

**ACOUSTOLUMINESCENCE,
A NEW PHENOMENON
OF ACOUSTOOPTICS**

I. V. OSTROVSKII

A set of scientific results on new kind of crystals luminescence excited by acoustic wave is presented. It is referred as acoustoluminescence (AL) in Russian scientific journals, and sonoluminescence (SL) in English-language ones. Main properties of AL and its applications are briefly described. Comparison of AL with known types of luminescence of crystals is carried out.

Изложена совокупность научных результатов по новому виду люминесценции кристаллов, возбуждаемой акустической волной и называемой акустолюминесценцией (АЛ) в русскоязычной научной периодике и сонолюминесценцией (СЛ) в англоязычной. Кратко описаны основные свойства АЛ и ее использование. Проведено сравнение АЛ с известными видами люминесценции кристаллов.

© Островский И.В., 1998

**АКУСТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ –
НОВОЕ ЯВЛЕНИЕ
АКУСТООПТИКИ**

И. В. ОСТРОВСКИЙ

Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко

ВВЕДЕНИЕ

Для исследования физических свойств кристаллов и их дефектов широко используются оптические и акустические методы исследования. Особый интерес представляют новые явления, которые ранее не только не были известны, но и предсказать их было трудно. К таким относится акустолюминесценция кристаллов, то есть свечение кристалла, возбуждаемое акустической волной начиная с некоторой (пороговой) интенсивности. Данная статья излагает научные результаты по новому виду люминесценции кристаллов, акустолюминесценции (АЛ), возбуждаемой акустической волной (АВ).

Физические исследования твердых тел оптическими и акустическими методами занимают важное место в современной физике. Эти исследования являются частью одного из перспективных направлений в области физики твердого тела – акустооптики, имеющей фундаментальное и прикладное значение [1–3]. Исследования на стыке кристаллооптики и физической акустики ранее практически не велись, и только в конце 70-х годов появились работы, связывающие люминесценцию кристаллов и ультразвук [4, 5]. Авторы статьи [4] предложили новый способ возбуждения электролюминесценции в слоистой системе пьезоэлектрик–люминофор. Сам же термин “акустолюминесценция” в конце 60-х годов был впервые использован Ю.В. Гуляевым [6], теоретически рассмотревшим задачу об акустоконцентрационном эффекте. Он состоит в том, что ультразвук, распространяясь вдоль пьезополупроводника, может увлекать носители заряда, электроны и дырки, изменяя их концентрации в локальных местах кристалла. Принципиально новые механизмы возбуждения света ультразвуком в кристаллах не обсуждались и экспериментально не были обнаружены вплоть до работы [5], где описана АЛ в монокристаллах сульфида кадмия и высказано предположение о сложном механизме ее возбуждения ультразвуком (УЗ).

ЧТО ТАКОЕ АКУСТООПТИКА

Акустооптика изучает взаимодействие акустических и электромагнитных волн в среде. Как правило, это ультразвуковые волны и свет, распространяющиеся в конденсированной среде, влияющие на эту среду и взаимодействующие между собой. Известное

Таблица 1. Эффекты и явления акустооптики

Номер	Время	Автор	Эффекты и явления
1	Начало XIX века	Д. Брюстер, А. Зеебек	Упругооптический эффект
2	1880 год	А. Белл, В. Рентген, Д. Тиндаль	Фотоакустический эффект
3	1922 год 1926 год	Л. Бриллюэн Л. Манделштам	Теория рассеяния света на неоднородностях показателя преломления
4	1930 год	Е. Гросс, Г. Ландсберг, Л. Манделштам	Экспериментальное наблюдение рассеяния Манделштама–Бриллюэна
5	1932 год	П. Дебай, Ф. Сирс, Р. Люка, П. Бикар	Дифракция света на возбуждаемых внешним преобразователем ультразвуковых волнах
6	1934 год	Д. Френзел, П. Шульц	Сонолюминесценция жидкостей
7	1938 год	М. Вейнгеро	Фотоакустическая спектроскопия газов
8	1957 год 1958 год	В. Баранский Х. Боммель, К. Дрансфельд	Впервые зарегистрирован гиперзвук с помощью дифракции света на УЗ в кристаллах
9	1957 год 1964 год	И. Фабелинский (теория) Р. Чао, Ч. Таунс, И. Стойчев (эксперимент)	Вынужденное рассеяние Манделштама–Бриллюэна
10	1966 год	Е. Иппен	Дифракция света на ПАВ
11	1967 год	Ю. Гуляев	Гипотеза акустолюминесценции в полупроводниках за счет акустоконцентрационного эффекта
12	1973 год	А. Розенцвейг	Фотоакустическая спектроскопия твердых тел
13	1978 год	А. Добровольский, В. Леманов, В. Шерман	Возбуждаемая пьезоактивным ультразвуком электролюминесценция в слоистой системе
14	1979 год	И. Островский, А. Рожко, В. Лысенко	Обнаружение акустолюминесценции кристаллов

воздействие УЗ на среду состоит в том, что деформация, создаваемая УЗ, изменяет в пространстве и времени оптические свойства среды, что сказывается на распространении света. Световыми волнами служат как электромагнитные волны видимого диапазона, так и примыкающие к ним волны ближнего инфракрасного или ультрафиолетового диапазона. Как правило, воздействие УЗ сводилось ранее к изменению (модуляции) показателя преломления света. Последнее приводит к явлению дифракции света на УЗ. Влияние света на среду распространения связано с появлением в ней локальных механических напряжений вследствие высокочастотной электрострикции в электрическом поле световой волны и вследствие теплового расширения. Такой светотермоупругий эффект приводит к генерации акустических волн в поле световой волны.

Различают акустооптические и оптоакустические явления. Общий подход такой: если интенсивный УЗ влияет на свет, то это акустооптический эффект, если же интенсивный свет воздействует на акустические характеристики среды, то это оптоакустический эффект. К оптоакустическим относится также фотоакустический эффект. Он состоит в генерации звуковых волн при облучении вещества модулированным светом, который поглощается в этом веществе и возбуждает тепловые волны, то есть области расширения и сжатия. Далее тепловые волны преобразуются в звук, частоты звука и модуляции света совпадают.

В табл. 1 приведены наиболее значительные эффекты акустооптики с указанием времени их обнаружения.

Пояснения к табл. 1

1. Изменение показателя преломления среды при ее деформации.
2. Преобразование модулированного светового потока в звук.
3. Рассеяние Манделштама–Бриллюэна – рассеяние света на неоднородностях показателя преломления, которые возникают в конденсированной среде вследствие теплового движения атомов и молекул. Это рассеяние света в основном на высокочастотных фонах.
4. Наблюдение рассеяния Манделштама–Бриллюэна.
5. Различают дифракцию Брэгга и Рамана–Ната в зависимости от соотношения между длинами волн УЗ и света, а также апертурами светового и УЗ-пучков. При дифракции Рамана–Ната наблюдаются несколько пучков дифрагированного света.
6. Обнаружена люминесценция жидкости, возбуждаемая УЗ, при кавитации в воде. Диапазон частот килогерцевый.
7. Показано, что можно изучать оптические спектры газов по спектральной зависимости величины фотоакустического отклика образца газа.

8. Наблюдалась дифракция света на гиперзвуковых волнах.

9. Интенсивное лазерное излучение в конденсированной среде генерирует гиперзвуковые волны, на которых и происходит дифракция света. В результате возрастает стоковая компонента света, рассеянного на генерируемых светом же гиперзвуковых волнах.

10. Дифракция света на поверхностных акустических волнах мегагерцевого диапазона в кристаллах, например ниобата лития.

11. Высказано предположение, что при взаимодействии УЗ с электронами и дырками в полупроводнике возможно их пространственное перераспределение, что может привести к их излучательной рекомбинации. Последнюю предложено назвать *акустолюминесценцией*.

12. Показано, что можно изучать спектры поглощения света в непрозрачных твердых телах с использованием фотоакустического эффекта.

13. Возбуждена электролюминесценция в электролюминофоре ZnS за счет пьезоэлектрического поля УЗ, распространяющегося в ниобате лития, на поверхности которого помещен порошок ZnS.

14. Экспериментально обнаружен новый тип люминесценции кристаллов – *собственно-дефектная акустолюминесценция*. Она связана с заряженными дефектами кристалла, возникающими вследствие колебательного движения дислокаций в поле УЗ сверхпороговой интенсивности. Диапазон частот мегагерцевый, интенсивность УЗ от 1 до 10 Вт/см².

Из таблицы видно, что акустооптика как фундаментальная наука возникла давно, еще в XIX веке. Особенно интенсивное развитие она получила во второй половине XX века. В последние десять лет в области акустооптики активно работают физики Украины, России, США, Англии, Франции, Японии и других стран. Значительный вклад в ее развитие внесли такие известные ученые, как академик РАН Ю.В. Гуляев, член-корреспондент НАНУ М.К. Шейнкман, профессора П. Дас, А. Корпел, Р. Дьелесан, В.В. Проклов, И.Я. Кучеров и многие другие.

ИЗВЕСТНЫЕ ВИДЫ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КРИСТАЛЛОВ

Согласно устоявшимся представлениям, люминесценцию можно классифицировать по типу возбуждения, механизму преобразования энергии после первоначального возбуждения кристалла, а также по временным характеристикам или длительности свечения. *Люминесценцией* называется избыточное по отношению к тепловому излучению с длительностью свечения, значительно превышающей период собственных световых колебаний излучающего центра (молекулы, атома).

В твердых телах механизмы преобразования энергии после первоначального возбуждения кристалла часто связаны с процессами генерации и рекомбинации электронов и дырок, а такая люминесценция именуется *рекомбинационной*.

Наряду с рекомбинационной люминесценцией в конденсированных средах наблюдается также внутрицентровая люминесценция, связанная с электронными переходами в системе энергетических уровней отдельного центра люминесценции, например в примесном атоме. По механизмам элементарных процессов различают *резонансную* и *спонтанную* люминесценции. В первой задействованы два уровня (основной и возбужденный), а во второй – три уровня (основной, возбужденный и лежащий между ними уровень излучения). Если в элементарных процессах энергообмена принимает участие метастабильный уровень, люминесценция называется *метастабильной*.

Различные элементарные процессы энергообмена практически мало связаны с видом возбуждения, и наиболее важной можно назвать классификацию люминесценции по типу возбуждения.

Тип возбуждения люминесценции обычно отражен в ее названии. Так, при возбуждении светом имеем **фотолюминесценцию** (ФЛ).

Электролюминесценция (ЭЛ) возбуждается внешним электрическим полем, приложенным к образцу.

Деформационная люминесценция (ДЛ) возникает в твердых телах при их пластической деформации. Она наблюдается только в период времени от начала деформации образца и до его разрушения.

Доменная люминесценция – это излучение света из ограниченной в пространстве подвижной области в кристалле, где напряженность электрического поля выше, чем в среднем по образцу.

Катодолуминесценция возникает при облучении конденсированных сред пучками ускоренных электронов (катодных лучей).

Радиолуминесценция – это свечение, вызванное облучением образца продуктами радиоактивного распада и элементарными частицами: нейтронами, протонами, α -частицами и др.

Рентгенолюминесценция возбуждается рентгеновским и γ -излучением.

Триболюминесценция возникает при механическом нагружении кристалла свыше предела прочности и сопровождается образованием микротрещин в образцах. Механизм триболюминесценции связан с накоплением электрического заряда в области микротрещин с последующим электрическим пробоем преимущественно по поверхности.

Термолюминесценция наблюдается в предварительно возбужденных, например светом, кристаллах с последующим их нагревом.

Стриммерная люминесценция сопровождается электрическим разрядом в кристалле. В отличие от обычной ЭЛ она характеризуется появлением ряда светящихся полос, не совпадающих по направлению с полем.

Отметим также **хемилюминесценцию**, которая сопровождается некоторыми химическими реакциями, **биолюминесценцию**, являющуюся частным случаем хемилюминесценции и наблюдаемую в биообъектах, **кандолюминесценцию**, то есть свечение тел в пламени горелки.

Скажем, что в жидкостях интенсивным ультразвуком возбуждается **сонолюминесценция**. Ее возникновение связывают с процессами кавитации. Такой механизм просто невозможен в твердых телах, поскольку в них не существует кавитации.

СОБСТВЕННО-ДЕФЕКТНАЯ АКУСТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ

Основные характеристики

Экспериментально собственно-дефектная АЛ (ДАЛ) была обнаружена в кристаллах CdS [5]. В тонких пластинах полупроводникового CdS возбуждался ультразвук мегагерцевого диапазона, образцы были помещены в жидкий азот или гелиевый криостат. При интенсивности УЗ выше 1 Вт/см^2 пластины сульфида кадмия начинали излучать свет по пути распространения УЗ. Впоследствии АЛ была возбуждена и при комнатной температуре и в других материалах, а именно: ZnS, ZnSe, CdS, NaCl, LiNbO_3 , $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$. Обращает на себя внимание, что АЛ обнаружена в кубических щелочно-галлоидных соединениях NaCl и KCl, не обладающих пьезоэлектрическим эффектом, как ниобат лития или германат висмута. Возбуждение АЛ в NaCl и KCl послужило одним из доказательств, что она не связана с пьезоэлектрическими полями, сопровождающими УЗ, и не сводится к электролюминесценции в электрическом поле УЗ. Схемы возбуждения АЛ показаны на рис. 1, б и 2, б. Стрелки представляют свет АЛ, направляемый далее на монохроматор и компьютерную систему обработки результатов.

Типичные спектры ДАЛ приведены на рис. 1 для кристаллов CdS и на рис. 2 для NaCl и KCl. Общее свойство этих спектров состоит в том, что их максимумы соответствуют излучательным электронным переходам в системе собственных дефектов решетки кристалла. Другое основное свойство ДАЛ заключается в том, что ее возбуждение носит только пороговый характер. В соединениях A_2B_6 , к которым относятся CdS, CdSe, ZnS, ZnSe, свечение ДАЛ появляется при интенсивности УЗ от 1 до 5 Вт/см^2 в зависимости от материала. Таким образом, к основным свойствам ДАЛ можно отнести следующее: 1) спектры формируются в системе собственных дефектов решетки; 2) возбуждение носит пороговый

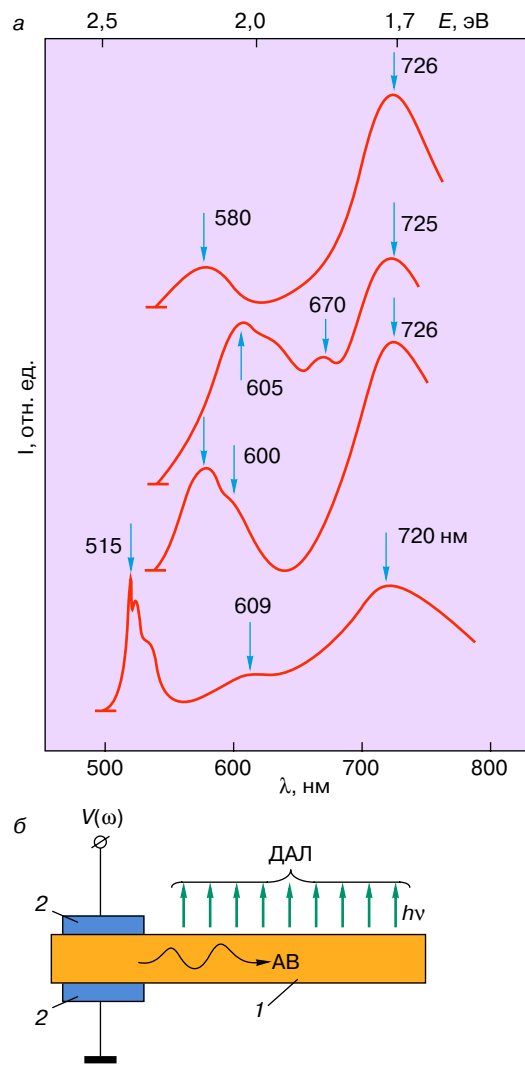


Рис. 1. а – спектры ДАЛ различных образцов кристаллов CdS при температуре жидкого азота; б – схема возбуждения ДАЛ: 1 – кристалл, 2 – металлические электроды-преобразователи для возбуждения УЗ, $V(\omega)$ – электрическое переменное напряжение, возбуждающее УЗ

характер; 3) ДАЛ не сводится к электролюминесценции в электрическом поле, сопровождающем УЗ.

Механизм ДАЛ и энергия УЗ

Механизм ДАЛ связан с воздействием акустической волны на кристалл. Прежде всего это: 1) локальная знакопеременная деформация кристалла, 2) появление пьезоэлектрических полей в пьезоэлектриках, 3) возможный локальный разогрев, 4) движение и размножение дислокаций в поле напряжений АВ, 5) взаимодействие движущихся дислокаций в кристалле. При этом напряженность электрического поля в области ядра заряженных дислокаций в

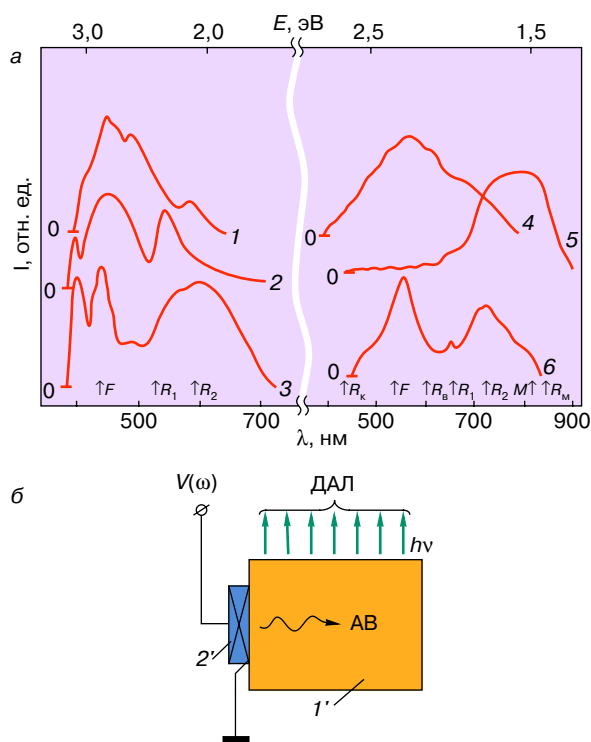


Рис. 2. а – спектры ДАЛ NaCl (1–3) и KCl (4–6), полученные при комнатной температуре; б – схема возбуждения ДАЛ: 1' – кристалл, 2' – пьезокерамический преобразователь для возбуждения УЗ, $V(\omega)$ – электрическое переменное напряжение, возбуждающее УЗ

кристаллах A_2B_6 достигает 10^6 В/см, что значительно превышает пьезоэлектрические поля в опытах с АЛ ($\sim 10^3$ В/см). Перечисленные воздействия акустической волны в принципе могут привести к возникновению триболоминесценции, электролюминесценции, термолюминесценции, импульсной и стационарной деформационной люминесценции. Однако в опытах с АЛ триболоминесценция не могла быть, поскольку возбуждение АЛ не сопровождается появлением микротрещин и АЛ носит стационарный, а не импульсный характер. Светозлучение происходит из всей поверхности кристалла, что невозможно в случае триболоминесценции. Исключена также и ЭЛ, что следует из экспериментов по частотным характеристикам АЛ резонаторов CdS, а также из опытов с NaCl и KCl. Термолюминесценция не возникала в образцах при нагреве, поэтому и возможное тепловое воздействие УЗ не могло приводить к термоизлучению. Следовательно, АЛ не является аналогом термолюминесценции. Механизм импульсной ДЛ, связанный с выносом движущимися дислокациями электрического заряда на поверхность и последующим электрическим пробоем, также не может объяснить возбуждение

ДАЛ, поскольку ДАЛ в целом носит стационарный характер.

Можно было бы думать, что объяснением ДАЛ может служить механизм стационарной ДЛ. Стационарная ДЛ возникает вследствие туннелирования электронов из примесных уровней в зону проводимости под действием электрического поля дислокации с последующей рекомбинацией этих электронов с ионизированными центрами свечения. Такая схема возбуждения не предусматривает возможности изменения спектров ДЛ при изменении механической нагрузки. В случае же ДАЛ в CdS спектры изменяются при увеличении амплитуды УЗ. Изменения же в спектрах ДЛ при изменяющемся давлении вообще не наблюдаются. К тому же в NaCl и KCl возбуждение АЛ происходит в неокрашенных кристаллах, в которых не возбуждается ДЛ. Поэтому и механизм стационарной ДЛ не может объяснить все особенности АЛ.

Для непротиворечивого объяснения особенностей АЛ можно предложить собственно-дефектный механизм возбуждения. Согласно этому механизму, ультразвук сверхпороговой мощности генерирует дефекты собственной структуры кристалла. Излучательные электронные переходы в системе возникающих дефектов и дают АЛ. Генерировать дефекты ультразвуком можно как в местах растяжения кристалла, так и при возвратно-поступательном скольжении дислокаций в поле напряжений ультразвука. Взаимодействие дислокаций с точечными дефектами и генерация дефектов в поле ультразвука подвижными дислокациями установлены довольно достоверно. Собственно-дефектный механизм АЛ подтверждается также тем, что спектры АЛ содержат полосы, связанные с дефектами структуры кристаллов. Существенно, что эти дефекты вызваны ультразвуком в неравновесном зарядовом состоянии.

Надо отметить, что процесс обмена энергией между акустической волной и решеткой кристалла нельзя рассматривать с точки зрения фононов. Дело в том, что упругое поле дислокации является дальнедействующим. Поэтому обмен энергией между движущейся дислокацией и ультразвуком осуществляется во всем объеме кристалла. Дислокация, обладая дальнедействующим упругим полем, как бы концентрирует упругую энергию акустической волны, заключенную в большом объеме, приходящемся на одну дислокацию. Таким образом, мы установили принципиальную возможность генерации линейных и точечных дефектов при пороговых для возбуждения ДАЛ интенсивностях акустической волны. Механизм же ДАЛ является собственно-дефектным с точки зрения формирования спектра и излучения света кристаллической решеткой в поле УЗ.

Близкие пары Френкеля и формирование спектров ДАЛ

Парами Френкеля в физике твердого тела называют два связанных дефекта: междоузельный атом и вакансию. В зонной схеме такой паре соответствуют два энергетических уровня, расположенные в запрещенной зоне, один донорный, а другой акцепторный. Поскольку спектры ДАЛ CdS содержат полосы, связанные с междоузельным кадмием Cd_i^+ и серой S_i^- , а также вакансиями кадмия V_{Cd}^- и серы V_S^+ , целесообразно рассмотреть зонную схему кристалла с дефектами (рис. 3). Ненулевое зарядовое

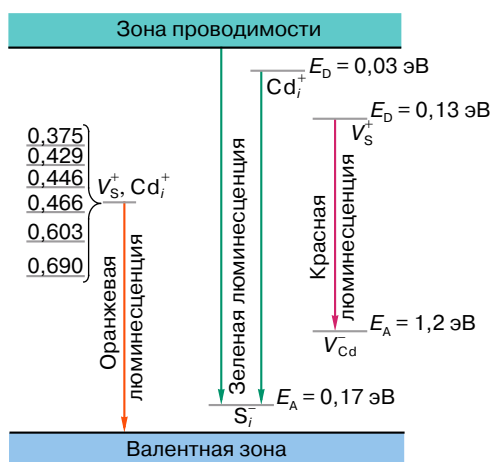


Рис. 3. Зонная схема кристалла CdS с собственными дефектами

стояние этих дефектов обусловлено следующим: рассчитанные из эксперимента энтальпии реакций диссоциации $CdS \rightarrow V_S^+ + V_{Cd}^-$ и $CdS \rightarrow V_S^+ + V_{Cd}^-$ равны 4 и 2,7 эВ соответственно, что говорит о меньших энергезатратах и большей вероятности

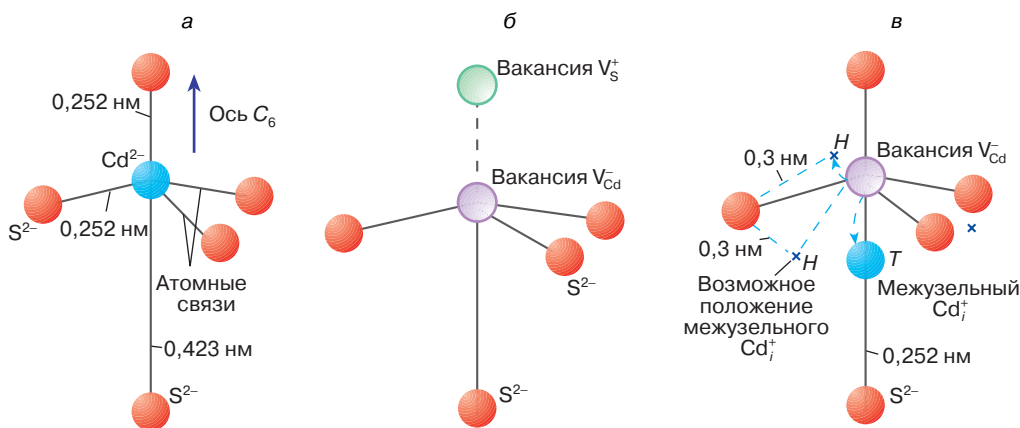


Рис. 4. Атомная конфигурация ближайших соседей в решетке CdS: а – бездефектная атомная конфигурация, б – центр красной ДАЛ, в – центр оранжевой ДАЛ, Т и Н – тетраэдрическое и гексагональное междоузлия

для образования заряженной пары дефектов. Группа уровней, обозначенная как (V_S^+, Cd_i^+) , представляет комплекс донора с ловушкой. Поскольку собственные дефекты являются донорами и акцепторами, то здесь применима теория донорно-акцепторных пар. Энергия излучения при рекомбинации электрона и дырки в паре может быть вычислена по формуле

$$h\nu = E_g - \Delta_a - E_D - E_A + [q^2 / (4\pi\epsilon\epsilon_0 r_{AD}^2)] - \phi(r_{AD}),$$

где E_g – ширина запрещенной зоны, Δ_a – эффективное изменение E_g под действием УЗ, E_D и E_A – уровни залегания донора и акцептора, ϕ – поправка на некулоновский характер взаимодействия при малых r_{AD} – расстояниях между донором и акцептором, q – заряд электрона.

При амплитуде АВ вблизи пороговых значений возникают зеленая и оранжевая полосы АЛ. Зеленая ДАЛ с максимумом на 515 ± 5 нм – это излучательный переход электрона из донора Cd_i^+ или зоны проводимости на центр зеленой люминесценции S_i^- . Оранжевая ДАЛ – это переходы электронов из группы уровней (V_S^+, Cd_i^+) в валентную зону. При дальнейшем повышении амплитуды АВ более интенсивно будут происходить процессы генерации дефектов и ионизации доноров и акцепторов. Дырка из S_i^- и электрон из Cd_i^+ переводятся в валентную зону и зону проводимости соответственно. Это приводит к замедлению роста интенсивности зеленой полосы и более крутому росту оранжевой полосы ДАЛ. С ростом интенсивности УЗ начинает проявляться также широкая полоса красной АЛ с максимумом в области 720–725 нм. Красная полоса ДАЛ может быть сформирована излучательными переходами между заряженными вакансиями серы и кадмия, то есть в близкой донорно-акцепторной паре (V_S^+, V_{Cd}^-) .

После излучения рассматриваемые дефекты могут аннигилировать по схеме $(V_{Cd}^- + Cd_i^+)$, а также

$(V_s^{2+} + S_i^{2-})$. Частично они могут также остаться в кристалле, диффундируя к поверхности. В целом приведенная на рис. 3 схема и атомная конфигурация дефектов, показанная на рис. 4, хорошо согласуются с максимумами в спектрах ДАЛ (см. рис. 1).

Независимая проверка наличия подобных дефектов в кристаллах была проведена с помощью температурных зависимостей акустотока, а также другими экспериментами. Все независимые опыты подтвердили факт генерации пар Френкеля в поле УЗ сверхпороговой интенсивности. Таким образом, сейчас окончательно доказано, что ДАЛ возникает в результате генерации ультразвуком электрически заряженных дефектов структуры кристалла.

ПРИПОВЕРХНОСТНАЯ АКУСТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ НА ГРАНИЦЕ КРИСТАЛЛ–ГАЗ

При распространении УЗ по поверхности пьезоэлектрического кристалла пьезоэлектрическое поле, сопровождающее УЗ, проникает за пределы кристалла в окружающее пространство. Если кристалл окружен воздухом, то можно осуществить его возбуждение до уровня возникновения микрозарядов. Наиболее просто возбудить интенсивные УЗ-колебания в тонких пластинах, называемых резонаторами.

Пьезоэлектрическое поле, связанное с ультразвуковыми колебаниями в пьезоэлектрическом кристалле, может быть существенно сильнее возбуждающего, приложенного к резонатору. При колебаниях на резонансной частоте по толщине пластины укладывается половина длины волны ультразвука. Расчет дает такое значение пьезоэлектрического поля E_n :

$$E_n = \frac{4VK^2Q}{h\pi^2},$$

где напряженность внешнего приложенного поля равна $V/2h$, Q – механическая добротность, K – коэффициент электромеханической связи кристалла. Следовательно, E_n может быть сильнее приложенного поля. В хороших пьезоэлектриках E_n может в десятки и сотни раз превышать приложенное. Можно наносить контакт не на всю поверхность пьезоэлектрика, и тогда пьезополе проникает из пьезопластины в окружающую среду. Это поле способно поддерживать свечение газового разряда. Повышенный практический интерес представляет разряд в газе высокого давления. Эксперименты по возбуждению газового разряда при атмосферном давлении проводились с резонаторами LiNbO_3 толщиной 0,14–3 мм с длиной и шириной от единиц миллиметров до нескольких сантиметров. При подаче на пластину LiNbO_3 возбуждающего напряжения в ней возбуждались ультразвуковые колебания за счет собственного пьезоэффекта. При частотах, близких к резонансной, и напряжении, большем некоторого порогового значения, у поверхности об-

разца возбуждался газовый разряд в виде фиолетовых точек. Исследования проводились в частотном интервале 0,4–16 МГц, в непрерывном и импульсном режимах возбуждения УЗ. Во всех случаях наблюдались пробой газа и газовый разряд окружающего образец воздуха. В спектре присутствуют линии азота и кислорода, входящих в состав воздуха.

Важно отметить, что свечение газа возбуждается пьезоактивной УЗ-волной при амплитудах, соответствующих интенсивному движению дислокаций. Поэтому можно думать, что возбуждение свечения может быть связано также с акустодислокационными эффектами, включая сильные электрические поля у ядер дислокаций, а также эмиссию электронов с поверхности кристалла под действием акустической волны. Речь идет о том, что эмиттируемые электроны могут давать вклад в первичную ионизацию прилегающего к поверхности образца газа, давление которого не понижено для облегчения возбуждения газового разряда. В дальнейшем пьезоэлектрическое поле УЗ способно поддерживать постоянный газовый разряд у поверхности кристалла.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

1. Практическое использование любого физического явления состоит в разработке каких-либо устройств, применяемых в науке и технике, и в создании принципиально новых методов для экспериментального исследования свойств вещества. АЛ послужила основой для разработки компактных устройств анализа состава газовых смесей, а также для разработки источников света нового типа.

2. С точки зрения фундаментальной науки физические процессы возбуждения акустолюминесценции легли в основу разработки принципиально новых экспериментальных методик для изучения дефектов структуры кристаллов. Особенно это относится к короткоживущим собственным дефектам, то есть к междоузельным атомам и вакансиям, с временем жизни даже меньше одной миллисекунды. Для их исследования просто раньше не существовало никаких методов. Кроме того, короткоживущие дефекты структуры играют очень важную роль в так называемой радиационной стойкости материалов, включая полупроводники и полупроводниковые приборы. Были разработаны акустооптическая модуляционная спектроскопия (АОМС) и акустооптическая нестационарная спектроскопия (АОНС), которые и позволяют идентифицировать, классифицировать, изучать свойства дефектов. При этом метод АОНС позволяет исследовать слоистые системы типа подложка – тонкий слой, включая именно плоскость раздела между подложкой и слоем. Сейчас такие структуры интенсивно исследуются с целью использования в полупроводниковой микроэлектронике.

3. В качестве примера приведем блок-схему (рис. 5) и описание устройства, называемого акустолюминесцентным анализатором газовых смесей (АГС). Он использует приповерхностную АЛ в системе пьезоэлектрик–газ. АГС может быть использован для контроля смеси газов на присутствие какой-либо компоненты или для слежения за величиной концентрации какого-либо конкретного газа в смеси.

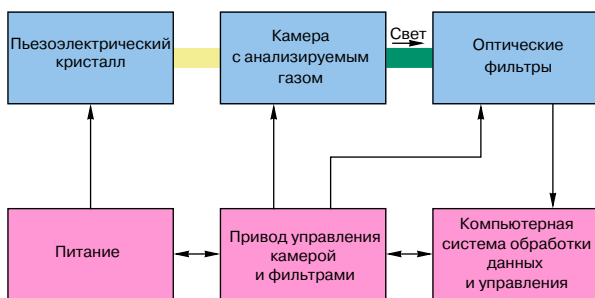


Рис. 5. Блок-схема АГС

Физическая основа работы АГС есть излучение света анализируемым газом при возбуждении приповерхностной АЛ. Каждая компонента в газовой смеси имеет свое характеристическое излучение с наиболее сильной спектральной линией. С изменением оптических интерференционных фильтров регистрируется оптический спектр излучения АЛ. Затем компьютер сравнивает полученный спектр с известными характеристическими линиями свечения разных газов и дает ответ, из чего, собственно, состоит анализируемая смесь. Подобное устройство отличается от известных компактностью, быстродействием, малыми габаритами, малой потребляемой мощностью, универсальностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Осталось сказать, что в современной физике поиск новых явлений и эффектов, которые были бы перспективны как с научной, так и с практической точки зрения, является всегда актуальной задачей. Без сомнения, это будет относиться и к физическим исследованиям начала XXI века. Хотелось бы, чтобы на примере АЛ читатель нашел для себя интересной акустооптику как научное направление, по которому целесообразно работать и сейчас и в будущем.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Островский И.В.* Акустолюминесценция и дефекты кристаллов. Киев: Вища шк., 1993. 219 с.
2. *The Physics of Semiconductors: Proc. 22 Intern. Conf. L.: World Sci., 1994. 1813 p.*
3. *Гуляев Ю.В., Проклов В.В., Шкердин Г.И.* // УФН. 1978. Т. 124, вып. 1. С. 61–111.
4. *Добровольский А.А., Леманов В.В., Шерман А.Б.* // Письма в ЖТФ. 1978. Т. 4, вып. 13. С. 753–757.
5. *Островский И.В., Рожко А.Х., Лысенко В.Н.* // Там же. 1979. Т. 5. С. 910–913.
6. *Гуляев Ю.В.* // ФТТ. 1967. Т. 9, вып. 2. С. 431–434.

* * *

Игорь Васильевич Островский, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой общей физики Киевского национального университета. Область научных интересов: акустооптика, физика твердого тела, физическая акустика. Автор двух монографий и 109 статей.