

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А. Ф. ИОФФЕ

На правах рукописи

Ивахно Владимир Никитич

**КВАНТОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И СООТНОШЕНИЯ
В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛАХ
ПРИ ПОГЛОЩЕНИИ ФОТОНОВ БОЛЬШОЙ ЭНЕРГИИ**

01.04.10 — физика полупроводников

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург

2007

Работа выполнена в Физико-Техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН

Официальные оппоненты:

доктор физико-математический наук,
профессор Е.Л. Ивченко

доктор физико-математический наук,
профессор М.С. Каган

доктор физико-математический наук
профессор А.Н. Пихтин

Ведущая организация:

ФГУП НПО „Орион“, г. Москва

Защита состоится „ “ 2007 г. в часов на заседании специализированного совета Д 002.205.02 при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН (194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.

Автореферат разослан „ “ 2007 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
доктор физ.-мат. наук

Л.М. Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Взаимодействие фотонов большой энергии $h\nu \gg E_g$ с полупроводниковыми кристаллами — одна из центральных проблем физики твердого тела, в последние десятилетия приобрела особое значение ввиду радикального прогресса физики полупроводников и твердотельной электроники, стимулированных главным образом задачами прикладного характера, а также созданием твердотельных и инжекционных лазеров. Представляя собой сложный процесс ввиду реальности нескольких ионизаций и сопровождаемый комплексом вторичных квантовых процессов и явлений, таких, как:

- разогрев электронов до $T = 10^5 \div 10^6$ К, — ударная ионизация,
- внутренний фотоэффект,
- фотоэмиссия из кристаллов,
- максвеллизация горячих электронов

он является одновременно весьма информативным средством для изучения перечисленных квантовых процессов и ряда проблем квантовой теории твердых тел.

Несмотря на частую реализацию в практике названных процессов и явлений, их широкое применение в оптоэлектронике и твердотельной электронике, ряд важных проблем, связанных с этими процессами, изучен недостаточно, что в значительной мере тормозит развитие названных областей электроники. Такое положение создано прежде всего потому, что для современной квантовой теории эти проблемы представляют принципиальные трудности.

Ввиду сложности проблемы взаимодействия фотонов большой энергии¹ с кристаллами и сопровождающих вторичных процессов, ранее, как правило, предпринимались попытки решить их с применением приближения зон, которое формулируется как одноэлектронное, тогда как фактически эти процессы должны рассматриваться как многочастичные. Поэтому в теоретических исследованиях вынужденно применяют упрощенные, идеализированные модели. Но даже в этих случаях конечные уравнения проводимого анализа чрезвычайно сложны и могут быть решены только приближенными методами. Однако до настоящего времени точности применяемых методов оказывались недостаточными, чтобы сделать однозначные выводы и прояснить фактическую картину изучаемых квантовых процессов [1–5]. Таким образом, одна из наиболее важных в практическом отношении проблем квантовой теории твердых тел в ряде аспектов остается открытой применительно к полупроводниковым кристаллам.

¹Под большой энергией здесь понимается энергия до $15E_g$, т. е. энергия кратная запрещенной зоне в кристалле.

В сложившейся ситуации для решения названных проблем особое значение приобретают экспериментальные исследования, которые в данной работе являются доминирующими. Наряду с этим большое внимание уделяется критическому анализу теоретических работ по решаемым проблемам, опубликованным в периодической литературе.

В диссертации основное внимание было уделено выявлению квантовых энергетических соотношений, которым подчиняются исследуемые процессы. Но, как показывают проведенные автором исследования, глубокое изучение этих сложных процессов возможно лишь при конкретном знании квантовых правил отбора, которым подчиняются исследуемые процессы. Фактически эти важные вопросы квантовой теории в случае полупроводниковых кристаллов для квазичастиц с энергиями $\gg E_g$ в настоящее время являются открытыми. Из вышесказанного достаточно очевидна актуальность решения для физики твердого тела, оптоэлектроники и полупроводниковой электроники отмеченных проблем.

Как подчеркивалось выше, изучаемые в работе процессы и явления применяются в качестве основы целого ряда оптоэлектронных и полупроводниковых приборов: в фотоприемниках и фотоэлементах, детекторах ядерных и других видов жестких излучений, улучшение чувствительности которых весьма актуально. В равной степени актуальна проблема повышения электрической прочности и надежности полупроводниковых приборов для нужд электроники и энергетики. Вопросы ударной ионизации в кристаллах, одной из наиболее частых причин электрического пробоя твердотельных приборов, ждут своего решения на уровне квантовой механики, как наиболее действенной области современной физики твердого тела.

Цель работы

Базируясь на современных представлениях квантовой теории твердого тела и физики полупроводников, а также закономерностях при поглощении фотонов больших энергий $h\nu \gg E_g$, проявляющихся: а) во внутреннем фотоэффекте, б) фотоэмиссии, в) фотолюминесценции, г) умножении свободных электронов при оптической накачке энергии, автором диссертации для совершенствования параметров полупроводниковых приборов определяются:

- 1) фактически действующие квантовые правила отбора в полупроводниковых кристаллах при оптическом поглощении фотонов с энергиями $h\nu \gg E_g$;
- 2) квантовые правила отбора в полупроводниковых кристаллах при электрон-электронных взаимодействиях в случае сильного разогрева квазичастиц: $\mathcal{E}_{e,h} \geq E_g$;
- 3) определяется пороговая энергия умножения электронов $h\nu_i$ в кристаллах при поглощении фотонов больших энергий $h\nu \gg E_g$;

4) определяется пороговая энергия ударной ионизации E_i в полупроводниковых кристаллах;

5) соотношение ионизационного и фононного рассеивания энергии горячими квазичастицами в области энергий $\mathcal{E}_{e,h} \geq E_g$;

6) роль решетки кристаллов в оптических квантовых переходах при энергиях квантов $h\nu \gg E_g$;

7) роль решетки кристаллов для электронных Оже-переходов при сильных разогревах электронов: $\mathcal{E}_{e,h} \geq E_g$.

Квантовые процессы и соотношения изучались с учетом структур энергетических зон электронов в \mathbf{k} -пространстве для основных классов полупроводниковых кристаллов и с различным типом кристаллической решетки. Исследования проводились в широком температурном интервале (77–300 К), на кристаллах с высоким структурным совершенством: для германия и кремния концентрации примесных атомов $\leq 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и дефектов на уровне $\leq 10^{13} \text{ см}^{-3}$; для кристаллов бинарных соединений также высокого структурного совершенства и чистоты, широко применяемых в оптоэлектронике: A_3B_5 , A_2B_6 , A_4B_6 .

Отмеченные выше факты дают основание считать, что сделанные в работе выводы по исследованным кристаллам имеют общее применение к полупроводниковым кристаллам.

Научная новизна

1. Для основных классов полупроводниковых кристаллов:

— атомарные: германий, кремний;

— бинарные, кристаллы A_3B_5 : InSb, InAs, GaSb;

— бинарные, кристаллы A_2B_6 : $Cd_xHg_{1-x}Te$, CdS;

— бинарные, кристаллы A_4B_6 : PbS, PbTe, PbSe

впервые измерены зависимости квантового выхода внутреннего фотоэффекта от энергии фотонов в области $E_g \leq h\nu \leq 10E_g$. Использовалась усовершенствованная автором формула (1) стр. 8 для определения и нормирования квантового выхода фотоэффекта для фотонов с энергиями $h\nu \geq 2E_g$, где E_g — минимальная запрещенная зона.

2. Изучены виды Оже-переходов в \mathbf{k} -пространстве при поглощении, названными в п. 1 кристаллами, фотонов с энергиями $E_g \leq h\nu \leq 10E_g$. Впервые обнаружен новый квантовый эффект — рост абсолютной величины квантового выхода (на уровень больше 1) при энергиях фотонов $h\nu \geq 2E_g$; построена модель объясняющая эффект.

3. Впервые обнаружен в области разрешенных прямых переходов существенный вклад непрямых квантовых переходов в оптическом поглощении и ударной ионизации

при поглощении фотонов с энергиями $E_g \leq h\nu \leq 10E_g$ полупроводниковыми кристаллами. Проведена оценка эффективности правила отбора, учитывающего сохранение только электронного волнового вектора $\mathbf{k}_{e,h}$ в исследованных процессах, показана ограниченная его применимость.

4. Определена роль фононной системы при поглощении кристаллами фотонов с энергиями $E_g \leq h\nu \leq 10E_g$ и определено соотношение вероятностей рассеивания энергии горячими электронами на фононах w_{ph} и путем ударной ионизации w_i для области энергий $\mathcal{E}_{e,h} \geq E_g$.

5. Для основных классов полупроводниковых кристаллов определены параметры ударной ионизации горячими электронами:

- a) пороговые энергии ударной ионизации E_i ;
- b) относительная величина вероятности ионизации в окрестности порога ионизации E_i , реализуемой при оптической накачке энергии.

6. Предложен и обсужден новый принцип работы фотоприемников на умножении электронов в отсутствие электрического поля, с целью увеличения их обнаружительной способности.

7. Дана новая трактовка факту снижения электрической прочности кристаллов и приборов на их основе вблизи неоднородностей и поверхности кристаллов.

8. Проведены впервые в стране исследования фотоэлектрических свойств фотодиодов из InSb и показана их большая перспектива в качестве приёмников инфракрасного излучения. Зарегистрировано Комитетом по Делама Изобретений и Открытий при Совете Министров страны, Аннотация на НИР за № 60831 с приоритетом 1.7.1960, а также: В.Н. Ивахно, Фотоэлектрические свойства электронно-дырочных переходов в антимониде индия (InSb) и разработка на их основе приёмников инфракрасного излучения. Диссертация на уч. степень к. ф. м. н., ФТИ им А.Ф. Иоффе, 1964.

Научная и практическая значимость работы

Основные результаты данной работы представляют важное значение для квантовой физики твердого тела — теоретического фундамента современной полупроводниковой физики. Знание энергетических соотношений и конкретно вида квантовых переходов, имеющих место в оптических и Оже-переходах, которые изучены в данной работе, позволяют правильно оценивать эффективность преобразования энергии фотоэлектрическими приборами на основе полупроводниковых кристаллов, что важно для практики. Большое значение имеет выяснение роли кристаллической решетки при поглощении фотонов больших энергий и сильного разогрева электронного газа: $\mathcal{E}_{e,h} \geq E_g$. Метод электрического поля в кристалле, часто используемый в публикациях, позволяет исследовать этих вопросы лишь в пределах нескольких kT ,

где T — температура кристалла. Экстраполяция этих данных по электрон-фононным взаимодействиям на область соизмеримых с E_g , широко применяемая в литературе, фактически не обоснована. Как правило, кристаллическая решетка при этом рассматривается только как мощный резервуар поглощения энергии горячих квазичастиц [1–6 и др.]. Участием в оптических и Оже-переходах полностью пренебрегается на том основании, что вероятность не прямых переходов, т.е. с участием фононов, на два-три порядка ниже, чем прямых переходов. К таким выводам, в частности, приводит анализ, проведенный Иглес [6], которые в научной литературе являются общепризнанными.

В данной работе использованы условия, при которых реализуется ударная ионизация в кристаллах; определены экспериментально энергетические условия, а также построены квантовые модели ударной ионизации, которые позволяют оценить электрическую прочность приборов на основе полупроводниковых кристаллов, их надежность в работе.

С другой стороны, в приборах, где ударная ионизация используется в качестве рабочего механизма, сведения, полученные в данной работе, будут несомненно полезны для развития таких приборов. Проведенные исследования, в частности, убеждают в реальности нового принципа увеличения чувствительности фотоприемников — умножения электронов за счет ударной ионизации. Дальнейшие исследования в этом направлении представляются перспективными.

Автором диссертации впервые в нашей стране были разработаны фотоприемники специального назначения на основе фотодиодов из InSb, обладающие высокой чувствительностью в диапазоне $3 \div 6$ мк (Правительственное задание, шифр „Энергия“). Материалы этих разработок были своевременно переданы заинтересованным организациям и предприятиям: ГОИ им. С.И. Вавилова, НИИ ПФ МОП СССР, а также ряду других организаций; оформлены и защищены диссертация на степень кандидата физ.-мат. наук и авторские свидетельства на изобретения: В.Н. Ивахно, В.В. Галаванов, Авторское свидетельство № 20813, от 16.7.1959; В.Н. Ивахно, Д.Н. Наследов, Авторское свидетельство № 30996, от 17.5.1963. Настоящая диссертация является развитием этого направления на квантомеханическом уровне. Значительное внимание в связи с этим уделяется проблеме горячих носителей в полупроводниковых кристаллах и возможности совершенствования фотоприемников на их основе.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения, десяти глав, Заключения и библиографии. Основное содержание диссертации разбито на три части: 1 часть включает 4 главы, 2-я часть — 3 главы, 3-я часть — 3 главы. Объем диссертации составляет 212 страниц

основного текста, 58 рисунков, 8 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 301 наименование.

Основные положения, выносимые на защиту

1) Закономерности квантового выхода внутреннего фотоэффекта в области энергий $E_g \leq hv \leq 10E_g$, определенные экспериментально и их объяснения в **k**-пространстве для полупроводниковых кристаллов: атомарные — германий, кремний; бинарные — кристаллы A_3B_5 ; бинарные — кристаллы A_2B_6 ; бинарные — кристаллы A_4B_6 .

Новый квантовый эффект — рост абсолютной величины квантового выхода η на уровень $\eta > 1$ для фотонов с $hv \geq 2E_g$, где E_g — минимальная запрещенная зона в кристалле, обнаруженный автором.

2) Методику измерения и нормирования квантового выхода фотоэффекта в полупроводниковых кристаллах. Усовершенствованную формулу определения квантового выхода η на p - n -переходах:

$$\eta = \frac{J_{p-n}}{e(1-R)N_\phi \cdot \beta} \cdot \frac{1}{\gamma[\tau_e(\varepsilon_e), \tau_h(\varepsilon_h)]} \quad (1)$$

где вводимый параметр $\gamma \leq 1$ учитывает ионизационное рассеивание горячих электронов, при котором часть вторичных электронов с энергией $\varepsilon_{e,h} \rightarrow 0$ и временем жизни $\tau_{e,h} \rightarrow 0$ полем p - n -перехода не разделяется.

3) Параметры ударной ионизации горячими электронами в полупроводниковых кристаллах: $E_i = E_g \pm \hbar\omega_{opt}$, где E_i — пороговая энергия ионизации, E_g — минимальная запрещенная зона, $\hbar\omega_{opt}$ — энергия оптического фонона; соотношение вероятностей рассеивания энергии: $w_i \approx w_{ph}$, где w_i — вероятность ионизационного рассеивания, w_{ph} — вероятность фононного рассеивания вблизи порога E_i .

4) Рост квантового выхода η в окрестности $hv \geq 2E_g$ происходит ввиду подключения ударной ионизации горячими электронами посредством не прямых оптических и Оже-переходов с участием фононов, когда сохраняется только энергия. И ввиду соотношения $w_i \approx w_{ph}$, часть горячих электронов (5 ÷ 15%) успевает ударно ионизовать до охлаждения ниже порога ударной ионизации E_i .

5) Модели квантовых переходов в **k**-пространстве, посредством которых совершается ударная ионизация в исследованных кристаллах при поглощении фотонов с энергиями в окрестности $hv = 2E_g$.

6) Приемники инфракрасного диапазона на основе фотодиодов из InSb, разработанные по Правительственному заданию (шифр „Энергия“), Авторское свидетельство № 20813 и Аннотация на НИР по редиффузионным приемникам. Регистрация Комитетом по Изобретениям и Открытиям при СМ страны, № 60831 от 1.7.1960 г.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на международных и всесоюзных научных конференциях, специализированных всесоюзных совещаниях, научных семинарах ведущих НИИ Академии Наук СССР и Министерств СССР:

1. Диссертация на соискание ученой степени кандидата фаз.-мат. наук: „Фотоэлектрические свойства электронно-дырочных переходов в InSb и разработка приемников излучения на их основе“. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе АН СССР г. Ленинград, 1964 г.

2. II Всесоюзная конференция по электронно-дырочным переходам в полупроводниках, г. Рига, 1964 г., Доклад.

3. III Всесоюзное совещание по физическим явлениям в электронно-дырочных переходах в полупроводниках, г. Тбилиси, 1966 г., Доклад.

4. Доклад на общем научном семинаре полупроводниковых лабораторий, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе АН СССР, г. Ленинград, 1971 г.

5. Доклад на научном семинаре полупроводниковых лабораторий, Физический институт им. П.Н. Лебедева АН СССР, г. Москва, 1971 г.

6. Доклад на семинаре лаборатории полупроводников (сектор В.С. Вавилова), Физический институт им. П.Н. Лебедева АН СССР, г. Москва, 1970 г.

7. Доклад на семинаре лаборатории электронных полупроводников, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе АН СССР, г. Ленинград, 1972 г.

8. Всесоюзное совещание по спецтеematике. НИИ ПФ МОП СССР, г. Москва, 1962 г. Доклад.

9. Всесоюзное специализированное совещание, доклад НИИ ПФ МОП СССР, г. Москва, 1965 г. Доклад.

10. Научный семинар кафедры электроники твердых тел, доклад. Ленинградский Гос. Университет, г. Ленинград, 1974 г.

11. Доклад на научном семинаре лаборатории твердотельной электроники, Институт Физики АН УССР, г. Киев, 1981 г.

12. Доклад на научном семинаре отдела полупроводников. Физический институт им. П.Н. Лебедева АН СССР, г. Москва, 1987 г.

13. Доклад на Международном оптическом конгрессе „Оптика XXI век“, „Фундаментальные проблемы оптики“, г. С.-Петербург, 14–18.10.2002 г.

14. Доклад на заседании оптической секции Дома ученых РАН, г. С.-Петербург, 16.12.2002 г.

15. Доклад на научной сессии кафедры экспериментальной физики Политехнического Университета, г. С.-Петербург, 25.12.2002.

Автор участвовал в выполнении НИР и ОКР по заданиям Правительства страны. В результате были разработаны быстродействующие приемники инфракрасного диапазона на $3 \div 6$ мк, на них получены авторские свидетельства, тема „Энергия“; участвовал в создании матричных фотоприемников и разработке системы специального назначения, шифр „Фот“.

В 1993 г. по материалам диссертации во ВНИИГПЭ подана заявка на открытие: № ОТ-МЗ-217.

Публикации

Основное содержание диссертации отражено в 34 научных трудах, включая 2 авторских свидетельства на изобретения; в 2 отчетах на НИР Физ.-тех. института им. А.Ф. Иоффе РАН, 1 отчет на ОКР Центр. констр. бюро при ЛОМО Миноборонпрома, 1 заявку на открытие.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В разделе Введение дается анализ современному состоянию исследуемых проблем, при этом широко привлекаются материалы, опубликованные в периодической печати по обсуждаемым вопросам, и другие источники. Этой же цели служат вводные параграфы, которыми начинается каждая часть работы. Обосновывается актуальность темы, формулируется основная цель работы, приводится краткое содержание диссертации.

В первой части приведены результаты исследований квантовых процессов и соотношений в атомарных полупроводниках — германии и кремнии. Включает четыре главы, объем первой части — 96 стр.

Кристаллы германия и кремния за моноатомный состав и чисто ковалентный тип связи называют элементарными, они широко применяются в электронике и оптоэлектронике, являясь их фундаментом. Это диктует необходимость тщательного изучения их свойств, особенно квантовых.

Проведенные автором исследования по элементарным кристаллам затем используются как базис при обсуждении ряда фундаментальных вопросов, таких как: а) виды квантовых переходов в k -пространстве в зависимости от энергии фотонов, в) квантовые правила отбора в кристалла, с) механизмы рассеивания энергии квазичастицами при сильных разогревах: $\mathcal{E}_{e,h} \geq E_g$. При этом автором привлекаются

работы по внутреннему и внешнему фотоэффекту, фото- и электролюминесценции в кристаллах. Такой подход оказался весьма плодотворным, т.к. с точки зрения квантовой механики названные явления в значительной мере определяются теми же факторами, что и внутренний фотоэффект.

Глава 1. Приведены теория оптического поглощения и внутреннего фотоэффекта при больших энергиях квантов, теория ударной ионизации, рассеивания энергий горячими квазичастицами.

При изучении внутреннего фотоэффекта, создаваемого фотонами $h\nu \gg E_g$, (2) встают две самостоятельные проблемы:

1) взаимодействие фотона с кристаллом, т.е. взаимодействие электромагнитного излучения с электронной и фононной системами, а также инородными атомами, создающими локальные примесные состояния;

2) релаксационные процессы, посредством которых совершается термализация горячих квазичастиц с энергиями $\mathcal{E}_{e,h} \geq E_g$ (3) способных создавать новые э—д пары. При этом квантовый выход фотоэффекта η становится > 1 .

Для фотонов с энергиями $E_g \ll h\nu = E_v + E_g + E_c$, (4) гамильтониан взаимодействия с кристаллом можно представить в виде:

$$H = H^c + H^v + H_{\text{pph}} + H_d + H_{\text{pl}}, \quad (5)$$

где H^v — взаимодействие с валентными электронами,
 H^c — « — со свободными электронами,
 H_{pph} — « — с решеткой кристалла,
 H_d — « — с дефектами (примесями, дислокациями),
 H_{pl} — « — с плазмонами

Автором отмечается, во-первых, что при энергиях $E_g \ll h\nu < 10E_g$, (6) гамильтониан H^v превосходит в 10^2 – 10^3 раза все остальные. Во-вторых, соотношения вероятностей прямых и непрямых переходов, т.е. с сохранением вектора $\mathbf{k}_{e,h}$ или без него, при этом радикально будет зависеть от энергии фотонов и структуры энергетических зон электронов в \mathbf{k} -пространстве. Квантовой теорией твердого тела эти положения конкретизированы только в окрестности низкоэнергетического края полосы основного поглощения. Следовательно, критерии, которые в настоящее время используются при прогнозировании видов квантовых переходов в реальных условиях при $h\nu \gg E_g$, т.е. в глубину зон, требуют проверки.

В соответствии с современными представлениями [1–10 и др.], в теоретических исследованиях, как правило, принимается, что вероятность прямых оптических переходов на два-три порядка больше вероятности непрямых переходов. Ввиду чего

основными правилами отбора принимаются:

$$\Sigma_j \mathbf{k}_{e_j, h_j} = \text{const}, \quad (7) \quad \text{— сохранение электронного волнового вектора,}$$

$$\Sigma_j E_j = h\nu, \quad (8) \quad \text{— сохранение энергии квазичастиц.}$$

Автором отмечается, что последнее верно только для переходов вблизи границы основной полосы поглощения, но вовсе не очевидно для более глубоких переходов. Теория непрямого поглощения фактически развита лишь вблизи края основной полосы поглощения, поэтому теоретический анализ фотоэффекта при $h\nu \gg E_g$ в настоящее время встречает принципиальные трудности. В такой ситуации экспериментальные исследования проблемы приобретают особую значимость.

Современные представления по ударной ионизации в кристаллах кратко приведены в § 2. Согласно квантовомеханическим расчетам [1–10 и др.], наиболее вероятными переходами, ответственными за ударную ионизацию, считаются прямые межзонные Оже-переходы. Поэтому основными квантовыми правилами отбора принимаются:

$$\Sigma_j E_j = \text{const}, \quad \text{— сохранение суммарной энергии электронов (9),}$$

$$\Sigma_j \mathbf{k}_{e_j, h_j} = \text{const} \quad \text{— сохранение суммарного электронного волнового вектора (10).}$$

Роль фононов при поглощении фотонов большой энергии и в Оже-переходах пока изучена недостаточно, теоретический анализ их встречает принципиальные трудности [1–10 и др.].

Сложную задачу в теоретическом и экспериментальном плане представляет определение пороговой энергии ударной ионизации E_i , фигурирующей в ряде теорий как подбираемый параметр [4–9, 15–19]. В частности, для кристаллов германия сообщаются значения E_i в пределах $0.66 \div 1.8$ эВ, что соответствует $(1 \div 3)E_g$ и не может удовлетворить ни теорию, ни практику [19]. Аналогичная ситуация имеет место для кристаллов Si и других полупроводниковых кристаллов (InSb, InAs и др.) [19].

Гамильтониан H наиболее существенных взаимодействий при сильных разогревах электронов имеет вид:

$$H = H_{ee} + H_{eph}, \quad (11)$$

где H_{ee} — гамильтониан, учитывающий электрон-электронные взаимодействия, H_{eph} — гамильтониан, учитывающий электрон-фононные взаимодействия.

Вид H_{ee} и H_{eph} определен в теории лишь для области $\mathcal{E}_{e,h} \leq 20kT$. Остается невыясненным: какой из каналов рассеивания энергии является более вероятным для области $\mathcal{E}_{e,h} \geq E_g$, первый или второй? Последний вопрос исключительно важен

для развития квантовой электроники как в теоретическом, так и в практическом плане [1,3–6].

Теория ударной ионизации развивалась в основном в приближении эффективных масс [2–5,9 и др.], при этом учитывались только прямые межзонные переходы.

Для параболических зон и при равенстве эффективных масс носителей тока порог E_i , прогнозируемый данной теорией, равен $1.5E_g$ и $< 1.5 \cdot E_g$ при $m_e^* \neq m_h^*$.

В значительной мере формальная теория ударной ионизации, а также квантового выхода фотоэффекта в кристаллах при $h\nu \gg E_g$ была разработана в работах [3]. Вероятности ударной ионизации P_i в них были получены в виде весьма сложных функций вектора $\mathbf{k}_{e,h}$. Поэтому в окончательных расчетах сохранением вектора $\mathbf{k}_{e,h}$ пренебрегается. Необоснованной в этих расчетах также является экстраполяция электрон-фононного взаимодействия на область больших энергий квази-частиц. В силу отмеченных факторов, расчеты [3] едва ли могут считаться убедительными.

Решение уравнений, учитывающих сохранение $\mathbf{k}_{e,h}$ и E_j при определении E_i , сопряжено с принципиальными трудностями, в то время как приближенные методы Монте-Карло [1,5 и др.] и вводимые упрощающие предположения вносят существенные неточности, при которых трактовки результатов становятся либо ненадежными, либо неоднозначными. Учет структуры энергетических зон в \mathbf{k} -пространстве для Ge и Si и более простых, даже без учета электрон-фононного рассеивания энергии [1,3,6], приводит к уравнениям, которые не могут быть решены прямым способом. Поэтому экспериментальные методы определения порога ударной ионизации E_i в кристаллах, а следовательно, и порога умножения электронов $h\nu_i$ при поглощении фотонов $h\nu \gg E_g$, имеют в настоящее время явное преимущество, если не единственную возможность.

Глава 2 — методическая. Приводятся описания методик, использованных объектов и экспериментальных установок, обосновываются новые методики, особенно измерение η -квантового выхода внутреннего фотоэффекта; обсуждаются преимущества неселективных приемников в измерениях интенсивностей излучения и другие методические вопросы при исследовании зависимости $\eta = f(h\nu)$.

В главе 3 приведены результаты исследований квантовых процессов и соотношений при поглощении фотонов большой энергии кристаллами германия. Краткий обзор более ранних работ по фотоэффекту в кристаллах Ge составляет § 1. Среди них работы [9,11 и др.], впоследствии использованные В. Шокли [4] для построения феноменологической модели квантовых процессов в полупроводниковых кристаллах. Последняя, хотя в ней и не учитывается зонная структура электронов, в настоящее время считается наиболее признанной. Дан критический анализ расчетам зависимости $\eta = f(h\nu)$, проведенных в работах [1–6 и др.]. Отмечаются большие расхождения

между теоретическими и экспериментальными значениями ряда параметров, а интерпретация результатов их авторами противоречива, что требует новых исследований.

Эксперименты по изучению квантовых процессов в кристаллах германия автором проводились на объектах:

- 1) электронно-дырочных переходах, полученных методами:
 - а) сплавления индия,
 - б) диффузии атомов 3 и 5 групп таблицы Менделеева,
- 2) фоторезисторы на базе $P\text{-Ge}$;
- 3) точечный зонд на сколах кристаллов или поверхностях, обработанных химическим способом.

Многообразие объектов позволило оценить влияние таких факторов как поверхность, времена жизни носителей, их подвижности (рис. 1).

Зависимости квантового выхода фотоэффекта $\eta = f(h\nu)$, анализ которых проведен в § 2, позволил отметить следующие особенности: 1) для всех исследованных объектов в интервале 0.85–1.2 эВ наблюдается постоянство η , т.е. каждый поглощенный фотон рождает только одну свободную э–д пару. Одновременно это свидетельствует о правильности выбора методики при интерпретации данных по фотоэффекту — использование уровня плато в $\eta = f(h\nu)$ для нормировки данных, соответствующих уровню $\eta = 1$; 2) во всех примененных методах измерений при энергиях фотонов $h\nu \geq 1.3$ эВ проявляется рост фотоэффекта, достигающий 15–20% при $h\nu = 1.5$ эВ; 3) учитывая, что в кристаллах Ge $E_g = 0.65$ эВ, следовательно рост η начинается при энергиях $h\nu = 2E_g$; точность оценок составляет ± 0.1 эВ. Особо отметим, что E_g соответствует здесь непрямым переходам.

Проведенный автором анализ по фотоэффекту [12,13 и др.] ранее опубликованных работ убеждает, что при корректном учете условий экспериментов и правильно выбранной нормировке в них также имеет место рост квантового выхода для фотонов с энергией $\geq 2E_g$ и, следовательно, подтверждают результат автора.

На основании проведенных исследований и обнаруженного роста квантового выхода фотоэффекта сделаны следующие выводы:

- 1) рассеивание энергии горячими носителями с $\mathcal{E}_{e,h} \geq E_g$, на оптических (рамановских) колебаниях решетки не является доминирующим, как считается в подавляющем большинстве работ [1,3–5 и др.].
- 2) пороговая энергия ударной ионизации E_i горячими носителями в кристаллах Ge равна или весьма близка к $E_g = 0.65$ эВ, т.е. энергии не прямой запрещенной зоны.
- 3) не прямые оптические переходы в кристаллах Ge интенсивны даже в окрестности $h\nu = 1.3$ эВ, где уже разрешены прямые оптические переходы.

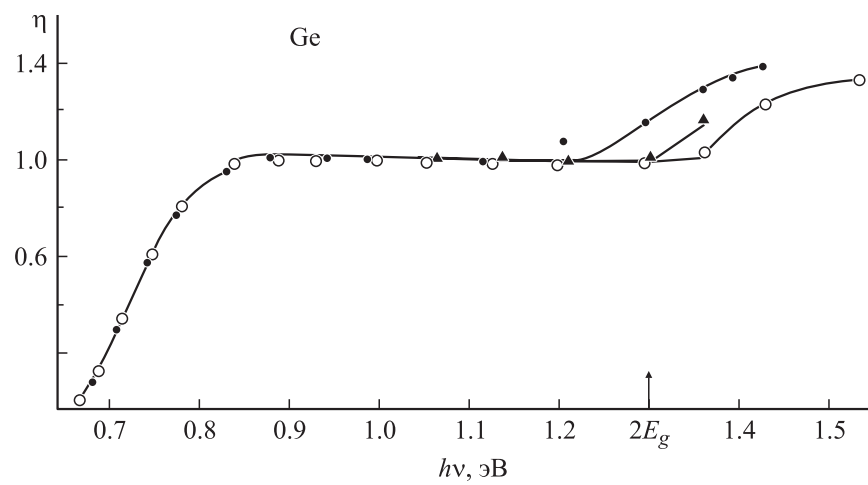


Рис. 1: Квантовый выход внутреннего фотоэффекта в зависимости от энергии фотонов $h\nu$ для германия, измеренные с применением: ● — э-д перехода сплавного, ○ — фотопроводимости p -Ge образца, Δ — металлического зонда на n -Ge.

4) межзонные переходы, вызванные электрон-электронными взаимодействиями и обуславливающие процесс ударной ионизации в кристаллах, со значительной вероятностью совершаются без сохранения электронного волнового вектора, т.е. непрямым способом.

В § 3 проведен анализ квантовых соотношений в Ge по данным фотоэмиссии, опубликованным в литературе. Отмечается, что они подтверждают выводы, сделанные в § 2 по исследованиям автора внутреннего фотоэффекта.

Модели квантовых переходов в кристаллах Ge, ответственных за рост $\eta = f(h\nu)$ при $h\nu_i \geq 2E_g$, представлены в § 5. Их построению предшествует детальный анализ работы Д.М. Иглес [6], в которой рассчитывались вероятности Оже-переходов с участием фононов для случая кристаллов InSb, GaAs. Автором подчеркивается необходимость в более тщательных оценках, притом абсолютных, а не относительных, как сделано в [6]. Приводятся факты, подтверждающие существенную вероятность не прямых оптических и Оже-переходов, в частности, проведенный автором анализ 2-х электронной люминесценции, интенсивность которой максимальная при 1.3 эВ, что также соответствует $2E_g$ для не прямых переходов в германии [14] (рис. 2).

Изучению квантовых процессов в Si, имеющего как и Ge, непрямую структуру зон в \mathbf{k} -пространстве, посвящена глава IV. Теоретический анализ их проводился наиболее часто в литературе [1,3] ввиду широкого применения кремния в твердотельной электронике: феноменологические модели [4 и др.], кинетические [15,16], использующие приближенные методы [17 и др.] (см. рис. 7).

Автором исследовались кристаллы n - и p -Si, включавшие ε -д переходы, полученные сплавной или диффузионной технологией; исходные кристаллы Si содержали $\leq 10^{15} \text{ см}^{-3}$ примесных атомов. Как и в случае кристаллов Ge, исследование квантовых процессов проводилось в отсутствии электрических и магнитных полей, регистрировался фотовольтаический сигнал. Полученные (рис. 3) зависимости квантового выхода $\eta = f(h\nu)$ имеют четко выраженное плато для энергии фотонов < 2.1 эВ и рост для $h\nu \geq 2.2-2.3$ эВ, что соответствует удвоенной запрещенной зоне в Si. Точность измерения η составляла $\pm 3\%$. Исследования автора позволили [21] заключить, что рассеивание энергии горячими носителями с $\mathcal{E}_{e,h} \geq E_g$ на рамановских фононах в Si не является доминирующим, т.к. ионизационное рассеивание проявляется, как только выполняется баланс энергии. Ввиду этого сделан вывод, что порог ударной ионизации E_i равен $E_g = 1.1$ эВ. Проведен анализ температурной зависимости квантовых процессов в кристаллах кремния (§ 5), подтверждающий сделанные выше выводы.

Исходя из проведенных исследований, построены схемы квантовых переходов (рис. 4), объясняющие полученные в экспериментах значения $h\nu_i$ и порога иони-

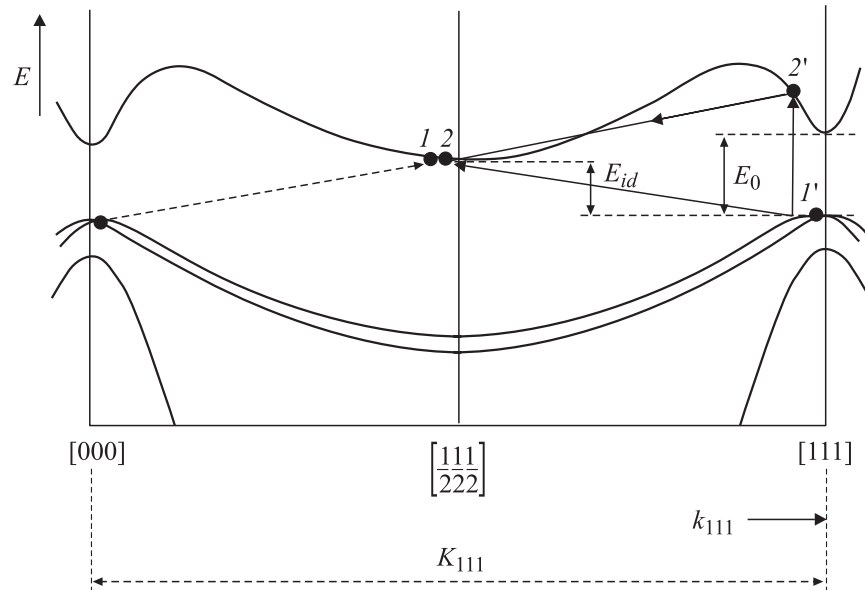


Рис. 2: Квантовые переходы в кристаллах германия, определяющие рост η при поглощении фотонов с энергией $h\nu \geq 2E_g$: *a*) непрямого оптического перехода — $1', 2'$; *b*) непрямого Оже-перехода — $2', 2$ и $1', 2$ (ударная ионизация).

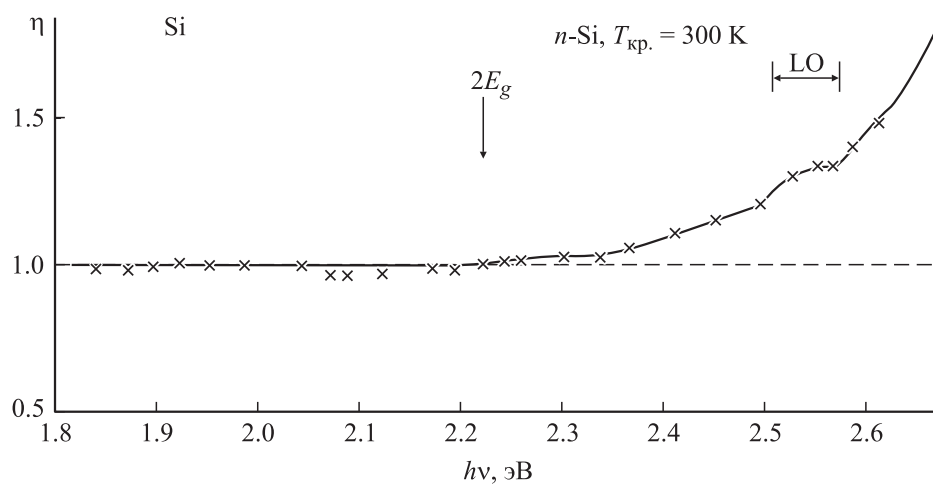


Рис. 3: Зависимость квантового выхода $\eta = f(h\nu)$ для кристаллов кремния, измеренная на сплавном э-д переходе, облучался n -Si, $T_{\text{кр.}} = 300$ К [104].

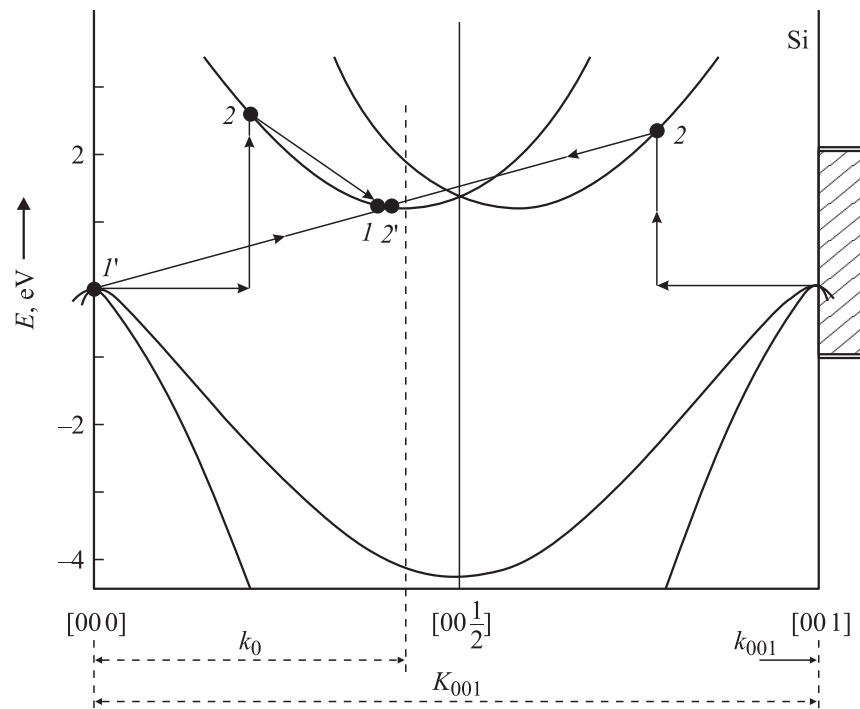


Рис. 4: Квантовые переходы в \mathbf{k} -пространстве, определяющие рост квантового выхода фотоэффекта при $h\nu \geq 2E_g$ в кристаллах кремния: а) непрямой оптический переход — $1', 2$; б) непрямой Оже-переход — $2, 2'$ и $1', 1$.

зации E_i в кремнии. Проанализированы литературные данные по фотоэмиссии и 2-х электронным люминесцентным переходам [14], подтверждающие правильность сделанных выводов по зависимости $\eta = f(h\nu)$. Привлекая непрямые переходы, было дано правильное объяснение результатам работы [14], притом раньше ее автора.

2 часть. Включает 3 главы, общий объем — 46 стр. Представлены результаты исследований по кристаллам соединений A_3B_5 , имеющих структуру зон в \mathbf{k} -пространстве радикально отличную от Ge и Si — главные экстремумы c - и v -зон находятся при $\mathbf{k}[0, 0, 0]$, т.е. прямозонную.

Первая глава посвящена исследованиям в кристаллах InSb; изучался внутренний фотоэффект. Для всех методов регистрации: эл.–дырочный переход, фотопроводимость, фотоэлектромагнитный эффект обнаружен рост η квантового выхода при $h\nu_i \geq (0.43-0.01)$ эВ, что при 90 К соответствует $2E_g$ в InSb. Детальные исследования на n - и p -типа кристаллах высокой чистоты ($\leq 10^{13}$ см $^{-3}$), однозначно указывают на участие непрямых оптических и ионизационных переходов в окрестности энергий $h\nu_i$. Сделаны заключения по видам рассеивания энергии горячими носителями в области $\geq E_g$, отмечается активная роль кристаллической решетки в непрямых переходах, возбуждаемых фотонами с энергией $h\nu \geq h\nu_i = 2E_g$.

Аналогичные выводы сделаны по исследованиям на кристаллах InAs, GaAs, GaSb, составляющие содержание 2-й и 3-й глав диссертации. Приводятся модели, объясняющие рост фотоэффекта при $h\nu \geq 2E_g$ в названных кристаллах (рис. 5 и 6). Температурные исследования внутреннего фотоэффекта и по фотоэмиссии на кристаллах A_3B_5 также свидетельствуют об участии фононов в непрямых переходах, ответственных за рост квантового выхода η на уровень > 1 .

3 часть, объем которой 23 стр., включает 3 главы и посвящена исследованиям в соединениях A_2B_6 и кристаллах солей свинца: PbS, PbSe, PbTe.

В главе 1 приведены результаты, касающиеся PbS, имеющего в \mathbf{k} -пространстве прямую зону E_g , тип решетки — хлористого натрия. Квантовые закономерности изучались по зависимости $\eta = f(h\nu)$ для внутреннего фотоэффекта в интервале энергий $0.3 \div 2.2$ эВ. Применяя анализ аналогичный примененному к кристаллам Ge и Si, сделаны выводы относительно рассеивания энергии горячими носителями в области $\geq E_g$. Определен порог ударной ионизации E_i на основании обнаруженного роста фотоэффекта при $h\nu_i \geq 2E_g$. Исходя из полученных значений $h\nu_i$ и E_i , сделан вывод о существенном вкладе непрямых оптических переходов для фотонов с энергией ≥ 0.8 эВ, а также непрямых ионизационных переходов при $\mathcal{E}_{e,h} \geq E_g$. Приводится обсуждение работ [18] по кристаллам PbS, PbSe и PbTe, в которых подтверждаются результаты, полученные ранее автором для сернистого свинца [20].

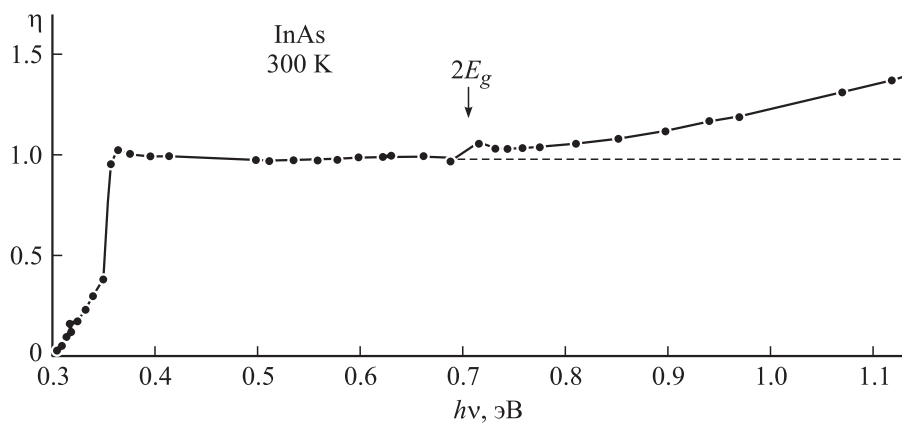


Рис. 5: Зависимость квантового выхода фотоэффекта $\eta = f(h\nu)$ для кристаллов арсенида индия при $T_{кр.} = 300$ К; диффузионный э-д переход.

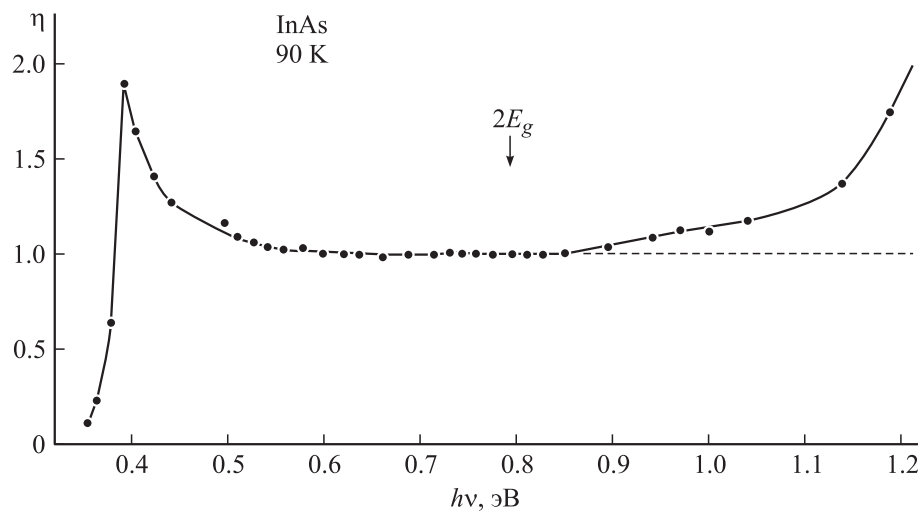


Рис. 6: Зависимость квантового выхода фотоэффекта для кристаллов InAs при $T_{кр.} = 90$ К (диффузионный э–д переход).

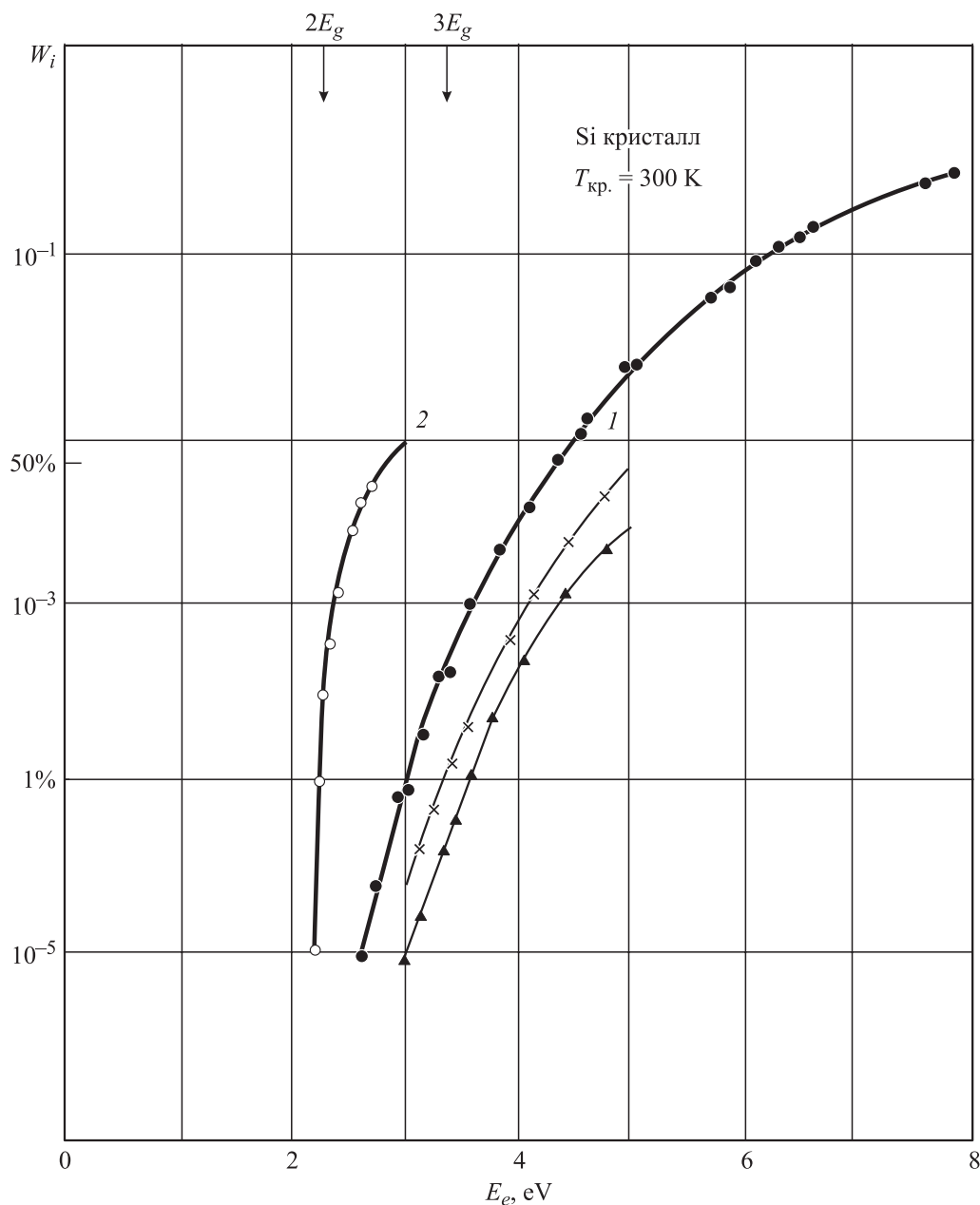


Рис. 7: Вероятность ударной ионизации в кристаллах кремния горячими электронами: *1* — данные теоретических расчетов с использованием Монте-Карло моделирования [13] и др.; *2* — данные экспериментальных исследований автора [104]. Смещение к меньшим энергиям обусловлено участием непрямых квантовых переходов — межзонных и внутризонных переходов. Энергия электронов отсчитывается от вершины валентной зоны.

Анализ и обсуждение квантовых процессов для кристаллов A_2B_6 — CdS и $Cd_xHg_{1-x}Te$ проведены в главе 2. Основные выводы, сделанные по ним в работе, коррелируют с теми, которые были сделаны для других типов кристаллов и приводятся в предыдущих разделах.

Исследования с применением лазеров в качестве источников фотонов (часть III, гл. III) полностью подтвердили зависимости квантового выхода η от энергии фотонов полупроводниковых кристаллах, полученные нами при использовании спектрофотометров (часы I и II диссертации).

Диссертация имеет самостоятельный раздел „Заключение“, где суммированы основные результаты исследований и представлены в виде отдельных параграфов, имеющих названия:

- 1) Квантовые правила отбора в полупроводниковых кристаллах и электронный волновой вектор \mathbf{k} как квантовый параметр.
- 2) Рассеивание энергии горячими носителями в полупроводниковых кристаллах при $\mathcal{E}_{e,h} \geq E_g$.
- 3) Ударная ионизация в полупроводниковых кристаллах и проблема повышения электрической прочности приборов на их основе.
- 4) Проблема увеличения пороговой чувствительности фотоприемников.
- 5) Заключительные выводы.

В этом же разделе обсуждаются альтернативные механизмы, которые могли бы рассматриваться в качестве объяснения наблюдаемому росту фотоэффекта для фотонов с $h\nu \geq 2E_g$, но отклонены ввиду их малой вероятности. Наряду с часто привлекаемой в научной литературе причиной электрического пробоя — эффективное увеличение напряженности электрического поля вблизи неоднородностей в кристаллах, таких, как кластеры, включения окислов, дислокации и тому подобное, приводимое в [4], в данной работе более вероятной причиной пробоя считается интенсивная генерация фононов, стимулирующая не прямые электронные переходы в указанных областях, требующие меньших энергий.

Приводятся конкретные предложения для решения практических задач твердотельной электроники, которые позволили высказать изученные в данной работе физические проблемы.

В разделе „Заключительные выводы“ сведены итоговые выводы по проведенным исследованиям основных классов полупроводниковых кристаллов, что позволяет считать их применимыми к полупроводниковым кристаллам в целом.

Заключительные выводы

1. Проведенные впервые экспериментальные комплексные исследования квантовых процессов и квантовых соотношений при поглощении фотонов больших энергий $h\nu \gg E_g$ в полупроводниковых кристаллах, отличающихся структурой решетки, а именно:

- а) кубическая, объемноцентрированная — решетка алмаза — Ge и Si;
- б) кубическая, сложная — решетка сфалерита — InSb, InAs, GaAs, GaSb, CdS, $\text{Cd}_{0.23}\text{Hg}_{0.77}\text{Te}$;
- в) кубическая, гранцентрированная — решетка хлористого натрия — PbS, PbTe, PbSe, позволили обнаружить ранее неизвестную закономерность — рост внутреннего фотоэффекта при энергиях фотонов $h\nu \geq 2E_g$. Анализ экспериментов проведен с использованием \mathbf{k} -пространства.

2. В кристаллах, отличающихся радикально структурой энергетических зон в \mathbf{k} -пространстве: InSb, InAs, GaSb, CdS, $\text{Cd}_{0.23}\text{Hg}_{0.77}\text{Te}$, PbS, PbTe, PbSe — прямозонные, т. е. $\mathbf{k}_c = \mathbf{k}_v$ и Ge, Si — непрямоzonные, т. е. $\mathbf{k}_c \neq \mathbf{k}_v$, рост внутреннего фотоэффекта происходит при эквивалентных энергиях фотонов — $h\nu \geq 2E_g$.

3. Рост внутреннего фотоэффекта для фотонов $h\nu \geq 2E_g$ имеется как при обычных температурах ($T = 300\text{ K}$), так и в случае глубоких охлаждений кристаллов ($T = 77\text{ K}$).

4. Рост внутреннего фотоэффекта в полупроводниковых кристаллах для фотонов $h\nu \geq 2E_g$ имеется как в кристаллах с электронной, так и дырочной проводимостью и, следовательно, не связан с механизмом электропроводности, что вместе с фактами, отмеченными в п.п. 1–3, указывает на фундаментальный характер данного явления.

5. Рост внутреннего фотоэффекта при энергиях фотонов $h\nu \geq 2E_g$ происходит за счет увеличения квантового выхода фотоэффекта, обусловленного участием ударной ионизации горячими носителями в кристаллах.

6. Диссипация энергии горячих квазичастиц (электронов, дырок) в диапазоне $\mathcal{E}_{e,h} \geq E_g$ происходит со значительной вероятностью через электрон-электронные взаимодействия, т. е. посредством ионизационного рассеяния.

7. Диссипация энергии горячих квазичастиц в области $\mathcal{E}_{e,h} \geq E_g$ путем взаимодействия с рамановскими колебаниями решетки не является доминирующей в полупроводниковых кристаллах и диссипация путем ионизационного рассеяния сравнима с нею по абсолютной величине.

8. Феноменологические модели, в частности, модель В. Шокли [4] и другие, предложенные для объяснения квантовых процессов в полупроводниковых кристаллах

при сильных разогревах носителей ($\mathcal{E}_{e,h} \geq E_g$), прогнозирующие доминирующее рассеяние энергии носителями на рамановских колебаниях решетки кристаллов, не корректны ввиду не отвечающего действительности выбора главного механизма рассеяния энергии горячими квазичастицами.

9. Исследования квантовых процессов, проведенные по внутреннему и внешнему фотоэффекту, свидетельствуют, что в полупроводниковых кристаллах оптические переходы в окрестности $h\nu \geq 2E_g$, как в кристаллах с непрямыми зонами, так и в кристаллах с прямыми зонами со значительной вероятностью совершаются без сохранения вектора \mathbf{k} , т.е. непрямым образом.

10. Квантовые межзонные Оже-переходы, согласно исследованиям по внутреннему фотоэффекту, фотоэмиссии, люминесцентным двухэлектронным переходом в кристаллах с непрямыми зонами со значительной вероятностью совершаются без сохранения электронного волнового вектора \mathbf{k} .

11. Квантовые, межзонные Оже-переходы, исследование которых проведено методами, указанными в п. 10, в кристаллах с прямыми энергетическими зонами со значительной вероятностью совершаются без сохранения вектора \mathbf{k} .

12. Электронный волновой вектор \mathbf{k} в реальных условиях, как свидетельствуют исследования оптических переходов в области $h\nu \gg E_g$ и Оже-переходов в области $\mathcal{E}_{e,h} \geq E_g$ при электрон-электронных взаимодействиях в кристаллах не является устойчивым квантовым параметром и, следовательно, сохранение только вектора \mathbf{k} не является строгим квантовым правилом отбора. Поэтому указанное правило может иметь лишь ограниченное применение.

13. Согласно температурным исследованиям внутреннего фотоэффекта, фотоэмиссии, двухэлектронным люминесцентным переходам, наиболее вероятной причиной несохранения вектора \mathbf{k} в Оже и оптических переходах при $h\nu \geq 2E_g$ является участие фононов в соответствующих квантовых переходах.

14. Фононная система в полупроводниковых кристаллах играет существенную роль в таких явлениях как ударная ионизация, межзонные оптические переходы и других видах электронных переходов, т.к. поставляет дефицит по квазиимпульсу $\hbar\mathbf{k}$.

15. Пороговая энергия ударной ионизации E_i , как в полупроводниковых кристаллах с непрямыми зонами ($\mathbf{k}_c \neq \mathbf{k}_v$), так и в кристаллах с прямыми зонами ($\mathbf{k}_c = \mathbf{k}_v$), равна запретной зоне в кристаллах, т.е. $E_i = E_g$ (с точностью до энергии фонона).

16. Применение различных методов регистрации фотоэффекта и обработки поверхности кристаллов:

- а) травление химическими растворами,

б) электрохимическая полировка,
 в) скалывание кристаллов в вакууме 10^{-11} мм.рт.ст. и атмосфере,
 г) естественная поверхность роста кристалла, свидетельствуют, что несохранение электронного вектора \mathbf{k} в квантовых переходах не связано с поверхностью кристаллов.

17. Эффект умножения носителей за счет ударной ионизации горячими носителями является перспективным для использования в качестве нового принципа работы фотоприемников с целью улучшения их пороговой чувствительности. Главным условием принципа работы является $E_g \ll h\nu$.

18. Фотоэффект в кристаллах возрастает при $h\nu \geq 2E_g$, что приводит к существенному увеличению квантового преобразования лазерных излучений и должно учитываться при выборе оптимального сочетания лазер—фотоприемник.

19. Инородные включения в кристаллах типа SiO_2 в кремнии, вторая фаза (комплексы неактивного состояния примесей), приповерхностные участки кристаллов представляют области пониженной электрической прочности кристаллов ввиду того, что способствуют генерации не прямых квантовых переходов. Последнее снижает E_i — порог ионизации на величину $\leq 0.5E_g$, что эквивалентно уменьшению напряженности электрического поля в $\lesssim 10$ раз.

20. Электрическая прочность полупроводниковых приборов может быть повышена: совершенствованием структуры решетки кристаллов, сведением к минимуму легирования кристаллов и других факторов, порождающих дислокации, являющихся причиной не прямых межзонных переходов.

21. Для увеличения электрической прочности и надежности работы полупроводниковых приборов целесообразно применять меры, ведущие к снижению концентраций фононов такие как эксплуатация приборов при умеренных температурах; конструирование приборов, исключаящее выход на поверхность областей повышенной электрической напряженности; имитация диэлектрическими покрытиями с идентичными параметрами решеток в области выхода высоких электрических полей на поверхность с целью уменьшения вероятности не прямых квантовых переходов.

Основные результаты диссертации были опубликованы в следующих научных работах:

1. Разработка приемников инфракрасного излучения на основе кристаллов сурьмянистого индия. Отчет по научно-исследовательской работе, шифр „Энергия“, по заданию Правительства страны. 1969. ФТИ им. А.Ф. Иоффе, АН СССР. Наследов Д.Н., Галаванов В.В., Ивахно В.Н.

2. Получение и исследование кристаллов сурьмистого индия. Отчет по научно-исследовательской работе, тема Г-8, по распоряжению Президиума Академии Наук. ФТИ им. А.Ф. Иоффе, АН СССР, 1961. Наследов Д.Н., Галаванов В.В., Ивахно В.Н. и др.

3. Зависимость квантового выхода от энергии фотонов для $p-n$ переходов в InSb. „Физика твердого тела“, 1964, т. 6, в. 7, с. 2094–2099. Библ.: 8 названий, Ивахно В.Н., Наследов Д.Н.

4. Высокочувствительные приемники инфракрасного излучения на основе $p-n$ переходов в InSb. „Военная радиоэлектроника“, 16, 22. 1962. Галаванов В.В., Ивахно В.Н.

5. Свойства приемников инфракрасного излучения на основе $p-n$ переходов сурьминистого индия. „Вопросы специальной радиоэлектроники“, серия XII, № 16, 1962, Ивахно В.Н., Наследов Д.Н.

6. Аннотация на НИР по фотоприемникам специального назначения на основе InSb. Регистр. Комитет по делам изобретений и открытий при СМ СССР, 1962. Галаванов В.В., Ивахно В.Н.

7. Фотоэлектрические свойства электронно-дырочных переходов в антимониде индия и разработка на их основе приемников излучения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. ФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР, г. Ленинград, Ивахно В.Н., 1964.

8. Влияние давления на спектральное распределение фотоэффекта в кристаллах InSb. „Физика твердого тела“, 1965, т. 7, с. 3650–3652. Библ. 3 назв. Ивахно В.Н., Извозчиков Б.В., Таксами И.А.

9. Приемники инфракрасного излучения на основе InSb. Труды НИИ-801, т. 6, в. 2, ч. 1, 1965. Ивахно В.Н., Михайлова М.П. и др.

10. Вольт-амперные характеристики $p-n$ переходов в InSb при гелиевых температурах. „Радиотехника и электроника“, 1967, т. 12, с. 762–763. Библ.: 10 назв. Ивахно В.Н.

11. Плазмо-фононные взаимодействия в полупроводниках при гелиевых температурах. Ивахно В.Н., Наследов Д.Н. Аннотация на НИР, Комитет по делам изобретений и открытий при СМ СССР, № 65373, 1967. Отчет по теме Г-8.

12. Генерация акустических волн в полупроводниковых кристаллах импульсными электрическими полями. Ивахно В.Н., Наследов Д.Н. „Физика и техника полупроводников“, 1968, т. 2, с. 1171–1173.

13. Генерация ультразвуковых колебаний импульсными полями в полупроводниках. „Труды ЛИСИ“. Физика. Материалы 25 научной конференции ЛИСИ, 1968, Ивахно В.Н., Наследов Д.Н.

14. Оптические свойства и запретная зона в ZnSnSb_2 . „Физика и техника полупроводников“, 1969, т. 3, с. 1083–1085. Библ.: 6 назв. Ивахно В.Н., Крадинова Л.В., Прочухан В.Д.

15. О некоторых электронных свойствах стеклообразного CdGeP_2 . „Физика и техника полупроводников“, 1969, в. 11, с. 1739–1742. Библ.: 6 назв. Федотов В.Г., Леонов Е.И., Ивахно В.Н., Горюнова Н.А., Тычина И.И.

16. Поляризационные свойства и оптические константы системы InSb-NiSb . „Физика и техника полупроводников“, 1970, т. 4, в. 5, с. 1174–1175. Библ.: 4 назв. Векшина В.С., Ивахно В.Н., Кроль Л.Я., Новак И.И.

17. Неустойчивость фононной системы в полупроводниковых кристаллах в импульсных электрических полях. „Физика и техника полупроводников“, 1970, т. 12, с. 609–611. Библ.: 11 назв. Ивахно В.Н.

18. К вопросу о зависимости квантового выхода фотоэффектра в InSb от энергии фотонов. „Письма в ЖЭТФ“, 1970, т. 12, с. 345–346. Библ.: 7 назв. Ивахно В.Н., Наследов Д.Н.

19. Электрические и фотоэлектрические свойства $p-n$ переходов в InSb , полученных прогревом в вакууме. Тезисы 2 Всесоюзного совещания по $p-n$ переходам, г. Рига, 1964. Ивахно В.Н., Наследов Д.Н.

20. Свойства $p-n$ -переходов в InSb при гелиевых температурах. Тезисы 3 Всесоюзного совещания по $p-n$ -переходам, 1966, г. Тбилиси. Ивахно В.Н., Наследов Д.Н.

21. Квантовый выход внутреннего фотоэффекта и ударная ионизация в германии. „Физика твердого тела“, 1972, т. 14, в. 1, с. 196–200. Библ.: 14 назв. Ивахно В.Н., Новак И.И.

22. Квантовый выход внутреннего фотоэффекта и ударная ионизация в Si . „Физика и техника полупроводников“, 1972, т. 6, в. 8, с. 1612–1614. Библ.: 10 назв. Ивахно В.Н.

23. Квантовый выход внутреннего фотоэффекта и ударная ионизация в PbS . „Физика твердого тела“, 1972, т. 14, в. 2, с. 578–580. Библ.: 9 назв. Ивахно В.Н.

24. Свойства $p-n$ -переходов в InSb при гелиевых температурах. Аннотация на НИР. Комитет по делам изобретений и открытий при СМ СССР № 65033 от 1967 г., Д.Н. Наследов, В.Н. Ивахно, Ю.П. Наумов.

25. Фотоприемник с координатной чувствительностью на основе $p-n$ -переходов в InSb . В.Н. Ивахно, Д.Н. Наследов. Доклад на совещании; г. Москва, 1963.

26. Аннотация на НИР по редиффузионным $p-n$ -переходам и фотоприемникам на их основе. Регистр. Комитет по делам изобретений и открытий при СМ СССР, 1962. Ивахно В.Н., Галаванов В.В.

27. Авторское свидетельство на изобретение № 20813, авторы: Ивахно В.Н., Галаванов В.В.

28. Авторское свидетельство на изобретение № 30996, авторы: Ивахно В.Н., Наследов Д.Н.

29. Отчет на ОКР „Фот“, Правительственное задание. Центральное конструкторское бюро при ЛОМО, Ленинград, 1976–1990. Ивахно В.Н. в коллективе авторов.

30. Заявка на открытие № ОТ-МЗ-217 под названием „Закономерность фотоэффекта в полупроводниковых кристаллах при энергиях квантов $\hbar\omega \geq 2E_g$ “. Заявитель В.Н. Ивахно. На рассмотрении во ВНИИГПЭ; 02.08.1993 г.

31. Ультрагорячая люминесценция с $\hbar\omega \leq 3E_g$ в полупроводниках. Оптический журнал, т. 68, № 7, 13–15, 2001 г, В.Н. Ивахно.

32. Оптическое решение задачи А.Ф. Иоффе — электроны в кристаллах при сильных электрических полях. В.Н. Ивахно. Сборник трудов конференции „Фундаментальные проблемы оптики“, 14–17 октября 2002 г., Санкт-Петербург, стр. 142–143.

33. Квантовая динамика электрического пробоя полупроводников. В.Н. Ивахно, „Физика твердого тела“. Март, 2003 г. (на рассмотрении).

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Kane E.O. Phys. Rev. 159, 624, 1967. Sano N., Yoshii A., J. Appl. Phys. 75, 5102, 1994.
2. Beattie A.R. J. Phys. Chem. Sol. 24, 1049, 1962.
3. Антончик Э. Труды 9 Международной конференции по физике полупроводников, г. Москва, стр. 897, 1968. Proc. 10 Inter. Conf. Phys. Semic. Boston, USA. p. 838, 1970.
4. Шокли В. УФН 77, 161, 1962. Доклад на Международ. конференции по физике полупроводников, Прага, 1960 г.
5. Huldt L. Proc. XI Int. Conf. Phys. Semic., Warszawa, 1972. p. 1097.
6. Egles D.M. Proc. Phys. Soc. 78, 204, 1961.
7. Киттель Ч. Квантовая теория твердых тел, Наука, Москва, 1967.
8. Давыдов А.С. Теория твердого тела, Мир, Москва, 1966.
9. Вавилов В.С. Действие излучений на полупроводники. Физматлит., Москва, 196, 1963.
10. Займан Д. Принципы теории твердого тела, Мир, Москва, 1966.
11. Вавилов В.С., Брицын К.И. ЖЭТФ, 34. 1354. 1958.

12. Алфёров Ж.И., Коноваленко Б.М., Рывкин С.М., Тучкевич В.М., Уваров А.И. ЖТФ, 25, 11, 1955.
13. Мосс Т.С. Оптические свойства полупроводников, ИЛ, 1961.
14. Conradt R. Z. Phys. 209. 445, 1968.
15. Келдыш Л.В. ЖЭТФ 37, 713, 1959.
16. Baraff G.A. Phys. Rev. 126, 2507, 1962.
17. Ballinger R.A. et al. Sol. St. Phys. 6, 2573, 1970.
18. Барышев Н.С.и др. ФТП 8, № 2, 301, 1974; № 3, 593, 1974.
19. Mahadevan S. et al. Phys. Stat. Sol. 8, 335, 1971.
20. Ивахно В.Н. ФГТ 14, 578, 1972.
21. Ивахно В.Н. ФТП 6, 1612, 1972.

ДЛЯ ЗАМЕТОК
