

53109)
Б-72

P-P

723/-

МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ УССР
КИЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ им. А. М. ГОРЬКОГО

БОВТРУК Алла Георгиевна

На правах рукописи

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ (ДОЗОННЫЙ ПЕРИОД)

07.00.10.— История науки и техники
(Диссертация написана на русском языке)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

НБ НПУ
імені М.П. Драгоманова



100310753

Киев — 1975

МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ УССР

**КИЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ ИМ. А. М. ГОРЬКОГО**

На правах рукописи

БОВТРУК Алла Георгиевна

**ВОЗНИКНОВЕНИЕ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ
(ДОЗОННЫЙ ПЕРИОД)**

**07.00.1С. - История науки и техники
(Диссертация написана на русском языке)**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Киев - 1975

Работа выполнена на кафедре физики Киевского государственного педагогического института им. А. М. Горького.

Научный руководитель - кандидат физико-математических наук, доцент Г. Г. КОРДУН

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Института полупроводников АН УССР

Е. Г. МИСЕЛДК

доктор физико-математических наук, профессор МГУ им. М. В. Ломоносова

Б. И. СПАССКИЙ

Оппонирующая организация - Институт истории естествознания и техники АН СССР.

Автореферат разослан " " 1975 г.

Защита диссертации состоится " 11 " июня 1975 г. на заседании Ученого Совета физико-математического факультета Киевского государственного педагогического института им. А. М. Горького (252030, Киев - 30, ул. Пирогова 9).

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале института.

УЧЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА,
кандидат физико-математических наук,
доцент

(И. И. ТЫЧИНА)

Физика полупроводников прочно занимает одно из ведущих мест в современной науке и имеет широкие выходы в технику. В Директивах XXIV съезда КПСС по девятому пятилетнему плану в числе основных научных направлений фундаментальных исследований, подлежащих интенсивному развитию, названы исследования по физике твердого тела и полупроводников. Это, с одной стороны, свидетельствует о значительных достижениях советской науки в области физики полупроводников, а с другой — о больших перспективах ее развития.

Значимость физики полупроводников в современной научно-технической революции определяет актуальность задач всестороннего исследования ее истории. Анализ состояния вопроса показал, что до настоящего времени изучен только один из ее важных аспектов — история развития зонной теории электропроводности металлов и полупроводников. Ценная историческая информация, имеющая важное генезисологическое значение, содержится в статьях А.Э.Морфе, Я.И.Френкеля, Б.М.Вула и других советских и зарубежных авторов; отдельные замечания исторического характера можно встретить также в монографиях по различным вопросам физики полупроводников и обзорных статьях. Это является одним из свидетельств потребности в знаниях подобного рода. Однако поскольку авторами этих работ цели систематического и всестороннего исследования истории физики полупроводников не ставилась, эта информация часто имеет фрагментарный характер и нуждается в систематизации, существенных дополнениях, научных обоснованиях, доказательствах и т.п. Таким образом, имеет место несоответствие между успехами современной физики полупроводников и состоянием научно-исторических исследований в этой области.

В диссертационной работе исследуется часть поднятой обширной проблемы - возникновение физики полупроводников. Обнаруженные нами документальные данные свидетельствуют о том, что этот период длился более 150 лет (с конца XVIII в. по 30-е гг. XX в.) и был содержательным в финансовом и прикладном плане^{II}. Между тем, в отечественной и зарубежной литературе широко представлено мнение о том, что история физики полупроводников начинается только с 30-х или даже с 40-х гг. XX в. Это вызвано тем, что, несмотря на известную важность исходных идей для дальнейшего развития любой отрасли науки, вопрос о возникновении физики полупроводников наименее исследован. Период, длившийся до 30-х гг. XX в., оказался, по существу, забытым и, кроме отдельных упоминаний о некоторых работах того времени, об этом периоде нет никаких сведений.

Возникновение нового направления в науке всегда есть скачок, отражающий дифференциацию или интеграцию знаний и обозначающий новое качество, новый более высокий уровень знания. Однако этот скачок не означает, что формирование нового направления происходит вдруг, внезапно. А именно так, по сути, трактуется в литературе факт возникновения физики полупроводников, поскольку роль и значение вышеуказанного периода для современного состояния знаний, его вклад в генезис и развития физики полупроводников не выделены.

Наконец, необходимо отметить, что интерес к раннему периоду истории физики полупроводников проявляется в последние время в зарубежом, о чем свидетельствует, в частности, вышедшая в 1972 и 1973 гг. статьи^I, в которых, однако, рассматриваемая проблема не

^{II} Достаточно сказать, что к 1927 г. только по исследованию фотоэлектрических свойств органики было опубликовано 1586 работ и выдано 188 патентов.

^I Goetzeler H. Zur Geschichte der Halbleiter-Halbleite der Elektronik.- Technikgeschichte, 39, 31, (1972); Stöckmann F. Photconductivity - A Centennial. - Phys. Stat. Sol., 19, 381, (1973).

решается и полученные в нашей работе результаты - отсутствуют.

Под физикой полупроводников как самостоятельной областью физики понимается наука, изучающая специфические физические процессы в полупроводниках^ж и методы управления этими процессами, которые определяются природой этих веществ и их взаимодействием с внешней средой. Предметом данного исследования явились историко-физические закономерности процесса познания свойств полупроводниковых веществ на его ранних этапах. Основная цель - выявление и обоснование особенностей возникновения физики полупроводников и факторов, способствующих этому. Эта цель определила частные задачи: установление периодизации в истории возникновения физики полупроводников; составление эмпирической сетки событий в их исторической последовательности и рассмотрение связанных с этим вопросов прироста; выяснение роли и значения отечественных исследований; обнаружение условий зарождения и закономерностей смены теоретических идей о сущности специфических физических процессов в полупроводниках и их взаимоотношение с экспериментом; установление, как и когда добыты научные результаты привели к важным по тому времени техническим приложениям.

Данное исследование построено на изучении оригинальных работ, помещенных в отечественных и зарубежных журналах, рефератов, патентов, материалов союзных и международных конференций и съездов, монографической литературы. Анализ и систематизация этого материала, а также научное обобщение результатов анализа наиболее фунда-

^ж Под полупроводниками понимают обычно неметаллические проводники с электронным механизмом тока, имеющими при комнатной температуре удельную электропроводность в интервале $10^{-8} - 10^6 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$, которая зависит в сильной степени от вида и количества примесей и структуры вещества, а также от внешних условий: температуры, освещенности и т.п.

ментальных работ проводится с точки зрения современных представлений.

Выполненное исследование позволило установить следующую внутреннюю периодизацию в истории возникновения физики полупроводников:

1. Предыстория изучения свойств полупроводниковых веществ в доэлектронный период (конец XVIII - конец XIX вв.).
2. Развитие учения о полупроводниках в 1900-1930 гг.
3. Формирование основ современной теории полупроводников (рубеж 20-х - 30-х гг. XX в.).

Диссертация состоит из введения, трех глав, соответствующих установленной периодизации, заключения, списка цитированной литературы и приложений, где приводится дополнительный фактический материал.

Во введении обосновывается выбор темы исследования, кратко характеризуется современное состояние проблемы, дается анализ соответствующей литературы, формулируются цели, задачи и, в соответствии с этим, определяются методы исследования.

Глава первая охватывает комплекс вопросов, связанных с выявлением предпосылок и первых результатов в изучении полупроводниковых веществ. Поскольку для полупроводников наиболее характерными являются их электрические свойства (точнее, зависимость электрических свойств от внешних условий - температуры, освещенности, контактных условий и т.д.), то представляется закономерным, что по мере развития учения об электричестве шло постепенное накопление знаний о полупроводниках. Этому должно было способствовать также и то обстоятельство, что (как известно теперь) большинство твердых тел, встречающихся в природе, являются полупроводниками. Нижняя временная граница исследования была определена рубежом XVIII-XIX вв., ког-

да глобальный климат науки (т.е. успехи в развитии механики, теплоты, электричества) мог создать необходимые научные предпосылки, определяющие возможность зарождения физики полупроводников. Верхняя временная граница в данной главе определялась рубежом XIX-XX вв., т.е. началом революции в физике, давшей не только важнейшие научные открытия, но и приведшей к качественным изменениям в самом подходе к физическим исследованиям и к их организации.

В первом параграфе выясняются условия и время введения в физику термина "полупроводник". Установлено, что это событие относится к периоду 200-летней давности, ко второй половине XVIII в. и связано с работами Д.Беккера, Д.Кантона, Г.Кавендиша. Поэтому широко распространенное мнение о том, что термин этот "сравнительно молод" и возник в 20-х - 30-х гг. XX в. следует полагать ошибочным. Первое представление о полупроводниках возникло в связи с обобщением и систематизацией экспериментальных данных по исследованию "способности тел" проводить электрический ток, а термин "полупроводник" был введен примерно в 1770 годах в результате появления потребности кодировать меру этой способности. Необходимо подчеркнуть важное значение первого определения полупроводников как твердых тел, занимающих по величине электрической проводимости промежуточное положение между проводниками и изоляторами, которое, являясь сравнительным, сохранилось и до настоящего времени, характеризуя полупроводники в "широком смысле". Однако физическим, судя по содержанию этот новый термин тогда наполнен еще не был. Его определение на языке логики можно отнести к определениям номинальным (т.е. определению содержания термина), а не реальным (т.е. определению самого предмета). Это как раз тот случай, когда термин возник намного раньше соответствующего понятия.

Второй параграф главы посвящен открытиям и исследованиям характерных электрических явлений в полупроводниковых материалах и созданию первых приборов на их основе. Вопреки мнению Р.Смита и других авторов, считающих, что первым специфическим свойством, открытым в полупроводниках, был отрицательный температурный коэффициент сопротивления, в работе учитывается, что исследования по таким важным свойствам полупроводников как термоэлектрические, начались на 12 лет раньше, с открытия Т.Зеебека в 1821 г. Высказывание Зеебека о термоэлектрических свойствах некоторых сульфидов и оксидов в форме минералов, а также теллура не осталось незамеченным. С этими и другими аналогичными веществами (т.е. полупроводниками), для которых устанавливались количественные характеристики термоэлектрического эффекта (Э.Беккерель, В.Ханкель, А.Маттисен и др.), предпринимались попытки по конструированию термоэлектрических элементов для использования их в качестве источников тока. Из таких конструкций наиболее удачной можно считать батарею на PbS Л.Мура и Ч.Кламона (1869 г.) и на $ZnSb$ Гольхера (1890 г.). Однако успешно начавшееся исследование, не имея продуктивной научной базы, вскоре затормозилось и новый этап в истории развития этого научного направления начался много позже, в 1950 г., когда А.Ф.Иоффе разработал теорию энергетических применений полупроводниковых термоэлементов, определившую дальнейший путь их развития.

Открытие отрицательного температурного коэффициента сопротивления полупроводников (М.Фарадей, 1833 г.) диктовалось самой логикой развития исследований электропроводности твердых тел, которыми ученые занимались уже длительное время и со второй четверти XIX в. стали получать количественные результаты, выражающие зависимость электропроводности от различных факторов. В это время би-

ло известно наличие отрицательного температурного коэффициента сопротивления у проводников II рода, имеющих электролитический тип проводимости. Обнаружение такой же температурной зависимости сопротивления у веществ, в которых разложения вещества при прохождении тока не наблюдалось (т.е. эти вещества должны являться проводниками I рода, имеющими металлическую проводимость и положительный температурный коэффициент сопротивления), поставило вопрос о природе проводимости в сульфидах и оксидах металлов, селене, теллуре, которые стали рассматриваться как соединительное звено между металлами и электролитами. Несмотря на то, что к 1900 г. в этой области было накоплено значительное количество экспериментальных данных (И.Гитторф, Ф.Бейджерик, А.Аст, А.Маттисен, М.Бозе, Д.Бернфельд и др.), они были еще недостаточно полными, чтобы послужить признаком новой закономерности. Полученные эмпирические представления носили нечеткий характер, так как условия экспериментов были неповторяемыми из-за отсутствия стандартных образцов и использования вместо этого природных минералов с неконтролируемыми примесями.

В период, рассматриваемый в данной главе, были открыты и фотоэлектрические свойства полупроводников*. Открытие фотопроводимости селена^{***} (Мэи, Смит, 1873 г.) явилось одним из тех, которые

* Первым открытием в данной области явилось, по сути, обнаружение Э.Беккерелем в 1839 г. появления разности потенциалов при освещении одного из серебряных электродов, погруженных в раствор серной кислоты. Хотя фотоэлектрический характер процесса стал ясен намного позднее, это наблюдение можно считать открытием фотоэлементов.

*** В работе уточняется, что автором этого открытия исторически правильнее было бы считать Мэя, телеграфного служащего из Ванденга, впервые заметившего это явление, а не У.Смита, впервые его описавшего.

возбудили интерес не только из-за своей странной и неожиданной природы², но и из-за возможности широкого применения. В частности, появлялась возможность использования селена в фотометрии, а так как к тому времени не было еще надежного и удобного способа измерения светового потока, то это открытие приобретало особое значение. Поэтому сразу же появилось большое количество работ по фотопроводимости селена, в которых можно увидеть три направления: 1) экспериментальное выяснение специфики нового явления, 2) создание конструкций, обеспечивавших его лабораторное изучение и практическое использование, 3) разработка гипотетических предположений о природе данного явления.

Работы первого направления позволили установить, что причиной, вызывавшей изменение сопротивления селена, является свет, а не теплота (Б.Россе, В.Адамс, Р.Дэй, В.Сименс), что было далеко не очевидным. Работы второго направления привели к созданию селенового фотосопротивления (В.Сименс) и фотогальванического элемента (В.Адамс, Р.Дэй, Ч.Фриттс, В.А.Ульянин). впервые появление эдс при освещении селенового элемента было замечено в 1876 г. В.Адамсом и Р.Даем, чем была осуществлена трансформация световой энергии в электрическую с помощью полупроводникового материала. Сравнительный анализ работ третьего направления показал, что, несмотря на отсутствие до начала XX в. ясных представлений о механизме электропроводности и природе твердых тел (это исключало возможность выработки единой точки зрения на их фотоэлектрические свойства), наиболее перспективной и приближенной к современным воззрениям оказалась теория аллотропической диссоциации селена известного русского физика Н.А.Гезехуса.

² Внутренний фотоэффект в селене был открыт на несколько лет раньше внешнего фотоэффекта (Г.Герц, 1887 г.).

Стремление к практическому использованию новооткрытого свойства полупроводниковых веществ наблюдалось и в связи с установлением односторонней проводимости (Ф.Браун, А.Шустер, 1874 г.), и привело к созданию выпрямителей двух типов - точечного и пластинчатого. Эти выпрямители, так же как и термобатарей, фотоспротивления, фотогальванические элементы, созданные до конца XIX в., явились прообразами современных полупроводниковых приборов и поэтому их можно считать началом полупроводниковой электроники.

К концу XIX в. интерес к исследованиям в рассматриваемой области заметно снизился. Это было вызвано тем, что научные идеи определили практические потребности, удовлетворявшиеся в то время проводниками и изоляторами, и технологические возможности производства индустриально развитых стран. Кроме того, начавшаяся революция в физике привлекла внимание ученых к другим открытиям и проблемам. Поэтому многие работы оказались забытыми и значительная часть накопленной информации была утрачена.

Перечисленные выше свойства полупроводников были открыты в разное время и на разных веществах, поэтому они выглядели еще разобщенными фактами, а не признаком новой закономерности, на основе которой можно было бы выделить эти вещества в особый класс твердых тел. Однако нельзя недооценивать период открытия основных свойств полупроводников, который являлся необходимой предпосылкой для возникновения новой области исследований в физике. В выводах к первой главе дается общая характеристика рассмотренного периода, при этом отмечается особое важное значение среди ранних исследований работ отечественных ученых Н.А.Гезехуса, В.А.Ульянина, И.И.Воргмана, Н.Г.Егорова, П.И.Бахметьева, И.Полякова.

Вторая глава посвящена прослеживанию эволюции учения о полу-

проводниках и анализу факторов, приведших к экспериментальному открытию класса полупроводников. Начало XX в. рассматривается как новый этап в исследовании полупроводниковых веществ. Этому способствовал, пользуясь выражением Энгельса, переход "теоретического мышления эпохи" от описания явлений к раскрытию их механизма. Важное значение для активизации интереса к рассматриваемой проблеме имело влияние индустриальных потребностей общества (запусков электротехники, радиотехники и др.). В этот период можно выделить такие самостоятельные направления исследований полупроводников: изучение электропроводности, структурно-чувствительных свойств, фотоэлектрических свойств и односторонней проводимости.

Главную роль в выяснении механизма электропроводности сыграли обнаружение эффекта Холла, открытие электрона и рентгеновских лучей. С конца XIX в., благодаря, главным образом, успешному применению электронной теории к объяснению разряда в газах, начинаются попытки применения этой теории к объяснению тока в металлах, что привело к классической модели электропроводности Друде-Лоренца. Но из всех твердых тел только в металлах проводимость с уверенностью рассматривалась как электронная. Для неметаллических элементов и соединений в твердом состоянии оставалось неопределенным, когда же следует учитывать ионную проводимость, а когда - электронную. На конгрессе электрохимиков в Вене в 1908 г. высказывалась общепринятая точка зрения, что электронная проводимость имеет место только в металлах. Однако появившийся уже ряд экспериментов свидетельствовал о том, что электронная проводимость встречается гораздо шире.

Интерес к исследованиям электропроводности в неметаллических твердых телах в начале XX в. обуславливался двумя причинами, из которых одна была как бы внешней и состояла в необходимости проверки

и уточнения теории металлической проводимости, а другая - внутренней, связанной с потребностью изучения веществ, уже проявивших себя в практике по линии выпрямителей (детекторов) и фотоэлементов. Основным было решение двух проблем: определение природы механизма электропроводности и выяснение закономерностей электропроводности. Решение первой проблемы состояло в ответе на вопрос, какие неметаллические тела проводят электронно и какие - электролитически, что требовало прежде всего установления критериев различия этих двух механизмов проводимости.

Очень важными в этот период оказались эксперименты А.Ф.Иоффа, обнаружившего в 1903 г. первые признаки электронной проводимости в типичных изолирующих кристаллах (таких как каменная соль) и показавшего, таким образом, что электроны, в принципе, могут перемещаться в твердых неметаллах.

Первым критерием для определения механизма проводимости в полупроводниках явилась выполнимость законов Фарадея: "...следует принять электронную проводимость в тех случаях, когда никаких продуктов электролиза обнаружить не удается..." - писал по этому поводу в 1909 г. И.Кенигсбергер^I. Работы К.Бедекера (1907-1909 гг.) по исследованию влияния содержания мода на электропроводность G_{1J} привели к установлению второго важного критерия - наличия или отсутствия эффекта Холла. С этого момента изучение эффекта Холла в полупроводниках стало использоваться не только для определения механизма проводимости, но и как мощный метод исследования этих веществ.

На основе экспериментальных работ по изучению механизма электропроводности и установления главных критериев электронной прово-

^I Koenigsberger J. Über Elektrizitätsleitung. - Zs.f. Elektrochem. 15, 97. (1909).

димости, а также выяснения закономерностей электропроводности, изучения эффекта Холла, термо-эдс, фотопроводности и т.п. в неметаллических кристаллах, стало возможным выделение класса полупроводниковых веществ и их определение в физическом смысле. Главная заслуга в решении этого вопроса принадлежит немецкому электрохимику Я.Кенигсбергеру. Самостоятельную роль в идентификации полупроводников сыграло изучение температурной зависимости электропроводности, в связи с чем Кенигсбергер употребил для них термин "переменные проводники" и дал им такое определение: "...полупроводниками... или переменными проводниками будут называться проводники с металлической проводимостью, сопротивление ... которых очень сильно изменяется с температурой ..."^I. Все вещества, которые Кенигсбергер отнес к полупроводникам (за исключением титана и циркония) и в настоящее время рассматриваются как таковые.

В рамках существовавшей концептуальной системы Кенигсбергер дал классическую модель полупроводника, которая основывалась на представлении о росте количества носителей зарядов с температурой по экспоненциальному закону $n = n_0 e^{-\frac{E}{kT}}$ и в связи с этим предложил формулу температурной зависимости электропроводности $\sigma = A e^{-\frac{E}{kT}}$. Проведенный в диссертации анализ показывает, что эти представления соответствуют современным взглядам и их можно считать первой классической моделью полупроводников.

Привлечение эффекта Холла к исследованиям полупроводников (К.Беденер, 1907 г.) и для раздельного определения концентраций носителей заряда и их подвижности (и.Кенигсбергер, 1914 г.), позволило установить ряд важных закономерностей: 1) - количество но-

^I Koenigsberger J. Das elektrische Verhalten der variablen Leiter... - Jahrb. d. Radioakt. u. Elektronik, 11, 84, (1914).

сителей заряда намного меньше, чем в металлах и изменяется в широких пределах от образца к образцу одного и того же полупроводникового материала; 2) подвижность является свойством кристаллической решетки и для данной решетки она увеличивается с температурой; 3) эффект Холла может иметь как отрицательный, так и положительный знак.

Работы физико-химического направления привели к установлению сильной зависимости проводимости полупроводников от примесей (К. Бедекер, 1907 г., К.Тубандт, 1927 г., К.Хипс, 1927 г., М.Леблан, Х.Заксе, 1929-30 гг.). Экспериментальный материал позволил вынести суждение о влиянии примесей на электропроводность полупроводников: а) их проводимость не является константой вещества; б) проводимость зависит от химических примесей и вызываемых ими нарушений кристаллической решетки. Однако особая роль примесей была переоценена, в результате чего Б.Гудден (1930 г.) пришел к выводу о том, что "... полупроводников в кенигсбергерском смысле не существует..."¹, а вместо них должны быть изоляторы с примесями². Но в свое время гипотеза Гуддена сыграла и определенную положительную роль. Во-первых, она привела К.Вагнера (1933 г.) к установлению "избыточных" и "дефектных" полупроводников, а во-вторых, эта работа обострила сложившуюся противоречивую ситуацию, которая обсуждается в главе третьей.

¹ Gudden B. Über die Elektrizitätsleitung in Halbleitern. - Sitzungsberichte der phys.-med. soz., 62, 289, (1930).

² Исходя из современных представлений видно, что Кенигсбергер и Гудден говорили о разных типах проводимости: первый - о собственной, второй - о примесной. М.Леблан и Х.Заксе в 1931 г. высказали убеждение в существовании собственной электропроводности некоторых соединений, а в 1932 г. В.П.Дузе и Б.В.Курчатов экспериментально обнаружили собственную электропроводность α_2 .

В этот же период сформировались представления о температурных дефектах решетки в полупроводниках (К.Вагнер, В.Шоттки, 1930 г.), которые были аналогичны представлениям, разработанным ранее для ионной проводимости А.Ф.Иоффе (1924 г.) и Я.И.Френкелем (1926 г.).

Одним из самых важных результатов изучения неомического поведения полупроводников на контакте с металлом явилось установление электронной природы и определение теоретической схемы процессов, что стало возможным в результате формирования представлений о наличии особого запирающего слоя на границе контактных поверхностей и его экспериментального обнаружения (О.В.Лосев, В.Шоттки, В.Дейчман, Р.Стермер, Ф.Вайбель). Этим самым было принято правильное направление решения проблемы асимметричной проводимости - изучение электронных процессов в приконтактной области.

Исследование явлений в полупроводниках, возникающих под действием излучения, велось в основном по двум направлениям: выяснение закономерностей и механизма фотопроводимости; объяснение фотогальванического эффекта. Решению первой задачи способствовали исследования на ионных кристаллах: открытие фотопроводимости и измерение эффекта Холла в рентгенизированной каменной соли, выполненное отечественными учеными - А.Ф.Иоффе в 1904 г. и П.И.Лукирским в 1917 г. (последний доказал электронный характер фототока), а также работы Геттингенской школы (Р.Поль, Б.Гудден, 1920-е гг.) по фотопроводимости щелочно-галогидных кристаллов. В итоге была выяснена электронная природа фотопроводимости и разработана методика исследования, в дальнейшем успешно применявшаяся для изучения полупроводников. Главным результатом работ второй линии явилось установление связи между возникновением фото-эдс и наличием выпрямляющего контакта в системе. Исследование оптических свойств позволило установить некоторые количественные показатели наличия фото-

проводимости в полупроводниках.

К наиболее важным приборам, разработанным в данный период, и получившим практическое применение, относятся кремниевые и сурьмяно-свинцовые детекторы, меднозакисные, селеновые и таллофидные фотоэлементы, а также кристаллы О.В.Лосева.

К тридцатым годам XX ст. произошли глубокие изменения в теоретическом развитии науки, появились новые возможности в толковании свойств твердого тела. Важно было выяснить, как это повлияло на углубление знаний о полупроводниках, как происходило формирование основ современной теории полупроводников, чему посвящается третья глава.

Предпосылками формирования основ зонной теории полупроводников явились успехи в смежных областях физики, приведшие к возможности применения квантово-механического подхода к проблеме твердого тела, в целом, и к металлической проводимости, в частности. При этом отмечаются трудности теории Блоха при объяснении непроводимости изоляторов и температурной зависимости сопротивления полупроводников. По классической теории просто постулировалось, что число свободных электронов в полупроводнике быстро изменяется с температурой. При использовании же квантовой механики эта возможность исчезла, т.к. все электроны в идеальной решетке по теории Блоха движутся свободно, и получалось, что все вещества при 0°K должны иметь бесконечную проводимость, т.е. полупроводники и изоляторы не существуют.

Таким образом, в 30-е гг. XX в. четко обозначилась противоречивая ситуация: с одной стороны, полупроводники экспериментально изучались и, благодаря своим специфическим свойствам, получали технические применения, с другой стороны - физическая интерпретация

существования такого класса твердых тел оставалась неясненной. "Если это строгое следствие из теории, то оно может стать очень серьезным возражением против нее и поэтому необходимо рассмотреть, сможем ли мы найти место в теории для изоляторов и полупроводников" - писал в 1931 г. А. Вильсон в работе "Теория электронных полупроводников"¹. Эта работа разрешила вышеуказанную противоречивую ситуацию по идентификации полупроводников в системе твердого тела. С одной стороны, она явилась рубежом, на котором заканчивался классический или дозонный период развития физики полупроводников; с другой стороны - давала единый подход в воззрениях на природу электропроводности всех твердых тел и поэтому созданием теории Вильсона заканчивается, в основных чертах, построение единой зонной теории электропроводности твердых тел. Особое значение этой работы создало необходимость проведения ее историко-физического анализа.

А. Вильсон, проводя дальнейшее развитие теории Блоха, пришел к выводу о зонной структуре энергетического спектра электронов в кристалле. Это было сделано на основе рассмотрения р-состояния изолированного атома и сравнения картины зон в приближении почти свободных

$$E = E_1 + d_1 - 2\beta_1 \left(\cos \frac{2\pi k}{G} + \cos \frac{2\pi \ell}{G} + \cos \frac{2\pi m}{G} \right)$$

и сильно связанных электронов

$$E = E_2 + d_2 + 2\gamma_2 \cos \frac{2\pi k}{G} - 2\beta_2 \left(\cos \frac{2\pi \ell}{G} + \cos \frac{2\pi m}{G} \right)$$

В результате оказалось, что s- и p-полосы кристалла в общем случае разделены запрещенным энергетическим промежутком ΔW ,

$$E_2 + d_2 - 4\beta_2 - 2\gamma_2 > E_1 + d_1 + 6\beta_1 \quad (*)$$

¹ Wilson A. The Theory of Electronic Semi-Conductors.- Proc. Roy. Soc., A133, 458, (1931).

но, в зависимости от типа вещества, могут и перекрываться. Для того, чтобы вещество было полупроводником, "... необходимо, чтобы электроны, которые не образуют замкнутой оболочки, полностью заполняли одну из полос разрешенных энергий и чтобы эти электроны были сильно связаны ... Второе условие для полупроводников является количественным и выражено нерезвенством (ξ)...". Вычисления Вильсона показали, что "... можно найти в теории место для полупроводников... Очень отрадно, что одна и та же модель дает свойства металлических проводников и полупроводников... Теоретически нет причин, по которой полупроводники не могли бы существовать...".

Следовательно, в 1931 г. было сделано теоретическое открытие полупроводников и дано их определение как веществ, отличающихся от металлов и диэлектриков по величине запрещенной зоны. Одним из первых достижений теории Вильсона явилось то, что с помощью применения статистич. ферми-Дирака и теоремы Блоха были рассмотрены равновесные свойства и электропроводность при низких температурах для модели собственного полупроводника и теоретически выведена формула $\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E_g}{kT}}$, которая хорошо соответствовала экспериментальным данным.

В заключении дается общая характеристика всего исследованного периода (конец XIX в. - 1931 г.), которая содержит новые качественные итоги, не являющиеся простой суммой выводов, представленных в конце каждой главы; рассматриваются особенности возникновения физики полупроводников и делается попытка их обоснования.

К основным особенностям относятся следующие.

I. Физика полупроводников как самостоятельная область физики сформировалась к началу 30-х гг. XX в., отпочковавшись от физики твердого тела, в недрах которой она зародилась еще в конце XIX в.

2. Внутренняя логика процесса возникновения физики полупроводников определялась предметом исследования и особенностями его научного познания.

3. Полупроводники как класс веществ со специфическими физическими характеристиками были открыты сначала экспериментально, а затем возможность существования такого класса веществ в природе была доказана теоретически. Это был длительный исторический процесс, который по основным результатам познания можно разбить на такие этапы: введение термина "полупроводник" и его наиболее очевидное сравнительное определение (первый этап, конец XVIII в.); экспериментальное открытие нового класса твердых проводников — электронных полупроводников и его определение в узком физическом смысле (второй этап, 1910-е гг.); теоретическое открытие полупроводников и построения квантово-механической модели собственного полупроводника (третий этап, 1931 г.). Значение этих этапов состоит не только в том, что был открыт новый предмет исследования в науке, но также и в том, что в рассмотренном длительном историческом периоде выкристаллизовалось то содержание понятия "полупроводник", которое сохранилось и по сегодняшний день. Это касается как сравнительного определения полупроводников в широком смысле, так и определения их в узком физическом смысле, поскольку были найдены все те главнейшие свойства, по которым полупроводники отличаются от других классов твердых тел: промежуточная между металлами и изоляторами удельная электропроводность, положительный температурный коэффициент электропроводности, малая концентрация носителей заряда, большие значения термоэлектродвижущей силы по сравнению с металлами, высокая чувствительность к свету, способность резкого изменения свойств под влиянием малых концентраций примесей, неомиче-

свое поведение на контактах.

4. Толчком к теоретическому открытию полупроводников явилось противоречие между теорией и практикой, создавшееся в связи с затруднениями по идентификации полупроводников в системе твердого тела. Свое разрешение это противоречие нашло в работе А. Вильсона, заложивший основы современной зонной модели полупроводников.

Основное количество исследований полупроводниковых веществ в рассматриваемый период было выполнено в наиболее развитых индустриально странах таких как Германия, США, Англия. Однако несмотря на "факт крайне неблагоприятного положения физики в дореволюционной России", отечественными учеными в силу собственной инициативы и научных интересов проводились исследования по физике полупроводников. Такие имена как В.А. Ульянин, Н.А. Гезехус были широко известны специалистам в данной области. И хотя эти исследования в то время носили еще разрозненный, несистематический характер, уже в этих работах, так же как и в последующих исследованиях А.Ф. Коффе, О.В. Дюбува, П.И. Лукириного и других, которые получили мировое признание, можно увидеть истоки того большого вклада и тех важных результатов, которых впоследствии добилась Советская полупроводниковая школа.

Несомненно начало исследований по физике полупроводников в Советском Союзе имеет исторически обусловленную специфику и в то же время связано с мировыми достижениями, обусловилось целесообразным рассмотрением этого вопроса в самостоятельном и работе, что в общем не нарушило хронологической последовательности изложения материала.

■ ■ ■

Приведенные материалы позволяют получить результаты, которые внесли существенные изменения в представления об истории

физики полупроводников.

I. Выявлен большой период зарождения, формирования и выделения учения о полупроводниках в самостоятельную область физики, который по своему основному физическому содержанию может быть назван дозонным периодом развития учения о полупроводниках, а по историческому - периодом возникновения физики полупроводников.

II. Вскрыта внутренняя логика процесса возникновения физики полупроводников, определявшаяся предметом исследования и особенностями его научного познания.

III. Дана общая характеристика исследованного периода и предпринята попытка обоснования закономерного происхождения его особенностей, для чего:

- выяснено, что в рассматриваемый период наиболее интенсивно изучались такие свойства полупроводников как фотоэлектрические, односторонняя проводимость, структурная чувствительность, закономерности электропроводности. Показано, что до XIX в. исследования носили спорадический характер, а затем стали приобретать все более широкий размах и систематический характер, проявив на всем протяжении тесную связь с практикой;

- прослежено формирование теоретических представлений о полупроводниках, а также пути развития каждого из вышеуказанных экспериментальных направлений изучения свойств полупроводниковых веществ, из синтеза которых на основе зонного подхода к объяснению этих свойств стало возможным выделение физики полупроводников в самостоятельную область физики. Возникновение физики полупроводников рассматривается не как одnorазовый акт внезапного ее появления, а как длительный исторический процесс, состоящий из подготовительного этапа и скачка - отпочкования физики полупроводников в самостоя-

ятельный раздел физики, имеющий свой специфический предмет исследования (полупроводники), свои четко выраженные познавательные задачи и большие перспективы в практических приложениях;

- количество публикаций, посвященных изучению характерных явлений в полупроводниках, их практическому применению и теоретическому объяснению, все время росло и к 30-м гг. XX в. составляло огромное число работ. I диссертации рассмотрены наиболее важные отечественные и зарубежные работы, выяснены их роль и место в возникновении физики полупроводников.

IV. Освещена роль отечественных ученых в процессе накопления знаний о полупроводниках и рассмотрено начало систематических исследований в Советском Союзе. Выяснено, что:

- исследования отечественных ученых сыграли важную роль в развитии знаний о полупроводниках и полупроводниковых приборах;

- в Советском Союзе систематические исследования полупроводников начались в самом конце 20-х гг. XX в. и очень быстро, в благоприятных социальных условиях, приобрели всеобъемлющий и плановый характер и организационно оформились в самостоятельное научное направление на Первой конференции по твердым выпрямителям и фотоэлементам (1931 г.).

Советская полупроводниковая школа теперь прочно занимает передовое место в мире и ее успехи по сравнению с периодом, рассмотренным в данной работе, настолько велики, что всестороннее исследование ее становления и развития представляет большой научный и практический интерес и является, на наш взгляд, одной из актуальных задач истории физики XX века.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на II Всесоюзной конференции по истории физико-математических наук (Тамбов, май 1974 г.), XUI конференции аспирантов и младших научных сотрудников Института истории естествознания и техники АН СССР (Москва, февраль 1974 г.), заседаниях республиканской секции истории физики Украинского отделения Советского национального объединения историков естествознания и техники (Киев, апрель 1972 г., март 1973 г., сентябрь 1973 г., май 1974 г., декабрь 1974 г.), научных конференциях кафедр Киевского государственного педагогического института им. А.М.Горького (март 1973 г., февраль 1974 г.).

По теме диссертации опубликованы следующие работы.

1. К истории возникновения физики полупроводников. - Вопросы истории физико-математических наук. Тамбов, 1974, с.156-157.
2. Открытие и исследование явления фотопроводимости в полупроводниковых материалах. - Нариси з історії природознавства і техніки. К., "Наукова думка", 1974, в.19, с.65-69 (на укр.яз.).
3. К вопросу об истории физики твердого тела. - Методика викладання фізики. К., "Радянська школа", 1973, в.8, с.172-177 (на укр.яз.). (Совместно с Г.Г.Кордуном).
4. Формирование представлений о возникновении физики полупроводников. - Радянська школа, в. 6, 1974, с.53-55 (на укр.яз.).
5. Возникновение современной теории выпрямляющего действия полупроводников. - Методика викладання фізики. К., "Радянська школа", 1974, в.9, с.138-142 (на укр.яз.).
6. Основные этапы процесса определения класса полупроводниковых веществ. - Труды XUI конференции аспирантов и младших научных сотрудников ИГиЭТ АН СССР. М., ВИНИТИ. 1975, с.18-21 (в печати).