cos^2 \varphi$
	YZ	$d_{31} \sin \theta$	$d_{13} \sin^2 \theta + d_{12} \cos^2 \theta$
	XZ	$d_{12} \cos \theta - d_{32} \sin \theta$	0
$mm2$ $X \parallel a$	XY	0	$d_{31} \sin^2 \varphi + d_{32} \cos^2 \varphi$
	YZ	$d_{31} \sin \theta$	0
	XZ	$d_{32} \sin \theta$	0
222 $Y \parallel b$	XY	0	$d_{36} \sin 2\varphi$
	YZ	0	$d_{36} \sin 2\theta$
	XZ		$d_{36} \sin 2\theta$
6, 4, $6mm$, $4mm$		$d_{15} \sin \theta$	0
$\bar{6}m2$		$d_{22} \cos \theta \sin 3\varphi$	$d_{22} \cos^2 \theta \cos \varphi$
$3m$		$d_{15} \sin \theta - d_{22} \cos \theta \sin 3\varphi$	$d_{22} \cos^2 \theta \cos 3\varphi$
$\bar{6}$		$\cos \theta (d_{11} \cos 3\varphi - d_{22} \sin 3\varphi)$	$\cos^2 \theta (d_{11} \sin 3\varphi + d_{22} \cos 3\varphi)$
3		$d_{15} \sin \theta + \cos \theta (d_{11} \cos 3\varphi - d_{22} \sin 3\varphi)$	$\cos^2 \theta (d_{11} \sin 3\varphi + d_{22} \cos 3\varphi)$
32		$d_{11} \cos \theta \cos 3\varphi$	$d_{11} \cos^2 \theta \sin 3\varphi$
$\bar{4}$		$\sin \theta (d_{14} \sin 2\varphi + d_{15} \cos 2\varphi)$	$\sin 2\theta (d_{14} \cos 2\varphi - d_{15} \sin 2\varphi)$
$\bar{4} 2m$		$d_{36} \sin \theta \sin 2\varphi$	$d_{36} \sin 2\theta \cos 2\varphi$

В уравнениях для расчета эффективности преобразования используются коэффициенты эффективной нелинейности, содержащие все операции суммирования по направлениям поляризаций взаимодействующих волн:

$$d_{эф} = p_1 dp_3 p_2 = p_2 dp_3 p_1 = p_3 dp_1 p_2. \quad (5).$$

Величина $d_{эф}$ представляет собой скалярное произведение первого вектора в выражении (4) на тензорно-векторное произведение вида dpp , которое тоже есть вектор. В зависимости от типа синхронизма (ооо, оое и т. д.) с помощью (4) вычисляются компоненты векторов p_i и по известным из векторной алгебры правилам определяется произведение (5). В табл. 3 приведены найденные таким методом значения $d_{эф}$ для двухосных кристаллов 4 классов симметрии и для одноосных кристаллов 11 классов симметрии [3*, 12*].

1.9. Расчет эффективности нелинейных преобразователей частоты

Исходным является волновое уравнение, получаемое непосредственно из уравнений Максвелла [1*—4*]:

$$\left(\text{rot rot} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + \frac{\varepsilon_0}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = -\frac{4\pi}{c} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{P}_{\text{нел}}(\mathbf{r}, t) \quad (6)$$

совместно с выражением (1) для нелинейной поляризованности (ограничимся квадратичным приближением)

$$\mathbf{P}_{\text{нел}}(\mathbf{r}, t) = \chi^{(2)} \mathbf{E}^2(\mathbf{r}, t) \quad (7)$$

и начальными, и граничными условиями для поля $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$.

В выражении (6) \mathbf{r} — радиус-вектор; t — время; c — скорость света. Представим поле \mathbf{E} в виде суперпозиции трех взаимодействующих волн

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^3 \{ p_n A_n(\mathbf{r}, t) \exp j(\omega_n t - \mathbf{k}_n \mathbf{r}) + \text{К. С.} \}, \quad (8)$$

где $A_n(\mathbf{r}, t)$ — комплексные амплитуды волн; ω_n и \mathbf{k}_n — частоты и волновые векторы волн; К. С. означает комплексное сопряжение. Подстановка (8) в (6) с учетом (7) и использованием метода медленно меняющихся амплитуд приводит к укороченным уравнениям для комплексных амплитуд [4*]:

$$\hat{M}_1 A_1 = -j \sigma_1 A_3 A_2^* \exp(j \Delta k z); \quad (9)$$

$$\hat{M}_2 A_2 = -j \sigma_2 A_3 A_1^* \exp(j \Delta k z); \quad (10)$$

$$\hat{M}_3 A_3 = -j \sigma_3 A_1 A_2 \exp(-j \Delta k z), \quad (11)$$

где оператор \hat{M}_n имеет вид:

$$\begin{aligned} \hat{M}_n = & \frac{\partial}{\partial z} + \rho_n \frac{\partial}{\partial x} + \frac{j}{2k_n} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + \\ & + \frac{1}{u_n} \frac{\partial}{\partial t} + j g_n \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \delta_n + Q_n(A). \end{aligned} \quad (12)$$

Расчет ведется в декартовых координатах x, y, z , где z — направление распространения (не путать с осями кристалла X, Y, Z). В формулах (9)–(12) ρ_n — углы двулучепреломления (анизотропии, сноса), причем «снос» необыкновенного луча предполагается в плоскости xz ; σ_n — коэффициенты нелинейной связи; u_n — групповые скорости; g_n — коэффициенты дисперсионного распывания; Δk — суммарная волновая расстройка; δ_n — коэффициенты линейного поглощения; $Q_n(A)$ учитывает нелинейное (как правильно, двухфотонное) поглощение. Имеют место соотношения:

$$\sigma_{1,2} = 4\pi k_{1,2} n_{1,2}^{-2} \mathbf{p}_{1,2} d\mathbf{p}_{2,1} \mathbf{p}_3; \quad (13)$$

$$\sigma_3 = 2\pi k_3 n_3^{-2} \mathbf{p}_3 d\mathbf{p}_1 \mathbf{p}_2; \quad (14)$$

$$\delta_n = k_n (2n^2 n)^{-1} \mathbf{p}_n [\text{Im } \varepsilon_0(\omega_n)] \mathbf{p}_n, \quad n = 1, 2, 3; \quad (15)$$

$$g_n = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} \right)_{\omega=\omega_n}; \quad (16)$$

$$u_n = \left(\frac{\partial k}{\partial \omega} \right)_{\omega=\omega_n}^{-1} = c \left[\frac{\partial (n_n \cdot \omega)}{\partial \omega} \right]_{\omega=\omega_n}^{-1} = c \left[n_n + \omega_n \left(\frac{dn}{d\omega} \right)_{\omega=\omega_n} \right]^{-1}.$$

В формуле (15) $\text{Im } \varepsilon_0(\omega_n)$ — мнимая часть тензора линейной диэлектрической поляризуемости, отвечающая за линейное поглощение излучения. Порядок записи векторов и тензоров в (13)–(15) нарушать нельзя. Наконец,

$$\Delta k = \Delta k_{\text{лин}} + \Delta k_{\text{т.с}} + \Delta k_{\text{ф.п}} + \Delta k_{\text{г.с.н}}, \quad (17)$$

где $\Delta k_{\text{лин}}$ — «линейная» волновая расстройка:

$$\Delta k_{\text{лин}} = |\Delta \mathbf{k}|_z = |\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3|_z;$$

$\Delta k_{\text{т.с}}$ — расстройка вследствие тепловых самовоздействий в нелинейном кристалле; $\Delta k_{\text{ф.п}}$ — расстройка, обусловленная фотопреломлением (фоторефрактивным эффектом); $\Delta k_{\text{г.с.н}}$ — расстройка, обусловленная генерацией свободных носителей в зоне проводимости вследствие нелинейного поглощения. Тепловая расстройка входит в уравнение теплопроводности, которое для установившегося (по теплу) случая имеет вид:

$$\nabla_r^2 \Delta k_{\text{т.с}}(r, z) = -c P_{\text{кр}}^{-1} \sum_{n=1}^3 \delta_n n_n \bar{a}_n^2(r, z), \quad (18)$$

где ∇_r^2 — оператор Лапласа по поперечным координатам $r = (x, y)$, $P_{\text{кр}}$ — критическая мощность самофокусировки, равная

$$P_{\text{кр}} = \gamma \lambda_1 \left[4L \left(\frac{\partial B}{\partial T} \right)_{T=T_0} \right]^{-1}; \quad (19)$$

B — так называемое дисперсионное двулучепреломление (для ГВГ $B = n_{e3} - n_{o1}$); T — температура; T_0 — температура кристалла, при которой ось z (нормаль к поверхности кристалла) совпадает с направлением синхронизма; γ — коэффициент теплопроводности

кристалла; L — его длина. Средний квадрат вещественных амплитуд $a_n = |A_n|$ равен

$$\bar{a}_n^2(r, z) = f \int_{-\infty}^{\infty} a_n^2(r, z, t) dt,$$

где f — частота повторения импульсов основного излучения.

Появление тепловой расстройки физически связано с неоднородным (по сечению) нагревом нелинейного кристалла излучением. Уравнение теплопроводности (18) следует решать совместно с соответствующими граничными условиями и с укороченными уравнениями (9) — (11). При наличии нелинейного поглощения в кристалле ($Q_n \neq 0$) оно должно быть учтено не столько в укороченных уравнениях, сколько в величине δ_n .

Для случая ГВГ ($a_1 = a_2$) см. [4*]:

$$Q_1 = \beta_{12} a^2 z; \quad Q_2 = 2\beta_{12} a^2 z + \beta_{22} a^2 z,$$

где β_{12} и β_{22} — коэффициенты смешанного ($\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 > E_g$) и двухфотонного ($2\hbar\omega_3 > E_g$) нелинейного поглощений (E_g — ширина запрещенной зоны кристалла). Отметим, что при значительном нелинейном (как правило, двухфотонном) поглощении на наибольшей (суммарной) частоте ω_3 начинает сказываться неравенство суммарных (линейного и нелинейного) поглощений на частотах $\omega_{1,2}$ и ω_3 , что может привести к несимметрии и даже гистерезису температурной зависимости мощности преобразованного излучения (вблизи температуры синхронизма).

Фотопреломление (фоторефрактивный эффект) возникает в ряде нелинейных кристаллов (типа ниобата лития) и состоит в наведении излучением в кристалле изменения коэффициента преломления. Для непрерывного излучения при плотности мощности S_3 на частоте ω_3 , превышающей, например, для ниобата лития 200 Вт/см^2 , $\Delta B = \Delta(n_o - n_e) \approx 10^{-3}$. Для импульсных лазеров при плотностях мощности S_3 на частоте ω_3 , не превышающих 10^8 Вт/см^2 , $\Delta B \simeq \beta \sqrt{S_3}$, где для ниобата лития $\beta = 6 \cdot 10^{-9} \text{ см} \cdot \text{МВт}^{-1/2}$ (при $S_3 = 10^8 \text{ Вт/см}^2$ реализуется $\Delta B \simeq 10^{-4}$). При малых ΔB величину $\Delta k_{\text{ф.п}}$ можно скомпенсировать за счет $\Delta k_{\text{лин}}$, т. е. за счет отстройки нелинейного кристалла от направления синхронизма (на практике это удается сделать всегда). Следует учитывать, что фотопреломление может привести к окрашиванию кристалла, возрастанию поглощения и роли эффектов тепловых самовоздействий.

Процесс нелинейного поглощения сопровождается переходами электронов из валентной зоны в зону проводимости, т. е. генерацией свободных носителей (ГСН). Эффект ГСН приводит, в свою очередь, к двум эффектам: дополнительному поглощению излучений на всех трех частотах (поглощение на свободных носителях) и дополнительной волновой расстройке, пропорциональной квадрату плотности мощности (четвертой степени амплитуды) двухфотонно-поглощаемого излучения (т. е., как правило, излучения на наибольшей частоте): $\Delta k_{\text{г.с.н}} = -qa^4 z$, где q — коэффициент, зависящий от параметров нелинейного поглощения, време-

ни жизни свободных носителей и т. д. Эффект ГСН следует учитывать при использовании кристаллов типа ниобатов лития и бария—натрия; при этом поглощением на свободных носителях на всех трех частотах можно пренебречь, оставляя в уравнениях расстройку $\Delta k_{\text{ГСН}}$.

Возвратимся к оператору \hat{M}_n вида (12). Первый его член — производная по z — описывает изменения амплитуд в процессе их распространения и взаимодействия. Второй его член — с производной по x — описывает влияние анизотропии кристалла (снос необыкновенного луча по оси x). Третий член, содержащий вторые производные по поперечным координатам x, y , соответствует эффекту дифракции (диффузионного распылывания пучка). Четвертый член (производная по времени) описывает влияние временной модуляции (импульсный режим), в том числе эффект группового запаздывания импульсов. Член со второй производной по времени соответствует эффекту дисперсионного распылывания импульсов. Члены δ_n и $Q_n(A)$ описывают линейное и нелинейное поглощения соответственно.

Правые части укороченных уравнений (9)—(11) описывают нелинейное взаимодействие волн.

Методика расчета эффективности нелинейных преобразователей частоты. Точный расчет эффективности преобразователей, использующих ГВГ, ГСЧ, ГРЧ по уравнениям (9)—(11), весьма сложен и, как правило, возможен только с помощью ЭВМ. Лишь в некоторых простейших случаях используются аналитические решения, позволяющие произвести грубые оценки эффективности преобразования, однако пользоваться ими надо с известной осторожностью. Для правильной оценки эффективности следует ясно представлять себе параметры как исходного (преобразуемого) излучения, так и кристалла-преобразователя, после чего на основании нижеприведенных рекомендаций следует выбрать адекватный математический метод расчета.

Введем следующие эффективные длины процесса взаимодействия:

апертурная длина L_a :

$$L_a = d_0 \rho^{-1}, \quad (20)$$

где d_0 — характерный диаметр луча; ρ — угол анизотропии (сноса); квазистатическая длина взаимодействия $L_{\text{КВ}}$:

$$L_{\text{КВ}} = \tau \nu^{-1}, \quad (21)$$

где τ — длительность импульсов излучения; ν — расстройка обратных групповых скоростей; для случая ГВГ

$$\nu = u_1^{-1} - u_3^{-1}, \quad (22)$$

где u_1, u_3 — групповые скорости на соответствующих длинах волн; дифракционная длина $L_{\text{диф}}$:

$$L_{\text{диф}} = k d^2_0; \quad (23)$$

длина дисперсионного расплывания $L_{\text{дис}}$:

$$L_{\text{дис}} = \tau^2 g^{-1}, \quad (24)$$

где g — коэффициент дисперсионного расплывания (16).

Особо вводится длина нелинейного взаимодействия $L_{\text{нел}}$:

$$L_{\text{нел}} = (\sigma a_0)^{-1}, \quad (25)$$

где σ — коэффициент нелинейной связи (13), (14); a_0 находится по формуле:

$$a_0 = (a^2_1(0) + a^2_2(0) + a^2_3(0))^{1/2};$$

$a_i(0)$ — амплитуды волн на входе кристалла (при $z=0$).

Необходимость учета того или иного эффекта в математическом описании процесса нелинейного преобразования определяется сравнением длины кристалла L с соответствующей эффективной длиной $L_{\text{эф}}$ из набора (20) — (24). При $L < L_{\text{эф}}$ соответствующим эффектом можно пренебречь. Например, при $L < L_a$ можно пренебречь влиянием анизотропии (сноса) и положить равным нулю второй член в операторе (12); при $L < L_{\text{диф}}$ можно пренебречь дифракционным расплыванием пучка и т. д.

Особо отметим роль длины нелинейного взаимодействия $L_{\text{нел}}$ (25). При выполнении условия $L < L_{\text{нел}}$ реализуется так называемое приближение заданных полей преобразуемых волн; например, для ГСЧ это означает, что амплитуда поля СЧ $a_3(z) \ll a_{1,2}(0)$, вследствие чего уравнения (9) — (11) преобразуются к линейным (по вещественным амплитудам полей $a = |A|$) уравнениям. Для амплитуды поля СЧ, в частности, имеем

$$\dot{M}_3 A_3 = -j \sigma_3 a_1(0) a_2(0) \exp j(-\Delta k z - \varphi_1 - \varphi_2),$$

где φ_i — фазы волн. При $L \gtrsim L_{\text{нел}}$ необходимо решать полные (нелинейные) уравнения.

Таким образом, перед проведением расчета необходимо:

1) вычислить все эффективные длины процесса, сравнить их с длиной нелинейного кристалла и определить эффекты, подлежащие учету; остальными эффектами пренебречь;

2) вычислить длину нелинейного взаимодействия, сравнить ее с длиной кристалла и определить, справедливо ли приближение заданных полей или нужно решать полные уравнения.

Некоторые практические рекомендации. В непрерывных режимах генерации лазерного излучения заведомо можно пренебречь запаздыванием групповых скоростей ($L_{\text{кв}} = \infty$) и тем более дисперсионным расплыванием импульса ($L_{\text{дис}} = \infty$). В реально используемых кристаллах при $L \approx 1$ см можно заведомо пренебречь: дифракцией и анизотропией для пучков сантиметрового диаметра; запаздыванием групповых скоростей при $\tau \geq 10^{-9}$ с; дисперсионным расплыванием при $\tau \geq 10^{-12}$ с; нелинейным поглощением и эффектом ГСН при $2\hbar\omega_3 < E_g$. Эффект фотопреломления при расчетах можно не учитывать, поскольку $\Delta k_{\text{фп}}$ на практике легко компенсируется заворотом кристалла (в кристаллах ниобата лития эффект фотопреломления полностью исчезает при $T_0 \geq 170^\circ\text{C}$).

Дифракцию принципиально надо учитывать при преобразовании в сфокусированных пучках [4*], [13*]. При выполнении условия, что длина кристалла L меньше всех эффективных длин, оператор \hat{M} в формуле (12) имеет вид

$$\hat{M}_n = \delta_n + \frac{d}{dz}.$$

Если при выполнении этого условия преобразуемые излучения являются модулированными во времени (импульс длительностью τ) или по поперечным координатам (пучок диаметром d_0), а форма модуляции не является однородной (например, гауссовы пучки, гауссовы импульсы), то допускается следующий достаточно точный приближенный метод расчета.

Огибающая пучка (или импульса) преобразуемого излучения аппроксимируется ступенчатой функцией (рис. 13), причем внутри каждой «ступеньки» амплитуда поля постоянна. Для каждой такой «ступеньки», т. е. для каждого значения амплитуды поля, по формулам для плоских волн рассчитывается эффективность преобразования, после чего суммируются результаты по поперечным координатам (или, соответственно, по времени), в результате чего определяется мощность (или, соответственно, энергия) пучка (импульса) преобразованного излучения.

Тепловыми самовоздействиями (и, следовательно, уравнением теплопроводности) можно пренебречь при выполнении условия $\bar{P}_0 < P_{кр}$, где \bar{P}_0 — средняя (или непрерывная) мощность преобразуемых излучений на входе кристалла. Если выполняется обратное неравенство, необходимо совместное решение укороченных уравнений и уравнения теплопроводности. Здесь имеет место два варианта. В первом варианте отсутствует дисперсия коэффициен-

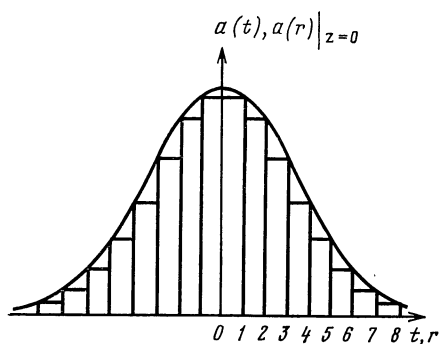


Рис. 13. Аппроксимация импульса (пучка) ступенчатой функцией для расчета эффективности преобразования в квазистатическом (для импульса) и бездифракционном (для пучка) приближениях

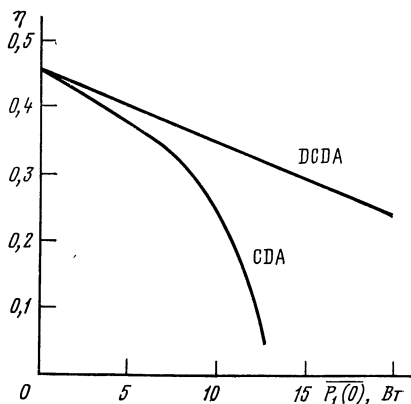


Рис. 14. Зависимость эффективности преобразования для ГВГ от средней мощности излучения на основной частоте в кристаллах CDA и DCDA длиной 3 см ($\lambda_1 = 1,06$ мкм)

тов поглощения ($\delta_1 = \delta_2 = \delta_3$), в результате чего уравнение теплопроводности расщепляется с укороченными уравнениями; если при этом тепловой контакт кристалла с внешней средой (термостатом) идеален (нет скачка температуры на границе кристалл—термостат), то для тепловой расстройки имеем

$$\Delta k_{\text{т.с}}(r) = 4\pi\gamma P^{-1}_{\text{кр}}[T(r) - T_0], \quad (26)$$

где $T(r) = T(0) - \frac{\delta \bar{P}_0}{2\pi\gamma} \left[\ln \left(2 \frac{r^2}{\omega_0^2} \right) - \text{Ei} \left(-2 \frac{r^2}{\omega_0^2} \right) + C \right]$; $T(0)$ — температура на оси пучка; ω_0 — характерный радиус пучка преобразуемого излучения; $C = 0,5772$ — постоянная Эйлера—Маскерони;

$$\text{Ei}(x) = \int_{-\infty}^x y^{-1} e^y dy$$

— интегральная показательная функция [14*].

Так, для кристалла LiNbO_3 ($\delta \approx 10^{-2} \text{ см}^{-1}$; $\gamma = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-1} \text{ К}^{-1}$) при $\bar{P}_0 \approx 10 \text{ Вт}$ перепад температур между осью кристалла и границей пучка составляет около 2К, что больше температурной ширины синхронизма (см. ниже).

Вычисленная по формуле (26) тепловая расстройка подставляется в укороченные уравнения, которые решаются для каждого значения поперечной координаты r , после чего производится суммирование по площади для вычисления мощности.

Во втором варианте, когда $\delta_{1,2} \neq \delta_3$, уравнение теплопроводности уже не расщепляется с укороченными уравнениями, и решение возможно только на ЭВМ; аналогично в случае наличия скачка температуры на границе кристалл—термостат.

На рис. 14 представлены характерные зависимости коэффициента преобразования при ГВГ от средней входной мощности излучения на основной частоте $\bar{P}_1(0)$ в широко используемых на практике кристаллах CDA и DCDA [4*]. Кардинальным способом устранения тепловых самовоздействий является уменьшение потерь в нелинейных кристаллах.

1.10. Волновая расстройка. Ширина синхронизма

В реальных источниках преобразуемых излучений и в реальных преобразователях частоты ситуация далека от идеальной: излучение не является плоской волной, т. е. немонахроматично и обладает расходимостью, а температура кристалла-преобразователя может быть нестабильной. В этих условиях для расчета преобразователя необходимо знать угловую, температурную и частотную ширину синхронизмов, соответствующую предельно допустимым расходимости, нестабильности температуры внешней среды и ширине линии преобразуемого излучения.

Величина Δk является функцией: температуры кристалла T , частот взаимодействующих волн ν_i ; отклонения от угла синхронизма $\delta\theta = \theta - \theta_c$. Зависимости Δk от этих параметров в первом

(линейном) приближении определяются первыми производными:

$$\Delta k = \Delta k(0) + \frac{\partial(\Delta k)}{\partial T} \cdot \Delta T + \frac{\partial(\Delta k)}{\partial(\delta\theta)} \cdot \delta\theta + \frac{\partial(\Delta k)}{\partial \nu_1} \cdot \Delta \nu,$$

где $\Delta k(0)$ — расстройка при выполнении синхронизма, а частные производные по одному аргументу берутся при постоянстве двух других аргументов. Очевидно, что $\Delta k(0) = 0$.

Ниже будет показано, что падение вдвое мощности преобразованного излучения (ВГ, СЧ и т. д.) имеет место при волновой расстройке $\Delta k = 0,886\pi/L$.

Это позволяет оценить угловую ($\Delta\theta$), температурную (ΔT) и частотную (спектральную) ($\Delta\nu$) ширину синхронизма:

$$\Delta\theta = 1,772\pi \left(L \frac{\partial(\Delta k)}{\partial(\delta\theta)} \right)^{-1}_{\theta=\theta_c}; \quad (27)$$

$$\Delta T = 1,772\pi \left(L \frac{\partial(\Delta k)}{\partial T} \right)^{-1}_{T=T_c}; \quad (28)$$

$$\Delta\nu = 1,772\pi \left(L \frac{\partial(\Delta k)}{\partial \nu} \right)^{-1}_{\nu=\nu_c}. \quad (29)$$

Использованные в (27) — (29) производные зависят от дисперсии коэффициентов преломления и вида (типа) синхронизма.

В табл. 4 и 5 приведены формулы для расчета угловой ширины синхронизма ($\Delta\theta$) в случаях ГВГ и ГСЧ. Формулы для ГСЧ можно использовать для вычислений и в случае ГРЧ, если при обозначении синхронизма указывать поляризацию в порядке возрастания частоты.

При наличии 90° -го синхронизма первая производная $\partial(\Delta k)/\partial(\delta\theta)$ обращается в нуль, и наибольшей становится вторая производная по отклонению от угла синхронизма. В связи с этим ширина 90° -го синхронизма равна

$$\Delta\theta(90^\circ) = 2 \sqrt{0,886\pi \left(L \frac{\partial^2(\Delta k)}{\partial(\delta\theta)^2} \right)^{-1}}. \quad (30)$$

При 90° -м синхронизме расчет угловой ширины синхронизма для ГВГ и ГСЧ следует вести по формулам табл. 6 и 7.

Температурная и спектральная ширина синхронизма рассчитываются по формулам табл. 8—12. В табл. 13—17 приведены формулы для расчета угловой и температурной перестроек синхронизма $\partial\nu/\partial\theta$ и $\partial\nu/\partial T$; эти производные характеризуют изменение частоты ν преобразуемого излучения при изменении угла или температуры соответственно. В последних семи таблицах (кроме табл. 13, 15) приведены формулы для ГСЧ, описывающие наличие источника широкополосного излучения как на λ_1 , так и на λ_2 .

Т а б л и ц а 4

Угловая ширина синхронизма $\Delta\theta$ для ГВГ

Тип взаимо- действия	Формулы для вычисления
ооо	$\frac{0,443 \lambda_1 [1 + (n_{o2}/n_{e2})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]}{L \operatorname{tg} \theta [1 - (n_{o2}/n_{e2})^2] n_2^e(\theta)}$
еое	0,886
оее	$L \operatorname{tg} \theta \left \frac{n_{e1}(\theta)}{\lambda_1} \frac{[1 - (n_{o1}/n_{e1})^2]}{[1 + (n_{o1}/n_{e1})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]} - \frac{n_2^e(\theta)}{\lambda_2} \frac{[1 - (n_{o2}/n_{e2})^2]}{[1 + (n_{o2}/n_{e2})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]} \right $
еео	$\frac{0,443 \lambda_1 [1 + (n_{o1}/n_{e1})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]}{L \operatorname{tg} \theta [1 - (n_{o1}/n_{e1})^2] n_1^e(\theta)}$
еoo	$\frac{0,886 \lambda_1 [1 + (n_{o1}/n_{e1})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]}{L \operatorname{tg} \theta [1 - (n_{o1}/n_{e1})^2] n_1^e(\theta)}$

Т а б л и ц а 5

Угловая ширина синхронизма $\Delta\theta$ для ГСЧ

Тип взаимо- действия	Формулы для вычисления
оое	$\frac{0,886 \lambda_3 [1 + (n_{o3}/n_{e3})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]}{L \operatorname{tg} \theta [1 - (n_{o3}/n_{e3})^2] n_3^e(\theta)}$
еое	0,886
оee	$L \operatorname{tg} \theta \left \frac{n_1^e(\theta)}{\lambda_1} \frac{[1 - (n_{o1}/n_{e1})^2]}{[1 + (n_{o1}/n_{e1})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]} - \frac{n_3^e(\theta)}{\lambda_3} \frac{[1 - (n_{o3}/n_{e3})^2]}{[1 + (n_{o3}/n_{e3})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]} \right $
оee	0,886
еео	$L \operatorname{tg} \theta \left \frac{n_2^e(\theta)}{\lambda_2} \frac{[1 - (n_{o2}/n_{e2})^2]}{[1 + (n_{o2}/n_{e2})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]} - \frac{n_3^e(\theta)}{\lambda_3} \frac{[1 - (n_{o3}/n_{e3})^2]}{[1 + (n_{o3}/n_{e3})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]} \right $
еео	0,886
еoo	$L \operatorname{tg} \theta \left\{ \frac{n_1^e(\theta)}{\lambda_1} \frac{[1 - (n_{o1}/n_{e1})^2]}{[1 + (n_{o1}/n_{e1})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]} + \frac{n_2^e(\theta)}{\lambda_2} \frac{[1 - (n_{o2}/n_{e2})^2]}{[1 + (n_{o2}/n_{e2})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]} \right\}$
еoo	$\frac{0,886 \lambda_1 [1 + (n_{o1}/n_{e1})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]}{L \operatorname{tg} \theta [1 - (n_{o1}/n_{e1})^2] n_1^e(\theta)}$
ioeo	$\frac{0,886 \lambda_2 [1 + (n_{o2}/n_{e2})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]}{L \operatorname{tg} \theta [1 - (n_{o2}/n_{e2})^2] n_2^e(\theta)}$

Таблица 6

Угловая ширина синхронизма $\Delta\theta$ 90°-го для ГВГ

Тип взаимод-действия	Формулы для вычисления
ооо	$2 \sqrt{\frac{0,443\lambda_1}{Ln_{e2} [1 - (n_{e2}/n_{o2})^2]}}$
еоо оое	$2 \sqrt{\frac{0,886}{L} \left \frac{n_{e1} [1 - (n_{e1}/n_{o1})^2]}{\lambda_1} - \frac{n_{e2} [1 - (n_{e2}/n_{o2})^2]}{\lambda_2} \right ^{-1}}$
еео	$2 \sqrt{\frac{0,443\lambda_1}{Ln_{e1} [1 - (n_{e1}/n_{o1})^2]}}$
еоо оео	$2 \sqrt{\frac{0,886\lambda_1}{Ln_{e1} [1 - (n_{e1}/n_{o1})^2]}}$

Таблица 7

Угловая ширина 90°-го синхронизма $\Delta\theta$ для ГСЧ

Тип взаимод-действия	Формулы для вычисления
ооо	$2 \sqrt{\frac{0,886\lambda_3}{Ln_{e3} [1 - (n_{e3}/n_{o3})^2]}}$
еоо	$2 \sqrt{\frac{0,886}{L} \left \frac{n_{e1} [1 - (n_{e1}/n_{o1})^2]}{\lambda_1} - \frac{n_{e3} [1 - (n_{e3}/n_{o3})^2]}{\lambda_3} \right ^{-1}}$
оое	$2 \sqrt{\frac{0,886}{L} \left \frac{n_{e2} [1 - (n_{e2}/n_{o2})^2]}{\lambda_2} - \frac{n_{e3} [1 - (n_{e3}/n_{o3})^2]}{\lambda_3} \right ^{-1}}$
еео	$2 \sqrt{\frac{0,886}{L} \left \frac{n_{e1} [1 - (n_{e1}/n_{o1})^2]}{\lambda_1} + \frac{n_{e2} [1 - (n_{e2}/n_{o2})^2]}{\lambda_2} \right ^{-1}}$
еоо	$2 \sqrt{\frac{0,886\lambda_1}{Ln_{e1} [1 - (n_{e1}/n_{o1})^2]}}$
оео	$2 \sqrt{\frac{0,886\lambda_2}{Ln_{e2} [1 - (n_{e2}/n_{o2})^2]}}$

Таблица 8

Температурная ширина синхронизма ΔT для ГВГ

Тип взаимодействия	Формулы для вычисления
ооо	$\frac{0,443\lambda_1}{L \left \frac{\partial n_{01}}{\partial T} - \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial T} \right }$
ооо ооо	$\frac{0,886\lambda_1}{L \left \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial T} + \frac{\partial n_{01}}{\partial T} - 2 \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial T} \right }$
еео	$\frac{0,443\lambda_1}{L \left \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial T} - \frac{\partial n_{02}}{\partial T} \right }$
ооо ооо	$\frac{0,886\lambda_1}{L \left \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial T} + \frac{\partial n_{01}}{\partial T} - 2 \frac{\partial n_{02}}{\partial T} \right }$

Таблица 9

Температурная ширина синхронизма ΔT для ГСЧ

Тип взаимодействия	Формулы для вычисления
ооо	$\frac{0,886}{L \left \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_{01}}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_{02}}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial T} \right }$
ооо	$\frac{0,886}{L \left \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_{02}}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial T} \right }$
ооо	$\frac{0,886}{L \left \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_{01}}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial T} \right }$
еео	$\frac{0,886}{L \left \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_{03}}{\partial T} \right }$
ооо	$\frac{0,886}{L \left \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_{02}}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_{03}}{\partial T} \right }$
ооо	$\frac{0,886}{L \left \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_{01}}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_{03}}{\partial T} \right }$

Спектральная ширина синхронизма $\Delta\nu_1$ для ГВГ

Тип взаимо- действия	Формулы для вычисления
ооо	$\lambda_1 L \left \frac{\partial n_{o1}}{\partial \lambda_1} - \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial \lambda_2} \right $
еоо оое	$\lambda_1 L \left \frac{\partial n_{o1}}{\partial \lambda_1} + \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial \lambda_1} - 2 \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial \lambda_2} \right $
еео	$\lambda_1 L \left \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial \lambda_1} - \frac{\partial n_{o2}}{\partial \lambda_2} \right $
еоо оео	$\lambda_1 L \left \frac{\partial n_{o1}}{\partial \lambda_1} + \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial \lambda_1} - 2 \frac{\partial n_{o2}}{\partial \lambda_2} \right $

Таблица 11

Спектральная ширина синхронизма $\Delta\nu_1$ для ГСЧ (λ_1 — широкополосное излучение, λ_2 — фиксированная длина волны)

Тип взаимо- действия	Формулы для вычисления
ооо	$L \left n_{o1} - n_3^e(\theta) - \lambda_1 \frac{\partial n_{o1}}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial \lambda_3} \right $
еоо	$L \left n_1^e(\theta) - n_3^e(\theta) - \lambda_1 \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial \lambda_3} \right $
оое	$L \left n_{o1} - n_3^e(\theta) - \lambda_1 \frac{\partial n_{o1}}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial \lambda_3} \right $
еео	$L \left n_1^e(\theta) - n_{o3} - \lambda_1 \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_{o3}}{\partial \lambda_3} \right $
еоо	$L \left n_1^e(\theta) - n_{o3} - \lambda_1 \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_{o3}}{\partial \lambda_3} \right $
оео	$L \left n_{o1} - n_{o3} - \lambda_1 \frac{\partial n_{o1}}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_{o3}}{\partial \lambda_3} \right $

Таблица 12

Спектральная ширина синхронизма $\Delta\nu_2$ для ГСЧ (λ_2 — широкополосное излучение, λ_1 — фиксированная длина волны)

Тип взаимодействия	Формулы для вычисления
ооо	$L \left n_{02} - n_3^e(\theta) - \lambda_2 \frac{\partial n_{02}}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial \lambda_3} \right $
юоо	$L \left n_{02} - n_3^e(\theta) - \lambda_2 \frac{\partial n_{02}}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial \lambda_3} \right $
оое	$L \left n_2^e(\theta) - n_3^e(\theta) - \lambda_2 \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial \lambda_3} \right $
юео	$L \left n_2^e(\theta) - n_{03} - \lambda_2 \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_{03}}{\partial \lambda_3} \right $
еоо	$L \left n_{02} - n_{03} - \lambda_2 \frac{\partial n_{02}}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_{03}}{\partial \lambda_3} \right $
оео	$L \left n_2^e(\theta) - n_{03} - \lambda_2 \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_{03}}{\partial \lambda_3} \right $

Таблица 13,

Угловая перестройка синхронизма $\partial\nu_1/\partial\theta$ для ГВГ

Тип взаимодействия	Формулы для вычисления
ооо	$\lambda_2^e(\theta) \operatorname{tg} \theta 1 - (n_{02}/n_{e2})^2 $
оое	$\lambda_1^2 [1 + (n_{02}/n_{e2})^2 \operatorname{tg}^2 \theta] \left \frac{\partial n_{01}}{\partial \lambda_1} - \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial \lambda_2} \right $
еое	$\operatorname{tg} \theta \left \frac{[1 - (n_{01}/n_{e1})^2] n_1^e(\theta)}{[1 + (n_{01}/n_{e1})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]} - 2 \frac{[1 - (n_{02}/n_{e2})^2] n_2^e(\theta)}{[1 + (n_{02}/n_{e2})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]} \right $
оее	$\lambda_1^2 \left \frac{\partial n_{01}}{\partial \lambda_1} + \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial \lambda_1} - 2 \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial \lambda_2} \right $

Тип взаимо- действия	Формулы для вычисления
еео	$\frac{n_1^e(\theta) \operatorname{tg} \theta [1 - (n_{o1}/n_{e1})^2]}{\lambda_1^2 [1 + (n_{o1}/n_{e1})^2 \operatorname{tg}^2 \theta] \left \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial \lambda_1} - \frac{\partial n_{o2}}{\partial \lambda_2} \right }$
еоо оео	$\frac{n_1^e(\theta) \operatorname{tg} \theta [1 - (n_{o1}/n_{e1})^2]}{\lambda_1^2 [1 + (n_{o1}/n_{e1})^2 \operatorname{tg}^2 \theta] \left \frac{\partial n_{o1}}{\partial \lambda_1} + \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial \lambda_1} - 2 \frac{\partial n_2^e}{\partial \lambda_2} \right }$

Таблица 14

Угловая перестройка синхронизма при ГСЧ

Тип взаимо- действия	Формулы для вычисления
	<i>a) $\partial v_1 / \partial \theta (\lambda_2 - \text{фиксированная длина волны})$</i>
оое	$\frac{n_3^e(\theta) \operatorname{tg} \theta [1 - (n_{o3}/n_{e3})^2]}{\lambda_3 [1 + (n_{o3}/n_{e3})^2 \operatorname{tg}^2 \theta] \left n_{o1} - n_3^e(\theta) - \lambda_1 \frac{\partial n_{o1}}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial \lambda_3} \right }$
еоо	$\operatorname{tg} \theta \left \frac{n_1^e(\theta)}{\lambda_1} \frac{[1 - (n_{o1}/n_{e1})^2]}{[1 + (n_{o1}/n_{e1})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]} - \frac{n_3^e(\theta)}{\lambda_3} \frac{[1 - (n_{o3}/n_{e3})^2]}{[1 + (n_{o3}/n_{e3})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]} \right $
оое	$\left n_1^e(\theta) - n_3^e(\theta) - \lambda_1 \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial \lambda_3} \right $
оое	$\operatorname{tg} \theta \left \frac{n_2^e(\theta)}{\lambda_2} \frac{[1 - (n_{o2}/n_{e2})^2]}{[1 + (n_{o2}/n_{e2})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]} - \frac{n_3^e(\theta)}{\lambda_3} \frac{[1 - (n_{o3}/n_{e3})^2]}{[1 + (n_{o3}/n_{e3})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]} \right $
еоо	$\left n_{o1} - n_3^e(\theta) - \lambda_1 \frac{\partial n_{o1}}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial \lambda_3} \right $
еео	$\operatorname{tg} \theta \left\{ \frac{n_1^e(\theta)}{\lambda_1} \frac{[1 - (n_{o1}/n_{e1})^2]}{[1 + (n_{o1}/n_{e1})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]} + \frac{n_2^e(\theta)}{\lambda_2} \frac{[1 - (n_{o2}/n_{e2})^2]}{[1 + (n_{o2}/n_{e2})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]} \right\}$
еоо	$\left n_1^e(\theta) - n_{o3} - \lambda_1 \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_{o3}}{\partial \lambda_3} \right $
еоо	$\frac{n_1^e(\theta) \operatorname{tg} \theta [1 - (n_{o1}/n_{e1})^2]}{\lambda_1 [1 + (n_{o1}/n_{e1})^2 \operatorname{tg}^2 \theta] \left n_1^e(\theta) - n_{o3} - \lambda_1 \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_{o3}}{\partial \lambda_3} \right }$

Тип взаимо- действия	Формулы для вычисления
оео	$\frac{n_2^e(\theta) \operatorname{tg} \theta [1 - (n_{o2}/n_{e2})^2]}{\lambda_2 [1 + (n_{o2}/n_{e2})^2 \operatorname{tg}^2 \theta] \left n_{o1} - n_{o3} - \lambda_1 \frac{\partial n_{o1}}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_{o3}}{\partial \lambda_3} \right }$ <p>б) $\partial v_2 / \partial \theta (\lambda_1 - \text{фиксированная длина волны})$</p>
оое	$\frac{n_3^e(\theta) \operatorname{tg} \theta [1 - (n_{o3}/n_{e3})^2]}{\lambda_3 [1 + (n_{o3}/n_{e3})^2 \operatorname{tg}^2 \theta] \left n_{o2} - n_3^e(\theta) - \lambda_2 \frac{\partial n_{o2}}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial \lambda_3} \right }$
еое	$\operatorname{tg} \theta \left \frac{n_1^e(\theta)}{\lambda_1} \frac{[1 - (n_{o1}/n_{e1})^2]}{[1 + (n_{o1}/n_{e1})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]} - \frac{n_3^e(\theta)}{\lambda_3} \frac{[1 - (n_{o3}/n_{e3})^2]}{[1 + (n_{o3}/n_{e3})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]} \right $ $\left -n_{o2} - n_3^e(\theta) - \lambda_2 \frac{\partial n_{o2}}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial \lambda_3} \right $
оее	$\operatorname{tg} \theta \left \frac{n_2^e(\theta)}{\lambda_2} \frac{[1 - (n_{o2}/n_{e2})^2]}{[1 + (n_{o2}/n_{e2})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]} - \frac{n_3^e(\theta)}{\lambda_3} \frac{[1 - (n_{o3}/n_{e3})^2]}{[1 + (n_{o3}/n_{e3})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]} \right $ $\left n_2^e(\theta) - n_3^e(\theta) - \lambda_2 \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial \lambda_3} \right $
еео	$\operatorname{tg} \theta \left\{ \frac{n_1^e(\theta)}{\lambda_1} \frac{[1 - (n_{o1}/n_{e1})^2]}{[1 + (n_{o1}/n_{e1})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]} + \frac{[1 - (n_{o2}/n_{e2})^2]}{\lambda_2 [1 + (n_{o2}/n_{e2})^2 \operatorname{tg}^2 \theta]} \right\}$ $\left n_2^e(\theta) - n_{o3} - \lambda_2 \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_{o3}}{\partial \lambda_3} \right $
еoo	$\frac{n_1^e(\theta) \operatorname{tg} \theta [1 - (n_{o1}/n_{e1})^2]}{\lambda_1 [1 + (n_{o1}/n_{e1})^2 \operatorname{tg}^2 \theta] \left n_{o2} - n_{o3} - \lambda_2 \frac{\partial n_{o2}}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_{o3}}{\partial \lambda_3} \right }$
оео	$\frac{n_2^e(\theta) \operatorname{tg} \theta [1 - (n_{o2}/n_{e2})^2]}{\lambda_2 [1 + (n_{o2}/n_{e2})^2 \operatorname{tg}^2 \theta] \left n_2^e(\theta) - n_{o3} - \lambda_2 \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_{o3}}{\partial \lambda_3} \right }$

Таблица 15

Температурная перестройка синхронизма $\partial v_1/\partial T$ для ГВГ

Тип взаимодействия	Формулы для вычисления
ооо	$\frac{\left \frac{\partial n_{01}}{\partial T} - \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial T} \right }{\lambda_1^2 \left \frac{\partial n_{01}}{\partial \lambda_1} - \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial \lambda_2} \right }$
оое оое	$\frac{\left \frac{\partial n_{01}}{\partial T} + \frac{\partial n_{01}}{\partial T} - 2 \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial T} \right }{\lambda_1^2 \left \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial \lambda_1} + \frac{\partial n_{01}}{\partial \lambda_1} - 2 \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial \lambda_2} \right }$
еео	$\frac{\left \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial T} - \frac{\partial n_{02}}{\partial T} \right }{\lambda_1^2 \left \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial \lambda_1} - \frac{\partial n_{02}}{\partial \lambda_2} \right }$
ооо оео	$\frac{\left \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial T} + \frac{\partial n_{01}}{\partial T} - 2 \frac{\partial n_{02}}{\partial T} \right }{\lambda_1^2 \left \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial \lambda_1} + \frac{\partial n_{01}}{\partial \lambda_1} - 2 \frac{\partial n_{02}}{\partial \lambda_2} \right }$

Таблица 16

Температурная перестройка синхронизма $\partial v_1/\partial T$ для ГСЧ (λ_2 — фиксированная длина волны)

Тип взаимодействия	Формулы для вычисления
оое	$\frac{\left \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_{01}}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_{02}}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial T} \right }{\left n_{01} - n_3^e(\theta) - \lambda_1 \frac{\partial n_{01}}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial \lambda_3} \right }$
оое	$\frac{\left \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_{02}}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial T} \right }{\left n_1^e(\theta) - n_3^e(\theta) - \lambda_1 \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial \lambda_3} \right }$

Тип взаимодействия	Формулы для вычисления
оee	$\left \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_{01}}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial T} \right $ $\left n_{01} - n_3^e(\theta) - \lambda_1 \frac{\partial n_{01}}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial \lambda_3} \right $
еео	$\left \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_{03}}{\partial T} \right $ $\left n_1^e(\theta) - n_{03} - \lambda_1 \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_{03}}{\partial \lambda_3} \right $
еoo	$\left \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_{02}}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_{03}}{\partial T} \right $ $\left n_1^e(\theta) - n_{03} - \lambda_1 \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_{03}}{\partial \lambda_3} \right $
оeo	$\left \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_{01}}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial \tilde{n}_2^e(\theta)}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_{03}}{\partial T} \right $ $\left n_{01} - n_{03} - \lambda_1 \frac{\partial n_{01}}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_{03}}{\partial \lambda_3} \right $

Таблица 17

Температурная перестройка синхронизма $\partial v_2 / \partial T$ для ГСЧ (λ_1 — фиксированная длина волны)

Тип взаимодействия	Формулы для вычисления
оoe	$\left \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_{01}}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_{02}}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial T} \right $ $\left n_{02} - n_3^e(\theta) - \lambda_2 \frac{\partial n_{02}}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial \lambda_3} \right $
еoe	$\left \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_{02}}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial T} \right $ $\left n_{02} - n_3^e(\theta) - \lambda_2 \frac{\partial n_{02}}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial \lambda_3} \right $

Тип взаимодействия	Формулы для вычисления
оee	$\frac{\left \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_{o1}}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial T} \right }{\left n_2^e(\theta) - n_3^e(\theta) - \lambda_2 \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial \lambda_3} \right }$
eeo	$\frac{\left \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_{o2}}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_3^e(\theta)}{\partial T} \right }{\left n_2^e(\theta) - n_{o3} - \lambda_2 \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_{o3}}{\partial \lambda_3} \right }$
eoo	$\frac{\left \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_1^e(\theta)}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_{o2}}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_{o3}}{\partial T} \right }{\left n_{o2} - n_{o3} - \lambda_2 \frac{\partial n_{o2}}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_{o3}}{\partial \lambda_3} \right }$
eeo	$\frac{\left \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_{o1}}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_{o3}}{\partial T} \right }{\left n_2^e(\theta) - n_{o3} - \lambda_2 \frac{\partial n_2^e(\theta)}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_{o3}}{\partial \lambda_3} \right }$

1.11. Примеры расчета эффективности нелинейных преобразователей частоты

Точный расчет эффективности преобразования оптических частот в нелинейных кристаллах в общем случае, с учетом всех сопутствующих факторов, весьма сложен и производится на ЭВМ. Получение аналитических выражений возможно только для некоторых простейших конкретных случаев, однако применение этих выражений позволяет произвести оценку предельно достижимых параметров эффективности. Коррекция этой оценки с учетом всех аспектов процесса взаимодействия может быть проведена косвенными методами.

Ниже приведены некоторые аналитические выражения для расчета эффективности преобразования.

Приближение плоских волн и заданных полей волн накачки. В этом приближении можно пренебречь такими ограничивающими факторами, как дифракция, анизотропия (снос), запаздывание групповых скоростей, дисперсионное распывание. Кроме того,

будем пренебрегать тепловыми эффектами, линейным и нелинейным поглощениями (а, следовательно, и эффектом ГСН). Другими словами, в этом приближении должны выполняться условия:

$$L < L_{\text{нел}}; \quad L < L_{\text{эф}};$$

$$\bar{P}_0 < P_{\text{кр}}; \quad 2\hbar\omega_3 < E_g.$$

В частности, условие $L < L_{\text{нел}}$ означает:

$$\begin{aligned} &\text{для ГСЧ } a_3(z) \ll a_{1,2}(0); \\ &\text{для ГРЧ } a_1(z) \ll a_{2,3}(0) \\ &\quad \text{или } a_2(z) \ll a_{1,3}(0); \\ &\text{для ГВГ } a_3(z) \ll a_1(0) = a_2(0). \end{aligned}$$

Формулы для расчета эффективности преобразования по мощности при ГВГ, ГСЧ, ГРЧ в указанном приближении в системах *SI* и *CGS* приведены в табл. 18 и 19, где использованы обозначения: d — эффективная нелинейность в направлении синхронизма (см. табл. 3); n_i — показатели преломления на длинах волн λ_i с учетом поляризаций волн в направлении синхронизма; $A = \pi\omega^2_0$ — площадь сечения лазерного пучка с радиусом ω_0 (распределение интенсивности в сечении предполагается однородным, а площади

Таблица 18

Формулы для расчета эффективности преобразования η при ГВГ, ГСЧ и ГРЧ в системе *SI*

Нелинейный процесс	Эффективность преобразования
ГВГ, $\omega_1 + \omega_1 = \omega_2$, $\Delta k = 2k_1 - k_2$	$\frac{P_2}{P_1} = \frac{2\pi^2 d^2 L^2 P_1}{\epsilon_0 c n_1^2 n_2 \lambda_2^2 A} \operatorname{sinc}^2\left(\frac{ \Delta k L}{2}\right)$
ГСЧ, $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$, $\Delta k = k_1 + k_2 - k_3$	$\frac{P_3}{P_1} = \frac{2^3 \pi^2 d^2 L^2 P_2}{\epsilon_0 c n_1 n_2 n_3 \lambda_3^2 A} \operatorname{sinc}^2\left(\frac{ \Delta k L}{2}\right)$
ГРЧ, $\omega_1 = \omega_3 - \omega_2$, $\Delta k = k_1 + k_2 - k_3$	$\frac{P_1}{P_3} = \frac{2^3 \pi^2 d^2 L^2 P_2}{\epsilon_0 c n_1 n_2 n_3 \lambda_1^2 A} \operatorname{sinc}^2\left(\frac{ \Delta k L}{2}\right)$

Размерности: $[d] = \text{м/В}$, $[P] = \text{Вт}$, $[L] = \text{м}$, $[\lambda] = \text{м}$, $[A] = \text{м}^2$, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ А} \cdot \text{с/В} \cdot \text{м}$, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

Формулы для расчета эффективности преобразования η при ГВГ, ГСЧ и ГРЧ в системе CGS

Нелинейный процесс	Эффективность преобразования
ГВГ, $\omega_1 + \omega_1 = \omega_2$, $\Delta k = 2k_1 - k_2$	$\frac{P_2}{P_1} = \frac{2^7 \pi^5 d^2 L^2 P_1}{c n_1^2 n_2 \lambda_2^2 A} \operatorname{sinc}^2 \left(\frac{ \Delta k L}{2} \right)$
ГСЧ, $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$, $\Delta k = k_1 + k_2 - k_3$	$\frac{P_3}{P_1} = \frac{2^9 \pi^5 d^2 L^2 P_2}{c n_1 n_2 n_3 \lambda_3^2 A} \operatorname{sinc}^2 \left(\frac{ \Delta k L}{2} \right)$
ГРЧ, $\omega_1 = \omega_3 - \omega_2$, $\Delta k = k_1 + k_2 - k_3$	$\frac{P_1}{P_3} = \frac{2^9 \pi^5 d^2 L^2 P_2}{c n_1 n_2 n_3 \lambda_1^2 A} \operatorname{sinc}^2 \left(\frac{ \Delta k L}{2} \right)$

Размерности: $[d] = \text{см/дин}^{1/2}$, $[P] = \text{эрг/с}$, $[L] = \text{см}$, $[\lambda] = \text{см}$, $[A] = \text{см}^2$, $c = 3 \times 10^{10} \text{ см/с}$.

пучков всех волн — одинаковыми); P_i — мощности волн на соответствующих частотах ω_i в непрерывном режиме. В случае импульсного (квазистатического!) режима под P_i следует понимать импульсные мощности $P_i = E_i/\tau$, где E_i — энергия импульсов на частотах ω_i (распределение интенсивности по импульсу предполагается однородным).

Отметим, что в случаях ГСЧ и ГРЧ при примерно равных мощностях смешиваемых волн эффективность преобразования определяется по формулам:

$$\eta = \frac{P_3}{\sqrt{P_1 P_2}} \quad (\text{ГСЧ}); \quad \eta = \frac{P_1}{\sqrt{P_2 P_3}} \quad (\text{ГРЧ}).$$

Из формул табл. 18 и 19 видно, что эффективность преобразования пропорциональна плотности мощности накачки, квадрату длины кристалла, квадрату эффективной нелинейности, т. е. «параметру качества» нелинейного кристалла $d^2(n_1 n_2 n_3)^{-1}$, а также члену вида

$$\operatorname{sinc}^2 \left(\frac{|\Delta k| L}{2} \right) = \sin^2 \left(\frac{|\Delta k| L}{2} \right) / \left(\frac{|\Delta k| L}{2} \right)^2,$$

характеризующего влияние волновой расстройки на эффективность преобразования. Последняя падает вдвое при $\Delta k = \pm 0,886\pi/L$, что было использовано выше при выводе формул (27) — (30).

Отметим, что формула для эффективности преобразования в случае ГСЧ при подстановке в нее $\omega_1 = \omega_2$, $\omega_3 = 2\omega_1$, $P_1 = P_2$ дает

в четыре раза большее значение эффективности преобразования, чем формула для ГВГ. Это кажущийся парадокс объясняется тем, что в случае ГВГ присутствует только одна волна с частотой ω_1 , а в случае ГСЧ при $\omega_1 = \omega_2$ взаимодействуют две волны, каждая с той же мощностью. Интенсивность преобразованного излучения при ГСЧ определяется произведением мощностей преобразуемых волн, что и объясняет появление коэффициента 4 в выражениях для ГСЧ (см. табл. 18 и 19).

В табл. 20 приведены выражения для квантовой эффективности преобразования (т. е. для отношения чисел квантов преобразованного и исходного излучений) в случае точного синхронизма ($\Delta k = 0$) при ГСЧ и ГРЧ. Эти формулы позволяют оценить длину нелинейного кристалла, необходимую для достижения 100 %-й эффективности преобразования.

Учет истощения волн накачки («нелинейный» режим). При произвольном соотношении L и $L_{\text{нел}}$ следует учитывать истощение мощности волн преобразуемого излучения (волн накачки). Сохраняя остальные допущения первого раздела этого параграфа, в некоторых случаях можно получить аналитические формулы для расчета эффективности преобразования.

Эффективность преобразования по мощности для ГВГ в точном синхронизме при $a_3(0) = 0$, $a_{1,2}(0) = a_0$ в нелинейном режиме и в вышеуказанных допущениях рассчитывается по формуле

$$\eta = P_3(L)/P_1(0) = \text{th}^2(\sigma_3 a_0 L) = \text{th}^2(L/L_{\text{нел}}), \quad (31)$$

где $\text{th } x$ — гиперболический тангенс (табулированная специальная функция) [14*].

При наличии ненулевой расстройки в тех же допущениях для ГВГ

$$\eta = \kappa \text{sn}^2(u; \kappa), \quad (32)$$

Т а б л и ц а 20

Формулы для расчета квантовой эффективности преобразования при ГСЧ и ГРЧ в условиях точного синхронизма в системах единиц SI и CGS

Нелинейный процесс	SI	CGS
ГСЧ, $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$	$\eta = \frac{P_3 \lambda_3}{P_1 \lambda_1} =$ $= \sin^2 \left[2\pi dL \sqrt{\frac{2P_2}{\varepsilon_0 c n_1 n_2 n_3 \lambda_1 \lambda_3 A}} \right]$	$\eta = \frac{P_3 \lambda_3}{P_1 \lambda_1} =$ $= \sin^2 \left[16\pi^2 dL \sqrt{\frac{2\pi P_2}{c n_1 n_2 n_3 \lambda_1 \lambda_3 A}} \right]$
ГРЧ, $\omega_1 = \omega_3 = \omega_2$	$\eta = \frac{P_1 \lambda_1}{P_3 \lambda_3} =$ $= \sin^2 \left[2\pi dL \sqrt{\frac{2P_2}{\varepsilon_0 c n_1 n_2 n_3 \lambda_1 \lambda_3 A}} \right]$	$\eta = \frac{P_1 \lambda_1}{P_3 \lambda_3} =$ $= \sin^2 \left[16\pi^2 dL \sqrt{\frac{2\pi P_2}{c n_1 n_2 n_3 \lambda_1 \lambda_3 A}} \right]$

где $\text{sn}(u; \kappa)$ — эллиптический двухпараметрический синус (табулированная специальная функция Якоби [14*]);

$$\begin{aligned} u &= \sigma_3 a_0 L \kappa^{-1/2} = L \kappa^{-1/2} / L_{\text{нел}}; \\ \kappa &= [\sqrt{1 + (\Delta_0/2)^2} - \Delta_0/2]^2; \\ \Delta_0 &= \Delta k (2\sigma_3 a_0)^{-1} = 0,5 \Delta k L_{\text{нел}}. \end{aligned} \quad (33)$$

При $\Delta k \rightarrow 0$, $\Delta_0 \rightarrow 0$, $\kappa \rightarrow 1$, и эллиптический синус переходит в гиперболический тангенс (рис. 15,а); при $\Delta_0 \gg 1$ параметр $\kappa \rightarrow 0$, и эллиптический синус трансформируется в обычный (круговой) синус (рис. 15,г). Порядок расчета эффективности ГВГ по формулам (31)—(33) следующий: рассчитывается параметр $L_{\text{нел}}$, затем оценивается Δ_0 ; при $\Delta_0 \ll 1$ можно пользоваться формулой (31) или соответствующим графиком рис. 15; при $\Delta_0 \gg 1$ расчет производится по формуле табл. 19 или по эквивалентной формуле

$$\eta = \left(\frac{L}{L_{\text{нел}}} \right)^2 \text{sinc}^2 \left(\frac{|\Delta k| L}{2} \right). \quad (34)$$

При расчетах $L_{\text{нел}}$ амплитуда поля a_0 находится по известной исходной мощности излучения на основной частоте $P_1(0)$ с помощью формулы

$$a_0 = \left(\frac{752 P_1(0)}{\pi \omega_0^2 n} \right)^{1/2},$$

где используются следующие размерности величин: $[a_0] = \text{В} \cdot \text{см}^{-1}$; $[\omega_0] = \text{см}$; $[P_1(0)] = \text{Вт}$.

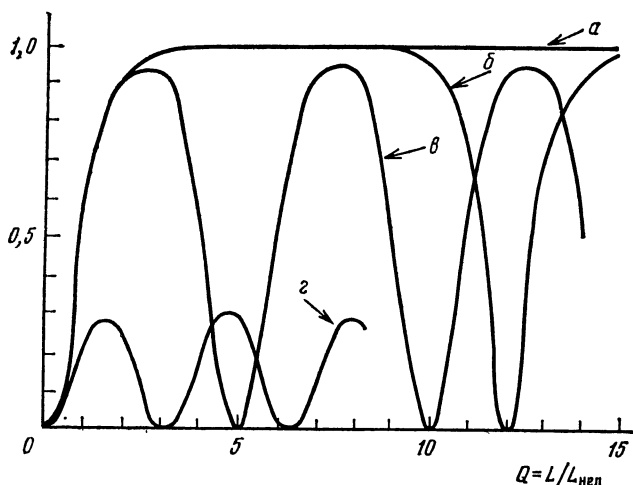


Рис. 15. Зависимости эффективности преобразования для ГВГ от соотношения длины кристалла к нелинейной длине для разных значений κ^2 :

а — $\kappa^2 = 1$; б — $\kappa^2 = 1 - 10^{-4}$; в — $\kappa^2 = 0,9$; г — $\kappa^2 = 0,1$

Параметр σ_3 для ГВГ рассчитывается в соответствии с (14) по формуле

$$\sigma_3 = \frac{2\pi^2 d_{3\phi}}{n \lambda_1}.$$

где используются следующие размерности величин:

$$[d] = \text{м} \cdot \text{В}^{-1}; [\sigma_3] = \text{В}^{-1}; [\lambda_1] = \text{м}.$$

При точном синхронизме (формула (31)) 100%-ное преобразование во вторую гармонику реализуется при $L \geq 1,5L_{\text{нел}}$. Так, для кристалла KDP при плотности входной мощности излучения на основной частоте $P_1(0) \cdot (\pi \omega^2_0)^{-1} = 5 \cdot 10^8 \text{ Вт/см}^2$, $\lambda_1 = 10^{-4} \text{ см}$ (неодимовый лазер), $n = 1,5$ имеем $a_0 \simeq 5 \cdot 10^5 \text{ В/см}$, $\sigma_3 \simeq 10^{-6} \text{ В}^{-1}$ и $L_{\text{нел}} = 2 \text{ см}$, так что при $L = 3 \text{ см}$ в отсутствие всех ограничивающих факторов (кроме учтенного истощения основного излучения) возможно 100%-е преобразование во вторую гармонику. Естественно, для реализации такой предельной эффективности требуются идеальные параметры как исходного излучения, так и кристалла-преобразователя.

При $\kappa^2 \leq 0,3$ или, что то же самое, при $\Delta_0 \geq 0,6$ достаточно сложный для расчетов эллиптический синус в (32) можно заменить круговым синусом

$$\eta \simeq \kappa \sin^2 u, \quad (35)$$

где κ и u рассчитываются по формулам (33). Использование (35) вместо (32) дает относительную ошибку не более 10%.

Учет конечной расходимости основного излучения для ГВГ в приближении заданного поля. Формулы предыдущих разделов пригодны для плоских волн. В геометрическом приближении с помощью этих формул можно рассчитать эффективность ГВГ для расходящегося пучка основного излучения с осесимметричным углом расходимости $\varphi_0 \gg \varphi_{\text{диф}}$, где $\varphi_{\text{диф}} = 0,61\lambda_1\omega_0^{-1}$ — угол дифракционной расходимости. В геометрооптическом приближении ГВГ происходит независимо вдоль парциальных лучей, каждый из которых распространяется в своем направлении (под своим углом θ относительно оси Z внутри угла φ_0); соответственно каждому значению θ можно сопоставить расстройку [4*]:

$$\Delta k(\theta) = \frac{\partial(\Delta k)}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\theta_c} \cdot (\theta - \theta_c) = \gamma_1(\theta - \theta_c),$$

где γ_1 — угловой дисперсионный коэффициент 1-го порядка; вблизи 90°-го синхронизма следует учитывать дисперсионный коэффициент 2-го порядка (см. формулу (30)). Для синхронизма 1-го типа (оое) параметр γ_1 вычисляется по формуле

$$\gamma_1 = \frac{2n_{o1}\omega_1}{cn_{o3}n_{e3}} \sqrt{(n_{o1}^2 - n_{e3}^2)(n_{o3}^2 - n_{o1}^2)}.$$

Интегральная (по всему лучу) эффективность ГВГ рассчитывается интегрированием выражения (34) по углу в пределах расходимости φ_0 :

$$\eta = \frac{P_3(L, \varphi_0)}{P_1(0)} = \left(\frac{L}{L_{\text{нел}}} \right)^2 \cdot (\Omega^{-1} \cdot \text{Si}(2\Omega) - \Omega^{-2} \cdot \sin^2 \Omega), \quad (36)$$

где $\Omega = (1/4)\gamma_1\varphi_0 L$ (предполагается, что биссектриса луча совпадает с направлением синхронизма), функция $\text{Si } x$ есть интегральный синус (табулированная специальная функция, [14*]):

$$\text{Si } x = \int_0^x \frac{\sin y}{y} dy.$$

Предельные случаи:

а) $\Omega \ll 1$ (малые: расходимость, длина кристалла или дисперсионный коэффициент); при этом $\text{Si } 2\Omega \simeq 2\Omega$; $\sin^2 \Omega \simeq 1$ и

$$\eta \simeq (L/L_{\text{нел}})^2,$$

что совпадает со случаем точного синхронизма;

б) $\Omega \gg 1$ (большие: расходимость, длина кристалла, дисперсионный коэффициент); при этом $\text{Si } 2\Omega \simeq \pi/2$; $\sin^2 \Omega \simeq 0$, т. е.

$$\eta \simeq (\pi/2\Omega) (L/L_{\text{нел}})^2.$$

Учет конечной расходимости основного излучения для ГВГ в нелинейном режиме. Нелинейный режим в приближении плоских волн для ГВГ описывается формулами (32), (33). Интегрирование выражения (32) по углу дает ($\varphi = \theta - \theta_c$)

$$\eta = \frac{1}{\varphi_0} \int_{-\varphi_0/2}^{+\varphi_0/2} \kappa(\varphi) \cdot \sin^2[u(\varphi); \kappa(\varphi)] d\varphi. \quad (37)$$

В приближении (35) выражение (37) принимает вид, пригодный для оперативных расчетов:

$$\eta = \frac{Q^2}{3\Omega} \left[Q - \frac{Q^2}{v} + \frac{\sin^2 Q}{Q} + \frac{1}{2} \sin 2Q - \frac{Q^2}{v^3} \left(\sin^2 v + \frac{v}{2} \sin 2v \right) + \right. \\ \left. + (3 - 2Q^2) \left(\text{Si } 2v - \frac{\sin^2 v}{v} - \text{Si } 2Q + \frac{\sin^2 Q}{Q} \right) \right], \quad (38)$$

где $Q = L/L_{\text{нел}}$; $v = \sqrt{Q^2 + (\Omega/2)^2} + \Omega/2$.

При $Q \ll 1$ или при $\Omega/Q \gg 1$ формула (38) переходит в (36). Используя приближение (35), справедливое при $\Delta_0 \geq 0,6$ с точностью не хуже 10%, и производя интегрирование по углу $\varphi = \theta - \theta_c$, мы включаем и участок $[-0,6 \leq \Delta_0 \leq +0,6]$, в котором формула (35) некорректна. Однако вклад этого участка в ошибку при $Q \leq 2$ незначителен, и формулой (38) можно пользоваться с ошибкой не более 10%; эта ошибка увеличивается до 25...30% лишь в области, где большие значения Q сочетаются с малыми значениями Ω ($Q \geq 2$; $\Omega \leq 1 \dots 2$) и где формула (38) пригодна лишь для оценок.

Результаты расчета точного выражения (37) на ЭВМ в виде кривых равных значений эффективности ГВГ в координатах Ω

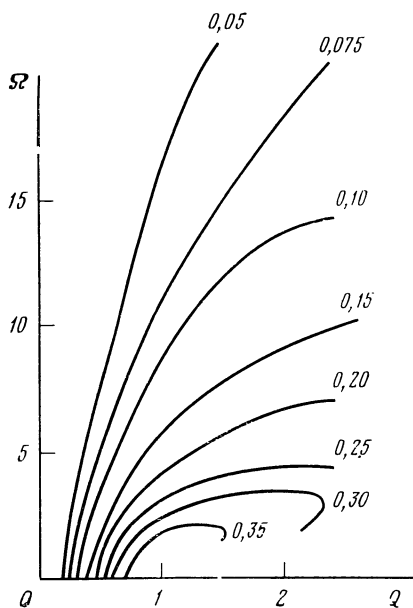


Рис. 16. Кривые равных значений эффективности преобразования по мощности в координатах Ω , Q для непрерывного (немодулированного) излучения на основной частоте при ГВГ в нелинейном режиме

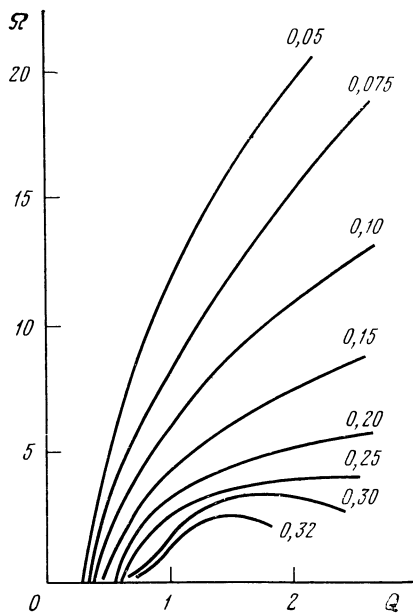


Рис. 17. Кривые равных значений эффективности преобразования по энергии в координатах Ω , Q для гауссова импульса излучения на основной частоте при ГВГ в нелинейном режиме

и Q представлены на рис. 16 — по мощности, для непрерывного режима, и на рис. 17 — по энергии импульса, для импульсного режима (с гауссовым профилем импульса основного излучения). Так как параметры Ω и Q пропорциональны длине кристалла L , то графики рис. 16 и 17 не изменяются при изменении L (меняется лишь масштаб осей). Технически приемлемые значения эффективности ($\eta \geq 0,2$) при $Q \approx 1$ группируются в области малых $\Omega \leq 5 \dots 7$, откуда и следуют известные (для принятых здесь приближений) рекомендации: для получения высокой эффективности ГВГ следует использовать большие плотности мощности основного излучения ($Q \geq 1$, вплоть до пробойных значений) и добывать малых значений $\Omega \leq 5$ (т. е. использовать кристаллы с малыми угловыми дисперсионными коэффициентами, типа CDA, а также максимально снижать расходимость лазерного излучения).

Подчеркнем, что в двух последних разделах данного параграфа, как и ранее, в связи с допущениями не было учтено поглощение (линейное и нелинейное), дифракция, снос, запаздывание групповых скоростей, дисперсионное расплывание импульса, тепловые явления, эффекты фотопреломления и ГСН.

Учет *линейного поглощения*. Влияние параметров затухания ($\delta_i \neq 0$) в отсутствие тепловых эффектов можно учесть во всех

случаях умножением эффективности преобразования, вычисленной для $\delta=0$, на множитель $\exp(-2\delta L)$. Поскольку применяемые кристаллы, как правило, прозрачны для взаимодействующих волн, можно использовать разложение $\exp(-2\delta L) \simeq 1 - 2\delta L$.

1.12. Дополнительные замечания

Как уже отмечалось, генерация суммарной частоты (ГСЧ), в частности, используется в так называемых «ап-конвертерах», или преобразователях частоты вверх; с помощью таких преобразователей оптические сигналы ИК-диапазона трансформируются в видимый диапазон, а сигналы видимого диапазона — в ультрафиолетовое излучение. Оценка эффективности проводится по формулам для ГСЧ (табл. 18—20), см. также [3*, 15*].

Параметрическая люминесценция и параметрическая генерация света (ПГС) используются для создания плавно перестраиваемых источников когерентного (лазерного) излучения, в том числе в ИК-диапазоне. Для оценок эффективности преобразования ПГС можно воспользоваться работами [4*, 16*—18*].

В последнее время бурно развивается нелинейная оптика пико- и фемтосекундных световых импульсов ($1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$). Особенности нелинейно-оптических эффектов в полях таких импульсов обсуждаются в монографиях [18*, 19*]. Рекомендуется обратить внимание на необходимость и полезность выполнения, помимо волнового (фазового) синхронизма, также и группового синхронизма (для случая ГВГ это означает равенство групповых скоростей основного излучения и ВГ). Отметим также, что в сверхсильных полях фемтосекундных импульсов могут наблюдаться кооперативные явления [19*].

Одним из интересных направлений современной нелинейной оптики безусловно следует считать развитие квантовой теории нелинейности оптических сред, позволяющей связать нелинейность данного кристалла с особенностями его молекулярной структуры [20*, 21*]. Эта теория, в частности, обещает дать инструмент для прогнозирования и планомерного поиска новых нелинейно-оптических материалов с заданными свойствами.

Важным вопросом прикладной нелинейной оптики является выбор оптимального нелинейного кристалла. При наличии нескольких нелинейных материалов, подходящих для решения данной задачи, выбор оптимального из них может быть проведен с использованием системы коэффициентов качества, развитой в [22*].

Глава 2.

Нелинейно-оптические свойства кристаллов

2.1. Одноосные кристаллы

КН₂РО₄, дигидрофосфат калия (KDP)

Отрицательный одноосный кристалл: $n_o > n_e$.

Класс симметрии: $\bar{4} 2m$.

Диапазон прозрачности: 0,1765 ... 1,5 мкм [1, 2, 18*].

Дисперсионные зависимости ($T=24,8^\circ\text{C}$) [3] (λ — в мкм):

$$n_o^2 = 2,259276 + \frac{0,01008956}{\lambda^2 - 1/77,26408} + \frac{0,03251305}{0,0025 - 1/\lambda^2};$$

$$n_e^2 = 2,132668 + \frac{0,008637494}{\lambda^2 - 1/81,42631} + \frac{0,008069981}{0,0025 - 1/\lambda^2}.$$

Другие формулы приведены в [4].

Типичные значения показателей преломления для различных длин волн ($T=25^\circ\text{C}$):

λ , мкм	n_o	n_e
0,213	1,6028	1,5470
0,266	1,5593	1,5099
0,347	1,5327	1,4871
0,355	1,5311	1,4858
0,532	1,5123	1,4705
0,694	1,5050	1,4653
1,064	1,4938	1,4599

Показатели преломления для девяти кристаллов группы KDP согласно [23*] вычисляются по формуле

$$n^2 = 1 + A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C^2} + \frac{D}{\lambda^2 - E^2}.$$

Соответствующие значения коэффициентов A , B , C , D , E приведены в табл. 21. При расчете показателей преломления по формуле [24*]

$$n^2 = 1 + A + B\lambda^2 + C\lambda^4 + \frac{D\lambda^2}{\lambda^2 - E^2}$$

используются значения коэффициентов A , B , C , D , E , приведенные в табл. 22.

Температурные зависимости коэффициентов преломления кристаллов KDP, DKDP и ADP описываются следующими формулами [4]:

$$n^2 = A + \frac{B}{1 - C/\lambda^2} + \frac{D}{1 - E/\lambda^2};$$

$$A, B, C, D = mT + n,$$

где T в К, λ — в мкм.

Коэффициенты для расчета показателей преломления кристаллов группы KDP по Kirby et al [23*]

Кристалл		A	B	C	D	E
KDP	o	1,257574	1,76225	7,609065	0,010115	0,118982
	e	1,129495	0,752775	11,27179	0,009650	0,037136
DKDP	o	1,240921	2,246956	11,26591	0,009676	0,124981
	e	1,126019	0,784404	11,10871	0,008578	0,109505
KDA	o	1,424647	3,742954	11,26515	0,015841	0,13647
	e	1,262579	0,769288	11,27181	0,013461	0,127145
ADP	o	1,301929	1,78281	6,840459	0,010569	0,133602
	e	1,162273	1,823756	11,31744	0,009866	0,101736
DADP	o	1,279481	1,215879	7,614168	0,010761	0,115165
	e	1,151161	1,199009	11,25169	0,009652	0,09855
RDP	o	1,249885	3,688005	11,27829	0,01056	0,088207
	e	1,159913	0,988431	11,30013	0,009515	0,092076
RDA	o	1,390661	3,487176	11,25899	0,015513	0,134582
	e	1,27557	0,720099	11,25304	0,013915	0,1208
CDA	o	1,420405	1,403336	7,60422	0,016272	0,134185
	e	1,350262	0,685328	11,28135	0,015645	0,121741
DCDA	o	1,40817	2,212173	11,26371	0,015598	0,138209
	e	1,345809	0,651843	11,28408	0,015141	0,129754

Соответствующие коэффициенты m и n приведены в табл. 23. Типичные значения показателей преломления при $T = -100^\circ\text{C}$:

λ , мкм	n_o	n_e
0,213	1,6095	1,5506
0,266	1,5651	1,5133
0,347	1,5379	1,4904
0,355	1,5363	1,4890
0,532	1,5172	1,4736
0,694	1,5097	1,4685
1,064	1,4985	1,4630

Изменения показателей преломления Δn при охлаждении от комнатной температуры (298 К) до температуры T (К) можно рассчитывать по формулам [5]:

$$\Delta n_o = n_o(T) - n_o(298) = (298 - T) \cdot (n_o^2 - 1,432) \cdot 0,402 \cdot 10^{-4};$$

$$\Delta n_e = n_e(T) - n_e(298) = (298 - T) \cdot (n_e^2 - 1,105) \cdot 0,221 \cdot 10^{-4}.$$

Таблица 22

Коэффициенты для расчета показателей преломления кристаллов группы KDP по Eimerl [24*]

Кристалл		A	B · 10 ²	C · 10 ³	D	E
KDP	о	0,683696	—3,319326	0,7706707	0,5606856	0,1315899
	е	0,7980716	—1,56089	3,993255	0,33884	0,1498919
DKDP	о	0,9575554	—2,824391	4,977826	0,2901391	0,1677494
	е	0,5005779	—1,054063	2,243821	0,6276034	0,1146988
KDA	о	0,988413	—5,826141	14,09368	0,4430935	0,1710929
	е	1,011142	—3,195326	12,17516	0,2681806	0,1925064
ADP	о	1,212279	—9,685763	39,49124	0,1170906	0,2268105
	е	0,7721719	—2,289421	4,011002	0,3957988	0,1468191
DADP	о	0,6837559	—2,494824	1,62896	0,5970244	0,1314933
	е	—1,261059	—0,6219993	—3,888768	2,457582	0,06756204
RDP	о	0,7575657	—3,911456	4,782302	0,4986887	0,1353779
	е	0,719013	—1,525472	3,568325	0,445821	0,1368467
RDA	о	0,6392251	—2,972298	0,8221364	0,7529543	0,1417942
	е	0,09150814	—0,1356935	—2,216456	0,181453	0,110563
CDA	о	0,8776328	—3,602222	5,234121	0,5503951	0,16257
	е	0,6862889	—1,372244	3,948463	0,6694571	0,1464712
DCDA	о	0,6278496	—1,822031	0,2813331	0,780817	0,1407699
	е	0,6236063	—0,9338692	1,965413	0,7249589	0,141485

Таблица 23

Коэффициенты для вычисления температурных зависимостей показателей преломления кристаллов KDP, DKDP и ADP [4]

Кристалл	KDP		DKDP		ADP	
	о	е	о	е	о	е
A $m \cdot 10^3$ n	0,03185 1,44896	—0,01152 1,42691	0,33935 1,55934	0,00343 1,68647	—0,87835 1,69960	—0,01089 1,42036
B $m \cdot 10^3$ n	—0,14114 0,84181	—0,06139 0,72722	—0,41655 0,71098	—0,06260 0,46629	0,72007 0,64955	0,00514 0,74453
C $m \cdot 10^3$ n	—0,02130 0,01280	0,03104 0,01213	0,64904 0,01407	0,13626 0,01663	—1,40526 0,01723	—0,02471 0,01300
D $m \cdot 10^3$ n	0,00575 0,90793	—0,00198 0,22543	0,48281 0,67671	0,00241 0,59614	—1,17900 1,10624	—0,00999 0,42033
E	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0

Эффективная нелинейность [6]:

$$d_{\text{ооe}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\varphi;$$

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{оee}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\varphi^*.$$

Нелинейный коэффициент [7]

$$d_{36}(1,06 \text{ мкм}) = (4,35 \pm 0,17) \cdot 10^{-13} \text{ м/В.}^{**}$$

По данным справочника [25 *]

$$d_{36}(0,69 \dots 1,06 \text{ мкм}) = 4,7 \cdot 10^{-13} \text{ м/В};$$

$$d_{36}(1,15 \text{ мкм}) = 4,6 \cdot 10^{-13} \text{ м/В.}$$

По данным работы [8]:

$$d_{36}(0,6328 \text{ мкм}) = 7,1 \cdot 10^{-13} \text{ м/В};$$

$$d_{36}(1,06 \text{ мкм}) = 6,3 \cdot 10^{-13} \text{ м/В};$$

$$d_{36}(1,15 \text{ мкм}) = 6,2 \cdot 10^{-13} \text{ м/В};$$

$$d_{36}(1,318 \text{ мкм}) = 6,0 \cdot 10^{-13} \text{ м/В.}$$

В настоящем справочнике нелинейности других кристаллов, измеренные относительно d_{36} (KDP), рассчитываются исходя из данных [7].

Пороги поверхностных повреждений I при различных длинах волн и длительностях импульса:

λ , мкм	τ_n , нс	I , 10^9 Вт/см ²
0,53	0,2	17 [9]
0,6943	20	0,4 [10]
1,06	0,01	100 [12]
1,06	0,2	23 [9]
1,06	1	> 10 [13]
1,065	15	14,4 [14]
1,06	4,7	16,6 [11]

Пороги разрушения E при фокусировании линзой с фокусным расстоянием F [15]:

λ , мкм	τ_n , пс	F , мм	E , мкДж
0,53	10	20	30
0,53	10	50	70
1,06	10	20	300
1,06	10	50	600

Пороги пробоя I за счет многофотонной ионизации для сверхчистого образца KDP и спектрально-ограниченных импульсов на-

* Здесь и далее при сокращенном обозначении поляризаций взаимодействующих волн первый из трех символов относится к наиболее длинноволновому излучению, а последний — к наиболее коротковолновому.

** Для перевода единиц нелинейного коэффициента из системы SI в CGS заметим, что $1 \text{ м/В} = \frac{3}{4\pi} \cdot 10^4 \text{ см/дин}^{1/2} = 2,39 \cdot 10^3 \text{ см/дин}^{1/2}$.

качки (излучение распространялось вдоль оси Z и было поляризовано вдоль оси X) [16]:

λ , мкм	τ_n , пс	I , 10^{12} Вт/см 2
0,3547	17	2,5 ... 5,0
0,532	21	1,1
1,064	30	2,3

Коэффициент линейного поглощения α на различных длинах волн:

λ , мкм	α , см $^{-1}$
0,1765	1,2 [2]
0,35 ... 0,53	$< 0,005$ [17]
0,78	0,024 [18]
0,89	0,015 [18]
1,06	0,03 ... 0,05 [17, 18]
1,315	0,3 [26*]

Данные о порогах возникновения ВКР в КДР при $\lambda_n = 532$ нм и пикосекундного континуума приведены в табл. 58, 60 § 3.7.

Значения коэффициента двухфотонного поглощения β на $\lambda = 266$ и 355 нм приведены в табл. 24.

Коэффициент теплопроводности κ , Вт/см·К, при разных температурах T [27*]:

κ (оси c)	κ (\perp оси c)	T , К
0,0121	—	302
—	0,0134	319
0,0130	0,0176	428

Т а б л и ц а 24

Коэффициенты двухфотонного поглощения β , см/Вт, на различных длинах волн

Крис- талл	$\lambda = 266$ нм	$\lambda = 355$ нм [19, 23]	$\lambda = 532$ нм	$\lambda = 1,06$ мкм [20]
KDP	$2,7 \cdot 10^{-10}$ [19]	$5,9 \cdot 10^{-12}$	—	—
DKDP	$(2,7 \pm 0,7) \cdot 10^{-11}$ [21]	$5,4 \cdot 10^{-12}$	—	—
	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-11}$ [22]			
ADP	$(11 \pm 3) \cdot 10^{-11}$ [21]	$6,8 \cdot 10^{-12}$	—	—
	$(6 \pm 1) \cdot 10^{-11}$ [22]			
	$24 \cdot 10^{-11}$ [19]			
CDA	—	$2,81 \cdot 10^{-11}$	—	—
DCDA	—	$(5 \dots 8) \cdot 10^{-11}$	—	—
KDA	—	$4,8 \cdot 10^{-11}$	—	—
RDP	—	$5,9 \cdot 10^{-12}$	—	—
RDA	—	$5,0 \cdot 10^{-11}$	—	—
LiIO $_3$	—	—	$3 \cdot 10^{-11}$ [23]	
LiNbO $_3$	—	—	$(1,6 \dots 2,9) \cdot 10^{-9}$ [23]	
			$1,5 \cdot 10^{-10}$ [24]	
Ag $_3$ AsS $_3$	—	—	—	$2 \cdot 10^{-8}$
CdSe	—	—	—	$2 \cdot 10^{-8}$

KD₂PO₄, дидейтерофосфат калия (DKDP)Отрицательный одноосный кристалл: $n_o > n_e$.Класс симметрии: $\bar{4} 2m$.

Диапазон прозрачности: 0,2 ... 2,0 мкм [29*, 18*]

Дисперсионные зависимости ($T=300$ К) [4] (λ — в мкм):

$$n_o^2 = 1,661145 + \frac{0,586015}{1 - 0,016017/\lambda^2} + \frac{0,691194}{1 - 30/\lambda^2};$$

$$n_e^2 = 1,687499 + \frac{0,447510}{1 - 0,017039/\lambda^2} + \frac{0,596212}{1 - 30/\lambda^2}.$$

Другие формулы даны в [23*, 24*].

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_o	n_e
0,266	1,5546	1,5085
0,347	1,5278	1,4854
0,355	1,5263	1,4841
0,532	1,5085	1,4690
0,658	1,5032	1,4645
0,694	1,5020	1,4635
1,064	1,4928	1,4555
1,315	1,4867	1,4502

Коэффициенты для вычисления температурных зависимостей показателей преломления приведены в табл. 23, а соответствующие формулы на с. 47.

Изменения показателей преломления Δn при охлаждении от комнатной температуры (298 К) до температуры T (К) можно рассчитывать по формулам [5]:

$$\Delta n_o = n_o(T) - n_o(298) = (298 - T) \cdot (n_o^2 - 1,047) \cdot 0,228 \cdot 10^{-4};$$

$$\Delta n_e = n_e(T) - n_e(298) = (298 - T) \cdot n_e^2 \cdot 0,955 \cdot 10^{-5}.$$

Эффективная нелинейность [6]:

$$d_{ooe} = d_{36} \sin \theta \sin 2\varphi;$$

$$d_{eoe} = d_{oee} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\varphi.$$

Нелинейный коэффициент [7, 25]:

$$d_{36}(1,06 \text{ мкм}) = (0,92 \pm 0,04) d_{36}(\text{KDP}) = (4,02 \pm 0,17) \cdot 10^{-13} \text{ м/В}.$$

Пороги поверхностных повреждений:

λ мкм	τ_n , нс	I , 10^9 Вт/см ²
1,06	10	0,5 [26]
1,06	0,25	6 [27]

Линейное поглощение:

λ , мкм	α , см ⁻¹
0,53	0,005 [27]
1,06	0,005 [27]
1,315	0,025 [26*]

Значения коэффициента двухфотонного поглощения β на $\lambda=0,266$ и $0,355$ мкм приведены в табл. 24.

$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, дигидрофосфат аммония (ADP)

Отрицательный одноосный кристалл: $n_o > n_e$.

Класс симметрии: $\bar{4} 2m$.

Диапазон прозрачности: $0,184 \dots 1,5$ мкм [1, 2, 14*].

Дисперсионные зависимости ($T=24,8^\circ\text{C}$) [28] (λ — в мкм):

$$n_o^2 = 2,302842 + \frac{0,011125165}{\lambda^2 - 1/75,450861} + \frac{0,03775616}{0,0025 - 1/\lambda^2};$$

$$n_e^2 = 2,163510 + \frac{0,009616676}{\lambda^2 - 1/76,98751} + \frac{0,01479974}{0,0025 - 1/\lambda^2}.$$

Другие формулы приведены в [4, 23*, 24*].

Типичные значения показателей преломления ($T=25^\circ\text{C}$):

λ , мкм	n_o	n_e
0,213	1,6271	1,5684
0,266	1,5791	1,5261
0,347	1,5499	1,5004
0,355	1,5481	1,4989
0,532	1,5275	1,4815
0,694	1,5193	1,4754
1,064	1,5065	1,4681

Коэффициенты для вычисления температурных зависимостей показателей преломления приведены в табл. 23, а соответствующие формулы на с. 47.

Типичные значения показателей преломления при $T=-100^\circ\text{C}$:

λ , мкм	n_o	n_e
0,213	1,6416	1,5688
0,266	1,5887	1,5264
0,347	1,5575	1,5007
0,355	1,5557	1,4992
0,532	1,5343	1,4818
0,694	1,5260	1,4757
1,064	1,5131	1,4683

Изменения показателей преломления Δn при охлаждении от комнатной температуры (298 К) до температуры T (К) можно рассчитать по формулам [5]:

$$\Delta n_o = n_o(T) - n_o(298) = (298 - T) (n_o' - 3,0297n_o + 2,3004) \cdot 0,713 \cdot 10^{-2};$$

$$\Delta n_e = n_e(T) - n_e(298) = (298 - T) \cdot n_e' \cdot 0,675 \cdot 10^{-6}.$$

Эффективная нелинейность [6]:

$$d_{\text{ооe}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\varphi;$$

$$d_{\text{еoe}} = d_{\text{оee}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\varphi.$$

Нелинейный коэффициент [7]:

$$d_{36}(1,06 \text{ мкм}) = 5,28 \cdot 10^{-13} \text{ м/В.}$$

По данным справочника [25 *]:

$$d_{36}(0,6328 \text{ мкм}) = (5,7 \pm 0,68) \cdot 10^{-13} \text{ м/В;}$$

$$d_{36}(0,6943 \text{ мкм}) = (4,87 \pm 0,28) \cdot 10^{-13} \text{ м/В;}$$

$$d_{36}(0,8250 \text{ мкм}) = (6,6 \pm 1,4) \cdot 10^{-13} \text{ м/В;}$$

$$d_{36}(1,058 \text{ мкм}) = (5,58 \pm 0,28) \cdot 10^{-13} \text{ м/В;}$$

$$d_{36}(1,15 \text{ мкм}) = (5,44 \pm 1,4) \cdot 10^{-13} \text{ м/В.}$$

По данным [30 *]:

$$d_{36}(1,064 \text{ мкм}) = 7,6 \cdot 10^{-13} \text{ м/В.}$$

Пороги поверхностных повреждений:

λ , мкм	τ_n , нс	I , 10^9 Вт/см^2
0,527	0,5	> 10 [29]
0,532	0,03	> 8 [22]
1,06	60	0,5 [30]
1,06	15	6,4 [31]

Линейное поглощение:

λ , мкм	α , см^{-1}
0,184	1,39 [2]
0,266	0,035 [22]
0,79	0,03 [18]
0,89	0,038 [18]
1,06	0,1 [18]

Значения коэффициента двухфотонного поглощения β на $\lambda = 266$ и 355 нм приведены в табл. 24.

Коэффициент теплопроводности κ , $\text{Вт/см} \cdot \text{К}$, [27*]:

κ (\parallel оси c)	(\perp оси c)	T , К
0,0071	0,0126	315
0,0071	0,0134	340

$\text{ND}_4\text{D}_2\text{PO}_4$, дейтерированный дигидрофосфат аммония (DADP, Отрицательный одноосный кристалл: $n_o > n_e$).

Класс симметрии: $\bar{4} 2m$.

Диапазон прозрачности: $0,22 \dots 2,1 \text{ мкм}$ [29*, 32].

Коэффициенты для расчета показателей преломления приведены в табл. 21, 22, а соответствующие формулы на с. 47.

Типичные значения показателей преломления [33]:

λ , мкм	n_o	n_e
0,35	1,5414	1,4923
0,53	1,5198	1,4784
0,69	1,5142	1,4737
1,06	1,5088	1,4712

Эффективная нелинейность [6]:

$$d_{\text{ооe}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\varphi;$$

$$d_{\text{еoe}} = d_{\text{оee}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\varphi.$$

Нелинейный коэффициент [34]:

$$d_{36} = 1,1 d_{36} (\text{KDP}) = (0,52 \pm 0,08) \cdot 10^{-12} \text{ м/В}.$$

CsH₂AsO₄, дигидроарсенат цезия (CDA)

Отрицательный одноосный кристалл: $n_o > n_e$.

Класс симметрии: $\bar{4} 2m$.

Диапазон прозрачности по уровню 0,5 : 0,25 ... 1,43 мкм [35].

Коэффициенты для расчета показателей преломления приведены в табл. 21, 22, а соответствующие формулы на с. 47.

Типичные значения показателей преломления ($T=20^\circ\text{C}$) [35]:

λ , мкм	n_o	n_e
0,3472	1,6027	1,5722
0,5321	1,5733	1,5514
0,6943	1,5632	1,5429
1,0642	1,5516	1,5330

Температурное изменение показателей преломления:

$$\frac{d(n_e^e - n_o^o)}{dT} = (8,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} [35].$$

Эффективная нелинейность [6]:

$$d_{\text{ооe}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\varphi;$$

$$d_{\text{еoe}} = d_{\text{оee}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\varphi.$$

Нелинейный коэффициент [35]:

$$d_{36} (1,06 \text{ мкм}) = (4,02 \pm 0,46) \cdot 10^{-13} \text{ м/В}.$$

Пороги поверхностных повреждений:

λ , мкм	τ_n , нс	I , 10^9 Вт/см^2
0,53	10	0,6 [36]
1,06	10	0,5 [26, 36]
1,06	0,007	> 4 [26]

Коэффициент линейного поглощения α на $\lambda=1,06$ мкм составляет $0,04 \text{ см}^{-1}$ [26, 35].

Значение коэффициента двухфотонного поглощения на $\lambda=355 \text{ нм}$ приведено в табл. 24.

CsD₂AsO₄, дидейтероарсенат цезия (DCDA)

Отрицательный одноосный кристалл: $n_o > n_e$.

Класс симметрии: $\bar{4} 2m$.

Диапазон прозрачности по уровню 0,5 : 0,27 ... 1,66 мкм [35].

Коэффициенты для расчета показателей преломления приведены в табл. 21, 22, а соответствующие формулы на с. 47.

Типичные значения показателей преломления ($T=20^\circ\text{C}$) [35]:

λ , мкм	n_o	n_e
0,3472	1,5895	1,5685
0,5321	1,5681	1,5495
0,6943	1,5596	1,5418
1,0642	1,5503	1,5326

Температурное изменение показателей преломления:

$$\frac{d(n_2^e - n_1^o)}{dT} = (7,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ [35]}.$$

Эффективная нелинейность [6]:

$$d_{\text{ооe}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\varphi;$$

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{оee}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\varphi.$$

Нелинейный коэффициент [35]:

$$d_{36} (1,06 \text{ мкм}) = (4,02 \pm 0,46) \cdot 10^{-13} \text{ м/В}.$$

Порог поверхностных повреждений $I > 2,6 \cdot 10^8 \text{ Вт/см}^2$ при $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$ и $\tau_{\text{и}} = 12 \text{ нс}$ [35].

Коэффициенты линейного поглощения α на $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$ по данным работ [26] и [35] составляют 0,01 и 0,02 см^{-1} соответственно.

Значение коэффициента двухфотонного поглощения β на $\lambda = 355 \text{ нм}$ приведено в табл. 24.

KN_2AsO_4 , дигидроарсенат калия (KDA)

Отрицательный одноосный кристалл: $n_o > n_e$.

Класс симметрии: 4 2m.

Диапазон прозрачности: 0,216 ... 1,45 мкм [29*, 34].

Коэффициенты для расчета показателей преломления приведены в табл. 21, 22, а соответствующие формулы на с. 47.

Типичные значения показателей преломления [31*]:

λ , мкм	n_o	n_e
0,4861	1,5762	1,5252
0,5460	1,5707	1,5206
0,5893	1,5674	1,5179
0,6563	1,5632	1,5146

Эффективная нелинейность [6]:

$$d_{\text{ооe}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\varphi;$$

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{оee}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\varphi.$$

Нелинейный коэффициент [33]:

$$d_{36} (0,69 \text{ мкм}) = 1,06 d_{36} (\text{KDP}) = (0,52 \pm 0,03) \cdot 10^{-12} \text{ м/В}.$$

Значение коэффициента двухфотонного поглощения приведено в табл. 24.

RbH₂AsO₄ дигидроарсенат рубидия (RDA)

Отрицательный одноосный кристалл: $n_o > n_e$.

Класс симметрии: $\bar{4} 2m$.

Диапазон прозрачности по уровню 0,5: 0,26 ... 1,46 мкм [37].

Коэффициенты для расчета показателей преломления приведены в табл. 21, 22, а соответствующие формулы на с. 47.

Типичные значения показателей преломления ($T=20^\circ\text{C}$):

λ , мкм	n_o	n_e
0,347	1,60	1,55
0,694	1,55	1,50

Эффективная нелинейность [6]:

$$d_{\text{ооe}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\varphi;$$

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{оee}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\varphi.$$

Нелинейный коэффициент [38]:

$$d_{36}(0,694 \text{ мкм}) = (3,94 \pm 0,4) \cdot 10^{-13} \text{ м/В.}$$

Порог поверхностных повреждений при $\lambda=0,6943$ мкм и $\tau_{\text{и}}=10$ нс равен $3,5 \cdot 10^8$ Вт/см² [38].

Линейное поглощение [37]:

λ , мкм	α , см ⁻¹
0,3547	0,05
0,5321	0,03
1,0642	0,035

Значение коэффициента двухфотонного поглощения приведено в табл. 24.

RbH₂PO₄ дигидрофосфат рубидия (RDP)

Отрицательный одноосный кристалл: $n_o > n_e$.

Класс симметрии: $\bar{4} 2m$.

Диапазон прозрачности по уровню 0,5: 0,22 ... 1,4 мкм [39].

Дисперсионные зависимости [31*] (λ — в мкм):

$$n_o^2 = 1 + \frac{1,2068}{1 - 0,01539/\lambda^2};$$

$$n_e^2 = 1 + \frac{1,15123}{1 - 0,010048/\lambda^2}.$$

Другие формулы приведены в [23*, 24*].

Типичные значения показателей преломления [33]:

λ , мкм	n_o	n_e
0,35	1,5284	1,4969
0,53	1,5083	1,4789
0,69	1,5020	1,4735
1,06	1,4973	1,4693

Эффективная нелинейность [6]:

$$d_{\text{ооо}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\varphi;$$

$$d_{\text{еоо}} = d_{\text{оое}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\varphi.$$

Нелинейный коэффициент [7, 40]:

$$d_{36}(1,06 \text{ мкм}) = (0,92 \pm 0,1) d_{36}(\text{KDP}) = (4,02 \pm 0,46) \cdot 10^{-13} \text{ м/В}.$$

Пороги поверхностных повреждений:

λ , мкм	τ_n , нс	I , 10^9 Вт/см^2
0,6943	10	0,2 [39]
1,06	12	$> 0,3$ [41]

Линейное поглощение [42]:

λ , мкм	α , см^{-1}
0,3547	0,015
0,5321	0,01
1,064	0,04

Значение коэффициента двухфотонного поглощения приведено в табл. 24.

LiIO_3 , йодат лития.

Отрицательный одноосный кристалл: $n_o > n_e$.

Класс симметрии: 6.

Диапазон прозрачности: 0,3 ... 6,0 мкм [43, 32*].

Дисперсионные зависимости [44] (λ — в мкм):

$$n_o^2 = 3,415716 + \frac{0,047031}{\lambda^2 - 0,035306} - 0,008801\lambda^2;$$

$$n_e^2 = 2,918692 + \frac{0,035145}{\lambda^2 - 0,028224} - 0,003641\lambda^2.$$

Практически такие же значения показателей преломления дают формулы из [45] (λ — в мкм, ошибка $\pm 0,00005$):

$$n_o^2 = 2,083648 + \frac{1,332068\lambda^2}{\lambda^2 - 0,035306} - 0,008525\lambda^2;$$

$$n_e^2 = 1,673463 + \frac{1,245229\lambda^2}{\lambda^2 - 0,028224} - 0,003641\lambda^2;$$

В УФ-области длин волн 293 ... 335 нм используются следующие формулы [46] (λ — в мкм, ошибка $\pm 0,0007$):

$$n_o^2 = 3,425834 + \frac{0,046664}{\lambda^2 - 0,032155} - 0,010334\lambda^2;$$

$$n_e^2 = 2,913366 + \frac{0,034267}{\lambda^2 - 0,033230}.$$

Другие менее точные формулы приведены в [47, 48, 8].

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_o	n_e
0,347	1,9918	1,8165
0,355	1,9832	1,8104
0,532	1,8982	1,7480
0,633	1,8818	1,7354
0,694	1,8754	1,7304
1,064	1,8571	1,7165

Эффективная нелинейность [6]:

$$d_{\text{оое}} = d_{15} \sin \theta.$$

Нелинейный коэффициент [7]:

$$d_{15}(1,06 \text{ мкм}) = d_{31} = -(5,53 \pm 0,3) \cdot 10^{-12} \text{ м/В}.$$

По данным работы [8] и справочника [30*]:

$$\begin{aligned} d_{33}(2,12 \text{ мкм}) &= 6,41 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}; \\ d_{33}(1,318 \text{ мкм}) &= -6,75 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}; \\ d_{33}(1,06 \text{ мкм}) &= -7,02 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}; \\ d_{31}(2,12 \text{ мкм}) &= -6,43 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}; \\ d_{31}(1,318 \text{ мкм}) &= -6,82 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}; \\ d_{31}(1,06 \text{ мкм}) &= -7,11 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}; \\ d_{31}(0,6943 \text{ мкм}) &= -8,41 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}. \end{aligned}$$

Пороги повреждений:

λ , мкм	τ_n , нс	Режим	I , 10^9 Вт/см ²
0,53	15	—	0,04 [49]
0,53	0,015	—	7 [50]
0,53	0,045	—	15 [51]
0,53	0,03	Многократные импульсы	5 [52]
0,53	0,1	—«—	1 [52]
1,06	20	—	0,06 [53]
1,06	100	—	0,25 [54]
1,06	0,045	Однократные импульсы	25 ... 30 [51, 52]
1,06	0,12	—«—	10 ... 15 [52]
1,06	0,045	Многократные импульсы, наличие синхронизма для ГВГ	7 [52]
1,06	0,045	Многократные импульсы, отсутствие синхронизма для ГВГ	20 [52]

1,06	0,12	Множественные им- пульсы, наличие синхронизма для ГВГ	3	[52]
1,06	0,12	Множественные им- пульсы, отсутст- вие синхронизма для ГВГ	8	[52]

Линейное поглощение:

λ , мкм	α , см ⁻¹
0,347	0,1 ... 0,3 [43]
1,08	0,06 [55]

Данные о порогах возникновения ВКР на $\lambda=532$ нм и пико секундного континуума приведены в табл. 58 и 60, § 3.7.

Значения коэффициента двухфотонного поглощения β приведены в табл. 24.

LiNbO₃, ниобат лития.

Отрицательный одноосный кристалл: $n_o > n_e$.

Класс симметрии: $3m$.

Диапазон прозрачности: 0,33 ... 5,5 мкм [33*].

Дисперсионные зависимости [56] (λ — в мкм, T — в К):

$$n_o^2 = 4,9130 + \frac{0,1173 + 1,65 \cdot 10^{-8} T^2}{\lambda^2 - (0,212 + 2,7 \cdot 10^{-8} T^2)^2} - 2,78 \cdot 10^{-2} \lambda^2;$$

$$n_e^2 = 4,5567 + 2,605 \cdot 10^{-7} T^2 + \frac{0,097 + 2,7 \cdot 10^{-8} T^2}{\lambda^2 - (0,201 + 5,4 \cdot 10^{-8} T^2)^2} - 2,24 \cdot 10^{-2} \lambda^2.$$

Другие формулы приведены в [45, 57, 58].

Типичные значения показателей преломления:

При $T=25^\circ\text{C}$:

λ , мкм	n_o	n_e
0,532	2,3251	2,2330
0,633	2,2884	2,2019
0,694	2,2743	2,1890
1,064	2,2340	2,1554
2,0	2,1981	2,1249
3,0	2,1624	2,0951
4,0	2,1156	2,0561
5,0	2,0549	2,0059

при $T=200^\circ\text{C}$:

λ , мкм	n_o	n_e
0,532	2,3279	2,2455
0,633	2,2901	2,2127
0,694	2,2756	2,2001

1,064	2,2345	2,1644
2,0	2,1983	2,1334
3,0	2,1625	2,1035
4,0	2,1156	2,0647
5,0	2,0550	2,0147

Эффективная нелинейность [6]:

$$d_{\text{ооe}} = d_{15} \sin \theta - d_{22} \cos \theta \sin 3\varphi;$$

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{оee}} = d_{22} \cos^2 \theta \cos 3\varphi.$$

Нелинейные коэффициенты:

$$d_{15}(1,06 \text{ мкм}) = d_{31} = 5,44 \cdot 10^{-12} \text{ м/В [7];}$$

$$d_{22}(1,06 \text{ мкм}) = d_{33} = 2,76 \cdot 10^{-12} \text{ м/В [7,25].}$$

По данным работы [8] и справочника [30*]:

$$d_{31}(1,15 \text{ мкм}) = 5,77 \cdot 10^{-12} \text{ м/В.}$$

$$d_{31}(1,06 \text{ мкм}) = 5,95 \cdot 10^{-12} \text{ м/В;}$$

$$d_{33}(2,12 \text{ мкм}) = 29,1 \cdot 10^{-12} \text{ м/В;}$$

$$d_{33}(1,318 \text{ мкм}) = 31,8 \cdot 10^{-12} \text{ м/В;}$$

$$d_{33}(1,15 \text{ мкм}) = 33,4 \cdot 10^{-12} \text{ м/В;}$$

$$d_{33}(1,06 \text{ мкм}) = 34,4 \cdot 10^{-12} \text{ м/В.}$$

Пороги поверхностных повреждений:

λ , мкм	τ_n , нс	I , 10^9 Вт/см ²
0,53	15	0,01 [49]
0,53	0,007	> 10 [59]
0,6	5	0,35 [60]
0,6	0,001	70 [60]
1,06	30	0,12 [61]
		При просвет- вленных гра- нях 15 ... 20 [62]
1,06	0,006	10 [63]
1,064	10	0,05 ... 0,06 [64]

Линейное поглощение,

λ , мкм	α , см ⁻¹
0,5145	0,025 [65]
0,8 ... 2,6	0,08 [18]

Коэффициент двухфотонного поглощения при накачке излучениями с ω_1 и ω_2 [23]:

$$\beta = 7,5 \cdot 10^{-9} \text{ см/Вт} \cdot \text{эВ} [\hbar(\omega_1 + \omega_2) - 4,45 \text{ эВ}] \text{ — для о-волны;}$$

$$\beta = 10^{-8} \text{ см/Вт} \cdot \text{эВ} [\hbar(\omega_1 + \omega_2) - 4,37 \text{ эВ}] \text{ — для е-волны.}$$

На длине волны 532 нм ($\omega_1 = \omega_2$; $2\hbar\omega = 4,66$ эВ):

$$\beta_o = 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ см/Вт};$$

$$\beta_e = 2,9 \cdot 10^{-9} \text{ см/Вт}.$$

Данные о порогах генерации ВКР на $\lambda = 532$ нм и пикосекундного континуума на $\lambda = 1,064$ мкм приведены в табл. 58 и 60, § 3.7.

Коэффициент теплопроводности κ , Вт/см·К [34*]:

κ	T , К
0,126	100
0,046	300

$K_3Li_2Nb_5O_{15}$, ниобат калия-лития (клин)

Отрицательный одноосный кристалл: $n_o > n_e$.

Класс симметрии: $4mm$.

Диапазон прозрачности: 0,4 ... 5 мкм [66].

Дисперсионные зависимости (λ — в мкм) [31*]:

$$n_o^2 = 1 + \frac{3,708}{1 - 0,04601/\lambda^2};$$

$$n_e^2 = 1 + \frac{3,349}{1 - 0,03564/\lambda^2}.$$

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_o	n_e
0,450	2,405	2,251
0,532	2,328	2,197
0,6328	2,272	2,163
1,064	2,208	2,112

Эффективная нелинейность [3*]:

$$d_{ооe} = d_{15} \sin \theta;$$

$$d_{eoe} = d_{оee} = 0.$$

Нелинейный коэффициент [31*, 66]:

$$d_{15} = (6,2 \pm 1,1) \cdot 10^{-12} \text{ м/В};$$

$$d_{31} = (7,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-12} \text{ м/В};$$

$$d_{33} = (12,7 \pm 1,8) \cdot 10^{-12} \text{ м/В}.$$

$BeSO_4 \cdot 4H_2O$

Отрицательный одноосный кристалл: $n_o > n_e$.

Класс симметрии: $4 2m$.

Диапазон прозрачности: 0,19 ... 1,37 мкм [67].

Дисперсионные зависимости [67] (λ — в мкм):

$$n_o^2 = 1 + \frac{1,127884}{1 - 0,011509/\lambda^2};$$

$$n_e^2 = 1 + \frac{1,025413}{1 - 0,008925/\lambda^2}.$$

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_o	n_e
0,266	1,5320	1,4743
0,355	1,4971	1,4504
0,532	1,4750	1,4349
0,633	1,4701	1,4314
1,064	1,4627	1,4260

Эффективная нелинейность [6]:

$$d_{ооe} = d_{36} \sin \theta \sin 2\varphi;$$

$$d_{eoe} = d_{оee} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\varphi.$$

Нелинейный коэффициент [67]:

$$d_{36} = 0,62d_{36}(\text{KDP}) = 2,5 \cdot 10^{-13} \text{ м/В}.$$

Порог пробоя при $\lambda = 532 \text{ нм}$, $\tau_n = 10 \text{ нс}$, $f = 10 \text{ Гц}$ равен 10^8 Вт/см^2 [67].

β -BaB₂O₄, бета-борат бария (ВВО)

Отрицательный одноосный кристалл: $n_o > n_e$.

Класс симметрии: $3m$.

Диапазон прозрачности по уровню 0,5: 0,198 ... 2,6 мкм [68].

Дисперсионные зависимости [437] (λ — в мкм):

$$n_o^2 = 2,7405 + \frac{0,0184}{\lambda^2 - 0,0179} - 0,0155\lambda^2;$$

$$n_e^2 = 2,3730 + \frac{0,0128}{\lambda^2 - 0,0156} - 0,0044\lambda^2.$$

Другие формулы приведены в [68, 69].

Типичные значения показателей преломления [437]:

λ , мкм	n_o	n_e
0,213	1,8465	1,6742
0,266	1,7571	1,6139
0,355	1,7055	1,5775
0,532	1,6750	1,5555
1,064	1,6551	1,5426

Температурные зависимости показателей преломления [437]:

$$\lambda, \text{ мкм} \quad \frac{dn_o}{dT}, (^\circ\text{C})^{-1} \quad \frac{dn_e}{dT}, (^\circ\text{C})^{-1}$$

$$0,4 \dots 1,0 \quad -16,6 \cdot 10^{-6} \quad -9,3 \cdot 10^{-6}$$

Эффективная нелинейность [437]:

$$d_{ооe} = d_{15} \sin \theta - d_{22} \cos \theta \sin 3\varphi;$$

$$d_{eoe} = d_{оee} = d_{22} \cos^2 \theta \cos 3\varphi.$$

Нелинейные коэффициенты [69]:

$$d_{22} = \pm (4,1 \pm 0,2) d_{36}(\text{KDP}) = \pm (1,78 \pm 0,09) \cdot 10^{-12} \text{ м/В};$$

$$d_{15} = (0,070 \pm 50\%) d_{22}(\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4) = (0,12 \pm 0,06) \cdot 10^{-12} \text{ м/В}.$$

Порог пробоя:

λ , мкм	τ_n , нс	I , ГВТ/см ²
0,266	8	$>0,12$ [68]
0,355	8	$>0,4$ [438]
0,355	8	19 [459]
0,53	0,25	10 [70]
0,53	8	32 [459]
0,53	10	7 [439]
0,6943	0,02	10 [69]
1,054	0,005	>50 [440]
1,06	7,5	2 [69]
1,064	0,1	10 [70]
1,064	1	$13,5 \pm 2$ [70]
1,064	10	5 [70]
1,064	10	4,6 [439]
1,064	14	23 [459]

Ag_3AsS_3 , прустит

Отрицательный одноосный кристалл: $n_o > n_e$.

Класс симметрии: $3m$.

Диапазон прозрачности, 0,6 ... 13 мкм [71].

Дисперсионные зависимости [72] (λ — в мкм):

$$n_o^2 = 9,220 + \frac{0,4454}{\lambda^2 - 0,1264} - \frac{1733}{1000 - \lambda^2};$$

$$n_e^2 = 7,007 + \frac{0,3230}{\lambda^2 - 0,1192} - \frac{660}{1000 - \lambda^2}.$$

Другие формулы приведены в [57, 71].

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_o	n_e
0,694	2,9563	2,6903
1,06	2,8163	2,5822
10,6	2,6966	2,5033

Эффективная нелинейность [6]:

$$d_{\text{ооe}} = d_{15} \sin \theta - d_{22} \cos \theta \sin 3\varphi;$$

$$d_{\text{еoe}} = d_{\text{оee}} = d_{22} \cos^2 \theta \cos 3\varphi.$$

Нелинейные коэффициенты [29, 73]:

$$d_{15}(10,6 \text{ мкм}) = 0,13d_{36}(\text{GaAs}) = (1,13 \pm 0,25) \cdot 10^{-11} \text{ м/В};$$

$$d_{22}(10,6 \text{ мкм}) = 0,2d_{36}(\text{GaAs}) = (1,80 \pm 0,25) \cdot 10^{-11} \text{ м/В}.$$

Значение нелинейного коэффициента $d_{36}(\text{GaAs}) = 9 \cdot 10^{-11} \text{ м/В}$ [7].

Пороги поверхностных повреждений:

λ , мкм	τ_n , нс	I , 10^6 Вт/см ²
0,694	14	3 [74]
0,694	25	10 [20]

1,06	18 ... 20	20	[74, 20]
1,064	0,02	$6 \cdot 10^3$	[75]
10,6	220	50	[74]

Линейное поглощение при $T=300$ К:

λ , мкм	α , см ⁻¹	
0,593 (е-луч)	16,1	[76]
0,633 (о)	1,83	[76]
0,633 (е)	1,59	[76]
0,679 (о)	0,83	[76]
0,694	0,2	[77]
1,06	0,1	[77]
9,2	0,29	[78]
9,3 (е)	0,53	[77]
10,6	0,45	[79]
14	100	[80]
20	10	[80]

Линейное поглощение при $T=77$ К [76]:

λ , мкм	α , см ⁻¹
0,593 (е)	0,89
0,633 (о)	0,81
0,633 (е)	0,64
0,679 (о)	0,64
9,3 (е)	0,25

Значение коэффициента двухфотонного поглощения на $\lambda=1,06$ мкм приведено в табл. 24.

Ag₃SbS₃, пираргирит

Отрицательный одноосный кристалл: $n_o > n_e$.

Класс симметрии: $3m$.

Диапазон прозрачности 0,7 ... 14 мкм [81].

Дисперсионные зависимости [81] (λ — в мкм):

$$n_o^2 = 1 + \frac{6,585\lambda^2}{\lambda^2 - 0,16} + \frac{0,1133\lambda^2}{\lambda^2 - 225};$$

$$n_e^2 = 1 + \frac{5,845\lambda^2}{\lambda^2 - 0,16} + \frac{0,0202\lambda^2}{\lambda^2 - 225}.$$

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_o	n_e
1,06	2,9458	2,7956
5,3	2,7580	2,6221
10,6	2,7352	2,6140

Эффективная нелинейность [6]:

$$d_{ooe} = d_{15} \sin \theta - d_{22} \cos \theta \sin 3\varphi;$$

$$d_{eoe} = d_{oeel} = d_{22} \cos^2 \theta \cos 3\varphi.$$

Нелинейные коэффициенты [7, 82, 83]:

$$d_{15}(10,6 \text{ мкм}) = (8,4 \pm 2,9) \cdot 10^{-12} \text{ м/В};$$

$$d_{22}(10,6 \text{ мкм}) = (9,2 \pm 2,9) \cdot 10^{-12} \text{ м/В}.$$

Пороги поверхностных повреждений [74]:

λ , мкм	$\tau_{\text{и}}$, нс	I , 10^7 Вт/см ²
1,06	17,5	2
10,6	200	5

Линейное поглощение:

λ , мкм	α , см ⁻¹
10,6	0,5 [73]
0,75 ... 13,5	< 1 [81]

AgGaS₂, тиогаллат серебра

Отрицательный одноосный кристалл: $n_o > n_e$.

Класс симметрии: $\bar{4} 2m$.

Диапазон прозрачности: 0,5 ... 13 мкм [84].

Дисперсионные зависимости [85] (λ — в мкм):

$$n_o^2 = 3,6280 + \frac{2,1686\lambda^2}{\lambda^2 - 0,1003} + \frac{2,1753\lambda^2}{\lambda^2 - 950};$$

$$n_e^2 = 4,0172 + \frac{1,5274\lambda^2}{\lambda^2 - 0,1310} + \frac{2,1699\lambda^2}{\lambda^2 - 950}.$$

Другие формулы приведены в [84, 86].

Температурные зависимости показателей преломления [87] (λ — в мкм):

$$\frac{dn_o}{dT} = \frac{1}{2n_o} \left[\frac{-39,88}{1 - 0,0676/\lambda^2} + \frac{112,20}{(1 - 0,0676/\lambda^2)^2} \right];$$

$$\frac{dn_e}{dT} = \frac{1}{2n_e} \left[\frac{25,50}{1 - 0,107584/\lambda^2} + \frac{5,72}{1 - 0,107584/\lambda^2} \right].$$

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_o	n_e
0,53	2,6458	2,6227
0,694	2,5231	2,4727
1,06	2,4508	2,3966
5,3	2,3954	2,3421
10,6	2,3466	2,2924

Эффективная нелинейность [6]:

$$d_{\text{ооe}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\varphi;$$

$$d_{\text{еoe}} = d_{\text{оee}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\varphi.$$

Нелинейный коэффициент [7, 88]:

$$d_{36}(10,6 \text{ мкм}) = (0,15 \pm 0,03) d_{36}(\text{GaAs}) = (1,34 \pm 0,25) \cdot 10^{-11} \text{ м/В}.$$

Пороги поверхностных повреждений:

λ , мкм	τ_n , нс	I , 10^6 Вт/см ²
0,59	500	2 [89]
0,59	$50 \cdot 10^3$	2 [90]
0,625	500	3 [89]
0,694	10	20 [86]
0,694	30	4 [91]
1,06	35	25 [86]
1,064	0,02	$3 \cdot 10^3$ [92]
10,6	150	10 [90]
10,6	200	25 [78]

Коэффициент линейного поглощения α в диапазоне длин волн 0,6 ... 12 мкм составляет менее $0,09 \text{ см}^{-1}$.

HgGa₂S₄, тигаллат ртути

Отрицательный одноосный кристалл: $n_o > n_e$.

Класс симметрии: $\bar{4}$.

Диапазон прозрачности: 0,5 ... 13 мкм [94].

Дисперсионные зависимости [94] (λ — в мкм):

$$n_o^2 = 6,20815221 + \frac{63,70629851}{\lambda^2 - 225} + \frac{0,23698804}{\lambda^2 - 0,09568646};$$

$$n_e^2 = 6,00902670 + \frac{63,28065920}{\lambda^2 - 225} + \frac{0,21489656}{\lambda^2 - 0,09214633}.$$

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_o	n_e
0,5495	2,6592	2,5979
0,6500	2,5796	2,5264
1,0760	2,477	2,432
3,540	2,439	2,398
11,000	2,369	2,329

Эффективная нелинейность [6]:

$$d_{\text{ооe}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\varphi + d_{31} \sin \theta \cos 2\varphi;$$

$$d_{\text{еоe}} = d_{\text{оee}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\varphi - d_{31} \sin 2\theta \sin 2\varphi.$$

Нелинейные коэффициенты:

$$d_{36}(1,064 \text{ мкм}) = 1,8d_{36}(\text{AgGaS}_2) \pm 15\% = (3,52 \pm \pm 0,53) \cdot 10^{-11} \text{ м/В [95];}$$

$$d_{31}(1,064 \text{ мкм}) = 0,6d_{36}(\text{AgGaS}_2) \pm 15\% = (1,17 \pm 0,18) \cdot 10^{-11} \text{ м/В [95];}$$

$$d_{36}(1,064 \text{ мкм}) = 80d_{11}(\text{SiO}_2) \pm 30\% = (2,68 \pm 0,80) \cdot 10^{-11} \text{ м/В [96].}$$

Линейное поглощение:

λ , мкм	α , см^{-1}
0,53	8 ... 11 [95, 96]
1,06	0,1 [95]

AgGaSe₂

Отрицательный одноосный кристалл: $n_o > n_e$.

Класс симметрии: $\bar{4} 2m$.

Диапазон прозрачности: 0,71 ... 18 мкм [97].

Дисперсионные зависимости [85] (λ — в мкм):

$$n_o^2 = 4,6453 + \frac{2,2057\lambda^2}{\lambda^2 - 0,1879} + \frac{1,8377\lambda^2}{\lambda^2 - 1600};$$

$$n_e^2 = 5,2912 + \frac{1,3970\lambda^2}{\lambda^2 - 0,2845} + \frac{1,9282\lambda^2}{\lambda^2 - 1600}.$$

Другие формулы приведены в [98].

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_o	n_e
1,06	2,7005	2,6759
5,3	2,6140	2,5823
10,6	2,5915	2,5585

Температурное изменение показателей преломления [99]:

$$\frac{dn_2}{dT} - \frac{dn_1}{dT} = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ (K)}^{-1}.$$

Эффективная нелинейность [6]:

$$d_{\text{ооe}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\varphi;$$

$$d_{\text{еoe}} = d_{\text{оee}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\varphi.$$

Нелинейный коэффициент [7, 100]:

$$d_{36}(10,6 \text{ мкм}) = (0,37 \pm 0,04) d_{36}(\text{GaAs}) = (3,3 \pm 0,3) \cdot 10^{-11} \text{ м/В}.$$

Пороги поверхностных повреждений:

λ , мкм	τ_n , нс	Режим	I , МВт/см ²	
1,06	35	Одиночные импульсы	30	[98]
1,06	35	Повторяющиеся импульсы	11	[98]
10,6	200	—	> 2	[97]

Коэффициент линейного поглощения α на $\lambda = 10,6$ мкм составляет $0,089 \text{ см}^{-1}$ [99].

ZnGeP₂

Положительный одноосный кристалл: $n_e > n_o$.

Класс симметрии: $\bar{4} 2m$.

Диапазон прозрачности: 0,74 ... 12 мкм [101].

Дисперсионные зависимости [102] (λ — в мкм):

$$n_o^2 = 4,47330 + \frac{5,26576\lambda^2}{\lambda^2 - 0,13381} + \frac{1,49085\lambda^2}{\lambda^2 - 662,55};$$

$$n_e^2 = 4,63318 + \frac{5,34215\lambda^2}{\lambda^2 - 0,14255} + \frac{1,45795\lambda^2}{\lambda^2 - 662,55}.$$

Другие формулы приведены в [85].

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_o	n_e
1,06	3,2324	3,2786
5,3	3,1141	3,7524
10,6	3,0725	3,1119

Эффективная нелинейность [6]:

$$d_{oeo} = d_{eoo} = d_{36} \sin \theta \sin 2\varphi;$$

$$d_{eeo} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\varphi.$$

Нелинейный коэффициент [7, 101]:

$$d_{36}(10,6 \text{ мкм}) = (0,83 \pm 0,14) d_{36}(\text{GaAs}) = (7,54 \pm 1,3) \cdot 10^{-11} \text{ м/В}.$$

Порог разрушения:

λ , мкм	τ_n	I , Вт/см ²	
1,06	30 нс	$3 \cdot 10^6$	[101]
2,79	150 пс	$3 \cdot 10^{10}$	[103]
5	Непрерывное излучение	$2,5 \cdot 10^5$	[104]
10,6	0,1 ... 10 мс	$(60 \dots 65) \cdot 10^6$	[105]
10,6	Непрерывное излучение	$> 10^3$	[105]
10,6	То же	$2 \cdot 10^5$	[104]
10,6	2 нс	10^9	[106]
10,6	200 нс	$6 \cdot 10^7$	[104]

Линейное поглощение:

λ , мкм	α , см ⁻¹	
1	3	[107]
2,5 ... 8,5	$> 0,2$	[108]
3,4	0,2 ... 0,41	[104]
3,5	0,4	[109]
5	0,1 ... 0,32	[104]
8,3 ... 9,5	$< 0,3$	[108]
2,5 ... 12	$< 0,1$	[105]
10,6	0,9	[109]
10,6	0,46 ... 0,83	[104]

CdGeAs₂

Положительный одноосный кристалл: $n_e > n_o$.

Класс симметрии: $\bar{4}2m$.

Диапазон прозрачности: 2,4 ... 18 мкм [110].

Дисперсионные зависимости [85] (λ — в мкм):

$$n_o^2 = 10,1064 + \frac{2,2988\lambda^2}{\lambda^2 - 1,0872} + \frac{1,6247\lambda^2}{\lambda^2 - 1370};$$

$$n_e^2 = 11,8018 + \frac{1,2152\lambda^2}{\lambda^2 - 2,6971} + \frac{1,6922\lambda^2}{\lambda^2 - 1370}.$$

Другие формулы приведены в [110, 111].

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_o	n_e
5,3	3,5304	3,6209
10,6	3,5046	3,5911

Эффективная нелинейность [6]:

$$d_{oeo} = d_{eoo} = d_{36} \sin \theta \sin 2\varphi;$$

$$d_{eeo} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\varphi.$$

Нелинейный коэффициент [7, 112]:

$$d_{36}(10,6 \text{ мкм}) = (2,6 \pm 0,4) d_{36}(\text{GaAs}) = (2,35 \pm 0,38) \cdot 10^{-10} \text{ м/В}.$$

Порог поверхностных повреждений при $\lambda = 10,6$ мкм, $\tau_n = 160$ нс составляет $4 \cdot 10^7$ Вт/см² [111], при воздействии непрерывного излучения с $\lambda = 10,6$ мкм порог пробоя равен 10^3 Вт/см² [110].

Линейное поглощение:

λ , мкм	α , см ⁻¹	
5,85	1,5	[113]
9 ... 11	0,23	[111]
2,4 ... 9; 11 ... 18	$> 0,23$	[111]
10,6 ... 11,7	0,5	[113]
5	0,4 ($T = 77$ К)	[114]
10	0,1 ($T = 77$ К)	[114]
10,6 ... 11,7	0,14 ($T = 77$ К)	[113]

GaSe, селенид галлия

Отрицательный одноосный кристалл: $n_o > n_e$.

Класс симметрии: $\bar{6} 2m$.

Диапазон прозрачности: 0,65 ... 18 мкм [115].

Дисперсионные зависимости [116] (λ — в мкм):

$$n_o^2 = -\frac{0,06}{\lambda^4} + \frac{0,526}{\lambda^2} + 8,038 - 8,2 \cdot 10^{-4} \lambda^2 - 2,7 \cdot 10^{-6} \lambda^4;$$

$$n_e^2 = 6,06 + \frac{0,5754}{\lambda^2 - 0,0453} - 1,04 \cdot 10^{-3} \lambda^2.$$

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_o	n_e
0,694	2,9784	2,7163
1,06	2,9082	2,5676
1,18	2,8955	2,5467
2,36	2,8506	2,4816
2,65	2,8471	2,4769
5,3	2,8340	2,4599
10,6	2,8136	2,4389

Эффективная нелинейность [6]:

$$d_{\text{ооe}} = d_{22} \cos \theta \sin 3\varphi;$$

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{оee}} = d_{22} \cos^2 \theta \cos 3\varphi.$$

Нелинейный коэффициент [7, 101, 115]:

$$d_{22}(10,6 \text{ мкм}) = (3 \pm 0,6) d_{15}(\text{CdSe}) = (5,44 \pm 0,1) \cdot 10^{-11} \text{ м/В}.$$

Порог поверхностных повреждений:

λ , мкм	$\tau_{\text{н}}$, нс	I , 10^7 Вт/см ²
0,694	25	2 [117]
1,06	10	3,5 [118]

Линейное поглощение:

λ , мкм	α , см ⁻¹	
0,7	<0,3	[117]
1,06	0,25...0,45	[116, 119]
1,9	0,1	[119]

CdSe, селенид кадмия

Положительный одноосный кристалл: $n_e > n_o$.

Класс симметрии: *6mm*.

Диапазон прозрачности: 0,75 ... 20 мкм [120].

Дисперсионные зависимости [85] (λ — в мкм):

$$n_o^2 = 4,2243 + \frac{1,768\lambda^2}{\lambda^2 - 0,227} + \frac{3,12\lambda^2}{\lambda^2 - 3380};$$

$$n_e^2 = 4,2009 + \frac{1,8875\lambda^2}{\lambda^2 - 0,2171} + \frac{3,6461\lambda^2}{\lambda^2 - 3629}.$$

Другая формула приведена в [121].

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_o	n_e
1,06	2,5375	2,5572
2,36	2,4622	2,4818
10,6	2,4266	2,4445

Эффективная нелинейность [6]:

$$d_{\text{оeo}} = d_{\text{eoo}} = d_{15} \sin \theta.$$

Нелинейный коэффициент [7, 109]:

$$d_{15}(10,6 \text{ мкм}) = (0,2 \pm 0,02) d_{36}(\text{GaAs}) = (1,8 \pm 0,18) \cdot 10^{-11} \text{ м/В}.$$

Пороги поверхностных повреждений:

λ , мкм	$\tau_{\text{н}}$, нс	I , 10^7 Вт/см ²
1 ... 2	10	>5 [122]
1,833	300	3 [123]
2,36	30	5 [120]

Линейное поглощение:

λ , мкм	α , см ⁻¹
1,06	0,02 [20]
1,32	0,01 [20]
4	0,04 [124]
10,6	0,016 [124]
16	0,72 [125]

Двухфотонное поглощение [20]:

λ , мкм	β , см/Вт
1,06	$2 \cdot 10^{-8}$
1,32	$2 \cdot 10^{-9}$

Теплопроводность:

$$\kappa = 0,043 \text{ Вт/(см} \cdot \text{К)} \text{ при } T = 300 \text{ К} [34*].$$

HgS, киноварь.

Положительный одноосный кристалл: $n_e > n_o$.

Класс симметрии: 32.

Диапазон прозрачности: 0,63 ... 13,5 мкм [126].

Дисперсионные зависимости [85] (λ — в мкм):

$$n_o^2 = 4,1506 + \frac{2,7896\lambda^2}{\lambda^2 - 0,1328} + \frac{1,1378\lambda^2}{\lambda^2 - 705};$$

$$n_e^2 = 4,0101 + \frac{4,3736\lambda^2}{\lambda^2 - 0,1284} + \frac{1,5604\lambda^2}{\lambda^2 - 705}.$$

Другие формулы приведены в [126].

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_o	n_e
0,694	2,8287	3,1579
1,06	2,7041	2,9909
5,3	2,6280	2,8877
10,6	2,5938	2,8448

Эффективная нелинейность [6]:

$$d_{\text{оео}} = d_{\text{еоо}} = d_{11} \cos \theta \cos 3\varphi;$$

$$d_{\text{еео}} = d_{11} \cos^2 \theta \sin 3\varphi.$$

Нелинейный коэффициент [127]:

$$d_{11} (10,6 \text{ мкм}) = (5,02 \pm 1,7) \cdot 10^{-11} \text{ м/В}.$$

Порог поверхностных повреждений при $\lambda = 1,06$ мкм, $\tau_n = 17$ нс составляет $4 \cdot 10^7$ Вт/см² [74].

Линейное поглощение [127]:

λ , мкм	α , см ⁻¹
0,63	1,7
0,67	1,4
5,3	0,032
10,6	0,073

Se, селен

Положительный одноосный кристалл: $n_e > n_o$.

Класс симметрии: 32.

Диапазон прозрачности: 0,7 ... 21 мкм [128].

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_o	n_e
1,06	2,79	3,61
10,6	2,64	3,48

Эффективная нелинейность [6]:

$$d_{oeo} = d_{eoo} = d_{11} \cos \theta \cos 3\varphi;$$

$$d_{e eo} = d_{11} \cos^2 \theta \sin 3\varphi.$$

Нелинейный коэффициент:

$$d_{11}(10,6 \text{ мкм}) = (9,7 \pm 2,5) \cdot 10^{-11} \text{ м/В [129];}$$

$$d_{11}(28 \text{ мкм}) = (18,4 \pm 8,8) \cdot 10^{-11} \text{ м/В [130].}$$

Линейное поглощение [129]:

λ , мкм	α , см ⁻¹
5,3	1,4
10,6	1,09

Теплопроводность:

$$\kappa = 0,011 \text{ Вт/(см} \cdot \text{К) [35 *].}$$

Te, теллур

Положительный одноосный кристалл: $n_e > n_o$.

Класс симметрии: 32.

Диапазон прозрачности: 3,8 ... 32 мкм [131].

Дисперсионные зависимости [85]:

для λ в диапазоне 4 ... 14 мкм:

$$n_o^2 = 18,5346 + \frac{4,3289\lambda^2}{\lambda^2 - 3,9810} + \frac{3,7800\lambda^2}{\lambda^2 - 11,813};$$

$$n_e^2 = 29,5222 + \frac{9,3068\lambda^2}{\lambda^2 - 2,5766} + \frac{9,2350\lambda^2}{\lambda^2 - 13,521};$$

для λ в диапазоне 8,5 ... 30,3 мкм:

$$n_o^2 = 4,0164 + \frac{18,8133\lambda^2}{\lambda^2 - 1,1572} + \frac{7,3729\lambda^2}{\lambda^2 - 10};$$

$$n_e^2 = 1,9041 + \frac{36,8133\lambda^2}{\lambda^2 - 1,0803} + \frac{6,2456\lambda^2}{\lambda^2 - 10}.$$

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_o	n_e
5,3	4,8546	6,3043
10,6	4,7979	6,2483
14	4,7900	6,2384
28	4,7809	6,2263

Эффективная нелинейность [6]:

$$d_{\text{еоо}} = d_{\text{еоо}} = d_{11} \cos \theta \cos 3\varphi;$$

$$d_{\text{еоо}} = d_{11} \cos^2 \theta \sin 3\varphi.$$

Нелинейный коэффициент:

$$d_{11} (10,6 \text{ мкм}) = (6,5 \pm 0,3) \cdot 10^{-10} \text{ м/В [7];}$$

$$d_{11} (28 \text{ мкм}) = (5,7 \pm 1,9) \cdot 10^{-10} \text{ м/В [132].}$$

Порог поверхностных повреждений при $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$, $\tau_n = 190 \text{ нс}$ составляет $4,5 \cdot 10^7 \text{ Вт/см}^2$ [74].

Линейное поглощение [133]:

λ , мкм	α , см $^{-1}$
5,3	1,32
10,6	0,96

Теплопроводность:

$$\kappa = 0,063 \text{ Вт/(см} \cdot \text{К)} \text{ при } T = 239 \text{ К [35 *].}$$

α -SiO₂, кварц

Положительный одноосный кристалл: $n_e > n_o$.

Класс симметрии: 32.

Диапазон прозрачности: 0,15 ... 4,5 мкм [35*].

Значения показателей преломления в области 0,18 ... 3 мкм [34*, 35*]:

λ , нм	n_o	n_e
185,5	1,6758	1,6900
200,06	1,6493	1,6623
211,07	1,6343	1,6467
226,5	1,6182	1,6299
242,8	1,6053	1,6165
303,4	1,5770	1,5872
410,17	1,5565	1,5660
533,85	1,5468	1,5560
627,8	1,5428	1,5519
706,5	1,5405	1,5495
1000,0	1,5350	1,5438
1300,0	1,5310	1,5396
2058,2	1,5200	1,5281
3000,0	1,4996	1,5070

Кварц обладает оптической активностью.

Угол поворота плоскости поляризации ρ (градус) при распространении света вдоль оптической оси для кристалла толщиной $L = 1 \text{ мм}$ определяется из формулы $\rho = -2,1 + 8,14/\lambda^2$ [36*], где λ — в мкм (рис. 18).

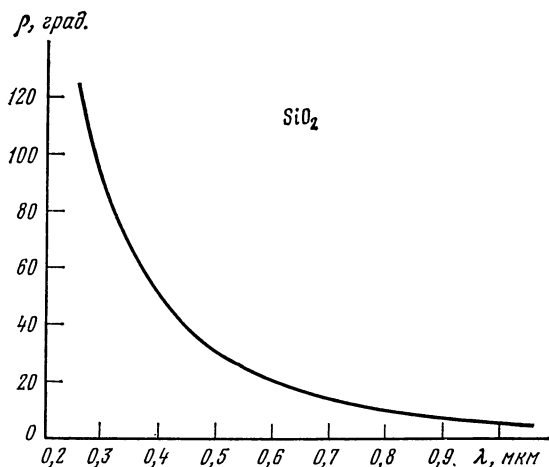


Рис. 18. Зависимость угла поворота плоскости поляризации от длины волны излучения в кристаллическом кварце толщиной 1 мм

Типичные значения угла поворота на разных длинах волн ($L = 1$ мм):

λ , мкм	ρ
0,266	$112,94^\circ$
0,355	$62,5^\circ$
0,532	$26,65^\circ$
1,064	$5,09^\circ$

Нелинейный коэффициент:

$$d_{11} = (3,64 \pm 0,4) \cdot 10^{-13} \text{ м/В [31 *];}$$

$$d_{11} = 3,3 \cdot 10^{-13} \text{ м/В [7];}$$

$$d_{11} = 5,0 \cdot 10^{-13} \text{ м/В [30 *].}$$

Теплопроводность κ , Вт/(см·К) [27*]:

κ (оси c)	κ (\perp оси c)	T , К
0,4899	0,2454	83
0,1955	0,1043	195
0,1143	0,0682	273
0,0938	0,5650	323
0,0796	0,0494	373
0,0703	0,0444	423
0,0632	0,0406	473
0,0569	0,0375	523
0,0515	0,0352	573
0,0473	0,0331	623

2.2. Двухосные кристаллы

$\text{KB}_5\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, пентаборат калия (KB5)

Положительный двухосный кристалл, угол между оптическими осями $2V_z = 126^\circ 20'$ ($\lambda = 546,1$ нм) [134].

Класс симметрии: $mm2$.

Диапазон прозрачности: 0,165 ... 1,4 мкм [135].

Дисперсионные зависимости [134, 136] (λ — в мкм):

$$n_x^2 = 1 + \frac{1}{0,848117 - 0,0074477/\lambda^2};$$

$$n_y^2 = 1 + \frac{1}{0,972682 - 0,0087757/\lambda^2};$$

$$n_z^2 = 1 + \frac{1}{1,008157 - 0,0094050/\lambda^2}.$$

Типичные значения показателей преломления для различных длин волн:

λ , мкм	n_x	n_y	n_z
0,2	1,5845	1,5256	1,5145
0,213	1,5691	1,5111	1,4996
0,266	1,5317	1,4759	1,4637
0,3	1,5187	1,4638	1,4514
0,4	1,4992	1,4455	1,4329
0,532	1,4889	1,4359	1,4233
0,6	1,4861	1,4334	1,4207
0,7	1,4834	1,4309	1,4182
0,8	1,4817	1,4293	1,4165
1,064	1,4793	1,4270	1,4143

Кристаллофизические оси X , Y , Z соответствуют кристаллографическим осям a , b , c [137—139].

Эффективная нелинейность [140, 138]:

плоскость XY :

$$d_{\text{еео}} = d_{31} \sin^2 \varphi + d_{32} \cos^2 \varphi;$$

плоскость YZ :

$$d_{\text{ооо}} = d_{31} \sin \theta;$$

плоскость XZ , $\theta < V_z$:

$$d_{\text{ооо}} = d_{\text{еоо}} = d_{32} \sin \theta;$$

плоскость XZ , $\theta > V_z$:

$$d_{\text{ооо}} = d_{32} \sin \theta,$$

где θ — полярный угол, отсчитываемый от оси Z ; φ — азимутальный угол, отсчитываемый от оси X , V_z — угол между оптической осью и осью Z в плоскости XZ .

Нелинейный коэффициент [138]:

$$d_{31} = 4,56 \cdot 10^{-14} \text{ м/В};$$

$$d_{32} = 0,33 \cdot 10^{-14} \text{ м/В}.$$

Порог поверхностных повреждений:

λ , мкм	τ_n , нс	f , Гц	I , 10^9 Вт/см ²	
0,45	7	15	≥ 1	[137]
0,91	30	—	$\geq 0,5$	[141]

Линейное поглощение:

λ , мкм	α , см ⁻¹	
0,165	5,12	[135]
0,2128	0,14	[142], 0,18 [143]
0,2661	0,06	[142], 0,11 [143]
0,3472	0,04	[144]
0,5321	0,02	[142]
0,6943	0,03	[144]
1,064	0,06	[142]

В [141] приводится формула для подсчета $\lambda_1 = f(\lambda_2)$, позволяющая оценить взаимодействующие длины волн λ_1 и λ_2 при ГСЧ по направлению оси Y ($\theta = \varphi = 90^\circ$) (λ — в нм):

$$\lambda_1 = 97,89 + \frac{1,019 \cdot 10^5}{\lambda_2} + \frac{1,914 \cdot 10^7}{\lambda_2^2}.$$

Суммарная длина волны при этом $\lambda_3^{-1} = \lambda_1^{-1} + \lambda_2^{-1}$.

KB₅O₈·4D₂O, дейгерирированный пентаборат калия (DKB5)

Положительный двухосный кристалл.

Класс симметрии *mm2*.

Диапазон прозрачности: 0,1625 ... 1,9 мкм [135].

Дисперсионные зависимости [135] (λ — в мкм):

$$n_x^2 = 1 + \frac{1}{0,84857 - 0,0075428/\lambda^2};$$

$$n_z^2 = 1 + \frac{1}{1,0123 - 0,0095376/\lambda^2}.$$

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_x	n_z
0,216	1,5671	1,4959
0,432	1,4958	1,4284
0,532	1,4888	1,4219
0,633	1,4850	1,4183
0,748	1,4824	1,4159

Соответствие осей: $X, Y, Z \rightarrow a, b, c$ [135].

Эффективная нелинейность [140]:

плоскость XY :

$$d_{eeo} = d_{31} \sin^2 \varphi + d_{32} \cos^2 \varphi;$$

плоскость YZ :

$$d_{ooe} = d_{31} \sin \theta;$$

плоскость XZ , $\theta < V_Z$:

$$d_{oeo} = d_{eoo} = d_{32} \sin \theta;$$

плоскость XZ , $\theta > V_Z$:

$$d_{ooe} = d_{32} \sin \theta.$$

Нелинейные коэффициенты [135]:

$$d_{31} \geq d_{31}(\text{KB5}) = 4,6 \cdot 10^{-14} \text{ м/В};$$

$$d_{32} \approx d_{32}(\text{KB5}) = 0,4 \cdot 10^{-14} \text{ м/В}.$$

Порог пробоя $I = 50$ кВт (при фокусировке), $\lambda = 430$ нм, $\tau_n = 7$ нс [135].

Коэффициент линейного поглощения α на $\lambda = 162,5$ нм составляет 5 см^{-1} [135].

LiCOOH·H₂O, формиат лития (LFM)

Отрицательный двухосный кристалл: $2V_Z = 123,9^\circ$ ($\lambda = 532,1$ нм) [145].

Класс симметрии: $mm2$.

Диапазон прозрачности: $0,23 \dots 1,2$ мкм [145, 146].

Дисперсионные зависимости [147] (λ — в мкм):

$$n_X^2 = 1,4376 + \frac{0,4045}{1 - (0,1301)^2/\lambda^2} - 0,0005\lambda^2;$$

$$n_Y^2 = 1,6586 + \frac{0,5006}{1 - (0,1530)^2/\lambda^2} - 0,0127\lambda^2;$$

$$n_Z^2 = 1,6714 + \frac{0,5928}{1 - (0,1592)^2/\lambda^2} - 0,0153\lambda^2.$$

Другие формулы приведены в [145].

Типичные значения показателя преломления:

λ , мкм	n_X	n_Y	n_Z
0,230	1,4256	1,5987	1,6759
0,458	1,3702	1,4898	1,5305
0,532	1,3666	1,4835	1,5226
0,633	1,3637	1,4782	1,5159
1,064	1,3593	1,4681	1,5035

Кристаллофизические оси X , Y , Z соответствуют кристаллографическим осям a , b , c [145].

Эффективная нелинейность [140]:

плоскость XY :

$$d_{eoe} = d_{oee} = d_{31} \sin^2 \varphi + d_{32} \cos^2 \varphi;$$

плоскость YZ :

$$d_{oeo} = d_{eoo} = d_{31} \sin \theta;$$

плоскость XZ , $\theta < V_Z$:

$$d_{ooe} = d_{32} \sin \theta;$$

плоскость XZ , $\theta > V_Z$:

$$d_{oeo} = d_{eoo} = d_{32} \sin \theta.$$

Нелинейный коэффициент [145,7]:

$$d_{31} = 0,3d_{11}(\alpha\text{-SiO}_2) = 10^{-13} \text{ м/В};$$

$$d_{32} = 3,5d_{11}(\alpha\text{-SiO}_2) = 1,16 \cdot 10^{-12} \text{ м/В};$$

$$d_{33} = 5,1d_{11}(\alpha\text{-SiO}_2) = 1,68 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}.$$

По данным работы [148] $d_{32} = 1,3 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}$.

Порог пробоя в случае воздействия непрерывного излучения с $\lambda = 0,488 \text{ мкм}$ составляет $I = 10^3 \text{ Вт/см}^2$ [145].

Линейное поглощение [149]:

λ , мкм	α , см ⁻¹
0,355	0,025
0,532	0,012
1,064	0,017

Ва (COOH)₂, формиат бария

Положительный двухосный кристалл: $2V_Z = 101,3^\circ$ ($\lambda = 532 \text{ нм}$).

Класс симметрии: 222.

Диапазон прозрачности: 0,245 ... 2,2; 4,8 ... 5,1 мкм [150].

Дисперсионные зависимости [150] (λ — в мкм):

$$n_X^2 = 2,619 + \frac{0,0177}{\lambda^2 - 0,039};$$

$$n_Y^2 = 2,491 + \frac{0,0184}{\lambda^2 - 0,035};$$

$$n_Z^2 = 2,421 + \frac{0,0160}{\lambda^2 - 0,042}.$$

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_X	n_Y	n_Z
0,532	1,6407	1,6019	1,5773
1,064	1,6214	1,5819	1,5585

Кристаллофизические оси X , Y , Z соответствуют кристаллографическим осям a , b , c .

Эффективная нелинейность [140]:

плоскость XY :

$$d_{eeo} = d_{36} \sin 2\theta;$$

плоскость YZ :

$$d_{eoe} = d_{oeo} = d_{36} \sin 2\theta;$$

плоскость XZ , $\theta < V_Z$:

$$d_{e\text{eo}} = d_{36} \sin 2\theta;$$

плоскость XZ , $\theta > V_Z$:

$$d_{e\text{oe}} = d_{\text{oe}} = d_{36} \sin 2\theta.$$

Нелинейные коэффициенты [150]:

$$d_{36} = (0,27 \dots 0,32) d_{36}(\text{KDP}) = (1,17 \dots 1,39) \cdot 10^{-13} \text{ м/В};$$

$$d_{14} = 0,26 d_{36}(\text{KDP}) = 1,13 \cdot 10^{-13} \text{ м/В};$$

$$d_{25} = 0,27 d_{36}(\text{KDP}) = 1,17 \cdot 10^{-13} \text{ м/В}.$$

NaCOOH, формиат натрия

Отрицательный двухосный кристалл: $2V_Z = 92,2^\circ$ ($\lambda = 532 \text{ нм}$) [151].

Класс симметрии: $mm2$.

Диапазон прозрачности: $0,24 \dots 2,2 \text{ мкм}$ [152], по уровню $0,5: 0,26 \dots 1,28 \text{ мкм}$ [151].

Дисперсионные зависимости [152] (λ — в мкм):

$$n_X^2 = 1,2646 + \frac{0,6381\lambda^2}{\lambda^2 - (0,1101)^2} - 0,0011\lambda^2;$$

$$n_Y^2 = 1,2589 + \frac{0,8423\lambda^2}{\lambda^2 - (0,1203)^2} - 0,0005\lambda^2;$$

$$n_Z^2 = 1,2515 + \frac{1,0729\lambda^2}{\lambda^2 - (0,1314)^2} - 0,0013\lambda^2.$$

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_X	n_Y	n_Z
0,355	1,4037	1,4867	1,5794
0,532	1,3896	1,4651	1,5472
1,064	1,3814	1,4531	1,5296

Соответствие осей: $X, Y, Z \rightarrow a, b, c$ [151, 152].

Эффективная нелинейность 140:

плоскость XY :

$$d_{e\text{oe}} = d_{\text{oe}} = d_{31} \sin^2 \varphi + d_{32} \cos^2 \varphi;$$

плоскость YZ :

$$d_{\text{oeo}} = d_{\text{eoo}} = d_{31} \sin \theta;$$

плоскость XZ , $\theta < V_Z$:

$$d_{\text{ooe}} = d_{32} \sin \theta;$$

плоскость XZ , $\theta > V_Z$:

$$d_{\text{oeo}} = d_{\text{eoo}} = d_{32} \sin \theta.$$

Нелинейные коэффициенты [152]:

$$d_{31} = d_{15} = 0,004 d_{31}(\text{LiNbO}_3) = 0,22 \cdot 10^{-13} \text{ м/В};$$

$$d_{32} = d_{24} = -(0,04 \pm 0,02) d_{31}(\text{LiNbO}_3) = -(2,2 \pm 1,1) \cdot 10^{-13} \text{ м/В};$$

$$d_{33} = (0,06 \pm 0,03) d_{31}(\text{LiNbO}_3) = (3,3 \pm 1,6) \cdot 10^{-13} \text{ м/В};$$

$$d_{32} = 5,23 \cdot 10^{-13} \text{ м/В [151]}.$$

Линейное поглощение [151]:

λ , мкм	α , см $^{-1}$
0,3547	0,02
0,5321	0,005
1,0642	0,015

КТiОРО₄, титанил-фосфат калия (КТР)

Положительный двухосный кристалл: $2V_Z = 43^\circ 19'$ ($\lambda = 530 \text{ нм}$) [153].

Класс симметрии: $mm2$.

Диапазон прозрачности: 0,35 ... 4,5 мкм [154, 155].

Дисперсионные зависимости [441] (λ — в мкм):

$$n_X^2 = 3,0129 + \frac{0,03807}{\lambda^2 - 0,04283} - 0,01664\lambda^2;$$

$$n_Y^2 = 3,0333 + \frac{0,4106}{\lambda^2 - 0,04946} - 0,01695\lambda^2;$$

$$n_Z^2 = 3,3209 + \frac{0,05305}{\lambda^2 - 0,05960} - 0,01763\lambda^2.$$

Дисперсионные зависимости по данным работы [442] (λ — в мкм):

$$n_X^2 = 2,029809 + \frac{0,9737485\lambda^2}{\lambda^2 - 0,04093072} + \frac{1,1048585\lambda^2}{\lambda^2 - 100,0};$$

$$n_Y^2 = 2,079195 + \frac{0,9412874\lambda^2}{\lambda^2 - 0,04595899} + \frac{0,9320789\lambda^2}{\lambda^2 - 100,0};$$

$$n_Z^2 = 2,006239 + \frac{1,2965213\lambda^2}{\lambda^2 - 0,04807691} + \frac{1,1329810\lambda^2}{\lambda^2 - 100,0}.$$

Наиболее точные данные по показателям преломления кристалла КТР получены в [156, 157, 443]. Все эти данные соответствуют одной дисперсионной формуле

$$n^2 = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C} - D\lambda^2,$$

где λ в мкм. Значения коэффициентов $ABCD$ даны в табл. 25.

Типичные значения показателей преломления [156]:

λ , мкм	n_X	n_Y	n_Z
0,4047	1,8249	1,8409	1,9629
0,5320	1,7785	1,7892	1,8894
0,5343	1,7780	1,7887	1,8888
0,6234	1,7637	1,7732	1,8672
0,7050	1,7555	1,7642	1,8550
1,0640	1,7381	1,7458	1,8302

Значения коэффициентов $ABCD$ для расчета показателей преломления кристалла КТР

	A	B	C	D	Литература
n_x	2,16747	0,83733	0,04611	0,01713	[156]
n_y	2,19229	0,83547	0,04970	0,01621	
n_z	2,25411	1,06543	0,05486	0,02140	
n_x	2,10468	0,89342	0,04438	0,01036	[157]
n_y	2,14559	0,87629	0,04850	0,01173	
n_z	1,94460	1,36170	0,04700	0,01491	
n_x	2,1146	0,89188	0,04352	0,01320	[443]
n_y	2,1518	0,87862	0,04753	0,01327	
n_z	2,3136	1,00012	0,05679	0,01679	

Значения показателей преломления, рассчитанные по формулам из [157]:

λ , мкм	n_x	n_y	n_z
0,4047	1,8244	1,8394	1,9586
0,5320	1,7780	1,7884	1,8863
0,5343	1,7775	1,7879	1,8856
0,6234	1,7633	1,7725	1,8644
0,7050	1,7551	1,7636	1,8524
1,0640	1,7386	1,7458	1,8287

Соответствие осей: $X, Y, Z \rightarrow a, b, c$.

Эффективная нелинейность [140]:

а) условия Клейнмана не выполняются:

плоскость XY :

$$d_{eoe} = d_{oeo} = d_{15} \sin^2 \varphi + d_{24} \cos^2 \varphi;$$

плоскость YZ :

$$d_{oeo} = d_{eoo} = d_{15} \sin \theta;$$

плоскость XZ , $\theta < V_z$:

$$d_{oeo} = d_{32} \sin \theta;$$

плоскость XZ , $\theta > V_z$:

$$d_{oeo} = d_{eoo} = d_{24} \sin \theta;$$

б) условия Клейнмана выполняются:

плоскость XY :

$$d_{eoe} = d_{oeo} = d_{31} \sin^2 \varphi + d_{32} \cos^2 \varphi;$$

плоскость YZ :

$$d_{oeo} = d_{eoo} = d_{31} \sin \theta;$$

плоскость XZ , $\theta < V_Z$:

$$d_{ооe} = d_{32} \sin \theta;$$

плоскость XZ , $\theta > V_Z$:

$$d_{оeo} = d_{eoo} = d_{32} \sin \theta.$$

Нелинейные коэффициенты [154]:

$$d_{31} = 6,5 \cdot 10^{-12} \text{ м/В};$$

$$d_{32} = 5 \cdot 10^{-12} \text{ м/В};$$

$$d_{33} = 13,7 \cdot 10^{-12} \text{ м/В};$$

$$d_{24} = 7,6 \cdot 10^{-12} \text{ м/В};$$

$$d_{15} = 6,1 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}.$$

Порог поверхностных повреждений:

λ , мкм	$\tau_{и}$	I , Вт/см ²	
0,526	30 пс	$30 \cdot 10^9$	([443]
1,064	Непрерыв- ный режим	> 5	Вт [154] при фокусировке
1,064	1 нс	$15 \cdot 10^9$	[156] при просветлении
1,064	10 нс	$4 \cdot 10^8$	[158]
1,064	30 нс	$6,5 \cdot 10^8$	[159]
1,064	125 мкс	$5 \cdot 10^8$	[160]
1,064	10 нс	10^9	[161]

Коэффициент линейного поглощения α на $\lambda = 1,06$ мкм составляет $0,01 \text{ см}^{-1}$ [162].

$\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ — ниобат бария-натрия («банан»).

Отрицательный двухосный кристалл: $2V_Z = 13^\circ$ [163].

Класс симметрии: $mm2$.

Диапазон прозрачности: $0,37 \dots 5$ мкм [164, 163].

Дисперсионные зависимости ($T = 20^\circ \text{C}$) [163] (λ — в мкм):

$$n_X^2 = 1 + \frac{3,9495}{1 - (0,20097)^2/\lambda^2};$$

$$n_Y^2 = 1 + \frac{3,9495}{1 - (0,20035)^2/\lambda^2};$$

$$n_Z^2 = 1 + \frac{3,6008}{1 - (0,17944)^2/\lambda^2}.$$

Типичные значения показателей преломления [163]:

λ , нм	n_X	n_Y	n_Z
458	2,4272	2,4257	2,2921
488	2,3992	2,3979	2,2724
502	2,3882	2,3870	2,2646
532	2,3679	2,3669	2,2501
633	2,3221	2,3215	2,2171
1064	2,2573	2,2571	2,1694

Соответствие осей: $X, Y, Z \rightarrow a, b, c$.

Температурные зависимости показателей преломления в интервале температур 0 ... 600 °C [163]:

$$\frac{dn_X}{dT} = -2,5 \cdot 10^{-5} (^\circ\text{C})^{-1}; \quad \frac{dn_Z}{dT} = 8 \cdot 10^{-5} (^\circ\text{C})^{-1};$$

n_Y мало зависит от T .

В основном кристалл используется при 90°-м синхронизме, при котором имеет место:

$$d_{\Phi} = d_{31} (\theta = 90^\circ, \varphi = 90^\circ, \text{луч по оси } Y);$$

$$d_{\Phi} = d_{32} (\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ, \text{луч по оси } X).$$

Нелинейные коэффициенты:

$$d_{31} = d_{32} = 40d_{11} (\alpha\text{-SiO}_2) = 1,32 \cdot 10^{-11} \text{ м/В [163]};$$

$$d_{33} = 55d_{11} (\alpha\text{-SiO}_2) = 1,82 \cdot 10^{-11} \text{ м/В [163]};$$

$$d_{31} = 1,46 \cdot 10^{-11} \text{ м/В [165]}.$$

Порог пробоя:

$$I = 3 \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2, \lambda = 1,06 \text{ мкм}, \tau_n = 10 \text{ нс};$$

$$I = 10^4 \text{ Вт/см}^2, \lambda = 0,532 \text{ мкм}, \tau_n = 10 \text{ нс [166]}.$$

Линейное поглощение;

λ , мкм	α , см ⁻¹
0,53	0,04 [167]
1,064	0,002 [168]

α -ННО₃, йодноватая кислота

Отрицательный двухосный кристалл: $2V_Z = 133^\circ$ ($\lambda = 532,5 \text{ нм}$) [169].

Класс симметрии: 222.

Диапазон прозрачности: 0,35 ... 1,6 мкм для $E \parallel a$ [57, 170, 171]; 0,35 ... 2,2 мкм для $E \parallel c$ [171].

Дисперсионные зависимости [170] (λ — в мкм):

$$n_X^2 = 2,5761 + \frac{0,6973}{1 - (0,2356)^2/\lambda^2} - 0,0201\lambda^2;$$

$$n_Y^2 = 2,4701 + \frac{1,2054}{1 - (0,2246)^2/\lambda^2} - 0,0152\lambda^2;$$

$$n_Z^2 = 2,6615 + \frac{1,1316}{1 - (0,2281)^2/\lambda^2} - 0,0398\lambda^2.$$

Другие формулы приведены в [171].

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_X	n_Y	n_Z
0,4	1,9080	2,0562	2,0814
0,532	1,8541	1,9831	2,0092
0,694	1,8315	1,9517	1,9776
0,8	1,8239	1,9414	1,9667
1,064	1,8129	1,9273	1,9500

Кристаллофизические оси X, Y, Z соответствуют кристаллографическим осям a, b, c [171].

Эффективная нелинейность [140]:

плоскость XY

$$d_{eoe} = d_{oeo} = d_{36} \sin 2\varphi;$$

плоскость YZ :

$$d_{eeo} = d_{36} \sin 2\theta;$$

плоскость $XZ, \theta < V_Z$:

$$d_{eoe} = d_{oeo} = d_{36} \sin 2\theta;$$

плоскость $XZ, \theta > V_Z$:

$$d_{eeo} = d_{36} \sin 2\theta.$$

Нелинейный коэффициент [57]:

$$d_{36}(1,065 \text{ мкм}) = (9,5 \pm 1,3) d_{36}(\text{KDP}) = (4,13 \pm 0,56) \cdot 10^{-12} \text{ м/В}.$$

Порог пробоя [51, 172]:

λ , мкм	τ_n , пс	I , 10^9 Вт/см ²
0,532	45	30
0,532	1500	$> 0,02$
1,064	45	50

Данные о пороге генерации ВКР в α - HfO_3 приведены в табл. 58, § 3.7.

KNbO_3 , ниобат калия

Отрицательный двухосный кристалл: $2V_Z = 113^\circ$ ($\lambda = 532$ нм) [173].

Класс симметрии: $mm2$.

Диапазон прозрачности: 0,4 ... 4,5 мкм [24*].

Дисперсионные зависимости [173] (λ — в мкм):

$$n_X^2 = 1 + \frac{3,38361}{1 - 0,03448/\lambda^2}.$$

$$n_Y^2 = 1 + \frac{3,79361}{1 - 0,03877/\lambda^2};$$

$$n_Z^2 = 1 + \frac{3,93281}{1 - 0,04486/\lambda^2};$$

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_X	n_Y	n_Z
0,488	2,4178	2,3519	2,2263
0,515	2,3945	2,3330	2,2112
0,532	2,3819	2,3229	2,2030
0,633	2,3299	2,2803	2,1685
1,064	2,2572	2,2199	2,1189

Соответствие осей: $X, Y, Z \rightarrow c, a, b$.

Эффективная нелинейность [140]:
плоскость XY :

$$d_{\text{ооe}} = d_{32} \sin \varphi;$$

плоскость YZ :

$$d_{\text{еео}} = d_{32} \sin^2 \theta + d_{31} \cos^2 \theta;$$

плоскость XZ , $\theta < V_Z$:

$$d_{\text{ооe}} = d_{31} \cos \theta;$$

плоскость XZ , $\theta > V_Z$:

$$d_{\text{еоо}} = d_{\text{оео}} = d_{31} \cos \theta.$$

Нелинейные коэффициенты [173—175]:

$$d_{31} = 35d_{11} (\alpha\text{-SiO}_2) = 1,15 \cdot 10^{-11} \text{ м/В};$$

$$d_{32} = -40d_{11} (\alpha\text{-SiO}_2) = -1,32 \cdot 10^{-11} \text{ м/В};$$

$$d_{33} = -61d_{11} (\alpha\text{-SiO}_2) = -2,01 \cdot 10^{-11} \text{ м/В};$$

$$d_{32} = -2,05 \cdot 10^{-11} \text{ м/В}.$$

Пороги повреждений:

λ , мкм	$\tau_{\text{и}}$, нс	I , 10^6 Вт/см 2	
0,532	10	150 ... 180	[176], 55 [177]
0,86	Непрерывный режим	$> 8,5 \cdot 10^{-4}$	[178]
1,06	10	150 ... 180	[176], 12 [177]

Линейное поглощение:

λ , мкм	α , см $^{-1}$
0,39	10 [179]
0,42	$< 0,05$ [180]

MgBaF $_4$, фторид магния-бария

Отрицательный двухосный кристалл: $2V_Z = 117,5^\circ$ ($\lambda = 532$ нм):

Класс симметрии: mm^2 .

Диапазон прозрачности: 0,185 ... 10 мкм [150].

Дисперсионные зависимости [150] (λ — в мкм):

$$n_X^2 = 2,077 + \frac{0,0076}{\lambda^2 - 0,0079};$$

$$n_Y^2 = 2,1238 + \frac{0,0086}{\lambda^2};$$

$$n_Z^2 = 2,1462 + \frac{0,00736}{\lambda^2 - 0,0090}.$$

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_X	n_Y	n_Z
0,532	1,4508	1,4678	1,4742
1,064	1,4436	1,4604	1,4674

Кристаллофизические оси X, Y, Z соответствуют кристаллографическим осям b, c, a [150].

Эффективная нелинейность [140]:

плоскость XY :

$$d_{ооe} = d_{31} \cos \varphi;$$

плоскость YZ :

$$d_{оeo} = d_{eoo} = d_{32} \cos \theta;$$

плоскость $XZ, \theta < V_Z$:

$$d_{eoe} = d_{31} \sin^2 \theta + d_{32} \cos^2 \theta;$$

плоскость $XZ, \theta > V_Z$:

$$d_{eeo} = d_{31} \sin^2 \theta + d_{32} \cos^2 \theta.$$

Нелинейные коэффициенты [150]:

$$d_{31} = 0,057 d_{36} (\text{KDP}) = 2,48 \cdot 10^{-14} \text{ м/В};$$

$$d_{32} = 0,085 d_{36} (\text{KDP}) = 3,7 \cdot 10^{-14} \text{ м/В};$$

$$d_{33} = 0,023 d_{36} (\text{KDP}) = 10^{-14} \text{ м/В};$$

$$d_{24} = 0,062 d_{36} (\text{KDP}) = 2,7 \cdot 10^{-14} \text{ м/В}.$$

2.3. Органические кристаллы

$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, мочевина

Положительный одноосный кристалл: $n_e > n_o$.

Класс симметрии: $\bar{4} 2 m$.

Диапазон прозрачности: 0,2 ... 1,8 мкм с поглощением в области 1,4 ... 1,6 мкм [181].

Дисперсионные зависимости [182] (λ — в мкм):

$$n_o^2 = 2,1823 + \frac{0,0125}{\lambda^2 - 0,03};$$

$$n_e^2 = 2,51527 + \frac{0,0240}{\lambda^2 - 0,03} + \frac{0,0202(\lambda - 1,52)}{(\lambda - 1,52)^2 + 0,08771}.$$

В [181] приводятся следующие дисперсионные зависимости (λ — в мкм):

$$n_o^2 = 2,1678 + \frac{0,0139}{\lambda^2 - 0,0207};$$

$$n_e^2 = 2,4917 + \frac{0,0141}{\lambda^2 - 0,0240}.$$

Другие формулы приведены в [183, 184].

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_o	n_e
0,213	1,7308	2,0155
0,266	1,5777	1,7575
0,355	1,5207	1,6580
0,532	1,4939	1,6098
1,064	1,4811	1,5830

Эффективная нелинейность [6]:

$$d_{\text{еео}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\varphi;$$

$$d_{\text{оео}} = d_{\text{еоо}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\varphi.$$

Нелинейный коэффициент [185]:

$$d_{36} = 3d_{36}(\text{KDP}) = 1,3 \cdot 10^{-12} \text{ м/В } (\lambda = 1,06 \text{ мкм}).$$

Пороги пробоя [186]:

λ , мкм	$\tau_{\text{н}}$, нс	I , 10^9 Вт/см 2
0,266	10	0,5
0,355	10	1,4
0,532	10	3
1,064	10	5

Линейное поглощение [187]:

λ , мкм	α , см $^{-1}$
0,2128	0,1
0,266	0,04
1,064	0,02

C₁₂H₂₂O₁₁, сахара

Отрицательный двухосный кристалл: $2V_Z = 132^\circ$ [188].

Класс симметрии: 2.

Диапазон прозрачности: 0,192 ... 1,35 мкм [188].

Дисперсионные зависимости [188] (λ — в мкм):

$$n_x^2 = 1,8719 + \frac{0,4660}{1 - 0,0214/\lambda^2} - 0,0113\lambda^2;$$

$$n_y^2 = 1,9703 + \frac{0,4502}{1 - 0,0238/\lambda^2} - 0,0101\lambda^2;$$

$$n_z^2 = 2,0526 + \frac{0,3909}{1 - 0,0252/\lambda^2} - 0,0187\lambda^2.$$

Типичные значения показателей преломления [188]:

λ , мкм	n_x	n_y	n_z
0,532	1,5404	1,5681	1,5737
1,064	1,5278	1,5552	1,5592

Кристаллофизическая ось Y параллельна кристаллографической оси b . Оси c и a перпендикулярны оси b , ось c составляет угол $\beta = 103,5^\circ$ с осью a . Ось X составляет угол $\alpha = 65,5^\circ$ с осью c (рис. 19) [188].

Эффективная нелинейность [140, 188]:

плоскость XY :

$$d_{\text{оое}} = d_{23} \cos \varphi;$$

$$d_{\text{оее}} = d_{\text{еое}} = d_{36} \sin 2\varphi;$$

ПЛОСКОСТЬ YZ :

$$d_{eeo} = d_{36} \sin 2\theta;$$

$$d_{oeo'} = d_{eoo} = d_{21} \cos \theta;$$

ПЛОСКОСТЬ XZ , $\theta < V_Z$:

$$d_{ooo} = 0;$$

$$d_{oeo} = d_{eoe} = d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta - d_{36} \sin 2\theta;$$

ПЛОСКОСТЬ XZ , $\theta > V_Z$:

$$d_{eeo} = d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta - d_{36} \sin 2\theta;$$

$$d_{oeo} = d_{eoo} = 0.$$

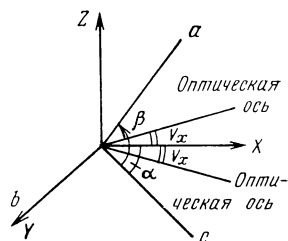


Рис. 19. Кристаллофизические (X, Y, Z) кристаллографические (a, b, c) и оптические оси кристалла сахарозы

Значения нелинейных коэффициентов в литературе не приводятся.

Однако приводятся данные о $d_{эф}$ для ГВГ от 1,06 мкм:

$$d_{эф} = 0,2d_{эф}(\text{ADP}) \quad [188];$$

$$d_{эф} = 0,3d_{эф}(\text{ADP}) \quad [189].$$

Порог повреждений $I = 5 \cdot 10^8$ Вт/см² при $\lambda = 1,06$ мкм, $\tau_i = 10$ нс [188].

3-метил-4-нитропиридин-1-оксид (ПОМ)

Положительный двухосный кристалл: $2V_Z = 70^\circ$ ($\lambda = 0,532$ нм).

Класс симметрии: 222.

Диапазон прозрачности: 0,4 ... 3 мкм [190].

Дисперсионные зависимости [190, 30*] (λ — в мкм):

$$n_X^2 = 2,4529 + \frac{0,1641}{1 - 0,1280/\lambda^2};$$

$$n_Y^2 = 2,4315 + \frac{0,3556}{1 - 0,1276/\lambda^2} - 0,0579\lambda^2;$$

$$n_Z^2 = 2,5521 + \frac{0,7962}{1 - 0,1289/\lambda^2} - 0,0941\lambda^2.$$

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_X	n_Y	n_Z
0,468	1,6875	1,8085	2,1134
0,509	1,6665	1,7656	2,0279
0,532	1,6591	1,7500	1,9969
0,579	1,6487	1,7281	1,9530
0,644	1,6402	1,7091	1,9153
1,064	1,6242	1,6633	1,8287

Соответствие осей: $X, Y, Z \rightarrow c, a, b$.

Эффективная нелинейность [140, 190]:

ПЛОСКОСТЬ XY :

$$d_{eoe} = d_{oeo} = d_{36} \sin 2\varphi;$$

плоскость YZ :

$$d_{\text{eео}} = d_{36} \sin 2\theta;$$

плоскость XZ , $\theta < V_Z$:

$$d_{\text{еоe}} = d_{\text{оee}} = d_{36} \sin 2\theta;$$

плоскость XZ , $\theta > V_Z$:

$$d_{\text{eео}} = d_{36} \sin 2\theta.$$

Нелинейный коэффициент [190]:

$$d_{36} = 10^{-11} \text{ м/В} \pm 15\%.$$

Пороги повреждений:

λ , мкм	τ_n , нс	I , 10^9 Вт/см ²
0,53	0,02	0,15 [190]
0,532	0,025	0,27 [191]
0,532	15	0,05 [191]
1,06	0,02	2 [190]

$\text{C}_{10}\text{H}_{11}\text{N}_3\text{O}_6$, метил-(2,4-динитрофенил)-амино-2-пропаноат (МАР).

Положительный двухосный кристалл $2V_Z = 74^\circ$ [192].

Класс симметрии: 2.

Диапазон прозрачности: 0,5 ... 2 мкм [192].

Дисперсионные зависимости [192] (λ — в мкм):

$$n_X^2 = 2,1713 + \frac{0,10305}{1 - 0,16951/\lambda^2} - 0,01667\lambda^2;$$

$$n_Y^2 = 2,31 + \frac{0,2258}{1 - 0,17988/\lambda^2} - 0,01886\lambda^2;$$

$$n_Z^2 = 2,7523 + \frac{0,6079}{1 - 0,1606/\lambda^2} - 0,05361\lambda^2.$$

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_X	n_Y	n_Z
0,532	1,5568	1,7100	2,0353
1,064	1,5079	1,5991	1,8439

Кристаллофизическая ось Y соответствует кристаллографической оси b , оси a и c лежат в плоскости XZ , ось X составляет угол $\alpha = 31^\circ 24'$ с осью c , угол между осями a и c $\beta = 95,59^\circ$ (рис. 20) [192].

Эффективная нелинейность [188]:

плоскость XY :

$$d_{\text{оoe}} = d_{23} \cos \varphi;$$

$$d_{\text{оee}} = d_{\text{еоe}} = d_{36} \sin 2\varphi;$$

плоскость YZ :

$$d_{\text{eео}} = d_{36} \sin 2\theta;$$

$$d_{\text{оео}} = d_{\text{еоо}} = d_{21} \cos \theta;$$

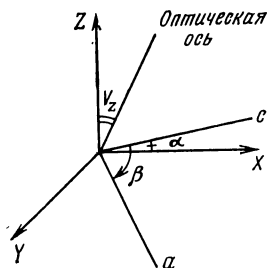


Рис. 20. Кристаллофизические (X, Y, Z), кристаллографические (a, b, c) и оптические оси кристалла МАР

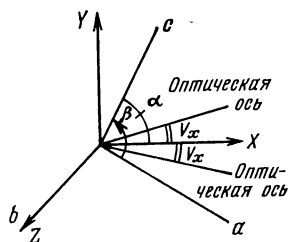


Рис. 21. Кристаллофизические (X, Y, Z), кристаллографические (a, b, c) и оптические оси кристалла МНА

плоскость XZ , $\theta < V_Z$:

$$d_{ooo} = 0;$$

$$d_{ooo} = d_{eoe} = d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta - d_{36} \sin 2\theta;$$

плоскость XZ , $\theta > V_Z$:

$$d_{eoo} = d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta - d_{36} \sin 2\theta;$$

$$d_{ooo} = d_{eoo} = 0.$$

Нелинейные коэффициенты [192]:

$$d_{21} = d_{16} = 1,67 \cdot 10^{-11} \text{ м/В};$$

$$d_{23} = d_{34} = 3,68 \cdot 10^{-12} \text{ м/В};$$

$$d_{25} = d_{36} = d_{14} = -5,44 \cdot 10^{-13} \text{ м/В};$$

$$d_{22} = 1,84 \cdot 10^{-11} \text{ м/В}.$$

Порог пробоя [192]

λ , мкм	τ_n , нс	I , 10^9 Вт/см ²
0,532	10	0,15
1,064	10	3

Коэффициент линейного поглощения α на $\lambda = 0,532$ мкм составляет $3,7 \text{ см}^{-1}$ [192].

$\text{NO}_2\text{C}_6\text{H}_4\text{NH}_2$, 2-метил-4-нитроанилин (МНА)

Положительный двухосный кристалл: $2V_X = 42^\circ$ [193].

Класс симметрии: m .

Диапазон прозрачности: $0,5 \dots 2,5$ мкм [193].

Типичные значения показателей преломления [193]:

λ , мкм	n^x	n_Y
0,532	2,2	—
0,6328	$2,0 \pm 0,1$	$1,6 \pm 0,1$
1,064	1,8	—

Кристаллофизическая ось Z параллельна оси b и перпендикулярна осям a и c . Угол между осями a и c $\beta = 137'$. Ось X составляет угол $\alpha = 35^\circ$ с осью c (рис. 21) [193].

Эффективная нелинейность [140]:
плоскость XY :

$$d_{\text{еео}} = d_{31} \sin^2 \varphi + d_{32} \cos^2 \varphi;$$

$$d_{\text{оео}} = d_{\text{еоо}} = d_{13} \sin \varphi;$$

плоскость YZ :

$$d_{\text{ооe}} = d_{31} \sin \theta;$$

$$d_{\text{оee}} = d_{\text{еоe}} = d_{13} \sin^2 \theta + d_{12} \cos^2 \theta;$$

плоскость XZ , $\theta < V_Z$:

$$d_{\text{еео}} = 0;$$

$$d_{\text{еоо}} = d_{\text{оео}} = d_{12} \cos \theta - d_{32} \sin \theta;$$

плоскость XZ , $\theta > V_Z$:

$$d_{\text{ооe}} = d_{12} \cos \theta - d_{32} \sin \theta;$$

$$d_{\text{еoe}} = d_{\text{оee}} = 0.$$

Нелинейные коэффициенты:

$$d_{12} = 5,8 d_{31} (\text{LiNbO}_3) = 2,67 \cdot 10^{-11} \text{ М/В [193];}$$

$$d_{11} = 40 d_{31} (\text{LiNbO}_3) = 1,84 \cdot 10^{-10} \text{ М/В [193];}$$

$$d_{11} = 2,5 \cdot 10^{-10} \text{ М/В [194].}$$

Порог пробоя $I = 2 \cdot 10^8 \text{ Вт/см}^2$ при $\lambda = 1,064 \text{ мкм}$, $\tau_n = 20 \text{ нс}$ [193].

Коэффициент линейного поглощения α на $\lambda = 532 \text{ нм}$ составляет 1 см^{-1} [193].

$\text{NO}_2\text{C}_6\text{H}_4\text{NH}_2$, мета-нитроанилин (mNA)

Отрицательный двухосный кристалл: $2V_Z = 104^\circ$ ($\lambda = 532 \text{ нм}$) [195].

Класс симметрии: $mm2$.

Дисперсионные зависимости [30*] (λ — в мкм):

$$n_X^2 = 2,469 + \frac{0,1864}{1 - 0,16/\lambda^2} - 0,0199\lambda^2;$$

$$n_Y^2 = 2,6658 + \frac{0,1626}{1 - 0,1719/\lambda^2} - 0,0212\lambda^2;$$

$$n_Z^2 = 2,8102 + \frac{0,1524}{1 - 0,175/\lambda^2} - 0,0294\lambda^2.$$

Значения показателей преломления по данным [196]:

λ , мкм	n_X	n_Y	n_Z
0,5123	1,718	1,750	1,810
0,530	1,705	1,738	1,798
0,6274	1,670	1,709	1,758
1,06	1,631	1,678	1,719
1,54	1,616	1,667	1,700

Кристаллофизические оси X, Y, Z соответствуют кристаллографическим осям c, b, a [195]:

Эффективная нелинейность [140]:

плоскость XY :

$$d_{\text{оое}} = d_{31} \sin \varphi;$$

плоскость YZ :

$$d_{\text{еео}} = d_{31} \sin^2 \theta + d_{32} \cos^2 \theta;$$

плоскость XZ , $\theta < V_Z$:

$$d_{\text{оое}} = d_{32} \cos \theta;$$

плоскость XZ , $\theta > V_Z$:

$$d_{\text{оео}} = d_{\text{еео}} = d_{32} \cos \theta.$$

Нелинейные коэффициенты [37*]:

$$d_{31} = 20 \cdot 10^{-12} \text{ м/В};$$

$$d_{32} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м/В};$$

$$d_{33} = 21 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}.$$

Порог пробоя [197]:

λ , мкм	$\tau_{\text{и}}$, нс	I , Вт/см ²
1,06	Непрерывный режим	10
1,06	20	$2 \cdot 10^8$

Коэффициент линейного поглощения α на $\lambda = 532$ нм составляет $4 \dots 6 \text{ см}^{-1}$ [197].

СООК-СНОИ-СН₂СООК·1,5 Н₂О, яблочнокислый калий (КМ)

Положительный двухосный кристалл: $2V_Z = 131,1^\circ$.

Класс симметрии: m .

Диапазон прозрачности: $0,24 \dots 1,3$ мкм [198].

Дисперсионные зависимости [198] (λ — в мкм):

$$n_X^2 = 1,542 + \frac{0,8299}{1 - (0,1419)^2/\lambda^2};$$

$$n_Y^2 = 1,470 + \frac{0,7473}{1 - (0,1343)^2/\lambda^2};$$

$$n_Z^2 = 1,339 + \frac{0,8519}{1 - (0,1195)^2/\lambda^2}.$$

Типичные значения показателей преломления:

λ , мкм	n_X	n_Y	n_Z
0,532	1,5606	1,5060	1,4954
1,064	1,5450	1,4931	1,4838

Ориентация кристаллографических осей XYZ относительно фигуры роста кристалла КМ дана в [198].

Эффективная нелинейность [40]:

плоскость XY :

$$d_{eeo} = d_{31} \sin^2 \varphi + d_{32} \cos^2 \varphi;$$

$$d_{eoo} = d_{oeo} = d_{13} \sin \varphi;$$

плоскость YZ :

$$d_{ooo} = d_{31} \sin \theta;$$

$$d_{oeo} = d_{eoe} = d_{13} \sin^2 \theta + d_{12} \cos^2 \theta;$$

плоскость XZ , $\theta < V_Z$:

$$d_{eeo} = 0;$$

$$d_{eoo} = d_{oeo} = d_{12} \cos \theta - d_{32} \sin \theta;$$

плоскость XZ , $\theta > V_Z$:

$$d_{ooo} = d_{12} \cos \theta - d_{32} \sin \theta;$$

$$d_{eoe} = d_{oee} = 0.$$

Нелинейные коэффициенты [198]:

$$d_{31} = 1,4d_{36} (\text{KDP}) = 6,1 \cdot 10^{-13} \text{ м/В};$$

$$d_{32} = 5,3d_{36} (\text{KDP}) = 23 \cdot 10^{-13} \text{ м/В}.$$

Мета-динитробензол (MDB)

Отрицательный двухосный кристалл: $2V_Z = 51^\circ 12'$ ($\lambda = 0,532$ мкм) [199].

Класс симметрии: $mm2$.

Диапазон прозрачности: 0,4 ... 2,2 мкм [199].

Типичные значения показателей преломления [199]:

λ , мкм	n_X	n_Y	n_Z
0,436	1,803	1,736	1,508
0,532	1,759	1,698	1,491
0,633	1,738	1,680	1,483
1,064	1,709	1,654	1,471
1,152	1,707	1,652	1,470

Соответствие осей: $X, Y, Z \rightarrow a, b, c$.

Эффективная нелинейность [140]:

плоскость XY :

$$d_{eeo} = d_{31} \sin^2 \varphi + d_{32} \cos^2 \varphi;$$

плоскость YZ :

$$d_{ooo} = d_{31} \sin \theta;$$

плоскость XZ , $\theta < V_Z$:

$$d_{eoo} = d_{eoe} = d_{32} \sin \theta;$$

плоскость XZ , $\theta > V_Z$:

$$d_{ooo} = d_{32} \sin \theta.$$

Нелинейные коэффициенты [199]:

$$d_{31}=4,1d_{36}(\text{KDP})=1,78\cdot 10^{-12} \text{ м/В};$$

$$d_{32}=6,2d_{36}(\text{KDP})=2,7\cdot 10^{-12} \text{ м/В};$$

$$d_{33}=1,7d_{36}(\text{KDP})=7,4\cdot 10^{-13} \text{ м/В}.$$

$\text{C}_{13}\text{H}_{19}\text{N}_3\text{O}_2$, 2-циклооктиламино-5-нитропиридин (COANP)

Положительный двухосный кристалл: $2V_Z=45^\circ 24' \pm 2^\circ$ ($\lambda=547 \text{ нм}$) [200].

Класс симметрии: $mm2$.

Диапазон прозрачности по уровню 0,5: 0,47 ... 1,5 мкм с небольшим поглощением в области 1,2 ... 1,4 мкм [200].

Значения показателей преломления [200]:

λ , мкм	n_X	n_Y	n_Z
0,55	1,681	1,702	1,847

Соответствие осей: $X, Y, Z \rightarrow c, a, b$.

Эффективная нелинейность [140]:

плоскость XY :

$$d_{\text{оое}}=d_{32} \sin \varphi;$$

плоскость YZ :

$$d_{\text{еео}}=d_{32} \sin^2 \theta + d_{31} \cos^2 \theta;$$

плоскость XZ , $\theta < V_Z$:

$$d_{\text{оое}}=d_{31} \cos \theta;$$

плоскость XZ , $\theta > V_Z$:

$$d_{\text{оое}}=d_{\text{еоо}}=d_{31} \cos \theta.$$

Нелинейные коэффициенты [200]:

$$d_{31}=(15 \pm 2) \cdot 10^{-12} \text{ м/В};$$

$$d_{32}=(26 \dots 34) \cdot 10^{-12} \text{ м/В};$$

$$d_{33}=(10 \pm 2) \cdot 10^{-12} \text{ м/В}.$$

Коэффициент линейного поглощения на $\lambda=1,35 \text{ мкм}$ $\alpha < 1 \text{ см}^{-1}$ [200].

Глава 3.

Применения нелинейных кристаллов

3.1. Генерация гармоник неодимовых лазеров

Генерация второй гармоники излучения неодимовых лазеров в неорганических кристаллах. Типичными представителями семейства твердотельных лазеров являются неодимовые лазеры, т. е. лазеры, активной средой которых служат трехвалентные ионы неодима (Nd^{3+}), внедренные в различные кристаллические и стеклянные матрицы. Длина волны генерации большинства неодимовых ла-

Т а б л и ц а 26.

Генерация второй гармоники излучения Nd:YAG лазера ($1,064 \rightarrow 0,532$ мкм)

Кристалл	Тип взаимодей- ствия	θ_c , град	I_n , Вт/см ²	τ_n	L , мм	Коэффи- циент преобра- зования, %	Лите- рату- ра	Примечание
KDP	ооо	41	10^9	150 пс	25	32 по энергии	[201]	
	ооо	41	—	50 пс	25	60 —»—	[202]	
	ооо	41	$8 \cdot 10^9$	30 пс	14	82 по энергии	[203]	
	ооо	41	$7 \cdot 10^9$	30 пс	20	81 —»—	[203]	
DKDP	ооо	53,5	10^8	18 нс	30	50 по мощнос- ти	[27]	$P_{2\omega} = 10$ Вт
	ооо	53,5	$3 \cdot 10^9$	250 пс	40	70 —»—	[27]	
	ооо	53,5	$8 \cdot 10^7$	20 нс	30	50 по энергии	[204]	
CDA	ооо	90	$2 \cdot 10^8$	10 нс	17,5	57 по мощнос- ти	[35]	$T = 48^\circ \text{C}$
	ооо	90	$4 \cdot 10^9$	7 пс*	13	25 по энергии	[26]	
DCDA	ооо	90	$8 \cdot 10^7$	20 нс	21	40 по энергии	[204]	$T = 90 \dots 100^\circ \text{C}$, $P_{2\omega} = 10$ Вт $T = 112^\circ \text{C}$
	ооо	90	$3 \cdot 10^8$	20 нс	16	40 —»—	[204]	
	ооо	90	$2 \cdot 10^8$	10 нс	13,5	45 по мощнос- ти	[35]	
	ооо	90	$9 \cdot 10^7$	—	29	50 по энергии	[205]	$P_{2\omega} = 6$ Вт
	ооо	90	—	15 нс	20	57	[206]	
RDA	ооо	50	—	10 нс	—	34 по мощнос- ти	[37]	$T = 25^\circ \text{C}$
RDP	ооо	50,8	$2 \cdot 10^8$	10 нс	15,3	36 по мощнос- ти	[41]	
	ооо	83,1	$2 \cdot 10^8$	10 нс	15,3	11 —»—	[41]	
LiIO ₃	ооо	30	$7 \cdot 10^7$	—	18	44 по мощнос- ти	[207]	
	ооо	30	$3 \cdot 10^9$	40 пс	5	50	[52]	
LiNbO ₃	ооо	90	$2 \cdot 10^7$	10 нс	20	40	[64]	$T = 120^\circ \text{C}$

Кристалл	Тип взаимодействия	θ , град	I_H , Вт/см ²	τ_H	L , мм	Коэффициент преобразования, %	Литература	Примечание
LFM	ооо	55,1	$3,7 \cdot 10^7$	—	15	36	[208]	Моноимпульсный режим
	ооо	55,1	$6,2 \cdot 10^3$	—	15	0,08	[208]	Режим свободной генерации
КТР	еоо	26	—	10 нс	—	22	[209]	Квазинепрерывный цуг
	еоо	26	—	39 пс	5	18	[210]	
	еоо	25,2	—	70 пс	7,2	52	[155]	
	еоо	25	$2,5 \cdot 10^8$	15 нс	4	60	[162]	Многомодовый режим
	еоо	30	$2 \cdot 10^7$	35 нс	9	40 по энергии	[159]	
	еоо	30	$9 \cdot 10^7$	35 нс	4	45 по энергии	[159]	
	еоо	30	10^8	30 нс	5,1	60 —»—	[159]	
	еоо	30	10^8	30 нс	8	50 —»—	[159]	
	еоо	26	—	200 пс	5	55	[160]	Двухпроходовой режим Гауссовский пучок $E_{2\omega}=0,19$ Дж
	еоо	23	$2,5 \cdot 10^8$	10 нс	3	30	[161]	
«банан»	ооо	74	—	60 пс	3	20	[165]	Плоскость YZ, $P_{2\omega}=0,55$ Вт
β -BaB ₂ O ₄	ооо	—	$1,9 \cdot 10^8$	14 нс	6	47	[70]	$P_{2\omega}=4,5$ Вт
	ооо	—	$1,67 \cdot 10^8$	14 нс	6	38	[70]	$P_{2\omega}=8,5$ Вт
	ооо	—	$2,53 \cdot 10^8$	14 нс	6	37	[70]	$P_{2\omega}=36$ Вт
	ооо	21	—	10 нс	6,8	70	[439]	

* Лазер на стекле с неодимом ($\lambda=1,062$ мкм)

зеров лежит в области 1,05 ... 1,08 мкм. Например, неодимовый лазер на фосфатном стекле имеет длину волны генерации 1,054 мкм, неодимовый лазер на силикатном стекле — 1,062 ... 1,064 мкм (в зависимости от марки стекла), неодимовый лазер на алюминате иттрия ($\text{Nd}^{3+}:\text{YAlO}_3$) — 1,0796 мкм, $\text{Nd}^{3+}:\text{YLiF}_4$ — 1,053 мкм, $\text{Nd}^{3+}:\text{CaWO}_4$ — 1,0584 мкм и т. д. Наиболее широко распространен неодимовый лазер на основе алюмо-иттриевого граната ($\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$, $\lambda=1,06415$ мкм).

В табл. 26 приведены результаты исследований по ГВГ излучения $\text{Nd}:\text{YAG}$ лазера ($\lambda=1,064$ мкм); для каждого случая указаны тип взаимодействия, угол синхронизма, интенсивность накачки I_H и длительность импульса второй гармоники, длина кристалла и коэффициент преобразования (по энергии или мощности). В табл. 27, 28 приведены расчетные и экспериментальные значения спектральной, угловой и температурной ширины синхронизма для ГВГ ($\lambda_1=1,064$ мкм), а также значения углов двулучепреломления (сноса) и синхронизма.

Таблица 27

Расчетные значения спектральной $\Delta\lambda$, угловой $\Delta\theta$ и температурной ширины ΔT синхронизма для ГВГ от $\lambda=1,064$ мкм (длина кристалла $L=1$ см)

Кристалл	Тип взаимодействия	θ_0	$\Delta\lambda$, нм		$\Delta\theta$, мрад		ΔT , °C [4*]
			[12*]	[4*]	[12*]	[4*]	
KDP	ооо	41°	—	28,3	1,1	1,7	25,1
	ооо	59°	4,38	11,5	2,1	3,4	19,1
DKDP	ооо	37°	—	—	1,8	—	—
	ооо	53°	—	6,5	3,6	3,4	20,9
ADP	ооо	42°	—	31	1,0	1,5	2,7
	ооо	61°	4,0	9,7	2,0	3,0	2,1
CDA	ооо	84°	—	22,4	—	11,8	5,1
DCDA	ооо	78°	—	—	51 ($\theta=90^\circ$)*	—	5,6*
RDP	ооо	50°46'	2,0	13,5	1,8	1,7	25,0
	ооо	83°05'	1,52	2,5	15,7	13,4	8,7
LiIO ₃	ооо	30°	0,62	0,7	0,3	0,6	—
	ооо	44°	0,66	0,68	0,6	1,1	—
LiNbO ₃	ооо	78°	0,41	0,3	2,3	3,1	1,1
β -BaB ₂ O ₄ **	ооо	—	—	—	—	1,4	55
LFM	ооо	56°	—	3,0	—	1,7	24,7
	ооо	82°	—	3,4	—	3,4	9,8
Ba ₂ NaNb ₅ O ₁₅	ооо	74°	—	0,3	—	2,4	0,8
α -HIO ₃	ооо	10°	—	0,43	—	0,8	2,5
	ооо	55°	—	0,38	—	1,1	4,6

* [204].

** [70].

Таблица 28

Экспериментальные значения спектральной, угловой и температурной ширины синхронизма для ГВГ от $\lambda=1,064$ мкм ($L=1$ см) и угла двулучепреломления ρ

Кристалл	Тип взаимодействия	θ_0	$\Delta\lambda$, нм	$\Delta\theta$, мрад	ΔT , °C	ρ , мрад	Литература
KDP	ооо	41°	7,25	2,73	11	27	[211, 460]
	ооо	59°	5,57	5,29	13,2	24	[211, 460]
DKDP	ооо	53,5°	5,57	3,0	6,7	24	[162, 211, 204]
CDA	ооо	84°	—	12,3	2	40	[35]
DCDA	ооо	79,3°	2,45	7,2	3,3...6,4	44	[35, 211, 204]
RDPA	ооо	50°	—	1,4	—	—	[37]
LiIO ₃	ооо	30°	0,82	—	—	—	[211]
LiNbO ₃	ооо	90°	0,88	—	—	—	[211]
	ооо	55,1°	3,0	1,66	24,7	—	[208]
LFM	ооо	81,9°	3,4	3,38	9,8	—	[208]
КТР	ооо	25°	0,56	15...68	25	1	[154, 155, 162]
«банан»	ооо	74°	—	2,79	0,5	—	[163]
	ооо	76°	—	5,41	0,5	—	[163]

Для ГВГ излучения пикосекундных и субнаносекундных ($\tau_n = 1 \dots 500$ пс) Nd:YAG лазеров используется в основном кристалл KDP, в единичных случаях — DKDP [27], LiIO_3 [52]. Кристалл KDP имеет высокий порог пробоя, кроме того, нелинейные процессы типа двухфотонного поглощения, генерации ВКР и пикосекундного континуума в нем практически отсутствуют. Для достижения оптимального коэффициента преобразования при ГВГ излучения мощных лазеров пучки приходится расширять, т. е. использовать кристаллы большой апертуры. Отметим, что в настоящее время выращиваются кристаллы KDP высокого оптического качества с апертурой в несколько десятков сантиметров.

В [203] исследовалась ГВГ излучения Nd:YAG лазера ($\tau = 30$ пс) в кристаллах KDP различной длины: от 3,5 до 40 мм. Максимальное значение коэффициента преобразования $\eta = 82\%$ достигнуто на кристалле длиной 14 мм при энергии импульса накачки $E = 32$ мДж. С учетом френелевских потерь и деполяризации это соответствует коэффициенту преобразования по энергии, равному 92%.

В наносекундном режиме при небольшой частоте повторения импульсов (несколько герц) используются в основном кристаллы CDA и DCDA, имеющие 90° -й синхронизм и, как следствие, большую угловую ширину синхронизма и нулевой угол сноса, что позволяет фокусировать излучение в кристалл. В [35] в CDA и DCDA достигнуты эффективности преобразования по мощности 57 и 45% соответственно. В качестве источника накачки использовался Nd:YAG лазер мощностью 50 МВт и длительностью импульса 12 нс. Генерация второй гармоники достигалась в коллимированном пучке (расходимость 1,1 мрад) диаметром 5 мм. Мощность второй гармоники составляла 20...30 МВт при длительности импульса 10 нс. Отметим, что ввиду большой угловой ширины синхронизма при $\theta = 90^\circ$ ($L\Delta\theta = 50$ см·мрад) кристаллы CDA и DCDA особенно пригодны для удвоения частоты излучения многомодовых импульсных неодимовых лазеров. Кристалл LiIO_3 , в отличие от CDA и DCDA, не требует термостабилизации, однако имеет существенный недостаток — большой угол двулучепреломления и, как следствие, маленькую угловую ширину синхронизма. Это обстоятельство приводит к диафрагменному апертурному эффекту — уменьшению эффективности преобразования за счет сноса энергии необыкновенной волны. Для разрешения этой проблемы применяют специальные схемы ГВГ, содержащие несколько (два или более) последовательно расположенных кристаллов одинакового среза [4*]. При этом четные кристаллы относительно нечетных повернуты на 180° вокруг направления вектора k . Таким образом, снос энергии необыкновенной волны в нечетных кристаллах компенсируется сносом в четных. Длина каждого кристалла должна быть меньше апертурной длины L_a , определяемой как $L_a = d/\rho$, где d — апертура входного пучка; ρ — угол сноса.

Кристалл LiNbO_3 также широко применяется для ГВГ излучения Nd:YAG лазеров, однако он обладает такими недостатками, как фоторефрактивный эффект (optical damage, или изменение показателей преломления под действием лазерного излучения) и необходимость термостабилизации кристалла. Для существенного уменьшения влияния фоторефрактивного эффекта на эффективность преобразования при ГВГ используют кристаллы LiNbO_3 с добавками MgO (концентрация 4,5% или более) [455—457] и LiNbO_3 , выращенные из конгруэнтных расплавов [458], что увеличивает эффективность преобразования до 50%.

Т а б л и ц а 29

Генерация второй гармоники излучения Nd:YAG лазера в различных кристаллах

Нелинейный кристалл	L , мм	θ_c , град	E (0,53 мкм), мДж	P (0,53 мкм), Вт	η , %
LiNbO ₃ конгруэнтного состава	9 30	90 90	53 52	1,07 1,04	50,9 49,5
LiIO ₃	19	29	29	0,58	27,6
DCDA	37	90	48	0,96	47,6
DKDP	50	53	19	0,39	19,5
KTP	5	24	9,6	0,19	42,6
LiNbO ₃ :MgO	4	90	23	0,46	23,0
LiNbO ₃ :MgO	9	90	31	0,63	35,2

В табл. 29 приведены данные о ГВГ излучения Nd:YAG лазера ($\lambda=1,06$ мкм, $E=100$ мДж, $\tau=14$ нс, $f=20$ Гц, $I_n=35$ МВт/см²) в этих кристаллах, а также в LiIO₃, DCDA, DKDP, KTP [458].

В ряду кристаллов-удвоителей частоты Nd:YAG лазера кристалл калий-титанил-фосфата KTiOPO₄(KTP) занимает особое место. Обладая огромной нелинейностью ($d_{31}=6,5 \cdot 10^{-12}$ м/В, $d_{32}=5 \cdot 10^{-12}$ м/В), этот кристалл одновременно имеет большую угловую ($L\Delta\theta=15 \dots 68$ см'мрад) и температурную ($\Delta TL=20 \dots 25$ °С·см) ширину синхронизма для ГВГ от $\lambda=1,06$ мкм, что превышает почти на порядок аналогичные параметры кристаллов KDP, DKDP и др. В добавок он негигроскопичен и имеет высокую лучевую стойкость. В [161] рассчитаны угловая ширина синхронизмов, угол сноса (двулучепреломления) и эффективная нелинейность для трех направлений синхронизма в KTP для ГВГ от $\lambda=1,064$ мкм (табл. 30). Отметим, что направление с $\varphi=23^\circ$ и $\theta=90^\circ$, имеющее самое высокое значение $d_{\text{эф}}$, и по другим параметрам обладает преимуществами над остальными направлениями: имеет самую большую угловую ширину синхронизма и минимальный угол сноса. Экспериментально полученные значения для $\Delta\varphi=32 \pm 5'$, $\Delta T=20$ °С при $L=1$ см [161]. В табл. 26 представлены результаты экспериментальных исследований по ГВГ излучения Nd:YAG лазера в KTP. Во всех случаях использовалось взаимодействие типа еое в плос-

Т а б л и ц а 30

Параметры генерации второй гармоники излучения Nd:YAG лазера в кристалле KTP

Тип взаимодей- ствия	θ_c , φ_c	$\Delta\theta$, $\Delta\varphi$ ($L=1$ см)	ρ
1	$\varphi=40^\circ$ $\theta=46^\circ$	$\Delta\varphi=12'$ $\Delta\theta=2'$	$2^\circ 40'$ ($\lambda=1,06$ мкм) $10'$ ($\lambda=0,53$ мкм)
2	$\varphi=23^\circ$ $\theta=90^\circ$	$\Delta\varphi=33'$ $\Delta\theta=1,8^\circ$	$12'$ ($\lambda=1,06$ мкм) $15'$ ($\lambda=0,53$ мкм)
2	$\varphi=90^\circ$ $\theta=69^\circ$	$\Delta\theta=6'$	$1^\circ 50'$ ($\lambda=1,06$ мкм)

кости ХУ. В [160] применялся Nd:YAG лазер, генерирующий пуг длительностью 100 мкс, состоящий из единичных импульсов длительностью 175 ± 25 пс. Использовался кристалл КТР размерами $3 \times 3 \times 5$ мм, излучение фокусировалось в кристалл в пятно диаметром 390 мкм. Достигнута эффективность преобразования во вторую гармонику 55%. В [159] подробно исследована ГВГ излучения Nd:YAG лазера, работающего в одно- и многомодовых режимах. Использовались кристаллы КТР различной длины от 4 до 9 мм. Обнаружено уменьшение эффективности преобразования в кристалле длиной 9 мм, что связано с перекачкой энергии излучения второй гармоники обратно в основное излучение. Достигнутая максимальная эффективность преобразования по энергии составляла 60% в двухпроходовом режиме при использовании коротких кристаллов с $L=5,1$ мм.

Для ГВГ излучения с $\lambda=1,064$ мкм в кристалле «банан» угол синхронизма при взаимодействии в плоскости YZ ($\varphi=90^\circ$) $\theta_{\text{сое}}^{31}=73^\circ 45'$, в плоскости XZ ($\varphi=0^\circ$) $\theta_{\text{сое}}^{32}=75^\circ 26'$ ($T=25^\circ\text{C}$); при $\theta=90^\circ$, $\varphi=90^\circ$ температура синхронизма $T_{31}=101^\circ\text{C}$, при $\theta=90^\circ$, $\varphi=0^\circ$ $T_{32}=89^\circ\text{C}$ [163]. Следует отметить, что приведенные значения для θ и T варьируют от образца к образцу в пределах $73 \dots 75^\circ$ и $75 \dots 77^\circ$ для θ и $90 \dots 110^\circ\text{C}$ и $80 \dots 100^\circ\text{C}$ для T соответственно. Отметим, что благодаря большому нелинейному коэффициенту этот кристалл широко применяется главным образом во внутриврезонаторных схемах ГВГ (см. ниже).

В табл. 31 представлены расчетные значения углов синхронизма для ГВГ излучения Nd:YAG лазера в двухосных кристаллах MgBaF_4 , $\text{Ba}(\text{COOH})_2$, NaCOOH .

Генерация второй гармоники излучения неодимовых лазеров с $\lambda=1,06$ мкм в органических кристаллах. По многим своим параметрам органические кристаллы могут конкурировать с уже применяемыми кристаллами класса КДР, ниобатами и формиатами. Они дешевы в изготовлении, имеют высокие нелинейные восприимчивости, а также достаточное двулучепреломление, что позволяет использовать их для преобразования частоты. Пороги разрушения органических кристаллов весьма высокие, например, у мочевины порог пробоя при наносекундной накачке составляет несколько ГВт/см², что превышает таковой для LiNbO_3 и LiIO_3 . Однако, наряду с указанными преимуществами,

Т а б л и ц а 31

Генерация второй гармоники излучения Nd:YAG лазера в некоторых двухосных кристаллах

Кристалл	Плоскость	θ , град	φ , град	Тип взаимодействия	Литература
MgBaF_4	XZ	39,6	0	1	[150]
	XZ	18,9	0	2	
	XY	90	9,2	1	
	XY	90	42,1	2	
$\text{Ba}(\text{COOH})_2$	XZ	33,3	0	1	[150]
	XZ	71,9	0	1	
	YZ	8	90	2	
	XY	90	37,4	2	
NaCOOH	XY	90	37,4	2	[152]
	XZ	37	0	1	

органические монокристаллы имеют и существенные недостатки, ограничивающие их применение в нелинейной оптике. Они гигроскопичны и очень мягки, поэтому их поверхности должны защищаться соответствующими покрытиями.

В [38*, 189, 212] проводилось исследование эффективности ГВГ от $\lambda = 1,06$ мкм в поликристаллических образцах (порошках) органических соединений. Были испробованы оптически активные аминокислоты (триптофан, аспарагин и т. д.) [212], сахара (сахароза, мальтоза, фруктоза, галактоза, лактоза) [189] и другие органические соединения. К настоящему времени ГВГ Nd:YAG лазера реализована в следующих органических монокристаллах: сахароза ($C_{12}H_{22}O_{11}$), 3-метил-4-нитропиридин-1-оксид (РОМ), метил(2, 4-динитрофенил)-амино-2-пропаноат (МАР), мета-нитроанилин (mNA), 2-метил-4-нитроанилин (MNA) и мета-динитробензол (МДБ). Благодаря большим нелинейностям на этих кристаллах удается получать большие преобразования (табл. 32). Так, на кристалле МАР толщиной всего 1 мм достигнут коэффициент преобразования 30%. Коэффициент преобразования на мета-нитроанилине составляет 15% при коллинеарной ГВГ и 85% при неколлинеарной ГВГ (НГВГ) в плоскости XY. Во втором случае достигаются наибольшие эффективная нелинейность ($d_{\text{эф}} = d_{31}$) и угловая ширина синхронизма. Следует отметить, что по-

Т а б л и ц а 32

Генерация второй гармоники излучения Nd:YAG лазера в органических кристаллах

Кристалл	Тип взаимодействия	$\frac{d}{d_{36}(\text{KDP})}$	θ , град	φ , град	Литература	Примечание
Сахароза	еое	0,2*	90	60,5	[188]	Достигнут коэффициент преобразования 30% в кристалле толщиной 1 мм
—»—	оое	0,2*	90	33,7	[188]	
—»—	еое	0,2*	15,8	0	[188]	
РОМ	еео	21,8	35,7	90	[190]	
—»—	еое	9,9	12,8	0	[190]	
МАР	еое	38,3	2,2	0	[192]	НГВГ в плоскости XY, $L=1$ мм, $\eta=10\%$ НГВГ в плоскости XY, $L=3$ мм, $\eta=85\%$ (с учетом френелевских отражений и поглощения на $\lambda=532$ нм)
—»—	оео	37,7*	11	90	[192]	
mNA	оое	37,7*	90	55	[197]	
—»—	еео	24,1	44	90	[197]	
—»—	оое	11,5	90	14,5	[197]	
—»—	оое	6,8	90	8,5	[195]	$\eta=0,1 \dots 0,5\%$, $L=2 \dots 4$ мм, $I_n = 50$ МВт/см ² $\eta=3,6\%$, $I_n=1,3$ МВт/см ² , $L=0,9$ мм, $\tau=250$ нс
MNA	—	65,7	5	40	[193]	
МДБ	оое	3,6	35,3	0	[199]	
COANP	оео	30,9	26,4	0	[200]	

* Приведено значение $d_{\text{эф}}/d_{36}(\text{KDP})$.

мимо нелинейного кристалла мочевины, который успешно используется как для ГВГ излучения лазеров на красителях, так и для параметрической генерации света, из молекулярных кристаллов наибольшее применение нашел метанитроанилин. В этом кристалле выполняются условия синхронизма для сложения и вычитания частот в полосе 0,5 ... 1,5 мкм.

Внутрирезонаторная ГВГ. Для лазеров с непрерывной накачкой характерно малое значение оптимального коэффициента пропускания выходного зеркала — несколько процентов. Это приводит к тому, что мощность выходного излучения бывает существенно меньше мощности излучения внутри резонатора. А поскольку эффективность преобразования во вторую гармонику существенно зависит от мощности основного излучения, то в таких лазерах целесообразно помещать нелинейный кристалл внутри резонатора (внутрирезонаторная генерация второй гармоники (ВРГВГ)). При этом выходное зеркало должно иметь высокое отражение на основной частоте и высокое пропускание на частоте второй гармоники. Для увеличения эффективности преобразования применяют фокусировку основного излучения в нелинейный кристалл.

Для получения максимальной выходной мощности на второй гармонике при ВРГВГ необходимо достичь оптимального режима ВРГВГ или режима 100%-го преобразования. Оптимальный режим ВРГВГ есть режим, в котором лазер с непрозрачными для основного излучения зеркалами имеет на частоте второй гармоники такую же выходную мощность, какую имел бы на основной частоте тот же лазер при условии, что внутрирезонаторный нелинейный кристалл выведен из синхронизма и использования выходного зеркала с оптимальным пропусканием на основной частоте [4*]. Следует подчеркнуть, что режим 100%-го преобразования не означает, что происходит 100%-е преобразование основного излучения во вторую гармонику. В действительности эффективность ВРГВГ не превышает 20 ... 30% для импульсных и 5 ... 10% для непрерывных лазеров [4*].

Для внутрирезонаторной ГВГ излучения Nd:YAG лазера с $\lambda=1,064$ мкм в основном используются кристаллы LiIO_3 , LiNbO_3 (в режиме модуляции добротности и синхронизации мод) и «банан» (в непрерывном режиме); сравнительно недавно успешно начал применяться КТР. В табл. 33 приведены характеристики Nd:YAG лазеров с ВРГВГ. Как видно из таблицы, режим 100%-го преобразования достигнут как в непрерывном режиме, так и в режиме модуляции добротности; получены мощности выходного излучения до 5,6 Вт. При установке кристалла КТР в дополнительном резонаторе внутри резонатора лазера [161] достигнуты на $\lambda=532$ нм средние мощности $P=7,1$ Вт. При этом кристалл сильно разогревался (до 100 °C) из-за поглощения на $\lambda=532$ нм, однако в течение нескольких часов видимых повреждений не наблюдалось.

Кристалл КТР ($L=4,4$ мм) также использовался для ВРГВГ излучения лазера на алюминате иттрия с Nd^{3+} ($\lambda=1,0796$ мкм) с акустооптической модуляцией добротности ($f=5$ кГц) [227]. Реализовался 90°-й синхронизм ($\varphi=0$, $\theta=90^\circ$) типа 2 при $T_{\text{кр}}=153\pm 3^\circ\text{C}$; грани кристалла были просветлены на 1,08 и 0,54 мкм. Средняя мощность излучения второй гармоники $\lambda=0,54$ мкм составляла 15 Вт.

Генерация третьей гармоники (ГТГ) излучения Nd:YAG лазера реализована в кристаллах KDP, ADP, RDA, RDP, LiIO_3 , $\text{LiCOOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$, NACOON (табл. 34), условия синхронизма позволяют реализовать ГТГ также в пента-

Внутрирезонаторная генерация второй гармоники излучения Nd:YAG лазера (1,064→0,532 мкм)

Кристалл	θ_0 , град	L , мм	Режим работы, выходные параметры излучения	Коэффициент преобразования, %	Литература
LiIO ₃	29	—	Модуляция добротности, $P = 0,3$ Вт	100	[53]
	29	20	Непрерывный режим, $P = 4$ Вт	40 (0,12*)	[213]
	29	—	Непрерывная накачка, синхронизация мод, $P = 5$ Вт, $\tau = 800$ пс	40 (0,13*)	[214]
	29	15	$P_{\text{пик}} = 100$ Вт, $\tau = 180$ мкс, $f = 50$ Гц	0,06*	[215]
LiNbO ₃	90	—	Непрерывная накачка, модуляция добротности, $P = 0,31$ Вт, $P_{\text{пик}} = 500$ Вт	100	[216]
	90	1	$P_{\text{пик}} = 100$ Вт, $\tau = 60$ нс, $f = 400$ Гц	—	[217]
«банан»	90	3	Непрерывный режим, $P = 1,1$ Вт	100	[218]
	90	3	Непрерывный режим, $P = 0,3$ Вт	—	[219]
	90	—	Непрерывная накачка модуляция добротности, $P = 0,016$ Вт, $P_{\text{пик}} = 200$ Вт	100	[220]
	90	5	$P = 0,3 \dots 0,5$ Вт	—	[221]
КТР	26	3,5	Модуляция добротности, $P = 5,6$ Вт	—	[153]
	23	3	Акустооптическая модуляция, $P = 7,1$ Вт, $f = 9$ кГц	—	[161]
KNbO ₃	70	5	Непрерывный режим, $P = 0,15$ Вт	60	[222]
	90	5	Непрерывный режим, $P = 0,366$ Вт	90	[222]

* Коэффициент преобразования относительно мощности ламп накачки.

борате калия (KB5) и β -BaB₂O₄. Вследствие того, что после удвоения частоты поляризации волн первой и второй гармоник ортогональны, для ГТГ необходимо использовать кристалл, позволяющий взаимодействие типа 2. Этому условию, в частности, удовлетворяет KDP, который благодаря своим свойствам нашел широкое применение для ГТГ. В кристаллах RDA и RDP возможна синхронная ГТГ только типа ооо, что приводит к необходимости установления дополнительных оптических элементов после кристалла-удвоителя частоты для совмещения поляризаций первой и второй гармоник. Так, в [42] для этой цели использовалась пластинка из кристаллического кварца толщиной 4,35 мм. Кристалл LiIO₃ в принципе позволяет реализовать как синхронизм типа 1 с $d_{\text{эф}} = d_{31} \sin \theta$, так и синхронизм типа 2 с $d_{\text{эф}} = 0,5d_{14} \sin 2\theta$. Однако ввиду того, что d_{14} пренебрежимо мал,

Генерация третьей гармоники излучения Nd:YAG лазера (1,064→ 0,355 мкм)

Кристалл	Тип взаимодействия	Угол синхронизма	τ_n	L , мм	Коэффициент преобразования, %	Литература	Примечание
KDP	ооо	58°	150 пс	12	32 по энергии	[201]	$I_n=1$ ГВт/см ²
	ооо	58°	25 нс*	—	6 —»—	[223]	
	ооо	58°	50 пс	—	10 —»—	[224]	
RDA	ооо	66°12'	8 нс	14,8	12 по мощности	[37]	$\Delta\theta L=1,0$ мрад·см
RDP	ооо	61°11'	—	15,3	44 по мощности	[41]	$I_n=2 \cdot 10^8$ Вт/см ²
	ооо	61°11'	8 нс	15,3	21 —»—	[42]	
LiIO ₃	ооо	47°	0,8 нс	8	0,7 по мощности	[225]	$P_{ср}=4,5$ мВт
	ооо	47°30'	—	4,8	4 —»—	[226]	
	ооо	61°43'	—	4,65	10 ⁻³ —»—	[226]	
LFM	ооо	8,2°	12 нс	—	15	[149]	$P=0,6$ МВт, плоскость XY
NaCOOH	ооо	2,2°	8 нс	15	46 по мощности	[151]	Плоскость XY, $P_{ср}=1,9$ Вт, $P_{пик}=23$ МВт, $\Delta\varphi=8,7$ мрад

* Лазер на стекле с Nd³⁺.

взаимодействие типа 2 в LiIO₃ на практике не используется. В [226] с использованием LiIO₃ получены ГТГ излучения Nd:YAG лазера в синхронизме типов 1, 2 с мощностью третьей гармоники 22 и 0,005 кВт соответственно. Генерация третьей гармоники излучения Nd:YAG лазера с модуляцией добротности реализована в RDA и RDP [37, 42]. Излучение с $\lambda=1,064$ мкм мощностью 50 МВт и длительностью импульса 12 нс удваивалось в кристалле DCDA. Мощность излучения на второй гармонике $\lambda=532$ мкм составляла 18...22 МВт при длительности импульса 10 нс. Мощность излучения на третьей гармонике $\lambda=355$ нм составляла 6 и 10,5 МВт при использовании кристаллов RDA и RDP соответственно.

Прямая ГТГ излучения наносекундного лазера на алюминате иттрия YAlO₃:Nd³⁺ ($\lambda=1,079$ мкм, $\tau=15$ нс) реализована в LiIO₃ [444]. Угол синхронизма для преобразования типа ооо—е составлял 80°, достигнут коэффициент преобразования $\eta=0,2\%$ при $I_n=50$ МВт/см². Прямая ГТГ излучения пикосекундного лазера на фосфатном стекле с Nd³⁺ ($\lambda=1,054$ мкм, $\tau=5$ пс) достигнута на кристалле β -BaB₂O₄ ($\theta_{ооо}=47^\circ 24'$, $\varphi=90^\circ$, $L=0,72$ см) [440]. Коэффициент преобразования $\eta=0,8\%$ при $I_n=50$ ГВт/см², $\chi^{(3)}_{эф}=(6,4\pm 2,8) \cdot 10^{-23}$ м²/В².

Генерация четвертой гармоники излучения Nd:YAG лазера ($\lambda_4=0,266$ мкм) получена в кристаллах KDP, DKDP, ADP, KB5, LFM, а также в β -BaB₂O₄ [69] (табл. 35). Наиболее пригодны для этой цели кристаллы DKDP и ADP,

Т а б л и ц а 35

Генерация четвертой гармоники излучения Nd : YAG лазера (1,064→0,266 мкм)

Кристалл	Тип взаимод-ствия	θ , град	I_H , Вт/см ²	τ	L , мм	Коэффи-циент преоб-разования, % (от $\lambda=532$ нм)	Лите-рату-ра	Примечание
KDP	ооо	78	—	7 нс	—	30...35	[228]	
DKDP	ооо	90	$2 \cdot 10^7$	—	40	40	[27]	$T=40,6^\circ\text{C}$
	ооо	90	$8 \cdot 10^9$	30 пс	4	75	[22]	
	ооо	90	$5 \cdot 10^7$	25 нс	20	40	[229]	$T=60^\circ\text{C}$, $P=2,5$ МВт,
	ооо	90	—	600 нс	50	3,4	[230]	$T=49,8^\circ\text{C}$, $P_{ср}=0,5$ Вт
ADP	ооо	90	$8 \cdot 10^9$	30 пс	4	85	[22]	
	ооо	90	—	8 нс	30	15*	[231]	$T=51,2^\circ$, $P=5$ МВт
KB5	еео	47,2	—	30 пс	10	6*	[232]	$P=60$ МВт
LFM	ооо	—	10^6	—	15	6...7	[208]	
β -BaB ₂ O ₄	ооо	48	—	5 нс	—	16	[445]	$E=80$ мДж

* Коэффициент преобразования от $\lambda_1=1,064$ мкм.

допускающие 90°-й синхронизм, а также KDP. Все они имеют достаточно высокие нелинейные коэффициенты, небольшие коэффициенты линейного и двухфотонного поглощения на частоте четвертой гармоники и высокие пороги оптического пробоя. Необходимо отметить работу [22], где достигнут 85%-й коэффициент преобразования в излучение с $\lambda=266$ нм при использовании кристалла ADP толщиной 4 мм. В табл. 36 приведены расчетные значения спектральной, угловой и температурной ширины синхронизма для ГВГ от $\lambda=0,532$ мкм.

Генерация пятой гармоники излучения неодимовых лазеров ($\lambda_5=212$ нм) осуществлена в кристаллах KDP и ADP — при их охлаждении, и в β -BaB₂O₄, KB5, мочеvine и CaCO₃ — при комнатной температуре (табл. 37). Достигнуты

Т а б л и ц а 36.

Расчетные значения спектральной $\Delta\lambda$, угловой $\Delta\theta$ и температурной ΔT ширины синхронизма для ГВГ от $\lambda=0,532 \rightarrow 0,266$ мкм (длина кристалла $L=1$ см)

Кристалл	Тип взаимод-ствия	θ_c , град	$\Delta\lambda$, нм [12*, 4*]	$\Delta\theta$, мрад [12*]	ΔT , °C [4*]
KDP	ооо	77	0,13	1,1	1,2
DKDP	ооо	90	—	13,4 [230]	1,77*
ADP	ооо	82	0,14	1,4	2,5
LFM	ооо	32	0,1	—	0,7
					0,54**
					—

* Экспериментальные данные [229].

** Экспериментальные данные при $\theta_{ооо}=90^\circ$ ($T=52,1^\circ\text{C}$) [231].

Генерация пятой гармоники излучения неодимовых лазеров ($\lambda_5=212,8$ нм)

Кристалл	Углы синхронизма θ , φ , град	Тип взаимодей- ствия	Тем- пера- тура кри- стал- ла, °С	Выходные параметры	τ_n	Лите- ратура
KDP	$\theta=90$	ооо*	-70	10^{-4} Дж	—	
	$\theta=90$	ооо	-35	$P_{ср}=2,6$ мВт, $f=120$ кГц	30 нс	[234]
	$\theta=90$	ооо	-40	$P_{ср}=2$ мВт, $f=6$ кГц	30 нс	[235]
ADP	$\theta=90$	ооо	-40	$P_{ср}=5-7$ мВт, $f=10$ Гц	10 нс	[236]
	$\theta=90$	ооо	-55	5 кВт, $f=10$ Гц	10 нс	[237]
KB5	$\varphi=53\pm 1$, $\theta=90$	еео	20	110 кВт	6 нс	[142]
	$\varphi=53$, $\theta=90$	еео	20	5 МВт	20 пс	[238]
	$\varphi=52,1$, $\theta=90$	еео	20	11 МВт	30 пс	[232]
Мочевина	$\theta=72$	еео	20	4,5 МВт	10 нс	[187]
CaCO ₃	$\theta=51,5$	оооо	20	0,2 МВт	3 пс	1
β -BaB ₂ O ₄	$\theta=55\pm 1$	ооо	20	—	—	
	$\theta=51,1$	ооо	20	—	7 нс	
	$\theta=69,3$ *	ооо	20	—	10 нс	
	$\theta=55$	ооо	20	4 МВт	5 нс	

* $\omega_5=\omega_2+\omega_3$.

средние мощности наносекундного излучения 2...3 МВт при большой частоте повторения (120 кГц) [234, 235] и 5...7 МВт при частоте повторения 10 Гц [236, 142]. В кристалле KB5 достигнуты пиковые мощности излучения на $\lambda=212,8$ нм до 11 МВт при $\tau_n=30$ пс [232]. Излучения первой и четвертой гармоник распространялись в плоскости ХУ, поляризованные в той же плоскости, излучение пятой гармоники было поляризовано вдоль оси Z.

В кальците (CaCO₃), в отличие от предыдущих случаев, где взаимодействовало основное излучение с четвертой гармоникой, для ГПГ использовалось четырехфотонное параметрическое взаимодействие типа оооо: $\lambda_1+\lambda_1+\lambda_3\rightarrow\lambda_5$, т. е. смешивались два фотона с $\lambda_1=1,06$ мкм с одним фотоном с $\lambda_3=355$ нм [239]. В данном случае ГПГ реализуется за счет тензора кубической нелинейной восприимчивости $\chi^{(3)}$, компоненты которого равны: $\chi^{(3)}_{1111}=2,5\cdot 10^{-22}$ м²/В² ($\lambda=0,53$ мкм), $\chi^{(3)}_{3333}=1,4\cdot 10^{-22}$ м²/В² ($\lambda=0,53$ мкм) и $\chi^{(3)}_{3222}=0,06\cdot 10^{-22}$ м²/В² ($\lambda=0,69$ мкм). В качестве накачки использовался пуг из 20 импульсов ($\tau_n=3$ пс) неодимового лазера. Кристалл CaCO₃ имел длину 0,5 см, линейное поглощение на $\lambda=212$ нм составляло $\alpha=3,4$ см⁻¹.

В [69, 68, 445] получена ГПГ излучения Nd:YAG лазера в β -BaB₂O₄ как при смешении первой и четвертой гармоник ($\theta_{ооо}=51,1^\circ$, $\theta_{ооо}=57,2^\circ$), так и третьей со второй ($\theta_{ооо}=69,3^\circ$). Высокая прозрачность в УФ-области (до 188 нм) и возможность ГВГ при комнатной температуре вплоть до 204,8 нм делают кристалл β -BaB₂O₄ весьма перспективным для его использования в УФ-диапазоне спектра.

Благодаря большому нелинейному коэффициенту ($d_{36}=3d_{36}$ (KDP)), прозрачности в УФ-области (вплоть до 200 нм) и высокому порогу пробоя

Генерация гармоник излучения Nd:YAG лазера с $\lambda=1,318$ мкм

Номер гармоник	λ , нм	Кристалл	$\theta_{оое}$, град	L , мм	τ_n , нс	Выходные параметры	Коэффициент преобразования по энергии, %	Литература
2	659,4	LiNbO ₃	44,67	16	40	85 кВт	10	[240]
3	439,6	KDP	42,05	30	40	3,4 кВт	0,4	[240]
4	329,7	KDP	53,47	30	40	6 кВт	0,6	[240]
5*	263,8	KDP	55,33	30	30	0,2 кВт	0,02	[240]
6**	219,3	KB5	78 (еео)	15	45	3 кВт	0,5	[241]
2	659,4	DCDA	70,38	13,5	25	1,4 МВт	40	[244]
2	659,4	LiIO ₃ ***	22	10	30	$P_{ср}=1$ Вт	100	[243]
2	659,4	LiNbO ₃	90($T=300^\circ\text{C}$)	19	50	60 мДж	48	[242]
2	659,4	LiNbO ₃	90($T=300^\circ\text{C}$)	20	50	10 мДж	21	[242]
3	439,6	KDP	42,05	40	50	1,4 мДж	3	[242]
3	439,6	LiIO ₃	—	8	50	0,6 мДж	1,2	[242]

* $\omega_5 = \omega_1 + \omega_4$;** $\omega_6 = \omega_3 + \omega_3$;

*** Внутрирезонаторная ГВГ.

(5 ГВт/см² на $\lambda=1,06$ мкм) мочевины, наряду с боратом бария, наиболее пригодна для ГПГ излучения Nd:YAG лазеров с модуляцией добротности. Так, в [187] на кристалле мочевины длиной 5 мм достигнута энергия излучения с $\lambda=212,8$ нм, равная 30 мДж.

Генерация гармоник излучения лазеров с $\lambda=1,318$ мкм. В ряде работ исследована генерация гармоник Nd:YAG лазера с модуляцией добротности с длиной волны основного излучения $\lambda_1=1,318$ мкм. В [240] с использованием LiNbO₃ и KDP достигнута генерация высших гармоник (вплоть до пятой) мощностью 0,2...85 кВт (табл. 38). Во всех случаях использовалось взаимодействие типа оое. В [241] получена шестая гармоника $\lambda_6=219,3$ нм на кристалле пентабората калия путем удвоения его третьей гармоники. Излучение распространялось в плоскости XY(*a*, *b*), использовалось взаимодействие типа еео. Спектральная и угловая ширина синхронизма составляли 1,2 нм и 1,5 мрад соответственно. Наиболее перспективным материалом для удвоения излучения с $\lambda=1,318$ мкм является LiNbO₃ [242]. Например, при интенсивности накачки $I_n=100$ МВт/см² достигнута эффективность преобразования во вторую гармонику примерно 48% при 90°-м синхронизме. Без специальной фокусировки основного излучения эффективность падает до 21% при длине кристалла 20 мм [242]. Режим 100%-го преобразования во вторую гармонику при внутрирезонаторной ГВГ с использованием кристалла LiIO₃ достигнут в [243]; при этом мощность на выходе составила 1 Вт.

3.2. Генерация гармоник мощных широкоапертурных неодимовых лазеров

В последнее время успешно развиваются исследования по генерации гармоник в мощных, высокоэнергетичных лазерных установках на стекле с неодимом, используемых, в частности, в экспериментах по лазерному термоядер-

ному синтезу. В этих преобразователях частоты используются исключительно кристаллы KDP, которые имеют ряд преимуществ по сравнению с другими кристаллами: высокий порог пробоя для субнано- и пикосекундных накачек: >10 ГВт/см²; небольшое линейное и двухфотонное поглощение на длинах волн 0,266; 0,355; 0,532 и 1,064 мкм; высокий порог генерации пикосекундного континуума и ВКР: >100 ГВт/см²; отсутствие оптически наведенного изменения показателя преломления (optical damage); возможность выращивания монокристаллов больших размеров (несколько десятков сантиметров) высокого оптического качества; малая величина производной дисперсионного двулучепреломления по температуре, что позволяет использовать кристаллы KDP без дополнительного термостатирования. В настоящее время достигнуты эффективности преобразования: во вторую гармонику ($\lambda_2=0,53$ мкм) $\eta=90\%$ [245], в третью гармонику ($\lambda_3=0,355$ мкм) $\eta=80 \dots 81\%$ [17, 245], в четвертую гармонику ($\lambda_4=0,266$ мкм) $\eta=51\%$ (с учетом просветления кристаллов $\eta=70\%$ [13]), табл. 39.

Процесс утроения частоты излучения неодимового лазера детально исследован в работах [249, 250] и реализован экспериментально на широкоапертурной лазерной установке в Университете г. Рочестера (США) [13]. Рассмотрение сводится к сравнению трех разных схем утроения:

1. *Схема «угловой расстройки» (angle-detuning).* Используется процесс ГВГ типа 2 с поворотом угла поляризации основного излучения на угол $\alpha=45^\circ$ относительно о-поляризации (традиционная схема). Для ГТГ также используется тип 2 взаимодействия, при том оба кристалла KDP имеют одинаковые параметры: $\theta=59^\circ$, $\varphi=0^\circ$. Эта схема чувствительна к расстройке угла α . Недостатком данного метода является необходимость в установке специальной пластинки из кристаллического кварца между кристаллами KDP для достижения ортогональности поляризаций волн ω и 2ω . При использовании для ГВГ взаимодействия по типу 1 необходимость в использовании специальной пластинки для вращения плоскости поляризации отпадает. В этом случае, однако, чувствительность схемы в расстройке угла α возрастает в 2,7 раза.

2. *Схема поляризационного рассогласования (polarization-mismatch).* В этой схеме так же, как и в первой, используются для ГВГ и ГТГ взаимодействия типа 2 ($\theta=59^\circ$), однако угол поворота плоскости поляризации волны ω относительно о-поляризации составляет величину $\alpha=\arctg 1/\sqrt{2}=35^\circ 18'$. В случае плоских волн для достижения максимального преобразования в третью гармонику необходимо равенство числа фотонов ω и 2ω , что приводит к отношению их энергий как 1:2. Отсюда ясно, что при ГВГ необходимо достижение не максимально возможного преобразования, а именно значения 67% для последующего максимального коэффициента преобразования в третью гармонику. В рассматриваемой схеме № 2 при угле $\alpha=35^\circ 18'$ один из двух «о» фотонов волны ω смешивается с «е» фотоном ω с образованием «е» фотона 2ω в то же время как другой «о» фотон частоты ω остается без преобразования. При этом коэффициент преобразования во вторую гармонику достигает 67%, причем оставшееся излучение на частоте ω имеет подходящую поляризацию для следующего каскада утроения. Эта схема малочувствительна к угловой расстройке поляризаций (расстройка $\Delta\alpha$ может составлять 300 мкрад); нет необходимости в использовании дополнительных

Генерация гармоник излучения

Основное излучение			Вторая гармоника				
λ , мкм	I_H , 10^9 Вт/см ²	τ_H , нс	λ , мкм	Тип взаимодействия	η , %	Длина кристалла, мм	E , Дж
1,054	2,5	0,14	0,527	еое	67	12	9
1,054	3,5	0,7	0,527	еое	67	12	25
1,064	2,5	0,1	0,532	еое	67	8	17
1,064	9,5	0,7	0,532	оое	83	10	346
1,064	2,0	0,7	0,532	еое	67	12	—
1,064	1,2	0,7	0,532	оое	—	10	—
1,06	0,2	25	0,53	оое	80	40	60
1,06	2,7	0,5	0,53	оое	90	30	10...20
1,06	2,7	0,5	0,53	еое	67	18	—
1,053	1,5	0,6	0,527	еое	60...70	16	70...80

оптических пластинок для поворота плоскости поляризации основного излучения; нет проблемы двулучепреломления, которая существенно влияет на параметры схемы № 1 с $\alpha=45^\circ$. Данная схема является идеальной для мощных лазерных систем на неодимовом стекле.

3. *Схема обхода поляризации (polarization-bypass)*. Эта схема аналогична схеме поляризационного рассогласования с той лишь разницей, что в обеих каскадах используется взаимодействие типа 1. В первом каскаде (ГВГ) достигается максимально возможное преобразование во вторую гармонику ($\alpha=35^\circ 18'$, $\theta=41^\circ$), что практически реализуется выбором нелинейных кристаллов соответствующей длины. Эта схема особенно пригодна при использовании в каскаде ГВГ кристаллов, допускающих 90° -й синхронизм с температурной подстройкой (например, CDA), так как они менее чувствительны к угловой расстройке поляризаций, чем KDP.

Во всех схемах может быть получен коэффициент преобразования в третью гармонику до 80%, с учетом поглощения $\alpha=0,04$ см⁻¹ на $\lambda=1,06$ мкм. Более оптимальной является схема № 2, где указанная величина эффективности преобразования сохраняется в широком диапазоне интенсивностей основного излучения: 2...5 ГВт/см².

Экспериментально для ГТГ реализована схема «поляризационного рассогласования» с коэффициентом преобразования 80% [17]. Параметры лазерной установки: длина волны 1,06 мкм; диаметр пучка 60 мм; длительность импульса 140 и 700 пс; энергия 25 и 40 Дж соответственно. Использовались кристаллы KDP с $\theta_{оое}=59^\circ$ и $\varphi=0^\circ$. Максимальный коэффициент преобразования достигался при $I_H=2...3$ ГВт/см². В [13] описываются исследования генерации гармоник 2 ω (532 нм), 3 ω (355 нм) и 4 ω (266 нм) на широкоапертурной неодимовой установке Аргус в Ливерморской лаборатории. Детально анализировался механизм нелинейных потерь при нелинейном преобразовании: генерация ВКР в просветляющих покрытиях кристаллов KDP при интенсив-

мощных неодимовых лазеров в КДР

Третья и четвертая гармоники					Лите- ратура	Примечание
λ , мкм	Тип вза- имодей- ствия	η , %	Длина кристал- ла, мм	E , Дж		
0,35	еое	80	12	11	[17]	Поляризация излучения с $\lambda=1,054$ мкм составляет угол $\alpha=35^\circ$ относительно о-поляри- зации $\tau_{4\omega}=50$ пс
0,35	еое	80	12	30	[17]	
0,266	оое	30	7	4	[246]	
0,355	еое	55	10	41	[17]	
0,266	оое	51	10	50	[13]	
0,353	еое	81	18	10...20	[247]	Поляризация излучения с $\lambda=1,06$ мкм составляет угол $\alpha=35,2^\circ$ относительно о-поля- ризации
					[245]	
					[245]	
0,263	оое	46	7	53	[248]	

ностях >3 ГВт/см²; нелинейные потери (двухфотонное поглощение) в КДР на $\lambda=266$ нм при $I_n > 1,5$ ГВт/см² (коэффициент двухфотонного поглощения $\beta = 2,7 \cdot 10^{-10}$ см/Вт); объемный пробой оптических элементов из плавленнного кварца за счет самофокусировки при $I > 1,5$ ГВт/см² на длинах волн третьей и четвертой гармоник (355 и 266 нм); повреждение просветляющих пленок при потоках энергии больше 1 Дж/см². При использовании кристалла КДР (тип 1) длиной 1,0 см (апертура 10×10 см) и $I_n = 9,5$ ГВт/см² достигнут коэффициент преобразования во вторую гармонику $\eta = 83\%$ (вне кристалла). При просветлении кристалла эта цифра возрастает до 89%. При использовании КДР (тип 1) длиной 2,29 см и $I_n = 2,7$ ГВт/см² коэффициент преобразования $\eta = 71\%$ с энергией на выходе 65 Дж. При $I_n = 5,7$ ГВт/см² на КДР (тип 2, длина 1,19 см) достигнут коэффициент преобразования $\eta = 74\%$ с $E = 121$ Дж на $\lambda = 532$ нм.

Для ГТГ опробованы три разные схемы удвоения и утроения: при тип1/тип2, длина кристаллов 2,3/1,12 см; тип 1/тип 2, длина кристаллов 1,3/1,2 см и тип 2/тип 2, длина кристаллов 1,2/1,0 см. Достигнуты коэффициенты преобразования в третью гармонику соответственно 50, 53 и 55%. Как было указано выше, при ГЧГ существенную роль при $I_n > 1,5$ ГВт/см² начинают играть нелинейные потери. По этой причине для достижения эффективного ГЧГ интенсивность накачки была выбрана $I_n = 1 \dots 1,2$ ГВт/см². Использовалось преобразование типа 1 (оое), получены максимальные эффективности преобразования от $\lambda = 532$ нм 64% ($E = 50$ Дж) и 55% ($E = 44$ Дж) при длинах кристаллов 1 и 1,5 см соответственно. С учетом возможности просветления кристаллов эти цифры возрастают до 70 и 60% соответственно. Теоретическая интерпретация результатов работы [13] приведена в [251].

В [247] проанализирован процесс удвоения частоты излучения в условиях, применимых к большим лазерным системам на неодимовом стекле с целью выяснения предельных коэффициентов преобразования. Эксперименталь-

ное исследование ГВГ было проведено на установке с многокаскадным лазером на неодимовом стекле с апертурой двух оконечных каскадов усилителей 45 мм. Максимальная энергия излучения лазера достигала 90 Дж в гигантском импульсе длительностью 25 нс. При этом распределение интенсивности лазерного пучка соответствовало гипергауссовой функции со степенью $N=5$. Для удвоения использовались кристаллы КДР апертурой 20 и 50 мм, тип взаимодействия оое. Максимальное преобразование по энергии излучения во вторую гармонику получено на кристалле КДР размерами $50 \times 50 \times 40$ мм: $\eta=80\%$ при энергии падающего излучения 70 Дж и расходимости $6 \cdot 10^{-5}$ рад.

В [245] достигнуты предельные эффективности преобразования во вторую (90%) и третью (81%) гармоники мощного лазера на фосфатном стекле. Для удвоения использовались кристаллы КДР сечением 50×50 мм, длиной 18, 30 и 40 мм. Достигнуты коэффициенты преобразования соответственно 75, 90 и 80%. Диаметр пучка 32 мм, расходимость $5,5 \cdot 10^{-5}$ рад, деполаризованная часть излучения не более 3%. Для ГТГ использовалась схема «поляризационного рассогласования» с поворотом плоскости поляризации основного излучения на 35° . В обоих каскадах использовались кристаллы КДР длиной 17,5 мм и апертурой 50×50 мм, тип взаимодействия еое. В [248] исследовалась генерация четвертой гармоники излучения широкоапертурного лазера с генератором на $YLF:Nd^{3+}$ и усилителями на фосфатном стекле с неодимом ($\lambda_1=1,053$ мкм, $E=115$ Дж). Достигнутый коэффициент преобразования в четвертую гармонику ($\lambda_4=0,26$ мкм) $\eta=46,5\%$ при $I_d=1,5$ ГВт/см².

Оригинальная схема преобразования частоты (квадратурная схема) с использованием двух кристаллов для каждой ступени преобразования (вместо одного) предложена и детально исследована в [252]. Суть метода проиллюстрируем на примере ГВГ (рис. 22). Квадратурная схема ГВГ включает в себя два кристалла, ориентированных для взаимодействия типа 2 (еое) и расположенных таким образом, что плоскости kz (т. е. где находятся оптическая ось и направление распространения пучка) были ортогональны. Эта схема имеет две особенности: во-первых, падающее излучение, оставшееся после первого каскада преобразования, имеет нужную поляризацию и для второго каскада преобразования, поэтому оба кристалла могут эффективно участвовать в преобразовании; во-вторых, вторая гармоника, генерируемая в первом кристалле, имеет неподходящую поляризацию для второго кристалла и поэтому проходит через него без преобразования. Суммарная эффективность преобразования для двух кристаллов будет равна

$$\eta = \eta_1 + (1 - \eta_2)\eta_2,$$

где η_1 и η_2 — эффективности преобразования в каждом кристалле.

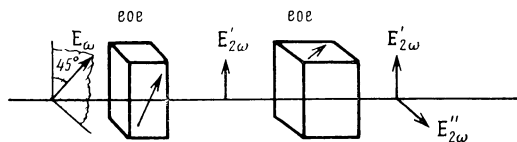


Рис. 22. Квадратурная схема ГВГ

Квадратурная схема преобразования имеет одно неоспоримое преимущество по сравнению с обычной однокристалльной. Она имеет существенно больший динамический диапазон изменения интенсивности накачки, достигающий до 100 ... 1000, в то время как в однокристалльных схемах удается получить динамический диапазон около 10. Экспериментально преимущества этой схемы были продемонстрированы для ГВГ излучения Nd:YLF лазера с тремя усилителями на фосфатном стекле с Nd ($\lambda=1,053$ мкм, $\tau=1,2$ нс). Использовались кристаллы DKDP толщиной 12 и 44 мм; поглощение на основной частоте $\alpha=0,006$ см⁻¹, френелевские отражения от 15,5 до 18,5%. Достигнута эффективность преобразования 80% при изменении интенсивности накачки в 45 раз от 0,2 ... 9 ГВт/см². При просветлении кристаллов η возрастает до 95%. Основное преобразование при маленьких интенсивностях происходит во втором, длинном кристалле, при больших же интенсивностях — в первом.

Теоретически также рассчитаны зависимости коэффициента преобразования от интенсивности накачки при ГВГ в КТР, β -BaB₂O₄ ($\lambda=1,06$ мкм) и CdSeAs₂ (10,6 мкм). Приводятся квадратурные схемы преобразования для ГТГ, ГЧГ и ГСЧ.

3.3. Генерация гармоник других лазеров

Рубиновый лазер. Для ГВГ излучения рубинового лазера ($\lambda=694,3$ нм) используются кристаллы KDP, DKDP, ADP, RDA, RDP, LiIO₃ и KB5 (табл. 40). Как видно из таблицы, наибольшие коэффициенты преобразования достигнуты на кристаллах RDA, RDP и LiIO₃. На RDA длиной 1,45 см достигнут коэффициент преобразования 58% по мощности как при комнатной температуре ($T=20^\circ\text{C}$, $\theta_{\text{оое}}=80^\circ$), так и при 90°-м синхронизме ($T=90^\circ\text{C}$). Мощность на выходе составила 62 МВт. Кристалл RDA удобен также тем, что имеет большую угловую ширину синхронизма (см. табл. 40). Третья гармоника излучения рубинового лазера ($\lambda_3=231,4$ нм) получена на кристалле KB5

Т а б л и ц а 40.

Генерация второй гармоники излучения рубинового лазера ($\lambda_1=694,3$ нм)

Кристалл	Тип взаимодействия	θ_0 , град	$I_{\text{н}}$, Вт/см ²	L , см	Коэффициент преобразования по мощности, %	Литература	Примечание
KDP	оое	50,5	—	—	—	[253]	$L\Delta\theta=1,75$ мрад·см
DKDP	оое	52	—	—	—	[34]	$L\Delta\theta=1,46$ мрад·см
ADP	оое	52	—	—	—	[253]	$L\Delta\theta=1,63$ мрад·см
RDA	оое	80,3 (90)	$1,5 \cdot 10^8$	1,45	58	[38]	$T=20^\circ\text{C}$ (90°C), $L\Delta\theta=4,37$ мрад·см
RDP	оое	67	$1,8 \cdot 10^8$	1,0	37	[39]	$T=20^\circ$, $L\Delta\theta=2,4$ мрад·см
LiIO ₃	оое	52	$1,3 \cdot 10^8$	1,1	40	[43]	$L\Delta\theta=0,2$ мрад·см
KB5	еео	26,5	—	1,0	10^{-3}	[254]	$\eta[12^*]$ В плоскости XY

при смещении первой (694,3 нм) и второй его гармоник (347,1 нм) [144]. Излучения распространялись в плоскости XY по углом $\varphi = 57 \pm 1^\circ$ от оси X . Использовалось взаимодействие типа $e eo$. Достигнут коэффициент преобразования 0,2% от основного излучения. Мощность на выходе составила 40 кВт при $\tau_n = 6$ нс.

Полупроводниковые лазеры. Наиболее удобным кристаллом для ГВГ излучения полупроводниковых лазеров является KNbO_3 . Наряду с очень большим нелинейным коэффициентом ($d_{32} = 50d_{36}(\text{KDP}) = 2,1 \cdot 10^{-11}$ м/В), этот кристалл имеет 90° -й синхронизм при комнатной температуре на длине волны генерации диодных лазеров ($\lambda = 860$ нм). В [255] получена эффективная ГВГ излучения импульсного $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ лазера (860 нм) в кристалле длиной 6 мм при распространении излучения вдоль оси a ($T = 31^\circ\text{C}$). Основное излучение было поляризовано вдоль оси b , а его вторая гармоника — вдоль оси c . При накачке $I = 6$ кВт/см² коэффициент преобразования достигал $1,8 \times 10^{-3}$. Мощность на выходе составляла 0,35 мВт. В [446] достигнута на $\lambda = 421$ нм мощность $P = 0,72$ мВт при удвоении излучения GaAlAs лазера в кристалле длиной 5 мм при $T = -22,75^\circ\text{C}$.

В [178] реализована ГВГ излучения непрерывного $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ лазера (860 нм) в кристалле KNbO_3 длиной 8,97 мм. Излучение накачки так же, как и в [255], распространялось вдоль a и было поляризовано вдоль b . При $I_n = 250$ Вт/см² мощность излучения на второй гармонике достигала 0,28 мВт при $\eta = 5 \cdot 10^{-5}$. Спектральная ширина синхронизма для использованной длины кристалла составляла $\Delta\lambda = 0,056$ нм, что позволяло полностью удваивать излучение AlGaAs лазера с $\Delta\lambda = 0,02$ нм. Угловая ширина синхронизма при 90° -м синхронизме составляла 51 мрад, что больше расходимости излучения при фокусировке в кристалл (12 мрад).

Лазеры на красителях. В табл. 41 приведены некоторые характеристики нелинейных кристаллов, используемых для удвоения излучения лазеров на красителях: нелинейный коэффициент $d_{\text{эф}}$, отношение $d_{\text{эф}}^2/n^3$, пропорциональное эффективности преобразования и минимальная длина волны, достижимая с помощью ГВГ при комнатной температуре. Для всех рассмотренных кристаллов, кроме LFM, эта длина волны соответствует 90° -му синхронизму, т. е. распространению под углом $\theta = 90^\circ$ к оптической оси для одноосных кристаллов, и вдоль оси Y ($\theta = 90^\circ$, $\varphi = 90^\circ$) — для двухосных кристаллов. Для формиата лития (LFM) длина волны 230 нм соответствует краю поглощения кристалла, в то время как условия синхронизма позволяют получать и меньшие длины волн. При охлаждении кристаллов с помощью ГВГ возможно получать и меньшие длины волн; например, у ADP $\lambda_{2\omega\text{min}} = 250$ нм при $T = 200$ К [256]. Ввиду того, что 90° -й синхронизм обладает рядом преимуществ, для генерации второй гармоники, как правило, используются нелинейные кристаллы, имеющие 90° -й синхронизм для данной длины волны накачки. Так, для ГВГ излучения с $\lambda = 860$ нм оптимально использовать KNbO_3 , а для $\lambda = 592$ нм — кристалл DADA и т. д.

Минимальные длины волн с помощью ГВГ достигаются на кристаллах $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ (205 нм), пентабората калия (KB5) и его дейтерированном аналоге (DKB5) (217 нм). В [137—139] на кристалле KB5 получена ГВГ излучения лазеров на красителях в области длин волн 217...315 нм (табл. 42). Излучение лазера на красителе распространялось в плоскости $ab(XY)$ с поляризацией в той же плоскости. Вторая гармоника была поляризована вдоль

Параметры кристаллов-удвоителей частоты излучения лазеров на красителях

Кристалл	$d_{эф}$	$d_{эф}^2/n^3$	$\lambda_2 \omega \text{ мин.}$ нм	Угол сноса ρ , град				
				$\lambda_0 = 500$ нм	600 нм	700 нм	800 нм	900 нм
β -BaB ₂ O ₄	0,3	0,06	204,8	4,96	4,71	4,28	3,89	3,57
DKB5	0,1	0,01	216,2	—	—	—	—	—
KB5	0,1	0,01	217,1	1,99	1,96	1,56	1,05	0,11
LFM	1,4	2,1	230	—	7,22	6,76	6,43	6,19
KDP	1	1	258,5	—	1,51	1,69	1,69	1,65
ADP	1,2	1,5	262	—	1,57	1,81	1,82	1,79
DKDP	0,92	0,9	265,5	—	1,41	1,59	1,57	1,51
LiIO ₃	12,7	106,7	293,2	—	3,34	4,98	5,00	4,74
ADA	—	—	294	—	0,80	1,88	1,42	2,03
DADA	—	—	296	—	—	—	—	—
DKDA	—	—	310	—	—	—	—	—
RDP	0,92	0,9	313,5	—	—	0,87	1,06	1,10
RDA	0,9	0,8	342	—	—	0,65	1,22	1,35
KNbO ₃	30,3	391	430	—	—	—	—	0,94
DCDA	0,92	0,75	517	—	—	—	—	—
CDA	0,92	0,75	525	—	—	—	—	—

Примечание: значения $d_{эф}$ и $d_{эф}^2/n^3$ даны относительно кристалла KDP.

оси Z (взаимодействие типа eoe). Указанная область перестройки перекрывается при изменении угла синхронизма φ_{eoe} от 90 до 31°. При взаимодействии в плоскости YZ ($\varphi = 90^\circ$) при изменении угла синхронизма θ_{ooe} от 90 до 0° перекрывается значительно меньший диапазон — от 217,1 до 240 нм [138]. Следует также подчеркнуть, что в плоскости YZ эффективная нелинейность значительно меньше, чем в плоскости XY , так как $d_{31} \approx 10d_{32}$, поэтому в KB5 в основном используются взаимодействия именно в плоскости XY . В табл. 43 приведены расчетные значения спектральной и угловой ширины синхронизма для ГВГ в плоскости $ab(XY)$ KB5.

В [68] на кристалле β -BaB₂O₄ достигнута ГВГ излучения лазера на красителе с параметрами: $P=1$ МВт, $\tau=8$ нс, вплоть до 204,8 нм (90°-й синхронизм типа oee). Излучение фокусировалось в кристалл с помощью линзы с $F=50$ см, коэффициент преобразования в излучение с $\lambda=204,8$ нм составлял $\eta=4\%$, с $\lambda=205,8$ нм — $\eta=17\%$. В [274] на том же кристалле β -BaB₂O₄ достигнут коэффициент преобразования во вторую гармонику излучения лазера на красителе 36% при $I_n=423$ МВт/см². Излучение фокусировалось в кристалл линзой с $F=50$ см. Эффективность преобразования с β -BaB₂O₄ в 4—6 раз превосходила таковую на кристалле ADP. При внутрирезонаторной ГВГ излучения фемтосекундного лазера на красителе получено излучение с $\lambda=315$ нм и длительностью импульса 43 фс на кристалле ВВО толщиной 55 мкм [447].

Отметим, что благодаря большой прозрачности в УФ-области (до 188 нм), высокому порогу оптического пробоя, возможности получения второй гармоники вплоть до $\lambda=204,8$ нм, негигроскопичности, химической инертности и механической стойкости кристалл β -BaB₂O₄ безусловно найдет широкое применение для нелинейных преобразований в УФ-диапазоне.

Генерация второй гармоники излучения лазеров на красителях

Кристалл	$\lambda_{2\omega}$, нм	Выходные параметры излучения (энергия, мощность, коэффициент преобразования, длительность импульса)	Температура	Примечание
KDP KDP	267,5...310 280...385	0,1 кВт, $\eta=1\%$ —	[257] [258, 259]	$\theta_{00e}=66 \dots 45^\circ$
KDP ADP	280...310 280...315	50 мДж —	[260] [261—263]	$\theta_{00e}=70 \dots 58^\circ$, $T=20^\circ\text{C}$
ADP ADP * ADP *	280...310 290...315 250...260	50 мДж, $\eta=8,4\%$ До 1 мВт, $\eta=3 \cdot 10^{-4}$ 120 мкВт	[260] [264] [256]	$\theta_{00e}=90^\circ$, $T=200 \dots 280\text{K}$ $L=3 \text{ мм}$
ADP *	293	0,13 мВт, $\eta=0,08\%$, $\tau=3 \text{ пс}$	[265]	$L=1 \dots 3 \text{ мм}$ $\theta=90^\circ$, $T=20 \dots 98^\circ\text{C}$, $I_n=36 \text{ МВт/см}^2$, $L=25 \text{ мм}$ $\theta=90^\circ$
ADP * RDP	295 313,8...318,5	$\eta=10^{-4}$, $\tau=3 \dots 4 \text{ пс}$ 3,6 мВт, $\eta=52\%$ по мощности, $\tau=8 \text{ нс}$	[266] [268]	$L=1 \dots 3 \text{ мм}$ $\theta=90^\circ$, $T=20 \dots 98^\circ\text{C}$, $I_n=36 \text{ МВт/см}^2$, $L=25 \text{ мм}$ $\theta=90^\circ$
RDP	310...335	3,2 мВт, $\eta=36\%$, $\tau=10 \text{ нс}$, $f=10 \text{ Гц}$	[272]	$\theta=90^\circ$, $T=25 \dots 100^\circ\text{C}$, $\delta v < 1 \text{ МГц}$
ADA*	294...305	10...20 мВт, непрерывный режим	[269]	$\theta=90^\circ$, $T=25 \dots 100^\circ\text{C}$, $\delta v < 1 \text{ МГц}$
DADA *	296...308	10...20 мВт, непрерывный режим	[269]	$\theta=90^\circ$, $T=25 \dots 100^\circ\text{C}$, $\delta v < 1 \text{ МГц}$
ADA *	285...315	40 мВт (одномодовый режим), 50 мВт (многомодовый режим)	[273]	$\theta=90^\circ$, температурная перестройка, $L=30 \text{ мм}$, $\delta v < 50 \text{ МГц}$
DKDA	310...355	0,8...3,2 мВт, $\eta=9 \dots 36\%$, $\tau=10 \text{ нс}$, $f=10 \text{ Гц}$	[272]	$\theta=90^\circ$, $L=15 \text{ мм}$
LiIO ₃ *	295	$\eta=10^{-4}$, $\tau=2,1 \text{ пс}$	[266]	$L=0,3 \text{ мм}$
LiIO ₃ *	293...312	0,37 мВт, непрерывный режим	[46]	$L=10 \text{ мм}$
LiIO ₃	293...330	15 мВт, непрерывный режим	[267]	$L=1 \text{ мм}$
LiIO ₃	293	3 кВт, $\eta=30\%$	[257]	$L=6 \text{ мм}$
LiIO ₃	293...310	4 мВт, $\eta=0,4\%$, непрерывный режим	[48]	$L=6 \text{ мм}$, $\Delta\lambda=0,03 \text{ нм}$
LiIO ₃	293...310	21 мВт, $\eta=2\%$, непрерывный режим	[48]	$L=6 \text{ мм}$, $\Delta v=30 \text{ МГц}$
β -BaB ₂ O ₄	204,8...215	100 кВт, 4...17%, 8 нс	[68]	$\theta=70 \dots 90^\circ$
β -BaB ₂ O ₄	205...310	50 кВт, 1...36%, 9...22 нс	[274]	$L=6 \text{ и } 8 \text{ мм}$
β -BaB ₂ O ₄ *	315	$P_{cp}=20 \text{ мВт}$, $\tau=43 \text{ фс}$	[447]	$\theta=38^\circ$, $\varphi=90^\circ$, $L=55 \text{ мкм}$
KB5	217,3...234,5	0,3 кВт, 1%, 7 нс	[137]	Плоскость ab , $e \parallel o$
KB5	217,1...240	5...6 мкДж, 10%, 3...4 нс	[138]	Плоскость bc , $\theta_{00e}=90 \dots 0^\circ$

Кристалл	$\lambda_{2\omega}$, нм	Выходные параметры излучения (энергия, мощность, коэффициент преобразования, длительность импульса)	Литература	Примечание
KB5	217,1...315,0	5...6 мкДж, 10%, 5 нс	[138]	Плоскость ab , $\varphi_{\text{еео}} = 90 \dots 31^\circ$, $L = 10$ мм
KB5	217,0...250	0,1...5 мкДж, 0,2...5%	[139]	Плоскость ab , $\varphi_{\text{еео}} = 90 \dots 65^\circ$
DKB5	216,15	2 мкДж, 5%, 3 нс	[135]	$\theta = 90^\circ$, $\varphi = 90^\circ$
LFM	230...300	2%	[146]	Плоскость XZ , $\theta_{\text{оое}} = 35 \dots 45^\circ$, $L = 1$ см
LFM *	290...315	$\eta = 10^{-4}$	[264]	Плоскость XZ , $\theta_{\text{оое}} = 45^\circ$ (590 нм)
LFM *	238...249	70 мкВт (244 нм), непрерывный режим	[270]	Плоскость XZ , $\theta_{\text{оое}} = 39\%$ (486 нм)
LFM	237,5...260	20 Вт, наносекундный режим, $\eta = 0,7\%$	[257]	
LFM	243	1,4 мВт, непрерывный режим	[271]	$\theta_{\text{оое}} = 36,8^\circ$, $L = 15$ мм
LFM	285...310	4 мкВт, непрерывный режим	[48]	
KNbO ₃	425...468	400 мВт, 43%	[180]	Угловая перестройка в плоскостях XU и YZ и температурная (20...220 °C) по оси a
KNbO ₃	419...475	12 мкВт, $\eta = 6,5 \cdot 10^{-4}$, непрерывный режим	[178]	По оси a , $T = -36 \dots +180^\circ\text{C}$, $L = 9$ мм
KNbO ₃	425...435	21 мВт, $\eta = 1,1\%$, непрерывный режим	[174]	По оси a , $T = 0 \dots 50^\circ\text{C}$, $L = 9$ мм
Мочевина	238...300	—	[181]	$\theta_{\text{еео}} = 90 \dots 45^\circ$, $L = 2$ мм
Мочевина	298...370	—	[181]	$\theta_{\text{еео}} = 90 \dots 50^\circ$, $L = 2$ мм

* Внутррезонаторная ГВГ.

Таблица 43

Расчетные значения спектральной $\Delta\lambda$ и угловой $\Delta\varphi$ ширины синхронизма для ГВГ и KB5 в плоскости ab (длина кристалла $L = 1$ см)

λ , нм	$\varphi_{\text{еео}}$, град	$\Delta\lambda$, нм	$\Delta\varphi$, град
440	78	1,16	1,40
446,7	73	1,31	1,05
470	62,3	2,04	0,76
484	57,5	2,66	0,72
500	52,8	3,7	0,70
520	49,2	5,06	0,72
530	46,8	6,15	0,73
540	45,2	7,38	0,75

В [273] с использованием кристалла ADA реализована ГВГ излучения лазера на красителе родамин 6G с эффективностью $5 \cdot 10^{-3}$. В [267] на кристалле LiIO_3 с помощью ВРГВГ достигнута генерация непрерывного УФ-излучения в области 293...330 нм с мощностью 2...15 мВт. Использовался лазер на красителе родамин 6G с накачкой аргоновым лазером с $\lambda = 514,5$ нм и $P = 2,5$ Вт. Ширина линии УФ-излучения составляла 180...500 кГц. В [46] сообщается о достижении 90°-го синхронизма с $\lambda = 293,15$ нм в LiIO_3 .

В кристалле формата лития (LFM) при ВРГВГ излучения лазера на красителе кумарин 102 получено излучение на длине волны 243 нм [271]. Излучение на основной частоте распространялось в кристалле в плоскости XZ с $\theta = 36^\circ 48'$. Использовалось взаимодействие типа оое, длина кристалла равнялась 15 мм. Диаметр пятна сфокусированного излучения в кристалле составлял 20 мкм. Эффективность преобразования от основного излучения оценивалась в $1,5 \cdot 10^{-4}$. Излучение с $\lambda = 243$ нм также генерировалось в кристалле ADP [275, 276] при внутрирезонаторной ГСЧ излучения аргонового лазера и лазера на красителе. Несмотря на то, что нелинейный коэффициент LFM больше, чем у ADP, внутрирезонаторная ГСЧ на ADP значительно более эффективна, чем внутрирезонаторная ГВГ на LFM по той причине, что кристалл ADP путем подбора соответствующих длин волн излучений может быть использован при 90°-м синхронизме.

В [272] продемонстрирована генерация третьей гармоники излучения лазера на красителе в кристалле пентабората калия (KB5). Достигнута перестройка в области 207,3...217,4 нм с пиковой мощностью 250 кВт при средней мощности 15 мВт. Использовались взаимодействия типа еое (в плоскости XY) и оое (в плоскости YZ). Генерация третьей гармоники излучения лазера на красителе с использованием мочевины достигнута в [187]: $\lambda = 231$ нм, $\theta_{\text{еое}} = 77^\circ$.

На рис. 23—28 представлены перестроенные зависимости угла синхронизма от длины волны для ГВГ в кристаллах KDP, ADP, RDP, LiIO_3 , LiNbO_3 , $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$, KB5 (плоскости XY и YZ), LFM(XZ), KTP(XY), KNbO_3 (XY, YZ, XZ), мочевины.

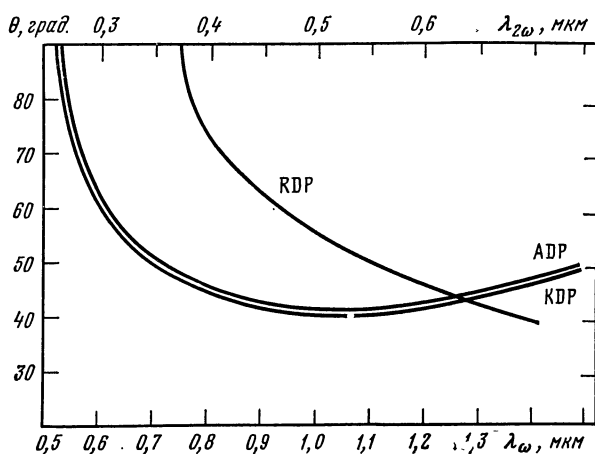


Рис. 23. Перестроенные кривые для ГВГ в кристаллах KDP, ADP и RDP (тип взаимодействия оое)

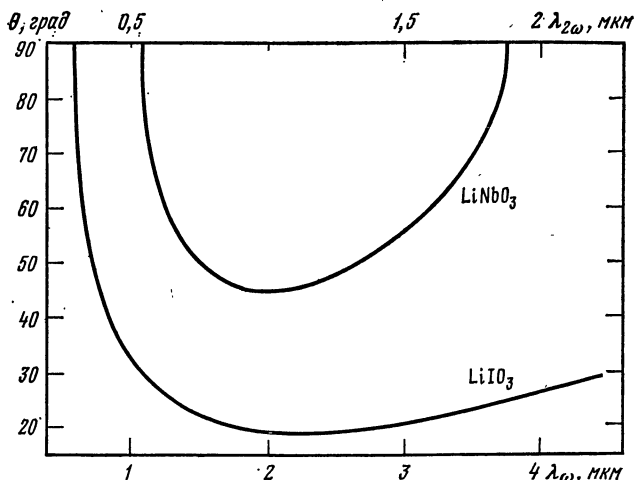


Рис. 24. Перестроенные кривые для ГВГ в кристаллах LiIO_3 и LiNbO_3

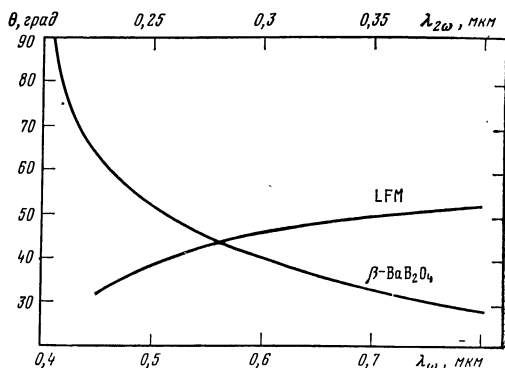


Рис. 25. Перестроенные кривые для ГВГ в кристаллах LFM (плоскость XZ, тип взаимодействия ооо) и $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ (тип взаимодействия ооо)

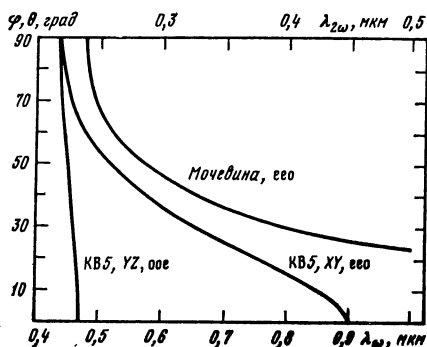


Рис. 26. Перестроенные кривые для ГВГ в кристаллах KB5 (XY, еео; YZ, ооо) и мочевины (еео)

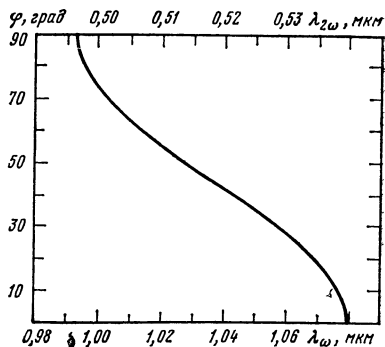


Рис. 27. Перестроенная кривая для ГВГ в кристалле KTR (XY, еео)

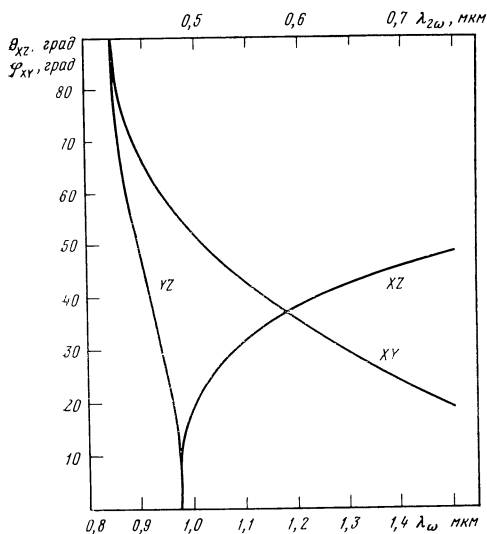


Рис. 28. Перестроочные кривые для ГВГ в кристалле KNbO_3 (YZ, еео; XY, оое; XZ, оое)

Газовые лазеры. Для получения второй гармоники излучения аргонового лазера (458 ... 515 нм) используются кристаллы KDP, ADP, КВ5; He-Ne лазера (1,15 ... 3,39 мкм) — кристаллы LiIO_3 , LiNbO_3 , AgGaS_2 ; NH_3 лазера — Te, CdGeAs_2 . В табл. 44 приведены данные об использованных кристаллах, углах

Т а б л и ц а 44

Генерация второй гармоники газовых лазеров

Тип лазера	Кристалл	λ , мкм	θ_c , град	T , °C	Литература
Аргоновый лазер	KDP *	0,5145	90	—13,7	[279]
То ж	ADP	0,4965	90	—93,2	[280]
—»—	ADP	0,5017	90	—68,4	[280]
—»—	ADP	0,5145	90	—10,2	[280]
—»—	ADP *	0,5145	90	—10	[281]
—»—	KB5	0,4579	67,2*	20	[254]
—»—	KB5	0,4765	60,2*	20	[254]
—»—	KB5	0,4880	56,6*	20	[254]
—»—	KB5	0,5145	50,2*	20	[254]
—»—	BB0	0,5145	49,5	—	[448]
—»—	BB0	0,4965	52,5	—	[448]
—»—	BB0	0,4880	54,5	—	[448]
—»—	BB0	0,4765	57,0	—	[448]
He-Ne лазер	LiIO_3^*	1,152...1,198	25	20	[282]
—»—	LiNbO_3	1,152	90	169	[283]
—»—	LiNbO_3	1,152	90	281	[59]
—»—	AgGaS_2	3,39	33	20	[93]
NH_3 лазер	Te	12,8	—	—	[278]
—»—	CdGeAs_2	11,7	35,7	—	[113]
CO лазер	ZnGeP_2	5,2...6,3	47,5	—	[284]

* Внутрирезонаторная ГВГ.

** φ_c

и температурах синхронизма. При ГВГ излучения аргонового лазера ($\lambda_{2\omega} = 257$ нм) в кристалле ADP, находящемся во внешнем резонаторе, мощность на выходе составляла 80 мВт. При использовании кристаллов KDP и ADP внутри резонатора аргонового лазера (514,5 нм) достигнут коэффициент преобразования 50% [277]. Мощность на второй гармонике составляла 0,415 Вт. При использовании кристалла пентабората калия для ГВГ излучения аргонового лазера коэффициент преобразования достигал 10^{-5} . Отметим, что кристалл KB5 удобен тем, что не требует температурной подстройки синхронизма, однако при этом из-за небольшой нелинейности ($d_{31}=0,1d_{36}(\text{KDP})$) не удается получать большие преобразования. Высокоэффективная ГВГ излучения NH_3 лазера ($\tau=1$ нс) с $\eta=60\%$ реализована в [278]. Мощность на $\lambda_{2\omega}=6,4$ мкм составляла 300 кВт. Генерация второй гармонике излучения СО лазера реализована в [284] с использованием кристалла ZnGeP_2 . Мощность на $\lambda=5,2 \dots 6,3$ мкм равна 2,45 ... 4 мВт (пиковая мощность 350 ... 500 Вт) при частоте повторения $f=100$ Гц и коэффициент преобразования 3%. Излучение фокусировалось в кристалл длиной 7 мм.

Йодный лазер. В экспериментах по лазерному термоядерному синтезу используются мощные йодные лазеры ($\lambda_1=1,315$ мкм) с преобразованием излучения в гармоники, вплоть до шестой ($\lambda_6=219,2$ нм) [285—287, 26*] (табл. 45). Генерация второй гармонике излучения йодного лазера исследовалась в кристаллах KDP, DKDP, LiIO_3 . На KDP получены эффективности преобразования во вторую гармонику 16 и 12% при еое и оое преобразованиях соответственно. Как оказалось, самым лучшим нелинейным материалом для ГВГ излучения йодного лазера является DKDP. Имея практически такой же порог разрушения, как и KDP, кристалл DKDP обладает значительно меньшим коэффициентом поглощения на $\lambda=1,315$ мкм — $\alpha=0,025$ см $^{-1}$, тогда как у KDP он на порядок больше — $\alpha=0,3$ см $^{-1}$. В режиме однократных импульсов, как указано в [26*], пригоден также DKDP с 87 ... 90%-м дейтерированием с $\alpha=0,06$

Т а б л и ц а 45

Генерация гармоник йодного лазера ($\lambda=1,315$ мкм, $E=600$ мДж, $\tau_n=1$ нс)

Частота гармоник, способ ее получения	$2\omega=\omega+\omega$			$3\omega=2\omega+\omega$		$4\omega=2\omega+\omega+\omega$	$5\omega=2\omega+\omega+\omega+\omega$	$6\omega=3\omega+\omega+\omega$
Длина волны, нм	657,6			438,4		328,8	263,0	219,2
Кристалл	DKDP	KDP	KDP	DKDP	KDP	KDP	KDP	KB5
Длина кристалла, мм	19	20	10	20	10	40	—	10
Тип взаимодействия	еое	еое	оое	еое	оое	оое	оое	еое
θ , град	51,3	61,4	44,3	48	42,2	53,6	74	80,5
Эффективность преобразования, %:								
$I_n=(1 \dots 1,5) \times 10^9$ Вт/см 2	30	16	12	30	6	15	—	—
$I_n=3 \cdot 10^9$ Вт/см 2	70	—	—	50	—	30	9	3

см⁻¹. Однако в импульсно-периодическом режиме требуется максимально возможная степень дейтерирования. Результаты экспериментов по генерации гармоник йодного лазера приведены в табл. 45. Использовались пучки диаметром от 5 до 8 мм с интенсивностью накачки (1...3) ГВт/см². В пучках диаметром 4 мм эффективность преобразования во вторую гармонику составляла 70%. При ГТГ использовалась схема поляризационного рассогласования, теоретически описанная в [249] и экспериментально реализованная на широкоапертурных мощных неодимовых лазерных установках [17] (см. § 3.2). Достигнуто 50%-е преобразование в третью гармонику йодного лазера. Для ГЧГ и ГПГ использовались кристаллы KDP с ооо преобразованием. С использованием KB5 достигнута ГШГ излучения йодного лазера при удвоении его третьей гармоники. Использовалось взаимодействие типа еео при распространении излучения в плоскости ХУ под углом $\varphi=80,5^\circ$ от оси Х. Из-за небольшого нелинейного коэффициента KB5 ($0,1d_{36}(\text{KDP})$) эффективность преобразования в излучение с $\lambda_6=219,2$ нм составляла 3%. Отметим, что все значения эффективностей преобразования приведены относительно излучения на основной частоте.

СО₂ лазер. Генерация второй гармоники излучения СО₂ лазера реализована как в импульсном, так и непрерывном режимах с использованием кристаллов прустита, пираргирита, титогаллата серебра, AgGaSe₂, ZnGeP₂, CdGeAs₂, GaSe, HgS, Se и Те. Наибольшие коэффициенты преобразования во вторую гармонику с $\lambda=5,3$ мкм в импульсном режиме достигнуты на кристаллах AgGaSe₂, ZnGeP₂, CdGeAs₂ и Те (табл. 46). Генерация второй гармоники излучения импульсного СО₂ лазера с $\lambda=10,25$ мкм в AgGaSe₂ реализована в [290] с $\eta=35\%$ при

Т а б л и ц а 46

Генерация второй гармоники излучения СО₂ лазера

Кристалл	λ , мкм	Тип взаимодействия	θ_c , град	I_n , Вт/см ²	L , мм	Коэффициент преобразования по мощности, %	Литература
Ag ₃ AsS ₃	9,2	ооо	19,9	—	10	$4 \cdot 10^{-4} *$	[78]
Ag ₃ AsS ₃	10,6	ооо	22,5	$1,1 \cdot 10^7$	4,4	2,2	[288]
Ag ₃ SbS ₃	10,6	ооо	24,2...30	—	—	—	[289]
AgGaSe ₂	10,6	ооо	67,5	—	—	—	[93]
AgGaSe ₂	10,6	ооо	57,5	$1,7 \cdot 10^6$	15,3	2,7	[97]
AgGaSe ₂	10,25	ооо	52,7	—	—	35	[290]
ZnGeP ₂	{9,19...9,7 10,15...10,8}	еео	76	—	—	5 0,6*	[105]
ZnGeP ₂	8,6	еео	55,8	—	—	10,1	[449]
ZnGeP ₂	10,6	еео	76	10^9	3	49	[106]
CdGeAs ₂	10,6	оео	48,4	$1,4 \cdot 10^7$	9	15	[111]
CdGeAs ₂	10,6	еео	32,5	—	13	21	[114]
CdGeAs ₂	10,6	еео	32,5	—	13	$4,4 \cdot 10^{-1} *$	[114]
GaSe	10,6	ооо	12,7	—	—	—	[115]
HgS	10,6	еео	20,8*	—	8,5	—	[127]
Se	10,6	еео	5,5	—	8	$10^{-5} *$	[129]
Te	10,6	еео	14,5	$7 \cdot 10^5$	2,1	0,5	[291]
Te	10,6	оео	20,4	—	—	—	[292]
Te	10,2	—	—	$5 \cdot 10^6$	9	15	[293]
Te	9...11	еео	2...18	—	7	$10^{-4} *$	[294]

* Непрерывный режим.

$\theta_{000}=52,7^\circ$; ГВГ излучения непрерывного CO_2 лазера ($9 \dots 11$ мкм) с $\eta=10^{-6}$ получена в [294]. Мощность на второй гармонике составляла $0,1 \dots 5$ мкВт. В [78] с использованием кристалла прустита достигнута ГВГ излучения непрерывного CO_2 -лазера с мощностью на второй гармонике примерно 40 мкВт при коэффициенте преобразования $4 \cdot 10^{-6}$. В [114] на кристалле CdGeAs_2 при температуре 77 К достигнута ГВГ излучения CO_2 лазера со средней эффективностью преобразования 21% в импульсном режиме ($f=1,5$ кГц) и 0,44% — в непрерывном. Средняя мощность на $\lambda=5,3$ мкм составляла 0,79 Вт при $f=47$ кГц (импульсный режим) и 73 мВт (непрерывный режим).

В ZnGeP_2 достигнута высокоэффективная ГВГ излучения CO_2 лазера: $\eta=49\%$ — вне кристалла, $\eta=80\%$ — внутри кристалла [106]. Энергия излучения с $\tau=2$ нс и $\lambda=5,3$ мкм составляла $5 \dots 10$ мДж. Далее это излучение еще раз удваивалось в другом кристалле ZnGeP_2 ($\theta=47^\circ 40'$, $\varphi=0$, $L=10$ мм) с эффективностью $\eta=14\%$ (внутренняя эффективность 22%).

Эффективная ГТГ излучения импульсного CO_2 лазера ($\tau=90$ нс) в двух кристаллах CdGeAs_2 реализована в [295] с коэффициентом преобразования 1,5% (внутри кристалла $\eta=3\%$). Угол синхронизма $\theta=45^\circ$ для преобразования типа ооо. Длины используемых кристаллов соответственно 12 и 4,5 мм.

Другие лазеры. В [296] с использованием кристалла ADP при $T=-30^\circ\text{C}$ и $\theta=90^\circ$ получена ГВГ излучения лазера на парах меди ($\lambda=510,6$ нм) с коэффициентом преобразования 8,5%. В [297] получено УФ-излучение с $\lambda=271$ и 289 нм мощностью 600 и 120 мВт соответственно, при ГСЧ и ГВГ излучения лазера на парах меди, генерирующего на длинах волн 510,6 и 578,2 нм. В качестве нелинейного кристалла использовался KDP длиной 4 см, коэффициент преобразования составлял 3%.

В [298] реализована ГВГ излучения лазера на SOAP:Ho (2,06 мкм) в прустите. Также в прустите получена ГВГ излучения HF лазера (2,7 ... 2,9 мкм) [299]. В [115] на кристалле GaSe реализована ГВГ излучения $\text{CaF}_2:\text{Dy}^{2+}$ лазера с $\lambda=2,36$ мкм. Угол фазового синхронизма для преобразования типа ооо $\theta=18^\circ 40'$. В [300] реализована внутрирезонаторная ГВГ излучения непрерывного $\text{Nd}^{3+}:\text{NdP}_5\text{O}_{14}$ лазера $1,05 \rightarrow 0,525$ мкм. При длине кристалла «банан» с $L=1$ мм достигнутый коэффициент преобразования составлял 1%. Излучение распространялось вдоль кристаллографической оси a и имело поляризацию вдоль оси b , температура кристалла $T=72,3^\circ\text{C}$.

С целью исследования возможности ГВГ излучения Er:YLF лазера в KNbO_3 в [180] реализована ГВГ излучения лазера на красителе с $\lambda=850,2$ нм с эффективностью 43% при мощности накачки 0,9 МВт. Кристалл KNbO_3 длиной 5 мм выдерживался при температуре 18°C , излучение распространялось вдоль оси a .

3.4. Генерация суммарной частоты

С помощью генерации суммарной частоты удастся значительно расширить диапазон длин волн, излучаемый перестраиваемыми лазерами. В настоящее время с помощью ГСЧ в кристаллах получено излучение в области вакуумного ультрафиолета (ВУФ) вплоть до 185 нм. Для смешивания в качестве непрерывно перестраиваемого излучения наиболее часто используется излучение лазера на красителе. В пикосекундном диапазоне длительностей для этой цели применяется параметрическая генерация света. В качестве излучения с фикси-

рованной частотой обычно используется Nd:YAG лазер, а также его вторая, третья и четвертая гармоники. Наряду с гармониками Nd:YAG лазера используются также стоксовые компоненты ВКР, генерируемые в различных органических жидкостях и в газах.

Генерация суммарной частоты позволяет эффективно преобразовывать ИК-излучение в видимый диапазон (ап-конверсия), что значительно облегчает процесс его регистрации. Например, ИК-излучение CO₂ лазера ($\lambda=10,6$ мкм) преобразуется в видимый диапазон с эффективностью 30...40% при накачке излучением лазера на красителе или Nd:YAG лазера.

Преобразование в УФ-диапазон. Для преобразования излучения в УФ- и ВУФ-диапазоны в основном используются кристаллы KDP, ADP и KB5. Благодаря прозрачности в широком диапазоне длин волн вплоть до 177 нм, достаточно большой нелинейности и высокому порогу оптического пробоя кристалл KDP успешно применяется для генерации УФ-излучения пикосекундной и

Т а б л и ц а 47

Генерация суммарной частоты в кристалле KDP

λ , нм	Источники взаимодействующих излучений	τ_n , нс	Коэффициент преобразования, мощность, энергия	Литература
362...432	Лазер на красителе+Nd:YAG лазер	0,03	20%	[301]
257...320	Лазер на красителе+аргоновый лазер	Непрерывное излучение	200 мкВт	[302]
215...223	2 ω лазера на красителе+Nd:YAG лазер		10 кВт	[236]
240...242	2 ω рубинового лазера (347 нм)+лазер на красителе	30	1 МВт	[303]
269...315	ВКР от 532 нм (2 ω Nd:YAG лазера)+532 нм	0,03	1...3 мДж	[304]
218...244	(269...315) нм+Nd:YAG лазер	0,03	0,1 мДж	[304]
360...415	Лазер на красителе+Nd:YAG лазер	25...30	60...70%	[305]
239	Nd:YAG лазер (1,064 мкм)+XeCl лазер (308 нм)	0,7	50%	[309]
288...393*	Излучение ПГС (0,63...1,5 мкм)+2 ω Nd:YAG лазера	0,02	100 кВт	[238]
269...287	Излучение ПГС (1,29...3,6 мкм)+3 ω Nd:YAG лазера	0,02	100 кВт	[238]
217...226	Излучение ПГС (1,1...1,5 мкм)+4 ω Nd:YAG лазера	0,02	100 кВт	[238]
215...245	ВКР от 266 нм (Nd:YAG+излучение ПГС (0,9...1,4 мкм))	0,02	100 мкДж	[306]
190...212	ВКР от 1,064 мкм+суммарная частота (220...250 нм [306])	0,02	20...40 мкДж	[307]
217...275	2 ω лазера на красителе+Nd:YAG лазер (1,064 мкм)	25...30	$P_{ср}=10$ мВт, $\eta=50...55\%$ от 2 ω лазера на красителе	[308]

* Использовался кристалл DKDP.

наносекундной длительности. В работах [301—309, 236, 238] на KDP достигнута перестройка в диапазоне длин волн 190...432 нм. В табл. 47 приведены характеристики лазеров, используемых в экспериментах, значения коэффициентов преобразования, мощности или энергии на выходе. Во всех работах использовалась угловая перестройка синхронизма; в [303] при смещении излучения второй гармоники рубинового лазера (347 нм) и ИК-излучения лазера на красителе достигалась перестройка в области 240...242 нм при изменении температуры кристалла от -20 до $+80^\circ\text{C}$ при $\theta_{000}=90^\circ$. В [309] при ГСЧ между излучениями Nd:YAG ($\tau_n=0,7$ нс) и XeCl ($\tau_n=12$ нс) лазеров достигнут коэффициент преобразования $\eta=50\%$ от излучения XeCl лазера в $\lambda=239$ нм ($\theta_{000}=68^\circ 18'$). В [305] излучение лазера на красителе (545...680 нм) преобразовывалось в УФ-область с $\lambda=360$...415 нм и $\tau_n=25$...30 нс с эффективностью 60...70% при накачке излучением Nd:YAG лазера (1,064 мкм). При этом использовалось взаимодействие типа eoe при изменении угла синхронизма в пределах 56 ... 58° . Непрерывное излучение в области 257...320 нм с мощностью до 200 мВт генерировалось при смещении линий аргонового лазера (458, 488, 515 нм) с излучением лазера на красителе [302]. Минимальная длина волны на KDP получена в [307] ($\lambda=190$ нм) при смещении излучения с 1,415 мкм (полученного при ВКР излучения с $\lambda=1,064$ мкм в азоте) с излучением с $\lambda=220$...250 нм, которое в свою очередь получалось смещением параметрического излучения со стоксовыми компонентами ВКР излучения четвертой гармоники Nd:YAG лазера в азоте и водороде ($\lambda=283$ и 299 нм). Генерируемые энергии пикосекундных импульсов в области 212...190 нм составляли 20...40 мкДж ($\theta_{000}=70$... 90°).

В ряде работ реализована ГСЧ в УФ-области с использованием кристалла ADP [275, 276, 310—312, 236, 301, 303] (табл. 48). Непрерывное излучение вплоть до $\lambda=243$ нм с мощностью 4 мВт получено в [275, 276] при смещении излучений лазера на красителе и аргонового лазера. При использовании лазеров с модуляцией добротности достигнута перестройка в области 240...248 нм с мощностью в импульсе 1 МВт [303]. Использовался кристалл ADP длиной 25 мм при $\theta=90^\circ$. Минимальная длина волны 208 нм на ADP достигнута в [236] при смещении излучения Nd:YAG лазера со второй гармоникой лазера на красителе (246...302 нм). При этом кристалл ADP охлаждался до -120°C при $\theta=90^\circ$. Пиковая мощность на $\lambda=208$ нм составила 500 Вт.

В ряде работ для ГСЧ использовался кристалл KB5, в результате чего перекрывался диапазон длин волн в УФ-области 185...269 нм [136, 313—317, 141, 143, 238, 272]. В [313, 272] смешивалось излучение второй гармоники лазера на красителе с излучением рубинового (694,3 нм) и Nd:YAG (1,064 мкм) лазеров соответственно. Таким образом достигалась генерация наносекундного излучения в диапазоне 202...212 нм с энергией 2...10 мкДж [313] и в диапазоне 207,3...217,4 нм с энергией до 2,5 мДж [272]. В [318] реализована также температурная перестройка при 90° -м синхронизме: $\lambda=201,2$...201,8 нм при изменении температуры от -20 до 40°C . В [238] при смещении четвертой гармоники Nd:YAG лазера (266 нм) с излучением лазера на красителе достигнута генерация на $\lambda=196,6$ нм $\tau_n=8$ нс и $P=40$ кВт. Ультрафиолетовое излучение вплоть до 185 нм с энергией примерно 10 мкДж и $\tau_n=30$ нс достигнуто при ГСЧ излучения второй гармоники лазера на красителе ($\lambda=237$ нм) с излучением другого лазера на красителе, генерирующего в ИК-области (740...910 нм) [141]. Взаимодействующие излучения распространялись вдоль

Генерация суммарной частоты в кристалле ADP

λ , нм	Источники взаимодействующих излучений. Угол синхронизма, температура кристалла	τ_n	Коэффициент преобразования, мощность, энергия	Литература
252...268*	Лазер на красителе+аргоновый лазер (477, 488, 497 нм), $\theta_{\text{ооо}}=90^\circ$	Непрерывное излучение	8 мВт	[310]
243...247*	Лазер на красителе+аргоновый лазер (363,8 нм)	То же	4 мВт	[275, 276]
243*	Лазер на красителе+аргоновый лазер (351 нм) $\theta=90^\circ$, $T=8^\circ\text{C}$	—»—	0,3 мВт	[311]
247,5	Лазер на красителе+криптоновый лазер (413,1 нм) $\theta=90^\circ$, $T=-103^\circ\text{C}$	—»—	—	[312]
240...248	Лазер на красителе+2 ω рубинового лазера $\theta=90^\circ$, $T=-20 \dots +80^\circ\text{C}$	30 нс	1 МВт, 4%	[303]
246...259	Лазер на красителе+2 ω Nd:YAG лазера, $\theta=90^\circ$, $T=-120 \dots 0^\circ\text{C}$	10 нс	1%, 3 мкДж	[236]
222...235	2 ω лазера на красителе+Nd:YAG лазер	10 нс	10%	[236]
208...214	2 ω лазера на красителе+Nd:YAG лазер $\theta=90^\circ$, $T=-120 \dots 0^\circ\text{C}$	10 нс	1,7 мкДж	[236]
270...307	Лазер на красителе+2 ω Nd:YAG лазера $\theta=81^\circ$	Пикосекундное излучение	—	[301]

* Кристалл ADP находился во внешнем резонаторе.

оси Y с поляризацией по X . Получен коэффициент преобразования УФ-излучения 8...12% при интенсивности ИК-излучения 500 МВт/см². К настоящему времени длина волны 185 нм является минимальной, достигаемой путем преобразования частоты в нелинейных кристаллах. При ГСЧ частот излучения лазера на красителе и излучений аргонового лазера (351,1 и 334,5 нм) [315, 316] и его второй гармоники (257 нм) [317] получено непрерывное излучение с $\lambda=211 \dots 216$ и 194 нм соответственно. Мощность излучения на $\lambda=194$ нм составляла 2 мкВт. Изменением температуры в пределах 20...45 °C при 90°-м синхронизме достигнута перестройка в области 194,1...194,3 нм [317]. В работах [238, 143] сообщается о генерации пикосекундного УФ-излучения в области 196...269 нм при смешении третьей (355 нм) и четвертой (266 нм) гармоник Nd:YAG лазера с синхронизацией мод с излучением ПГС. Достигнуты мощности 20 кВт на $\lambda=197$ и 100 кВт на $\lambda=225 \dots 269$ нм при $\tau_n=20$ пс и длине кристалла 7 мм [143]. В работах использовалось взаимодействие типа еео в плоскости XY . В [238] перекрыт диапазон 200...222 нм.

В табл. 49 приведены характеристики УФ-излучения, генерируемого в KB5 при различных нелинейных взаимодействиях.

В [319] для ГСЧ использовался кристалл KNbO₃. Благодаря большой нелинейности ($d_{32}=2,1 \cdot 10^{-11}$ м/В) достигнуто эффективное преобразование в область 420 нм при смешении излучения Nd:YAG лазера (1,064 мкм) с излучением лазера на красителе (694 нм); излучение распространялось по оси a . С

Генерация УФ-излучения в кристалле KB5

λ , нм	τ , нс	Энергия, мощность	Эффективность преобразования	Процесс	Литература
217,3...234,5	7	0,5 мкДж	$2 \cdot 10^{-3}$	ГВГ	[137]
217,1...315,0	2...5	5 мкДж	0,1	ГВГ	[138]
217,0...250,0	5	До 5 мкДж	$(2...5) \cdot 10^{-2}$	ГВГ	[139]
231,4	6	0,2 мДж	$2 \cdot 10^{-3}$	ГТГ	[144]
229...347	18	До 20 мкДж	10^{-5}	ГВГ	[254]
212,8	6	110 кВт	10^{-2}	ГПГ	[142]
208...217	10	0,5 Вт	$2,5 \cdot 10^{-4}$	ГСЧ	[136]
196,6	8	0,5 мДж	10^{-3}	ГСЧ	[314]
207,3...217,4	3	0,8 мДж	$3 \cdot 10^{-3}$	ГСЧ	[272]
201...212	20	2...10 мкДж	0,1	ГСЧ	[313]
185...200	30	До 10 мкДж	0,1	ГСЧ	[141]
211...216	Непрерывное излучение	50...100 нВт	10^{-6}	ГСЧ	[315]
266	0,045	60 МВт	0,05	ГЧГ	[238]
212,8	0,045	11 МВт	0,01	ГПГ	[232]
196,7...226	0,02	20 кВт		ГСЧ	[238]
212,8	0,02	5 МВт		ГПГ	[238]
219	0,75	100 МВт	0,03	ГШГ	[286]
194,1...194,3	Непрерывное излучение	2 мкВт		ГСЧ	[317]
200...222	0,045	1 мкДж	$2 \cdot 10^{-5}$	ГСЧ	[143]
220...266	0,045	1 мкДж		ГВГ	[318]

использованием кристалла β -BaB₂O₄ достигнута генерация УФ-излучения в области 201,1...212 нм при смешении излучения второй гармоники Nd:YAG лазера (532 нм) со второй гармоникой лазера на красителе [70].

В [450] получено УФ-излучение до 197,4 нм ($\tau=17$ нс) в β -BaB₂O₄ при ГТГ излучения лазера на красителе. Использовался кристалл с $\theta=90^\circ$ и $L=8,2$ мм; при $I_n=19...29$ МВт/см² коэффициент преобразования доходил до 5%. При охлаждении кристалла до 95 К минимальная длина волны преобразованного излучения была равна 195,3 нм. Приведена экспериментальная зависимость $\lambda_{3\omega}$ при ГТГ от температуры кристалла: $\lambda_{3\omega}=194,34+10,3 \cdot 10^{-3} T(K)$. В [451] путем ГСЧ между излучениями лазера на красителе (780...950 нм) и второй гармоники другого лазера на красителе (497 нм) в β -BaB₂O₄ достигнута перестройка в области 188,9...197 нм. Коэффициент преобразования составлял 0,2 и 7% в нано- (9 нс) и пикосекундных (30 пс) режимах соответственно.

Отметим, что минимальные длины волн достигаются при 90°-м синхронизме, т. е. при распространении излучений перпендикулярно оптической оси в случае одноосных кристаллов KDP и ADP и вдоль оси Y(b) в случае двухосного кристалла KB5. Для KDP, ADP и KB5 на рис. 29—31 приведены кривые синхронизма при взаимодействии типа I, откуда нетрудно получить длины волн λ_1 и λ_2 смешиваемых излучений для генерации излучения с длиной волны λ_3 . Вершины этих кривых соответствуют случаю генерации второй гармоники и указывают на минимальную длину волны, достигаемую с помощью ГВГ.

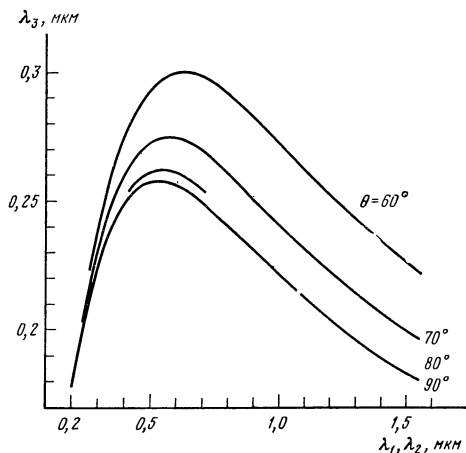


Рис. 29. Перестроочные кривые для ГСЧ в KDP при различных θ (тип взаимодействия оое)

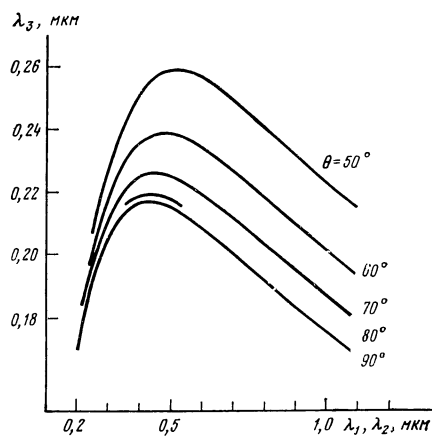


Рис. 31. Перестроочные кривые для ГСЧ в $\text{KVB}_5\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ при различных θ (тип взаимодействия еео)

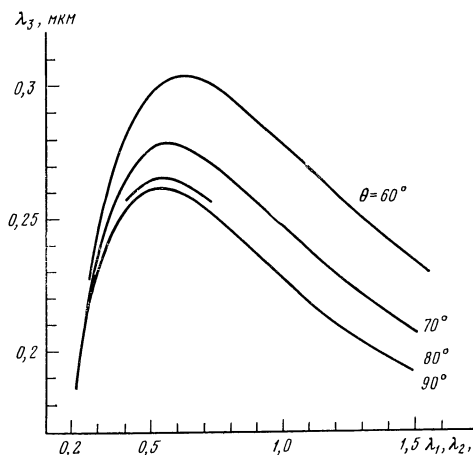


Рис. 30. Перестроочные кривые для ГСЧ в ADP при различных θ (тип взаимодействия оое)

изменении температуры кристалла от 180 до 400 °С в видимый диапазон преобразуются участки ИК-спектра от 2,7 до 4,5 мкм [327, 328]. В [329—332] накачкой служило излучение рубинового лазера. В [331] получена 100%-я квантовая эффективность при накачке с $I = 5 \cdot 10^6$ Вт/см² в кристалле длиной 2 см. В качестве источников накачки также используются He-Ne и Nd:YAG лазеры. В [333] излучение черного тела с $\lambda = 6,5 \dots 12,5$ мкм преобразовано в ближний ИК-диапазон в кристалле прустита длиной 6 мм при накачке излучением Nd:YAG лазера с $P = 1$ кВт, $f = 2$ кГц.

В [322] ап-конверсия использовалась для преобразования ИК-излучения астрономических источников в видимый диапазон. Инфракрасное излучение

Ап-конверсия (up-conversion)
ИК-излучения в видимый диапазон, или преобразование вверх по частоте. В [320—326] для ап-конверсии ИК-излучения с длиной волны 1...5 мкм в видимый диапазон использовался LiIO_3 (табл. 50). В [320] получена 100%-я квантовая эффективность преобразования излучения с $\lambda = 3,39$ мкм при накачке с интенсивностью $6,3 \cdot 10^4$ Вт/см² в кристалле длиной 5 см. Для преобразования излучения с $\lambda = 1,5 \dots 4,5$ мкм в видимый диапазон также широко используется кристалл LiNbO_3 (табл. 51). В [283, 327, 65] накачкой служило излучение аргонового лазера, применялся 90°-й синхронизм типа оое. При

Ап-конверсия ИК-излучения в кристалле LiIO_3

$\lambda_{\text{ИК}}$, мкм	Источник накачки	Длина вол-ны, мкм	η , %	Литера-тура
3,39	Рубиновый лазер с модуляцией добротности	0,694	100	[320]
3,2...5	Nd:YAG лазер	1,064	0,001	[322]
2,38	Непрерывный аргоновый лазер	0,488	$4 \cdot 10^{-8}$	[323]
1,98; 2,22; 2,67	Рубиновый лазер с модуляцией добротности	0,694	0,14...0,28	[324]
3,39	Аргоновый лазер	0,5145	$2,4 \cdot 10^{-2}$	[325]
1...2	Рубиновый лазер	0,694	18	[326]

Таблица 51.

Ап-конверсия ИК-излучения в кристалле LiNbO_3

$\lambda_{\text{ИК}}$, мкм	Источник накачки	Длина вол-ны, мкм	η , %	Литера-тура
1,69...1,71	Рубиновый лазер с модуляцией добротности	0,694	1	[329]
1,6...3	То же	0,694	100	[331]
1,6	Рубиновый лазер	0,694	10^{-5}	[332]
3,3913	Непрерывный He-Ne лазер	0,633	10^{-5}	[334]
3,3922	Непрерывный He-Ne лазер	0,633	$5 \cdot 10^{-5}$	[335]
2...4	Nd:YAG лазер с модуляцией добротности	1,064	—	[336]
3,39	Аргоновый лазер	0,515	—	[65]

Луны, Венеры, Марса и некоторых ярких звезд было преобразовано в область с $\lambda=0,76 \dots 0,83$ мкм с η до 0,001%. В [335] с целью точного измерения длины волны излучение стабилизированного с помощью метановой ячейки He-Ne лазера преобразовывалось в область с $\lambda=0,533$ мкм при накачке излучением I_2 стабилизированного He-Ne лазера в кристалле LiNbO_3 . Измеренная таким образом длина волны составляет 3,39223140 мкм. Ап-конверсия также позволяет значительно расширить диапазон генерации ПГС. Так, в [326] излучение ПГС с $\lambda=1 \dots 2$ мкм преобразовывалось в область 0,42...0,51 мкм при его смешении с излучением рубинового лазера ($\eta=18\%$). Использовалось преобразование типа оое; угол синхронизма менялся от 27 до 37°. Мощность на выходе составляла 10 кВт.

В [337] с использованием кристалла KNbO_3 излучение сигнальной волны Nd:YAG лазера ($\lambda=1,064$ мкм, $P=2,1$ Вт) смешивалось с излучением накачки (Кг лазер, $\lambda=676,4$ мкм, 26,2 мВт). Излучения распространялись вдоль оси a , температура кристалла $T=-4^\circ\text{C}$, длина 8,97 мм. Мощность излучения на суммарной частоте $\lambda=413,6$ нм составляла 0,1 мВт.

Ап-конверсия излучения CO_2 -лазера в ближний ИК- и видимый диапазоны. Нелинейное преобразование излучения CO_2 лазера (10,6 мкм) в ближний ИК-

Ап-конверсия излучения CO_2 лазера

Кристалл	Источник накачки	λ_d , мкм	Тип взаимодействия	θ , град	$I_{\text{н}}$, Вт/см ²	L, см	η , %	Литература
Ag_3AsS_3	Рубин, 300 мкс, 20 мДж	0,694	ооо	27,7	—	0,45	1,4·10 ⁻⁴	[340]
	He-Ne, непрерывное излучение, 0,25 мВт	0,633	ооо	25,4...27,8	—	1	2·10 ^{-5*}	[338]
	Nd : YAG, наносекундное излучение, 740 Вт	1,064	ооо	20	—	0,6	0,84	[348]
	Рубин, 1 мс	0,694	—	—	10 ⁴	1	0,14	[72]
	Nd : YAG, наносекундное излучение	1,064	ооо	20	400	0,6	0,5	[344]
	Ионный криптоновый лазер, непрерывное излучение, 60 мВт	0,647	ооо	—	—	0,9	2·10 ^{-4*}	[339]
	Nd : YAG	1,064	ооо	20	—	1,4	1,5	[349]
	Рубин, 25 пс	0,694	ооо	25,2	10 ⁸	0,5	10,7	[342]
	Nd : YAG, наносекундное излучение	1,064	ооо	20	—	—	30**	[350]
	То же	1,064	ооо	20	(0,5...1,2)·10 ⁸	—	8***	[351]
	He-Ne, непрерывное излучение	0,633	ооо	29	—	—	4·10 ⁻⁴	[76]
				(T = 77K)				
Ag_3SbS_3	Nd : YAG, непрерывное излучение	1,064	ооо	27,3	86	0,35	4·10 ⁻⁶	[83]
AgGaS_2	Nd : YAG	1,064	ооо	40	6·10 ⁵	0,3	40**	[353]
	Рубин, 30 нс	0,694	ооо	55	—	0,33	9	[91]
	Рубин, свободная генерация	0,694	ооо	55	—	0,33	0,01	[91]
	Nd : YAG, наносекундное излучение	1,064	ооо	40	—	—	30	[354]
	То же	1,064	ооо	40	(0,5...1,2)·10 ⁸	—	14***	[351]
	Краситель 3 нс	0,598	ооо	90	—	0,5	40	[355]

Кристалл	Источник накачки	λ , мкм	Тип взаимодействия	θ , град	I_H , Вт/см ²	L , см	η , %	Лите- ратура
HgGa ₂ S ₄	Nd : YAG, наносекундное излу- чение	1,064	ооо	41,6	(0,5...1,2)·10 ⁶	—	20***	[351]
ZnGeP ₂	Nd : YAG	1,064	юоо	82...89	—	1	1,4	[109]
	Nd : YAG, наносекундное излу- чение СО лазер; 4,7 Вт	1,064 5	юоо еео	82,9 56	(0,5...1,2)·10 ⁶ —	—	6*** 0,01	[351] [104]
GaSe	СО лазер	5...6	ооо, еео, ооо	10...18	—	0,15	2,5·10 ⁻²	[118]
GaSe	Nd : YAG	1,064	—»—	13...15	—	0,25	1,6·10 ⁻³	[118]
	Nd : YAG	1,064	ооо	13,6	10 ⁴	0,35	2·10 ⁻²	[116]
CdSe HgS	Nd : YAG	1,833	ооо	77	2,4·10 ⁷	1	35**	[355]
	He-Ne непрерывное излучение, 1 мВт	0,633	еео	25,3	—	0,8	4·10 ^{-8*}	[127]

* Генерация разностной частоты.

** Коэффициент преобразования по мощности.

*** Коэффициент преобразования по мощности для двух каскадов: 10,6+1,064→0,967; 0,967+1,064→0,507 мкм.

и видимый диапазоны осуществляется в кристаллах прустита (Ag_3AsS_3), Ag_3SbS_3 , титгаллата серебра (AgGaS_2), титгаллата ртути (HgGa_2S_4), ZnGeP_2 , GaSe , CdSe , и HgS . В табл. 52 приведены данные об источниках накачки (длина волны λ_n , режим работы), углах синхронизма и типе взаимодействия, интенсивности накачки I_n , длине кристалла L и эффективности преобразования по числу квантов η . В [338, 339, 127] для ап-конверсии используется ГРЧ, в [118] — ГСЧ и ГРЧ при оое, еое и оое типах взаимодействия, во всех остальных случаях — ГСЧ.

В ряде работ для ап-конверсии использовался прустит. В [72, 340—343] в качестве источника накачки использовался рубиновый лазер. Максимально достигнутая квантовая эффективность преобразования в видимый диапазон равнялась 10,7%, что соответствовало коэффициенту преобразования по мощности 175% [342]. В работах [344—351] в качестве накачки использовался Nd:YAG лазер (1,064 мкм), в [79, 339] — криптоновый лазер, а в [352—354, 76] — He-Ne лазер (0,6328 мкм), причем в [76] кристалл охлаждался до 77 К, что приводило к уменьшению поглощения на 633 и 593 нм до $0,8 \dots 0,9 \text{ см}^{-1}$.

Наибольшая квантовая эффективность преобразования излучения CO_2 лазера в видимый диапазон $\eta=40\%$ достигнута в [335] при накачке излучением наносекундного лазера на красителе с $\lambda=598 \text{ нм}$ при $\theta_{\text{оое}}=90^\circ$ и длине кристалла 5 мм. В [354] реализована схема двухкаскадного преобразования ИК-излучения в видимое при накачке излучением Nd:YAG лазера, работающего в режиме модуляции добротности: $10,6+1,064 \rightarrow 0,967 \text{ мкм}$; $0,967+1,064 \rightarrow 0,507 \text{ мкм}$. В первой ступени преобразования использовался титгаллат серебра. Достигнута квантовая эффективность преобразования 30%. Дальнейшее преобразование излучения с $\lambda=0,967 \text{ мкм}$ осуществлялось с использованием той же накачки в кристалле LiIO_3 с $\theta_{\text{оое}}=21,6^\circ$. Для достижения нужной поляризации между двумя кристаллами ставилась пластинка из кристаллического кварца, поворачивающая плоскость поляризации накачки на 90° , а плоскость поляризации излучения с $\lambda=0,967 \text{ мкм}$ на 180° . Во втором каскаде достигнута эффективность $\eta=80\%$ по числу квантов. Полная эффективность преобразования по числу квантов излучения с $\lambda=10,6 \text{ мкм}$ в излучение с $\lambda=0,507 \text{ мкм}$ составила 24%, а КПД по мощности равнялся 5%.

Как видно из табл. 52, наиболее перспективными нелинейными материалами для преобразования излучения CO_2 -лазера в видимое являются прустит и титгаллат серебра, на которых достигнуты в импульсном режиме коэффициенты преобразования по числу квантов $10 \dots 40\%$ и $4 \cdot 10^{-6}$ — в непрерывном.

В некоторых работах также исследовалась ап-конверсия ИК-излучения CO лазера в видимое. В [352] на прустите длиной 0,8 см достигнута квантовая эффективность преобразования $2,8 \cdot 10^{-8}$ при накачке излучением He-Ne лазера (633 нм): $\theta_{\text{оое}}=33 \dots 36^\circ$. В [116] для этой цели использовался кристалл GaSe при накачке излучением Nd:YAG лазера (1,064 мкм): $\theta_{\text{оое}}=18^\circ 50'$.

3.5. Генерация разностной частоты

Процесс генерации разностной частоты (down-conversion), или преобразование вниз по частоте, используется, как правило, для получения излучения в среднем и дальнем ИК-диапазонах, а также в миллиметровом диапазоне длин волн. В некоторых случаях ГРЧ используется также для перестройки излучения мощных лазеров в видимом диапазоне.

Преобразование в видимый диапазон. В [309] сообщается об эффективном преобразовании излучения мощного XeCl лазера ($\lambda=308,0, 308,2, 308,5$ нм, $\tau_n=12$ нс) в область с $\lambda=434$ нм при накачке излучением Nd:YAG лазера ($\lambda=1,064$ мкм, $\tau_n=0,7$ нс). Использовался кристалл KDP толщиной 43 мм, угол синхронизма $\theta=53^\circ$ при взаимодействии типа ооо. Высокоэффективное преобразование излучения лазера на красителе родамин 6G с $\lambda=555 \dots 580$ нм в область с $\lambda=490 \dots 510$ нм достигнуто в [356] с использованием кристаллов DKDP и ADP длиной 5 см (табл. 53).

Генерация излучения в среднем ИК-диапазоне. Для получения ИК-излучения в области длин волн 1 ... 6 мкм используются в основном кристаллы LiIO_3 [358—366, 301, 44] и LiNbO_3 [367—371, 328]. Наряду с высокой прозрачностью в указанном диапазоне эти кристаллы обладают достаточно высокими порогами оптического пробоя и нелинейными коэффициентами. В диапазоне длин волн 4 ... 23 мкм наиболее часто используются кристаллы прустита [80, 372], тигаллата серебра [373—375] и GaSe [117, 376], а также AgGaSe_2 [97, 98], CdGeAs_2 [111, 377], CdSe [122] и Te [378].

В табл. 54 приведены данные об используемых кристаллах и источниках взаимодействующих излучений, а также некоторые выходные параметры генерируемого ИК-излучения. Генерация непрерывного ИК-излучения в области длин волн 2,3 ... 4,6 мкм продемонстрирована в [361]. С помощью неколлинеарной ГРЧ в кристалле LiIO_3 смешивалось излучение лазера на красителе родамин 6G с $\lambda=570 \dots 630$ нм и излучение аргонового лазера с $\lambda=514$ или 488 нм. Кристалл LiIO_3 длиной 10 мм находился внутри резонатора лазера на красителе; угол синхронизма $\theta_{\text{ооо}}$ менялся в пределах $40 \dots 50^\circ$, угол α между взаимодействующими пучками составлял $4 \dots 5^\circ$. При эффективности преобразования порядка 10^{-6} мощность ИК-излучения в одномодовом режиме составляла 0,5 мВт в многомодовом — 4 мВт при ширине линии 5 см^{-1} . В [111] с использованием кристалла CdGeAs_2 достигнута генерация непрерывного излучения в области 11,4 ... 16,8 мкм мощностью примерно 4 мВт с помощью ГРЧ излучений CO_2 и CO лазеров.

Угол синхронизма составлял $46 \dots 47^\circ$ при взаимодействии типа 2. Эффективная генерация наносекундного ИК-излучения в области 2 ... 4, 4,4 ... 5,7 и 5 ... 11 мкм получена в [370, 44, 374] с использованием кристаллов LiNbO_3 , LiIO_3 и AgGaSe_2 соответственно. Смешивались излучения лазеров на красителе с излучением Nd:YAG лазера. Максимальная мощность излучения в области 2 ... 4 мкм со-

Т а б л и ц а 53

Генерация разностной частоты в кристаллах KDP, DKDP и ADP

Кристалл	λ , нм	Источники взаимодействующих излучений	Коэффициент преобразования, %	Литература
KDP	434	Nd: YAG лазер ($\tau=0,7$ нс) + XeCl лазер (308 нм, 12 нс)	25	[309]
DKDP	490...510	Лазер на красителе + 4ω Nd: YAG лазера (266 нм)	87	[356]
ADP	680...1100	Азотный лазер (337 нм) + лазер на красителе, $\theta_{\text{ооо}}=49 \dots 53^\circ$	—	[357]
ADP	490...510	Лазер на красителе + 4ω Nd: YAG лазера (266 нм)	80	[356]

Генерация ИК-излучения методом ГРЧ

Кристалл	λ , мкм	Источники взаимодействующих излучений	Коэффициент преобразования, энергия, мощность, $\tau_{\text{и}}$	Литература
LiIO ₃	1,1...5,6	Лазер на красителе + Nd:YAG лазер (1,064 и 0,532 мкм), $\theta=23^\circ$	—	[301]
	2,3...4,6	Лазер на красителе + аргонный лазер (514 и 488 нм)	0,5 ... 4 мкВт непрерывное излучение	[361]
	4,3...5,3	Лазер на красителе + 2 ω Nd:YAG лазера, $\theta_{\text{оое}}=24,3^\circ$	—	[362]
	0,7...2,2	Лазер на красителе + азотный лазер, $\theta_{\text{оое}}=51 \dots 31^\circ$	3 нс	[363]
	3,8...6	Лазер на красителе + лазер на парах меди (511 нм), $\theta_{\text{оое}}=21 \dots 24^\circ$	10 ... 100 мкВт, 20 нс	[364]
	3,5...5,4	Лазер на красителе + 2 ω Nd:YAG лазера, $\theta_{\text{оое}}=20^\circ$	0,8 мДж, 10 нс	[365]
	1,2...1,6	Два лазера на красителе, $\theta_{\text{оое}}=29^\circ$	1,5 ... 5 пс	[366]
	4,4...5,7	Лазер на красителе + Nd:YAG лазер $\theta_{\text{оое}}=20 \dots 22^\circ$	550 кВт, 8 нс	[44]
LiNbO ₃	3...4	Лазер на красителе + рубиновый лазер	1%, 6 кВт	[367]
	2,2...4,2	Лазер на красителе + аргонный лазер	1 мкВт, непрерывное излучение	[328]
	2...4,5	Лазер на красителе (1,2 пс) + аргонный лазер (100 пс), $\theta=90^\circ$, $T=200 \dots 400^\circ\text{C}$	$P_{\text{ср}}=25$ мкВт 1,2 пс, $f=138$ МГц	[368, 369]
	2...4	Лазер на красителе + Nd:YAG лазер, $\theta_{\text{оое}}=46 \dots 57^\circ$	60%, 1,6 МВт	[370]
	2,04	Два лазера на красителе, $\theta_{\text{оое}}=90^\circ$	50%, $\Delta\lambda=0,03$ нм	[371]
Ag ₃ AsS ₃	11...23	Два лазера на красителе	3 Вт, 30 нс	[80]
	3,7...10,2	Излучение ПГС (1,06 ... 1,67 мкм) + 2 ω лазера на фосфатном стекле (527 нм)	25 ... 50 мкДж, 10 пс	[372]

Кристалл	λ , мкм	Источники взаимодействия излучений	Коэффициент преобразования, энергия, мощность, $\tau_{\text{и}}$	Литература
AgGaS ₂	5,5...18,3	Два лазера на красителе $\theta=90^\circ$	4 Вт, 4 нс	[373]
	5...11	Лазер на красителе + Nd:YAG лазер, $\theta_{\text{оое}} = 38 \dots 52^\circ$	180 кВт, 12 нс	[374]
	3,9...9,4	Лазер на красителе + Nd:YAG лазер	1%, 8 пс	[375]
	4...11	Излучение ПГС (2...4 мкм) + излучение с $\lambda = 1,4 \dots 2,13$ мкм	1 кВт, 8 нс	[379]
AgGaSe ₂	7...15	Излучение ПГС (1,5...1,7 мкм) + Nd:YAG лазер (1,32 мкм), $\theta_{\text{оое}} = 90 \dots 57^\circ$	1,2%	[97]
	12,2...13	СО лазер (5,67...5,85 мкм) + СО ₂ лазер, $\theta=61^\circ$	0,2 мкВт, непрерывное излучение	[98]
CdGeAs ₂	11,4...16,8	СО лазер + СО ₂ лазер	4 мкВт, непрерывное излучение	[111, 377]
GaSe	9,5...18	Лазер на красителе + рубиновый лазер	300 Вт, 20 нс	[117]
	4...12	Холостая и сигнальная волны ПГС	60 Вт	[376]
CdSe	16	Сигнальная волна ПГС (1,995 мкм) + холостая волна ПГС (2,28 мкм), $\theta=62,22^\circ$	0,5 кВт, 20 Гц, 10 нс	[122]
	9...22	Излучение ПГС (2...4 мкм) + излучение с $\lambda = 1,4 \dots 2,13$ мкм	10...100 Вт, 8 нс	[379]
Te	10,9...11,1	СО ₂ лазер (10,2 мкм) + излучение непрерывного спин-флип лазера (5,3 мкм) $\theta_{\text{оое}}=14^\circ$	10^{-5} Вт	[378]

ставляла 1,6 МВт при средней мощности 130 мВт на кристалле LiNbO₃ длиной 25 мм. Длительность импульса на разностной частоте равнялась 8 нс, угол фазового синхронизма менялся в пределах $46 \dots 57^\circ$. В области $4,4 \dots 5,7$ мкм пиковая мощность равнялась 550 кВт при $\tau=8$ нс, средняя мощность — 45 мВт на $\lambda=4,9$ мкм. Использовался кристалл LiIO₃ длиной 19 мм, угол синхронизма

$\theta_{\text{оое}} = 20 \dots 22^\circ$. Ширина линии излучения на $\lambda = 4,9$ мкм оценивалась в $0,1 \text{ см}^{-1}$. В диапазоне длин волн $5 \dots 11$ мкм пиковая мощность ИК-излучения доходила до 180 кВт при $\tau = 8$ нс, средняя мощность — до 14 мВт. Длина кристалла AgGaS_2 составляла 10 мм, угол фазового синхронизма менялся в пределах $\theta_{\text{оое}} = 38 \dots 52^\circ$ одновременно с перестройкой длины волны излучения лазера на красителе в диапазоне от 1,35 до 1,17 мкм. Ширина линии ИК-излучения оценивалась в $0,1 \dots 0,2 \text{ см}^{-1}$.

На кристалле прустита в [80] с помощью ГРЧ излучений двух лазеров на красителях перекрыт диапазон длин волн $11 \dots 23$ мкм. Пиковая мощность излучения на $\lambda = 10 \dots 12$ мкм составляла $20 \dots 30$ Вт, на $\lambda = 16 \dots 20$ мкм $P = 1 \dots 3$ Вт при длительности импульса 30 нс. Использовался кристалл Ag_3AsS_3 длиной 4 мм, вырезанный под углом 20° к оптической оси. Указанный диапазон перекрывался при повороте кристалла всего на 7° . В [80] также измерено пропускание прустита вплоть до $\lambda = 24$ мкм — $\alpha \approx 70 \text{ см}^{-1}$.

В [379] с использованием кристаллов трех типов (LiNbO_3 , AgGaS_2 , CdSe) с помощью ГРЧ перекрыт диапазон длин волн $1,4 \dots 22$ мкм. В первом кристалле LiNbO_3 смешиваются излучения $\text{Nd}:\text{YAG}$ лазера и лазера на красителе (610 ... 710 нм), при этом в результате ГРЧ достигается перестройка в диапазоне $1,4 \dots 2,13$ мкм (ИК 1). Далее, в другом кристалле LiNbO_3 реализуется ПГС с $\lambda = 2,13 \dots 4$ мкм (ИК 2). И наконец, в кристаллах AgGaS_2 и CdSe реализуется ГРЧ при смешении ИК 1 и ИК 2, что позволяет перекрыть области $4 \dots 11$ и $9 \dots 22$ мкм соответственно. В области $1,4 \dots 4$ мкм выходная мощность излучения составляла несколько мВт, в области $4 \dots 10$ мкм — несколько кВт, в области $9 \dots 22$ мкм — $10 \dots 100$ Вт при $\tau = 8$ нс и $f = 10$ Гц.

В ряде работ продемонстрирована генерация ИК-излучения пикосекундной длительности в области $1 \dots 9,4$ мкм. В [366] при смешении излучений двух лазеров на красителях с синхронизацией мод в LiIO_3 длиной 1 мм получено излучение в области $1,2 \dots 1,6$ мкм с пиковой мощностью до 10 Вт и длительностью импульса $1,5 \dots 5$ пс. Длительность импульса измерялась по кросскорреляционной функции при ГСЧ ИК-излучения с излучением лазера на красителе в другом кристалле LiIO_3 длиной 1 мм ($\theta_{\text{оое}} = 37^\circ$). С использованием кристалла LiNbO_3 длиной 5 мм с помощью ГРЧ достигнута перестройка в области $2 \dots 4,5$ мкм [369]. Смешивались излучения аргонового лазера, работающего в режиме с акусто-оптической синхронизацией мод ($\lambda = 514,4$ нм, $\tau = 100$ пс), и лазера на красителе родамин 6G ($\tau = 1,2$ пс), накачиваемого этим же аргоновым лазером. Спектральная ширина импульсов на $\lambda = 2,43$ мкм составляла 2,6 нм, остальные характеристики приведены в табл. 54. В [375] получена генерация ИК-излучения в области $3,9 \dots 9,4$ мкм с $\tau = 8$ пс при смешении излучения $\text{Nd}:\text{YAG}$ лазера ($\lambda = 1,064$ мкм, $\tau = 21$ пс) с излучением лазера на красителе ($\lambda = 1,2 \dots 1,46$ мкм). Использовался кристалл AgGaS_2 длиной 15 мм, угол синхронизма менялся в пределах $\theta_{\text{оое}} = 36 \dots 48^\circ$. Ширина линии ИК-излучения во всем диапазоне перестройки равнялась $6,5 \text{ см}^{-1}$. Коэффициент преобразования в ИК-излучение составлял несколько процентов по числу квантов от излучения $\text{Nd}:\text{YAG}$ лазера.

В [380] предложен и реализован двухкаскадный метод укорочения длительности импульса CO_2 лазера. В первом кристалле прустита с помощью ГРЧ смешивается излучение CO_2 лазера ($\lambda = 10,6$ мкм, $\tau = 150$ нс) с излучением $\text{Nd}:\text{YAG}$ лазера ($\lambda = 1,064$ мкм, $\tau = 20$ нс). Далее, полученное излучение на $\lambda = 1,2$ мкм во втором кристалле прустита еще раз смешивается с $\lambda = 1,064$ мкм

и в результате ГРЧ преобразуется в излучение с $\lambda=10,6$ мкм и длительностью 20 нс. Коэффициент преобразования по мощности от излучения с $\lambda=1,064$ мкм составляет $\eta=0,05\%$, что позволяет получить интенсивность ИК-излучения порядка 10 кВт/см². В обоих каскадах нелинейного преобразования использовались кристаллы прустита длиной 1 см и $\theta_{\text{св}}=20^\circ$. Оценки показывают, что в случае использования пикосекундного Nd:YAG лазера коэффициент преобразования на порядок выше.

Преобразование в дальний ИК-диапазон. Одним из методов получения излучения в дальнем ИК-диапазоне ($\lambda=50$ мкм ... 20 мм) является генерация разностной частоты между излучениями двух лазеров, генерирующих на близких частотах. Так, при смешивании в LiNbO₃ и кварце излучений двух рубиновых лазеров с температурной подстройкой частоты достигнута перестройка в диапазоне 1,2 ... 8,1 см⁻¹ [381]. В качестве источника накачки можно использовать один лазер с широким спектром излучения. В этом случае происходит взаимодействие частотных компонентов внутри спектра генерации, и в результате генерируется разностная частота, определяемая полностью шириной этой полосы.

Т а б л и ц а 55

Генерация разностной частоты в дальнем ИК-диапазоне

Источник накачки	Кристалл	ν , см ⁻¹	λ , мкм	Мощность, энергия	Литература
Nd : стекло, 1,06 мкм	LiNbO ₃	100	100	—	[382]
Рубин, 0,694 мкм	LiNbO ₃	29	330	—	[383]
Два рубиновых лазера, 0,694 мкм, 1 МВт, 30 нс	LiNbO ₃ Кварц	1,2...8	1250...8330	20 мВт	[381]
Nd : стекло, 1,06 мкм, 50 мДж, 10 пс	ZnTe, LiNbO ₃	8...30	330...1250	20 мВт/см ⁻¹	[384]
Nd : стекло, 1,06 мкм, 10 пс	LiIO ₃	—	—	—	[385]
Лазер на красителе 0,73 ... 0,93 мкм, 11 ... 15 нс, 4 ... 13 МВт	ZnTe, ZnSe, LiNbO ₃	5...30	330...2000	11 Вт (ZnTe)	[386]
Nd : стекло, 1,06 мкм, 10 пс	LiNbO ₃	0,4...2,5	4000...25000	60 Вт	[387]
Два рубиновых лазера, 0,694 мкм, 20 нс	LiNbO ₃	1...3,3	3000...10000	0,5 Вт	[388]
Рубин, 0,694 мкм	LiNbO ₃	1,67...3,3	3000...6000	—	[389]
Два лазера на красителе: $\tau_1=1,2$ пс, $\lambda_1=589$ нм, $E_1=0,2$ мДж; $\tau_2=20$ нс, $\lambda_2=590$... 596 нм, $E_2=20$ мДж	LiNbO ₃	20...200	50...500	3 мДж	[60]
CO ₂ лазер на двух частотах, 10,6 мкм	GaAs	2...100	100...5000	—	[39*]

Таким способом в [382] было получено излучение на фиксированной частоте 100 см^{-1} при накачке LiNbO_3 неодимовым лазером.

В качестве нелинейного материала для дальней ИК-области в основном используется LiNbO_3 , достаточно прозрачный в этой области, а также некоторые изотропные кристаллы, обладающие большими нелинейностями: GaAs , ZnTe и ZnSe (табл. 55). В [60] достигнуто преобразование в $\nu=20\ldots 200\text{ см}^{-1}$ с квантовой эффективностью $0,1\ldots 0,3\%$. Использовались два лазера на красителе с нано- и пикосекундной длительностью импульсов. Усилители обеих лазеров накачивались второй гармоникой Nd:YAG лазера, чем и обеспечивалась синхронизация между ними. Оба взаимодействующих излучения фокусировались в кристалл LiNbO_3 длиной 4 мм под небольшим углом α друг к другу. Перестройка частоты ИК-излучения достигалась изменением угла α (от 5 до 50 мрад) и частоты излучения наносекундного лазера. В результате генерируемая энергия достигала 3 нДж при длительности импульса, оцениваемой в 10 пс.

3.6. Параметрическая генерация света

Параметрическая генерация света УФ, видимого и ближнего ИК-диапазонов. Параметрическая генерация света в нелинейных кристаллах позволяет получать излучение с перестраиваемой частотой. Для плавного изменения длины волны в параметрических генераторах света используются методы угловой и температурной перестройки синхронизма. Оба метода наряду с преимуществами имеют и свои недостатки. К преимуществам угловой перестройки необходимо отнести сравнительную простоту метода, быстроту перестройки по сравнению с температурным методом. Температурная перестройка, как правило, применяется при 90°-м синхронизме, т. е. когда угол двулучепреломления равен нулю. Этот метод используется в основном в кристаллах с резкой зависимостью угла синхронизма от температуры: в ADP ($\lambda_n=266\text{ нм}$), LiNbO_3 ($\lambda_n=530\text{ нм}$), $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ ($\lambda_n=530\text{ нм}$), KNbO_3 ($\lambda_n=532\text{ нм}$), а также в кристаллах DKDP с $\lambda_n=266\text{ нм}$. В настоящее время параметрическая генерация света позволяет получать плавно-перестраиваемое излучение от УФ-диапазона (330 нм) до среднего ИК-диапазона (16,4 мкм), минимальные длительности импульсов в видимом диапазоне доходят до $0,1\ldots 0,3\text{ пс}$, ширина линий излучения ПГС — до $0,1\text{ см}^{-1}$. Максимальная эффективность преобразования достигнута с использованием кристаллов KDP (67...74%) и ADP (60%) при суммарной энергии ПГС до 2,3 Дж.

Ввиду того, что для возбуждения параметрической генерации необходимы достаточно большие интенсивности излучения, для накачки ПГС используются преимущественно нано- и пикосекундные источники. Все схемы ПГС в конечном счете сводятся к двум: ПГС бегущей волны (или безрезонаторные) и резонаторные ПГС (одно-, двухрезонаторные). Параметрические генераторы бегущей волны (БПГС) бывают обычно одно- или же двухкристалльными. Отличаясь технической простотой схемы и возможностью генерации практически во всем диапазоне прозрачности кристалла, БПГС имеет, однако, и свои недостатки. Так, для достижения больших коэффициентов преобразования необходимы интенсивности накачки, близкие к порогу разрушения кристалла.

Наиболее перспективным типом резонаторного ПГС является пикосекундный ПГС с синхронной накачкой. В этом случае нелинейный кристалл помещается в резонатор, обеспечивающий положительную обратную связь, а в каче-

стве накачки используется пуг пикосекундных импульсов, следующих с периодом, равным времени двойного прохода сигнала по резонатору. Резонатор обычно состоит из широкополосных зеркал с отражением $R_1=90\%$ и $R_2=4\ldots 80\%$ на длине волны ПГС. Основными достоинствами ПГС с синхронной накачкой являются низкий порог возбуждения ($I < 100 \text{ МВт/см}^2$) и близкие к предельным пространственная и временная когерентности импульсов. Наименее короткие длительности субпикосекундных импульсов ($0,3 \ldots 0,5 \text{ пс}$) достигаются именно в схемах ПГС с синхронной накачкой. Недостатком этого типа ПГС является необходимость подбора диэлектрических зеркал и достаточная усложненность схемы по сравнению с ПГС бегущей волны.

Резонаторные ПГС бывают двухрезонаторные (ДПГС), когда положительная обратная связь реализуется для обеих волн — сигнальной и холостой, и однорезонаторные (ОПГС), когда обратная связь имеет место только на одной частоте.

В качестве источника накачки ПГС, как правило, используется лазер на фосфатном стекле с Nd^{3+} ($\lambda=1,054 \text{ мкм}$) или $\text{Nd}:\text{YAG}$ лазер ($\lambda=1,064 \text{ мкм}$), работающие в режиме синхронизации мод или модуляции добротности, а также их гармоники — вторая, третья и четвертая. $\text{Nd}:\text{YAG}$ лазер характеризуется достаточной надежностью работы в режиме синхронизации мод с большой частотой повторения (несколько десятков герц). Длительности импульсов, достигаемых на $\text{Nd}:\text{YAG}$ лазерах с пассивной синхронизацией мод, составляют $25 \ldots 45 \text{ пс}$. В качестве пассивных затворов обычно используют растворы красителей 3955 или 3274 в нитробензоле, метаноле, изобутаноле или этаноле. К настоящему времени лазерные системы на $\text{Nd}:\text{YAG}$ позволяют достаточно легко достигать мощности одиночных пикосекундных импульсов 1 ГВт при частоте повторения более 10 Гц . Лазеры на силикатном и фосфатном стекле с Nd^{3+} имеют значительно меньшие длительности импульсов — до $1 \ldots 2 \text{ пс}$, однако работают они существенно менее устойчиво и частота повторения их импульсов из-за низкой теплопроводности активных элементов мала. Рубиновые лазеры для накачки ПГС в настоящее время практически не используются.

Наиболее полно и достаточно подробно все схемы ПГС, их энергетические, временные, спектральные и пространственные характеристики рассмотрены в [17*, 18*]. В настоящем справочнике описаны только основные выходные параметры ПГС, реализованные на практике.

В качестве нелинейных материалов для ПГС в диапазоне длин волн $0,3 \ldots 5 \text{ мкм}$ используются кристаллы KDP , DKDP , ADP , CDA , LiIO_3 , LiNbO_3 , «банизан», $\alpha\text{-HfO}_3$, KNbO_3 , а также органический кристалл мочевины. В табл. 56 указаны длина волны накачки и угол синхронизма, диапазон перестройки ПГС, длительность импульса генерируемого излучения, коэффициент преобразования. В примечании приводятся сведения о типе ПГС (безрезонаторные, одно- и двухрезонаторные), об интенсивности накачки, длинах используемых кристаллов и пределах варьирования их температуры, выходные параметры излучения ПГС (энергия, мощность, ширина линии).

Пикосекундные параметрические генераторы света наиболее подробно исследованы в [51, 24, 12]. Параметрические генераторы света бегущей волны на кристаллах KDP , LiIO_3 , LiNbO_3 и $\alpha\text{-HfO}_3$ реализованы в [51]. Высокая эффективность преобразования ($10 \ldots 12\%$) в параметрическое излучение достигалась в кристалле $\alpha\text{-HfO}_3$ при накачке в прямом пучке с интенсивностью $3 \ldots 4 \text{ ГВт/см}^2$. В случае кристаллов KDP и LiIO_3 использовалось цилиндрическое те-

Параметрические генераторы света УФ, видимого и ближнего ИК-диапазонов

Кристалл	Угол синхронизма, тип взаимодействия	λ_n , мкм	$\lambda_{\text{лпс}}$, мкм	τ_n	Коэффициент преобразования, %	Литература	Примечание
KDP	eoe	0,532	0,8...1,7	35 пс	6...8	[51]	БПГС, $I_n=15$ ГВт/см ² , $L_1=2,5$ см, $L_2=4$ см
	$\theta_{\text{eoe}}=58,5^\circ$	0,355	0,45...0,64, 0,79...1,69	45 пс	15	[390]	БПГС, $L_1=L_2=4$ см
	$\theta_{\text{eoe}}=58^\circ$	0,532	0,8...1,67	40 пс	25	[391]	БПГС, $E=1$ мДж, $L_1=L_2=4$ см
	$\theta_{\text{eoe}}=58,5^\circ$	0,532	0,9...1,3	30 пс	51 по энергии	[392, 393]	БПГС, $\Delta n \Delta t=0,7$, $L_1=4$ см, $L_2=6$ см, $I_n=15 \dots 20$ ГВт/см ²
	eoe	0,527	0,82...1,3	0,3...0,5 пс	2	[394, 12]	ПГС с синхронной накачкой, $E_{\text{лпс}}=20$ мкДж
DKDP	eoe	0,532	—	—	67...74	[395]	БПГС, $L_1=4$ см, $L_2=6$ см, $E=2$ Дж
	eoe	0,35	0,45...0,6	0,5 нс	70	396	БПГС, $L_1=2$ см, $L_2=6$ см, $E=0,35$ Дж, $I_n=(6 \dots 8)$ ГВт/см ²
	$\theta_{\text{ооо}}=90^\circ$ $\theta_{\text{ооо}}=90^\circ$	0,266 0,266	0,47...0,61 0,37...0,6	— —	— —	[397] [4]	БПГС, $T=40 \dots 100^\circ\text{C}$
ADP	eoe	0,266	—	—	30 по мощности	[398]	$L=6$ см, $I_n=1$ ГВт/см ²
	$\theta_{\text{ооо}}=90^\circ$	0,266	0,44...0,68	—	10	[399]	БПГС, $T=50 \dots 110^\circ\text{C}$, $L=5$ см
	$\theta_{\text{ооо}}=51 \dots 45^\circ$	0,352	0,44...1,75	5 пс	0,1...1	[400]	БПГС, $L_1=2,5$ см, $L_2=3$ см
	—	0,527	0,93...1,21	—	60	[29]	БПГС, $E=2,3$ Дж, $I_n=10$ ГВт/см ²
CDA	$\theta_{\text{ооо}}=90^\circ$	0,532	0,854...1,41	10 пс	30...60 по мощности	[36]	$L=3$ см, $T=50 \dots 70^\circ\text{C}$, $I_n=0,3$ ГВт/см ²
	$\theta_{\text{ооо}}=90^\circ$	0,53	0,8...1,2	10 пс	12,5	[401]	ПГС с синхронной накачкой, $L=4$ см, $I_n=3$ ГВт/см ²

[illegible]

Кристалл	Угол синхронизма, тип взаимодействия	$\lambda_{\text{н}},$ мкм	$\lambda_{\text{пгс}},$ мкм	$\tau_{\text{и}}$	Коэффици- ент преоб- разования, %	Литература	Примечание
$\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$	юе	0,355	0,45...1,68	8 нс	9,4	[438]	ОПГС, $I_{\text{н}}=130$ МВт/см ² , $L=11,5$ мм, $E_{\text{пгс}}=15$ мДж
	оое	0,53	0,68...2,4	75 пс	30	[452]	ПГС с синхронной накачкой, $I_{\text{н}}=2,2$ ГВт/см ² , $L=7,2$ мм, $E_{\text{пгс}}=2$ мДж
	юе	0,308	0,422...0,477	12 нс	10	[453]	ОПГС, XeCl лазер, $E_{\text{пгс}}=0,26$ мДж
	$\theta_{\text{ооо}}=26 \dots 33^\circ$ $\theta_{\text{еое}}=25 \dots 55^\circ$	0,355 0,355 0,355	0,43...2 0,41...2,6	— —	— —	[454] [454]	$L=7,6$ мм $L=6,5$ мм, ГВГ излучения ПГС до 205 нм
КТР	$\theta=40 \dots 70^\circ$, $\varphi=90^\circ$	0,526	0,6...2	30 пс	10	[443]	Накачка: Nd : YLF лазер, $L=20$ мм
	$\theta=40 \dots 80^\circ$, $\varphi=0^\circ$	0,526	0,6...4,3	30 пс	10	[443]	
«банан»	$\theta_{\text{ооо}}=90^\circ$	0,532	0,75...1,82	10 нс	5	[418]	ОПГС, $T=80 \dots 220^\circ\text{C}$
	$\theta_{\text{ооо}}=90^\circ$	0,532	0,8...1,6	10 пс	25	[419]	ПГС с синхронной накачкой
	$\theta_{\text{ооо}}=90^\circ$	0,53	0,65...3	10 пс	5,3	[401]	То же, $L=1$ см, $I_{\text{н}}=250$ МВт/см ²
$\alpha\text{-HfO}_3$	еое	0,532	1...1,1	—	57 по энер- гии	[172]	$I_{\text{н}}=20$ МВт/см ² , $L=2,3$ см
	еое	0,532	0,7...2,2	30... 45 пс	10...12	[51]	БПГС, $I_{\text{н}}=(4 \dots 5)$ ГВт/см ² , $L_1=L_2=2$ см
	еое	0,527	—	5... 6 пс	10	[420]	ПГС с синхронной накачкой, $\Delta\nu\Delta\tau=0,7$
	еое, по оси	0,532	0,86...1,4	5 нс	32	[176, 177]	ДПГС, $P=12$ МВт, $T=180 \dots 200^\circ\text{C}$
KNbO ₃	$\theta_{\text{ооо}}=81 \dots 90^\circ$	0,355	0,5...0,51; 1,17...1,22	7 нс	20	[184]	ОПГС, $I_{\text{н}}=90$ МВт/см ² , $L=1,27$ см
Мошви- на	$\theta_{\text{ооо}}=50 \dots 90^\circ$	0,355 0,266	0,5...1,23 0,33...0,42	7 нс 7 нс	23 —	[421, 182] [182]	ОПГС, $L=2,3$ см
NPr N-(4- нитрофе- нил)- (L)-про- пиол	—	0,62	1,0...1,6	100 фс	—	[422]	

лесткопирование, оптимальные условия которого находились экспериментально. Для LiNbO_3 использовалась однокристалльная схема и двукратный сферический телескоп. В кристаллах $\alpha\text{-HfO}_3$ обнаружено эффективное ВКР, которое конкурирует с ПГС и уносит до 30% энергии накачки. Порог ВКР очень низок и составляет 0,3 ГВт/см². В LiIO_3 ВКР возбуждалось менее эффективно: на вынужденное рассеяние расходовалось до 5% энергии накачки. Исследование формы параметрически усиленного импульса показало, что в КДР усиливаемый импульс сужается до 17 пс, а в LiIO_3 — до 6 пс при длительности накачки 45 пс.

В [12] реализован ПГС на КДР с синхронной накачкой цугом пикосекундных импульсов с $\lambda=527$ нм (вторая гармоника лазера на фосфатном стекле с неодимом). Кристалл КДР ($L=4$ см, $\epsilon_{\text{ое}}$) помещался в резонатор с оптической длиной 130 см, равно длине резонатора задающего генератора. Наиболее короткие импульсы ПГС имели длительности 0,3 ... 0,5 пс при энергии 20 мкДж (область перестройки 0,8 ... 1,5 мкм). Далее, импульсы ПГС усиливались до 1 мДж в F_2^+ центрах в кристалле LiF ($L=2$ см), накачиваемом второй гармоникой излучения лазера на Nd:YAG с электрооптической модуляцией добротности. Существенное укорочение длительности импульсов ПГС также может быть достигнуто в двухкаскадном параметрическом генераторе бегущей волны путем внесения соответствующей задержки между волной накачки и холостой (или сигнальной) волнами. Для этой цели, например, в [423, 413] между кристаллами ПГС устанавливался кристалл кальцита (CaCO_3) толщиной несколько миллиметров, который вносил временную задержку между сигнальной волной и накачкой, имеющих различные поляризации и, соответственно, различные показатели преломления. Таким образом достигалось укорочение длительности генерируемых ПГС импульсов до 4 пс при длительности накачки $\tau_n=21$ пс [423] и до 0,5 пс при $\tau_n=8$ пс [413]. В последнем случае временная задержка равнялась 8,5 пс.

Максимальная эффективность преобразования $\eta_{\text{эф}}=60 \dots 74\%$ достигнута в схемах ПГС бегущей волны с двумя кристаллами, расположенными на большом расстоянии друг от друга (до 1 м) [395, 396, 29]. Напомним, что эффективность преобразования $\eta_{\text{эф}}$ рассчитывается по формуле

$$\eta_{\text{эф}} = \frac{E_{\text{ПГС}}}{E_{\text{ПГС}} + E_{\text{ост}}},$$

где $E_{\text{ПГС}}$ — энергия излучения ПГС; $E_{\text{ост}}$ — энергия излучения накачки, оставшаяся без преобразования, измеренная после второго кристалла. Значение $\eta_{\text{эф}}$ существенно выше коэффициента преобразования: $\eta_{\text{кп}}=E_{\text{ПГС}}/E_{\text{нак}}$, где $E_{\text{нак}}$ — энергия накачки, ввиду того, что $(E_{\text{ПГС}}+E_{\text{ост}})/E_{\text{нак}}=40 \dots 70\%$ [396] и часть излучений накачки и ПГС неизбежно теряется на рассеяние и поглощение в кристаллах.

Выбор того или иного кристалла для параметрической генерации во многом аналогична таковому для других нелинейных преобразований, изложенных выше. Кристаллы «банана» и ниобата калия имеют максимальные нелинейности и, значит, минимальные пороги генерации ПГС (например, на KNbO_3 $I=3,5$ МВт/см² [177]). Эти кристаллы негигроскопичны и позволяют реализовать некритичный (90°-й) синхронизм с температурной перестройкой. Вместе с тем, они нестойки к излучению и их невозможно выращивать до достаточно больших размеров. Кристаллы LiIO_3 , LiNbO_3 и $\alpha\text{-HfO}_3$ эффективны в видимом и

ИК-диапазонах (до 5 мкм), кристаллы группы KDP и мочевины — в УФ и видимом при накачке второй — четвертой гармоникой неодимового лазера. Благодаря высокой оптической прочности кристаллы KDP, DKDP, ADP, а также LiIO_3 можно использовать в схемах безрезонаторных ПГС, требующих больших интенсивностей накачки — до 10 ГВт/см², но в то же время значительно более простых в конструктивном исполнении.

Параметрическая генерация света в средней ИК-области. Для ПГС средней ИК-области (5 ... 16 мкм) используются кристаллы Ag_3AsS_3 , AgGaS_2 , AgGaSe_2 , ZnGeP_2 и CdSe . Параметрический генератор света на кристаллах прустита (Ag_3AsS_3) в диапазоне 1,2 ... 8 мкм реализован в [75] при накачке излучением Nd:YAG лазера с $\lambda=1,064$ мкм, $I_n=6$ ГВт/см², $\tau=21$ пс, $\Delta\nu=2$ см⁻¹. Коэффициент преобразования по энергии составлял $10^{-2} \dots 10^{-4}$. Спектральная ширина импульсов ПГС составляла $10 \dots 40$ см⁻¹, длительность импульсов ≈ 8 пс. При использовании в качестве накачки лазера на фосфатном стекле с Nd^{3+} коэффициент преобразования в излучение ПГС с $\lambda=1,4 \dots 5$ мкм составлял 1% [424].

С использованием двух кристаллов AgGaS_2 с $L_1=1,5$ см и $L_2=3$ см реализован ПГС бегущей волны в диапазоне 1,2 ... 10 мкм [92]. В качестве накачки использовалось излучение Nd:YAG лазера с параметрами: $\lambda=1,064$ мкм, $\tau=20$ пс, $I_n=3$ ГВт/см². Угол синхронизма менялся от $\theta_{\text{ооо}}=35$ до 55° . Длительность импульсов ПГС определялась из кросс-корреляционной функции, полученной при неколлинеарной генерации суммарной частоты между излучением ПГС (5 мкм) и второй гармоникой Nd:YAG лазера (0,53 мкм) в кристалле LiIO_3 с $L=0,1$ см ($\theta=25^\circ$), составляла $\tau=8$ пс. Спектральная ширина импульсов ПГС равнялась 10 см⁻¹ (6 ... 10 мкм).

Эффективная генерация параметрического излучения в кристалле AgGaSe_2 в диапазонах длин волн 1,6 ... 1,7; 6,7 ... 6,9 и 2,65 ... 9,02 мкм наблюдалась в [425]. В качестве источников накачки использовались Nd:YAG ($\lambda=1,32$ мкм) и Ho:YLF ($\lambda=2,05$ мкм) лазеры, работающие в режиме модуляции добротности. Длины используемых кристаллов равнялись 18 ... 21 мм. Коэффициент преобразования составлял 18% при мощности на выходе $P=100$ кВт и $\tau=30$ нс. Пикосекундный ПГС в ZnGeP_2 реализован в [426, 103]. В качестве накачки использовался пуг импульсов эрбиевого лазера с $\lambda=2,94$ мкм и $\tau=80$ пс. Достигнут коэффициент преобразования в излучение с $\lambda=5,51 \dots 5,38$ и $6,29 \dots 6,46$ мкм $\eta=5,3\%$ при $I_n=4$ ГВт/см², длине кристалла 42 мм и $\theta_{\text{ооо}}=84,5 \dots 79,3^\circ$ [426]. При увеличении интенсивности накачки до 16 ГВт/см² получена квантовая эффективность преобразования 17%; мощность излучения ПГС составляла 1 МВт. Высокоэффективный ПГС на CdSe с коэффициентом преобразования по мощности 40% в излучение с $\lambda=2,26 \dots 2,23$ и $9,8 \dots 10,4$ мкм реализован в [123]. Накачкой служило излучение Nd:YAG лазера с $\lambda=1,833$ мкм, $\tau=300$ нс и $I_n=2 \cdot 10^7$ Вт/см². Угол фазового синхронизма менялся в пределах $\theta_{\text{ооо}}=90 \dots 78^\circ$. При накачке излучением $\text{CaF}_2:\text{Dy}^{2+}$ лазера ($\lambda=2,36$ мкм, $\tau=40$ нс) в кристалле CdSe достигнута параметрическая генерация в диапазоне 7,9 ... 13,7 мкм при $\theta_{\text{ооо}}=90 \dots 65^\circ$ [120, 427]. Коэффициент преобразования по энергии составлял 15% при $I_n=10^7$ Вт/см² и длине кристалла 30 мм. На том же кристалле достигнута ПГС в диапазонах 4,3 ... 4,5; 8,1 ... 8,3 и 14,1 ... 16,4 мкм с пиковой мощностью до 800 Вт при накачке излучением HF лазера ($\lambda=2,87$ мкм) [124, 125].

В табл. 57 приведены данные об используемых кристаллах, длинах волн накачки, диапазоне перестройки ПГС, длительности импульса и коэффициенте

Параметрические генераторы света среднего ИК-диапазона

Кристалл	λ_n , мкм	$\lambda_{ПГС}$, мкм	τ_n	Коэффициент преобразования, %	Литература
Ag_3AsS_3	1,06	2,1	100 нс	—	[428]
	1,065	1,82...2,56	26 нс	1	[429]
	1,065	1,22...8,2	25 нс	—	[430]
	1,064	1,2...8	8 пс	0,01...1	[75]
	1,055	1,4...5	10 пс	1	[424]
$AgGaS_2$	1,064	1,2...10	8 пс	0,1...10	[92]
$AgGaSe_2$	1,34	1,6...1,7 6,7...6,9	30 нс	>18	[425]
	2,05	2,65...9,02	30 нс	>18	[425]
$ZnGeP_2$	2,94	5,51...5,38 6,29...6,46	80 пс	5,3	[426]
	2,94	5...5,3 5,9...6,3	150 пс	17	[103]
$CdSe$	1,833	9,8...10,4 2,26...2,23	300 нс	40	[123]
	2,36	7,9...13,7	40 нс	15	[120, 427]
	2,87	4,3...4,5 8,1...8,3	140 нс	15	[124]
	2,87	14,1...16,4	—	—	[125]

преобразования. Как видно, в наносекундном режиме наиболее перспективны кристаллы $AgGaSe_2$ и $CdSe$, в пикосекундном — прустит, тиогаллат серебра и $ZnGeP_2$.

Преобразование излучения ПГС в УФ-диапазон. Диапазон генерируемых с помощью ПГС длин волн можно существенно расширить генерацией гармоник (ГВГ, ГЧГ), а также ГСЧ при смещении излучения ПГС с гармониками лазера накачки. Так, в [391] для ГВГ излучения ПГС использовался $LiIO_3$ длиной 30 мм, вырезанный под углом $\theta_{оо\epsilon}=30^\circ$. Энергия второй гармоники на $\lambda=420 \dots 700$ нм составляла 0,1 ... 0,4 мДж при коэффициенте преобразования 5 ... 47%. Излучение второй гармоники, в свою очередь, удваивалось в кристалле KDP или ADP длиной 40 мм; достигнутый диапазон перестройки 0,26 ... 0,4 мкм при энергии импульса в несколько мкДж и $\tau=30$ пс. В [24, 423] с использованием $LiIO_3$ ($L=1,4$ мм, $\theta=52^\circ$) и KDP ($L=8$ мм, $\theta=41,5$ или 52°) получена ГВГ вплоть до 313 нм при $\tau=5$ пс и $\Delta\nu=12$ см $^{-1}$. Энергия излучения ГВГ составляла 50 мДж. При смещении излучения ПГС (0,63 ... 3,6 мкм) с основным излучением Nd:YAG лазера в кристалле KDP достигнута ГСЧ до 240 нм [416]. В [421] излучение ОПГС на мочевины ($\lambda=0,498 \dots 1,23$ мкм, $\tau=7$ нс) удваивалось в другом кристалле мочевины ($L=6$ мм, его-взаимодействие) с $\eta=8,3\%$, в результате чего перекрыт диапазон длин волн 249 ... 320 нм.

В работе [238] сообщается о генерации пикосекундного излучения в области 197 ... 393 нм при смешении в кристаллах пентабората калия ($\text{KB}_5\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), KDP и DKDP второй, третьей и четвертой гармоник Nd : YAG лазера ($\lambda = 0,532$; 0,355 и 0,266 мкм) с излучением ПГС. Мощность УФ-излучения составляла 20 кВт на $\lambda = 197$ нм и 100 кВт в области 225 ... 393 нм при длительности импульса 20 пс. В [143] с использованием KB5 перекрыт диапазон 200 ... 222 нм при $E = 1$ мкДж и $\tau = 45$ пс.

3.7. Генерация вынужденного комбинационного рассеяния и пикосекундного континуума в кристаллах

Как указано в [18*], основной причиной, ограничивающей энергетическую эффективность ПГС на кристаллах LiIO_3 , LiNbO_3 , $\alpha\text{-HfO}_3$ и Ag_3AsS_3 , являются нелинейно-оптические потери энергии излучения накачки. В случае кристаллов LiIO_3 и $\alpha\text{-HfO}_3$ при $\lambda_n = 530$ нм основным механизмом нелинейных потерь является вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР); в этих кристаллах ВКР существенно снижает эффективность ПГС. Так, для LiIO_3 при $\lambda_n = 527$ нм и $\tau = 5$ пс максимальное значение коэффициента преобразования составляло 2% при $I = 7$ ГВт/см² и при дальнейшем увеличении интенсивности снижалось. При этом в излучение ВКР переходит более 70% энергии накачки [18*].

Данные о порогах ВКР в кристаллах KDP, LiIO_3 , LiNbO_3 и $\alpha\text{-HfO}_3$ приведены в табл. 58. Как видно, кристалл KDP имеет наибольший порог возбуждения ВКР, благодаря чему именно на этом кристалле удается получать наибольшие эффективности преобразования в излучение ПГС. В [408] исследовалось возбуждение ВКР в LiIO_3 при накачке второй гармоникой одночастотного лазера на неодимовом стекле с модуляцией добротности. Мощность импульса на $\lambda = 530$ нм составляла 15 МВт при $\tau = 30$ нс, что позволяло получать достаточно большие интенсивности. Кристалл LiIO_3 длиной 3 см был вырезан под углом $\theta = 26^\circ$ к оптической оси. Измеренный стоксов сдвиг равнялся 822 ± 2 см⁻¹. В отсутствие ВКР эффективность преобразования в излучение ПГС доходила до 20%, тогда как в присутствии ВКР энергия сигнальной волны ПГС

Т а б л и ц а 58.

Порог ВКР в кристаллах при $\lambda_n = 532$ нм

Кристалл	$I_n, 10^9$ Вт/см ²	τ , пс	Литература
KDP	22 44	30 4	[148] [148]
LiIO_3	0,015 0,7	3000 30	[408] [51]
LiNbO_3	1,2 5	30 4	[18*] [18*]
$\alpha\text{-HfO}_3$	0,3 1,4 6	35 30 4	[51] [18*] [18*]

Т а б л и ц а 59.

Параметры ВКР в $\alpha\text{-HfO}_3$

Компонента ВКР	$\Delta\nu$, см ⁻¹	λ , нм	η
1-я стоксовая	790	555,2	0,21
2-я стоксовая	1580	580,7	0,07
3-я стоксовая	2370	608,6	0,0095
4-я стоксовая	3160	640,2	0,001
1-я антистоксовая	790	510,5	0,01
2-я антистоксовая	1580	490,7	0,001

практически не зависела от энергии накачки, и максимальная эффективность преобразования достигала всего 3%.

Процесс ВКР в α - HfO_3 и его конкуренция с параметрическим усилением наиболее подробно исследованы в [51]. В качестве накачки использовалась вторая гармоника Nd:YAG лазера, работающего в режиме самосинхронизации мод ($\lambda=532$ нм, $\tau=35$ пс). Лазер излучал пуг из 5...7 импульсов. Максимальная частота повторения достигала 25 Гц. Измеренный порог ВКР в α - HfO_3 оказался довольно низким и составил 0,3 ГВт/см². В табл. 59 приведены значения коэффициентов преобразования в стоксовые и антистоксовые компоненты ВКР в кристалле α - HfO_3 при возбуждении с $\lambda=532$ нм [51]. Плотность мощности накачки составляла $I=1$ ГВт/см² при $\tau=35$ пс. Кристалл ориентировался для вырожденного параметрического взаимодействия типа еое. Обнаружена зависимость порога ВКР от поляризации возбуждающего излучения. Переход от необыкновенной поляризации к обыкновенной уменьшает порог ВКР в два раза. При этом появляется тонкая структура компонентов ВКР, которая с повышением мощности накачки заполняет интервалы между основными компонентами.

Таким образом, с увеличением интенсивности накачки за счет сильной конкуренции ВКР происходит подавление параметрического сигнала и резкое увеличение стоксовой компоненты ВКР. Следует, однако, подчеркнуть, что процесс генерации ВКР в кристаллах сам по себе может успешно использоваться для дискретной перестройки частоты.

Наряду с вынужденным комбинационным рассеянием в кристаллах наблюдается также генерация широкополосного излучения — пикосекундного континуума. Пикосекундный континуум первоначально был обнаружен в кубично-нелинейных средах — D_2O , H_2O , NaCl и др. Он эффективно применяется в различных задачах нестационарной спектроскопии в качестве зондирующего излучения. Среди кристаллов с квадратичной нелинейностью пикосекундный континуум обнаружен в KDP, LiIO_3 , LiNbO_3 , GaAs, AgBr, ZnSe и CdS. В табл. 60 приведены некоторые основные характеристики пикосекундного континуума и

Т а б л и ц а 60.

Генерация пикосекундного континуума

Кристалл	λ_n , мкм	I_n , 10^9 Вт/см ²	$\lambda_{\text{конт}}$, мкм	Эффективность преобразования, %	Угол среза кристалла	Литература
KDP	1,054	50	0,3...1,1	10	$\theta=49^\circ$	[432]
	0,527	30...40	0,84...1,4	15	$\theta=42^\circ$	[431]
LiIO_3	0,355	—	0,46...1,55	—	$\theta=90^\circ$	[433]
	0,532	0,3	0,67...2,58	—	$\theta=90^\circ$	[433]
	1,064	—	1,7...3	—	$\theta=90^\circ$	[433]
LiNbO_3	1,064	—	1,92...2,38	3	$\theta=44,7^\circ$	[434]
GaAs	9,3	100	3...14	—	—	[435]

условия его возбуждения. В [431] в качестве накачки использовались одиночные импульсы второй гармоники лазера на фосфатном стекле с Nd^{3+} с параметрами: $\lambda=0,527$ мкм, $\tau=3 \dots 6$ пс, $E=1$ мДж. Излучение фокусировалось в кристалл KDP длиной 4 см, вырезанный под взаимодействие ооо ($\theta=42^\circ$, $\varphi=45^\circ$). Эффективность преобразования в пикосекундный континуум в насыщении составляла 15%, спектральная эффективность преобразования — 10^{-4} л/см⁻¹. Расходимость излучения пикосекундного континуума составляла примерно 5 мрад, ширина спектра с учетом лишь коллинеарной генерации 3000 см⁻¹. При повороте кристалла на 10° в спектре континуума появлялись два максимума, соответствующие сигнальному и холостому излучениям ПГС. Временная задержка между крайними частотами континуума не превышала 0,2 пс. Затем излучение континуума удваивалось в другом кристалле KDP (ооо) длиной 3 см с эффективностью 10% [431].

Пикосекундный континуум также был зарегистрирован в KDP при накачке излучением с $\lambda=1,054$ мкм и $I=50$ ГВт/см² [432]. Спектральное уширение простиралось от 0,3 до 1,1 мкм. Наблюдалось временное запаздывание синих компонентов по сравнению с красными. В кристалле LiIO_3 наблюдался пикосекундный континуум в области 0,46...3 мкм, при накачке основным излучением, второй и третьей гармониками пикосекундного Nd:YAG лазера [433]. Излучение накачки распространялось в кристалле вдоль оси X.

Генерация пикосекундного континуума в LiNbO_3 длиной 4,5 см продемонстрирована в [434]. Использовалось взаимодействие типа 1 (ооо) при $\theta=44,7^\circ$. Энергия излучения континуума составляла 0,2 мДж. В кристалле GaAs генерировался пикосекундный континуум при накачке излучением с $\lambda=10$ мкм [436]. Для этого кристалла $d_{14}=(134 \dots 189) \cdot 10^{-12}$ м/В, однако ввиду отсутствия двулучепреломления он не может использоваться для ГВГ, ГСЧ или ПГС из-за невозможности достижения в нем синхронизма. В [435] при фокусировании излучения CO_2 лазера ($\lambda=9,3$ мкм, $\tau=2,5$ и 8 пс) в кристаллах GaAs, AgBr, ZnSe, CdSe генерировался континуум в области 3...14 мкм. Исследовался вклад нелинейных процессов в образование континуума: фазовой самомодуляции, четырехфотонного параметрического процесса, генерации высших гармоник и ВКР.

Список литературы

- 1*. Ахманов С. А., Хохлов Р. В. Проблемы нелинейной оптики. — М.: ВИНТИ, 1964. — 296 с.
- 2*. Бломберген Н. Нелинейная оптика: Пер. с англ./Под ред. С. А. Ахманова и Р. В. Хохлова. — М.: Мир, 1966. — 424 с.
- 3*. Цернике Ф., Мидвинтер Дж. Прикладная нелинейная оптика: Пер. с англ./Под ред. С. А. Ахманова. — М.: Мир, 1976. — 262 с.
- 4*. Дмитриев В. Г., Тарасов Л. В. Прикладная нелинейная оптика. — М.: Радио и связь, 1982. — 352 с.
- 5*. Ворошилов Ю. В., Никогосян Д. Н. Метод ориентации нелинейных одноосных монокристаллов//Квантовая электроника. — 1976. — Т. 3, № 3. — С. 608—611.
- 6*. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах: Пер. с англ./Под ред. И. Н. Сисакяна. — М.: Мир, 1987. — 616 с.

- 7*. **Никогосян Д. Н., Гурзадян Г. Г.** Новые формулы для расчета углов синхронизма//Квантовая электроника. — 1986. — Т. 13, № 12. — С. 2519—2520.
- 8*. **Никогосян Д. Н., Гурзадян Г. Г.** Кристаллы для нелинейной оптики//Квантовая электроника. — 1987. — Т. 14, № 8. — С. 1529—1541.
- 9*. **Hobden M. V.** Phase-matched second-harmonic generation in biaxial crystals//J. Appl. Phys. — 1967. — Vol. 38, № 11. — P. 4365—4372.
- 10*. **Степанов Д. Ю., Шигорин В. Д., Шипулов Г. П.** Направления фазового синхронизма при оптическом смещении в двусосных кристаллах с квадратичной восприимчивостью//Квантовая электроника, 1984. — Vol. 11, № 10. — С. 1957—1964.
- 11*. **Kleinman D. A.** Nonlinear dielectric polarization in optical media//Phys. Rev. — 1962. — Vol. 126, № 6. — P. 1977—1979.
- 12*. **Дмитриев В. Г., Ицхоки И. Я.** Оптические умножители частоты//Справочник по лазерам/Под ред. А. М. Прохорова. — М.: Сов. радио, 1978. — Т. 2. — С. 292—319.
- 13*. **Сухоруков А. П.** Нелинейные волновые взаимодействия в оптике и радиофизике. — М.: Наука, 1988. — 232 с.
- 14*. **Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф.** Специальные функции (формулы, графики, таблицы): Пер. с нем. — М.: Наука, 1964. — 212 с.
- 15*. **Milton A. F.** Up-conversion-a systems view//Appl. Opt. — 1972. — Vol. 11, № 10. — P. 2311—2330.
- 16*. **Boyd G. D., Ashkin A.** Theory of parametric oscillator threshold with single-mode optical masers and observation of amplification in LiNbO_3 //Phys. Rev. — 1966. — Vol. 146, № 1. — P. 187—198.
- 17*. **Дмитриев В. Г., Кулевский Л. А.** Параметрические генераторы света//Справочник по лазерам/Под ред. А. М. Прохорова. — М.: Сов. радио, 1978. — Т. 2. — С. 319—348.
- 18*. **Параметрические генераторы света и пикосекундная спектроскопия**/Р. Даниелюс, А. Пискаускас, В. Сируткайтис, А. Стабинис, Я. Ясевичюте. — Вильнюс: Моклас, 1983. — 186 с.
- 19*. **Ахманов С. А., Вислоух В. А., Чиркин А. С.** Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. — М.: Наука, 1988. — 310 с.
- 20*. **Рез И. С., Поплавко Ю. М.** Диэлектрики. Основные свойства и применения в электронике. — М.: Радио и связь, 1989. — 288 с.
- 21*. **Нелинейные оптические свойства органических молекул и кристаллов**/Под ред. Д. Шемлы, Ж. Висса. — М.: Мир, 1989.
- 22*. **Рез И. С.** Практическое использование свойств сегнетоэлектриков вблизи точек фазовых превращений//Изв. АН СССР. Сер. физич. — 1985. — Т. 49, № 2. — С. 241—246.
- 23*. **Kirby K. W., Hoeffler C. S., Deshazer L. G.** Refractive indices and thermo-optic coefficients of nonlinear crystals isomorphous to KH_2PO_4 /Final Report, submitted to Lawrence Livermore National Laboratory. — Available from NTIS. — 1985.
- 24*. **Eimerl D.** Electro-optic, linear and nonlinear optical properties of KDP and its isomorphs//Ferroelectrics. — 1987. — Vol. 72. — P. 95—139.
- 25*. **Таблицы физических величин**/Под ред. акад. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976. — 1006 с.
- 26*. **Бредерлов Г., Филл Э., Витте К.** Мощный йодный лазер. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 160 с.
- 27*. **Progress in crystal physics**/Ed. Krishnan R. S. — Madras: Viswanathan, 1958.
- 28*. **Smith W. L.** Two photon absorption in condensed media. CRC handbook of laser science and technology (M. J. Weber, Editor). — 1986.
- 29*. **Сонин А. С., Василевская А. С.** Электрооптические кристаллы. — М.: Атомиздат, 1971. — 328 с.
- 30*. **Kurtz S. K., Jerphagnon J., Choy M. M.** Nonlinear dielectric susceptibilities//Landolt-Börnstein New Series, Group III. — Berlin: Springer, 1979. — Vol. 11. — P. 671—743. Jerphagnon J., Kurtz S. K., Oudar J. L. Nonlinear dielectric susceptibilities//Landolt-Börnstein New Series, Group III. — Berlin: Springer, 1984. — Vol. 18. — P. 456—506.

- 31*. Синг С. Нелинейные оптические материалы//Справочник по лазерам/Под ред. А. М. Прохорова. — М.: Сов. радио, 1978. — Т. 2. — С. 237—271.
- 32*. Иодат лития. Выращивание кристаллов, их свойства и применения/Под ред. С. В. Богданова. — Новосибирск: Наука, 1980. — 144 с.
- 33*. Кузьминов Ю. С. Ниобат и танталат лития. — М.: Наука, 1975. — 182 с.
- 34*. Акустические кристаллы/Под ред. М. П. Шаскольской. — М.: Наука, 1975. — 632 с.
- 35*. Оптические материалы для инфракрасной техники. Справочное издание/Е. М. Воронкова, Б. Н. Гречушников, Г. И. Дистлер, И. П. Петров. — М.: Наука, 1965. — 336 с.
- 36*. Дитчерн Р. Д. Физическая оптика. — М.: Наука, 1965. — 632 с.
- 37*. Коренева Л. Г., Золин В. Ф., Давыдов Б. Л. Нелинейная оптика молекулярных кристаллов. — М.: Наука, 1985. — 200 с.
- 38*. Шигорин В. Д. Исследование генерации оптической гармоники в молекулярных кристаллах//Труды ФИАН. — М.: Наука, 1977. — Т. 98. — С. 78—140.
- 39*. Рябов С. Г., Торопкин Г. Н., Усольцев И. Ф. Приборы квантовой электроники. — М.: Радио и связь, 1985. — 252 с.

Библиографические ссылки¹

- | | |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Laser Foc. — 1967. — N 11. — P. 31. 2. Appl. Opt. — 1977. — Vol. 16. — P. 1798. 3. JOSA. — 1964. — Vol. 54. — P. 1215. 4. IEEE J. QE. — 1982. — Vol. 18. — P. 143. 5. JOSA. — 1966. — Vol. 56. — P. 629. 6. Br. J. Ap. Ph. — 1965. — Vol. 16. — P. 1135. 7. Ap. Ph. Lett. — 1972. — Vol. 20. — P. 272. 8. Ph. Rev. B. — 1976. — Vol. 14. — P. 1693. 9. Письма ЖЭТФ. — 1974. — Т. 19. — С. 48. 10. Опт. мех. пр. — 1969. — № 10. — С. 3. 11. Appl. Opt. — 1973. — Vol. 12. — P. 690. 12. Квант. эл. — 1982. — Т. 9. — С. 2491. 13. Appl. Opt. — 1982. — Vol. 21. — P. 3633. 14. Appl. Opt. — 1973. — Vol. 12. — P. 637. 15. Квант. эл. — 1976. — Т. 3. — С. 311. 16. Ph. Rev. B. — 1977. — Vol. 15. — P. 4039. 17. Opt. Comm. — 1980. — Vol. 34. — P. 469. 18. Нел. опт. — 1968. — С. 185. 19. Ph. Rev. B. — 1978. — Vol. 17. — P. 4620. | <ol style="list-style-type: none"> 20. Opt. Quant. El. — 1976. — Vol. 8. — P. 213. 21. IEEE J. QE. — 1977. — Vol. 13. — P. 791. 22. Ap. Ph. Lett. — 1977. — Vol. 30. — P. 91. 23. Квант. эл. — 1978. — Т. 5 — С. 2453. 24. Appl. Phys. — 1980. — Vol. 23. — P. 113. 25. Opto-elect. — 1970. — Vol. 2. — P. 125. 26. Ap. Ph. Lett. — 1972. — Vol. 20. — P. 282. 27. Laser Foc. — 1976. — Vol. 12. N 5. — P. 104. 28. JOSA. — 1965. — Vol. 55. — P. 210. 29. Квант. эл. — 1984. — Т. 11. — С. 1701. 30. Опт. и сп. — 1966. — Т. 21. — С. 715. 31. Appl. Opt. — 1973. — Vol. 12. — P. 637. 32. Кристалл. — 1967. — Т. 12. — С. 518. 33. Кристалл. — 1966. — Т. 11. — С. 832. 34. ЖЭТФ. — 1967. — Т. 53. — С. 491. 35. IEEE J. QE. — 1974. — Vol. 10. — P. 616. 36. IEEE J. QE. — 1974. — Vol. 10. — P. 899. 37. Opt. Comm. — 1975. — Vol. 13. — P. 93. |
|--|---|

¹ Полное название журналов см. в списке сокращений.

38. IEEE J. QE. — 1974. — Vol. 10.— P. 622.
39. Opt. Comm. — 1974. — Vol. 11.— P. 5.
40. Opt. Comm. — 1972. — Vol. 4.— P. 366.
41. Jap. J. Ap. Ph. — 1974. — Vol. 13. — P. 1681.
42. Ap. Ph. Lett. — 1974. — Vol. 25.— P. 342.
43. Ap. Ph. Lett. — 1970. — Vol. 17.— P. 286.
44. IEEE J. QE. — 1985. — Vol. 21.— P. 119.
45. Квант. эл. — 1975. — Т. 2. — С. 434.
46. Appl. Phys. B. — 1986. — Vol. 39. — P. 77.
47. Квант. эл. — 1974. — Т. 1. — С. 1769.
48. Квант. эл. — 1975. — Т. 2. — С. 2440.
49. Письма ЖЭТФ. — 1970. — Т. 12. — С. 475.
50. Квант. эл. — 1977. — Т. 4. — С. 211.
51. Квант. эл. — 1977. — Т. 4. — С. 2379.
52. IEEE J. QE. — 1984. — Vol. 20.— P. 434.
53. Phys. Lett. — 1969. — Vol. 30A.— P. 483.
54. Квант. эл. — 1976. — Т. 3. — С. 1138.
55. Appl. Phys. — 1969. — Vol. 40.— P. 5201.
56. Phys. Lett. — 1966. — Vol. 22.— P. 243.
57. IEEE J. QE. — 1970. — Vol. 6. — P. 68.
58. Opt. Quant. El. — 1984. — Vol. 16. — P. 373.
59. Jap. J. Ap. Ph. — 1975. — Vol. 14. — P. 1097.
60. Ap. Ph. Lett. — 1985. — Vol. 47.— P. 206.
61. Квант. эл. — 1972. — № 2 (8). — С. 94.
62. Appl. Opt. — 1981. — Vol. 20. — P. 1030.
63. Ap. Ph. Lett. — 1974. — Vol. 25.— P. 87.
64. Ap. Ph. Lett. — 1981. — Vol. 39.— P. 17.
65. Appl. Opt. — 1980. — Vol. 19. — P. 1415.
66. Ap. Ph. Lett. — 1967. — Vol. 11.— P. 161.
67. Ap. Ph. Lett. — 1978. — Vol. 33. — P. 413.
68. IEEE J. QE. — 1986. — Vol. 22.— P. 1013.
69. Sci. Sinica. B. — 1985. — Vol. 28. — P. 235.
70. Laser Foc. — 1987. — Vol. 23, N 9. — P. 88.
71. Ap. Ph. Lett. — 1967. — Vol. 10.— P. 133.
72. Appl. Opt. — 1972. — Vol. 11. — P. 1329.
73. Opt. Comm. — 1973. — Vol. 7.— P. 225.
74. IEEE J. QE. — 1972. — Vol. 8.— P. 317.
75. Opt. Comm. — 1983. — Vol. 44.— P. 293.
76. Opt. Lett. — 1983. — Vol. 7. — P. 63.
77. Квант. эл. — 1973. — № 2 (14). — С. 74.
78. IEEE J. QE. — 1972. — Vol. 8.— P. 382.
79. Квант. эл. — 1974. — Т. 1. — С. 1742.
80. Appl. Phys. — 1976. — Vol. 11.— P. 137.
81. Appl. Opt. — 1970. — Vol. 9. — P. 1716.
82. Appl. Opt. — 1972. — Vol. 11. — P. 993.
83. Opt. Comm. — 1970. — Vol. 1. — P. 187.
84. Opt. Comm. — 1971. — Vol. 3.— P. 29.
85. Appl. Opt. — 1976. — Vol. 15. — P. 305.
86. IEEE J. QE. — 1974. — Vol. 10.— P. 546.
87. Appl. Opt. — 1983. — Vol. 22.— P. 2492.
89. IEEE J. QE. — 1974.— Vol. 10.— P. 540.
88. IEEE J. QE. — 1974. — Vol. 10.— P. 461.
90. Appl. Opt. — 1984. — Vol. 23.— P. 3044.
91. Квант. эл. — 1977. — Т. 4. — С. 657.
92. Ap. Ph. Lett. — 1984. — Vol. 44.— P. 383.
93. Квант. эл. — 1975. — Т. 2. — С. 618.
94. Квант. эл. — 1979. — Т. 6. — С. 1807.
95. Квант. эл. — 1980. — Т. 7. — С. 2235.
96. IEEE J. QE. — 1976. — Vol. 12.— P. 367.
97. Ap. Ph. Lett. — 1974. — Vol. 24.— P. 65.

98. Opt. Comm. — 1973. — Vol. 9. — P. 315.
99. IEEE J. QE. — 1979. — Vol. 15. — P. 1074.
100. IEEE J. QE. — 1972. — Vol. 8. — P. 900.
101. Ap. Ph. Lett. — 1971. — Vol. 18. — P. 301.
102. Квант. эл. — 1987. — Т. 14. — С. 11361.
103. Квант. эл. — 1987. — Т. 14. — С. 1815.
104. Квант. эл. — 1987. — Т. 14. — С. 1177.
105. Квант. эл. — 1984. — Т. 11. — С. 1511.
106. Квант. эл. — 1987. — Т. 14. — С. 2252.
107. IEEE J. QE. — 1971. — Vol. 7. — P. 307.
108. Квант. эл. — 1985. — Т. 12. — С. 2143.
109. Ap. Ph. Lett. — 1971. — Vol. 18. — P. 446.
110. Ap. Ph. Lett. — 1971. — Vol. 19. — P. 237.
111. Opt. Comm. — 1974. — Vol. 10. — P. 306.
112. IEEE J. QE. — 1972. — Vol. 8. — P. 419.
113. Квант. эл. — 1987. — Т. 14. — С. 784.
114. Ap. Ph. Lett. — 1976. — Vol. 29. — P. 422.
115. Письма ЖЭТФ. — 1972. — Т. 16. — С. 1130.
116. Квант. эл. — 1975. — Т. 2. — С. 1228.
117. Квант. эл. — 1976. — Т. 3. — С. 163.
118. Opt. Comm. — 1974. — Vol. 11. — P. 291.
119. J. Appl. Phys. — 1969. — Vol. 40. — P. 219.
120. Письма ЖЭТФ. — 1972. — Т. 15. — С. 725.
121. Opt. Comm. — 1972. — Vol. 6. — P. 323.
122. Opt. Comm. — 1977. — Vol. 23. — P. 37.
123. Ap. Ph. Lett. — 1972. — Vol. 21. — P. 189.
124. Ap. Ph. Lett. — 1974. — Vol. 24. — P. 389.
125. Appl. Opt. — 1976. — Vol. 15. — P. 1322.
126. J. Appl. Phys. — 1967. — Vol. 38. — P. 4090.
127. IEEE J. QE. — 1968. — Vol. 4. — P. 515.
128. Compt. Rend. Acad. Sci. — 1967. — Vol. 265B. — P. 400.
129. Ap. Ph. Lett. — 1971. — Vol. 18. — P. 347.
130. J. Appl. Phys. — 1973. — Vol. 44. — P. 238.
131. Appl. Opt. — 1968. — Vol. 7. — P. 1997.
132. IEEE J. QE. — 1973. — Vol. 9. — P. 403.
133. Квант. эл. — 1972. — № 2 (8). — С. 105.
134. ЖОСА. — 1976. — Vol. 66. — P. 72.
135. Ap. Ph. Lett. — 1978. — Vol. 32. — P. 476.
136. Appl. Opt. — 1976. — Vol. 15. — P. 3131.
137. Ap. Ph. Lett. — 1975. — Vol. 26. — P. 714.
138. IEEE J. QE. — 1976. — Vol. 12. — P. 303.
139. Opt. Comm. — 1976. — Vol. 19. — P. 116.
140. ЖПС. — 1967. — Т. 7. — С. 621.
141. Appl. Opt. — 1978. — Vol. 17. — P. 981.
142. Opt. Comm. — 1976. — Vol. 19. — P. 332.
143. Изв. АН СССР физ. — 1983. — Т. 47. — С. 1619.
144. Ap. Ph. Lett. — 1976. — Vol. 29. — P. 562.
145. Ap. Ph. Lett. — 1970. — Vol. 17. — P. 292.
146. Opt. Comm. — 1973. — Vol. 7. — P. 181.
147. Opto-elect. — 1973. — Vol. 5. — P. 256.
148. Opt. Comm. — 1973. — Vol. 8. — P. 82.
149. Opt. Quant. El. — 1976. — Vol. 8. — P. 261.
150. Appl. Phys. — 1977. — Vol. 14. — P. 403.
151. IEEE J. QE. — 1983. — Vol. 19. — P. 893.
152. IEEE J. QE. — 1974. — Vol. 10. — P. 247.
153. Opt. Lett. — 1984. — Vol. 9. — P. 76.
154. J. Appl. Phys. — 1976. — Vol. 47. — P. 4980.
155. Квант. эл. — 1985. — Т. 12. — С. 1333.
156. Appl. Opt. — 1987. — Vol. 26. — P. 2390.
157. Квант. эл. — 1988. — Т. 15. — С. 1703.
158. Laser Foc. — 1978. — Vol. 14, N 7. — P. 18.

159. JOSA. — 1986. — Vol. 3B. — P. 683.
160. IEEE J. QE. — 1987. — Vol. 23. — P. 335.
161. Кристалл. — 1986. — Т. 31. — С. 1145.
162. Laser Foc. — 1985. — Vol. 21. N 10. — P. 110.
163. Phys. Rev. — 1970. — Vol. B2. — P. 2709.
164. Ap. Ph. Lett. — 1967. — Vol. 11. — P. 269.
165. IEEE J. QE. — 1974. — Vol. 10. — P. 263.
166. Proc. Symp. Damage in Laser Materials, Colorado. — 1971. — P. 98.
167. IEEE J. QE. — 1975. — Vol. 11. — P. 575.
168. IEEE J. QE. — 1976. — Vol. 12. — P. 254.
169. J. Appl. Phys. — 1968. — Vol. 39. — P. 3798.
170. Opto-elect. — 1972. — Vol. 4. — P. 335.
171. Ap. Ph. Lett. — 1968. — Vol. 12. — P. 186.
172. Письма ЖЭТФ. — 1971. — Т. 13. — С. 440.
173. Jap. J. Ap. Ph. — 1974. — Vol. 13. — P. 1362.
174. Appl. Opt. — 1985. — Vol. 24. — P. 1299.
175. Jap. J. Ap. Ph. — 1973. — Vol. 12. — P. 1257.
176. Квант. эл. — 1981. — Т. 8. — С. 715.
177. IEEE J. QE. — 1982. — Vol. 18. — P. 451.
178. Opt. Comm. — 1983. — Vol. 48. — P. 215.
179. Ferroelect. — 1970. — Vol. 1. — P. 141.
180. IEEE J. QE. — 1979. — Vol. 15. — P. 410.
181. IEEE J. QE. — 1979. — Vol. 15. — P. 1176.
182. IEEE J. QE. — 1985. — Vol. 21. — P. 1600.
183. Ph. St. Sol. — 1977. — Vol. A42. — P. K119.
184. Ap. Ph. Lett. — 1984. — Vol. 44. — P. 25.
185. J. Mol. Str. — 1978. — Vol. 47. — P. 393.
186. Opt. Comm. — 1979. — Vol. 29. — P. 243.
187. IEEE J. QE. — 1980. — Vol. 16. — P. 810.
188. IEEE J. QE. — 1982. — Vol. 18. — P. 410.
189. IEEE J. QE. — 1984. — Vol. 20. — P. 334.
190. J. Chem. Phys. — 1981. — Vol. 74. — P. 4800.
191. IEEE J. QE. — 1985. — Vol. 21. — P. 1286.
192. J. Appl. Phys. — 1977. — Vol. 48. — P. 2699.
193. J. Appl. Phys. — 1979. — Vol. 50. — P. 2523.
194. Ap. Ph. Lett. — 1984. — Vol. 45. — P. 333.
195. IEEE J. QE. — 1980. — Vol. 16. — P. 1288.
196. Опт. и сп. — 1975. — Т. 39. — С. 713.
197. Рад. и эл. — 1974. — Т. 19. — С. 1313.
198. Opt. Comm. — 1982. — Vol. 43. — P. 157.
199. Опт. и сп. — 1975. — Т. 38. — С. 779.
200. Ap. Ph. Lett. — 1987. — Vol. 50. — P. 486.
201. Opt. Comm. — 1975. — Vol. 15. — P. 10.
202. IEEE J. QE. — 1976. — Vol. 12. — P. 203.
203. Квант. эл. — 1978. — Т. 5. — С. 664.
204. Opt. Eng. — 1978. — Vol. 17. — P. 120.
205. IEEE J. QE. — 1974. — Vol. 10. — P. 463.
206. IEEE J. QE. — 1976. — Vol. 12. — P. 148.
207. Квант. эл. — 1973. — № 2 (14). — С. 64.
208. Квант. эл. — 1975. — Т. 2. — С. 420.
209. Laser Foc. — 1978. — Vol. 14. — N 7. — P. 18.
210. Opt. Lett. — 1983. — Vol. 8. — P. 554.
211. Ap. Ph. Lett. — 1977. — Vol. 31. — P. 187.
212. Квант. эл. — 1977. — Т. 4. — С. 214.
213. Квант. эл. — 1981. — Т. 8. — С. 906.
214. Квант. эл. — 1982. — Т. 9. — С. 2093.
215. Opt. Comm. — 1980. — Vol. 34. — P. 245.
216. Квант. эл. — 1972. — № 2 (8). — С. 111.
217. J. Appl. Phys. — 1968. — Vol. 39. — P. 4030.
218. Ap. Ph. Lett. — 1968. — Vol. 12. — P. 306.

219. *Ap. Ph. Lett.* — 1968. — Vol. 12. — P. 308.
220. *ТИИЭР.* — 1970. — Т. 58. — С. 27.
221. *IEEE J. QE.* — 1974. — Vol. 10. — P. 253.
222. *Изв. АН СССР физ.* — 1977. — Т. 41. — С. 548.
223. *Опт. и сп.* — 1979. — Т. 46. — С. 376.
224. *Ph. Rev. Lett.* — 1972. — Vol. 29. — P. 985.
225. *Квант. эл.* — 1985. — Т. 12. — С. 2143.
226. *Jap. J. Ap. Ph.* — 1971. — Vol. 10. — P. 808.
227. *Письма ЖТФ.* — 1986. — Т. 12. — С. 1222.
228. *Квант. эл.* — 1977. — Т. 4. — С. 1152.
229. *Ap. Ph. Lett.* — 1976. — Vol. 29. — P. 32.
230. *IEEE J. QE.* — 1985. — Vol. 21. — P. 1636.
231. *Opt. Comm.* — 1975. — Vol. 13. — P. 361.
232. *Письма ЖТФ.* — 1980. — Т. 6. — С. 277.
233. *Письма ЖЭТФ.* — 1969. — Т. 10. — С. 244.
234. *IEEE J. QE.* — 1978. — Vol. 14. — P. 527.
235. *IEEE J. QE.* — 1979. — Vol. 15. — P. 204.
236. *IEEE J. QE.* — 1976. — Vol. 12. — P. 721.
237. *Ap. Ph. Lett.* — 1974. — Vol. 24. — P. 371.
238. *Opt. Comm.* — 1982. — Vol. 41. — P. 434.
239. *Квант. эл.* — 1972. — № 5 (11). — С. 117.
240. *Квант. эл.* — 1981. — Т. 8. — С. 408.
241. *Тез. Всес. конф. по КиНО.* — 1985. — № 1. — С. 340.
242. *Квант. эл.* — 1983. — Т. 10. — С. 1603.
243. *Квант. эл.* — 1981. — Т. 8. — С. 2259.
244. *IEEE J. QE.* — 1976. — Vol. 12. — P. 443.
245. *Квант. эл.* — 1983. — Т. 10. — С. 1305.
246. *Appl. Opt.* — 1980. — Vol. 19. — P. 1022.
247. *Квант. эл.* — 1982. — Т. 9. — С. 1131.
248. *Appl. Opt.* — 1985. — Vol. 24. — P. 3740.
249. *Opt. Comm.* — 1980. — Vol. 34. — P. 474.
250. *IEEE J. QE.* — 1981. — Vol. 17. — P. 1771.
251. *Appl. Opt.* — 1983. — Vol. 22. — P. 2739.
252. *IEEE J. QE.* — 1987. — Vol. 23. — P. 1361.
253. *Opt. Comm.* — 1978. — Vol. 25. — P. 125.
254. *IEEE J. QE.* — 1976. — Vol. 12. — P. 436.
255. *Ap. Ph. Lett.* — 1979. — Vol. 35. — P. 461.
256. *Opt. Comm.* — 1980. — Vol. 35. — P. 435.
257. *Квант. эл.* — 1976. — Т. 3. — С. 1122.
258. *Письма ЖЭТФ.* — 1972. — Т. 15. — С. 26.
259. *Spectr. Lett.* — 1968. — Vol. 1. — P. 425.
260. *Opt. Comm.* — 1977. — Vol. 20. — P. 347.
261. *Ap. Ph. Lett.* — 1971. — Vol. 19. — P. 172.
262. *J. Appl. Phys.* — 1971. — Vol. 42. — P. 5171.
263. *Opt. Comm.* — 1971. — Vol. 4. — P. 316.
264. *IEEE J. QE.* — 1972. — Vol. 18. — P. 850.
265. *J. Appl. Phys.* — 1980. — Vol. 51. — P. 3559.
266. *Opt. Comm.* — 1980. — Vol. 35. — P. 283.
267. *Opt. Comm.* — 1983. — Vol. 45. — P. 201.
268. *J. Appl. Phys.* — 1975. — Vol. 46. — P. 2721.
269. *Проспект Spectra-Physics.* — 1984. — Ser. 380.
270. *Opt. Comm.* — 1980. — Vol. 35. — P. 259.
271. *Opt. Comm.* — 1984. — Vol. 50. — P. 199.
272. *IEEE J. QE.* — 1977. — Vol. 13. — P. 544.
273. *Appl. Phys.* — 1976. — Vol. 11. — P. 97.
274. *Opt. Lett.* — 1986. — Vol. 11. — P. 797.
275. *Opt. Lett.* — 1983. — Vol. 8. — P. 259.
276. *Opt. Comm.* — 1984. — Vol. 50. — P. 127.
277. *Ap. Ph. Lett.* — 1968. — Vol. 13. — P. 395.
278. *Opt. Comm.* — 1980. — Vol. 33. — P. 221.

279. IEEE J. QE. — 1967. — Vol. 3. — P. 164.
280. IEEE J. QE. — 1973. — Vol. 9. — P. 859.
281. Opt. Comm. — 1982. — Vol. 43. — P. 437.
282. Opt. Quant. El. — 1983. — Vol. 15. — P. 187.
283. Опт. и сп. — 1974. — Т. 36. — С. 768.
284. Квант. эл. — 1987. — Т. 14. — С. 782.
285. Opt. Comm. — 1980. — Vol. 33. — P. 321.
286. Opt. Comm. — 1983. — Vol. 47. — P. 412.
287. IEEE J. QE. — 1981. — Vol. 17. — P. 1809.
288. Квант. эл. — 1975. — Т. 2. — С. 609.
289. Opt. Comm. — 1973. — Vol. 7. — P. 225.
290. Ap. Ph. Lett. — 1985. — Vol. 47. — P. 786.
291. Квант. эл. — 1972. — № 2 (8). — С. 105.
292. IEEE J. QE. — 1968. — Vol. 4. — P. 395.
293. Тез. Всес. конф. по КиНО. — 1975.
294. Appl. Phys. — 1981. — Vol. 24. — P. 21.
295. Opt. Lett. — 1979. — Vol. 4. — P. 55.
296. Квант. эл. — 1980. — Т. 7. — С. 1700.
297. Квант. эл. — 1987. — Т. 14. — С. 2249.
298. IEEE J. QE. — 1971. — Vol. 7. — P. 248.
299. Opt. Comm. — 1975. — Vol. 15. — P. 26.
300. Ap. Ph. Lett. — 1976. — Vol. 29. — P. 176.
301. Opt. Comm. — 1976. — Vol. 16. — P. 21.
302. Opt. Lett. — 1977. — Vol. 1. — P. 58.
303. Appl. Opt. — 1978. — Vol. 17. — P. 1313.
304. Квант. эл. — 1979. — Т. 6. — С. 2267.
305. Квант. эл. — 1979. — Т. 6. — С. 2478.
306. Ap. Ph. Lett. — 1983. — Vol. 42. — P. 489.
307. IEEE J. QE. — 1985. — Vol. 21. — P. 193.
308. Квант. эл. — 1983. — Т. 10. — С. 625.
309. Opt. Comm. — 1981. — Vol. 37. — P. 149.
310. Appl. Opt. — 1982. — Vol. 21. — P. 3415.
311. Opt. Comm. — 1983. — Vol. 47. — P. 157.
312. Opt. Comm. — 1979. — Vol. 29. — P. 100.
313. Appl. Opt. — 1977. — Vol. 16. — P. 2356.
314. Ap. Ph. Lett. — 1977. — Vol. 30. — P. 583.
315. Appl. Opt. — 1978. — Vol. 17. — P. 2270.
316. Laser Foc. — 1978. — Vol. 14. — N 5. — P. 72.
317. Opt. Lett. — 1983. — Vol. 8. — P. 73.
318. Изв. АН Арм. ССР физ. — 1985. — Т. 20. — С. 39.
319. CLEO. — 1986. — P. 86.
320. Ap. Ph. Lett. — 1973. — Vol. 23. — P. 273.
321. Письма ЖЭТФ. — 1972. — Т. 16. — С. 475.
322. Nature. — 1974. — Vol. 249. — P. 638.
323. Exp. Tech. Ph. — 1975. — Vol. 23. — P. 495.
324. Exp. Tech. Ph. — 1975. — Vol. 23. — P. 379.
325. Ap. Ph. Lett. — 1980. — Vol. 36. — P. 503.
326. Ap. Ph. Lett. — 1971. — Vol. 19. — P. 36.
327. Appl. Opt. — 1976. — Vol. 15. — P. 961.
328. JOSA. — 1974. — Vol. 64. — P. 1683.
329. J. Appl. Phys. — 1967. — Vol. 38. — P. 519.
330. Квант. эл. — 1975. — Т. 2. — С. 1811.
331. Квант. эл. — 1975. — Т. 2. — С. 812.
332. Ap. Ph. Lett. — 1968. — Vol. 12. — P. 68.
333. Ap. Ph. Lett. — 1971. — Vol. 19. — P. 68.
334. IEEE J. QE. — 1967. — Vol. 3. — P. 642.
335. Opt. Comm. — 1973. — Vol. 7. — P. 107.
336. Ap. Ph. Lett. — 1969. — Vol. 14. — P. 29.
337. Ap. Ph. Lett. — 1987. — Vol. 50. — P. 554.
338. Opt. Comm. — 1971. — Vol. 3. — P. 277.
339. Квант. эл. — 1973. — № 5 (17). — С. 95.

340. *Ap. Ph. Lett.* — 1968. — Vol. 12. — P. 222.
341. *Квант. эл.* — 1971. — № 1. — С. 151.
342. *Квант. эл.* — 1975. — Т. 2. — С. 2524.
343. *Квант. эл.* — 1975. — Т. 2. — С. 2269.
344. *Ap. Ph. Lett.* — 1973. — Vol. 23. — P. 468.
345. *Квант. эл.* — 1975. — Т. 2. — С. 272.
346. *ТИИЭР.* — 1969. — Т. 57. — С. 157.
347. *Ap. Ph. Lett.* — 1971. — Vol. 19. — P. 68.
348. *Ap. Ph. Lett.* — 1972. — Vol. 21. — P. 382.
349. *Opto-elect.* — 1974. — Vol. 6. — P. 189.
350. *Opt. Lett.* — 1979. — Vol. 4. — P. 45.
351. *Квант. эл.* — 1981. — Т. 8. — С. 1361.
352. *Phys. Lett.* — 1973. — Vol. 45A. — P. 377.
353. *Квант. эл.* — 1975. — Т. 2. — С. 1090.
354. *Квант. эл.* — 1978. — Т. 5. — С. 2031.
355. *Ap. Ph. Lett.* — 1971. — Vol. 19. — P. 527.
356. *Appl. Opt.* — 1978. — Vol. 17. — P. 3702.
357. *Ap. Ph. Lett.* — 1977. — Vol. 30. — P. 199.
358. *Opt. Comm.* — 1972. — Vol. 5. — P. 209.
359. *Opt. Comm.* — 1974. — Vol. 12. — P. 129.
360. *Appl. Opt.* — 1975. — Vol. 14. — P. 653.
361. *Appl. Phys.* — 1976. — Vol. 11. — P. 363.
362. *Квант. эл.* — 1977. — Т. 4. — С. 1794.
363. *Opt. Comm.* — 1978. — Vol. 24. — P. 190.
364. *Квант. эл.* — 1982. — Т. 9. — С. 378.
365. *Opt. Comm.* — 1983. — Vol. 47. — P. 62.
366. *Opt. Comm.* — 1984. — Vol. 49. — P. 205.
367. *Ap. Ph. Lett.* — 1971. — Vol. 18. — P. 58.
368. *Opt. Quant. El.* — 1984. — Vol. 16. — P. 87.
369. *Opt. Quant. El.* — 1985. — Vol. 17. — P. 169.
370. *IEEE J. QE.* — 1980. — Vol. 16. — P. 1017.
371. *Opt. Comm.* — 1977. — Vol. 20. — P. 101.
372. *Письма ЖТФ.* — 1980. — Т. 6. — С. 694.
373. *Ap. Ph. Lett.* — 1976. — Vol. 29. — P. 705.
374. *IEEE J. QE.* — 1984. — Vol. 20. — P. 698.
375. *Opt. Comm.* — 1985. — Vol. 52. — P. 355.
376. *Opt. Comm.* — 1978. — Vol. 25. — P. 256.
377. *Opt. Comm.* — 1975. — Vol. 15. — P. 113.
378. *Ap. Ph. Lett.* — 1975. — Vol. 27. — P. 600.
379. *Appl. Phys.* — 1986. — Vol. 40B. — P. 107.
380. *Квант. эл.* — 1985. — Т. 12. — С. 437.
381. *Phys. Rev.* — 1969. — Vol. 180. — P. 363.
382. *Ph. Rev. Lett.* — 1965. — Vol. 15. — P. 999.
383. *Phys. Lett.* — 1968. — Vol. 26A. — P. 281.
384. *Jap. J. Ap. Ph.* — 1971. — Vol. 10. — P. 907.
385. *Jap. J. Ap. Ph.* — 1972. — Vol. 11. — P. 268.
386. *Jap. J. Ap. Ph.* — 1973. — Vol. 12. — P. 90.
387. *Письма ЖТФ.* — 1976. — Т. 2. — С. 1144.
388. *Письма ЖТФ.* — 1979. — Т. 5. — С. 233.
389. *Opt. Comm.* — 1980. — Vol. 35. — P. 147.
390. *Квант. эл.* — 1978. — Т. 5. — С. 679.
391. *Квант. эл.* — 1978. — Т. 5. — С. 2348.
392. *Письма ЖТФ.* — 1978. — Т. 4. — С. 765.
393. *Квант. эл.* — 1979. — Т. 6. — С. 1735.
394. *Квант. эл.* — 1983. — Т. 10. — С. 2318.
395. *Письма ЖТФ.* — 1986. — Т. 12. — С. 186.
396. *Письма ЖТФ.* — 1987. — Т. 13. — С. 305.
397. *IEEE J. QE.* — 1979. — Vol. 15. — P. 201.
398. *Письма ЖТФ.* — 1975. — Т. 1. — С. 847.
399. *IEEE J. QE.* — 1976. — Vol. 12. — P. 143.

400. Appl. Phys. — 1983. — Vol. 32B. — P. 39.
401. Квант. эл. — 1987. — Т. 14. — С. 2044.
402. Ar. Ph. Lett. — 1970. — Vol. 17. — P. 488.
403. Ar. Ph. Lett. — 1973. — Vol. 22. — P. 75.
404. Квант. эл. — 1979. — Т. 6. — С. 1237.
405. Квант. эл. — 1984. — Т. 11. — С. 1847.
406. Opt. Comm. — 1976. — Vol. 19. — P. 28.
407. Квант. эл. — 1977. — Т. 4. — С. 2225.
408. Квант. эл. — 1977. — Т. 4. — С. 1215.
409. Лит. физ. сб. — 1978. — Т. 18. — С. 93.
410. Письма ЖТФ. — 1978. — Т. 4. — С. 256.
411. Ar. Ph. Lett. — 1974. — Vol. 25. — P. 520.
412. Opt. Comm. — 1978. — Vol. 24. — P. 237.
413. Opt. Comm. — 1979. — Vol. 28. — P. 142.
414. Квант. эл. — 1977. — Т. 4. — С. 2469.
415. Appl. Opt. — 1979. — Vol. 18. — P. 3543.
416. Opt. Comm. — 1978. — Vol. 25. — P. 273.
417. Квант. эл. — 1986. — Т. 13. — С. 1281.
418. Письма ЖТФ. — 1980. — Т. 6. — С. 964.
419. Квант. эл. — 1983. — Т. 10. — С. 1525.
420. Квант. эл. — 1980. — Т. 7. — С. 2204.
421. JOSA. — 1985. — Vol. B2. — P. 691.
422. CLEO. — 1986. — P. 30.
423. Opt. Comm. — 1980. — Vol. 34. — P. 483.
424. Proc. UPS. — 1980. — Vol. 1. — P. 14.
425. Ar. Ph. Lett. — 1986. — Vol. 49. — P. 608.
426. Изв. АН СССР физ. — 1985. — Т. 49. — С. 569.
427. Opt. Comm. — 1973. — Vol. 9. — P. 234.
428. Ar. Ph. Lett. — 1970. — Vol. 17. — P. 233.
429. Ar. Ph. Lett. — 1972. — Vol. 20. — P. 34.
430. Ar. Ph. Lett. — 1973. — Vol. 22. — P. 440.
431. Квант. эл. — 1982. — Т. 9. — С. 2534.
432. Письма ЖЭТФ. — 1983. — Т. 37. — С. 597.
433. Opt. Comm. — 1985. — Vol. 55. — P. 439.
434. Opt. Lett. — 1979. — Vol. 4. — P. 357.
435. Opt. Lett. — 1985. — Vol. 10. — P. 624.
436. CLEO. — 1986. — P. 84.
437. J. Appl. Phys. — 1987. — Vol. 62. — P. 1968.
438. Ar. Ph. Lett. — 1988. — Vol. 53. — P. 175.
439. CLEO. — 1986. — P. 322.
440. Appl. Phys. — 1988. — Vol. 45B. — P. 225.
441. IEEE J. QE. — 1988. — Vol. 24. — P. 3.
442. Appl. Opt. — 1988. — Vol. 27. — P. 2650.
443. Appl. Opt. — 1988. — Vol. 27. — P. 3314.
444. Тез. Всес. конф. по КиНО. — 1985. — Ч. 1. — С. 78.
445. Opt. Lett. — 1988. — Vol. 13. — P. 221.
446. Ar. Ph. Lett. — 1988. — Vol. 53. — P. 1170.
447. Ar. Ph. Lett. — 1988. — Vol. 52. — P. 2211.
448. Chinese Phys-Lasers. — 1986. — Vol. 13. — P. 892.
449. Квант. эл. — 1987. — Т. 14. — С. 2137.
450. Appl. Phys. — 1988. — Vol. 45B. — P. 245.
451. Appl. Phys. — 1988. — Vol. 45B. — P. 259.
452. Opt. Comm. — 1988. — Vol. 67. — P. 316.
453. Opt. Lett. — 1988. — Vol. 13. — P. 643.
454. Appl. Opt. — 1988. — Vol. 27. — P. 2634.
455. Ar. Ph. Lett. — 1984. — Vol. 44. — P. 847.
456. Ar. Ph. Lett. — 1984. — Vol. 45. — P. 805.
457. Квант. эл. — 1988. — Т. 15. — С. 1705.
458. Ar. Ph. Lett. — 1988. — Vol. 52. — P. 1374.
459. Ar. Ph. Lett. — 1988. — Vol. 53. — P. 2587.
460. IEEE J. QE. — 1981. — Vol. 17. — P. 1781.

Ap. Ph. Lett	— Applied Physics Letters
Br. J. Ap. Ph	— British J. Applied Physics
CLEO	— Abstracts CLEO
Exp. Tech. Ph.	— Experimental and Technical Physics
IEEE J. QE	— IEEE J. Quantum Electronics
Jap. J. Ap. Ph.	— Japanese J. Applied Physics
J. Mol. Str.	— J. Molecular Structure
JOSA	— J. Optical Society America
Laser Foc.	— Laser Focus
Opt. Quant. El.	— Optical and Quantum Electronics
Opt. Eng.	— Optical Engineering
Opto-elect.	— Opto-electronics
Ph. Rev. Lett	— Physical Review Letters
Ph. St. Sol.	— Physica Status Solidi
Proc. UPS	— Proceed. Internat Symp. «Ultrafast Phenomena in Spectroscopy»
Spect. Lett	— Spectroscopy Letters

Указатель кристаллов

KH ₂ PO ₄ (KDP)	43	HgS (киноварь)	.7
KD ₂ PO ₄ (DKDP)	52	Se	.73
NH ₄ H ₂ PO ₄ (ADP)	53	Te	.73
ND ₄ D ₂ PO ₄ (DADP)	54	SiO ₂ (кварц)	.74
CsH ₂ AsO ₄ (CDA)	55	KB ₅ O ₈ ·4H ₂ O(KB5)	.76
CsD ₂ AsO ₄ (DCDA)	55	KB ₅ O ₈ ·4D ₂ O(DKB5)	.77
KH ₂ AsO ₄ (KDA)	56	LiCOOH·H ₂ O (формиат лития, LFM)	.78
RbH ₂ AsO ₄ (RDA)	57	Ba(COOH) ₂ (формиат бария)	.79
RbH ₂ PO ₄ (RDP)	57	NaCOOH (формиат натрия)	.80
LiSO ₃	58	KTiOPO ₄ (КТР)	.81
LiNbO ₃	60	Ba ₂ NaNb ₅ O ₁₅ (банан)	.83
K ₃ Li ₂ Nb ₅ O ₁₅	62	α-HJO ₃ (иодноватая кислота)	.84
BeSO ₄ ·4H ₂ O	62	KNbO ₃	.85
β-BaB ₂ O ₄ (BBO)	63	MgBaF ₄	.86
Ag ₃ AsS ₃ (прустит)	64	CO(NH ₂) ₂ (мочевина)	.87
Ag ₃ SbS ₃ (пираргирит)	65	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁ (сахароза)	.88
AgGaS ₂ (тиогаллат серебра)	66	РОМ	.89
HgGa ₂ S ₄ (тиогаллат ртути)	67	МАР	.90
AgGaSe ₂	68	MNA	.91
ZnGeP ₂	68	mNA	.92
CdGeAs ₂	69	KM	.93
GaSe (селенид галлия)	70	MDV	.94
CdSe (селенид кадмия)	71	COANP	.95

Список сокращений названий журналов

Изв. АН Арм.ССР физ.	— Известия АН Арм.ССР, физика
Изв. АН СССР физ.	— Известия АН СССР, серия физическая
Квант. эл.	— Квантовая электроника
Кристалл.	— Кристаллография
Лит. физ. сб.	— Литовский физический сборник
Нел. опт.	— Сборник «Нелинейная оптика» (Новосибирск)
Опт. и сп.	— Оптика и спектроскопия
Опт. мех. пр.	— Оптико-механическая промышленность
ЖПС.	— Журнал прикладной спектроскопии
Рад. и эл.	— Радиотехника и электроника
Тез. Всес. конф. по КиНО	— Тезисы Всесоюзной конференции по когерентной и нелинейной оптике

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Введение в оптику нелинейных кристаллов	4
1.1. Трехчастотные (трехволновые) взаимодействия	4
1.2. Фазовый синхронизм	5
1.3. Оптика одноосных кристаллов	6
1.4. Типы синхронизма в одноосных кристаллах	9
1.5. Расчет углов синхронизма в одноосных кристаллах	11
1.6. Отражение и преломление световых волн на поверхности одноосного кристалла	12
1.7. Оптика двухосных кристаллов. Расчет углов синхронизма	13
1.8. Симметрия кристаллов и эффективные нелинейности	19
1.9. Расчет эффективности нелинейных преобразователей частоты	21
1.10. Волновая расстройка. Ширина синхронизма	27
1.11. Примеры расчета эффективности нелинейных преобразователей частоты	38
1.12. Дополнительные замечания	46
2. Нелинейно-оптические свойства кристаллов	47
2.1. Одноосные кристаллы	47
2.2. Двухосные кристаллы	76
2.3. Органические кристаллы	87
3. Применения нелинейных кристаллов	95
3.1. Генерация гармоник неодимовых лазеров	95
3.2. Генерация гармоник мощных широкоапертурных неодимовых лазеров	108
3.3. Генерация гармоник других лазеров	113
3.4. Генерация суммарной частоты	123
3.5. Генерация разностной частоты	132
3.6. Параметрическая генерация света	138
3.7. Генерация вынужденного комбинационного рассеяния и пикосекундного континуума в кристаллах	146
Список литературы	148
Библиографические ссылки	150
Указатель кристаллов	158
Список сокращений названий журналов	158



06000022246

Справочное издание

**ГУРЗАДЯН ГАГИК ГРИГОРЬЕВИЧ, ДМИТРИЕВ ВАЛЕНТИН ГЕОРГИЕВИЧ,
НИКОГОСЯН ДАВИД НИКОЛАЕВИЧ**

**НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ КРИСТАЛЛЫ.
СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ В КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ**

Справочник

Заведующий редакцией **Ю. Н. Рысев**
Редактор **Н. К. Калинина**
Обложка художника **Н. А. Пашуро**
Художественный редактор **Н. С. Шеин**
Технический редактор **Т. Г. Родина**
Корректор **Г. Г. Казакова**

ИБ № 1969

Сдано в набор 23.08.90	Бумага тип. № 2	Подписано в печать 24.06.91
Формат 60×90 ¹ / ₁₆	Усл. печ. л. 10,0	Усл. кр.-отт. 10,25
Печать высокая	Изд. № 22660	Зак. № 76
Тираж 2000 экз.	Издательство «Радио и связь». 101000 Москва, Почтамт, а/я 693	Цена 2 р. 20 к.

Типография издательства «Радио и связь». 101000 Москва, ул. Кирова, д. 40

2 р. 20 к.

„РАДИО И СВЯЗЬ”