жана кандай максатта колдонгонуна жараша топторго бөлүү аракеттери бар. Лабораториялык иштерде студенттер жандуу экспериментти эмес, компьютердик моделди байкашат, ал ар дайым чындыкты методологиялык жактан туура чагылдыра албайт [4]. Студенттерди объективдүү аралыктан баалоону уюштуруу да бир топ кыйын. Балким, убакыттын өтүшү менен мындай эксперимент жүргүзүү кеңири таралган практикага айланышы мүмкүн.

Колдонулган адабияттар

1. Бражников М.А., Пурышева Н.С. Самообразование и становление дистанционного обучения физике в России // Физическое образование в вузах. 2017. Т. 23. № 2. С. 34–50.
2. Лапаник О.Ф., Слабженникова И.М. Особенности организации учебного процесса по дисциплине “Физика” в техническом университете на современном этапе // Физическое образование в вузах. 2018. Т. 24. № 3. С. 12–22.
3. Бугаев А.И. Методика преподавания физики. Теоретические основы. М.: Просвещение, 1981. 288 с.
4. Султаналиева Р.М., Тынышова А.М., Керменбаева Н.С., Жогорку техникалык окуу жайларында физиканы окутууда санариптик методдорду колдонуу//Вестник Ala-Too 2021 №2 С. 125-128.
5. Бондарев Б.В., Калашников Н.П., Спирин Г.Г. Курс общей физики: В 3 кн.: Учебное пособие. М.: Высшая школа, 2003.

Рецензент: педагогика илимдеринин кандидаты, доцент Дөөлөталиева А.С.

УДК 544.18
DOI 10.58649/1694-9099-2026-2-376-384

Осмоналиев К.
Жусуп Баласагын атындагы КУУ
Осмоналиев К.
КНУ имени Жусупа Баласагына
Osmonaliev K.
KNU Jusup Balasagyn

ORCID 0009-0007-6523-0156

КВАНТТЫК ТЕОРИЯ ЖАНА КРИСТАЛДАРДАГЫ ДЕФЕКТТЕРДИН ПРОЦЕССТЕРИ (ХРОНОЛОГИЯЛЫК АСПЕКТИ ЖАНА АКТУАЛДЫК МАСЕЛЕЛЕРИ)
КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ И ПРОЦЕССЫ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В КРИСТАЛЛАХ (ХРОНОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ И АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ)
FORMATION IN CRYSTALS (CHRONOLOGICAL ASPECT AND TOPICAL ISSUES QUANTUM THEORY AND PROCESSES OF DEFECT)

Кыскача мүнөздөмө: Бул макалада кристаллдардагы дефекттердин пайда болушунун кванттык теориясы, анын хронологиясы жана актуалдуу маселелери каралат. Дефекттердин пайда болушунун кванттык теориясынын актуалдуулугу кванттык технологиялардын өнүгүшү менен шартталган, анда чекиттик дефекттер, мисалы, алмаздагы NV-борборлор, масштабдалуучу кубиттер катары колдонулат. Учурдагы изилдөөлөр микроэлектроникада, энергетикада жана кванттык эсептөөлөрдө зарыл болгон белгилүү касиеттерге ээ материалдарды түзүү үчүн атомдук түзүлүштү башкарууга багытталган. Кванттык-механикалык моделдердин, атап айтканда, тыгыздык функционалы ыкмаларынын өнүгүшү кошулмалардын жана структуралык дефекттердин - дислокациялардын, вакансиялардын жана башка кемчиликтердин - жүрүм-турумун алдын ала айтууга мүмкүндүк берет. Заманбап материал таанууда

басым дефекттерди жөн гана жок кылуудан аларды инженердик колдонууга, башкача айтканда, багытталган дефектообразование процессине өтүүдө. Тең салмаксыз радиациялык дефекттердин пайда болуу процесстерин түшүнүү радиацияга туруктуу материалдарды түзүү үчүн маанилүү. Монокристаллдык диэлектриктер приборлордун натыйжалуулугун жогорулатуу үчүн дефекттердин пайда болушун так көзөмөлдөөнү талап кылат.

Аннотация: В статье рассмотрены хронология и актуальные вопросы квантовой теории дефектообразования в кристаллах. Актуальность квантовой теории дефектообразования обусловлена развитием квантовых технологий, в которых точечные дефекты, например NV-центры в алмазе, используются как масштабируемые кубиты. Современные исследования направлены на управление атомной структурой материалов с целью получения заданных свойств, востребованных в микроэлектронике, энергетике и при создании квантовых «магистралей». Развитие квантово-механических моделей, в частности методов функционала плотности, позволяет прогнозировать поведение примесей и структурных несовершенств: дислокаций, вакансий и других дефектов. В современном материаловедении акцент смещается от простого устранения дефектов к их инженерному использованию - направленному дефектообразованию. Понимание процессов образования неравновесных радиационных дефектов имеет важное значение для создания материалов, устойчивых к облучению. Монокристаллические диэлектрики требуют прецизионного контроля дефектообразования для повышения эффективности приборов.

Abstract: This article examines the chronology and current issues of the quantum theory of defect formation in crystals. The relevance of the quantum theory of defect formation is driven by the development of quantum technologies, in which point defects, such as NV centers in diamond, are used as scalable qubits. Current research is aimed at controlling the atomic structure of materials in order to obtain tailored properties required in microelectronics, energy technologies, and quantum computing. The development of quantum-mechanical models, in particular density functional methods, makes it possible to predict the behavior of impurities and structural imperfections, including dislocations, vacancies, and other defects. In modern materials science, the focus is shifting from simply eliminating defects to their engineering use, namely targeted defect formation. Understanding the formation processes of nonequilibrium radiation defects is important for creating radiation-resistant materials. Single-crystal dielectrics require precise control of defect formation to improve device efficiency.

Негизги сөздөр: дислокация; дефект; электрондук подсистема; чекиттик дефект; вакансия; экситон.

Ключевые слова: дислокация; дефект; электронная подсистема; точечный дефект; вакансия; экситон.

Keywords: dislocation; defect; electronic subsystem; point defect; vacancy; exciton.

Введение. После создания основ квантовой теории конденсированных сред на протяжении многих десятилетий развития физики полупроводников и диэлектриков общепринятым считалось, что возбуждение электронной подсистемы кристалла приводит к перераспределению электронов между разрешёнными энергетическими зонами и набором локальных электронных уровней в запрещённой зоне, обусловленных примесными и собственными дефектами кристалла.

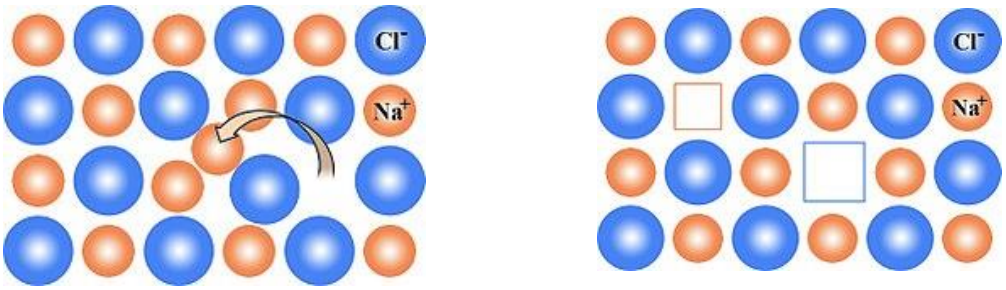
Процессы дефектообразования в кристаллах представляют собой механизмы нарушения идеальной периодичности кристаллической решётки, возникающие под воздействием различных факторов, таких как температура, радиация, электрические поля и легирование. Эти процессы определяют многие структурно-чувствительные свойства материалов, включая диффузию, ионную проводимость, прочность и оптические характеристики.

Основные процессы и типы дефектов

1. Термическое дефектообразование. При повышении температуры в кристалле увеличивается вероятность образования точечных дефектов.

Дефекты по Френкелю образуются, когда ион перемещается из нормального узла решётки в междоузельное пространство, создавая пару из вакансии и междоузельного иона. В ионных кристаллах энергия образования междоузельных дефектов может быть меньше для катионов, чем для анионов, вследствие меньшего размера катионов (рис. 1а).

Дефекты по Шоттки образуются, когда ион покидает своё место в кристаллической решётке и перемещается на поверхность кристалла, создавая вакансию. Для сохранения электронейтральности ионного кристалла дефекты Шоттки обычно возникают парами: вакансия катиона и вакансия аниона. Это равновесный процесс, количество таких дефектов зависит от температуры (рис. 1б).



а) б)

Рисунок 1. Основные типы термического дефектообразования

Радиационное дефектообразование. Воздействие ионизирующего излучения - электронов, ионов, нейтронов, гамма-квантов - приводит к образованию радиационных дефектов. Механизмы их возникновения включают:

• **ударные механизмы**: высокоэнергетические частицы могут напрямую выбивать ионы из узлов решётки, создавая вакансии и междоузельные атомы;

• **ионизационные механизмы**: в ионных кристаллах значительную роль играют ионизационные процессы, при которых распад электронных возбуждений - экситонов - приводит к смещению атомов и образованию устойчивых дефектов, таких как центры окраски: F-, H-, α-, I-центры и др. (рис. 2).

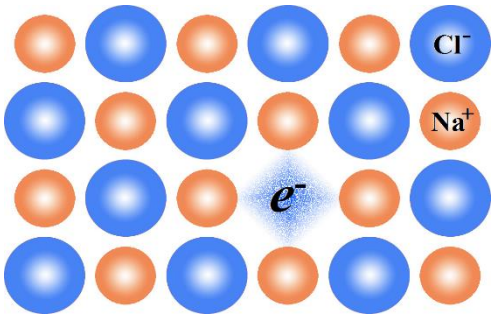
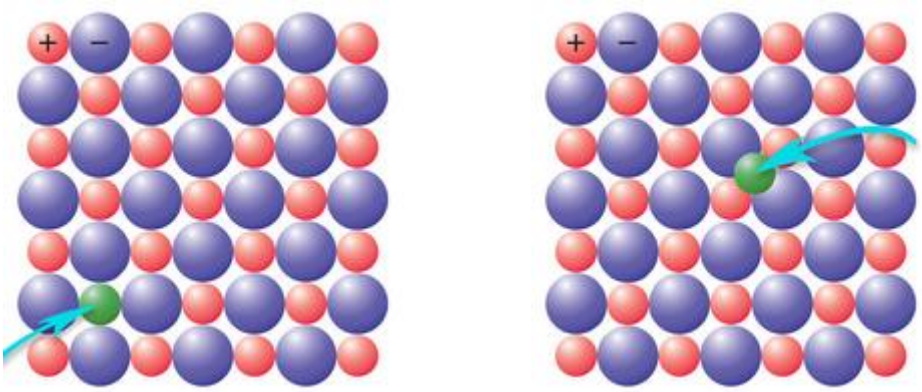


Рисунок 2. F-центр

1. Дефектообразование под воздействием примесей и легирования

Введение примесей в ионных кристаллах может привести к образованию дефектов для компенсации заряда и сохранения локальной и общей электронейтральности. Например, замещение двухвалентного катиона одновалентным потребует создания дополнительной катионной вакансии. Процессы диффузии примесей под действием нагрева и электрических полей также сопровождаются образованием дефектов (рис.3а и б).



а)Примесь замещения б)Примесь внедрения

Рисунок 3. Примесь замещения(а) и внедрения(б)

2. Линейные и объёмные дефекты.

Помимо точечных дефектов, в ионных кристаллах могут образовываться и другие типы дефектов.

Линейные дефекты (дислокации). Нарушения в правильном расположении кристаллической решетки вдоль линии. Их подвижность определяет пластичность и прочность кристаллов (рис.4а и б).

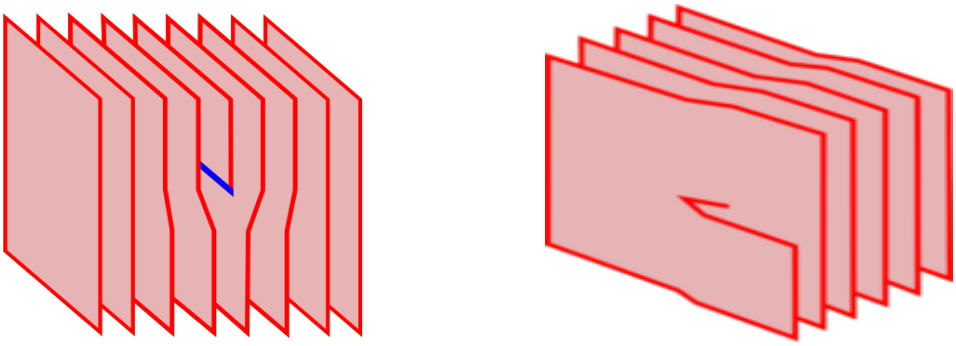
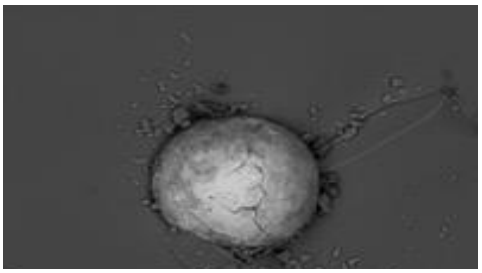


Рисунок 4. Продольная (а) и винтовая (б) дислокации

Объёмные дефекты. Это скопления точечных дефектов, образующие поры, каналы или включения примесей. Понимание этих процессов позволяет прогнозировать и контролировать свойства ионных кристаллов в различных условиях эксплуатации (рис. 5а, б).



а)Поры. Локальный разрыв решетки



б) Включения. Внедрение пузырьков и макрокопических примесей

Рисунок 5.а) Поры, б)Включения

В квантово-механической теории полупроводников и диэлектриков рассматриваются три типа переходов между энергетическими уровнями:

- излучательные, ведущие к появлению люминесценции;
- безызлучательные, приводящие к превращению поглощённой кристаллом энергии в малые колебания многих атомов, то есть к выделению тепла;
- безызлучательные, приводящие к созданию и преобразованию точечных радиационных дефектов.

Цель исследования:

а) рассмотреть экспериментальные проявления и механизмы явлений создания и преобразования точечных дефектов в конденсированных средах при возбуждении их электронной подсистемы;

б) обсудить ключевые проблемы сложившейся в настоящее время в физике полупроводников и диэлектриков ситуации, требующей единого рассмотрения электронных возбуждений и точечных дефектов в твёрдых телах.

1. Экспериментальное обнаружение создания и преобразования дефектов при возбуждении электронной подсистемы диэлектриков и полупроводников

- для всех твёрдых тел - металлов, полупроводников и диэлектриков - реализуется универсальный механизм создания радиационных дефектов, обусловленный смещением атомов (ионов) кристаллической решётки из узлов в междоузлия при упругом рассеянии частиц достаточно высоких энергий на атомах. Это механизм упругого смещения;
- при умеренных энергиях имеет место упругое парное соударение, подчиняющееся законам сохранения энергии и импульса. При этом достаточным условием образования дефекта является передача атому (иону) кристаллической решётки некоторого количества энергии, превышающего характерную для данного кристалла пороговую энергию ~10 эВ;
- при взаимодействии частиц и фотонов с твёрдым телом основная доля их энергии расходуется не на процессы упругого смещения атомов, а на возбуждение электронной подсистемы кристаллов;
- особенно ярко это проявляется в ЩГК. Основными центрами окраски служат F-центр - анионная вакансия, захватившая электрон; H-центр - межузельный атом галогена; α-центр - анионная вакансия; I-центр - межузельный ион галогена (рис. 6);
- Лущик, Лийдья и Яэк [1] разработали методику измерения спектров создания F-центров монохроматическим ультрафиолетовым излучением и показали, что F-центры возникают при оптическом создании экситонов и рекомбинации электронов и дырок. Такой же эффект имеет место при облучении ЩГК в ядерном реакторе, рентгеновскими лучами и ВУФ-излучением.

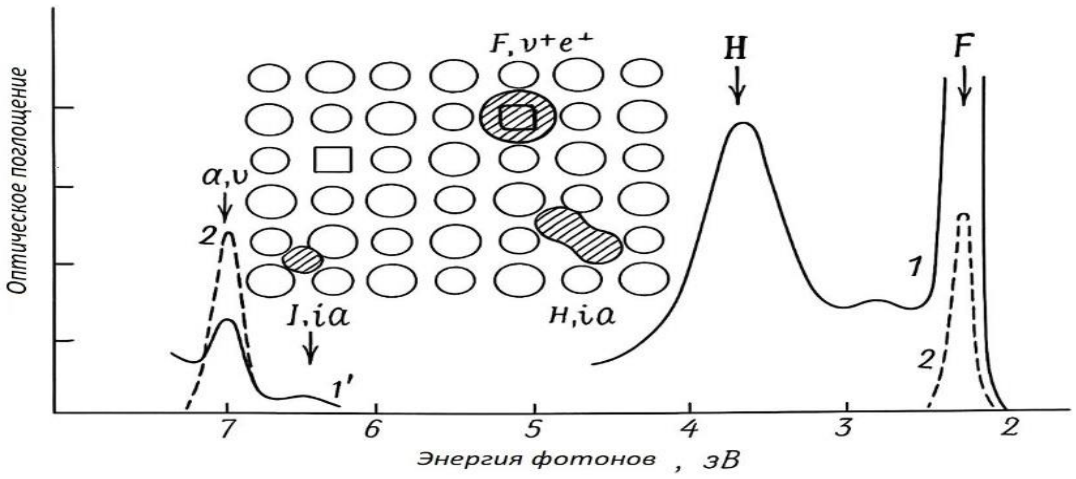


Рисунок 6. Центры окраски и спектры оптического поглощения в щелочно-галоидных кристаллах

Авторами экспериментальных и теоретических работ, посвящённых возможности создания и преобразования дефектов в полупроводниках под действием облучения электронами или фотонами с энергией, заметно меньшей, чем энергия, необходимая для реализации механизма упругого смещения, является большая группа учёных: K. Boer, W. Brown, С. Стародубцев, М. Шейнкман, А. Кив, Н. Витовский, В. Винецкий, М. Клингер, Г. Холодарь, В. Вавилов, С. Рывкин и др. Они разработали высокочувствительные фотоэлектрические и люминесцентные методы обнаружения радиационных дефектов в полупроводниках. Применение этих методик позволило обнаружить различные проявления подпорогового и надпорогового создания френкелевских пар в полупроводниках [3].

2. Механизмы дефектообразования. Модели процессов распада

- механизм J. Varley [4]: рождение анионных вакансий и интерстициалов в ЩГК происходит из-за многократной ионизации ионов галоида, что создает неустойчивую группировку из семи расположенных рядом положительных ионов, которая за время короткого существования успевает преобразоваться так, что ион галоида выбрасывается в междоузлие, оставляя вакансию. Но все же механизм Варли не объясняет основных процессов дефектообразования в ЩГК.

- механизм H. Hersh [5] и D. Pooley [6]: рассмотрен распад автолокализованных двухгалоидных экситонов на структурные дефекты как результат предиссоциации возбужденных молекул X_2^-e.

- D. Pooley: рассматривается фотодиссоциация молекул X_2^-e, занимавших первоначально два анионныз узла, на ион X^- в узле решетки и ион X^- в междоузлии с освобождением одного анионного узла. Этому по Pooley соответствует рождение $I-$ и $\alpha-$ центров.

- H. Hersh: фотодиссоциация молекул X_2^- может приводить к переводу атома галоида X^0 в междоузлие с освобождением одного анионного узла, в котором остается электрон (образуется F - центр). Затем междоузельный атом галоида может принять энергетически более выгодную конфигурацию $H-$центра.

Ч.Б. Лущик, И.К. Витол, М.А. Эланго [7] : Молекула X_2^-, занимавшая первоначально два анионных узла, при переходе из одного электронного состояния экситона в другое (что сопровождается выделением колебательной энергии) может сместиться в один анионный узел, оставив электрон в другом анионном узле. Если избыток колебательной энергии у $\mathbf{X_2^-}$ достаточен для обеспечения сильного взаимодействия с сосоедним по направлению $\langle\mathbf{110}\rangle$ ионом $\mathbf{X^-}$, то дальше может произойти эстафетное смещение состояния $\mathbf{X_2^-}$ в следующий узел кристаллической решетки. В результате происходит распад двухгалоидного экситона на $\mathbf{F-}$ и **H**-центры.

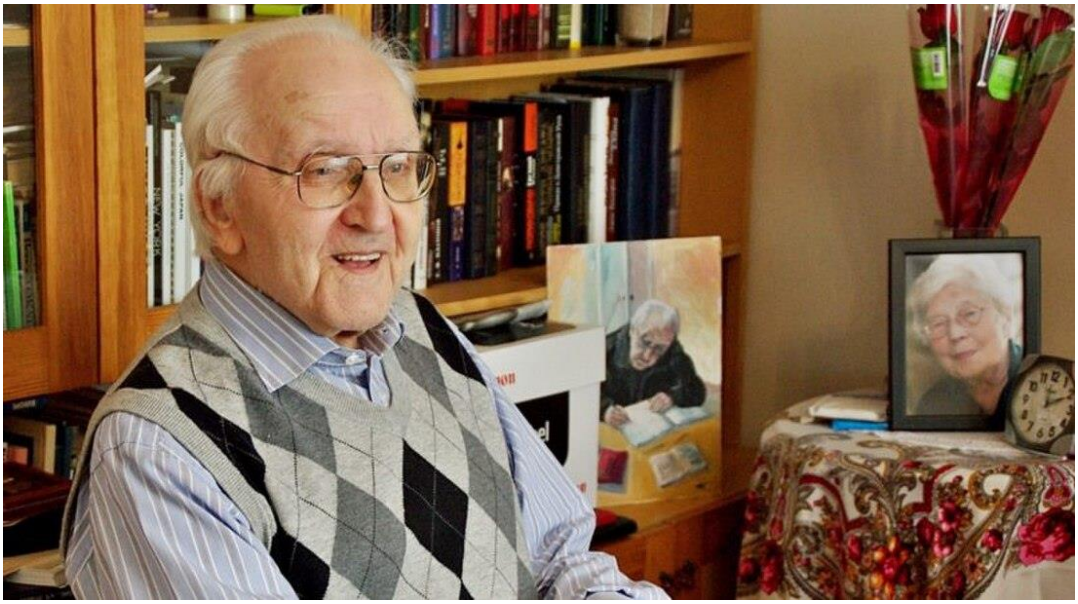


Рисунок 7. Ч.Б. Лущик

Ч. Б. Лущик [8] отмечает: если в кристалле рождается одногалоидный автолокализованный экситон **X^0e**, который затем превращается в двухгалоидный автолокализованный экситон **X_2^-e**, то в момент перехода между этими состояниями, существенно отличающимися равновесными положениями тяжёлых частиц, должны возникать интенсивные колебания. Для двухгалоидного экситона молекулярного типа эти колебания должны иметь локальный характер, что позволяет сконцентрировать колебательную энергию на **X_2^-e-центре** и препятствует её быстрой диссипации в кристалле-термостате. Предполагается, что в результате этого возможно создание F- и H-центров или передача энергии ближайшим катионам кристалла с образованием катионных френкелевских дефектов (рис. 8).

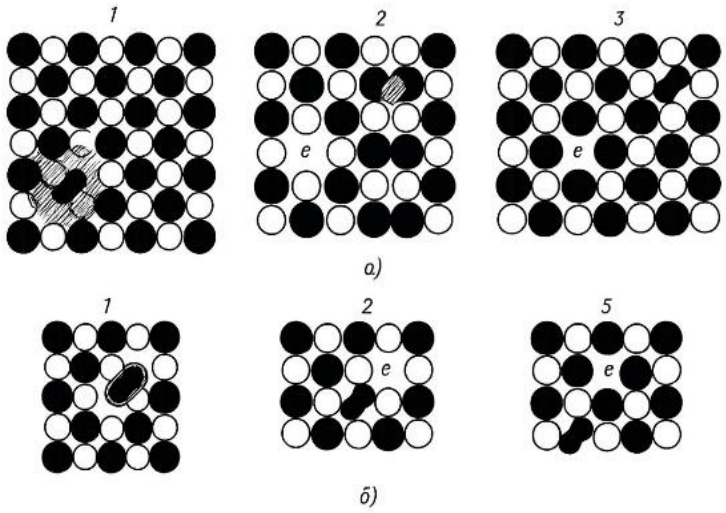


Рисунок 8. Схемы образования экситонов и радиационных дефектов в щелочно-галоидных кристаллах

В ЩГК при оптическом создании экситонов (СЭ) (e^0) и электронно-дырочнных пар (e^-, e^+) осуществляются реакции

$$e^0 \rightarrow V^+e^- + i^0,$$
$$e^- + e^+ \rightarrow e^0 \rightarrow V^+e^- + i^0.$$

Ч. Лущик и его сотрудники [2] обнаружили, что при 4,2К оптическое создание экситонов приводит в KCl, KBr, RbBr и CsBr не только к созданию F, H – пар, но и к рождению пар заряженных дефектов: анионных вакансий и междоузельных ионов галоида (α, I-пар) по реакциям

$$e^0 \rightarrow V^+ + i^-,$$
$$e^- + e^+ \rightarrow e^0 \rightarrow V^+ + i^-.$$

При теннельной перезарядке F, H -пар образуются i^- в краудионной конфигурации, способные при 4,2К смещаться на несколько постоянных решетки, что препятствует их с V^+[9,10].

В основе радиационного образования дефектов в ЩГК лежат процессы создания френкелевских дефектов при безызлучательной аннигиляции автолокализованных экситонов (АЛЭ) e_s^0 и рекомбинации электронов с автолокализованными дырками e_s^+ в регулярных участках кристаллической решетки.

Экситонный механизм создания френкелевских пар в кристаллах KCl имеет высокую эффективность. При 5 К 16% создаваемых лазерным пучком электронных возбуждений распадается с рождением короткоживущих F, H -пар [11], 6% от их числа составляют стабильные F, H -пары. Квантовый выход излучательной аннигиляции экситонов в KCl при 4,2К порядка 3% [9].

В полупроводниках имеет место рекомбинационно-стимулированные и электронно-тепловые механизмы преобразование дефектов. Процессы образования и перестройки дефектов с участием носителей заряда существенно влияет на величину и характер температурной зависимости

неравновесной проводимости полупроводников, используемых в условиях повышенных температур [12].

Совершенно очевидно, в твердых телах имеет место особый вид безызлучательных переходов, при которых распад электронных возбуждений ведет не к возбуждению малых колебаний многих атомов, а к большим (по сравнению с постоянной решетки) смещением отдельных атомов, т.е. к рождению дефектов.

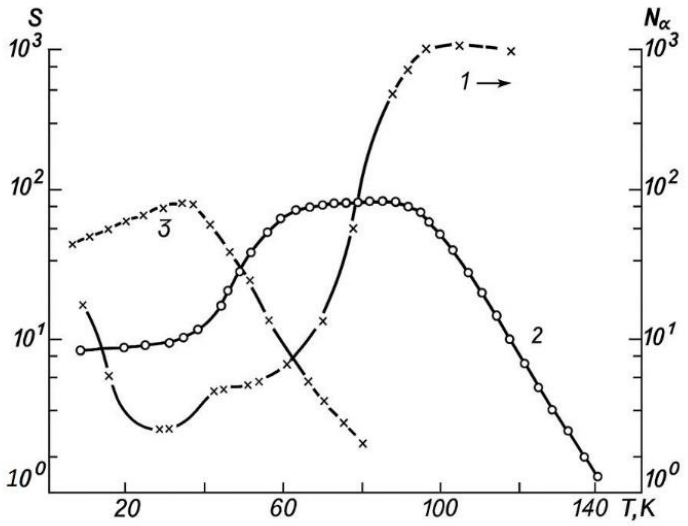


Рисунок 9. Температурная зависимость эффективности создания α-центров в кристалле KI при автолокализации экситона

Безызлучательный распад АЛЭ является основной причиной радиационной неустойчивости ЩГК. Васильченко, Лущик и Осмоналиев показали [13; 14], что в кристаллах KI с высокоподвижными при 4,2 К СЭ эффективность радиационного создания дефектов относительно мала. Для KI эффективность создания α-центров Х-лучами скачкообразно усиливается в области 30–50 К, где происходит термоактивированная автолокализация экситона (рис. 9). При автолокализации экситона в KI «включается» новый механизм дефектообразования. Этот факт в предельно наглядной форме демонстрирует важнейшее условие рождения дефектов в регулярных участках кристалла при распаде электронных возбуждений. Относительно малая эффективность этого механизма в KI связана с тем, что для АЛЭ в KI нет локальных колебаний, а быстрая релаксация АЛЭ уменьшает вероятность их распада с рождением дефектов.

Список использованной литературы

1. Luscik C., Liidja G., Jaek J. On the mechanisms of formation of radiation defects in ionic crystals – In: Color Centers in Alkali Halides (Intern.Symposium). – Corvalis, Oregon, USA, 1959, p.166.
2. Васильченко Е.А., Лущик А.Ч., Лущик Н.Е., Лущик Ч.Б., Тайиров М.М. – «Образование вакансий и интерстициалов в щелочно-галоидных кристаллах при оптическом создании экситонов» //Физика твердого тела. –1981.– Т.23, с.163.
3. Клингер М.И., Лущик Ч.Б., Машовец Т.В., и др. – Создание дефектов в твердых телах при распаде электронных возбуждений///Успехи физических наук., –1985.–Т.147, вып.3, с.523.
4. Varley J. «A new interpretation of irradiation-induced phenomena in alkali halides»– J. Nucl.Energy, 1954, v.1, p.130.
5. Hersh H. Proposed Excitonic Mechanism of Color-Center Formation in Alkali Halides– Phys. Rev., 1966, v.148, p. 928.

6. Pooley D. «F-centre production in alkali halides by electron-hole recombination»– Proc.Phys.Soc., 1966, v. 87, p.245, p.257.
7. Лущик Ч.Б., Витол И.К., Эланго М.А. «Распад электронных возбуждений на радиационные дефекты в ионных кристаллах – //Успехи физических наук.–1977.– Т.122, вып.2, с.223.
8. Денкс В.П., Лущик Н.Е., Лущик Ч.Б., Соовик Х.А. Люминесценция и радиационные дефекты в кристаллах NaBr и NaI– //Физика твердого тела. –1976. –Т.18, с.8.
9. Lushchik Ch., Kolk J., Lushchik A., Lushchik N., Tajirov M., Vasilchenko E. «Decay of excitons into long-lived F, H and \(\alpha \), I pairs in KCl». [1]– physica status solidi. ser.b, 1982., v.114, p.103.
10. Лисицын В., Сигимов В., Яковлев В. Роль электронных возбуждений в образовании дефектов в кристаллах KBr– //Физика твердого тела., –1982.– Т.24, с.2747.
11. Williams R., Bradford J., Faust W. – Phys. Rev. ser. B, 1978, v.18, p. 7038.
12. Винецкий В.Л., Холодарь Г.А. «О возможности определения коэффициента диффузии и концентрации радиационных дефектов по кинетике изменения проводимости полупроводника»– //Физика и техника полупроводников. –1982. – Т. 16, с. 1322.
13. Васильченко Е.А., Лущик Ч.Б., Осмоналиев К. «Автолокализация экситонов и создание радиационных дефектов в KI и RbI»– //Физика твердого тела. –1986.– Т.28, с.1991.
14.Васильченко Е.А., Осмоналиев К., Эланго А.А. Специфика низкотемпературного создания дефектов Френкеля в щелочных иодидах (KI) – //Физика твердого тела. –1987.– Т.29, с.1385.

Рецензент: кандидат физико-математических наук, доцент Акбеков Т.

УДК:378.147.(53)
DOI 10.58649/1694-9099-2026-2-384-391

Омаралиева З.И., Калидин кызы Т.
Ош мамлекеттик университети
Омаралиева З.И., Калидин кызы Т.
Ошский государственный университет
Omaralieva Z. I., Kalidin kyzy T.
Osh State University

ORCID:0009-0009-4252-9651

ФИЗИКАЛЫК БИЛИМДЕРДИ ПАЙДАЛАНУУНУН ТЕХНОЛОГИЯСЫ ЖАНА ОКУТУУЧУНУН МАЗМУНДУК-ИШМЕРДҮҮЛҮК МАМИЛЕСИ
ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНЕНИЯ ЗНАНИЙ ПО ФИЗИКЕ И СОДЕРЖАТЕЛЬНО-ДЕЯТЕЛЬНОСТНЫЙ ПОДХОД УЧИТЕЛЯ
TEKHNOLOGII PRIMENENIYA ZNANIY PO FIZIKE I SODERZHATEL'NO-DEYATEL'NOSTNYY PODKHOD UCHITELYA

Кыскача мүнөздөмө: Макалада физика боюнча алынган билимдерди практикада жана күнүмдүк турмушта пайдалануунун абалы каралат. Физикалык кубулуштардын жана алардын мыйзам ченемдүүлүктөрүнүн мазмунун ачып берүү аркылуу бул билимдерди практикада колдонуу актуалдуу маселе болуп эсептелет. Ушул максатта ОшМУнун жалпы физика жана физиканы окутуунун усулдугу кафедрасында тажрыйбаланып жаткан физикалык билимдерди пайдалануу технологиялары боюнча мазмундук-ишмердүүлүк мамилеси бир нече мисалдардын негизинде сунушталат.

Аннотация: В статье рассматривается состояние применения знаний, полученных по физике, на практике и в повседневной жизни. Обосновывается актуальность их практического применения