

ФИЗИКА

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



1989/9

Н.Г.Дружинин

Г.П.Марков

В.И.Станко

ЗВУЧАЩИЙ «СВЕТ» И «СВЕЯЩИЙСЯ» ЗВУК



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

ФИЗИКА

9/1989

Издается ежемесячно с 1967 г.

Н. Г. Дружинин,
Г. П. Марков,
В. И. Станко,

ЗВУЧАЩИЙ «СВЕТ»
И «СВЕТАЩИЙСЯ» ЗВУК



Издательство «Знание» Москва 1989

ДРУЖИНИН Николай Гаврилович — ведущий инженер,
МАРКОВ Геннадий Петрович — кандидат физико-математи-
ческих наук, старший научный сотрудник,
СТАНКО Виктор Иванович — доктор химических наук, про-
фессор, начальник отдела — сотрудники Института физико-
технических проблем.

Редактор: КУТУЗОВА К. А.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Акустическая генерация электромагнитных колебаний	8
Электромагнитная генерация акустических колебаний	25
Взаимные акустоэлектромагнитные преобразования в геологических и биологических средах	42
Заключение	62
Литература	64

Дружинин Н. Г., Марков Г. П., Станко В. И.
М 27 Звучащий «свет» и «светящийся» звук. — М.:
Знание, 1989. — 64 с. — (Новое в жизни, науке,
технике. Сер. «Физика»; № 9).

ISBN 5-07-000909-5

15 к.

В брошюре рассказывается об эффектах взаимного преобразова-
ния акустических и электромагнитных колебаний в различных мате-
риальных средах. Такое преобразование носит всеобщий характер, и
знание его позволит по-новому подходить к ряду проблем не только
физики, но и геологии, биологии, медицины.

Рассчитана на широкий круг читателей.

3702020000

ББК 22.32

ISBN 5-07-000909-5

© Издательство «Знание», 1989 г.

ВВЕДЕНИЕ

Механические (акустические) и электромагнитные колебания широко распространены в природе. По существу окружающая человека среда — это не только земля, вода, воздух и другие элементы вещественного окружения, но и сложный акустоэлектромагнитный континуум, определенное поле, в котором генерирует сам человек. Сейчас мы знаем, что частотная граница спектра акустических волн в твердых телах может достигать значения 10^{13} Гц, частоты электромагнитных волн могут быть на много порядков выше.

Звук и свет как наиболее информативные для человека области спектров акустических и электромагнитных волн издавна привлекали к себе пристальное внимание ученых. Из всего спектра акустических волн человек обычно воспринимает на слух диапазон 20 Гц—20 кГц (10 октав), а видимый свет захватывает область $(4—8) \cdot 10^{14}$ Гц (1 октава). Однако, не игнорируя этого факта, сейчас уже мы можем допустить, что посредством иных, более сложных, чем слух и зрение, физиологических механизмов человек способен воспринимать информацию в гораздо более широких диапазонах частот. Известно, например, что некоторые люди ощущают «невидимый свет» и «неслышимый звук».

Эта брошюра знакомит читателя с многочисленными эффектами превращения механической энергии в электромагнитную и обратно. Изучение этих эффектов находится на стыках различных научных направлений: механики, акустики, электромагнетизма, оптики, спектроскопии, взаимодействия излучения с веществом, химии и многих других. Можно утверждать, что любая материальная среда представляет собой преобразователь акустических колебаний в электромагнитные и обратно. В этом преобразовании мы видим один из важнейших

примеров проявления фундаментального закона природы — закона сохранения энергии.

В процессе любого взаимодействия (будь это столкновение космических тел или элементарный химический акт) происходит преобразование энергии из одного вида в другой. Явления преобразования акустической энергии в электромагнитную известны человечеству с древнейших времен (гром и молния, электризация при трении, ударе). Начало научному исследованию преобразований в твердых телах механической энергии в электромагнитную положили открытия магнитострикционного (1847 г.) и пьезоэлектрического (1880 г.) эффектов, суть которых заключается в возникновении магнитного или электрического поля при механическом напряжении ферромагнетика или пьезоэлектрика.

Замечательным свойством явлений магнитострикции и пьезоэффекта является их обратимость, поэтому магнитострикционные и пьезоэлектрические кристаллы используются сейчас в качестве как акустоэлектромагнитных, так и электромагнито-акустических преобразователей. Эффективность таких преобразователей обычно невысока: например, для кварцевого преобразователя — 10^{-2} . При этом считается, что основная часть энергии возбуждающего сигнала рассеивается по объему преобразователя. Однако процесс преобразования носит сложный резонансный характер, и спектр резонансных частот возбуждаемого сигнала связан с размером, структурой и составом пьезопреобразователя. Поэтому, оценивая эффективность преобразования, надо учитывать спектральный состав входного и выходного сигналов, а также состав и строение преобразующей среды, поскольку сигнал отклика отражает не только параметры воздействия, но и свойства преобразователя на разных структурных уровнях. В общем случае процесс преобразования какого-либо сигнала средой схематично можно изобразить так:

воздействие → среда → отклик.

Обычно воздействие на среду (равно как и последующий отклик) характеризуется двумя параметрами: частотой и амплитудой. При этом у любого сигнала различают две частоты: несущую (высокую) и модулирующую (низкую). Взаимодействие колебаний со средой характеризуется присущими данной среде резонансами,

обусловленными совпадением воздействующих частот и собственных частот среды. Спектр собственных частот среды также можно разделить на две области. Высоко-частотная область связана с энергетическими уровнями атомов и молекул, низкочастотная — с характерными размерами среды.

Наиболее эффективное взаимодействие (резонанс) имеет место при совпадении разности энергий между уровнями и размеров соответствующих элементов среды с длинами волн воздействующего излучения. Следовательно, в процессе преобразования колебаний несущая частота действует на микроуровне, она как бы «ключ» к среде, а частота амплитудной модуляции — на макроуровне, она — резонансная для макрочастей среды. От несущей частоты зависит эффективность поглощения средой энергии воздействия, то есть она соответствует резонансной природе вещества, а модулирующая частота — характеру поступления этой энергии.

Так, при постоянной интенсивности электромагнитного излучения (частота модуляции равна нулю), поглощаемого жидкостью или газом, они не «звучат», однако откликаются на переменную интенсивность излучения. Наиболее сильное воздействие на среду оказывает последовательность импульсов, поскольку наряду с частотой повторения импульсов f спектр частот модуляции воздействующего сигнала по интенсивности содержит бесконечное множество гармоник $f_n = n f$ ($n = 1, 2, 3, \dots$). При этом появляется более широкая возможность возбудить среду и заставить ее откликнуться на разных уровнях организации.

Амплитуда воздействия важна по той причине, что для любой среды должны существовать нижний и верхний пределы отклика. Если амплитуда воздействия выше нижнего предела отклика, среда реагирует на воздействие. В этом случае частота следования импульсов отклика определяется амплитудой воздействия и характерной для среды максимальной амплитудой сигналов отклика. (Наличие такого «потолка» отклика для неорганических сред пока не установлено, но в ряде случаев он существует: например, для зрительной и слуховой систем биообъектов.) При этом более мощное излучение, поступающее в среду, перерабатывается в большее количество импульсов отклика.

Например, интенсивность света, падающего на сетчатку глаза, кодируется частотой импульсов, посылаемых по зрительному нерву. Частота импульсов примерно соответствует логарифму освещенности сетчатки. Громкость кодируется в слуховой системе подобным же образом.

Аналогичная картина наблюдается в неживой природе. Большие деформация кристаллов или интенсивность ультразвукового воздействия на жидкость сопровождаются большей частотой генерации электромагнитных импульсов отклика.

До недавнего времени ферромагнетики и пьезоэлектрики считались единственными твердотельными преобразователями акустических и электромагнитных колебаний. Наиболее эффективно такие преобразования осуществляются при выполнении резонансных условий без изменения частоты, то есть при равенстве частот возбуждающих и возбуждаемых колебаний (условие синхронизма). Однако еще в прошлом веке было известно явление триболоминесценции — свечения под действием механических деформаций и разрушения. В 1949 г. при медленной деформации щелочно-галогидных кристаллов наряду с триболоминесценцией было обнаружено и электромагнитное излучение в радиодиапазоне. Эти эффекты не только устранили монополию пьезоэлектриков на преобразование механического сигнала в электромагнитный, но и показали возможность значительного изменения частоты (на несколько порядков) в результате такого преобразования. К настоящему времени подобные эффекты обнаружены в широком классе твердых тел.

Особого внимания как преобразователи различных видов колебаний заслуживают минералы, драгоценные камни и различные природные комплексы, поскольку история знакомства с ними человека изобилует множеством примеров, указывающих на специфические особенности таких преобразований. Кроме того, эффекты взаимодействия акустических и электромагнитных волн с горными породами играют важную роль при решении актуальной проблемы прогноза землетрясений, горных ударов в шахтах и других динамических процессов в недрах Земли.

В жидкостях превращение акустического излучения

в электромагнитное известно с 1934 г. (ультразвуковое свечение). Возбуждение акустических волн в жидкостях под воздействием электромагнитного излучения стало доступно наблюдению лишь с появлением мощных источников этого излучения — лазеров.

О трансформации электромагнитных волн в механические в газовой среде впервые сообщалось еще в 1880 г. А. Беллом, который заметил пульсации давления в замкнутом объеме газа при облучении его модулированным инфракрасным излучением. Затем подобный эффект в газах был обнаружен под воздействием ультрафиолетовой радиации и радиоволн сантиметрового диапазона. Об обратном эффекте, то есть о возникновении электромагнитного излучения в газах под действием звука в лабораторных условиях, данных почти нет, за исключением появления свечения газа в ударной волне.

Общеизвестно, что акустические и электромагнитные колебания оказывают сильное воздействие на биологические объекты, которые также являются своего рода преобразователями акустических и электромагнитных сигналов. Своеобразие биологических объектов определяется сложностью и большим числом уровней такого преобразования по сравнению с другими (небиологическими) объектами. Можно предполагать, что и сама жизнь на нашей планете возникла не без влияния эффектов взаимного акустоэлектромагнитного преобразования в предбиологическом веществе.

По-видимому, несмотря на сложность и многообразие проявлений процессов воздействия акустических и электромагнитных колебаний на различные физико-химические и биологические объекты, механизмы этих процессов должны иметь общие признаки и закономерности. Одним из таких общих признаков, на наш взгляд, является зависимость любого процесса от электронного строения атомов и молекул, участвующих в элементарном акте. Эта зависимость определяется взаимодействием кванта излучения с элементарной частицей вещества (атомом, молекулой и т. д.). Поэтому процесс взаимного преобразования акустических и электромагнитных волн будет зависеть не только от агрегатного состояния, формы и размеров преобразующей системы, но и от особенностей ее структуры и химического состава.

АКУСТИЧЕСКАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Твердые тела

По электрофизическим свойствам все твердые тела традиционно разделяются на диэлектрики, полупроводники и металлы. Будем и мы придерживаться этой классификации, поскольку процесс акустоэлектромагнитного преобразования в значительной степени определяется электрофизическими свойствами вещества, например наличием свободных зарядов.

Диэлектрики. Этот вид твердых тел известен отсутствием в них свободных электрических зарядов, благодаря чему диэлектрики обладают очень низкой электропроводностью. Однако известно также, что многие диэлектрики имеют легкоподвижные заряженные дефекты кристаллической решетки, способные перемещаться в кристалле под действием даже слабых упругих напряжений. Эта способность играет главную роль в процессах акустоэлектромагнитного преобразования в диэлектриках.

Электромагнитные эффекты, возникающие при механическом воздействии на твердые тела, легко наблюдать с помощью простой установки. К настоящему времени уже накоплено громадное количество экспериментальных данных. Здесь мы рассмотрим лишь те из них, которые характеризуют широту спектра электромагнитного отклика на механическое (акустическое) воздействие.

При статической или слабо меняющейся механической деформации диэлектриков наблюдают электромагнитные эффекты одновременно в громадном диапазоне частот. Во-первых, в пространстве вокруг диэлектрика появляется постоянное электрическое поле. Во-вторых, возникают переменные электромагнитные сигналы в диапазоне частот от десятков герц до десятков мегагерц, имеющие в основном вид импульсов. В-третьих, почти всегда синхронно с электромагнитными регистрируются световые импульсы. Это свечение, называемое триболюминесценцией, было известно гораздо раньше первых двух эффектов. Его можно наблюдать, деформируя и разрушая кристаллы в полной темноте.

Поднимаясь выше по шкале частот электромагнит-

ных волн, мы обнаруживаем также, что некоторые диэлектрики откликаются на механическое воздействие в области невидимого ультрафиолетового излучения и в диапазоне рентгеновских лучей с энергией 25 кэВ и выше. Еще более высокочастотное γ -излучение диэлектриков в лабораторных экспериментах пока не зарегистрировано.

Учитывая корпускулярно-волновой дуализм, здесь уместно отметить также эффекты корпускулярного излучения при механическом возбуждении диэлектриков. Так, например, при измельчении некоторых кристаллов наблюдается экзoeлектронная эмиссия, то есть эмиссия медленных электронов с энергией, не превышающей нескольких электронвольт. Любопытно, что довольно интенсивное излучение таких электронов происходит при разрушении кристаллов сахара. Не с этим ли связано пристрастие некоторых людей пить чай вприкуску? Недавно обнаружен еще один вид корпускулярного излучения при механическом возбуждении — эмиссия нейтронов при ударном разрушении кристаллов LiD. При условии достоверности этого результата он свидетельствует о протекании высокоэнергетических (ядерных) процессов в кристаллах при механическом разрушении. Кроме того, отсюда вытекает предположение об изменении массы вещества в процессе разрушения. На это указывают также эффекты интенсивной эмиссии атомарного водорода, наблюдаемые при разрушении водородсодержащих образцов.

Систематизация многочисленных фактов преобразования и классификация их по частоте электромагнитного отклика позволяют сделать простое, но важное обобщение: спектр электромагнитных сигналов при деформации и разрушении диэлектриков простирается от постоянного электрического поля и медленных его изменений до жесткого рентгеновского и корпускулярного излучений.

Как же объяснить столь широкополосное излучение деформируемых кристаллов? Общепринятая точка зрения на этот вопрос опирается на многочисленные эксперименты, в которых синхронно с радиочастотными и световыми импульсами регистрируются также акустические импульсы, обусловленные растрескиванием кристалла. Поэтому логично предположить, что возбуждение широкополосного электромагнитного излучения при деформа-

ции диэлектриков связано с возникновением трещин в кристалле.

Процесс развития трещины можно представить как образование своеобразного высоковольтного микроконденсатора, обкладками которого являются борта развивающейся трещины с разделенными на них электрическими зарядами. Вопрос о причинах разделения зарядов на бортах трещины для различных материалов решается по-разному. Механизм разделения зарядов в ионных диэлектриках связывают с неоднородной деформацией на бортах образующейся трещины и выходом заряженных дислокаций. При этом считается, что весь заряд сосредоточен в вершине трещины, благодаря чему там создается высокое электрическое поле. Согласно результатам измерения электрического заряда, возникающего на поверхности деформируемого ионного кристалла за счет смещения заряженных дислокаций, и теоретическим расчетам напряженность поля в вершине трещины может достигать значения 10^8 В/см. В некоторых других диэлектриках и полупроводниках разделение зарядов обусловлено донорно-акцепторным механизмом перераспределения электронов и ионов при межмолекулярном взаимодействии бортов трещины. В этом случае заряд распределен на бортах трещины в виде знакопеременной мозаики.

Главным для теории и эксперимента остается вопрос о причинах электромагнитного излучения при деформации. Однозначного решения его пока нет. В зависимости от частотного диапазона излучения предлагаются различные причины. Так, например, для излучения в радиодиапазоне в настоящее время приняты следующие основные причины: 1) вследствие высоких электрических полей, приводящих к созданию пробивных напряжений, происходит электрический разряд (в газе или вакууме), плазма которого излучает в широком диапазоне частот, включая оптические и рентгеновские; 2) движение заряженных дислокаций и вакансий в вершине развивающейся трещины, а также движение мозаично заряженных бортов трещины и колебания двойных электрических слоев приводят к созданию электромагнитного поля в низкочастотной области радиодиапазона.

Излучение в оптическом и рентгеновском диапазонах связывается с перекачкой механической энергии в

энергию электрического поля трещины с последующей эмиссией электронов, которая и вызывает излучение в видимой, ультрафиолетовой и рентгеновской областях. В этом случае трещина уже играет роль микроускорителя заряженных частиц. Если эмиссия электронов происходит в газовой среде, то, ускоряясь в поле трещины, электроны вызывают ударную ионизацию газа, способствуя тем самым зажиганию газового разряда.

С точки зрения теории интересной является модель непосредственной перекачки механической энергии в энергию возбуждения атомов с последующим высвечиванием. Однако при объяснении импульсов люминесценции под действием малых деформаций кристаллов $KCl \cdot Si$ эта модель дает увеличение энергии на один атом на 5—6 порядков меньше, чем необходимо для освобождения электронов из ловушек и последующего их высвечивания. Поэтому предполагается концентрация механических напряжений на дислокациях, энергия которых может быть достаточна для освобождения электронов. Их последующие рекомбинации и приводят к излучению света.

Итак, мы видим, что трещина в кристалле может быть эффективным генератором электромагнитного излучения в громадном диапазоне частот. Однако иногда даже при слабых статических воздействиях кристалл начинает излучать радиосигналы и до появления акустических импульсов из образца, то есть до начала процесса образования трещин. Природа этого излучения представляет одну из основных загадок акустоэлектромагнитного преобразования в диэлектриках (непьезоэлектриках). Единственное пока объяснение его основано на возможности перемещения легкоподвижных заряженных дислокаций или других дефектов под действием малых упругих напряжений.

При прохождении через кристалл упругой акустической волны также возникает электромагнитное излучение, не связанное с образованием трещин. В спектре этого излучения преобладает основная частота возбуждающей упругой волны, хотя могут быть и ее высшие гармоники. С началом процесса образования трещин в спектре наблюдаются заметные изменения.

Интересные эффекты имеют место при одновременном воздействии на диэлектрик (непьезоэлектрик) слабой звуковой волны и переменного электрического поля.

В этом случае отклик представляет собой электрический сигнал суммарной и разностной частот воздействующих полей. Отмечалось также возникновение переменного электрического напряжения на диэлектрике при воздействии акустической волны и подаче на электроды постоянного электрического поля.

Регистрация излучения ионных кристаллов под действием упругих деформаций (до появления трещин) указывает на возможность упругой поляризации пьезоэлектрических диэлектриков. При этом локальное перераспределение зарядов под действием упругих напряжений может быть обусловлено обратимым смещением заряженных дислокаций. Такой подход объясняет многие экспериментальные результаты, например, различия интенсивностей радиоизлучения упругодеформированных кристаллов KCl, NaCl, LiF, хорошо коррелирующие с зарядом дислокаций и пределом текучести.

Следует указать также еще одну причину радиоизлучения некоторых пьезоэлектрических кристаллов, не связанную с трещинообразованием. Это недавно открытый флексоэлектрический эффект, суть которого заключается в возникновении переменного электрического поля под действием градиента упругих напряжений, создаваемого, например, акустической волной.

В магнитоупорядоченных диэлектриках преобразование акустических и электромагнитных волн возможно за счет эффекта, обратного магнитострикции. При изменении упругих напряжений или прохождении упругой волны наблюдаются синхронные изменения намагниченности ферромагнетика. Многодоменные ферромагнетики так же, как и сегнетоэлектрики, могут генерировать излучение в радиодиапазоне при перестройке доменной структуры в поле упругих напряжений.

Итак, теперь мы знаем, что любой диэлектрик при статическом механическом воздействии и разрушении, а также под действием упругой звуковой волны способен генерировать электромагнитные сигналы в необычайно широком частотном диапазоне: от 0 до частот жесткого рентгеновского излучения. Этот вывод основан на громадном количестве экспериментальных фактов, однако объединяющего эксперимента, в котором бы удалось зарегистрировать одновременно весь спектр электромагнитного поля, пока не поставлено. По-видимому, отсутствие такого эксперимента можно объяснить не только

известными аппаратурными трудностями, но и недостаточной ясностью наших представлений об едином характере процесса акустоэлектромагнитного преобразования.

Другой, не менее важный, вывод состоит в том, что спектр электромагнитного отклика зависит от физико-химических свойств преобразующей среды. Правда, конкретных результатов, подтверждающих эту зависимость для диэлектриков, немного, ибо специально с этой целью такие эксперименты не проводились. Для жидкостей и газов (см. ниже) зависимость спектра отклика от химического состава будет видна более явно.

Полупроводники. Наличие в полупроводниках относительно слабо связанных зарядов обуславливает несколько иные по сравнению с диэлектриком механизмы акустоэлектромагнитного преобразования. Основной из них, конечно, пьезоэффект, однако мы не будем рассматривать здесь классический его вариант, поскольку он и так хорошо известен. Кроме того, классический (линейный) пьезоэффект с максимальной эффективностью работает на основной частоте механического возбуждения, в то время как нас интересуют прежде всего акустоэлектромагнитные преобразования с изменением частоты. Одним из таких преобразований является нелинейный пьезоэффект.

В последнее время интенсивно исследуется взаимодействие в полупроводниках упругих волн ультра- и гиперзвукового диапазонов и электромагнитных волн СВЧ-диапазона. Одним из вариантов такого взаимодействия является генерация радиочастотного электрического поля при взаимодействии двух акустических волн. В кристаллах с нелинейным пьезоэффектом две такие встречные волны с частотами F_1 и F_2 могут преобразоваться в электромагнитную волну с частотой $f = F_1 + F_2$. При взаимодействии двух поверхностных акустических волн генерация излучения в радиодиапазоне также происходит лишь при выполнении условия синхронизма:

$$f = F_l \pm F_s. \quad (1)$$

Здесь F_l , F_s , f — частоты продольной, поперечной и электромагнитной волн соответственно. Условие (1) показывает, что при взаимодействии двух акустических волн может происходить как увеличение, так и уменьшение частоты возбуждаемого излучения. Если акусти-

ческие волны поляризованы одинаково, преобразование происходит без изменения частоты.

Явление генерации радиоизлучения в полупроводниках объясняется действием индукционного механизма связи электромагнитных и акустических волн, при котором рассматривается движение электронов относительно движения решетки (под действием звука). Электромагнитные колебания в пьезополупроводнике возбуждаются одновременно с акустическими. Эффективность такого преобразования, то есть отношение энергий электромагнитных и акустических колебаний, пропорциональна отношению квадратов скоростей звука и света в полупроводнике. При высоких частотах электромагнитных волн эта эффективность ничтожна ($\sim 10^{-10}$).

Однако ситуация существенно меняется при помещении пьезополупроводника во внешнее постоянное магнитное поле определенного направления. В этом случае скорость электромагнитных волн в полупроводнике может настолько уменьшиться, что при некоторых частотах электромагнитная и акустическая энергии могут сравняться. Теория этого вопроса достаточно сложна, и мы не будем здесь останавливаться на ней, добавим только, что совместное применение электрического и магнитного полей позволяет обеспечить равенство энергий акустической и электромагнитной волн при более высоких частотах. Если такой пьезополупроводник использовать как сердечник в катушке, то в ней будет генерироваться переменный ток с частотой возбуждающего звука. При этом условие синхронизма $F = f$ естественно вытекает из требования равенства энергий акустических и электромагнитных колебаний.

Если при акустическом возбуждении радиоволн условие синхронизма приемлемо, то оно теряет смысл при акустическом возбуждении света — акустолюминесценции.

Предполагается, что спектр акустолюминесценции связан с электронными переходами в донорно-акцепторных парах и, следовательно, зависит от параметров звука и химического состава полупроводника. Например, красное свечение кристалла ZnTe с примесью Mn при воздействии ультразвуковой волны с $\lambda \sim 10$ МГц объясняется внутрицентральной люминесценцией ионов Mn^{2+} . При возбуждении ультразвуковых колебаний ($F = 1,9—15$ МГц) в ниобате лития и германате висмута наблю-

далось излучение почти во всей видимой области. При этом яркость свечения прямо связана с амплитудой упругих колебаний и максимальна при резонансной для данного образца ультразвуковой волне.

Возбуждение пьезоактивного ультразвука в CdS вызывает акустолюминесценцию при пороговой интенсивности звука 10 Вт/см^2 . При частоте ультразвука 15 МГц спектр акустолюминесценции CdS представлял собой красную полосу с максимумом при $\lambda = 720 \text{ нм}$, оранжевую ($\lambda = 605 \text{ нм}$) и краевое зеленое излучение с резким максимумом при $\lambda = 520 \text{ нм}$.

Всякий цвет связан с определенными дефектами или центрами в кристалле, которые могут образовываться различными путями, в том числе и под действием акустической волны. Возвратно-поступательное движение дислокаций в поле упругих напряжений акустической волны создает парные дефекты типа вакансии — атом в междоузлии. Эти оптически активные центры и формируют спектры акустолюминесценции. Красная полоса, например, связана с излучательными переходами между вакансиями серы и кадмия, зеленое излучение — с переходом из донора Cd_i на акцептор S.

Амплитуда акустических смещений, при которых ультразвук начинает увеличивать интенсивность полос свечения в CdS, составляет $1\text{—}3 \text{ \AA}$, что близко к пороговому значению генерации собственных дефектов при люминесценции в CdS. Наряду с такой собственной акустолюминесценцией пьезополупроводника наблюдалось также свечение, обусловленное возбуждением газового разряда в воздухе с помощью пьезоактивного ультразвука. Ясно, что спектр этой приповерхностной акустолюминесценции отличается от спектра собственной люминесценции. Возникновение разряда связывается с возникновением высокого электрического поля ($\sim 10^4 \text{ В/см}$) за пределы образца.

Причина появления высоких электрических полей в полупроводниках та же, что и для диэлектриков, — образование трещин. Поэтому деформация полупроводников также будет приводить к процессам разделения и релаксации зарядов в трещине и, следовательно, к широкому спектру электромагнитного излучения и электронной эмиссии.

Металлы. Деформация и разрушение металлов сопровождаются как тепловым, так и нетепловым элект-

тромагнитным излучением. Тепловое излучение тел давно изучено, и его спектр описывается известной формулой Планка. Нетепловое деформационное излучение стало изучаться сравнительно недавно. В последние годы обнаружен целый ряд нетепловых электромагнитных эффектов при различных видах деформации металлов.

Многие исследователи отмечали возникновение электромагнитных эффектов при ударном сжатии образцов. Например, при импульсном сжатии металлических стержней обнаружены электромагнитные сигналы радиодиапазона. Считается, что основной вклад в радиоизлучение при таком воздействии вносит эффект возникновения объемных зарядов в ударной упругой волне, распространяющейся вдоль стержня. При этом вокруг стержня возникает потенциальное электрическое поле, изменяющееся с частотой упругой волны. Если размеры стержня ограничены, упругий импульс будет многократно отражаться от его концов, приводя к повторяющимся радноимпульсам.

При статической деформации металлы излучают свет, который появляется еще до разрушения и наиболее интенсивен в момент разрушения. Спектр такого свечения зависит от типа разрушаемого металла. При соударении металлических частиц в вакууме наблюдается линейчатый спектр импульсов света с резкими максимумами интенсивности, частоты которых различны для разных металлов.

Кроме светового излучения, при соударении обнаружены также импульсы рентгеновского излучения двух типов: характеристические K -, L - и M -излучения атомов металлов и тормозное излучение электронов в расширяющейся плазме. Возникновение рентгеновского излучения при соударении металлических тел объясняется возбуждением внутренних электронных оболочек атомов при ударном разрушении кристаллической решетки, то есть подразумевается непосредственное возбуждение рентгеновских уровней при колебательном воздействии на атом. Согласно этому механизму в инфракрасном спектре излучения при соударении должен быть максимум, соответствующий резонансной частоте возбуждения решетки.

Любопытный результат был получен при исследовании спектра деформационного излучения стали. Он охватывает область от сантиметровых радиоволн до ниж-

ней границы γ -излучения с энергией выше 10^4 эВ. Возможное присутствие в спектре γ -излучения позволяет предположить возбуждение атомного ядра за счет уменьшения объема атома при деформации.

Таким образом, спектр деформационного излучения металлов распространяется от радиоволновой области до рентгеновского и даже γ -излучения. Возникновение электрических разрядов в трещине, являющихся одной из причин излучения неметаллических материалов, в металлах считается невозможным из-за чрезмерной малости времени релаксации заряда (менее 10^{-10} с). Вероятно, по этой же причине в чистых металлах не наблюдалась эмиссия электронов.

Итак, все твердые тела вне зависимости от их физических свойств и структурного строения способны преобразовывать акустические колебания в электромагнитные. При этом изменение частоты чаще всего не подчиняется условию синхронизма. Систематизация данных об изменении частоты при акустоэлектромагнитном преобразовании весьма затруднительна из-за отсутствия сведений о частотном составе воздействующего акустического сигнала (особенно при статической деформации и разрушении). В современной акустике изучаются звуковые колебания с частотами от 0 до 10^{13} Гц. На электромагнитной шкале этот диапазон соответствует области от постоянных электрических и магнитных полей до инфракрасного излучения. Однако приведенные данные показывают, что даже при одном и том же типе механического воздействия генерируются электромагнитные сигналы в диапазоне от сверхнизких частот до γ -излучения.

Зависимость спектра отклика от свойств самого преобразователя изучена еще недостаточно. Задача интерпретации спектра электромагнитного излучения чрезвычайно сложна и часто решается неоднозначно. Тем не менее можно предположить, что спектр механически возбуждаемого излучения в значительной степени определяется химическим составом излучающей среды.

Жидкости

К эффектам, которые сопровождают переход акустической энергии в энергию электромагнитного поля в жидкостях, относится ряд различных электрокинетических

явлений. Такие явления наблюдаются, например, в двух-фазных системах и выражаются в возникновении разности потенциалов в жидкости в направлении оседания находящихся в ней взвешенных твердых частиц (потенциал оседания), а также возникновении разности потенциалов между концами капилляра или между поверхностями пористой диафрагмы, через которую продавливается жидкость (потенциал течения). Величины потенциалов течения и оседания зависят от концентрации и состава растворов, изменения рН, температуры, природы пористой среды, размера и состава частиц и других факторов.

К электрокинетическим относятся также эффекты, наблюдаемые при быстром смещении внешней границы в электролитах. Амплитуда, знак и крутизна фронта электрического сигнала, возникающего в электролитах при таком переходном процессе, зависят от подвижности анионов и катионов, а также от скорости смещения внешней границы. Меньшей скорости смещения соответствуют меньшие амплитуды и крутизна фронта. Характеристики переходного процесса существенно зависят также от концентрации C электролита. При $C > 10^{-2}$ моль/л полярность сигнала во время переходного процесса сохраняется, время нарастания переднего фронта составляет десятки миллисекунд. При $C \leq 5 \cdot 10^{-3}$ моль/л характеристики переходного процесса существенно изменяются: появляется знакопеременная составляющая с амплитудой до 150 мВ, время нарастания переднего фронта уменьшается до нескольких микросекунд.

Предполагается, что появление электрического сигнала после смещения внешней границы связано с поляризацией электролита, обусловленной разными подвижностями катионов и анионов и разной степенью увлечения их проходящей по раствору упругой волной сжатия. Сделана попытка с помощью этого эффекта объяснить переходные электрические процессы на биомембранах (механорецепция). При этом предполагается, что эти процессы обусловлены не только изменением проницаемости мембран для катионов, но и нестационарными электрокинетическими явлениями во внутриклеточном электролите.

Давно известно, что между двумя неподвижными электродами, опущенными в электролит, возникает определенная для данной системы разность потенциалов $\Delta \phi$.

Перемещение электродов друг относительно друга будет изменять $\Delta\varphi$ в зависимости от характера перемещения. Например, в известном гальваническом элементе Даниэля ($\Delta\varphi = 1,07—1,14$ В) движение медного электрода увеличивает $\Delta\varphi$ на 4,6 мВ, перемещение цинкового электрода приводит к уменьшению $\Delta\varphi$ на 19 мВ. Если один из электродов колеблется около среднего положения, то $\Delta\varphi$ также испытывает синхронные колебания. Этот эффект, названный механогальваническим, по своей природе является электрокинетическим и упоминается уже в начале нашего века. Количественное объяснение его основано на теории Гельмгольца—Смолуховского и теории движения в вязкой жидкости.

В 1950 г. было открыто явление, возникающее при кристаллизации слабых водных растворов и некоторых органических диэлектриков. Оно заключается в том, что при движении фронта кристаллизации появляется межфазная разность потенциалов $\Delta\varphi \approx 10^2$ В, которая на 2—3 порядка больше межфазной $\Delta\varphi$ при равновесных условиях. Исследование характера зависимости $\Delta\varphi$ от химического состава жидкостей и режима кристаллизации равновесной (с атмосферным воздухом) дистиллированной воды и слабых водных растворов кислот и оснований показало, что $\Delta\varphi$ для дистиллированной воды ($6,0 < \text{pH} < 6,2$) тем больше, чем больше скорость нарастания льда v . Зависимость $\Delta\varphi(v)$ близка к линейной. При замораживании растворов кислот и оснований (растворитель — равновесная дистиллированная вода) получено, что $\Delta\varphi(\text{pH})$ — однозначная функция pH с максимумом при pH , отвечающем состоянию равновесия с атмосферой.

Возникновение при кристаллизации жидкостей межфазной разности потенциалов $\Delta\varphi$ послужило отправной точкой для предположения об электромагнитном излучении, которое должно сопровождать процесс кристаллизации. Так, в одном из экспериментов в полосе частот от 20 Гц до 10 МГц было обнаружено импульсное радиоизлучение, возникающее при кристаллизации воды и некоторых диэлектриков с максимумом при частотах 0,1—1 МГц. Предполагаемый механизм возникновения излучения связан с образованием трещин, хотя доказательства объяснения обнаруженного эффекта пока нет.

Картина явления может быть такой. В тонком кри-

сталлизуемом слое, примыкающем к фронту кристаллизации, возникает значительная разность потенциалов (до 10^2 — 10^3 В) при одновременном резком возрастании диэлектрической проницаемости ϵ . Вследствие неравномерности (в микромасштабе) процесса кристаллизации в кристаллизующейся системе возникают импульсы давления и периодические разрывы (микротрещины) в твердой фазе. В зоне трещины ϵ среды скачком уменьшается до ϵ воздуха. Соответственно в микроконденсаторе, образованном стенками трещины, резко возрастает первоначальная разность потенциалов. Электрический пробой воздушного промежутка за счет резкого возрастания $\Delta\phi$ на бортах трещин и является источником широкополосного радиоизлучения. По-видимому, радиоизлучение должно наблюдаться у всех веществ, при кристаллизации которых возникает значительная разность межфазных потенциалов.

Интересное свойство обнаружено у коллоидных систем: они способны генерировать электромагнитное излучение в процессе образования структур. Установлено, что в отличие от химических реакций, когда взаимодействие реагирующих веществ на атомно-молекулярном уровне сопровождается генерацией высокочастотного радиоизлучения, при структурообразующих процессах в коллоидно-дисперсных системах генерируется низкочастотное электрическое поле (десятки герц). Анализ спектров показывает, что каждая система генерирует поле со своей наиболее вероятной частотой.

Излучение жидкостей в оптическом диапазоне (ультразвуковое свечение) было замечено еще в 1934 г., но до сих пор механизм его остается до конца невыясненным. Это явление называли сонолюминесценцией, считая, что оно не связано с нагреванием. До недавнего времени в качестве возможных рассматривалось около десяти механизмов этого типа свечения. В настоящее время предпочтение отдается следующему: свечение обусловлено кавитацией — образованием газовых пузырьков в жидкостях под воздействием звука, а природа первичной активации молекул внутри кавитационного пузырька является либо тепловой, либо электрической. Возбужденные молекулы излучают свет, интенсивность которого может быть настолько высокой, что его легко обнаружить даже визуально в затемненной комнате.

Звуковые частоты, на которых наблюдается этот вид

люминесценции, охватывают широкий диапазон частот от 10—100 Гц до мега- и даже гигагерц, а световые частоты занимают весь видимый диапазон. Свечение обычно носит импульсный, вспышечный характер.

Спектр свечения жидкости является важной ее характеристикой. Для воды и водных растворов он непрерывен в интервале длин волны видимого диапазона. При высоких интенсивностях звуковых полей $I_{зв} \gtrsim 5$ Вт/см² спектры свечения сплошные, близкие по форме к спектру излучения абсолютно черного тела, тогда как при низких $I_{зв} \lesssim 0,5$ Вт/см² спектры имеют другой вид.

Так, спектр дважды дистиллированной воды при постоянной звуковой частоте $F = 535$ кГц и $I_{зв} = 5 \cdot 10^{-2}$ Вт/см² имеет дискретную структуру в интервале длин волн 300—700 нм. Такая структура спектра обусловлена растворенными в воде газами и группами H^+ и OH^- —продуктами диссоциации молекулы воды в парогазовой полости при воздействии ультразвука. Дискретность, а также отсутствие перераспределения энергии в спектре свечения воды при изменении $I_{зв}$ позволили сделать заключение, что механизм свечения не тепловой, а лежит в области более тонких эффектов взаимодействия ультразвукового поля и парогазовой смеси в пузырьке.

Этот вывод подтверждается результатами исследования влияния растворенного кислорода на спектр свечения. Обнаружено, что в коротковолновой области ($\lambda < 425$ нм) дискретный спектр практически не зависит от концентрации растворенного в воде кислорода, а в длинноволновой области ($\lambda > 450$ нм) зависит заметно, особенно при $\lambda = 610 \div 650$ нм, где существенны линии излучения кислорода. Следовательно, при низких интенсивностях звука более подходит не термический механизм свечения, а механизм электрических разрядов, поскольку он связан с образованием двойного электрического слоя на поверхности пузырька и тем самым зависит от структуры воды на границе раздела пузырька и от свойств растворенных в воде газов.

Влияние растворенных в жидкости органических и неорганических соединений, а также газов на свечение под действием ультразвука подтверждается многими экспериментами. Импульсный метод возбуждения кавитации (несущая звуковая частота $F = 0,7$ МГц) показал, что

при добавлении в дистиллированную воду соли NaCl и больших $I_{зв}$ интенсивность люминесценции монотонно растет с ростом концентрации соли, достигая восьмикратного увеличения в насыщенном растворе ($C = 270$ г/дм³) по сравнению с дистиллированной водой. Отмечено, что люминесценция в растворе возникает при больших $I_{зв}$, чем в дистиллированной воде. Растворенные в воде соли, как оказалось, не только вызывают появление характеристических линий, но и заметно изменяют общий эмиссионный спектр. Влияние растворенных газов на сонолюминесценцию весьма сложно и своеобразно.

В настоящее время имеется очень мало данных о свечении чистых органических жидкостей, не содержащих следов воды. Некоторые жидкости (например, метиловый спирт, хлороформ) практически не светятся в ультразвуковых полях, другие (например, чистый глицерин) начинают светиться, когда в них добавляют немного воды. Добавленные в воду органические вещества, как правило, тушат люминесценцию, но могут и усиливать ультразвуковое свечение воды (CS₂ и CCl₄).

В 1962 г. открыта сонолюминесценция в ртути. Она оказалась на несколько порядков более интенсивной, чем в воде. Заметим, что еще Ломоносов наблюдал электрический разряд при встряхивании ртути в запаянной колбе.

При быстром замораживании и охлаждении до низких температур жидкостей обнаружено излучение в оптическом диапазоне (криолюминесценция). Так, при быстром охлаждении замерзших насыщенных растворов солей тербия (хлоридов, сульфатов, нитратов и других) в 20-процентной перекиси водорода при 77 ± 5 К возникает несколько ярких вспышек света, состоящих из интенсивного центрального пика, предшествующих ему слабых пиков и большого числа уменьшающихся по интенсивности пиков после центрального.

Цвет вспышки (визуально) белесоватый, представляющий собой наложение зеленого свечения ионов Tb³⁺ и более кратковременного преобладающего сине-фиолетового свечения. Наиболее вероятное объяснение наблюдаемого свечения заключается в низкотемпературной механической деформации замерзшего раствора с образованием микротрещин и полостей и способности описываемой системы образовывать при охлаждении промежу-

точные комплексы иона Tb^{3+} с перекисью водорода. Следует отметить, что при замораживании отдельно перекиси водорода и растворов солей тербия в воде свечение не наблюдается.

Криолюминесценция является общим свойством прозрачных, слабо окрашенных жидкостей: в частности, чистой и морской воды, некоторых органических и неорганических растворителей, растворов, смесей, расплавов. Для возбуждения криолюминесценции необходима достаточно большая скорость охлаждения: от 0,1 до 30 град/с в зависимости от вещества. Временное распределение свечения имеет вид отдельных, следующих друг за другом импульсов со временем их затухания менее 0,1 с и частотой следования f от 10^{-1} до 10^2 Гц в зависимости от природы замораживаемой жидкости.

С ростом скорости охлаждения увеличиваются амплитуда и частота импульсов люминесценции. Оптический спектральный диапазон ее охватывает область 300—700 нм с максимальной интенсивностью в желто-зеленой части спектра. Большую роль в возникновении криолюминесценции играют электрические явления, происходящие при быстром замерзании жидкостей, такие, как пьезо- и пироэлектрические эффекты, разделение зарядов на свежееобразованных поверхностях, образование и движение заряженных дислокаций в твердой фазе. Их развитию способствуют механические напряжения, возникающие в быстро образующихся кристаллах аналогично тому, как это происходит при закалке. Это согласуется с возникновением сопутствующего свечению звукового излучения (потрескивания) и излучения в радиочастотном диапазоне.

В пользу электрической природы криолюминесценции свидетельствует также то, что способность к ней наиболее характерна для веществ, молекулы которых имеют большой дипольный момент. Так как интенсивность криолюминесценции и ее временное распределение характерны для каждого вещества, смеси или раствора, то это явление представляет собой высокочувствительный метод обнаружения и анализа состава и строения вещества.

При ультразвуковой кавитации в воде обнаружены импульсы рентгеновского излучения с энергией 1—10 кэВ, с большой точностью совпадающие с импульса-

ми сонолюминесценции. Предполагается, что рентгеновское излучение обусловлено тормозным излучением электронов, эмитированных с возбужденной поверхности кавитационного пузыря. Это предположение сделано с учетом квазикристаллических свойств большинства жидкостей (вода, спирты и т. п.) по аналогии с твердыми телами, для которых известна эмиссия электронов с краев трещин, сопровождающаяся электромагнитным излучением в видимом и рентгеновском диапазонах.

По-видимому, тормозное излучение должно присутствовать также и в других диапазонах длин волн, включая световой,— это так называемая тормозная компонента ультразвукового свечения.

Из приведенных данных видно, что электрическая гипотеза свечения жидкости объясняет зависимость интенсивности люминесценции от вида растворенного в жидкости газа, появление в жидкости различных радикалов при облучении ультразвуком, характер оптических спектров и их зависимость от интенсивности звука и ряд других эффектов. Для подтверждения этой гипотезы недостает надежного эксперимента по наблюдению электрического пробоя в пузырьке. Таким мог бы стать эксперимент по регистрации электромагнитного излучения в радиодиапазоне при звуковой кавитации в жидкости.

Газы

Основные данные об акустоэлектромагнитных преобразованиях в газовых средах получены для атмосферы и ионосферы. Лабораторных экспериментов и теоретических разработок по этому вопросу крайне мало. Одна из них рассматривает возможность генерации излучения субмиллиметрового диапазона на колебательных и колебательно-вращательных переходах молекул воды при охлаждении смеси горячего молекулярного водорода с молекулами водяного пара в сверхзвуковых потоках. Данная схема может быть использована в диффузионных H_2O -газодинамических лазерах для получения излучения с $\lambda = 163$ мкм, более интенсивного, чем в электроразрядных лазерах с $\lambda = 28$ мкм. Указывается на перспективность использования в лазерах возможности непрерывной генерации излучения дальнего инфракрасного диапазона ($\lambda = 28$ мкм) при сверхзвуковом расширении па-

ров воды. Ожидается получение высоких значений удельной энергии излучения, недостижимых пока для электроразрядных ладеров в режиме непрерывной генерации.

Примером перехода акустической энергии в электромагнитное излучение газа является свечение газа в ударной волне. Свечение, наблюдаемое при взрыве, представляет собой не хемилюминесцентную реакцию разложения взрывчатого вещества и не тепловое свечение продуктов взрыва — светится окружающий воздух, по которому распространяется ударная волна. Обнаружено также свечение ксенона в ударной трубке, причем число линий в линейчатом спектре увеличивалось по мере увеличения амплитуды волны, пока спектр не становился непрерывным.

Как уже отмечалось ранее, свечение газа, окружающего пьезокристалл LiNbO_3 , возбуждаемый звуковой волной с частотой 4—4,5 МГц, объясняется значительным электрическим полем, проникающим в газ из кристалла. Возбуждение свечения газа носит пороговый характер, яркость свечения близка к яркости маломощных неоновых лампочек. Спектры свечения различных газов, возбуждаемых пьезоактивным ультразвуком, совпадают со спектрами свечения в электрическом газовом разряде. Вместе с тем полученные спектры отличались от спектров акустилюминесценции ниобата лития, в частности, свечение было существенно более ярким, благодаря чему явление может найти применение в создании устройств преобразования типа «ультразвук—свет».

Таким образом, из всего спектра электромагнитного отклика газов мы сейчас знаем лишь о свечении их под действием ударной волны и о субмиллиметровом излучении в сверхзвуковом потоке. Причины отсутствия электромагнитного излучения в других диапазонах частот пока неясны. Это может быть связано с зависимостью спектра электромагнитного отклика от агрегатного состояния вещества-преобразователя, хотя, возможно, имеются и какие-либо иные причины.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Твердые тела

С практической точки зрения электромагнитное возбуждение звуковых волн в твердых телах не менее важ-

но, чем рассмотренный выше эффект преобразования акустической энергии в электромагнитную. Это связано прежде всего с возможностью получения высокочастотных звуковых колебаний (ультра- и гиперзвука), которые служат не только прекрасным инструментом исследования физических свойств твердого тела, но и сами являются мощным фактором воздействия на различные физико-химические процессы в веществе.

Смещение атома или иона в твердом теле определяется суммарным действием всех фононов, спектр частот которых простирается от основной частоты акустических колебаний в теле данных размеров F_0 до частоты собственных колебаний атомов в данном веществе $F_c \sim 10^{13}$ Гц. Принято считать, что этими частотами ограничивается весь спектр возможных акустических колебаний в твердом теле.

Так же, как и для прямого преобразования, универсального механизма обратного преобразования электромагнитного возбуждения в акустические волны в твердых телах нет. В зависимости от свойств среды, преобразующей электромагнитные колебания в акустические, и вида воздействующего излучения могут существовать следующие механизмы преобразования в твердых телах.

1) Стрикционные эффекты (электро- и магнито-стрикция). Электрострикцией обладает большинство диэлектриков, хотя часто этот эффект оказывается слабым. Роль электрострикции исследовалась в основном для случая оптической генерации звука. Магнито-стрикция свойственна только ферромагнитным материалам. Оба стрикционных эффекта не зависят от знаков электрических (E) или магнитных (H) полей и пропорциональны квадрату напряженности соответствующего поля. В отличие от электрострикции эффект магнито-стрикции обратим. В ферромагнитных материалах электромагнитные и акустические волны связаны между собой через магнито-стрикцию. Магнитоупругие (спиновые) волны в ферромагнетике могут быть возбуждены либо электромагнитным, либо акустическим излучением. В принципе магнитоупругие волны существуют в ферромагнетике и без внешнего возбуждения (тепловые магнитоупругие волны).

2) Обратный пьезоэффект. Наблюдается только в пьезоэлектриках (диэлектриках и полупроводниках) и является обычно линейной функцией напряженности при-

ложенного поля (в умеренных по величине полях). В сильных полях проявляется нелинейный пьезоэффект, который ответствен за параметрическое возбуждение звука в диэлектриках и полупроводниках.

3) Тепловой механизм. Связан с тепловым расширением вещества на фронте воздействующей электромагнитной волны или в фокусе лазерного луча. Преобладает в сильно поглощающих материалах при больших мощностях воздействующего излучения. С тепловым механизмом связывают поверхностное испарение, взрывное вскипание, оптический пробой вещества.

4) Вынужденное рассеяние Мандельштама—Бриллюэна и другие виды вынужденного рассеяния света. Любой из них можно рассматривать как процесс параметрического усиления электромагнитного (рассеянного) поля на частоте f_2 с возбуждением акустического поля на частоте $F = f_1 - f_2$. Такой процесс схематически можно записать в виде:

$$\text{фотон 1} \rightarrow \text{фотон 2} + \text{фонон} \quad (2)$$

$$\text{фотон 1} - \text{фотон 2} \rightarrow \text{фонон.} \quad (3)$$

При рассеянии Мандельштама—Бриллюэна были достигнуты коэффициенты преобразования (η) в несколько десятков процентов, следовательно, таким образом можно генерировать гиперзвук очень большой мощности. Каждый падающий фотон производит η фононов, так что отношение мощности звука к мощности падающего света $\eta F/f_1 \sim 10^{-5}$. Интенсивность возникающих при этом виде рассеяния звуковых волн может быть так велика, что возможно разрушение образца.

5) Изменение заполнения электронных уровней и образование радиационных дефектов (например, центров окраски). Эти процессы носят пороговый характер и возможны в том случае, когда энергия фотона $h\nu$ достаточна для их возбуждения.

6) Возмущение электронов проводимости и увлечение ими кристаллической решетки. Имеет место в металлах и полупроводниках со свободными носителями заряда. Физическая причина усиления или генерации акустических волн в системах с электронными потоками — черенковское излучение звука зарядом, движущимся со сверхзвуковой скоростью.

7) Механизм, связанный с колебательными движе-

ниями заряженных дислокаций в ионных кристаллах. Обнаружен пока только в пластически деформированных кристаллах. По своим характеристикам электроакустические эффекты, обусловленные этим механизмом, напоминают обратный пьезоэффект.

Кроме этих механизмов, следует отметить еще генерацию акустических колебаний потоками заряженных частиц и переходное оптико-акустическое излучение.

В настоящее время основными преобразователями электромагнитных колебаний в акустические (равно, как и наоборот) являются пьезо- и сегнетоэлектрические кристаллы, действующие по первым двум механизмам. В ферромагнетиках процесс электромагнитного возбуждения звука модифицируется дополнительными механизмами, связанными прежде всего с магнитострикционным взаимодействием. Магнитострикционные преобразователи используются в основном в специальных радиотехнических устройствах. Рассмотрим некоторые особенности эффектов электромагнитного возбуждения акустических волн в трех классах твердотельных преобразователей: диэлектриках, полупроводниках и металлах.

Диэлектрики. В диэлектриках возможны все механизмы преобразования, исключая сверхзвуковой дрейф носителей. К настоящему времени наиболее детально изучен тепловой механизм и два механизма параметрического возбуждения звука в твердых диэлектриках: вынужденное рассеяние Мандельштама—Бриллюэна и нелинейный пьезоэффект. Отметим, что в ферромагнитных диэлектриках, где силы Лоренца отсутствуют, основным механизмом электромагнитного возбуждения звука является магнитоупругое взаимодействие намагниченности с решеткой.

Электромагнитная генерация звука в средах, сильно поглощающих СВЧ-излучение, связывается обычно с тепловым механизмом. Частота генерируемого звука зависит от длительности и частоты следования СВЧ-импульсов.

При вынужденном рассеянии в поле электромагнитной волны накачки с частотой f_1 возбуждается прямая звуковая волна с частотой

$$F = 4 \pi v_s \epsilon^{1/2} f_1 / c,$$

где v_s — скорость звуковой волны, c — скорость света,

ϵ — диэлектрическая проницаемость, а также встречная электромагнитная волна с частотой

$$f_2 = f_1 \pm F.$$

При нелинейном пьезоэффекте возбуждаются две встречные акустические волны с частотами,

$$F = f_1/2.$$

С помощью указанных механизмов удается возбуждать гиперзвук и получать усиление внешних акустических волн. Однако для этого требуются весьма большие мощности излучения. Их можно существенно уменьшить компенсацией акустических потерь при наложении внешнего постоянного электрического поля.

Применение постоянного электрического поля при преобразовании электромагнитных колебаний в акустические дает возможность управления параметрами возбуждаемых звуковых волн. Такая возможность реализована в резонансном диэлектрическом преобразователе из титаната стронция, представляющем собой тонкий слой диэлектрика, находящийся под действием постоянного поля смещения E_0 и переменного поля E с частотой f . В таком слое возникают упругие колебания на собственных резонансных частотах F_0 .

Эффективное возбуждение объемных акустических колебаний в пьезоэлектриках возможно в случае воздействия на поверхность двух электрических полей, не однородных вдоль нее. Электрострикционное воздействие двух полей с частотами f_1 и f_2 приводит к возникновению упругих волн с частотами $F = f_1 + f_2$ и волновым вектором \mathbf{q} , перпендикулярным поверхности. Механизм такого типа позволяет более эффективно по сравнению с воздействием однородного поля управлять амплитудой возбуждаемых звуковых волн и осуществлять смещение частот. Замена одного из полей потоком заряженных частиц (электронов) также может приводить к возбуждению поверхностной акустической волны, однако этот эффект пока не получил экспериментального подтверждения. Возможность управления параметрами возбуждаемого ультразвука показана при смещении в кристал-

ле молибдата свинца двух световых волн с разными частотами. Изменяя угол пересечения исходных лучей, можно изменять частоту возбуждаемого ультразвука и, следовательно, мощность, которая пропорциональна F^2 .

Явление возникновения звуковой волны при воздействии модулированным светом на различные среды давно известно как фотоакустический эффект. Чаще всего для его объяснения привлекается наиболее хорошо изученный тепловой механизм (в случае больших мощностей накачки), согласно которому основная частота возникающих акустических волн равна или кратна частоте модуляции или следования импульсов света.

Основной особенностью возбуждения звука последовательностью лазерных импульсов является генерация большого числа акустических гармоник (шума). При этом форма звукового импульса универсальна и не зависит от формы лазерного импульса (от последнего зависит амплитуда звукового сигнала).

В случае пьезоэлектрических диэлектриков и полупроводников для объяснения фотоакустического эффекта привлекаются и другие (нетепловые) механизмы. Так, например, при неоднородном импульсном освещении высокоомного фотопроводящего пьезоэлектрика $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ обнаружен новый вид фотоакустического эффекта, обладающего свойством долговременной памяти. Воздействие неоднородного освещения на высокоомный фотопроводник приводит к образованию в нем долгоживущей пространственной зарядовой структуры, которая может быть стерта однородной засветкой. Импульсная запись и стирание этой структуры сопровождаются генерацией акустической волны, отображающей структуру записывающего светового поля. Этот эффект можно объяснить на основе механизма, связанного с быстрой перестройкой электронов в кристалле, происходящей в электрическом поле под действием лазерного импульса. Перестройка электронов вызывает переменное во времени и не однородное в пространстве изменение внутреннего поля, которое через обратный пьезоэффект приводит к генерации акустической волны.

Наряду с фотоакустическим эффектом памяти о структуре записывающего светового сигнала наблюдается явление долговременной памяти об объемной звуко-

вой волне в магнитострикционном Ni—Со-феррите. Запись акустического сигнала осуществляется подачей короткого электромагнитного импульса после возбуждения в образце сдвиговой волны с основной частотой 25 МГц. Запоминание происходит при совпадении частот исходной сдвиговой волны и электромагнитного импульса. При этом, по-видимому, происходит образование регулярной структуры магнитных неоднородностей за счет смещения доменных границ (аналогично зарядовой структуре в диэлектриках). При повторном воздействии электромагнитным импульсом наблюдается генерация звуковой волны, являющейся точной копией исходной.

Под действием переменного электрического поля пластически деформированных диэлектрических кристаллов, подобно обратному пьезоэффекту, возникают акустические колебания, связанные с колебательным движением заряженных дислокаций. Очевидно, что при определенных условиях здесь существует возможность дислокационного резонанса, обнаружение которого подтвердит правильность предполагаемого механизма.

Полупроводники. В настоящее время полупроводники, особенно пьезополупроводники, являются основными преобразователями электромагнитных колебаний в акустические. В зависимости от механизма генерации могут возбуждаться как объемные, так и поверхностные акустические волны. В принципе в пьезополупроводниках возможны еще вышеперечисленные механизмы преобразования, за исключением, может быть, дислокационного, ибо, насколько нам известно, в полупроводниках пока не обнаружены заряженные дислокации. Однако при объяснении взаимосвязи звуковых и электромагнитных волн в пьезополупроводниках в основном обращаются к двум механизмам. Один из них учитывает электронную (концентрационную) нелинейность, обусловленную нелинейностью электронной (или дырочной) подсистемы пьезополупроводника, второй — решеточную нелинейность, связанную с электрооптическим, электрострикционным и нелинейным пьезоэлектрическим эффектами.

Генерация объемных акустических волн в пьезополупроводниках со сверхзвуковым дрейфом носителей (электронов и дырок) была предметом многих исследований с начала 60-х годов. Литература по этому вопросу настолько обширна, что любая попытка дать здесь

ее обзор представляется немислимой. Мы остановимся только на тех работах последних лет, в которых есть какие-либо данные о спектре возбуждаемых в полупроводниках звуковых волн.

Одна из возможных физических причин усиления и генерации акустических волн в системах с электронными потоками — черенковское излучение упругой волны зарядом, созданным самой волной и движущимся со сверхзвуковой скоростью. Аналогичная причина имеет место и в случае акустического возбуждения электромагнитной волны в пьезополупроводнике с электронными (дырочными) потоками. Сверхзвуковой дрейф носителей тока обычно создается постоянным электрическим полем, приложенным вдоль направления распространения звука. На больших частотах, когда за время, равное периоду волны, заряд не успевает образоваться, усиление звука происходит за счет черенковского излучения отдельных электронов.

В последние годы интенсивно исследуется СВЧ-возбуждение звука в пьезополупроводниках, при котором возможны различные параметрические резонансы.

Согласно механизму параметрического резонанса, связанного с нелинейным пьезоэффектом, переменное поле с частотой f_1 приводит к усилению и генерации в пьезополупроводнике стоячих звуковых волн частоты $F = f_1/2$. При этом переменное поле действует на одну моду колебаний решетки и может быть использовано для генерации сигнала заданной частоты. В случае другого параметрического резонанса при распространении звуковой волны с частотой F и волновым вектором q в пьезополупроводнике возникает вынужденная волна электронной плотности с F и q . В переменном поле с частотой f_1 в плазменной подсистеме наряду с основной волной возникают волны электронной плотности с комбинационными частотами $F \pm k f_1$ и вектором q , которые, в свою очередь, порождают звуковые волны с этими же частотами.

В случае электронной нелинейности из-за пьезоэлектрической связи акустической волны с продольными колебаниями электронной плазмы в поле СВЧ-накачки частотой f_1 возникает параметрический резонанс звука на частотах гармоник накачки $n f_1$. Характерной особенностью этого взаимодействия является отсутствие резонанса на половине частоты накачки. Однако рас-

смотрение явления генерации звука СВЧ-полем с учетом как электронной, так и решеточной нелинейности показало возможность резонанса на этой частоте.

При воздействии синусоидального СВЧ-поля в полупроводниках с электронно-фононным взаимодействием или пьезополупроводниках могут возбуждаться поперечные поверхностные акустические волны на частоте, близкой к частоте поля накачки. Применение совместно с СВЧ-полем постоянного, электрического поля дает возможность управления параметрами возбуждения поверхностной волны.

Исследование генерации поверхностных акустических волн в пьезополупроводниках со сверхзвуковым дрейфом носителей при различных амплитудах электрического импульса показало, что в зависимости от величины дрейфового электрического импульса формируются три типа стационарных спектров волн. При амплитуде импульса, близкой к порогу самовозбуждения, спектр звуковой волны имеет один максимум на частоте максимального линейного усиления F_m . С ростом амплитуды электрического поля появляется второй максимум на частоте $0,67 F_m$. При дальнейшем росте амплитуды появляется еще один максимум на частоте $F_m/2$. Кроме этих основных трех максимумов, в спектре наблюдаются также их высшие гармоники.

Так же, как в пьезоэлектрических диэлектриках за счет электрострикции, в пьезополупроводниках за счет электронной нелинейности возможно возбуждение объемной звуковой волны при взаимодействии двух электрических полей, не однородных вдоль поверхности. Изменение концентрации свободных носителей ρ , происходящее под действием поля (или другого воздействия), приводит к возникновению нелинейных токов и, следовательно, нелинейного электрического поля. Последнее через пьезоэффект возбуждает перпендикулярные поверхности акустические волны на комбинационных ($F = f_1 \pm f_2$) частотах.

Отметим еще возможность оптического возбуждения звука в полупроводниках при воздействии на них светового излучения с энергией $E = hf$, большей E_g — ширины запрещенной зоны. Возбуждение звука происходит по двум механизмам: тепловому — за счет нагрева и остывания решетки и деформационному — за счет фотогенерации электронно-дырочной плазмы. В любом

случае здесь также можно констатировать факт преобразования света в звук, причем интенсивность звука зависит от длины волны света и различна для разных преобразователей.

Металлы. Распространение звука в металлах сопровождается возникновением электромагнитных волн, которые появляются в результате того, что нарушается равновесие электронной подсистемы. В свою очередь, возмущение электронов внешним полем приводит к появлению упругих напряжений в металле и возникновению звука. Наряду с непосредственным воздействием электрического поля на ионы решетки большую роль в процессах электромагнитного возбуждения звуковых волн играют силы, действующие на решетку со стороны электронов.

Взаимодействие электромагнитной волны с металлом имеет место лишь в тонком приповерхностном слое (скин-слое). Однако это не означает, что в металлах возбуждаются только поверхностные звуковые волны; при определенных условиях (наличие постоянного поля H_0) возможно возникновение и объемных волн. В зависимости от условий возбуждения звука могут действовать различные механизмы преобразования электромагнитных и звуковых волн на границе металла. Тем не менее все они (за исключением теплового) могут быть рассмотрены в рамках единого подхода, основанного на детальном анализе увлечения кристаллической решетки электронами проводимости.

В ферромагнитных металлах процесс возбуждения звука модифицируется дополнительными механизмами, прежде всего это магнитоупругое взаимодействие. В слабом поле H_0 возбуждение звука обусловлено воздействием электромагнитного поля на суммарную намагниченность. При этом сила, действующая на решетку, возникает в результате магнитоупругого взаимодействия намагниченности с решеткой. В сильном поле H_0 действует лоренцев механизм возбуждения звука в ферромагнитных металлах. Магнитоупругое взаимодействие и вместе с ним электромагнитное возбуждение звука могут быть существенно усилены при ферромагнитном резонансе в точках магнитных фазовых переходов.

В любом металле при электромагнитном возбуждении звука возможны и другие резонансные явления, на-

пример, геометрический и циклотронный резонансы, которые также могут влиять на процессы генерации звука.

Возбуждение продольных звуковых волн в металле за счет лоренцева механизма можно продемонстрировать с помощью простой системы, представляющей собой длинный металлический стержень в магнитном поле H_0 , на концах которого намотаны возбуждающая и приемная катушки. Электромагнитные колебания в возбуждающей катушке приводят к возникновению продольной звуковой волны в стержне. Обратный процесс, то есть генерация электромагнитных волн под действием звука, обуславливает возможность регистрации акустических колебаний с помощью приемной катушки. Аналогичное явление часто наблюдалось в опытах по ядерному магнитному резонансу, причем звук возбуждался непосредственно в проводе катушки ЯМР-спектрометра.

В ферромагнитном металле, помещенном в однородное магнитное поле с частотой f , возникают связанные с магнитострикцией акустические сигналы, следующие с частотой $2f$. При этом даже в медленно изменяющемся поле полоса частот, в которой могут регистрироваться такие акустические сигналы, простирается до 2 МГц и более.

Возбуждение поперечного звука в металле происходит в поле, перпендикулярном поверхности. Это связано с тем, что под действием электрической составляющей поля электроны и ионы решетки приобретают противоположно направленные импульсы и сила Лоренца отклоняет эти частицы в одну сторону. При этом электроны, сталкиваясь с решеткой, передают ей дополнительный импульс вдоль поверхности металла.

В магнитном поле, параллельном поверхности металла и перпендикулярном направлению тока в скин-слое, на электроны, находящиеся в скин-слое, действует сила Лоренца, направленная в глубь металла. При этом для сохранения электронейтральности происходит перестройка ионов решетки, и у поверхности возбуждается волна сжатия, распространяющаяся в глубь металла.

Все рассмотренные выше эффекты электромагнитного возбуждения звука имеют место в радиодиапазоне частот. Однако в металлах возможно и оптическое возбуждение звука. Механизм оптико-акустического эффек-

та в металлах — тепловой, причем основная частота генерируемых звуковых волн равна частоте модуляции светового излучения (или частоте следования импульсов). Весь частотный спектр генерируемых лазерным излучением акустических импульсов может быть довольно широк. Так, для Al, облучаемого импульсами с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм и длительностью $\tau = 24$ нс, основная часть энергии возбуждаемых акустических волн сосредоточена в области от 0 до 1 МГц.

Усиление и генерация упругих волн возможны и в полуметаллах, не обладающих пьезоэффектом (подобно полупроводникам). Взаимодействие звука с электронами при этом может осуществляться либо через деформационный потенциал, либо (если решетка заряжена), через кулоновское поле, которым сопровождается продольная волна в такой решетке.

Рассматривая эффекты электромагнитного возбуждения звука в металлах, нельзя не остановиться на таком интересном и важном явлении, как акустический ядерный магнитный резонанс. Этот резонанс обусловлен поглощением энергии спинами только тех ядер, которые находятся в скин-слое δ . Поэтому в ЯМР-спектроскопии обычно используются порошки с размером частиц $d < \delta$. Если $d > \delta$, эффект электромагнитного возбуждения звука в металле позволяет усилить сигнал ЯМР за счет объема образца, не захватываемого скин-слоем.

Эффект акустического ЯМР заключается в резонансном поглощении звуковых волн, возбуждаемых ядерной спин-системой, при условии что частота фона соответствует расстоянию между магнитными энергетическими уровнями ядер. Резонансные колебания ионов создают в каждой точке образца электромагнитное поле, с H -компонентой которого и взаимодействуют ядерные спины вне скин-слоя. Экспериментально наблюдаемый сигнал при этом оказывается суммарным сигналом от ядер, находящихся в скин-слое и в объеме образца.

Разнообразие механизмов электромагнитного возбуждения звука в твердых телах ни в коей мере не уменьшает фундаментальной значимости этого явления, а свидетельствует о пока еще недостаточной изученности его. Единый подход и нахождение общих закономерностей явления должны стать предметом дальней-

ших исследований проблемы обратного акустоэлектромагнитного преобразования в твердых телах.

Жидкости

Среди эффектов электромагнитной генерации звука в жидкостях наиболее детально изучен оптико-акустический эффект. В зависимости от вещества и от величины объемной плотности энергии, выделившейся в веществе, различают следующие механизмы оптической генерации звука в жидкостях: тепловое расширение, электрострикция, поверхностное испарение, взрывное вскипание, оптический пробой.

Поскольку эффективность преобразования оптической энергии в звуковую мала, практическое значение для генерации звука в жидкостях оптико-акустический эффект приобрел лишь с появлением лазеров. Впервые образование ударных волн при взаимодействии лазерного луча с водой наблюдали А. М. Прохоров с сотрудниками в 1963 г. Именно с появлением лазеров стало возможным говорить об оптических, или, как принято называть, оптико-акустических источниках звука.

В зависимости от характеристик лазера (длина волны λ , длительность импульса τ , энергия в импульсе E), режима генерации света (непрерывный, импульсный, одиночный импульс), а также свойств жидкости возбуждаются акустические сигналы с различными частотными спектрами. При этом физико-химические свойства преобразующей жидкости, на наш взгляд, должны играть существенную роль.

Среди преимуществ оптических источников звука перед традиционными акустическими излучателями можно указать на возможность легко изменять геометрические параметры области нагрева среды, генерирующей звук (так называемой оптико-акустической антенны; ее конфигурация определяет вид диаграммы направленности излучения звука) и диапазон излучаемых частот: от низких звуковых частот вплоть до гиперзвука (гигагерцы и выше).

Наиболее подробно описан тепловой механизм генерации звука в условиях, когда жидкость не меняет своего агрегатного состояния. В этом случае если на поверхность жидкости падает лазерный луч, а интенсивность света модулирована по гармоническому закону с

частотой F , то в жидкости возникает монохроматический звук той же частоты. Так как коэффициент поглощения света жидкостью μ зависит от частоты света f (несущая частота), то тем самым от f зависит конфигурация антенны, а значит, направленность звукового излучения и его эффективность.

Оптимальный режим генерации звука при лазерном возбуждении наблюдается в том случае, когда частота звука F удовлетворяет равенству $k = \mu$, где $k = 2\pi/\lambda = = 2\pi F/v_{зв}$ — звуковое волновое число.

При анализе частотного спектра звукового импульса удобно пользоваться так называемой спектральной передаточной функцией. С ее помощью по известному спектру лазерного импульса легко находится спектр генерированного лазером звукового импульса. Вид передаточной функции не зависит от формы лазерного импульса и определяется свойствами среды в области поглощения света, а также распределением интенсивности света по сечению лазерного пучка. Используя этот факт, можно предложить метод диагностики поглощающих свойств неоднородно поглощающих сред по измерениям спектра звукового сигнала, генерируемого лазерным импульсом.

При генерации звука периодической последовательностью лазерных импульсов звуковое поле представляет собой набор монохроматических звуковых волн с частотами, кратными частоте модуляции лазера. Ширина возбуждаемого спектра определяется частотой повторения лазерных импульсов, их длительностью и коэффициентом поглощения лазерного излучения в веществе. Используя зависимость эффективности преобразования световой энергии в звуковую от параметров антенны, можно из всего возможного спектра выделить определенный интервал частот. Важно, что при этом частота эффективно генерируемого звука может быть много больше, чем частота модуляции лазера. При возбуждении звука последовательностью лазерных импульсов возрастает эффективность преобразования энергии лазерного излучения в звук.

С помощью ультракоротких ($\tau = 80$ пс) импульсов излучения мощного лазера на гранате с эрбием ($\lambda = 2,94$ мкм) в воде, глицерине и этаноле возбуждались звуковые импульсы ($\tau = 0,75$ нс) амплитудой $2 \cdot 10^4$ атм. При этом вода сжималась на 30%. Коэффициент пре-

образования световой энергии в звуковую — около 6%, плотность мощности звуковой волны — 185 МВт/см².

Сильное нагревание и испарение вещества с поверхности тела под действием мощного потока лазерного излучения $\sim 10^{17}$ Вт/см² позволяют получить давление на поверхность со стороны паров вещества до 10^{12} атм. Такие сверхсильные давления уже используются в физике для изучения вещества. В 1972 г. американский физик Э. Теллер впервые предложил использовать сверхсжатие для решения проблемы управляемой термоядерной реакции. По расчетам, энергии лазера в 50—100 кДж уже достаточно для термоядерной вспышки в дейтерий-тритиевой смеси с энергетическим выходом, в 10 раз превышающим энергию света.

Лазерное сверхсжатие может быть также использовано для получения цепных реакций деления при очень небольших размерах ($\sim 10^{-2}$ см) и критических массах ($\sim 10^{-2}$ г) делящегося вещества. С помощью сверхсжатия вещества, в которое «вморожено» или в полости которого заключено магнитное поле, можно увеличить его напряженность до 10^8 — 10^9 Э при начальном поле 10^5 — 10^6 Э, достижимом в лабораторных соленоидах.

Важной является роль электрострикции в оптической генерации звука в жидкости, поскольку стрикционный механизм позволяет оптически возбуждать звук как в прозрачных, так и в поглощающих средах и в этом отношении более универсален, чем тепловой механизм. Однако в поглощающих жидкостях стрикционный механизм играет второстепенную роль, за исключением случаев генерации низкочастотного ($f < 10^2$ Гц) и гиперзвука ($f > 10^9$ Гц), когда стрикция может стать определяющей.

Генерация звука в прозрачных средах при их облучении мощным лазером возможна в результате вынужденного рассеяния. Сущность эффекта состоит в том, что небольшое начальное отражение света, приводящее к образованию стоячей световой волны, перераспределяет плотность и давление в среде. Возникшая последовательность сжатий и разряжений усиливает отражение света, что ведет к еще большему нарастанию перераспределения плотности в среде и генерации интенсивной гиперзвуковой волны частоты от 1 до 10 ГГц и амплитудой давления до нескольких тысяч атмосфер.

Примером преобразования энергии постоянного

электрического поля в акустическую энергию является генерация акустических импульсов в электрохимической ячейке при проведении электролиза. Импульсы излучались поверхностью электрода при кристаллизации и растворении меди в сульфатном электролите, серебра — в растворе AgNO_3 и других металлов, а воспринимались гидрофоном и имели переменную амплитуду, зависящую от плотности тока, и частоту следования от 4 до 6 кГц. В случае растворения металлов амплитуда и частота следования импульсов были больше, чем при кристаллизации. Причиной генерации акустических сигналов является импульсное изменение объемов локальных масс выделяющегося или растворяющегося металла.

В результате облучения растворов NaCl , KCl и этилового спирта радиоимпульсами с несущими частотами от 0,8 до 2,4 ГГц в жидкостях возбуждались акустические колебания, воспринимаемые на слух. Эти эксперименты проводились с целью выяснения механизма возникновения радиозвука, к которому мы еще вернемся в следующем разделе.

Эффект обратного акустоэлектромагнитного преобразования можно наблюдать также на моделях искусственной мышечной системы на основе полимерных гелей. Модель состоит из частично гидролизованного полиакриламидного геля в виде волокна диаметром 4 мм и длиной 30 мм, находящегося в смеси воды с ацетоном между плоскими платиновыми электродами. При подаче на электроды потенциала 1—1,5 В волокно сжимается, а при снятии напряжения восстанавливает свою длину в течение 10 мин. Сокращение геля наблюдалось также под действием электрических импульсов от источника постоянного напряжения с напряженностью поля в импульсе не менее 1,6 В/см. В переменном поле с частотой от 6 Гц до 5 кГц гель не сжимался. Возможно, рассмотренные полимерные гели могут стать основой, например, исполнительного элемента роботов или использоваться в переключающих устройствах.

Таким образом, в жидкостях так же, как и в твердых телах, электромагнитное излучение способно возбуждать звук от инфра- до гиперчастот.

Газы

О пульсациях давления в замкнутом объеме газа при облучении его модулированным потоком инфракрасного излучения впервые сообщил А. Белл в 1880 г. Затем подобный эффект обнаружили под действием ультрафиолетовой радиации и радиоволн сантиметрового диапазона. Для возникновения звука в газе очень важно, чтобы поглощенное газом излучение перешло в тепло, а не было излучено газом в окружающее пространство.

Практическое применение рассматриваемый эффект в газах нашел в начале 40-х годов в количественном и качественном анализе газовых смесей при создании приемников лучистой радиации, а в дальнейшем и в фотоакустической спектроскопии твердых тел и жидкостей.

При фокусировании мощного лазерного излучения в газе возникает световая искра — бурное выделение энергии, сопровождающееся ослепительной вспышкой света и громким звуком. Излучение лазера почти полностью поглощается в такой искре, которая является сгустком нагретой плазмы. Ударная звуковая волна образуется в результате быстрого (со скоростью 10—30 км/с) расширения горячей плазмы.

Существует принципиально иной механизм генерации звука в газах. В отличие от возбуждения звука за счет энергии светового излучения здесь энергия звука «выкачивается» из тепловой энергии газа, в результате чего газ может охлаждаться. Генерация звука в газе основана на явлении светоиндуцированного дрейфа, когда свет преобразует хаотическое движение частиц газа в более упорядоченное движение (например, в звуковые колебания). Аналогичное явление в определенных условиях свойственно и электронам проводимости в твердых телах.

Амплитуда звуковых колебаний зависит от знака разности Δ частоты света и резонансной частоты перехода из основного состояния в возбужденное (в простейшем случае двухуровневых частиц газа). Это позволяет экспериментально отделять звук, возникающий за счет индуцированного дрейфа, от «теплого» звука, маскирующего эффект. Если Δ осциллирует с частотой F , то звук возбуждается на частотах, кратных F , в отличие от

«теплого» звука, который возбуждается на частотах, кратных $2F$.

Образование ударных и звуковых волн в разрядном канале при прохождении импульсов тока, аналогичное грому при разряде молнии в атмосфере, находит приложение при рассмотрении работы импульсных газоразрядных лазеров. Образующиеся при электрическом разряде звуковые волны могут существенно влиять на выходные характеристики лазера, например на мощность излучения.

В заключение отметим, что частотный диапазон акустических волн, возбуждаемых электромагнитным излучением в газах, менее широк, чем в твердых телах и жидкостях, однако исследование соответствующих эффектов в газах, на наш взгляд, перспективно с точки зрения изучения влияния состава среды на эти эффекты.

В принципе любая реальная среда является нелинейной, анизотропной и неоднородной, поэтому исследования преобразования электромагнитного излучения в веществе следует проводить с учетом структуры, анизотропии и состава вещества—преобразователя. Необходимо учитывать также поляризацию возбуждающего излучения и ее влияние на параметры возбуждаемой звуковой волны. Процесс взаимодействия излучения со средой обязательно характеризуется определенной долей потерянной энергии. Эта энергия расходуется на перевод вещества в возбужденное состояние за счет различных диссипативных процессов. Возбуждение акустических колебаний является одним из важнейших процессов, происходящих при взаимодействии электромагнитного излучения с веществом. При этом в зависимости от параметров излучения и характера среды могут возбуждаться акустические волны различных частот (от инфра- до гиперзвука).

ВЗАИМНЫЕ АКУСТОЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Объединение в одном разделе столь различных объектов, как геологические и биологические среды, обусловлено возможностью единого подхода к проблеме взаимного превращения излучений в живой и неживой

природе. Кроме того, с точки зрения трансформации акустических и электромагнитных колебаний гео- и био-объекты обладают общим признаком — сложностью строения и состава, что обуславливает исключительную сложность процессов преобразования в них.

Геологические объекты

Литосфера. Горные породы представляют собой конгломераты диэлектрических, полупроводниковых и металлических минералов. Поэтому процессы взаимного акустоэлектромагнитного превращения в них весьма сложны. В принципе в горных породах могут иметь место все рассмотренные выше механизмы превращений излучений в твердых телах, однако существуют и специфические механизмы, присущие только горным породам, например сейсмоэлектрический эффект II рода. Кроме того, условия и масштабы натуральных экспериментов и геодинамических процессов существенно отличаются от лабораторных, что может приводить к определенным модификациям преобразований в горных породах. Так, например, суточная и полусуточная вариации электромагнитного излучения горных пород в естественных условиях определяются «фоновым» механизмом образования трещин за счет воздействия лунно-суточных приливов. Поэтому мы сочли целесообразным выделить горные породы из общего рассмотрения процессов преобразования в твердых телах.

Способность горных пород к трансформации колебаний лежит в основе одного из самых активно разрабатываемых сейчас методов прогноза землетрясений. Еще в 1885 г. Ж. Дари высказал гипотезу об электрических разрядах (подобных атмосферным) в недрах Земли, которая спустя 85 лет была развита профессором А. А. Воробьевым, теоретически обосновавшим различные механизмы накопления и релаксации электрических зарядов в горных породах. Сейчас идеи А. А. Воробьева находят свое подтверждение в результатах многочисленных натуральных экспериментов по преобразованиям колебаний в горных породах. Так же, как в лабораторных экспериментах, горные породы способны откликаться на механическое (акустическое) воздействие широким спектром электромагнитных волн (от постоянного поля до γ -излучения). Не претендуя на полноту охвата обширной литературы по данному вопросу, мы перечислим здесь

лишь те натурные наблюдения, которые иллюстрируют широту спектра электромагнитного излучения горных пород.

В горных породах вследствие фильтрации грунтовых вод электрическое поле вдоль направления течения достигает 10^{-3} — 10^{-4} В/м. Упругие волны, проходя во влагосодержащих горных породах, также создают разность потенциалов — сейсмoeлектрический эффект II рода. Обнаружено, что разность потенциалов увеличивается с ростом интенсивности упругой волны и появление электрической волны предшествует упругой. Интересно отметить, что при лабораторных исследованиях в условиях знакопеременной нагрузки и в натурных экспериментах с механическим вибратором проявились резонансные свойства этого эффекта.

Низкочастотные электромагнитные колебания горных пород в диапазоне 0,001—3,5 Гц были зарегистрированы при акустическом возбуждении промышленным взрывом на расстоянии 2,5—5,5 км от места взрыва. Сравнение электрического и сейсмического сигналов показало, что наблюдаемые вариации имеют одну и ту же основную частоту (~ 1 Гц). Отмечены также электромагнитные колебания с уменьшающейся со временем частотой и после затухания сейсмических колебаний. Наблюдаемые эффекты объясняются действием механизма смещения проводящих слоев горных пород в геомагнитном поле и изменением проводимости ионосферы при прохождении через нее акустической волны.

Электромагнитные сигналы в диапазоне 0,1—30 Гц, предшествовавшие сейсмическим, зарегистрированы при различных естественных и искусственно вызванных динамических процессах в природных ледниках. При сходе лавин зафиксировано широкополосное излучение с максимумом в области 10^3 Гц для свежеевыпавшего и $2,5 \cdot 10^6$ Гц — для слежавшегося снега.

При регистрации фона электромагнитного излучения, формируемого грозовой активностью атмосферы, в диапазоне от 4 до 10 Гц отмечено увеличение амплитуды и частот шумановских резонансов перед семью из десяти землетрясений с эпицентрами на суше. Если эпицентры находятся под водой, подобных изменений не возникает. Данные спутника OGO—6, полученные с помощью индукционного магнитометра в диапазоне 10 Гц — 1 кГц, показали наличие всплесков излу-

чения при пролете над эпицентрами землетрясений с фокусами на глубине менее 80 км. Причем аномалии электромагнитных излучений наблюдались как до, так и после землетрясения.

В настоящее время известно, что распространение в горных породах упругой волны сопровождается генерацией волн различной природы. Это может происходить за счет сейсмоэлектрического эффекта, механоэлектрических эффектов контактов, пьезоэлектрического эффекта в горных породах и эффектов, связанных с процессами образования трещин. Первые два механизма, а также пьезоэффект массивов кварцсодержащих пород характеризуются совпадением (в первом приближении) частот акустических и электромагнитных волн и линейной зависимостью между их амплитудами. При упругом возбуждении кварцевых жил или гнезд кварца частотные спектры электромагнитных волн могут значительно отличаться от спектров упругих волн за счет резонансных явлений, связанных с размерами преобразователей. Еще более значительно эти спектры могут различаться в случае процессов образования трещин.

При исследованиях месторождений полиметаллов наряду с упомянутыми электромагнитными колебаниями обнаружено мощное излучение более высокой частоты (до единиц мегагерц) с амплитудой на несколько порядков выше низкочастотного излучения. Это излучение связывают с полупроводниковыми свойствами минералов и их контактов, поскольку оно возникает только в тех рудных телах, которые содержат минералы-полупроводники. Наряду с электромагнитным зарегистрировано вторичное ультразвуковое излучение в диапазоне 0,66—1,7 МГц.

Перед землетрясением иногда отмечается аномальное увеличение фона естественного электромагнитного излучения. Такая аномалия была отмечена за 5 суток до Чилийского землетрясения 1960 г. Ее связывают с превращением излучений по механизму дипольного излучения зарядовой мозаики на бортах раскрывающихся трещин.

В рудных телах при прохождении упругой волны наряду с волнами радиодиапазона (до 3 МГц) обнаружено электромагнитное излучение, дающее сложную картину засветки на фотопленке, установленной в местах контактов галенита и сфалерита и рудных жилок с по-

родой. Кроме световой засветки, здесь может сказываться рентгеновское излучение и электронная эмиссия, причем при повторных взрывах засветки смещаются по фотопленке, что свидетельствует о необратимости процесса. Предполагается, что упругая волна вызывает в рудном теле образование трещин, разряды и одновременно поляризацию за счет пьезоэффекта. Под действием пьезоэлектрического поля E в полупроводниковых минералах могут возникать элементы типа транзисторов и тиристоров. Отсюда следует, что, кроме электромагнитного излучения, в радиодиапазоне должны генерироваться вторичные ультразвуковые волны, световое излучение и электронная эмиссия.

Недавно обнаружено вызванное упругой волной взрыва γ -излучение горных пород с энергией от 0,4 до 4 МэВ. Аномальное увеличение γ -излучения зарегистрировано в полиметаллическом рудном теле, содержащем редкие земли и находящемся на расстоянии в несколько десятков метров от места взрыва. При этом время запаздывания наблюдаемого сигнала γ -излучения после прихода упругой волны составляло от нескольких тысячных до 1 с. Интересно, что в этих же экспериментах было замечено аномальное нейтринное излучение, вызванное взрывной волной.

По современным теоретическим представлениям начавшееся разрушение породы перед самым началом землетрясения сопровождается появлением мощных импульсов тока в земной коре, формирующегося множеством ориентированных и синхронно действующих локальных механоэлектрических преобразователей. Увеличение затухания с частотой и обнаружение аномалий высокочастотного (в радиодиапазоне) излучения перед землетрясением дают основание предполагать выход через земную поверхность в атмосферу и ионосферу низкочастотных возмущений и квазистатических полей. При этом возможно возбуждение разрядных явлений в атмосфере или создание условий для образования в ионосфере плазменных неустойчивостей, приводящих к появлению вторичных источников излучения в радиодиапазоне. Эта точка зрения предполагает возникновение источников излучения в атмосфере и ионосфере, однако она не исключает и возможности генерации излучений в горных породах в непосредственной близости к приемной антенне.

Описанные эксперименты показывают, что спектр акустически возбуждаемого электромагнитного излучения в горных породах простирается от 0,001 Гц до γ -излучения ($\sim 10^{21}$ Гц для 4 МэВ). Пока еще не существует единого мнения о природе наблюдаемого излучения и единого подхода к изучению данного явления, что свидетельствует, с одной стороны, о сложности явления, с другой — о недостатке надежных экспериментальных данных.

Итак, в природных условиях в горных породах так же, как в любом твердом теле (только, очевидно, сложнее), возможны разнообразные процессы взаимного превращения звуковых волн в электромагнитные, зачастую происходящие с громадными сдвигами частот. Природа связи акустических и электромагнитных колебаний земной коры до конца еще неясна. Большинство исследователей отдают предпочтение механизму, связанному с образованием трещин, однако он не объясняет существования электромагнитного излучения, возникающего до образования трещины.

Есть мнение, что возникающие при деформации электромагнитные и акустические импульсы имеют общую первопричину и единый источник энергии, но и оно не отрицает возможности акустоэлектромагнитного преобразования в горных породах. Исследования этих процессов должны занимать ведущее место в комплексе натурных наблюдений для определения прогностических критериев землетрясений и играть важную роль в решении общей проблемы взаимной трансформации звуковых и электромагнитных волн в веществе.

Гидросфера. Эффекты преобразования колебаний в жидкой оболочке Земли известны с прошлого века. Мировой океан с его течениями и волнами является огромным источником электромагнитных волн. Впервые электрические поля, сопутствующие течениям, были обнаружены в 1851 г. в кабеле, уложенном на дне Ла-Манша, поля ветровых волн — в 1920 г. Индуцированные электромагнитные поля полностью определяются полем скоростей движения водных масс, распределением электрической проводимости морских вод, величиной и ориентацией магнитного поля Земли.

Диапазон частотного спектра электромагнитных вариаций гидродинамического происхождения простирается от 10^{-6} Гц (волны Россби) до 10 Гц (капиллярные

волны). Морские ветровые волны формируют диапазон с периодами от 1 до 15 с, волны зыби и цунами — от 10—30 с до нескольких часов.

Частотные спектры ветрового волнения и магнитных вариаций связаны между собой и состоят из трех частей: основного максимума, переходной и равновесной областей. В области основного максимума спектры сдвинуты друг относительно друга на величину, не превышающую $6 \cdot 10^{-2}$ частоты максимума. В то же время имеются данные и о более значительном сдвиге частот ветровых и электромагнитных вариаций. Так, при ветровом волнении на поверхности океана с основной частотой 0,1 Гц на глубине 3,5 км зарегистрированы пульсации электромагнитного поля, имеющие максимум на частоте 0,2 Гц. При изучении полей на поверхности моря в прибрежной зоне обнаружены колебания электромагнитного поля без частотного сдвига в такт с прибоем.

Если обычные ветровые волны формируют низкочастотный диапазон электромагнитного излучения, то в случае шторма возможно и более высокочастотное излучение. Недавно установлено, что при обрушивании волн во время штормов при ветре 8—10 м/с и более, когда разрушаются пузыри пены, наблюдается резкое усиление радиоизлучения с поверхностей морей и океанов в микроволновом диапазоне. Аналогичные явления наблюдаются при разбрызгивании воды вблизи водопадов, фонтанов (баллоэлектрический эффект).

Данные о возникновении излучений при замораживании жидкостей служат отправной точкой для предположения о возникновении электромагнитных излучений при замерзании и вскрытии рек и других водоемов. Опубликованных сведений о таких эффектах нам обнаружить не удалось, однако, очевидно, они должны иметь место, и обнаружение их — дело ближайшего будущего.

Что касается возникновения в водоеме звука под действием электромагнитного излучения, то таких данных практически нет. Возможно, это связано с малой эффективностью преобразования электромагнитной энергии в звуковую. Известны только результаты по лазерному возбуждению звука в озере. С помощью неодимового лазера ($\lambda = 1,06$ мкм), генерирующего импульсы ($\tau_{\text{имп}} = 1$ мс) с внутриимпульсной модуляцией по синусу

социальному закону, в воде озера удалось возбудить квазимонохроматический звук частотой 50 кГц.

Атмосфера. В атмосфере, особенно в ионосфере, возникновение электромагнитных вариаций возможно при действии относительно слабых звуковых волн. Известно, что звук возбуждает в атмосфере систему электромагнитных волн, спектр которых простирается от инфранизких частот до оптической области.

Низкочастотные аномальные возмущения в ионосфере могут быть как в период, предшествовавший землетрясению, так и в момент самого землетрясения. Детальный анализ аномальных вистлеров (свистящих атмосфериков) в диапазоне 200—1500 Гц показал, что они могут появляться несколькими днями до и после момента землетрясения, проходящего в точке, магнитосопряженной точке наблюдения. Объяснение этому дать трудно, поскольку, по существу, не изучен механизм сейсмоионосферных связей. Нельзя ответить на вопрос, является обнаруженная тенденция следствием возникновения благоприятных условий для генерации вистлеров, например, разрядных явлений в атмосфере, связанных с процессами в зоне подготовки землетрясения, или это опосредованное влияние через метеорологический фактор, также связанных с процессами подготовки землетрясения. Можно искать и другие причины.

Акустические волны, возбужденные в атмосфере на большой площади при землетрясениях, слабо затухают и поэтому могут достигать ионосферы. Под действием звуковых волн параметры ионосферы изменяются, и, поскольку ионосфера является одной из стенок сферического резонатора «Земля — ионосфера», это приводит к вариации шумановских резонансов, по характеру которой в принципе можно судить о землетрясении. Кроме того, если акустическая волна является ударной, то она может ионизировать атомы и молекулы воздуха. Последующее возвращение оторванных электронов на свои места сопровождается выделением энергии ионизации в форме излучения, в частности видимого света.

Еще до нашей эры было известно, что землетрясениям может сопутствовать видимое объемное свечение атмосферы широкого спектра над эпицентральной областью, которое нельзя объяснить электрическим полем, возникающим в трещинах при разрушении земных по-

род, так как эти поля быстро убывают с расстоянием R (как $1/R^3$). Поля в трещинах создают условия для свечения лишь поверхности Земли, склонов холмов и гор.

Объемное свечение атмосферы при землетрясениях объясняют по-разному. Кроме изложенного выше механизма свечения воздуха, существует объяснение с помощью модели двух последовательно соединенных глобальных сферических конденсаторов: «ионосфера—земная поверхность» и «земная поверхность—мантия», в которых изолятором являются воздух и мало-проводящие породы земной коры соответственно. Разлом в очаге землетрясения — это пробой диэлектрика в одном из конденсаторов, ведущий к резкому росту электрического поля в конденсаторе «земля—ионосфера» (рост поля в атмосфере перед землетрясением впервые подметил в 1924 г. Е. Чернявский) и последующему пробое воздуха. В результате возникает свечение атмосферы.

Другой подход к объяснению свечения атмосферы при землетрясениях предложил Дж. Байерли. Он считает, что при трении соседствующих плит земной коры во время землетрясения выделяется тепловая энергия, достаточная для испарения влаги геологических пород и почвы вдоль разлома земной коры, разделяющего эти плиты. Возникающий при этом в атмосфере электрический заряд, аналогичный грозовому, разряжаясь подобно молнии, вызывает голубовато-белое свечение неба.

Возможно и такое объяснение свечения атмосферы при землетрясениях. Как известно, воздух обладает собственным свечением в диапазоне длин волн от 250—300 нм примерно до 1500 нм с максимумом при 700—800 нм, спектр которого незначительно отличается от спектра излучения Солнца. По своей природе свечение воздуха является хемилюминесценцией и обуславливается в первую очередь присутствующим в нем озоном, а также ионами. Так как перед землетрясением приземная атмосфера за счет высоких электрических полей, электрических разрядов и других источников в области подготовки землетрясения обогащается ионами, то при подземном толчке за счет активного перемещения воздуха, обусловленного поршневым действием земной поверхности, в эпицентральной области происходит импульсное увеличение светового излучения воздуха. Ана-

логично объясняется свечение воздуха над морской поверхностью при землетрясениях (например, на о. Сахалин в 1953 г.).

Подобно акустическим волнам, связанным с землетрясением, колебания воздуха, сопровождающие молнию (гром), также могут вызвать атмосферное электромагнитное излучение при воздействии на заряженные облачные элементы (капельки воды и кристаллики льда). Кроме того, в последние годы в диапазоне от сотен килогерц до сотен мегагерц был обнаружен новый тип радиоизлучения грозowych облаков и циклонов, не связанный с громом, — непрерывно шумовое излучение. Так, в грозowych облаках имеет место радиоизлучение, обусловленное торможением в атмосфере заряженных частиц.

Согласно модели радиоизлучения кучево-дождевых (конвективных) облаков заряженные капли при падении растут за счет коагуляции — захвата мелких капель. Рост капель сопровождается колебаниями их формы и, поскольку капли заряжены, генерацией электромагнитного излучения. Исследования частотного спектра радиоизлучения облаков и его эволюции во времени могут стать эффективным средством изучения динамики облаков.

Хорошо известно свечение атмосферы в смерчах. Согласно теории этого явления механическая энергия закрученного грозowego облака преобразуется в энергию разделенных положительно и отрицательно заряженных капель и затем в энергию оптического излучения по механизму, который положен в основу объяснения не менее известного явления — огней «святого Эльма». В этом механизме важную роль играют капельки воды, неустойчивость которых во внешнем электрическом поле ведет к выбрасыванию ими мелких заряженных капель, вокруг которых возникает самоподдерживающийся электрический разряд. С точки зрения этого механизма можно ожидать появления огней «святого Эльма» и на горизонтальной поверхности воды при наличии волнения.

При изучении в полевых условиях характеристик горных пород с помощью взрывных нагрузжений поверхностных слоев необходимо надежно выделять из излучений горных пород электромагнитное излучение возникающего при взрыве наэлектризованного пылевого об-

лака. Зарегистрированное в различных частотных диапазонах излучение облака имеет максимум на частотах ~ 10 кГц. Генерация излучения облаком может происходить как за счет релаксации квазистационарного электрического поля, возникающего в формирующемся облаке при разделении заряженных частиц пыли в гравитационном поле, так и за счет возбуждения звуковой волны в пылевом облаке.

Всякий взрыв, произведенный в атмосфере, является источником широкополосного электромагнитного излучения. В природе атмосферные взрывы случаются, например, при извержении вулканов, взрываются в атмосфере крупные метеориты и другие тела. Известно, например, что воздух светится в сильной ударной волне, которая образуется при ядерном взрыве. Кроме того, взрывы атомных бомб сопровождаются характерными радиосигналами, которые принимаются на расстоянии тысяч и десятков тысяч километров. Диапазон этого радиоизлучения лежит в области метровых и километровых волн. На атмосферные взрывы чутко реагируют глобальные шумановские резонансы. Когда в 1962 г. США произвели высотный ядерный взрыв в Тихом океане, во Франции зарегистрировали в первые же секунды снижение резонансных частот на 0,5—0,9 Гц. Следовательно, даже локальное возмущение атмосферы отзывается по всему земному шару.

Наиболее известным природным явлением, в котором осуществляется обратное акустоэлектромагнитное преобразование, является гром при электрическом разряде (молнии) в атмосфере. Звук образуется в результате очень быстрого нагревания (до нескольких десятков тысяч градусов) и расширения воздуха в разрядном канале молнии. Наибольшая энергия грома приходится на частоты 0,25—2 Гц, так что основного колебания грома, несущего главную часть энергии, человек не воспринимает. Хорошо слышит он гармоники основного колебания, энергия которых убывает с ростом частоты. По одним данным, в акустическом спектре грома чаще других встречается частота 40 Гц и частоты в диапазоне 75—120 Гц, а более высокие частоты — значительно реже. По другим данным, высокие частоты грома приходятся на интервал 150—250 Гц, а иногда в громе могут быть слабо выражены частоты до 500 Гц. Также не определен однозначно диапазон частот для максималь-

ных спектральных звуковых составляющих грома: указываются диапазоны 50—150 и 400—500 Гц.

При поглощении света от вспышки молнии на поверхности тел (Земли) может наблюдаться эффект дистанционной генерации звука, аналогичный наблюдаемым в случае «электрофонных» болидов, когда звук возникает одновременно с наблюдением болида. Объяснением этого может быть механизм светотермогенерации звука, при котором модулированное излучение болида создает на поверхности колебания температуры, вызывающие звуковые волны в атмосфере. Предполагается, что плазменный след болида возмущает электрическое и магнитное поля Земли, которые также могут давать вклад в электрофонный эффект.

Выше отмечалось, что землетрясениям предшествует усиление излучения в широком диапазоне частот. Считается, что возникшее излучение способно проникнуть в высокие слои атмосферы и вызвать заметные эффекты в различных ее слоях. В частности, в верхней атмосфере возможен локальный разогрев, который вызовет изменение скорости ветра. Почти двукратное увеличение скорости атмосферного ветра наблюдалось в Абхазии (ГССР) во время землетрясения 31 августа 1986 г., эпицентр которого находился на расстоянии 1250 км (в Румынии).

Следует отметить возможность искусственного нагрева тропосферы Земли с помощью электромагнитного излучения для стимулирования некоторых метеорологических явлений, а также для создания атмосферных звуковых источников. Для нагрева предлагается использовать амплитудно или частотно модулированное СВЧ-излучение миллиметрового диапазона, которое, особенно на длине волны 5 мм (линия поглощения кислорода), хорошо поглощается тропосферой.

Полярные сияния и магнитные бури также вызывают в атмосфере звук и особенно инфразвук, однако точный механизм их возникновения до сих пор не раскрыт.

Таким образом, природные явления взаимного превращения излучений имеют место в твердой, жидкой и газообразной оболочках Земли. Однако в горных породах спектр электромагнитных волн простирается в область гораздо более высоких частот (γ -излучение), чем в гидросфере и атмосфере, в которых верхняя граница спектра лежит в оптической области.

Биологические объекты

Общеизвестно, что акустические и электромагнитные волны оказывают сильное воздействие на биологические объекты, которые так же, как неорганические среды, являются своеобразными преобразователями акустических и электромагнитных колебаний. При этом своеобразии биологических объектов определяется прежде всего сложностью строения и состава живых организмов, которые представляют собой ассоциации из твердых, жидких, жидкокристаллических и газообразных сред.

Экспериментальная биофизика чрезвычайно бурно развивается в последние годы. Особенно интенсивно исследуется влияние электромагнитного и акустического излучений на различные биологические объекты. При этом, руководствуясь, конечно, практической значимостью, влияние внешних полей оценивается в чисто биологических (физиологических, психологических) характеристиках объекта. Весьма интенсивно исследуются также эффекты собственного электромагнитного излучения биологических систем. Гораздо менее изучено акустическое излучение живых организмов.

Даже известная на сегодня картина генерации излучения живыми объектами чрезвычайно сложна и многообразна, поэтому достоверное выделение в ней процессов акустоэлектромагнитных преобразований пока представляется трудноразрешимой задачей, тем более что целенаправленных экспериментов по обнаружению соответствующих эффектов в биологических объектах не проводилось. Однако из общих соображений ясно, что такие эффекты должны иметь место, и их следует рассматривать в рамках единого подхода к процессам взаимного акустоэлектромагнитного превращения, протекающим в неорганической и органической природе.

Впервые излучение делящихся клеток лука (митогенетические лучи) было обнаружено А. Г. Гурвичем в 1923 г. Анализ спектрального состава митогенетических лучей показал, что они относятся к ультрафиолетовой области спектра ($\lambda = 190\text{--}325$ нм). Затем подобное излучение было обнаружено при делении других клеток. Сейчас известно, что многие живые органы и системы способны генерировать электромагнитное излучение в широком диапазоне частот.

Считается, что электромагнитное излучение в живых системах может возникнуть за счет:

а) биоэлектрической активности электрогенных тканей, сопровождающейся протеканием электрических токов в организме;

б) изменения биопотенциалов, возникающих за счет биохимической, функциональной и морфологической разнородностей тканей, повреждений и т. д.

в) перераспределения электростатических зарядов, приобретенных при трении и других процессах за счет различных двигательных (колебательных) актов;

г) пьезоэффекта (или подобного ему), который обнаружен сейчас во многих органических веществах (дерево, шелк, шерсть, кости, коллаген, мышцы, ДНК, РНК и другие).

Этим, очевидно, не исчерпывается перечень возможных причин излучения биологических объектов, однако каковы бы ни были причины генерации живых систем, в них должно быть место процессам взаимных превращений излучений. В качестве первого примера такого преобразования можно указать на наблюдаемое почью на море значительное усиление свечения одноклеточных организмов-ночесветок при их механическом возбуждении (например, ударом по воде). Заметим, что данное явление подобно известному в неорганической природе эффекту свечения при ударе кристаллов азотно-кислой урановой соли.

Очевидно, многим из нас знакомо ощущение вспышки света при воздействии на глаз несветового раздражителя («искры из глаз»). Такие явления называют фосфенами. В зависимости от характера раздражителя различают фосфены: механический, электрический, магнитный. Механический фосфен является примером непосредственного акустоэлектромагнитного превращения, электрический и магнитный фосфены, очевидно, представляют собой более сложные преобразования. Примером механического фосфена может быть неприятное ощущение света при сильном ударе головой. Явление магнитного фосфена известно с 1896 г. Суть его заключается в том, что человек зрительно ощущает вспышки света, когда его голова помещена в магнитное поле. Исследования показали, что световой эффект вызывается переменным магнитным полем с напряженностью 200—1000 Э и частотой $f = 20—100$ Гц. Наибольшая ин-

тенсивность эффекта наблюдалась при $f = 20$ Гц. Частота световых ощущений совпадала с частотой поля. При $f > 100$ Гц эффект становился менее выраженным. Длительность ощущения света зависит от продолжительности магнитного импульса.

Начиная с 1967 г. в биофизической литературе появляются все более надежные результаты регистрации электрических и магнитных полей ($f = 0,1—1$ кГц), возникающих при механическом возбуждении нерва, движении ресниц, напряжении мышц рта, движений языка при закрытом рте, при прикосновении к волосяному покрову кожи, полете различных насекомых вблизи антенны, при нанесении ударов по стволу березы и т. д. В последнем случае мы имеем еще один явный пример акустоэлектромагнитных преобразований в биологическом объекте, подобный электромагнитным эффектам при ударном воздействии на твердые тела. Наблюдаемое излучение при ударе по стволу березы связывают с вибрацией ствола, несущего на поверхности электрические заряды, индуцированные полем атмосферы, однако его можно связать и с пьезоэлектрическими свойствами древесины, а также с другими причинами, обсуждавшимися ранее.

Измерение магнитного поля, возникающего при моргании человека с частотой 0,2—0,5 Гц, показало, что максимальные амплитуды магнитных сигналов ~ 3 пТл наблюдались над глазами, полоса частот сигналов 0,03—45 Гц. В правом полушарии магнитное поле было направлено из черепа, в левом — в череп. Предполагается, что это поле обусловлено изменением распределения плотности токов, текущих через сетчатку глаза, в результате изменения геометрии объемного проводника, окружающего глазницы. При этом веки глаз выступают в качестве скользящих электродов, изменяющих объемные токи. Раздражение мозга прикосновением, звуком и светом сопровождается магнитным сигналом, который в ряде случаев представим в виде магнитного поля токовых диполей. Для желудка человека характерны постоянные и низкочастотные магнитные поля, причем вид сигнала определяется функциональным состоянием желудка.

Электрические и магнитные поля мышц человека и животных возникают только в момент сокращения, т. е. обусловлены не только биоэлектрическими, но и меха-

ническими процессами. С помощью сверхпроводящего квантового интерференционного детектора (СКВИДа) проведена запись импульсного сигнала магнитного поля, создаваемого скелетными мышцами ноги человека при их напряжении. Типичная длительность импульса составляла 10—20 мс. Ширина полосы частот измерительной системы — от 0 до 4 кГц. Спектральная плотность сигнала имела максимум при 40 Гц и простиралась до 400 Гц. При сокращении скелетных мышц человека в дополнение к высокочастотным компонентам (10—150 Гц) часто наблюдается также медленно меняющаяся составляющая.

Поля сердца, запись которых (электро- или магнитокардиограммы) промодулирована механическими колебаниями (сокращениями) сердечной мышцы, также могут быть примером акустоэлектромагнитных превращений в биологических системах. Сердце является источником наибольшего магнитного поля человека. Максимальное значение поля при измерении над поверхностью грудной клетки порядка $5 \cdot 10^{-11}$ Тл. В отличие от электрокардиограммы магнитная запись позволяет регистрировать сигналы сердца, начиная практически с нулевой частоты.

Известно, что ультразвук оказывает выраженное терапевтическое действие на живой организм, хотя механизм такого действия окончательно не выяснен. В свете обнаруженного в 1961 г. Б. Н. Тарусовым спонтанного сверхслабого свечения внутренних тканей живых организмов предполагается, что биологическое действие ультразвука связано с превращением акустической энергии в энергию электронных возбужденных состояний в жидких фазах живого организма, выражающуюся в свечении жидких сред. Биологически свечение может проявляться в обмене и трансформации различных форм энергии в молекулярных структурах биологических жидкостей и мембран, то есть в связи с метаболизмом, участвуя, в свою очередь, в информационном обмене и управлении жизнедеятельностью биообъектов.

Существуют и другие представления, например, о наличии у воды двух фаз: жидкой молекулярной и кристаллической льдоподобной, непрерывно переходящих друг в друга под влиянием внешних физических воздействий. Такие фазовые переходы ведут к возникновению значительной разности потенциалов на границе

«лед—вода» и могут быть одной из первичных реакций живой системы на воздействие внешних физических факторов, которые затрагивают динамику фазовых переходов.

Экспериментально установлена люминесценция сыворотки крови, плазмы, лимфы, мочи и других биожидкостей в видимом и ультрафиолетовом диапазонах при действии ультразвука интенсивностью $0,05\text{--}0,8\text{ Вт/см}^2$ и частотой $310\text{--}1500\text{ кГц}$. Например, спектр люминесценции сыворотки крови в целом совпадает со спектром свечения дистиллированной воды, однако интенсивность значительно ниже.

Кроме ультрафиолетового свечения биологических жидкостей, известна генерация переменного электрического поля телами живых и мертвых насекомых, оперением птиц и шкурками зверей под действием звука.

Низкочастотные поля биологических объектов (вплоть до метровых волн с $f \sim 100\text{ МГц}$) обычно измеряются в ближней зоне и представляют в основном потенциальные поля индукции в отличие от поля излучения в случае СВЧ-, инфракрасного и светового диапазонов (более высокочастотные излучения живых объектов пока не обнаружены).

Среди эффектов обратного акустоэлектромагнитного преобразования в живых объектах следует назвать прежде всего известный уже более 25 лет сенсорный акустический эффект СВЧ-поля, получивший название радиозвука. Эффект заключается в субъективном ощущении звука человеком, голова которого облучается СВЧ-импульсами. В зависимости от параметров поля человек может ощущать один из двух типов радиозвука: обычный и низкочастотный. В спектре первого присутствуют только компоненты спектра огибающей поля выше 8 кГц , а более низкие по частоте компоненты подавлены. Низкочастотный радиозвук начинает ощущаться наблюдателем только после подавления обычного, когда длительность импульсов достигает $\sim 110\text{ мкс}$, и кажется исходящим из другой точки пространства. Плавное изменение длительности импульсов от 110 до $50\text{--}60\text{ мкс}$, можно добиться одновременного восприятия обоих типов радиозвука. Механизм явления до сих пор не выяснен, имеется только ряд гипотез, не позволяющих, однако, дать ему исчерпывающее объяснение.

Некоторые особенности явления низкочастотного ра-

диозвука объясняются на основе модельных представлений о СВЧ-возбуждении акустических колебаний в жидких сферических моделях. При этом природа радиозвука связывается с поглощением электромагнитной энергии тканями головы человека или рабочей жидкостью. Формирование звукового образа у человека идет посредством костной акустической проводимости. Что касается обычного радиозвука, то в рамках такой модели объяснить его невозможно. По-видимому, полная модель радиозвука должна учитывать возбуждение слуховых ощущений как с помощью механических колебаний тканей, так и с помощью «прямого» воздействия электромагнитного излучения на слуховые рецепторы и нейронные анализирующие структуры.

Интересно отметить, что наряду с радиозвуком человек при действии на него радиоволн может ощущать «радиосвет» и «радиоприкосновение».

Другим примером обратного преобразования в живых объектах является эффект возбуждения акустических волн в биотканях под действием импульсов лазерного излучения, который по аналогии с радиозвуком можно назвать светозвуком. Многочисленные исследования влияния лазерного излучения на биологические объекты проводятся в основном в интересах медицины и биологии. При этом большое внимание уделяется механическим повреждениям биотканей организмов. В качестве основных механизмов таких повреждений рассматривается испарение, пробой диэлектрика, радиационное давление, электрострикция, возникновение ударных и звуковых волн.

Что касается радиационного давления и электрострикции, то их роль в повреждениях сильно поглощающих излучение тканей ($\mu \geq 100 \text{ см}^{-1}$) незначительна (по порядку величины $\sim 10^{-4}$) даже по отношению к акустическим волнам. Исключением является случай, когда среда оптически прозрачна, то есть слабо поглощает излучение. В этих условиях определяющей становится электрострикция, которая зависит не от поглощения излучения, а от величины электрического поля в лазерном луче.

Изучение акустических волн в биотканях при мощностях излучения меньших, чем нужны для вскипания, важно по нескольким причинам. Во-первых, звуковые волны от одиночных лазерных импульсов являются уни-

кальным инструментом получения количественных оценок сил связи, обеспечивающих структурную устойчивость биологических объектов. Во-вторых, в ряде экспериментов отмечено, что биоткани могут механически повреждаться на некотором удалении от места поглощения. Это говорит об участии в процессе акустических волн. Так, при облучении черепа мыши обнаружены повреждения у его основания, а при облучении брюшной полости — глубоко внутри нее. Зарегистрированы также звуковые волны в черепе кролика, возникшие вследствие облучения его глаза импульсом лазера.

Установлено, что звуковые волны, вызываемые лазерными импульсами в жидкости, могут разрывать находящиеся в ней вирусы табачной мозаики и бактериофаги Т-2. Однако не всегда ударные волны являются основной причиной образования микроповреждений. Наблюдаемые повреждения кожицы лука, помещенной в кювету с водой, при облучении лазерными импульсами с $\lambda = 1,06$ мкм связаны, по-видимому, с вскипанием биоткани, то есть с фотогидравлическим эффектом. Возможно, малый вклад ударных волн в механические повреждения объясняется близкими акустическими свойствами клеток и окружающей среды, тогда как в опытах по воздействию ударных волн на твердые биологические образования, например почечные камни, отмечается их разрушение.

Огромный интерес существует к возможному влиянию электромагнитного излучения непосредственно на сердце. Недавно обнаружен эффект снижения частоты сокращений сердца виноградной улитки в магнитном поле 15 кЭ, который объясняется изменением проницаемости оболочки клеток миокарда. С помощью электромагнитного излучения удалось даже вызвать полную остановку сердца. Часто у птиц, рыб, насекомых и млекопитающих отмечался рост двигательной активности и другие эффекты при действии магнитного поля.

Многие магнитобиологические эффекты объясняются реакцией живых объектов на магнитное поле посредством изменения интенсивности биохемилюминесценции жидкокристаллических образований (жиров, липидов и др.), фотоны которой выполняют роль переносчиков энергии и информации, что непосредственно отражается на состоянии организма.

Внешнее магнитное поле может влиять на биотоки

организма, которые являются пульсирующими токами. В результате возникает механическое смещение токонесущего участка, воспринимаемое организмом как механическое раздражение. Эта гипотеза в состоянии объяснить влияние слабого поля, а не только полей более 1 Э, как большинство других гипотез. В случае совпадения частот возбуждаемых магнитными полями механических колебаний какого-либо органа с его собственной частотой свободных колебаний заметные биологические эффекты могут возникать даже в магнитном поле Земли.

Сходным образом считается, что, например, для насекомых магнитобиологические эффекты, в частности ориентация, обусловлены не электромагнитной индукцией, а механическими силами. Силы возникают в результате взаимодействия магнитного поля Земли с циркулирующими токами, вызванными разностью потенциалов между поверхностью Земли и внутренними органами насекомых.

Качественные представления об электромагнитном возбуждении акустических колебаний на клеточном уровне дает механизм воздействия излучения на кольцевые резонаторы, образованные клеточными мембранами. Если частота электромагнитного излучения близка к частоте автоколебаний клеточных структур, то происходит синхронизация автоколебаний внешним источником. Такие синхронные колебания могут приводить к возбуждению акустических волн в окружающей среде и другим явлениям, например к изменению скорости выхода ионов. Наблюдение этих явлений позволяет судить о собственных частотах колебаний клетки. Подобный механизм можно привлечь и к интерпретации явления магнитного фосфена.

Как механическое, так и электромагнитное воздействие на среду зависят не только от частоты, но и от амплитуды воздействия. Более мощное воздействие трансформируется в большее количество импульсов отклика. Например, интенсивность света, падающего на сетчатку глаза, кодируется частотой импульсов, посылаемых по зрительному нерву. Частота импульсов соответствует логарифму освещенности сетчатки. Аналогичным образом кодируется в слуховой системе громкость звука.

Приведенные данные позволяют сделать вывод о на-

личии у биологических объектов способности генерировать и трансформировать друг в друга энергию практически всех диапазонов частот. При этом взаимодействие излучения с объектом осуществляется на разных структурных уровнях: от ядра до организма.

В отличие от собственного электромагнитного излучения биологических объектов акустическое излучение живых систем почти не изучено. Тем не менее акустические колебания так же, как и электромагнитные, — объективная реальность. Механизмы генерации излучений живых организмов, очевидно, должны быть связаны с взаимным акустоэлектромагнитным преобразованием в определенных структурных элементах организма. Раскрытие природы этих связей даст возможность по-новому понять место организма в системе его взаимодействия с окружающей средой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

До недавнего времени акустические и электромагнитные колебания рассматривались изолированно друг от друга, и только в последние годы начал выработываться единый подход к ним, в основе которого лежит универсальное явление взаимного акустоэлектромагнитного преобразования в веществе. Занимаясь поисками эффектов этого преобразования, мы обнаружили их на всех уровнях — от элементарных частиц до биологии и экологии. Рассматривая эти эффекты с единых позиций, мы старались обратить внимание на громадный диапазон генерируемых частот и большие частотные сдвиги в результате преобразования.

Одним из основных, на наш взгляд, является вывод о том, что любые материальные среды независимо от их агрегатного состояния и принадлежности к живой или неживой природе могут генерировать акустические и электромагнитные колебания в широком диапазоне частот. (Заметим, что, кроме электромагнитных и акустических волн, среда может откликаться также на то или иное воздействие и в виде различных корпускулярных излучений.)

Непосредственное экспериментальное доказательство широкого спектра преобразуемых сигналов затруднено в силу известных ограничений аппаратных возможностей, однако многочисленные факты преобразований

в отдельных узких диапазонах частот, распределенных по всей шкале акустических и электромагнитных волн, свидетельствуют в пользу этого вывода.

Важнейшим свойством рассмотренного преобразования является зависимость его характера и частотного спектра сигнала отклика от физико-химических свойств преобразующей среды. Можно сказать, что всякое вещество (и существо) обладает своим «голосом» и излучает свой «свет». Этот качественный вывод, однако, не позволяет пока ответить на вопрос, как по спектру отклика можно судить о физико-химических свойствах среды-преобразователя, а также о виде и спектре возбуждения. (В случае живых организмов интересно выяснить роль информации, содержащейся в воздействующем сигнале.)

Данный вопрос важен как с практической, так и с теоретической точки зрения. Последнюю можно сформулировать так. Должны существовать универсальные функции отклика материальной среды, описывающие ее реакцию на внешние электромагнитные, акустические или другие воздействия. Очевидно, такие функции отклика будут являться источником информации как о результатах воздействия на среду, так и о структуре и свойствах ее самой. Но вместе с тем функции отклика должны обладать и рядом общих свойств, единых для всех сред и видов воздействия. Эти свойства вытекают из общих требований причинности, устойчивости, симметрии и т. д. без использования каких-либо конкретных моделей среды и типов воздействия на среду. Разработка аппарата таких функций — фундаментальная задача теории.

Вопрос о зависимости отклика от типа возбуждения важен еще и потому, что во многих экспериментах генерация электромагнитного излучения наблюдается не только при акустическом возбуждении, но и при температурных воздействиях (нагрев, охлаждение), фазовых переходах, облучении заряженными частицами, химических реакциях и др. Кроме того, характер преобразования зависит от внешних условий, например электрического и магнитного полей. Выяснение зависимости спектра отклика от типа возбуждения и внешних условий — одна из главных задач экспериментального изучения акустоэлектромагнитных преобразований.

Всеобщий характер взаимного акустоэлектромагнит-

ного превращения определяет важную роль его во многих фундаментальных и прикладных областях естествознания: в технике — создание различных преобразователей; в материаловедении — дефектоскопия и неразрушающий контроль; в минералогии — определение условий образования минералов и горных пород; в геофизике — прогноз землетрясений, горных ударов в шахтах и изучение солнечно-земных связей; в экологии — учет последствий того или иного воздействия на окружающую среду; в медицине — диагностика, звуко- и электромагнитотерапия.

Рассмотрение эффектов взаимного преобразования с единых позиций полезно даже в общенаучном и общечеловеческом аспектах, так как формирует у людей потребность (и способность) к широкому восприятию действительности, к осмыслению ее с более общих позиций, что, в свою очередь, способствует лучшему пониманию окружающего мира.

ЛИТЕРАТУРА

Клюкин И. И. Удивительный мир звука. — Л.: Судостроение, 1978.

Холодов Ю. А. Шестой незримый океан. — М.: Знание, 1978. — 112 с.

Левин В. М., Маев Р. Г., Проклов В. В. Свет и звук: взаимодействие в среде. — М.: Знание, 1981.

Электромагнитные предвестники землетрясений / Под ред. М. А. Садовского. — М.: Наука, 1982. — 88 с.

Жаров В. П., Летохов В. С. Лазерная оптико-акустическая спектроскопия. — М.: Наука, 1984. — 320 с

Научно-популярное издание

Николай Гаврилович ДРУЖИНИН

Геннадий Петрович МАРКОВ

Виктор Иванович СТАНКО

ЗВУЧАЩИЙ «СВЕТ» И «СВЕЯЩИЙСЯ» ЗВУК

Гл. отраслевой
зова. Мл. реда
Смирнова. Х
Н. В. Клецка

ктор К. А. Куту
а художника А. Л.
) в. Техн. редактор

ИБ № 10266

Сдано в набор 08.06.89. Подписано к печати 28.07.89. Т 01161. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,57. Уч.-изд. л. 3,50. Тираж 28 315 экз. Заказ 1098. Цена 15 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 894009. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

ДОРОГОЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Брошюры этой серии в розничную продажу не поступают, поэтому своевременно оформляйте подписку. Подписка на брошюры издательства „Знание“ ежеквартальная, принимается в любом отделении „Союзпечати“.

Напоминаем Вам, что сведения о подписке Вы можете найти в „Каталоге советских газет и журналов“ в разделе „Центральные журналы“, рубрика „Брошюры издательства „Знание“.

Цена подписки на год 1 р. 80 к.



СЕРИЯ

ФИЗИКА