

И. 83-56

11 коп.

Индекс 70067

НОВОЕ
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

ЗНАНИЕ

2/1978

СЕРИЯ
ТЕХНИКА

Е.А. Авсиевич
ЛАЗЕРЫ
В ПРОМЫШЛЕННОЙ
ТЕХНОЛОГИИ



СОДЕРЖАНИЕ

Основы лазерной технологии	3
Лазерная размерная обработка	15
Сварка	34
Термообработка	39
Лазер и элементы интегральных схем	40
Получение тонких пленок	44
Лазерные устройства контроля	46
Еще кое-что о применении лазеров	55
Литература	62

Авсиевич Е. А.

А 22 Лазеры в промышленной технологии. М., «Знание», 1978.

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Техника», 2. Издается ежемесячно с 1961 г.)

Раскрой одежды и приборы для стыковки космических кораблей, запоминающие устройства ЭВМ и каналы связи, размерная обработка и сварка — бесконечно разнообразие областей применения оптических квантовых генераторов в народном хозяйстве. О них и рассказывается в брошюре, рассчитанной на широкий круг читателей.

30407

6Ф4

© Издательство «Знание», 1978 г.

Основы лазерной технологии

На торжественном заседании в Кремле, посвященном 60-летию Великой Октябрьской социалистической революции, отмечалось, что никогда еще наша страна не располагала таким огромным экономическим и научно-техническим потенциалом. Все более действенным фактором развития народного хозяйства становится научно-технический прогресс. Опережающими темпами развиваются новейшие отрасли производства и научно-го знания.

Примером прочного союза науки и производства, плодотворного сотрудничества различных дисциплин (электроники, оптики, химии, физики и многих других) можно назвать квантовую электронику. Благодаря ее успехам мы имеем сегодня такой уникальный в технологическом плане инструмент, как оптический квантовый генератор (ОКГ) — лазер.

Достижения квантовой электроники позволяют в настоящее время говорить о широкой практической реализации колоссальных возможностей лазеров, о лазерной технике и технологии, о их роли в повышении производительности труда и эффективности производства.

На сегодняшний день разработано и внедрено в различные отрасли промышленности универсальное и специализированное лазерное технологическое оборудование более 20 типов. Особенно показателен опыт использования лазерной технологии в электронной промышленности: лазерными установками оснащены производственные участки по сборке катодных узлов электровакуумных приборов, подгонке резисторов гибридных интегральных схем, герметизации корпусов некоторых типов интегральных схем, сварке деталей контактных узлов микрореле и др. Часовая промышленность полностью перешла на обработку рубиновых камней для часов

только лазерным лучом. Высокая эффективность использования ОКГ в авиационном приборостроении, в судостроительной промышленности, в строительстве — при разметке и прокладке дорог, шахт, тоннелей и т. д. Широкое внедрение уже разработанных установок и технологических процессов, активные исследования в этой области будут способствовать успешному выполнению планов десятой пятилетки, дальнейшему ускорению научно-технического прогресса в нашей стране.

Лазеры «сжимают» световые потоки во времени, пространстве и по спектру, а следовательно, концентрируют энергию. Ни один другой известный в природе источник света не обладает подобными свойствами.

Высокая монохроматичность, когерентность лазерного излучения позволяют фокусировать луч в пятно диаметром до нескольких микрометров. В зоне действия луча сосредоточивается поток колоссальной плотности — до 10^{12} — 10^{20} Вт/см². Чтобы получить такую же плотность потока за счет солнечной энергии, потребовалось бы сконцентрировать ее на площади в несколько тысяч квадратных метров.

Луч лазера весьма удобен как обрабатывающий инструмент. Уже при плотности потока 10^6 — 10^8 Вт/см² в материале возникает термический эффект. Испаряется и плавится практически любой известный тугоплавкий и сверхтвердый непрозрачный материал.

Обработку лучом лазера можно вести в любой прозрачной среде — твердой, жидкой, газообразной, в вакууме, а также в труднодоступных местах. Можно воздействовать на элементы электрических цепей даже под напряжением.

Достоинства лазерной обработки многообразны. Во-первых, на изделие не воздействуют механически, следовательно, оно не деформируется. Во-вторых, процесс высокоточен и при этом его отличает быстрота настройки. В-третьих, зона термического влияния концентрирована и структурные изменения обрабатываемого материала незначительны и т. д.

Лазерный луч удобен для фигурной резки материалов. Он способен прошивать микроотверстия под любым углом к поверхности детали с отношением глубины к диаметру, достигающим десятков и даже сотен, что недоступно механическим способам. Причем в течение ко-

роткого времени можно прошивать сотни идентичных отверстий.

Лазерные технологические установки отличаются высокой производительностью и простотой управления. Специфические особенности лазерной обработки открывают возможности полной автоматизации процесса и контроля с помощью ЭВМ. Это позволяет резко снизить процент брака, повысить точность обработки и т. д.

Сегодня лазерная технология успешно конкурирует с такими известными промышленными методами, как механическая, электронная, электроэрозионная и ультразвуковая обработка. В ряде же случаев лазерный луч не только (и не столько) заменяет механический или термический инструмент, но и вообще единственное средство решения технологической задачи.

Расширение сферы приложения лазерной технологии зависит, в первую очередь, от состояния лазерной техники. Поэтому прежде всего представим себе, что такое оптический квантовый генератор — лазер, откуда берутся уникальные свойства этих приборов.

Лазер представляет собой мощный источник когерентного направленного света. Принцип действия его — высвобождение энергии системы возбужденных атомов из-за индуцированного излучения под воздействием внешнего электромагнитного поля. Любой прибор, по сути, — активная среда, помещенная в резонатор, и генератор накачки, возбуждающий атомы в среде. Оптический резонатор, который реализует положительную обратную связь, — обычно система двух плоских строго параллельных друг другу зеркал (интерферометр Фабри—Перо). Однако зеркало, через которое «выводится» излучение, делается полупрозрачным.

При накачке в активной среде между зеркалами возникает состояние инверсной населенности: количество атомов на верхнем энергетическом уровне превышает количество их на нижнем. Лавинный процесс индуцированного излучения начинается в тот момент, когда хотя бы один возбужденный атом спонтанно излучает фотон в направлении, параллельном оптической оси. Фотон «вынуждает» другой возбужденный атом испустить второй фотон и т. д.

Многokrato отражаясь от зеркал резонатора, фотоны распространяются через активную среду и интенсифицируют развитие процесса. Геометрические разме-

ры резонатора таковы, что световая волна, дважды отразившись от зеркал, сдвигается по фазе на величину, кратную целому периоду. Таким образом, обеспечивается положительная обратная связь.

Если населенность верхнего уровня активной среды превышает некоторую пороговую величину (она зависит от коэффициента отражения полупрозрачного зеркала), то процесс интенсивно нарастает. Затем вследствие индуцированных переходов населенность верхнего уровня понизится до пороговой величины стационарного режима генерации. Световые волны, параллельные оси резонатора, усиливаются и выводятся через полупрозрачное зеркало в виде узкого пучка когерентного света. Высокая направленность излучения обусловлена тем, что в пучке остаются лишь фотоны, не отклонившиеся существенно от оси резонатора при многократном отражении.

Чтобы направленность излучения была высокой (т. е. расходимость светового пучка малой), необходима чрезвычайно высокая параллельность зеркал резонатора. Монохроматичность излучения определяется резонансными свойствами отдельных атомов и молекул, которые избирательно поглощают или излучают свет определенной волны. Ее фаза, частота, поляризация и направление распространения совпадают с характеристиками волны внешнего электромагнитного поля накачки, почему излучение и когерентно.

Теперь рассмотрим устройство и специфические особенности различных лазеров. В настоящее время имеется возможность индуцировать излучение почти во всех веществах, в любом агрегатном состоянии. В первую очередь промышленность заинтересована в твердотельных, газовых и полупроводниковых лазерах.

Твердотельные лазеры. Первым был создан лазер на рубине. Кристалл выращивают искусственно, окраска его бледно-розовая. Накачка световая, с помощью импульсных ламп-вспышек.

В качестве активного вещества в твердотельных лазерах может также использоваться стекло, активированное различными редкоземельными элементами, например неодимом. Из стекла проще изготавливать оптически однородные стержни любых размеров и формы. Выходная энергия в импульсе и КПД у лазеров на стекле выше, чем на рубине.

Индукцированное излучение получено также в алюмоиттриевом гранате и вольфрамите кальция, активированных ионами неодима. Их отличают незначительная энергия накачки и пригодность к работе в непрерывном режиме при комнатной температуре.

Основные элементы твердотельного лазера — оптическая головка, источник питания, блок поджига и синхронизирующее устройство. В оптическую головку входят активный элемент (его помещают между зеркалами резонатора) и источник накачки.

Твердотельные лазеры на рубине и неодимовом стекле работают, как правило, в так называемом режиме свободной генерации однократных или редко повторяющихся импульсов.

Для работы в импульсном режиме с большой частотой повторения, а также в непрерывном режиме наиболее пригоден лазер на алюмоиттриевом гранате (АИТ) с примесью неодима. Его кристаллы отличаются высокой теплопроводностью, большой термической стойкостью и низким порогом возбуждения. Частота повторения импульсов доходит до 50 кГц, а выходная мощность в непрерывном режиме — 300 Вт при сравнительно высоком КПД (до 2,5%). Имеются также сведения о создании лазера на кристалле кальцийфторапатита, активированном неодимом. Этот активный элемент по основным рабочим параметрам значительно превосходит лучшие образцы граната.

В режиме свободной генерации мощность рубинового лазера составляет десятки киловатт. Повысить этот показатель интенсивной световой накачкой невозможно, так как активный элемент может разрушиться. Было найдено весьма интересное решение. Известно, что если на верхний уровень активного вещества перевести не половину, а гораздо большую часть атомов, то индуцированное излучение может «развиться» в течение нескольких наносекунд. Вся энергия вспышки будет сосредоточена в этом кратчайшем временном отрезке. Мощность излучения достигнет десятков и сотен мегаватт. Чтобы генерация не возникала сразу после превышения пороговой инверсной населенности, обратная связь прерывается, после чего пороговая населенность повышается. Все атомы хрома перекачиваются на рабочий уровень, где могут находиться в течение 2 мс. Этого времени достаточно, чтобы вновь включив обратную связь

резонатора, получить мощный импульс излучения. Такой метод генерации назван «режимом модулированной добротности», а излучаемые импульсы — гигантскими. Для управления добротностью резонатора применяют механические, электрооптические и пассивные затворы.

Газовые лазеры, появившиеся почти одновременно с рубиновыми, имеют много разновидностей. Они способны работать в импульсном и непрерывном режимах в широком диапазоне волн — от ультрафиолетового до инфракрасного излучения. В газовых лазерах наиболее отчетливо проявляются характерные свойства лазерного излучения — высокая направленность, монохроматичность и когерентность. В качестве активной среды используются газы и их смеси, а также пары металлов.

Наиболее распространена смесь гелия с неоном. Накачка в лазерах, использующих эту смесь, осуществляется тлеющим разрядом в газоразрядной трубке, который возникает в условиях высокочастотного или постоянного напряжения. Часть атомов гелия ионизируется, образуя плазму, которая возбуждает остальные его атомы, переводя их на метастабильные уровни. Эти уровни близки к уровню неона, поэтому при столкновениях возбужденных атомов гелия с невозбужденными атомами неона последние приобретают энергию и возбуждаются. Атомы гелия возвращаются на основной уровень.

Высокая монохроматичность и направленность излучения, простота в обращении и надежность конструкции обусловили широкое применение гелийнеонового лазера при юстировочных работах, в голографии, для оптической связи и локации, в строительстве и других областях техники (в тех случаях, когда не требуются большие мощности).

Основной недостаток всех газовых лазеров — низкий КПД.

Полупроводниковые лазеры. Инверсную населенность в полупроводниках можно получить прямым электрическим возбуждением, оптической накачкой, электронным возбуждением и инъекцией носителей через электронно-дырочный переход. Наиболее практически интересны инжекционные лазеры, отличающиеся высоким КПД (до 50%). В непрерывном режиме они генерируют мощность 1—2 Вт, в импульсном (ОКГ на арсениде галлия при охлаждении жидким азотом) — до

100 Вт при длительности импульса порядка микросекунд.

Направленность излучения полупроводниковых лазеров хуже, чем у лазеров других типов, так как малы размеры излучающей площадки. Диапазон генерируемых волн — от ультрафиолетовой до инфракрасной областей спектра. Применяются полупроводниковые ОКГ в основном в системах связи и измерительной технике.

В стадии экспериментальных исследований находятся **жидкостные лазеры на неорганических жидкостях и органических красителях**. По энергетическим характеристикам они близки к твердотельным. Эти лазеры обеспечивают узкий спектр излучения и легко перестраиваются по частоте. Вследствие высокой оптической однородности жидкой активной среды угловая расходимость излучения у них меньше, чем у твердотельных, КПД жидкостных лазеров от 20 до 70%.

Итак, мы ознакомились с современными оптическими квантовыми генераторами основных типов. Для технологических целей, как уже говорилось, в основном используются твердотельные и газовые лазеры. Они отличаются достаточной надежностью, простотой конструкции, относительно низкой стоимостью и вместе с тем позволяют решать широкий круг технологических задач. Область применения лазеров определяется энергетическими, пространственно-временными и спектральными характеристиками светового излучения.

Энергетические характеристики. Энергия излучения ОКГ — основная «обрабатывающая» характеристика лазерного луча. В непрерывном режиме работы ОКГ энергетическая характеристика — мощность излучения. В современных лазерах на CO_2 или АИГ величина мощности доходит до десятков тысяч ватт.

Твердотельные ОКГ, работающие в режиме одиночных импульсов, излучают энергию от единиц до тысяч джоулей (для обработки любых материалов достаточной энергии от десятых долей джоуля).

В режиме повторяющихся импульсов излучение ОКГ характеризуется средней энергией, зависящей от частоты повторения импульсов. С помощью современных лазеров при частоте повторения в несколько килогерц и небольших значениях средней энергии можно обрабатывать любые сверхтвердые материалы.

Временные характеристики — длительность излуче-

ния и форма импульса генерации, которая определяет характер распределения во времени световой энергии.

В режиме свободной генерации, характерном для большинства промышленных твердотельных лазеров технологического назначения, излучаемый импульс структурно представляет собой последовательность отдельных пиков (пичков). Длительность пика — от одной до нескольких микросекунд при интервале между ними от 3 до 10 мкс. Общая длительность импульса составляет всего несколько миллисекунд.

Форма импульса в целом имеет вид неравнобокой трапеции: крутой передний фронт, плоская вершина и затянутый задний фронт (спад). Такая форма ухудшает качество обработки из-за неравномерности нагрева в зоне взаимодействия светового луча с материалом. Поэтому применяют дополнительные меры формирования прямоугольных импульсов с коротким задним фронтом.

Пространственные характеристики. Благодаря высокой степени когерентности лазерное излучение имеет весьма высокую направленность. Теоретическая расходимость луча, например, рубинового лазера при диаметре потока излучения 30 мм не превышает 40".

К пространственным свойствам излучения относится также характер распределения энергии в поперечном сечении светового пучка. В каждый момент времени генерации он описывается нормальным законом (кривая Гаусса), т. е. максимум интенсивности излучения находится в центре пучка. Значит, наиболее активная обработка происходит, если излучение фокусируется непосредственно на поверхности изделия.

Спектральные характеристики. Для обработки материалов с различными теплофизическими и оптическими свойствами необходимо выбрать такой тип лазера, длина волны генерации в котором обеспечивает максимум поглощения света в зоне его действия. Так, в связи с тем, что максимальное поглощение у металлов лежит в диапазоне длин волн от 0,3 до 1,3 мкм, целесообразно для обработки применять видимый свет. В то же время керамика, стекло лучше поглощают инфракрасное излучение с длиной волны 10—11 мкм, т. е. нужен ОКГ иного типа.

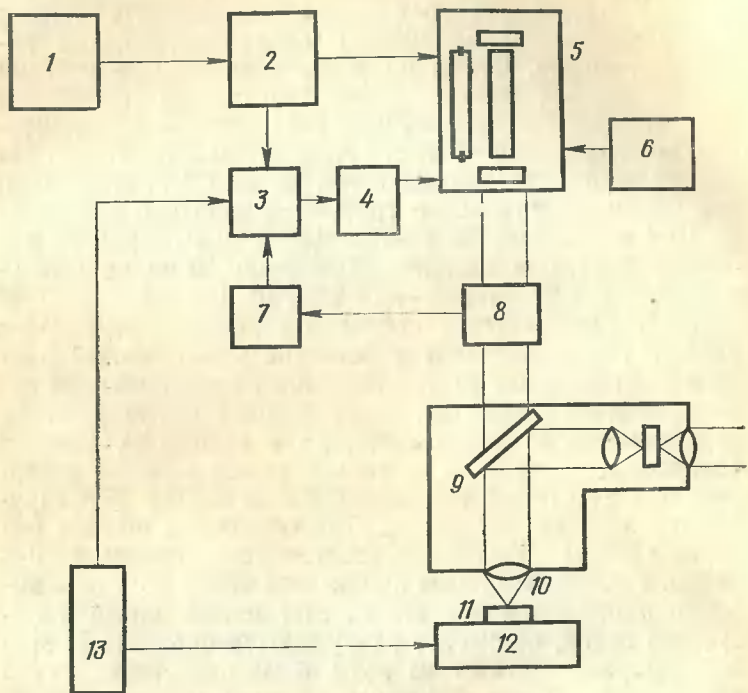
Плотность мощности излучения — функция энергии излучения, длительности светового импульса и площа-

ди фокусного пятна на поверхности обрабатываемой заготовки. Этот параметр отражает взаимосвязь между энергическими, временными и пространственными характеристиками. Чтобы получить оптимальные условия для различных лазерных технологических процессов, надо выдержать определенные соотношения между этими характеристиками, т. е. установить необходимую величину плотности мощности излучения ОКГ. Например, для прошивки отверстий требуются короткие импульсы до 10^{-3} с при энергии 20—50 Дж, а для сварки — наоборот, импульсы длительностью более 10 мс, но с меньшей энергией излучения — от 5 до 10 Дж.

На технологические процессы в значительной мере влияют также **фокусное расстояние управляющей линзы и расположение ее относительно обрабатываемой поверхности.** Как правило, поток энергии фокусируют на обрабатываемую поверхность, но в некоторых случаях (например, когда надо достичь большей глубины отверстия при некотором ухудшении его качества) фокусируют луч в глубь материала. Для обработки обычно выбирают линзы с фокусным расстоянием в пределах 10—40 мм. Короткофокусные линзы позволяют получить высокую плотность мощности за счет малой площади фокусного пятна, но быстро разрушаются продуктами эрозии, выбрасываемыми из зоны взаимодействия луча с материалом. Длиннофокусные по этой причине разрушаются меньше, но добиться необходимой плотности мощности можно только при больших энергетических затратах.

В Советском Союзе первые серийные лазерные технологические установки были выпущены в 1964 г. Это были устройства СУ-1 и К-3, в которых использовался рубиновый лазер. Чтобы выявить их технические возможности и перспективность, провели широкий производственный эксперимент: более 200 таких устройств одновременно задействовали на предприятиях различных отраслей промышленности.

Опыт, накопленный в процессе разработки установок СУ-1 и К-3, и экспериментальная эксплуатация позволили создать еще несколько типов технологических установок с лазером на рубине: К-3М, «Квант-3», УЛ-2М, УЛ-20М. За сравнительно небольшой промежуток времени было выпущено более 800 таких установок.



Типовая схема лазерной технологической установки: 1 — зарядное устройство; 2 — емкостный накопитель; 3 — система управления; 4 — блок поджига; 5 — лазерная головка; 6 — система охлаждения; 7 — система стабилизации энергии излучения; 8 — датчик энергии излучения; 9 — оптическая система; 10 — сфокусированный луч лазера; 11 — обрабатываемая деталь; 12 — координатный стол; 13 — система программного управления

Советские лазерные технологические установки СУ-1, УЛ-2М и УЛ-20М получили мировое признание. Они с успехом экспонировались на выставках в Лейпциге, Монреале, Будапеште, Бухаресте, Риме и Лондоне.

Лазерные технологические установки независимо от назначения строятся в основном по типовой схеме, представленной на рисунке. Принцип работы их прост: лазерное излучение фокусируют на обрабатываемую поверхность; лучом, его параметрами и деталью управляют синхронно, по заданной программе.

Процесс взаимодействия лазерного луча с материа-

лами можно представить в виде четырех последовательных стадий: поглощение светового излучения и передача тепловой энергии веществу; нагрев его до температуры испарения; испарение материала, его разрушение; остывание вещества. Длительность каждой стадии зависит от плотности светового потока и теплофизических свойств материалов.

Современные лазеры способны генерировать световые потоки в широком диапазоне плотности мощности — до 10^{15} — 10^{17} Вт/см² и даже выше. В зависимости от нее лазерное излучение разделяется на потоки малой (менее 10^5 Вт/см²), умеренной (от 10^5 до 10^9 Вт/см²) и высокой плотности (от 10^9 Вт/см²). Выбор зависит от конкретных условий применения лазеров. Для технологических целей в основном используются световые потоки умеренной плотности.

Независимо от плотности потока излучения в начальный период действия лазерного луча часть светового потока отражается от обрабатываемой поверхности, остальная поглощается поверхностным слоем вещества и переходит в тепло. Механизм этот для металлов, диэлектриков и полупроводников различен.

Следует отметить, что высокие скорости нагрева лазерным излучением и большие градиенты температуры могут стать причиной побочных явлений, например, повышения температуры фазовых переходов в материале (плавления или испарения) из-за инерционности перестройки кристаллической решетки.

Стадия нагрева — основная для технологических процессов, связанных только с плавлением материала — сварки, термической обработки, поэтому здесь достаточно иметь потоки малой плотности — 10^4 — 10^5 Вт/см².

При увеличении плотности потока до 10^6 — $5 \cdot 10^6$ Вт/см² металлы испаряются, в конечном итоге в обрабатываемой детали образуются отверстия.

Наиболее сложные физические превращения происходят на этой стадии, так как металл присутствует в зоне обработки одновременно и в жидкой, и в парообразной фазах. Кроме того, идет процесс интенсивного углубления отверстия, в результате чего жидкий металл течет по твердым стенкам отверстия и размывает их; падающий световой поток частично экранируется продуктами взаимодействия (эрозии), выбрасываемыми

ему навстречу в виде газообразного факела (низкотемпературной плазмы) и жидких капель металла; лазерный луч в зоне обработки расфокусируется; между парами металла и стенками отверстия идет интенсивный теплообмен.

Физическая сущность разрушения в этот период взаимодействия светового луча с материалами вкратце такова.

При плотности падающего потока более 10^6 Вт/см² испарение играет решающую роль в развитии процесса. Если в начальный период идет интенсивное испарение с поверхности детали, то затем в движущемся слое жидкого металла в результате его перегрева образуется пар. Этому также способствует существование центров парообразования (примеси, растворенные газы, неметаллические включения и т. п.). Пузырьки пара движутся к границе испарения, размеры их растут. В результате взрыва пар выбрасывается наружу. Он выносит с собой также и капли жидкого металла. Одновременно часть жидкого металла вытекает из зоны обработки по стенкам отверстия, размывая их.

По мере уменьшения плотности потока в зоне обработки процесс затухает и в конечном итоге полностью прекращается.

Увеличение плотности потока до значений 10^9 — 10^{10} Вт/см² (что характерно для лазеров, работающих в режиме модулированной добротности) приводит к тому, что при взаимодействии светового луча с металлами возникает низкотемпературная плазма, активно реагирующая с излучением. Это нарушает процесс ввода энергии и снижает эффективность съема металла. Основная часть излучения идет на нагревание плазмы, экранирующей обрабатываемую поверхность. В таких условиях можно получить лишь лунки, а не качественные отверстия.

С дальнейшим увеличением плотности потока мощности до 10^{11} — 10^{12} Вт/см² плазменное облако полностью экранирует падающее излучение в начальный момент взаимодействия, и лунка не образуется.

Все это говорит о том, что режим обработки с плотностью мощности, превышающей 10^9 — 10^{10} Вт/см², нельзя считать целесообразным из-за чрезвычайно низкой эффективности использования энергии падающего из-

лучения. Кроме того, из-за возникающего при этом мощного механического импульса, действующего изотропно, невозможно получить отверстия сколь-нибудь значительных размеров.

Лазерная размерная обработка

Сейчас, пожалуй, нельзя установить, кто и когда применил лазер именно в технологических целях. Однако известно, что с помощью первых рубиновых ОКГ еще при изучении их свойств были получены отверстия в металлических пластинах. В течение ряда лет из-за отсутствия специальных измерительных средств энергетические характеристики излучения ОКГ оценивались, например, по числу одновременно прошиваемых лезвий для бритвы. Конечно, получаемые лунки, кратеры или дырки, да еще со следами застывшего расплава, трудно было назвать отверстиями в понимании технологов, настолько они имели неправильную форму. И тем не менее уже тогда стали очевидными богатые возможности технологического использования лазеров.

Несколько позднее появились сообщения об использовании лазеров для прошивки отверстий в алмазах, рубиновых часовых камнях, в металлах. Потребовалось еще много и много экспериментальных исследований, прежде чем появилась технология лазерной размерной обработки в современном ее виде. Пришлось преодолеть трудности, связанные с нестабильностью параметров ОКГ, с необходимостью оптимизировать режимы обработки и устранить многие нежелательные явления, имеющие место при взаимодействии светового луча с конденсированными веществами.

Сегодня можно говорить о лазерной размерной обработке как о технологическом процессе, получившем право на жизнь, внедренном в промышленность и успешно конкурирующем с другими методами обработки.

Под понятие «размерная обработка» подходят такие процессы, как сверление (прошивание) отверстий, фрезерование пазов, резка труднообрабатываемых материалов и т. д.

Прошивка (сверление) отверстий. Процесс формообразования внутренних поверхностей при прошивке отверстий происходит на стадии разрушения материала. Разрушение условно делится на две фазы — так назы-

ваемую квазистатическую и динамическую. На квазистатической фазе металл интенсивно испаряется без заметного углубления отверстия. Заканчивается она образованием жидкого металла в метастабильном состоянии. Длительность фазы от единиц до нескольких десятков микросекунд — в зависимости от параметров излучения ОКГ и характеристик материала.

Динамическая фаза — режим ввода энергии в зону обработки с постоянной скоростью. Ему присущи гидродинамические явления, взрывные процессы, объемное парообразование. В этот период происходит так называемое квазистационарное разрушение, когда в процессе «развития» отверстия форма его остается постоянной — цилиндрической.

С ростом энергетических потерь и падением мощности светового излучения плотность энергии в зоне обработки (на дне отверстия) резко уменьшается. Распределение температурного поля по дну таково, что температура по его краям становится ниже температуры плавления материала и углубление образуется в центральной части. Внутренний диаметр отверстия уменьшается, образуется коническая поверхность. В верхней части также образуется небольшой конус из-за размыва отверстия вытекающим жидким материалом.

На завершающей стадии происходит в основном искажение формы отверстия, образуется облой, пробки и т. п. Поэтому оптимальным представляется обрабатывающий импульс с крутым задним фронтом.

Рассмотренные закономерности процесса формообразования отверстий характерны для использования в технологических целях импульсов длительностью от сотен микросекунд до нескольких миллисекунд. Оптимальная длительность обрабатывающих импульсов для большинства металлов лежит в диапазоне 0,5—1 мс. При меньших значениях и малых энергиях удается получить лишь небольшие конические углубления, так как процесс не успевает перейти в режим квазистационарного разрушения. Если же повысить при этом уровень энергии, то плотность потока превысит критические значения 10^9 — 10^{10} Вт/см² и образуется низкотемпературная плазма, поглощающая световое излучение. В свою очередь, при большой длительности импульса (свыше 1,5—2 мс) на процесс плавления стенок влияет теплопроводность металла. Заметная доля тепла, ушед-

шего в стенки отверстия, расходуется не на плавление, а отводится из-за теплопроводности металла в глубь его. Объем испаренного материала в этом случае уменьшается.

Процесс формообразования отверстий зависит от условий фокусировки излучения. Типичная их форма при фокусировке луча на обрабатываемую поверхность — цилиндр с небольшим верхним и нижним конусами. Если луч фокусируют на некотором расстоянии от поверхности (2—3 мм), то получают неглубокий конус. Объясняется это тем, что создать в зоне взаимодействия при расфокусировке необходимую плотность потока можно только энергией излучения высокого уровня. Но при такой энергии плотность потока в фокусе столь велика, что образуется плазма.

При фокусировке луча в глубь заготовки в фокусе образуется мощный тепловой источник. Он создает изолированное ядро расплавленного металла, которое придает в итоге отверстию бомбообразную форму.

Фокусное расстояние фокусирующей линзы также влияет на процесс формообразования внутренних поверхностей. Причем глубина отверстия уменьшается при увеличении фокусного расстояния, а диаметральные размеры соответственно растут. При выборе линз учитывают теплофизические свойства материалов и характеристики лазерного излучения. В промышленных установках обычно стандартные линзы с фокусным расстоянием от 25 до 100 мм.

Когда речь идет о технологических процессах, то в первую очередь встает вопрос обеспечения высокой точности, стабильности и производительности. Любой метод обработки материалов по различным причинам не обеспечивает абсолютную точность размеров. При светолучевой обработке материалов точности и воспроизводимости добиваются стабилизацией характеристик лазерного луча и строгим соответствием основных технологических факторов заданным параметрам.

«Рассеивание» размеров отверстий при обработке лазерным лучом зависит от состояния параметров ОКГ (колебания энергии излучения, угла расходимости лазерного луча, длительности и формы импульса, нестационарности режима генерации лазера, неточности настройки элементов оптической системы на размер, неточности установки и выверки обрабатываемой детали,

а также характеристик обрабатываемых материалов), от структуры и отражающих свойств поверхностей и т. д.

При прошивке отверстия единичным импульсом можно получить преимущественно 3-й класс точности; при этом погрешность диаметральных размеров соответствует 3—4-му, а погрешность глубины — 3—7-му классам. В настоящее время созданы методы повышения точности и качества одноимпульсной лазерной обработки.

Оптимизация режима обработки. Мы рассмотрели механизм физических явлений при лазерном сверлении отверстий. Наличие большой жидкой фазы в продуктах взаимодействия приводит из-за неуправляемого перераспределения ее при движении по стенкам и дну отверстия к образованию пробок и наплывов в канале отверстия, к искажению его геометрической формы. Толщина движущегося слоя жидкой фазы зависит от соотношения энергии и длительности лазерного импульса. При слишком большой длительности образуются чрезмерные количества жидкого металла в зоне обработки; при малой — снижается вероятность разрушения материала, так как почти нет условий для возникновения плазмы. Технологический диапазон плотностей потоков излучения, характеризующий оптимальное соотношение между энергией и длительностью, составляет для большинства материалов примерно 10^7 — $2 \cdot 10^8$ Вт/см².

Лазер удобен, когда надо получить систему идентичных отверстий. В этих целях в первую очередь необходимо уменьшить нестабильность параметров лазерного луча. Добиться хорошего результата можно при работе ОКГ с накачкой, значительно превышающей порог генерации. Кроме того, полезны также меры по нейтрализации продуктов разрушения фокусирующих систем: отсос таких продуктов, сдув факела струей сжатого воздуха, использование защитных стекол.

Большое значение имеет тепловой режим ОКГ. Из-за нестабильности температуры в активном элементе параметры лазерного луча отклоняются от заданных. Избежать этого стараются с помощью осветительных систем специальных конструкций, фильтрующих элементов, оптимизации геометрических размеров активных элементов, эффективных систем охлаждения.

Использование лазерных импульсов с оптимальными

временными параметрами. Длительность, форма и временная структура светового импульса существенно влияют на процесс образования отверстий.

Об оптимальной длительности мы уже говорили: значение ее для большинства материалов лежит в пределах 0,5—1 мс. При этом предельная глубина отверстия при обработке единичным импульсом — 6—7 мм.

В значительной мере качество и точность обработки зависят от формы импульса. Идеальная форма — равнобокая трапеция, не слишком крутой передний фронт, плоская вершина и крутой задний фронт.

Длительность переднего фронта определяет время нагрева материала до температуры испарения. Большая длительность означает увеличение зоны термического влияния излучения: отверстие будет иметь значительный диаметр входного конуса. Слишком крутой передний фронт приводит к чрезмерно высокой скорости ввода световой энергии в зону обработки. Нарушается нормальный режим нагрева материала. Длительность переднего фронта должна составлять около 10% общей длительности импульса.

Задний фронт импульса должен быть предельно крутым, чтобы процесс испарения материала был мгновенно прекращен по достижении заданной глубины. В существующих технологических установках формированием его «заныты» специальные формирующие цепи. Но наиболее эффективен для этих целей механический модулятор.

Временная пиковая структура импульса ОКГ в целом приемлема для обработки материалов. Но чтобы добиться нужной точности и воспроизводимости обработки, необходимо иметь одинаковые параметры каждого пика, т. е. упорядочить режим генерации. Для чего и применяют сферические резонаторы с линзами и одномодовый режим генерации. Полученные цилиндрические отверстия в этом случае 3-го класса точности с отношением глубины к диаметру до 6—7.

Диафрагмирование лазерного пучка. Распределение энергии в поперечном сечении пучка подчиняется закону Гаусса — интенсивность от максимума в центре спадает по колоколообразной кривой до минимума по краям сечения пучка; поперечное сечение его имеет форму неправильного круга. В результате на входе отверстия образуется большой конус со значительным облоем из

застывшего металла. Проецирование луча лазера через диафрагму на обрабатываемую поверхность позволяет уменьшить входной конус и зону облоя.

Оптическая система с цилиндрической световой трубкой. При фокусировке лазерного пучка обычными линзами на поверхность детали воздействует световой конус. Это приводит к тому, что по мере углубления отверстия световые лучи попадают непосредственно на стенки его. Стенки дополнительно оплавляются и соответственно возникают погрешности обработки.

При определенном расположении фокусирующей системы и лазера, когда размеры пятна в фокальной плоскости и в плоскости изображения излучателя равны, между этими плоскостями образуется цилиндрическая световая трубка. Длина и диаметр ее зависят от соотношений между углом расхождения пучка, фокусным расстоянием линзы и диаметром диафрагмы.

Применение пучка с цилиндрическим ходом лучей позволяет повысить точность обработки до 2-го класса и получить отверстия с высокой степенью цилиндричности при отношении глубины к диаметру до 15. Подобный метод повышения качества и точности обработки был успешно реализован в отечественной промышленной установке К-6 и установке К-НД1 фирмы «Корад» (США).

Дополнительные вспомогательные процессы и операции. Один из таких процессов, разработанный впервые в нашей стране под руководством профессора В. Суминова, — пневматическое калибрование отверстий струей сжатого воздуха (под давлением в несколько атмосфер из зоны обработки выбрасывается значительная часть жидкого материала). Еще более эффективна газоструйная лазерная обработка: практически весь жидкий материал выбрасывается струей газа, соосной световому пучку. Точность обработки этим методом соответствует 2—3-му классам при полном отсутствии погрешности поперечной формы.

Калибровать отверстия можно также **обратным действием светового луча:** вышедший из сквозного отверстия детали, а затем отраженный от зеркальной поверхности вспомогательной пластины, он обладает такой остаточной энергией, что может вновь воздействовать на материал краев отверстия.

Образованию облоя на поверхности детали и входного конуса отверстия препятствуют накладные защитные экраны и маски.

Новый метод лазерной обработки, созданный в нашей стране, — **электролазерная обработка.** Суть ее в одновременном воздействии светового луча и электрического разряда. Это позволило повысить точность сверления отверстий и приблизить ее к предельно возможной при одноимпульсной лазерной обработке.

Однако из основных характеристик, определяющих эксплуатационные достоинства деталей приборов, — качество обработанных поверхностей. При использовании лазера на таких поверхностях имеются макронеровности (волнистость, наплывы, впадины и т. п.), микронеровности (шероховатость), а также пробки в канале отверстия. Качество поверхностей определяется в основном параметрами импульса излучения ОКГ, свойствами материала и положением фокуса управляющей линзы относительно наружной поверхности заготовки. Искажения геометрии наиболее значительны при обработке глухого отверстия, особенно в нижней его части. У сквозных отверстий дефектов внутренних поверхностей значительно меньше, так как продукты эрозии выбрасываются в двух направлениях. Кроме того, при прошивке сквозных отверстий используются и дополнительные методы их калибрования.

При оптимальных параметрах обрабатывающего импульса для ряда металлов удается получить на отдельных участках отверстия шероховатость 8—10-го класса.

Многоимпульсная лазерная обработка. Одно из кардинальных решений проблемы повышения точности и качества лазерной обработки — пробивка отверстия серией одинаковых импульсов. Отверстие углубляется благодаря постепенному послойному испарению материала каждым последующим импульсом. Глубина зависит от суммарной энергии серии импульсов, диаметр отверстия — от диаметра фокального пятна и усредненных параметров отдельных импульсов в серии. Обычно максимум глубины достигается за 6—7 импульсов. После каждого импульса можно смещать фокус линзы на глубину снятого слоя металла. При этом удается получить отверстия с большим отношением глубины к диаметру (порядка 25).

Если в обработке участвует цилиндрическая свето-

вая трубка, то предельные размеры отверстия соответствуют ее размерам.

Импульсы при многоимпульсной прецизионной обработке значительно короче, чем при обработке единичными импульсами. Это делается для того, чтобы свести к минимуму отвод тепла в стенки отверстия и соответственно уменьшить оплавление последних. Например, если надо получить отверстие диаметром 50 мкм в стальной пластине толщиной 0,5 мм, используют 10 импульсов длительностью 250 мкс и энергией по 0,05 Дж. При этом обеспечивается точность 2-го класса. Уменьшение длительности еще более повышает точность. Принцип реализован в установке «Квант», созданной под руководством доктора технических наук М. Стельмаха.

Имеются сведения, что с помощью лазера на вольфраме кальция с неодимом при энергии импульса 1 Дж и частоте следования от 5 до 10 Гц получены отверстия диаметром 750 мкм в стальной пластине толщиной 15 мм, т. е. с отношением глубины к диаметру 20. С помощью рубинового ОКГ в режиме модулированной добротности и многоимпульсного метода обработки удалось прошить отверстия в различных металлах, керамике, рубине диаметром от 4 до 100 мкм с отношением глубины к диаметру от 20 до 50. Указанные примеры свидетельствуют о возможностях многоимпульсной лазерной обработки. Еще большего эффекта можно добиться, если использовать в технологических установках современные ОКГ на алюмоиттриевом гранате, двуокиси углерода, азоте и др., у которых высокая частота повторения импульсов (до нескольких десятков килогерц).

Промышленное применение лазерного сверления. За короткий период времени в нашей стране накоплен значительный практический опыт лазерной обработки в различных отраслях промышленности. Создан и введен целый ряд отечественных установок: ПАЛУ-1, «Раздан», К-3, К-3М, «Квант-9», «Квант-9М», ТИЛУ-1, «Кристалл-6», «Кристалл-16», «Кристалл-18», «Корунд-2» и др. Несмотря на относительно высокую стоимость установок, экономический эффект от их внедрения велик и в первую очередь благодаря резкому повышению эффективности технологических процессов и операций. Наибольший экономический эффект получен при изготов-

лении алмазных фильер и рубиновых часовых камней — 2,9 млн. руб. в год.

Алмазные фильеры в большом количестве применяются при протягивании медной проволоки, проволоки из нержавеющей стали для пружин, реостатной никелевой и вольфрамовой проволоки, искусственного волокна. Отверстия алмазных фильер имеют сложную форму. Раньше их изготавливали электрофизическими методами или механическим сверлением алмазным абразивом.

Специально для производства алмазных фильер отечественной промышленностью выпущена установка «Квант-9». Основные технологические характеристики ее следующие:

диаметр получаемых отверстий при обработке одним импульсом — 0,005—0,4 мм, при многоимпульсной обработке — до 1 мм;

глубина отверстий при обработке одним импульсом — 1 мм, при многоимпульсном методе — 3 мм;

отношение глубины отверстия к его диаметру — до 10—15 в зависимости от режима обработки и свойств обрабатываемого материала;

максимальная энергия излучения — 8—10 Дж;

длительность импульса — 0,35—0,5 мс;

частота следования импульсов в автоматическом режиме 6—60 имп/мин, в модернизированном варианте — до 180 имп/мин.

В установке использован лазер на стекле с неодимом.

Оптическая система визуального наблюдения — два микроскопа для наблюдения за обрабатываемой деталью в двух проекциях (сверху и сбоку), изображения в которых совмещены в одном окуляре. Такая система позволяет повысить точность сверления черновых отверстий в алмазных фильерах и уменьшить припуск на чистовую доработку.

Отверстие, как уже говорилось, имеет сложную форму. Однако с помощью установки удастся осуществить почти весь процесс обработки. Лишь чистовую доводку канала отверстия и полировку осуществляет ультразвук.

Использование «Квант-9» повысило производительность труда на этой операции по сравнению с применяв-

шимися ранее электрофизическими методами в 12—15 раз и в 200 раз по сравнению с механической обработкой. Высвобождены большие производственные площади и значительно улучшены условия труда. Годовой экономический эффект от применения «Кванта-9» только на двух заводах алмазных инструментов (Рославльском и Полтавском) составил 1,9 млн. руб. Установки закуплены фирмами Франции и ФРГ.

Не менее эффективно применение лазерного технологического оборудования в часовой промышленности при производстве рубиновых камней, которых в нашей стране выпускается свыше 500 млн. в год. Они представляют собой диски диаметром 1—1,5 мм и толщиной около 0,5 мм. Диаметр отверстия 30—90 мкм, причем отверстие в сечении имеет сложную форму с закруглениями на входе и выходе. Сверление таких отверстий механическими способами (с помощью алмазного абразива) весьма затруднительно, и повысить производительность труда на этой операции казалось практически невозможно. Однако были разработаны технологические лазерные установки, среди которых наиболее известен автомат «Корунд».

Установка «Корунд» представляет собой источник питания МИЛ-35 и станок, в состав которого входят излучатель, оптическая система, система охлаждения и автоматический подаватель камней вибробункерного типа. Принципиальная оптическая схема установки подобна схеме «Кванта-9» и отличается лишь габаритами.

Установка предназначена для сверления отверстий многоимпульсным методом. На одно отверстие диаметром 0,05—0,08 мм в рубиновой заготовке часового камня толщиной 0,45 мм требуется 4—5 имп. с энергией 0,2—0,3 Дж при частоте следования 5 Гц и 7—8 имп. с энергией около 0,1 Дж при частоте следования 10 Гц. Смена заготовки на рабочей позиции осуществляется автоматическим подавателем за время около 0,2 с, в течение которого излучение автоматически перекрывается затвором с электромагнитным приводом. Производительность установки — 1 камень в секунду. При многоимпульсном методе заготовки в процессе обработки больше не раскалываются, обеспечена высокая точность и воспроизводимость размеров отверстий. Глубина структурно измененной зоны вблизи стенок отверстия не превышает 1—2 мкм, что позволяет оставлять

минимальный припуск на чистовую обработку — 1—2 мкм.

Автомат «Корунд» успешно применяется на Кусинском заводе точных технических камней, Угличском часовом заводе и др. Только на Кусинском заводе замена существовавшего оборудования на лазерное высвободила около 450 рабочих и 2000 м² производственных площадей. Экономический эффект составил 390 тыс. руб.

На базе установки «Квант-9» создано и экспериментальное устройство с разделением лазерного луча на две позиции, что еще повысило производительность процесса. **Многолучевая обработка** — так же, как и многоимпульсная, — перспективное направление повышения эффективности технологического применения ОКГ.

В электронной промышленности, при производстве электровакуумных приборов наиболее полно используются такие особенности лазерной технологии, как отсутствие контакта между деталью и инструментом, локальность термического воздействия, возможность обработки и сварки в защитных средах и через прозрачные оболочки. Лазеры позволили на многих операциях в 3—4 раза и более увеличить производительность труда. А главный результат — повышение качества, увеличение надежности продукции. Экономический эффект здесь составляет миллионы рублей в год.

Широкое применение получило оборудование для обработки изделий электронной техники, созданное на базе установки «Кристалл-6». В основу синтеза «Кристалл-6» положены принципы унификации и агрегатирования. Степень унификации любого, в том числе и лазерного, технологического оборудования во многом определяет его стоимость, надежность и сроки освоения промышленностью. Агрегатирование также повышает экономичность разработки и снижает затраты времени на проектирование и освоение серийного производства установок. Сегодня созданы нормализованные конструкции основных функциональных блоков, которые сохраняются при смене объектов производства и могут быть использованы при компоновке другого станка или установки.

«Кристалл-6» применяется для прошивки отверстий в соплах теческателей, керамических деталях электровакуумных приборов (ЭВП) и диафрагмах электронных микроскопов, а также для обрезки молибденовых

спиралей в стеклянном баллоне СВЧ-приборов. Установка снабжена универсальным предметным столом и допускает применение специальных устройств и приспособлений автоматизации процессов обработки изделий в режиме одиночных или многократных импульсов.

Другая установка, «Кристалл-7», на базе микроскопа УИМ-21 предназначена для нанесения с высокой точностью ($\pm 0,003$ мм) координатной сетки предварительных отверстий в термообработанных и сверхтвердых заготовках штампов. Предварительное отверстие диаметром 0,3—0,4 мм в инструментальной стали толщиной до 5 мм обрабатывается за 1 мин. Не нужны сверла малого диаметра (менее 0,5 мм), производительность труда повышается в 8—12 раз.

Еще одна модификация — «Кристалл-16», он обрабатывает детали и узлы ЭВП. Специальный предметный стол, осветительная и наблюдательная системы в оптическом узле позволяют «сверлить» отверстия в условиях повышенных требований к их соосности.

И еще одна установка серии «Кристалл» прошивает отверстия в ферритовых пластинах, необходимых для изготовления блоков памяти ЭВМ. На ее основе разработан технологический процесс обработки в автоматическом режиме. Чтобы получить отверстия в ферритовых пластинах толщиной до 1 мм, применяют многоимпульсный метод. Четырьмя первыми импульсами длительностью 0,5 мс пробивают сквозное отверстие, четыре последующих его дорабатывают и калибруют. Сокращение длительности импульсов при увеличении их числа обусловлено повышенной по сравнению с другими непроводящими диэлектриками хрупкостью феррита. Из-за этого пластина растрескивается, раскалывается, если импульс излучения имеет длительность более 0,5 мс (как при одноимпульсной обработке).

Ферритовую пластину располагают на подвижном столе. Он перемещается под лучом лазера по заданной программе, что позволяет обрабатывать несколько сотен отверстий диаметрами 0,1—0,25 мм с допуском на межцентровые расстояния ± 15 мкм.

При изготовлении пресс-форм для миниатюрных штепсельных разъемов возникают трудности со сверлением в закаленных деталях сквозных технологических отверстий диаметром 0,3—0,5 мм с толщиной стенки

3—4 мм. Через них пропускают электрод (проволоку) в процессе обработки профилированных отверстий на электроискровых установках. Как правило, сквозные технологические отверстия диаметром 0,3—0,5 мм просверливаются в незакаленных деталях на координатно-расточных станках. Затем детали закаливают и т. д. При закалке они деформируются, что приводит к браку. Кроме того, часто ломаются сверла малого диаметра (7—15 отверстий на одно сверло).

Для обработки сквозных технологических отверстий в закаленных деталях пресс-форм из материалов различной твердости используется модернизированная лазерная установка «Корунд-2» на базе универсального измерительного микроскопа УИМ-21 с горизонтальным расположением активного элемента.

Разработан и внедрен также типовой технологический процесс лазерной обработки сквозных отверстий в деталях инструментальной оснастки. Созданы приспособления для фиксации деталей во время обработки.

Учеными, инженерами и рабочими Московского авиационно-технологического института им. К. Э. Циолковского, Московского института электромеханики и автоматики и Московского машиностроительного завода «Красный Октябрь» решены такие сложные технологические проблемы, как получение отверстий в деталях из жаропрочных и нержавеющих материалов и сплавов, уравнивание (динамическая балансировка) вращающихся масс, гидролазерная штамповка и др. Создано специализированное лазерное оборудование с максимальной степенью автоматизации технологии. В нем предусмотрены надежная защита оптики от продуктов эрозии, устранение наплывов металла в отверстиях и на поверхности заготовок, расширен размерный диапазон получаемых отверстий, обеспечена стабильность их параметров.

Разработаны новые методы прошивки отверстий, использующие газоструйнолазерное и электролазерное удаление материала.

В настоящее время успешно эксплуатируется в условиях серийного производства лазерный полуавтомат ЛП-2. С его помощью за 24 мин в одной детали прошивается 60 отверстий диаметром 0,3 и глубиной 1 мм. При этом обеспечиваются 2—3-й класс точности и шероховатость 8—9-го класса. Энергия импульса — 10 Дж.

Цикл работы ЛП-2 — автоматический (кроме установок и съема заготовки).

В электролазерном полуавтомате ЭЛП-1 отверстия прошиваются лучом лазера, остатки материала снимаются и отверстия калибруются электрическим разрядом. Такой комбинированный метод позволил при импульсе энергии в лазере 100 Дж и электрическом разряде 40 Дж прошивать отверстия диаметром 2 и глубиной 5 мм.

Иногда бывает необходимо просверлить отверстие, ось которого не перпендикулярна обрабатываемой поверхности. Те, кому с этим доводилось сталкиваться, знают, как это сложно: приходится делать различные приспособления, но получить высокую точность удается не всегда. Проблема была решена также с помощью лазера. Разработаны и успешно применяются на производстве агрегатированные лазерные автоматы АЛА-1 и АЛА-2 с интересными по замыслу и конструктивному исполнению решениями. С помощью установок можно получать отверстия, оси которых расположены под большим (до 60°) углом к обрабатываемой поверхности. Рабочий цикл полностью автоматизирован. На установке АЛА-2 одновременно прошиваются два отверстия диаметром 0,5 и глубиной 3 мм. При этом обеспечивается 8—9-й класс шероховатости и 2—3-й класс точности. Использование автомата в серийном производстве повысило производительность труда в 5 раз.

Среди других применений лазера для сверления отверстий следует отметить изготовление фильер в текстильной промышленности. Обычно их изготавливают из высоколегированных сталей и платины и обрабатывают механическим путем. Использование лазера для сверления черновых отверстий позволяет металлом заменить керамикой.

Применяют лазеры и в кабельной промышленности для прошивки отверстий в твердых жаропрочных керамических дисковых прокладках (толщиной в несколько миллиметров) прецизионных кабелей. Сверла с алмазными наконечниками позволяют сверлить отверстия при отношении глубины к диаметру не более 2, в то время как при многоимпульсной лазерной обработке эта величина составляет в среднем 20.

Имеются сведения об использовании лазеров для прошивки отверстий в подложках микросхем, в деталях

форсуночных сопел и двигателей из твердых сплавов, в сетках клистронов, в камнях для ювелирной промышленности.

В последнее время лазерный луч «освоил» с помощью специальной оптической системы из аксиконной и фокусирующей линзы отверстия больших диаметров. На обрабатываемую деталь проецируется изображение кольца, размеры которого определяются величиной угла при вершине конуса аксиконной линзы и расстоянием ее до линзы фокусирующей. Толщина кольца зависит от фокусного расстояния фокусирующей линзы.

Резка. С появлением мощных газовых ОКГ, работающих как импульсно, так и в режиме непрерывной генерации, приобрела права гражданства лазерная резка. Она основана на разделении материала под действием теплового источника. Это может быть полное испарение материала вдоль намеченной линии или глубокое его проплавление с удалением расплава из зоны реза. Разновидности резки — скрайбирование, прорезание непрерывной канавки на поверхности, а также сверление системы близко расположенных друг к другу отверстий малого диаметра с последующим разломом материала. Последнее применяется обычно для разделения хрупких материалов — керамики, полупроводников, стекла и др.

В настоящее время хорошо освоена непрерывная резка с поддувом газа в зону реза. Газ удаляет продукты разрушения и инициирует при разделении металлов химическую реакцию. Метод получил название газолазерной резки.

При резке металлов поддувают кислород (струей). Он способствует предварительному окислению металла, что снижает отражательные свойства поверхности. Кроме того, при наличии кислорода металл воспламеняется, и горение его усиливает термическое действие лазерного луча. Наконец, струя сжатого кислорода сдувает и уносит расплав из зоны реза. В результате получается качественный рез на значительно большую, нежели при отсутствии поддува, глубину.

С помощью мощных CO_2 -лазеров режут мягкие стали толщиной до 10 мм, легированные и нержавеющей — до 6 мм, никелевые сплавы — до 5 мм, тантал и ниобий — от 1,5 до 3 мм. Скорость резки 4—7 см/с для металлов толщиной 0,8 мм и 4—12 мм/с при толщине

их 10 мм. Ширина разреза обычно 0,5—0,6 мм. Если нужно, чтобы рез был тоньше (например, при резке тонких листов без поддува газом), используют лазеры, луч которых фокусируется в пятно размерами меньше реза.

Газолазерная резка целесообразна для обработки дорогих металлов и сплавов, поскольку она «дает» самый узкий разрез из существующих промышленных методов, а следовательно, и минимальные отходы дорогостоящих материалов.

Успешно применяется газолазерная резка и в стекольной промышленности, для работы со стеклянными трубами, стеклопрофилитом сосудов. Например, внедрена в производство отечественная технологическая установка для резки стеклопрофилита на двух CO₂-лазерах ЛГ-17. При мощности излучения 25 Вт скорость резки 3,5 м/мин. Эксплуатация установки позволила снизить брак в среднем на 10%.

Лазерная резка нашла себе место и в легкой промышленности для раскроя тканей, резки бумаги, картона. В Советском Союзе разработан газолазерный раскройный станок, который существенно упростил операцию раскроя, улучшил его качество, значительно уменьшил отходы. Наряду с этим повысилась гигиена производства, особенно при раскрое синтетических материалов и стеклоткани, кромка среза получается более ровной и к тому же повышенной прочности (из-за оплавления материала).

Автоматические лазерные «закройщики», снабженные компактной ЭВМ, выкроят по заданной программе самые сложные фасоны с производительностью 20 костюмов в час и более при оптимальном использовании ткани. Предполагается, что такой способ раскроя снизит себестоимость изготовления одежды не менее чем на 25%.

Опытная лазерная установка с программным управлением внедрена на Ленинградском швейном объединении им. Володарского. Она раскраивает текстиль со скоростью 20 м/мин при точности обработки ± 2 мм. Ожидаемый годовой экономический эффект может составить 670 тыс. руб. В перспективе предполагается создать единый центр раскроя материалов, который будет обслуживать группу швейных предприятий.

Особо следует остановиться на применении высокоточной лазерной резки, скрайбирования, в электронной промышленности при производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем.

Изготовление полупроводниковых приборов и подложек интегральных схем начинается с синтеза полупроводниковых пластин. Затем пластины разрезают (скрайбированием) на заготовки требуемой конфигурации и размеров. До недавнего времени эта операция выполнялась в основном с помощью алмазных резцов-скрайберов. Несмотря на «хитрый» механический привод, все-таки трудно получить сразу глубокие надрезы. Кроме того, края рисок недостаточно ровны, в материале образуются микротрещины, а давление реза на деталь иногда приводит к поломке ее.

У лазерного скрайбера множество преимуществ по сравнению с алмазным. Благодаря бесконтактности в пластине не возникают механические напряжения, значит нет причин для образования трещин и сколов. Кроме того, луч лазера способен делать не только глубокие надрезы (50 мкм и более), но и резать пластины на всю толщину. Это в значительной степени облегчает (или вообще упраздняет) операцию разлома пластины на отдельные элементы, которая обычно снижает процент выхода годных деталей. Лазерный разрез (или разлом) всегда высокого качества независимо от соотношения размеров единичных кристаллов и толщины пластины. Лазерному скрайбированию поддаются пластины из любого полупроводникового материала (кремния, германия, арсенида галлия), а ширина реза (канавки) примерно в 10 раз меньше. Размер дефектной зоны не превышает 50 мкм, поэтому схемы на подложке можно располагать более тесно, что экономит дорогостоящий полупроводниковый материал.

При широких масштабах производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем очень ценно и то, что лазерный прибор, помимо прочих преимуществ, гораздо производительнее (в 4—8 раз) и дешевле своего алмазного собрата.

Из всех разработанных в настоящее время лазеров для скрайбирования наиболее целесообразно использовать ОКГ с активным элементом из алюмоиттриевого граната, работающий в режиме модулированной добротности. Излучение таких ОКГ достаточно хорошо по-

глощается практически всеми полупроводниковыми материалами, а высокая частота следования импульсов обуславливает высокие скорости нанесения рисок.

В США разработано лазерное устройство для автоматического скрайбирования полупроводниковых дисков диаметром до 75 мм. Благодаря тому что используется лазер, работающий в режиме модулированной добротности с частотой следования импульсов от 15 до 35 кГц, установка позволяет вести процесс с высокой (до 20 см/с) скоростью. Ширина канавки не превышает 25 мкм, глубина — 400 мкм.

Для сквозной резки полупроводниковых подложек готовых интегральных схем в СССР создана установка «Квант-11». Она примечательна тем, что в полупроводниковых подложках после их разделения сохраняется ориентация кристаллов. Это способствует автоматизации всего производственного процесса и главным образом сборочных операций.

В «Кванте-11» лазер на алюмоиттриевом гранате работает в режиме свободной генерации со средней мощностью излучения 20 Вт и частотами повторения импульсов 12,5; 25; 50, 100 Гц. При вырезании скон в ситалловых подложках многокристалльных больших интегральных схем эта установка повышает производительность процесса в 2—3 раза по сравнению с ультразвуковым методом.

Энергетические параметры установки «Квант-11» позволяют применять ее для резки ситалла толщиной до 0,5 мм, металлической фольги, нарезки резисторов с хромовым покрытием, сверления отверстий в полупроводниках и фольге. Функциональные узлы установки могут быть использованы для комплектования установок различного целевого назначения.

Термораскалывание стеклянных трубок. В отечественной и зарубежной практике широко используется резка стекла созданием в нем термонапряжений. Заготовку нагревают так, что температурный перепад по всей длине раскалывания превышает порог термостойкости. Практически используется комбинация «нагрев—охлаждение» с последующим механическим разрушением стекла.

Однако при наличии обычных источников тепла возникают определенные трудности. Они объясняются инерционностью нагревательного устройства, сложностью

локализации места нагрева. Качество реза тоже оставляет желать лучшего: края изобилуют микротрещинами, невысоки точность разрезания, надежность и повторяемость процесса.

Кажется заманчивым использовать для резки стекла лазерное излучение. Ведь энергия его нарастает мгновенно, и луч легко можно сконцентрировать в очень узкую полоску или пятно чрезвычайно малого диаметра. Но вместе с тем до недавнего времени применить ОКГ для этой цели было невозможно. Дело в том, что для излучения существовавших тогда ОКГ стекло было абсолютно прозрачным, луч свободно проходил через стекло, не нагревая его. И только с появлением лазеров на углекислом газе мечта технологов стала реальностью.

Длина волны лазера на CO_2 — 10,6 мкм. Для такого излучения главные группы промышленных стекол непрозрачны. При их облучении практически вся энергия (за исключением ничтожной доли, отражаемой наружной поверхностью) поглощается и выделяется в очень тонком, порядка длины волны, приповерхностном слое. Возникают локальные термические напряжения, что способствует развитию трещин в заданном направлении. Стекло разделяется по траектории движения луча.

При резке стеклянных трубок их зажимают во врашающийся патрон. Затем на поверхность фокусируют с помощью линз из германия или сернистого цинка луч лазера. Каждая точка поверхности вдоль линии обработки нагревается до температуры, определяемой плотностью энергии, скоростью перемещения луча и свойствами стекла. Из-за относительно малой теплопроводности при уходе луча стекло не успевает полностью охладиться до его повторного воздействия при последующих оборотах. Нагрев скачкообразно повторяется до тех пор, пока перепад температуры вдоль всей линии обработки не достигнет предела термостойкости. Тут-то и происходит термораскалывание по намеченному лазерным лучом кольцевому контуру.

Экспериментально установлено, что для качественной резки без выкрошивания и заметных неровностей краев среза диаметр луча на поверхности стеклянной трубки должен примерно равняться толщине ее стенки. Наилучшие результаты получают, когда луч имеет форму кольца, несколько вытянутого в направлении резки.

В настоящее время отработаны и рекомендованы к использованию в промышленном масштабе процессы: резка термораскалыванием стеклянных заготовок для термометров из стекла 360 с наружным диаметром трубок 20 мм и толщиной стенки 1 мм; обрезка выдувных стеклоизделий из стекла С-90 диаметром до 80 мм (толщина стенок — 1,5—2 мм); резка труб из стекла Пирекс диаметром до 30 мм, труб из термостойкого стекла диаметром 60 мм (толщина стенки до 5 мм) и др.

Для резки стеклянных трубок отечественной промышленностью серийно выпускается установка «Кристалл-1А». В ней используется оптический квантовый генератор на углекислом газе с мощностью излучения 25—40 Вт. На установке можно резать трубки диаметром 5—60 мм при толщине стенок 0,5—2 мм. Точность резки 0,1 мм с перпендикулярностью реза не хуже 0,1 мм. Трубка из стекла С-87-1 разрезается за 2—4 с, из стекла С-49-2 — за 5—20 с.

Сварка

Лазерная сварка сегодня — такой же отработанный технологический процесс, как и размерная обработка.

Прежде лазеры использовались в основном для точечной микросварки. С появлением мощных газовых лазеров на CO_2 непрерывного излучения и твердотельных ОКГ на гранате, работающих в импульсном режиме с большой частотой следования импульсов, успешно зарекомендовала себя и шовная сварка.

Для сварки пригодны плотности потоков излучения 10^5 — 10^6 Вт/см² (при длительности импульсов в несколько миллисекунд). Тепло передается в глубину свариваемых материалов за счет теплопроводности. Когда требуется глубокое проплавление, потоки должны быть несколько большей плотности мощности. Процесс сопровождается испарением и временным образованием отверстия в сварочной ванне. По окончании действия импульса оно заливается расплавом из периферийной зоны светового пятна, где испарения не было.

Известны различные способы лазерной сварки. Широкий энергетический диапазон ОКГ позволяет выбрать такой способ, который наиболее соответствует свойствам свариваемых материалов и характеру соединения.

Оптимальная форма импульса при сварке — трапециевидная или треугольная, с относительно крутым передним и пологим задним фронтом. В начальный период действия импульса проплавляется основная часть материала, как правило, в режиме глубокого проплавления. Во время медленного спада интенсивности излучения жидкая фаза в зоне взаимодействия увеличивается. Жидкий металл не выбрасывается струей пара, как при прошивке отверстий, а постепенно заполняет сварочную ванну. К моменту затвердевания материала углубление, образовавшееся в начальный период времени, полностью ликвидируется.

Характерная особенность лазерной сварки — механическая передача энергии в зону сварки. Иными словами, нет механических контактов со свариваемыми деталями, а стало быть, нет и их деформации. Исключается любая возможность попадания посторонних веществ на детали, что бывает при электроконтактной, аргонодуговой, плазменной сварке и т. д. Поэтому лазерная точечная сварка особо ценится при изготовлении электровакуумных приборов.

Весьма важна присущая лишь лазерной сварке способность подводить энергию в труднодоступные места через любую защитную среду, пропускающую свет. Появляется возможность сваривать детали в жидких и газовых средах, контактирующих с поверхностью сварочной ванны в течение всего процесса. Это позволяет управлять им в нужном направлении. Можно проводить сварку в замкнутых объемах с прозрачными оболочками. Например, присоединять в лампе оторвавшийся от электрода проводник. Причем лазерная сварка дает соединения высокой надежности, прочности и долговечности.

Для точечной сварки различных металлов в электровакуумных приборах создана и широко применяется установка «Квант-10». Это сварочный аппарат, в котором смонтированы излучатель, оптическая система, система охлаждения, воздухонагнетательное устройство, питание. Кроме того, имеется система управления и блок измерения энергии. В излучателе используется стержень из стекла с неодимом; энергия излучения — до 30 Дж.

В процессе сварки нельзя изменять значение какого-либо параметра. Поэтому очень ответственны выбор ре-

жима сварки, исследования его повторяемости и формирования сварного соединения. Воспроизводимость режимов в первую очередь зависит от настройки установки, четкой и повторяемой юстировки резонатора и оптической системы, стабильности работы блоков электропитания. «Квант-10» гарантирует стабильный режим работы: разброс энергий лазерного излучения не превышает 8—10%. С помощью обрезаящих диафрагм между активным элементом и телескопической системой можно изменять максимальную величину энергий и получать различные энергетические характеристики. При необходимости варить одновременно в двух точках, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга, в оптический канал лазерного луча можно ввести призму. Она расщепляет луч на два, идущих под небольшим углом друг к другу. После объектива оба луча фокусируются в фокальной плоскости в виде двух световых пятен.

С помощью «Кванта-10» осуществляют сборку-сварку катодных узлов электровакуумных приборов, металлокерамических узлов и др. Сваркой встык или внахлест соединяются в различных комбинациях вольфрам, ковар, никель, молибден, цирконий, нержавеющая сталь.

Шовная сварка этим методом принципиально возможна, но применение лазеров до недавнего времени все же было экономически оправдано в основном на операциях точечной сварки. Относительно невысокая частота импульсов лазеров на стекле с неодимом и на рубине не позволяла эффективно использовать способ для получения протяженных швов. Появились лазеры на алюмоиттриевом гранате, примерно на порядок возросла частота следования импульсов и средняя мощность излучения. Тогда-то и были созданы установки для швовой лазерной сварки, применимые в промышленности.

Сплошной шов при импульсной лазерной сварке формируется наложением сварных точек друг на друга с некоторым смещением.

В настоящее время освоен серийный выпуск установок «Квант-12». Они дают прочные и плотные сварные соединения с шириной шва 0,25—1 мм при глубине проплавления до 0,3 мм со скоростью не менее 150 мм/мин. Можно соединять детали из никеля, ковара, нержавеющей стали, мельхиора, титана и др.

В излучателе лазера использован активный элемент

из АИГ. Он формирует импульсы с энергией излучения до 5 Дж. Максимальная частота повторения — 20 Гц, средняя мощность излучения — 30 Вт, длительность импульса изменяется ступенчато от 1,5 до 4 мс. Расходимость излучения при средних значениях энергии — 20 мрад. Нестабильность энергии лазерного излучения не превышает 5%. При помощи телескопической системы и объектива излучение лазера может быть сфокусировано в пятно диаметром от 0,25 до 1,0 мм.

«Квант-12» снабжен индикатором энергии излучения. С его помощью измерения могут быть произведены в любой момент работы лазера. В конструкции установки предусмотрены бокс с обеспыленной рабочей зоной, устройство для струйной защиты сварного шва инертным газом от окисления и приспособление для перемещения свариваемых деталей со скоростью до 300 мм/мин.

Наиболее эффективен «Квант-12» при герметизации металлических корпусов интегральных схем. Электродуговая, микроплазменная и конденсационная сварка зачастую повреждают элементы схемы и стеклянные изоляторы вводов из-за перегрева. Относительно невысокая плотность мощности на поверхности соединяемых деталей не позволяет повысить локальность нагрева и затрудняет теплоотвод. Холодная сварка хороша для герметизации круглых корпусов, но она малоприменима при изготовлении интегральных схем в прямоугольных корпусах из-за неравномерности пластических деформаций по периметру корпуса.

Другой характерный вид брака при герметизации указанными способами сварки — нарушение вакуумной плотности шва вследствие непровара. Более высокое качество по сравнению с другими дает электронно-лучевая сварка. Однако она пока малопроизводительна из-за длительной откачки вакуумных камер.

Высокая локальность нагрева при импульсной лазерной сварке позволяет понизить температуру наиболее чувствительных к нагреву элементов интегральной схемы при достаточной производительности процесса герметизации. Выход годного на операции герметизации корпусов интегральных схем методом лазерной сварки составляет 98%.

Один из путей повышения производительности швовой импульсной лазерной сварки — создани

зорованного оборудования, затрачивающего меньше времени на вспомогательные операции (установку и смену деталей). Этого добились, определенным образом компоновав детали сварочной машины и применив кассетные, карусельные или другие загрузочные устройства.

Повысить производительность процесса герметизации корпусов интегральных схем можно, используя одновременно несколько лучей, что и реализовано в специализированной двухлучевой установке «Квант-17».

В излучатель лазера помещены два активных элемента из граната. Каждому отведена отдельная осветительная камера. Они установлены соосно в резонаторе, образованном двумя сферическими зеркалами с одинаковым коэффициентом пропускания. Лазерный излучатель с двусторонним выводом излучения гарантирует идентичность его параметров в обоих случаях. По выходе из резонатора излучение направляется призмами полного внутреннего отражения в объективы. Там оно фокусируется на противоположные стороны герметизируемого корпуса интегральной схемы.

У лазера установки «Квант-17» следующие технические данные: энергия излучения в каждом луче — 4 Дж, длительность импульса — 5 мс, частота следования импульсов — 10 Гц, суммарная средняя мощность излучения в двух лучах — 80 Вт. Оптическая система позволяет фокусировать излучение лазера в пятно с минимальным диаметром 0,7 мм. При диаметре пятна 0,85 мм и коэффициенте перекрытия 0,5 суммарная скорость сварки при глубине шва 0,1 мм — 500 мм/мин. При глубине шва 0,3 мм скорость сварки до 350 мм/мин.

В установке предусмотрено загрузочное устройство кассетного типа для перемещения свариваемых корпусов в двух противоположных направлениях со скоростью 100—300 мм/мин и их автоматического поворота на 90° в конце прямого хода кассеты. В зависимости от размеров в кассете может быть помещено от 4 до 6 корпусов. Цикл сварки 2 мин, что при размерах их сторон 28,5×38,5 мм соответствует производительности 120 корпусов в час. Это в 4—6 раз превышает производительность промышленных электронно-лучевых установок.

Лазерная импульсная шовная сварка уже сейчас эффективное средство повышения качества продукции

и производительности труда при производстве изделий электронной техники.

Современные лазеры непрерывного действия на CO_2 и АИГ используются и для сварки крупногабаритных деталей, например стальных листов толщиной в несколько миллиметров. Так, специалистами автомобильной промышленности США введена в опытную эксплуатацию линия, на которой с помощью лазера соединяются основания кузовов. Излучение CO_2 -лазера мощностью 6 кВт, размещенного над рабочим столом, направляется системой зеркал на обрабатываемую поверхность. Зеркала управляются ЭВМ в соответствии с конфигурацией свариваемого изделия. Скорость поперечного перемещения луча — 3 см/с, продольного — 19 см/с. Система управления лучом лазера обеспечивает перпендикулярность его по отношению к обрабатываемой поверхности. Контроль качества сварки автоматический.

Термообработка

Лазерное излучение завоевывает место и под «солнцем» термической обработки металлов и сплавов. В частности, в инструментальном производстве для поверхностного упрочнения деталей импульсной закалкой.

При высокой скорости охлаждения приповерхностного слоя, нагретого лазерным импульсом, могут быть легко достигнуты весьма высокие значения микротвердости (до 1000 кг/мм² и более). Это создает предпосылки для существенного увеличения износостойкости инструмента.

Точность фокусировки лазерного излучения позволяет ограничить упрочнение строго конкретными участками поверхности в местах, подверженных износу. Причем исходная структура основной массы детали строго сохраняется. Благодаря этому высокую динамическую прочность термообработанных деталей можно сочетать с их износостойкостью. Кроме того, локальная закалка позволяет существенно уменьшить деформацию деталей после термообработки, значительно сократить (или полностью исключить) их финишную шлифовку. Бесконтактность нагрева делает довольно простой автоматизацию термообработки по контуру, упрощает термообработку деталей сложной формы и расположенных в труднодоступных местах.

Специально для термообработки разработана и выпускается серийно установка «Квант-16»; лазер — на стекле с неодимом со следующими характеристиками: длина волны излучения — 1,06 мкм, энергия излучения в импульсе — до 3 Дж, длительность его — 6—7 мс, частота следования — до 30 в 1 мин. Оптическая система установки позволяет фокусировать излучение в световое пятно диаметром от 0,2 до 0,5 см. Достаточная плотность потока излучения порядка 10^4 Вт/см².

Обработка проводится на воздухе или в атмосфере инертного газа, например аргона. При обработке на воздухе после первого импульса образуется окисная пленка, которая увеличивает коэффициент поглощения светового излучения. Поэтому критическая энергия здесь ниже, чем при термообработке в аргоне.

В аргоне процесс отличается незначительное уменьшение глубины закаленного слоя, высокое качество поверхности позволяет полностью исключить финишную шлифовку. Используется этот метод для термообработки наиболее точного инструмента. Но из-за большого расхода аргона и повышенной энергии излучения ОКГ он более дорог, чем обработка на воздухе.

В целом практика показала, что использование лазерной импульсной закалки для упрочения технологического инструмента повышает по сравнению с термообработкой другими способами долговечность его в 2—5 раз. Стойкость, например, микроштампов и пресс-форм возрастает в 2—4 раза и дает значительный экономический эффект.

Лазер и элементы интегральных схем

Логика развития лазерной техники позволила по-новому подойти к решению задач изменения геометрии изделий микроэлектроники. В первую очередь это относится к подгонке пленочных резисторов гибридных интегральных схем.

Существующие в настоящее время методы изготовления резисторов гибридных интегральных схем не гарантируют получения их номинала с требуемой точностью. Поэтому после нанесения резистивного элемен-

та параметры его необходимо как можно точнее «подогнать» к номинальным.

Подгонка с высокой точностью номиналов резисторов — ответственный этап получения микросхем. От подгонки качества и производительности во многом зависит эффективность производства всего микроэлектронного устройства.

До сих пор наиболее совершенными способами подгонки номинала пленочных резисторов были абразивный и электронно-лучевой. Абразивный — сошлифовывание части резистивного слоя — дешев и применяется для автоматической обработки изделий крупных партий. Но в процессе работы частицы абразива выкрошиваются и, оседая, загрязняют изделие, ухудшают его параметры. Поэтому после подгонки приходится тщательно удалять эти частицы. Электронно-лучевой способ — регулируемое испарение материала резистора — хорош со всех точек зрения. За исключением одной: доводка должна происходить в условиях высокого вакуума. Это удорожает прибор, создает неудобства в работе.

Лазерные методы обеспечивают чрезвычайно высокую (до 0,01%) точность подгонки и они свободны от названных недостатков, удобны для массового производства и, что особенно важно, лазер может работать уже после того, как деталь помещена в герметический прозрачный корпус. Последнее обстоятельство — залог того, что детали в процессе подгонки не будут повреждены и сохранят номиналы при последующей герметизации.

Для подгонки толстопленочных резисторов толщиной более 1 мкм, полученных трафаретной печатью и вжиганием в керамическую подложку, применяют импульсные лазеры на СО₂ и твердотельные лазеры, работающие в режиме свободной генерации со средней мощностью в несколько ватт при длительности импульса 10^{-4} с. Скорость удаления пленки — 10—50 мм/с. Разработаны различные схемы подгонки. Они учитывают свойства материала пленки и конфигурацию резистора.

Точности подгонки добиваются варьированием направлений реза: поперечным, продольным, U-образным и резом по диагонали. Поперечный рез скоротечен, но не дает высокой точности. Продольным можно повысить точность подгонки, однако способ применим при

обработке только тех резисторов, сопротивление которых незначительно отличается от номинала. Резы по диагонали и U-образные более универсальны. Подгонка достаточно точна (1%), в том числе и для резисторов, сопротивление которых значительно отличается от номинала.

Обычно в начале процесса проводят грубую подгонку движением луча поперек резистора; затем повышают точность, перемещая луч вдоль детали.

Отечественная промышленность для подгонки толсто пленочных резисторов выпускает установки УПР-1 и «Кристалл-9». В «Кристалле-9» используется ОКГ на основе алюмоиттриевого граната. Энергия импульса — 0,02—0,03 Дж, частота следования — 10—100 Гц, длительность — 250—300 мкс. Оптическая система позволяет регулировать ширину реза в пределах от 45 до 100 мкм. Толщина обрабатываемого резистивного слоя — 20—30 мкм. Он полностью удаляется в зоне обработки без повреждения подложки.

Для прецизионной микрообработки тонкопленочных резисторов гибридных интегральных схем применяют установки УПР-5 и «Кристалл-10». В последнюю входят квантовый генератор ЛГИ-21 на молекулярном азоте, устройство двухкоординатного сканирования луча, оптическая система и координатный стол «Зонд-А-1».

Двухкоординатная система сканирования луча позволяет подгонять резисторы в пределах одного модуля платы с надежным их контактированием, так как перемещается только луч, а плата остается неподвижной.

Лазеры на азоте, длительность импульсов которых 10^{-8} с, проделывают на пленках резы шириной 3—20 мкм при неровности края менее 1 мкм и полной сохранности подложки. Точность подгонки может достигать 0,01—0,05%.

На базе «Кристалла-10» разработаны установки «Кристалл-13» и «Кристалл-20». Вторая в отличие от «Кристалла-10» оснащена специальным измерительным устройством, которое гарантирует точность подгонки не хуже 0,5%. На таких установках можно обрабатывать тонкопленочные покрытия различных материалов толщиной до 1 мкм. Регулируемая ширина линии реза от 10 до 80 мкм.

Дальнейшее совершенствование оборудования для подгонки пленочных покрытий связывают с лазерами на

алюмоиттриевом гранате с непрерывной накачкой и модулирующей добротности акусто-оптическим затвором. У них малая длительность импульса излучения (10^{-7} с), средняя мощность — от единиц (в одномодовом режиме генерации) до нескольких десятков ватт (в многомодовом режиме), частота импульсов — 1—40 кГц. Используя такие приборы, можно совместить высокую производительность (свыше 10 тыс. операций в час при управлении от ЭВМ) процесса с локальностью обработки независимо от вида резистивной пленки.

Подгонка частоты вакуумированных кварцевых резонаторов — сложный и трудоемкий процесс. Но и он существенно упрощается благодаря использованию лазеров. Подгонка сводится к контролируемому удалению тонкопленочных электродов, нанесенных на кварцевый элемент, помещенный в отпаянный стеклянный баллон. Они удаляются полным или частичным испарением материала электрода в точках, распределенных по всей его поверхности.

Для подгонки частоты кварцевых резонаторов выпускается установка «Сигнал-3» с лазером на азоте, характеристики которого наилучшим образом подходят для этой весьма тонкой операции. Малая длительность импульса излучения (10^{-8} с) и легко контролируемая подача световой энергии в зону обработки позволяют удалять материал электрода при минимальном повреждении кварцевого элемента. Точность подгонки частоты резонатора ± 1 Гц при скорости ее изменения 500 Гц/с.

Прецизионные металлопленочные резисторы дискретного типа нарезают и подгоняют на установке ЛНР-1 импульсным лазером на CO_2 . В сочетании с быстродействующим автоматическим оборудованием для измерения сопротивления лазерный метод нарезки и подгонки благодаря малой инерционности системы при ее выключении показывает производительность до 800 резисторов в 1 ч.

Технология получения рисунков металлизированных фотошаблонов с помощью лазера использует проекционные оптические системы. Метод позволяет за один импульс испарять пленку сложного рисунка, повторяя в уменьшенном масштабе рисунок проектируемой маски. Такой принцип заложен в аппарате «Кизил». Проекционная оптическая система аппарата с разрешающей способностью до 300 лин/мм формирует на обрабатываемой

мой поверхности изображение при минимальном размере элементов рисунка 2—3 мкм.

Ретушь фотошаблонов осуществляется на установке ЭМ-551. Дефекты изображения в виде наплывов, перемычек, неровностей края удаляются испарением. Проекционная оптическая система фокусирует в зоне обработки световой пучок квадратного сечения со сторонами от 5 до 20 мкм. При обработке тонких пленок пучком такой формы край изображения получается более ровным, чем при фотолитографическом процессе. Ретушь промежуточных, эталонных и рабочих фотошаблонов с помощью лазера значительно удешевляет их изготовление и увеличивает выход годных интегральных схем.

Получение тонких пленок

В Советском Союзе и за рубежом интенсивно исследуются возможности использовать термохимические реакции, происходящие при локальном лазерном нагреве, чтобы получать пленки интегральных схем. Уже сегодня лазерным напылением можно синтезировать самые различные по структуре, толщине и рисунку металлические, полупроводниковые и диэлектрические пленки. А это, в свою очередь, открывает дорогу созданию уникальных электронных приборов на многослойных тонкопленочных структурах.

Идея использовать лазер при вакуумном напылении материалов возникла одновременно с появлением первых мощных лазеров. По мнению специалистов, лазерное напыление в сочетании с различными способами размерно-лучевой обработки может стать основой для создания полностью вакуумного цикла изготовления интегральных схем.

Технология высадки тонких пленок представляет собой процесс термического разложения находящихся в газообразном состоянии органических соединений, помещенных в вакуумную камеру. Подложка, на которой необходимо получить рисунок, нагревается излучением лазера по заданному рисунку. Тепло передается приповерхностному объему газа; происходит пиролиз газа, выделяется требуемый материал (металл, диэлектрик или полупроводник).

Можно получать рисунки, окисляя металл пленки при ее нагреве лазерным излучением (по заданному рисунку в окислительной атмосфере). Делается это следующим образом. Например, облучается пленка хрома в 1 мкм, нанесенная на стеклянную подложку. В местах нагрева хром окисляется на глубину 0,05 мкм. Затем пленку протравляют. Окисел реагирует значительно спокойней, чем неокисленный хром, поэтому на подложке образуется тонкопленочный рисунок, локализованный по контуру лазерного облучения.

В технологии получения пленок интегральных микросхем особое место занимает вакуумное напыление. Объясняется это технологической гибкостью и универсальностью метода. Новые возможности вакуумной технологии открылись с тех пор, когда попытались испарять материал излучением импульсных лазеров. Импульсные методы по некоторым характеристикам выгодно отличаются от использующих непрерывное излучение. Они, например, «создают» более высокий «эффективный» вакуум — следствие высокой скорости роста пленок. Повышенная скорость возникновения зародышей снижает минимум возможной толщины сплошных пленок, а энергетическое возбуждение атомов конденсата — температуру ориентированного роста. Кроме того, сохраняется состав исходного материала при напылении пленок многокомпонентных веществ.

При лазерном напылении мишень может быть произвольного размера и любой формы. Таким методом сравнительно несложно получать многослойные структуры: достаточно поместить мишени на вращающемся столике и воздействовать на них излучением в заданной последовательности.

Преимущества лазерного нагрева объясняются высокой плотностью светового потока сфокусированного излучения. Это позволяет испарять тугоплавкие материалы, такие, как вольфрам, молибден. Благодаря значительным скоростям нагрева и испарения можно получать пленки сложного химического состава (например, тугоплавких окислов и полупроводников) без изменения их стехиометрии. То, что для нагрева используют короткие импульсы с легко регулируемой энергией, позволяет с большой точностью управлять процессом образования пленки. Поэтому удается получать их особо тонкими (толщиной 0,1—1 мкм) с хорошей воспроиз-

димостью. Это существенная предпосылка создания новых видов полупроводниковых приборов и элементов оптоэлектронных устройств.

Для напыления тонких пленок могут применяться импульсные лазеры различных типов. Но лишь те, которые в сочетании с оптикой способны создать на испаряемой поверхности интенсивность излучения 10^9 Вт/см². Наиболее перспективны лазеры на стекле с неодимом, на СО₂, с поперечным возбуждением, работающие при атмосферном давлении рабочей смеси, а также некоторые типы лазеров на алюмоиттриевом гранате.

Лазерное напыление пленок тугоплавких металлов может быть использовано для получения высококачественных приборов с барьером Шотки. Пленки тех же металлов, нанесенные на стеклянные и кварцевые подложки, пригодны для изготовления износостойких фототаблонов.

Лазерные методы нанесения тонких пленок имеют неоспоримые преимущества при напылении сплавов с большой разностью упругости паров компонентов. Например, при производстве планарных тоннельных диодов на основе германия лазерным излучением целесообразно наносить пленки сплава.

Лазерные устройства контроля

Возможность использовать луч лазера в качестве носителя информации побудила создать ряд устройств для контроля качества изделий в процессе их производства, оценки геометрических параметров деталей сложной конфигурации. Причем скорость и точность лазерных методов контроля в десятки и сотни раз выше, чем у обычных. Кроме того, лазерное контрольно-измерительное оборудование отличается простотой конструкции и надежностью в эксплуатации. Еще одно достоинство лазерных приборов — дистанционность измерения. И наконец, они отличаются быстротой действия и способны «различать» достаточно мелкие элементы изделий.

Разработано несколько методов измерения размеров с помощью лазеров, например, триангуляции, фиксации края тени, синхронного сканирования,

При измерениях методом триангуляции тонкий луч маломощного лазера направляют на поверхность изделия. Рассеянный свет по двум путям, образующим стороны треугольника, отводится в приемное устройство. Расстояние до поверхности, с помощью которого контролируется толщина изделия, может быть измерено с погрешностью меньше 2,5 мкм при использовании пучка диаметром 1 мм. Причем расстояние от оптического преобразователя до поверхности изделия может превышать 1 м, а объекты измерения — иметь высокую температуру, шероховатую поверхность и большую протяженность.

При измерении методом фиксации края тени деталь освещается сканирующим лучом лазера. Приемник фиксирует момент, когда луч перекрывается деталью. Положение луча согласовано с тактовым генератором, и по времени отсутствия лазерного излучения на приемнике определяют размеры детали. Если расположить два лазера под прямым углом друг к другу, можно измерить параметры, характеризующие форму детали в плоскости ХУ.

При измерении методом синхронного сканирования лучи двух лазеров освещают передний и задний края движущегося на конвейере изделия, длину или ширину которого требуется проконтролировать. Лазеры устанавливают на расстоянии, обусловленном размером детали. Точность измерения не зависит от скорости конвейера.

Для лазерных метрологических устройств одинаково важны такие характеристики ОКГ, как высокая интенсивность излучения, его малая угловая расходимость, монохроматичность, поляризация и возможность фокусировки луча в пятно очень малых размеров.

Следует заметить, что разрабатываемые лазерные контрольно-измерительные устройства в подавляющем большинстве специализированы и предназначены для выполнения лишь определенных контрольных функций с максимальной степенью автоматизации процессов.

Так, например, в Московском авиационно-технологическом институте им. К. Э. Циолковского создали установки для контроля чистоты жидкостей и газов, проверки геометрических размеров деталей и качества их поверхности как в процессе обработки, так и в условиях эксплуатации; телевизионно-лазерный микроскоп и телевизионно-лазерное устройство для настройки рез-

цовых блоков станков с программным управлением и т. д.

Телевизионно-лазерный микроскоп ТЛМ-1 предназначен для измерения диаметров отверстий, определения точности взаимного расположения деталей, измерения профилей фасонных поверхностей, контроля их качества и т. п. У него высокая разрешающая способность, он измеряет линейные размеры с точностью $\pm 1,5$ мкм, а угловые величины с ошибкой не более 2'. Контроль можно проводить как в проходящем, так и в отраженном свете. Осветитель — гелий-неоновый лазер ЛГ-56. Увеличенное в 30—3000 крат изображение детали воспроизводится на экране видеоконтрольного устройства и сравнивается с масштабными сетками и шаблонами. Предметный стол прибора снабжен отсчетными устройствами.

Телевизионно-лазерный микроскоп ТЛМ-2 измеряет линейные (с точностью ± 1 мкм) и угловые (с точностью $\pm 0,5'$) размеры в полуавтоматическом режиме. Специальная приставка позволяет перейти на режим автоматического контроля. Результаты измерений фиксируются на световом табло. Увеличение 30—3000 крат.

Установки «Алмаз-1» и «Алмаз-2» проводят динамический анализ чистоты приборных жидкостей, топлива, масел, гидросмесей, а также статистический анализ размеров непрозрачных частиц на прозрачных подложках. В них использован гелий-неоновый лазер ЛГ-56. Эти установки позволяют фиксировать иррегулярные тела размерами от 5 до 100 мкм с точностью $\pm 10\%$.

Лазерная установка для контроля геометрических и динамических параметров деталей гиromоторов позволяет измерять уровень вибраций и деформаций элементов гиromоторов в процессе вращения. Принцип ее действия — оценка текущего значения интенсивности излучения газового ЛГ-56 лазера, отраженного от поверхности контролируемого элемента. Установка позволила контролировать параметры сферических роторов гироскопов при 1000—2000 об/мин с точностью $\pm 0,15$ мкм.

Универсальный лазерный профилометр-профилограф предназначен для определения класса чистоты поверхности. Сфокусированный луч лазера направляется на контролируемую поверхность. Отраженный сигнал улавливается фотоприемником и измеряется его диффузная составляющая с информацией о чистоте поверхности.

Установка для контроля подшипников, определения дефектов (рисок, вмятин, раковин, прижогов, следов коррозии) на поверхности роликов, шариков, колец, цапф и кернов работает на принципе измерения диффузной составляющей отраженного света. С ее помощью контролируются детали диаметром от 0,2 до 10 мм при разрешающей способности прибора 1,5—5 мкм.

Устройство для бесконтактного измерения кривизны сферической поверхности и контроля ее качества измеряет интенсивность отраженного от объекта когерентного светового потока при изменении угла между падающим лучом и нормально к поверхности объекта. Приемник излучения располагается вблизи источника света.

Устройство разработано для контроля сферической поверхности катода электронной пушки со сходящимся пучком (известно, что точность кривизны сферы катода существенно влияет на параметры электронно-лучевой пушки и в целом всего прибора). Высокая точность и достоверность контроля обеспечиваются сравнением с эталоном. Величина поступательного перемещения объекта — в пределах 10 мм. Привод вращения предметного столика позволяет поворачивать объект на угол, достаточный для «осмотра» лазерным лучом всей поверхности катода за один оборот. Острота кромок оценивается по крутизне спада и изменению величины интенсивности света, отраженного от краев катода. Несимметричность катода характеризуется смещением максимума интенсивности отраженного света, так как максимум интенсивности соответствует центру катода. Наличие поверхностных дефектов (сколов, наплывов, раковин) также определяется по изменению интенсивности отраженного светового потока в момент, когда дефекты попадают под световое пятно. Предельная точность метода измерения радиусов кривизны сферических поверхностей — 1%.

Описанное устройство может быть использовано также для контроля криволинейных поверхностей сложной конфигурации с разными радиусами кривизны.

Интерферометры различных типов давно применяются в современных измерительных приборах. Использование лазеров в интерферометрии стало событием в ее развитии. Хорошо разработанные интерферометрические методы высокоточного измерения длины (а следовательно, определения скорости, ускорения, деформации

тел, амплитуды вибраций и др.), основанные на волновой природе света, не могли быть широко реализованы в технике из-за отсутствия необходимых источников колебаний.

С появлением лазера интерферометр — достаточно сложный и доступный ранее небольшому кругу специалистов прибор — начинает все шире и шире внедряться в технологию. Яркость лазерного излучения позволила проводить измерения в незатемненном помещении и на открытом воздухе. Недостижимая ранее временная когерентность и интенсивность излучения сделали возможным подсчет числа полос интерференции для оптических путей значительно большей длины.

Высокая точность и стабильность длины волны монохроматического излучения лазеров стали причиной того, что на XI Генеральной конференции по мерам и весам в 1960 г. основная единица измерения длины — метр — была определена в числах длин волн линии изотопа криптона Kr^{86} (606,0 нм).

Уже сейчас с помощью лазерных интерферометров можно проводить прецизионные измерения в метрологии, станкостроении, оптическом приборостроении, при бесконтактных измерениях вибраций турбин, металлорежущего инструмента и термических деформаций деталей машин.

В процессе производства СВЧ-техники широко применяют детали с допусками по 1-му и 2-му классу точности. Так, допуск на шаг спиралей некоторых замедляющих систем — 0,003 мм, на ряд элементов деталей, полученных электроискровой обработкой, — 0,01 мм. До настоящего времени наиболее точное средство контроля — универсальный инструментальный микроскоп; его точность — $\pm 0,003$ мм. Но сам процесс измерения очень трудоемок. Оператор за смену способен проконтролировать шаг только двух—четырех спиралей. Другие высокоточные средства измерения — контактные. Но, например, миниатюрные детали особенно из мягкого материала при контактном измерении зачастую повреждаются.

Для измерения шага спиралей замедляющих структур создана лазерная установка на 25 автоматических измерений шагов в 1 с при точности $\pm 0,5$ мкм. В ней применен интерферометр на базе серийного лазера

ЛГ-56. Время между измерениями деталей различных типов сведено к минимуму благодаря простым по конструкции быстросменяемым заранее настроенным узлам. Текущие показания во время измерения контролируются по световому табло, результаты печатаются в виде графиков (при необходимости они могут быть зафиксированы на перфоленте).

Создана также специализированная установка автоматического измерения угла поворота круговых периодических систем на базе лазера ЛГ-56. Точность измерений — $10''$. Время контроля всей системы — 25 с.

Внедрение этих установок позволило повысить точность измерений в 3—5 раз, производительность труда — в 30 раз. Причины, влияющие на точность изготовления деталей, быстро и легко выявляются и устраняются. Стало быть, можно качественнее отработать соответствующие технологические процессы. Более эффективная отбраковка деталей повысила процент выхода годных изделий. Общий годовой экономический эффект от внедрения только двух таких интерферометров составил более 100 тыс. руб.

Отечественной промышленностью выпускается лазерный измеритель перемещения с цифровым индикатором ИПЛ-1 для измерения расстояний до 1 м с точностью 10^{-4} мм. Конструктивно прибор выполнен в виде трех блоков: интерферометра с лазером и фотоэлектронным устройством, подвижного элемента (призмы) и электронного блока.

В 5—7 раз сокращает время высокоточных измерений ИПЛ-7 (в прецизионном машиностроении, электронной технике, метрологии, научных исследованиях). Погрешность измерения не превышает 0,5 мкм. Особенно удобен прибор для линейной калибровки прецизионных металлорежущих станков, для контроля качества нарезки штриховых мер.

Одна из американских фирм выпускает лазерный интерференционный калибратор для измерения деталей размерами до 5 м с точностью 0,75 мкм. Максимальная погрешность измерения $\pm 0,5 \cdot 10^{-6}$ от измеряемой величины. Прибор снабжен автоматическими корректорами ошибок, возникающих в условиях меняющихся температур, влажности, давления. С помощью лазерного интерферометра было проведено выравнивание секций

ускорителя с угловой погрешностью $0,5 \cdot 10^{-6}$ на расстоянии до 60 м.

Лазерные оптические устройства применяются для измерения скорости перемещения. В них использован эффект Доплера. Погрешность измерения радиальной скорости объекта — порядка 10^{-7} . Разработанная в Англии лазерная доплеровская система измеряет скорость перемещения зеркальной поверхности с точностью 10^{-5} . Это на два порядка выше, чем удастся получить с помощью аппаратуры, применявшейся ранее на металлургических предприятиях.

Интересны возможности использования лазерных интерферометров для измерения малых температурных коэффициентов удлинения, относительного смещения материалов и т. д.

Наивно думать, что лазерный интерферометр стал карманным инструментом токаря или слесаря-инструментальщика, таким, как штангенциркуль или микрометр. Интерферометр — достаточно сложное устройство, пользоваться которым могут лишь хорошо обученные специалисты. Однако лазер позволил «переместить» этот прибор из стен научных учреждений в метрологические лаборатории и сборочные цехи заводов.

Принцип действия, подобный тому, который используется в интерферометрах, измеряющих малые деформации, заложен в приборах для определения величины дрейфа континентов и ледников. Существует гипотеза, что материки очень медленно перемещаются; это явление названо дрейфом континентов. По современным представлениям скорость перемещения материков составляет в среднем примерно 2—5 см в год. Экспериментальная проверка гипотезы и изучение столь медленного процесса возможны с помощью газовых лазеров непрерывного излучения.

Выплавка металла, создание новых материалов, физические исследования, геологическая разведка, астрономия и многое другое — вот поле деятельности спектроскопии. И здесь весьма перспективным представляется использование лазерных устройств: острая фокусировка луча на поверхности вещества позволяет исследовать мельчайшие вкрапления пород в геологических образцах, анализировать пробы массой до 1 мг, обнаруживать примеси, масса которых не превышает 10^{-11} г.

Выпускаемая в Советском Союзе установка «Ко-

ралл-1» выполнена в виде приставки к стандартному спектрографу. Она предназначена для спектрального анализа веществ. Пробы исследуемых веществ отбирают с помощью ОКГ, а затем сжигают в электрических разрядах стандартных искровых и дуговых генераторов.

Лазеры помогут установить оперативный санитарный контроль за воздушной средой промышленных центров. Пункт лазерного зондирования атмосферы уже создан в Центральной аэрологической обсерватории. Луч, устремленный в толщу атмосферы, встречает на своем пути не видимые невооруженным глазом молекулы воздуха и инородные включения. В зависимости от физических свойств встретившихся частиц — будь-то какой-либо газ, угольная пыль, пары воды — луч по-разному с ними взаимодействует и рассеивается. Это моментально фиксирует приемное устройство, и через минуту-другую электронно-вычислительная машина ответит на вопрос, что нащупал лазерный луч, чем загрязнены заоблачные дали, что мы вдыхаем вместе с воздухом и т. д.

Со временем на оптический луч переложат многие функции радиозондов. Метеорологическая «сообразительность» лазера окажет большую услугу различным службам народного хозяйства. Он расскажет не только о характере и степени загрязненности воздуха над городами, но и принесет информацию о приземных слоях атмосферы, в которых зарождаются грозы и штормы. А это очень важно для практической метеорологии, для геологов, летчиков, земледельцев, моряков...

В США создана лазерная система для определения состава и химической стабильности атмосферы, а также степени ее загрязненности промышленными газами. Это дистанционно управляемый лазер, оптоакустическое устройство и ЭВМ; система смонтирована на аэростате. Данные передаются на землю в реальном масштабе времени по радиотелеметрической линии передач. Получаемые результаты позволяют более точно моделировать химические реакции в стратосфере, определять влияние солнечного света на состав атмосферы и т. д.

В Англии разработано лазерное оборудование для быстрого обнаружения метана и других газов, поглощающих инфракрасное излучение. Результат анализа сре-

ды выдается менее чем через 1 с. Работать можно даже при больших скоростях газового потока. У прибора широкий диапазон чувствительности, он способен обнаружить газы невысокой концентрации. Такой прибор найдет применение в обеспечении безопасности при съемках газовых и нефтяных месторождений, при выявлении утечек газа и т. д.

Еще более чувствительную установку для обнаружения загрязняющих веществ в воздухе разработали специалисты Массачусетского технологического института (США). Принцип ее действия — быстрое «расширение» загрязняющего газа при поглощении им энергии прерывистого газового пучка. В результате возникают акустические колебания, улавливаемые микрофоном. Длина волны лазерного излучения подбирается в соответствии с линией поглощения газа, следы которого пытаются обнаружить. Опытный образец реагирует на газы, относительная концентрация которых $200 \cdot 10^{-9}$. Нижний предел измерений, как считают ученые, можно значительно снизить до $1 \cdot 10^{-9}$ при небольшой модернизации устройства.

Эта установка, по мнению специалистов США, может быть использована для обнаружения взрывчатых веществ и наркотиков в багаже пассажиров и почтовых отправлений. Интересно заметить, что сейчас для перевозки сходного по целям оборудования требуется грузовой автомобиль. Новое же устройство с перестраиваемым полупроводниковым лазером можно будет разместить в чемодане.

В Англии выпускаются лазерные анемометры и спектрофотометры; некоторые из них демонстрировались на выставке «Метрология-77» в Москве. Это корреляционный лазерный анемометр «Малверн 6200» для динамического обследования лаков и жидкостей. Он применялся в офтальмологии, при изучении скорости восприятия питания растениями и в других самых различных случаях.

Фотонный корреляционный спектрофотометр «Малверн 4300» определяет массу, форму и размеры молекул, коэффициент их диффузии. Используется для определения степени загрязнения воздуха вирусами и бактериями, для изучения полимеров, протеинов, нефтяных продуктов и т. д.

Еще кое-что о применении лазеров

В современной технике действует множество высокооборотных механизмов, машин и приборов, отличительная черта которых — высокие требования к уравниванию вращающихся тел. При скоростях вращения в несколько десятков тысяч оборотов в минуту даже при небольших массах роторов создается весьма значительный кинетический момент, отчего двигатели могут разрушаться весьма быстро.

Устраняют дисбаланс обычно механическим или электрофизическим способами. В первом случае определяют величину и место дисбаланса, преобразуют эту информацию в программу, передают ее на исполнительное устройство. При механическом способе устранение дисбаланса осуществляется, как правило, вручную (сверление).

Более успешны электрофизические способы уравнивания, которые позволяют автоматизировать процесс балансировки. Среди них наибольшего внимания заслуживает лазерный метод. Им можно уравнивать роторы из любых материалов. Способность лазерного луча фокусироваться в пятно диаметром в несколько микрометров и высокоточная синхронизация процесса позволяют балансировать роторы гироскопов с точностью до $0,5\text{—}0,02$ мкм, что недоступно другим методам.

Одна из первых лазерных балансировочных машин АЛБМ-1 — автоматическая лазерная балансировочная машина — разработана в МАТИ. Она предназначена для уравнивания осевых роторов гироскопов за два пуска. Работает она следующим образом.

Световой луч твердотельного лазера воздействует на вращающийся ротор. Он разгоняется до заданных оборотов (для контроля имеется электронный тахометр), включается автоматическая система управления. Усиленный сигнал с ее датчика поступает на синхронизатор и тахометр одновременно. С выхода синхронизатора сигнал передается блоку поджига ОКГ в момент, когда «тяжелое» место ротора проходит через оптическую ось лазера. Световой луч воздействует на него, испаряя лишнюю массу. В системе предусмотрено ав-

томатическое управление энергией излучения лазера, пропорциональное остаточной неуравновешенности ротора. Для уравнивания достаточно нескольких импульсов излучения.

В настоящее время созданы новые типы АЛБМ на ОКГ в режиме модулированной добротности. Эти балансировочные машины, так же, как и АЛБМ-1, внедрены в авиационном приборостроении с большим экономическим эффектом.

Нельзя не остановиться на использовании лазеров в геодезии и строительстве. Согласно оценке специалистов лазерные приборы для геодезических и метрологических целей, а также устройства для центрирования и «привязки» объектов окупаются в течение 10 месяцев. Все применявшиеся для этих целей методы имеют недостатки; главные — невысокая точность, низкая производительность и ограниченный диапазон рабочих расстояний.

Для контроля и сохранения прямолинейности и направления все шире используют устройства на основе гелий-неоновых лазеров. По точности эти приборы можно объединить в три основные группы: особо точные, позволяющие определять отклонение в 0,1—0,3 мкм на 1 м на расстояниях до 10 м (используются в оптическом приборостроении, станкостроении, электровакуумной промышленности); высокой и средней точности, фиксирующие отклонение элементов конструкции в 1 мкм на 1 м на расстояниях до 100 м (самолето- и кораблестроение, монтаж крупногабаритного оборудования, для прецизионных геофизических работ); невысокой точности, определяющие положение выбранной точки конструкции в 100 мкм на 1 м на расстоянии до 500 м (строительство дорог, аэродромов, гидромелиоративные работы, прокладка штреков, тоннелей, шахт).

В приборах всех трех групп основные функциональные части — лазер-излучатель, луч которого создает геометрическую базу (линию или плоскость), и позиционно-чувствительный элемент для обнаружения и количественной оценки отклонения от этой базы. При визуальном наблюдении отклонения точки объекта от центра пятна излучения, т. е. в простейшем случае, позиционно-чувствительным элементом служит специальный экран с координатной сеткой. Отклонения фиксируются на нем с точностью до 1 мм.

В более сложных системах в этих целях используют фотоприемники. В зависимости от назначения фотоприемные устройства имеют две, четыре и более светочувствительные площадки, включенные по мостовой схеме. При смещении объекта от заданного направления световая энергия, падающая на каждую из площадок, неодинакова. В результате возникает разностный ток, величина которого пропорциональна смещению объекта, а полярность указывает направление отклонения. Сигнал рассогласования используется в регистрирующих приборах или служит входным сигналом исполнительных механизмов автоматических систем управления.

Отклонения от вертикали при строительстве высотных объектов и сооружений в настоящее время измеряются с помощью лазерных зенитцентриров (ЛЗЦ). Первый из них — ЛЗЦ-1 — действовал еще при сооружении Останкинской телевизионной башни в Москве. Его модификация — прибор ЛЗЦ-2 для контроля вертикальности положения высотных сооружений при строительстве и эксплуатации. Ориентировочная потребность в этих приборах на 1976—1980 гг. — несколько тысяч штук.

Если мы уж заговорили о лазерных центрирующих устройствах, то, помимо строительства, они применяются на сборке крупных станков, самолетов, кораблей, при взаимоточной установке различных деталей. Они оказались очень эффективными при юстировке элементов сложных оптических систем, сборке и монтаже крупногабаритных оптических и радиолокационных антенн.

Для геодезической съемки подкрановых путей, контроля установки ленточных конвейеров, разбивки осей эстакад, полотна железных и шоссейных дорог и взлетно-посадочных полос аэродромов в Советском Союзе выпускаются промышленностью лазерные визиры ЛВ-1, ЛВ-2, ЛВ-4, ЛВ-5. Они представляют собой сочетание лазерного излучателя и приемного устройства.

Наиболее современный визир — прибор ЛВ-5 на базе гелий-неонового лазера ОКГ-13. Его крепят на обычном геодезическом штативе так, что он поворачивается в горизонтальной плоскости на 360°. Точность наведения в горизонтальной плоскости $\pm 15''$. Дальность действия — 2 км независимо от времени года и суток. Масса прибора — 5,2 кг.

С помощью ЛВ-5 были выполнены сложные геодезические работы при разбивке эстакады в районе Рижского вокзала в Москве. Эстакаду нужно было проложить над участком с большим количеством действующих железнодорожных путей. Ось трассы была разбита за 7 ч двумя операторами без нарушения движения. Если бы пришлось воспользоваться обычными геодезическими инструментами, то железнодорожное движение надо было приостановить не менее чем на 14 ч.

Лазерные визиры применялись для геодезической съемки подкрановых путей кабельного цеха ГРЭС и цехов металлургического завода, профиля поверхности взлетно-посадочной полосы аэродрома в Сочи, контроля прямолинейности расположения транспортирующих механизмов в Михайловском разрезе Курской магнитной аномалии, выверки осей вращающихся печей, рихтовки железнодорожного полотна и т. п.

За рубежом появляется повышенный интерес к лазеру как потенциальному средству передачи энергии на большие расстояния. Предварительные оценки свидетельствуют о том, что передача энергии с помощью лазера может конкурировать с обычными методами энергетического обеспечения. Проводятся работы, цель которых — оценить реальные возможности лазера в передаче энергии на большие расстояния, преобразовании энергии в реактивную тягу, усилие на валу и т. п. Рассматривается реальность передачи энергии в космос, создания термоядерных космических станций с лазерным инициированием, обеспечения маневра космических кораблей и др.

Сотрудники Стэнфордского университета исследовали работу поршневого двигателя с питанием от лазерной установки. Эксперимент выполнялся на двигателе простой конструкции, небольших размеров и массы. В принципе возможность работы такого устройства доказана.

Ожидается, что подобные установки могут иметь КПД свыше 40%. Однако сегодня нет подходящих материалов для окон, материалов, пропускающих излучение лазера на CO_2 . Кроме алмаза, но он дорог и из него можно изготовить пластины очень небольших размеров.

Преобразование лазерной энергии в аккумулируемую химическую перспективно. Наибольшее внимание при-

влекает процесс фотодиссоциации воды, поскольку водород очень эффективное ракетное топливо. Он может храниться в разнообразных формах — газообразной, жидкой, в виде соединений. Сопутствующие проблемы, которые требуется решить, — разработка эффективных коротковолновых лазеров (с длиной волны около 165 нм), а также разделение и хранение кислорода и водорода.

На космических кораблях работают солнечные батареи. Однако они имеют большую массу и дороги. Использование лазерного излучения вместо солнечного прежде всего уменьшило размеры батарей. Но в таких приборах преобразуется в электрическую не более 40% энергии света, остальные 60% превращаются в тепло.

Лазеры могут использоваться и в службе безопасности движения. Существует лазерный измеритель дальности видимости. С его помощью определяется прозрачность атмосферы вдоль железнодорожного полотна. Прибор имеет пять поддиапазонов, соответствующих различным значениям дальности видимости: свыше 300, от 300 до 150, от 150 до 90, от 90 до 30, менее 30 м. Прибор конструктивно — передатчик на лазерном диоде, формирующая оптика с юстировочными приспособлениями, блок питания и подогреватель для очистки окон при тумане и снегопаде. Диод генерирует пучок с расходимостью 1° в инфракрасном диапазоне. Его излучение безопасно для глаз.

Выходной сигнал приемной части измерителя выводится на индикатор. Специальная сигнализация предупреждает машиниста о тумане, пылевой или песчаной буре, дыме и других факторах, угрожающих безопасности железнодорожного движения. Предусмотрен автоматический дистанционный контроль видимости в каждом поддиапазоне с выводом информации на ленту или щитовой прибор.

Описанное устройство имеет некоторые преимущества по сравнению с измерителями, которые используют рассеяние света; упростилась корректировка нулевого уровня при изменении условий освещения.

В США разработано и изготовлено лазерное оборудование «Лазерфото» для передачи фотоинформации издательствам и телестудиям. Оно способно высококачественно воспроизводить фотоинформацию, переданную по телефонным линиям,

Для передачи фотоинформацию закладывают в передающий блок. Она сканируется лазерным пучком диаметром 0,1 мм. Изображение «преобразуется» в электрические сигналы, которые отправляются в линию связи. Одновременно с передачей фотоинформации лазер, синхронизированный с передающим устройством, экспонирует специально обработанную сухую фотобумагу. Процесс экспонирования одного снимка — около 8 мин. Затем фотоноситель проходит через блок термообработки, проявляется фотоснимок 20×25 см — по существу, репродукция оригинала, отрезается от рулона, после чего устройство начинает передавать следующий фотоснимок.

Срочная структура изображения уничтожается специальным сканированием: одновременно с перемещением по горизонтали (строчная развертка) лазерный пучок колеблется по вертикали, причем в 1000 раз быстрее, чем по горизонтали. В результате свет равномерно распределяется по толщине каждой строки развертки. Колебания пучка по вертикали и одновременно изменения его интенсивности в соответствии с тоновыми вариациями передаваемого изображения осуществляются с помощью акустооптического модулятора.

Длительность передачи фотоснимка может быть сокращена до 3 мин, если сети передачи фотоинформации сформировать на принципах цифрового кодирования.

* *
*

Девятая пятилетка — время интенсивного внедрения лазерной технологии в различные отрасли промышленности. На практике доказана ее высокая эффективность для прошивки, резки, сварки, термообработки и других целей: практически каждый вложенный рубль приносит 4—5 руб. дохода.

В соответствии с решениями XXV съезда КПСС темпы оснащения отраслей народного хозяйства лазерным технологическим оборудованием в десятой пятилетке резко возрастут. Будут интенсифицированы исследования и разработки новых технологических процессов. Увеличится выпуск высокопроизводительных многопостовых установок. Улучшатся качественные показатели лазерной технологии на основе более совершенного управления параметрами излучения и контролем характе-

ристик технологических процессов. Увеличатся и мощности лазеров, стабилизируются их параметры, начнут использоваться встроенные системы управления и контроля, в том числе микро-ЭВМ. Это резко повысит производительность лазерного технологического оборудования.

В рамках небольшой брошюры невозможно рассмотреть все известные применения лазеров, такие, например, как управляемый термоядерный синтез, управляемые химические реакции, разделение изотопов, получение сверхчистых веществ, лазерная связь и система передачи информации, измерение скорости, голографические приборы, устройства записи и хранения информации, распознавания образов. Но если читатель уяснит, какой существенный вклад вносят лазерные устройства в современную промышленную технологию, то автор будет считать свою задачу выполненной.

Литература

Анниси́мов С. И. и др. Действие излучения большой мощности на металлы. М., «Наука», 1970.

Белосто́цкий Б. Р. и др. Основы лазерной техники. М., «Советское радио», 1972.

Вейко В. П., Либенсон М. Н. Лазерная обработка. Л., 1973.

Водоватов Ф. Ф. и др. Лазеры в технологии. Под ред. М. Ф. Стельмаха, М., «Энергия», 1975.

Рябов С. Г. и др. Приборы квантовой электроники. Под ред. М. Ф. Стельмаха, М., «Советское радио», 1976.

Рыка́лин Н. Н. и др. Лазерная обработка материалов. М., «Машиностроение», 1975.

Суми́нов В. М., Скворчевский А. К. Уравновешивание вращающихся тел лучом лазера. М., «Машиностроение», 1974.

Суми́нов В. М., Авсиевич Е. А. Метод повышения качества лазерного сверления. — «Приборы и системы управления», 1974, № 9.

Семенов А. Н. Квантовая электроника и практика. М., «Знание», 1972.

Уважаемые читатели!

В 1978 г. в серии «Радиоэлектроника и связь» намечаются к изданию следующие брошюры.

В брошюре доктора технических наук Г. Г. Бубнова «**Антенно-фидерные устройства**» рассказано о технологии антенностроения как отрасли, имеющей особую важность не только по техническим соображениям, но и в сравнении ее относительной и абсолютной стоимости (производства, изготовления, эксплуатации). Рассказано о новых антенных системах: периодических антенных системах, зеркальных, линзовых, рупорных антеннах и их комбинациях. Описаны фазированные решетки с применением в качестве излучателей разнообразных элементарных антенн, а также новые перспективные схемы, отличающиеся большими возможностями в части управления их электродинамическими характеристиками.

В Москве 21—25 июня 1977 г. проходил Всемирный электротехнический конгресс. Первый электротехнический конгресс проходил в Париже в 1881 г., нынешний конгресс в Москве — одиннадцатый. Девиз конгресса — «Настоящее и будущее электротехники» — определил и основные научные темы, подлежащие обсуждению.

В брошюре «**Итоги одиннадцатого электротехнического конгресса**», составленной коллективом авторов, коротко изложены некоторые обсуждавшиеся на конгрессе проблемы, представляющие интерес для подписчиков серии «Радиоэлектроника и связь». Будут рассмотрены проблемы создания МГД-генератора, передачи электроэнергии на расстояния, создания и использования «теплых» сверхпроводников, проблемы вычислительной и микроэлектронной техники, запоминающих устройств и др.

Увлекательный мир компьютеров с предельно возможными на сегодня характеристиками, суперпроводимость и суперкриотроны — идеальная техника для реализации ЭВМ. О колоссальных трудностях внедрения в вычислительную технику джозефсоновских сверх-

Евгений Александрович Авсиевич

**ЛАЗЕРЫ В ПРОМЫШЛЕННОЙ
ТЕХНОЛОГИИ**

Гл. отраслевой редактор В. П. Демьянов

Редактор Г. И. Флиорент

Мл. редактор Н. А. Львова

Обложка художника А. С. Григорьев

Худож. редактор Т. И. Добровольнова

Техн. редактор А. М. Красавина

Корректор С. П. Ткаченко

ИБ № 1074

Т-04221. Индекс заказа 84402. Сдано в набор 26/XII-77 г. Подписано к печати 6/I-78 г. Формат бумаги 84×108/32. Бумага типографская №1. Бум. л. 1. Печ. л. 2. Усл. печ. л. 3,36. Уч.-изд. л. 3,35. Тираж 62 930 экз. Издательство «Знание». 101835, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Заказ 2280. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 8/4. Цена 11 коп.

проводящих микроэлементов и создания на их основе супер-ЭВМ с чрезвычайно высокими показателями по быстродействию, емкости памяти, производительности и другим параметрам рассказано в брошюре А. П. Кочура «Супер-ЭВМ». Вступительную статью к этой работе написал академик В. М. Глушков.

Принцип работы лазерного и полупроводникового кинескопов. Ориентировочные сроки освоения их производством и подготовки к серийному выпуску. Как изменятся основные параметры телевизионного приемника (экономичность, четкость, контрастность, цветопередача и др.) с применением этих кинескопов. Возможности совершенствования проекционных приемников. Изложение основных физических принципов построения и схематические особенности стереотелевизионных систем.

Со всеми этими вопросами подписчик серии может познакомиться в брошюре **«Новые разработки телевизионной техники»**, куда войдут три статьи: **«Стереотелевидение»**, **«Телевизор с лазерным кинескопом»**, **«Плоский телевизионный экран»**.

На ВДНХ 6—14 сентября проходила Международная выставка книги. Один из экспонатов этой выставки — книга Арпад Барна и Дэн И. Порэта **«Введение в микро-ЭВМ и микропроцессоры»**. Актуальность материала, хороший стиль изложения, удачное формулирование неизменно привлекали внимание посетителей выставки к этой книге.

Изложение темы удачно сочетается с многочисленными образными примерами, позволяющими популярно разъяснить наиболее трудные моменты рассказа о современной вычислительной технике.

Перевод с английского выполнил кандидат технических наук В. А. Свириденко.

Брошюра **«Электросвязь и научно-технический прогресс»** рассчитана на читателей, интересующихся техникой связи. В ней в популярной форме рассказано о влиянии достижений научно-технического прогресса на развитие средств связи. Описаны основные системы связи и современные методы передачи информации. Многочисленные сравнительные характеристики, интересные и образные примеры делают доступным изложение достаточно сложных процессов обработки, хранения, передачи и приема сигналов.