

ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ДРУЖБЫ НАРОДОВ
АКАДЕМИИ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Напеча-та-на рукописи
УДК 621.315.592.

ГОРОДИНИЧИЙ Олег Петрович

ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЗОННОЙ СТРУКТУРЫ, ПРИМЕСЕЙ И
ДЕФЕКТОВ НА ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Специальность 01.04.10 — физика полупроводников
и диэлектриков

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

К и е в
1990

Работа выполнена в Институте полупроводников
Академии наук Украинской ССР

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук профессор
Иванов-Омский В.И.

доктор физико-математических наук
Юнович А.Э.

доктор физико-математических наук профессор
Сальков Е.А.

Ведущее учреждение —

Институт физики металлов Уральского отделения
Академии наук СССР

Защита состоится 28 декабря 1990 г. в ч. м. на
заседании Специализированного совета Д 016.25.01 при
Институте полупроводников АН УССР по адресу 252028,
Киев, Проспект науки, 45.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Института полупроводников АН УССР.

Автореферат разослан " " 1990 г.

Ученый секретарь Специализированного совета

В.А. Романов

Диссертационная работа посвящена комплексному изучению некоторых явлений переноса, связанных, в основном, с проводимостью σ актуальных полупроводниковых материалов, которая существенным образом зависит от их совершенства, энергетической структуры и легирования. Энергетический спектр и примесные состояния определяют характер рассеяния носителей заряда и их количество, а существующие в образцах несовершенства могут внести заметные искажения в измеряемые эффекты.

Исследование проводимости полупроводниковых кристаллов, ее особенностей, зависимостей от внешних воздействий (температур, полей, деформаций и др.), определение параметров, позволяющих описать эти особенности и зависимости, разработка методов их измерений и т.д. — является достаточно сложной научной проблемой, актуальность которой определяется 2-мя факторами. Во-первых, решение этих вопросов необходимо для понимания физики процессов, происходящих в полупроводниках и для разработки новых приборов на их основе; во-вторых, избранные для исследования полупроводниковые материалы (Si, Ge, GaP, InSb , CdHgTe , MnHgTe) относятся, как уже говорилось, к наиболее часто используемым в технике.

По-существу, исследование проводимости — это исследование закономерностей явлений переноса зарядов в образцах, определяемых их структурой и внешними условиями. Т.е. $\sigma = e n \mu = e n \tau / m^*$, где e — заряд, n — концентрация носителей, μ и m^* — их подвижность и эффективная масса, τ — время релаксации, τ при постоянстве n и m^* изменение значений σ связано только с изменением τ . А эта величина полностью определяется законами рассеяния носителей заряда в конкретном полупроводнике и определенных условиях. Поэтому задача изучения проводимости сводится в конце концов к задаче определения вкладов существующих в полупроводниках механизмов рассеяния и их параметров.

Обычно она решается с помощью сопоставления расчетных и экспериментальных зависимостей кинетических и оптических коэффициентов, непосредственно связанных с условиями прохождения носителей тока по образцу. В случае низких энергий носителей это могут быть полевые, температурные, деформационные и др. зависимости проводимости, подвижности, магнитосопротивления и т.д. В случае носителей имеющих сравнительно высокие энергии, весьма удобным методом является исследование частотных зависимостей коэффициента поглощения света свободными носителями (ПСОН). При этом энергия носителей повышается на величину поглощаемого кванта света $\hbar\omega$, а само по-

глощение происходит лишь при наличии различных кристаллических несовершенств (в том числе дефектов, примесей, фононов и т.д.).

Согласование расчета с экспериментом требует подбора как соответствующей модели энергетического спектра, так и определения вкладов возможных при данных условиях механизмов рассеяния. И те и другие описываются рядом констант и параметров, которые необходимо определить для решения поставленной задачи. Трудности ее решения значительно возрастают в несовершенных и многодолинных кристаллах. В I-ом случае наличие несовершенств может существенным образом изменить измеряемые зависимости, и необходимо проведение специальных исследований, разделяющих так называемые "физические" и "нефизические" эффекты. Во 2-ом, в таких кристаллах как Si, Ge, GaP свободные электроны равномерно распределены по эквивалентным минимумам зоны проводимости, что приводит к интегральной изотропности кинетических и оптических свойств этих полупроводников и появлению особенностей в рассеянии носителей. И здесь также необходимы специальные методы исследований, позволяющие установить анизотропный характер изоэнергетических поверхностей электронов и самого рассеяния.

Для полноты картины в данной работе исследования были проведены на кристаллах с различным строением зоны проводимости: однодолинных InSb , CdHgTe и MnHgTe , трехдолинном (в области $T > 60 \text{ K}$) GaP, четырехдолинном Ge и шестидолинном Si. Отдельно исследовалось рассеяние носителей с низкими и сравнительно высокими энергиями. Т.к. мелкие доноры и акцепторы не только определяют концентрацию носителей зарядов, но и являются при определенных температурах их основными рассеивателями, в работе проведены специальные исследования, посвященные выяснению неизвестных к тому времени свойств и параметров примесных состояний. Представляло интерес также изучение особенностей некоторых явлений, связанных с валентными зонами этих же кристаллов, которые, не смотря на большие различия в структуре зон проводимости, были качественно подобны.

Цель настоящей работы состояла в установлении закономерностей и особенностей проводимости и рассеяния носителей тока в полупроводниковых кристаллах, отличающихся друг от друга не только видом энергетического спектра, легированием и совершенством, но и степенью изученности. Сравнительно недавно изготавливаемые промышленными методами GaP, CdHgTe и получаемый пока лишь в научных лабораториях MnHgTe требовали всесторонних исследований.

чинающихся выяснением характера влияния на проводимость имеющих-ся в образцах несовершенств и оканчивающихся определением величин ряда важнейших параметров спектра энергий и механизмов рассеяния. Более совершенные и давно изучаемые кристаллы кремния и германия требовали дальнейшего углубления знаний о механизмах рассеяния лишь в некоторых, мало исследованных областях (например, для случая носителей с высокими энергиями).

Для выполнения поставленной цели были решены следующие задачи:

1). Исследованы экспериментальные и расчетные зависимости подвижности и концентрации электронов от температуры в GaP (объемных кристаллах и эпитаксиальных слоях) в обычных и одноосно деформированных образцах.

2). Изучены закономерности поглощения света свободными носителями в многодолинных кристаллах Si, Ge, GaP (недеформированных и одноосно сдвинутых).

3). Теоретически и экспериментально исследовано ПССН в кристаллах InSb , CdHgTe и MnHgTe в собственной области проводимости, определены вклады различных механизмов рассеяния в них.

4). Изучено влияние одноосных упругих деформаций на мелкие донорные состояния в кремнии и фосфиде галлия, определены параметры, характеризующие эти состояния.

5). Исследовано влияние особенностей валентных зон Si, Ge, InSb , CdHgTe и MnHgTe (прежде всего их анизотропии и вырождения) на гальваномагнитные и оптические явления, наблюдаемые в этих полупроводниках.

6). Изучено влияние кристаллических несовершенств и неоднородного распределения проводимости по образцу на гальваномагнитные явления, измеряемые в квантовых магнитных полях в CdHgTe . Определены условия проявления глубоких физических эффектов, связанных с квантованием зоны проводимости, магнитным выхождением носителей, переходами металл-неметалл и др.

7). Изучены особенности проводимости и магнитосопротивления, измеряемые в магнитосмешанных полупроводниках, типа MnHgTe , связанные с обменным взаимодействием электронов с магнитным ионом Mn^{2+} .

Научная новизна данной работы заключается в том, что в ней независимыми методами впервые проведено комплексное изучение особенностей переноса носителей целого ряда актуальных полупроводниковых соединений в тех областях и условиях, в которых эти особенности либо вообще не изучались, либо сведения о них были совершенно недостаточными и даже противоречивыми. Впервые получен

цел. А ряд параметров, определяющих вид зонного спектра и вклады различных механизмов рассеяния, существующих в этих кристаллах. Показано несомненное влияние различных несовершенств, изменяющих проводимость в образцах, на кинетические эффекты. Все выводы, следующие из экспериментальных измерений, подкреплены подтверждающими их расчетами.

Основные положения, выносимые на защиту, основаны на ряде конкретных результатов и непосредственно вытекают из научной новизны сделанных заключений. Они состоят в следующем:

1.) Из проведенных температурных и деформационных исследований зависимостей удельного сопротивления и коэффициента Холла объемных кристаллов и эпитаксиальных слоев фосфида галлия разной степени чистоты и совершенства сделано заключение о необходимости учета междолинного рассеяния электронов и найдена температурная область его проявления. Впервые определен ряд констант и параметров, что позволило рассчитать подвижность электронов в этом материале в широкой области концентраций и температур ($10^{16} \text{ N}_i < 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $77 < T < 500 \text{ K}$): в частности, величину продольной массы электронов m_n^* , константы деформационного потенциала Ξ_n и Ξ_a , константу связи электрона с междолинным фоном D_f , значения и закономерности изменения параметра анизотропии рассеяния $K = \tau_a/\tau_n$.

2). Была разработана специальная методика определения анизотропии рассеяния, основанная на измерении анизотропии электропроводности, возникающей при деформации образцов GaP под углом к направлению $[100]$, и позволяющая следить за изменением K даже при изменении вкладов различных механизмов рассеяния.

3). Были изучены особенности зонной структуры и специфики рассеяния носителей тока при поглощении ИК излучения в одноосно деформированных многодолинных полупроводниках на основе разработанной нами экспериментальной методики и расчетов, проведенных в Институте физики АН УССР. Проведенные нами экспериментальные и теоретические исследования ПССН показали, что в многодолинных полупроводниках вклады различных механизмов в рассеяние носителей с малыми и большими энергиями - различны.

4). Впервые было показано, что в одноосно сжатых многодолинных кристаллах междолинное рассеяние, изотропное в обычном случае, становится резко анизотропным и может давать большой вклад в рассеивание электронов даже при сосредоточении их всех в одной опустившейся под действием сжатия долине.

5). Был обнаружен и описан новый своеобразный вид рассеяния электронов в GaP при ПССН, который появляется из-за энергетичес-

кой близости состояний X_1 и X_3 в зоне проводимости и большой вероятности прямых переходов $X_1 \rightarrow X_3$. Показано, что эти переходы могут существенно изменить вид зависимостей коэффициента ИК поглощения α от энергии $\hbar\omega$ кванта излучения.

6). Была разработана новая методика исследования параметров мелких примесных состояний многодолинных полупроводников, основанная на измерениях пьезохолл-эффекта в образцах, в которых такие состояния лишь частично ионизованы. С ее помощью впервые были определены константы примесного деформационного потенциала Ξ_n^* для P, As и Sb в кремнии, S и Sn в фосфиде галлия.

7). Было проведено изучение специфического влияния легких дырок на некоторые физические эффекты в кристаллах InSb , Ge , Si и CdHgTe . Показано, что легкие дырки, существенным образом участвующие в формировании магнитопольевых зависимостей коэффициента Холла и проводимости, температурной зависимости подвижности и структуры акцепторных состояний, слабо проявляют себя (вопреки выводам существующих теорий) в возникающем из-за анизотропии валентных зон нечетном магнитосопротивлении.

8). Были проведены исследования магнитопольевых эффектов, измеряемых в квантующих магнитных полях в кристаллах CdHgTe различной степени чистоты и совершенства. Сделан вывод о том, что особенности магнитопольевых и температурных зависимостей поперечного магнитосопротивления ρ_H и коэффициента Холла R , обычно объясняемые проявлением глубоких физических эффектов в квантующих магнитных полях, часто являются на самом деле следствием имеющихся в этих кристаллах несовершенств, неоднородностей и неконтролируемых дополнительных проводимостей по образцу, что хорошо подтверждается выполненными нами расчетами.

9). Было показано расчетом и подтверждено экспериментом, что существующие в кристаллах CdHgTe херринговские неоднородности, практически не влияют на магнитопольевые зависимости продольного магнитосопротивления ρ_{xx} .

10). Было проведено детальное исследование осцилляций Шубникова-де-Гааза в магнитосмешанных кристаллах MnHgTe различного состава. Впервые показано экспериментально и подтверждено необходимыми расчетами, что в отличие от всех других узкозонных кристаллов в образцах $\text{Mn}_{0,11}\text{Hg}_{0,89}\text{Te}$ значение g -фактора близко к нулю, что заметным образом может изменить скорость увеличения шели между s - и v -зонами в квантующих магнитных полях.

В работе рассмотрен широкий круг вопросов, связанных с изучением особенностей проводимости и рассеяния носителей в ряде актуальных полупроводниковых соединений, имеющих различную энерге-

тическую структуру, разную степень легирования и совершенства. Научная и практическая ценность этих исследований состоит в следующем: 1). Определены вклады различных механизмов рассеяния носителей, имеющих сравнительно низкие энергии ($E \approx kT$) для широкого интервала температур и концентраций примесей в п-GaP, для чего потребовалось определение целого ряда констант и параметров этого материала, необходимых для расчетов и других физических эффектов.

2). Совместно с теоретиками Института физики АН УССР разработана методика эксперимента и расчета, позволившая изучить специфику рассеяния носителей тока с высокими энергиями ($E \gg kT$) в одноосно и упруго деформированных многодолинных кристаллах Si, Ge, GaP. Это дало возможность, во-первых, определить и уточнить многие неизвестные или малоизвестные параметры, необходимые для расчетов различных физических явлений; во-вторых, наблюдать и описать новые или сильно измененные механизмы рассеяния, такие например, как рассеяние электронов в GaP из зоны X_1 в вышележащую зону X_3 , или рассеяние, связанное с неупругим взаимодействием электронов с фононами в сильно легированных полупроводниках, и др.

3). Были разработаны также новые методики определения параметра анизотропии рассеяния и констант примесных потенциалов Σ_i^* для многодолинных полупроводников. С их помощью изучено изменение вкладов различных механизмов рассеяния при одноосной упругой деформации кристаллов Si, Ge и GaP, а также определены значения Σ_i^* для примесей P, As, Sb в кремнии и S, Sn в фосфиде галлия.

4). Полученные данные об особенностях строения мелких донорных состояний в кремнии позволили дать некоторые рекомендации по усовершенствованию процесса легирования, проводимого в промышленных условиях. Это привело к повышению надежности приборов, изготавливаемых на основе этого материала, и дало экономический эффект в размере ~ 200 тыс. руб.

5). Проведенные в работе исследования влияния несовершенств и неоднородностей, существующих в обычных кристаллах CdHgTe, позволили изменить взгляды на наблюдаемые в этом материале особенности некоторых кинетических эффектов в квантовых магнитных полях и определить условия, при которых эти особенности действительно связаны с глубокими квантовыми эффектами.

6). Исследования оптических и гальваномагнитных свойств магнитосмешанных кристаллов MnHgTe показали возможность получения образцов с малой эффективной массой электронов ($m_e^* \leq 0,01 m_0$) и практически нулевым β -фактором, что открывает новые возможности

в создании перестраиваемых магнитным полем фотоприемников.

Апробация работы и публикации.

Основные материалы работы докладывались и обсуждались на: Всесоюзной конференции по физике плазмы (Киев, 1970), Республиканской конференции "Структура и гальваномагнитные явления в пленках" (Львов, 1973), Всесоюзном семинаре по физике, материаловедению и техническом применении кремния, германия и структур на их основе (Запорожье, 1978), Всесоюзной конференции "Техника получения и электрические свойства соединений A_3B_5 " (Ленинград, 1978), Республиканской конференции "Спектроскопия молекул и кристаллов" (Черновцы, 1979), Всесоюзной конференции по физико-химическим основам легирования полупроводниковых материалов (Москва, 1979), Республиканском семинаре "Электроника дефектов в кремнии" (Киев, 1982), 7-ой Международной школе по дефектам в кристаллах (Щирк, Польша, 1985), Всесоюзном совещании по физике узкозонных полупроводников (Москва, 1985), Всесоюзной школе по физике полупроводников (Свердловск, 1986), Всесоюзной конференции по физике полупроводников (Кишинев, 1989) и др.

Основные результаты диссертации опубликованы в 45 работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения. Она содержит 310 страниц машинописного текста, 80 рисунков, 19 таблиц и список литературы из 290 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертации приводятся краткие сведения о зонной структуре полупроводниковых кристаллов Si, Ge, GaP, InSb, CdHgTe и MnHgTe и ее изменениях, связанных с их одноосной упругой деформацией. Обращается внимание на отличия зон проводимостей перечисленных полупроводников и подобие их валентных зон.

Несмотря на имеющуюся в некоторых материалах анизотропию энергетических эллипсоидов, все эти кристаллы в обычных условиях интегрально изотропны (что проявляется в различных физических эффектах), из-за равномерного распределения свободных электронов по всем эквивалентным экстремумам и их взаимной компенсации. Для наблюдения анизотропии отдельно взятой долины удобно использовать методику одноосной упругой деформации, которая нарушает эквивалентность долин и, в зависимости от направления ее приложения, поднимает (или опускает) некоторые из них по шкале энергий. Можно выбрать такие направления сжатия, что опускаться будет только один эллипсоид в Ge или GaP (после 50 K) или два, лежащих на одной оси,

в Si. При достаточной величине сжатия опускание будет столь значительным, что все свободные электроны переместятся в опустившуюся долину, а кристалл станет квазианизотропным. В этом случае в экспериментах четко проявятся анизотропные свойства его изоэнергетических эллипсоидов, полностью или частично исчезнут междолинные перебои и т.д.

Во второй главе приводятся результаты характера рассеяния электронов в объемных кристаллах и эпитаксиальных слоях фосфида галлия. Этому предшествует обзор данных, имеющихся в научной литературе и посвященных этому вопросу. Хотя ко времени постановки наших исследований рассеяние электронов в GaP интенсивно изучалось, окончательной, полной и непротиворечивой картины создано не было. Этому мешало также и то, что в то время отсутствовали или были недостаточно надежно определены многие параметры и константы, необходимые для расчетов вкладов различных механизмов рассеяния, например такие, как значение продольной эффективной массы m_n^* , величины констант деформационного потенциала Ξ_u , Ξ_d , Ξ_v , параметры анизотропии рассеяния электронов при различных температурах, константы связи электронов с междолинными фононами. В последнем случае вообще не было известно в каких условиях необходим учет междолинного рассеяния, т.к. обнаружить его обычным способом (по температурной зависимости подвижности) в GaP затруднительно. Дело в том, что в соединениях A_3B_5 связь между атомами имеет большую долю ионности, а это приводит к большому вкладу полярного оптического рассеяния, которое дает такую же температурную зависимость подвижности, как и междолинное.

Стоящая перед нами задача и заключалась в том, чтобы решить эти трудности, определить необходимые константы и вклады отдельных механизмов, рассчитать значения подвижности, хорошо согласующиеся с экспериментом. С помощью одноосных деформаций в направлении $\vec{P} \parallel [100]$ ($\vec{P}$ - вектор напряжения), кристаллы GaP превращались в квазиднодолинные ([100]-долина опускалась по оси энергий значительно ниже других эквивалентных долин и в нее перетекали все свободные электроны). Измерение температурных и деформационных зависимостей продольного (относительно направления давления) сопротивления, коэффициента Холла и подвижности и сравнение их с рассчитанными позволили определить температурную область существования междолинного β -рассеяния (выше температур 120-140 K), продольную эффективную массу электронов, константы обобщенного потенциала деформации C_1 и связи электрона с междолинным фоном D_1 , коэффициент изменения междолинного энергетического зазора при

$P \parallel [100]$ и др.

Для уточнения полученных констант и полного согласования расчета с экспериментом необходимы были образцы с большей степенью чистоты и совершенства, чем существующие в настоящее время объемные кристаллы p-GaP. Образцы такого качества были получены лишь на эпитаксиальных слоях, выращенных из расплава, содержащего атомы редкоземельных элементов. Кроме того, из исследования ИК поглощения одноосно деформированными образцами GaP были определены константы Ξ_d и Ξ_u' , а из исследований пьезосопротивления на сравнительно чистых кристаллах - Ξ_u , необходимые для точного учета анизотропии и вкладов акустического и междолинного механизмов рассеяния. Проведенный нами в этом случае расчет значений подвижности в широком диапазоне температур 77 ÷ 400 K дал весьма хорошее совпадение с экспериментом, что может служить доказательством надежного и правильного определения перечисленных выше констант.

В третьей главе описана разработанная нами методика, позволяющая проводить измерения поглощения ИК света в одноосно деформированных полупроводниковых кристаллах. Эта методика удовлетворяла двум необходимым для таких исследований требованиям: образцы должны быть достаточно широкими (2,5 - 3 мм), а достигаемые напряжения деформаций должны быть достаточными для перехода подавляющего большинства свободных носителей в одну опустившуюся долину. Кроме этого методика позволяла проводить измерения поглощения ИК излучения, поляризованного вдоль и поперек оси опустившегося под действием сжатия эллипсоида.

В этой главе приведены также основные выводы квантовой теории поглощения света свободными носителями в одноосно деформированных многодолинных кристаллах, развитой теоретиками ИФ АН УССР Демиденко Э.А. и Томчуком П.М. В общем виде спектральная зависимость коэффициента ПСН для поляризованного излучения может быть записана следующим образом:

$$\alpha_0(\omega) = B \frac{2\beta^{-1}}{3\beta} A^2(\omega) L_0(\beta),$$

$$\alpha_{\parallel}(\omega) = B\beta^{-1} A^2(\omega) L_{\parallel}(\beta),$$

$$\alpha_{\perp}(\omega) = B A^2(\omega) L_{\perp}(\beta),$$

$$B = \frac{4\sqrt{2}m_n^* e^2}{3\pi\epsilon\hbar^2} \cdot \frac{N_{\text{эл}}}{(\hbar\omega)^{1/2}}, \quad \beta = \frac{m_n^*}{m_1^*},$$

в Si. При достаточной величине сжатия опускание будет столь значительным, что все свободные электроны переместятся в опустившуюся долину, а кристалл станет квазианизотропным. В этом случае в экспериментах четко проявятся анизотропные свойства его изоэнергетических эллипсоидов, полностью или частично исчезнут междолинные перебои и т.д.

Во второй главе приводятся результаты характера рассеяния электронов в объемных кристаллах и эпитаксиальных слоях фосфида галлия. Этому предшествует обзор данных, имеющихся в научной литературе и посвященных этому вопросу. Хотя ко времени постановки наших исследований рассеяние электронов в GaP интенсивно изучалось, окончательной, полной и непротиворечивой картины создано не было. Этому мешало также и то, что в то время отсутствовали или были недостаточно надежно определены многие параметры и константы, необходимые для расчетов вкладов различных механизмов рассеяния, например такие, как значение продольной эффективной массы m_n^* , величины констант деформационного потенциала Ξ_u , Ξ_d , Ξ_v , параметры анизотропии рассеяния электронов при различных температурах, константы связи электронов с междолинными фононами. В последнем случае вообще не было известно в каких условиях необходим учет междолинного рассеяния, т.к. обнаружить его обычным способом (по температурной зависимости подвижности) в GaP затруднительно. Дело в том, что в соединениях A_3B_5 связь между атомами имеет большую долю ионности, а это приводит к большому вкладу полярного оптического рассеяния, которое дает такую же температурную зависимость подвижности, как и междолинное.

Стоящая перед нами задача и заключалась в том, чтобы решить эти трудности, определить необходимые константы и вклады отдельных механизмов, рассчитать значения подвижности, хорошо согласующиеся с экспериментом. С помощью одноосных деформаций в направлении $\vec{P} \parallel [100]$ ($\vec{P}$ - вектор напряжения), кристаллы GaP превращались в квазиоднодолинные ([100]-долина опускалась по оси энергий значительно ниже других эквивалентных долин и в нее перетекали все свободные электроны). Измерение температурных и деформационных зависимостей продольного (относительно направления давления) сопротивления, коэффициента Холла и подвижности и сравнение их с рассчитанными позволили определить температурную область существования междолинного γ -рассеяния (выше температур 120-140 К), продольную эффективную массу электронов, константы обобщенного потенциала деформации C_1 и связи электрона с междолинным фоном D_1 , коэффициент изменения междолинного энергетического зазора при

$P \parallel [100]$ и др.

Для уточнения полученных констант и полного согласования расчета с экспериментом необходимы были образцы с большей степенью чистоты и совершенства, чем существующие в настоящее время объемные кристаллы n-GaP. Образцы такого качества были получены лишь на эпитаксиальных слоях, выращенных из расплава, содержащего атомы редкоземельных элементов. Кроме того, из исследования ИК поглощения одноосно деформированными образцами GaP были определены константы Ξ_d и Ξ_u , а из исследований пьезосопротивления на сравнительно чистых кристаллах - Ξ_v , необходимые для точного учета анизотропии и вкладов акустического и междолинного механизмов рассеяния. Проведенный нами в этом случае расчет значений подвижности в широком диапазоне температур 77 + 400 К дал весьма хорошее совпадение с экспериментом, что может служить доказательством надежного и правильного определения перечисленных выше констант.

В третьей главе описана разработанная нами методика, позволяющая проводить измерения поглощения ИК света в одноосно деформированных полупроводниковых кристаллах. Эта методика удовлетворяла двум необходимым для таких исследований требованиям: образцы должны быть достаточно широкими (2,5 - 3 мм), а достигаемые напряжения деформаций должны быть достаточными для перехода подавляющего большинства свободных носителей в одну опустившуюся долину. Кроме этого методика позволяла проводить измерения поглощения ИК излучения, поляризованного вдоль и поперек оси опустившегося под действием сжатия эллипсоида.

В этой главе приведены также основные выводы квантовой теории поглощения света свободными носителями в одноосно деформированных многодолинных кристаллах, развитой теоретиками ИФ АН УССР Демиденко З.А. и Томчуком П.М. В общем виде спектральная зависимость коэффициента ПССН для поляризованного излучения может быть записана следующим образом:

$$\alpha_0(\omega) = B \frac{2\beta^2}{3\beta} A^2(\omega) L_0(\beta),$$

$$\alpha_{\parallel}(\omega) = B\beta^{-1} A^2(\omega) L_{\parallel}(\beta),$$

$$\alpha_{\perp}(\omega) = B A^2(\omega) L_{\perp}(\beta),$$

$$B = \frac{4\sqrt{2}m_n^* e^2}{3\pi c \hbar^2} \cdot \frac{N_{\Delta 1}}{(\hbar\omega)^{1/2}}, \quad \beta = \frac{m_n^*}{m_1^*},$$

где N_{31} - концентрация носителей, n_0 - коэффициент преломления, $A^2(\omega)$ - интенсивность рассеяния, $L_{0,n,1}$ - фактор анизотропии рассеяния (A и $L_{0,n,1}$ - различны для различных механизмов рассеяния).

Как известно, принципиальным отличием квантовой теории ИК поглощения от классической является вывод о том, что зависимость α от ω (ω - частота волны падающего света) определяется существующими в данном кристалле механизмами рассеяния и имеет хорошо выраженный степенной характер: $\alpha \sim \omega^{-Z}$. При этом для каждого из классических механизмов показатель степени имеет свое значение, например: $7/2$, $5/2$ и $3/2$ для кулоновского, оптического полярного и акустического, соответственно. Именно поэтому измерения зависимостей $\alpha(\omega)$ позволяют делать выводы об актуальности того или иного механизма рассеяния, а эксперименты с квазиоднодолинными образцами, проведенные в поляризованном свете, хорошо показывают величину анизотропии как энергетических эллипсоидов, так и рассеяния в целом. Сопоставление расчетов с проведенными экспериментами дает возможность определить параметры, позволяющие найти вклады этих механизмов.

Совмещение методики одноосной упругой деформации с измерениями поляризованного ИК поглощения значительно расширило возможности последних. Поэтому, в частности, нам и удалось впервые наблюдать в какой-то мере новые механизмы рассеяния электронов с высокими энергиями в GaP и Ge, о чем будет сказано дальше.

В четвертой главе приводятся результаты исследований ИК ИССН в многодолинных кристаллах Ge, Si и GaP, подвергнутых одноосной упругой деформации. Использование в экспериментах поляризованного ИК излучения позволило выявить особую роль междолинных перебросов в образцах p-Ge. Если при рассеянии электронов с низкими энергиями в Ge этот вид рассеяния вплоть до 300 К практически не проявляется, то в ИССН он вносит большой и резко анизотропный вклад до тех пор, пока $\hbar\omega \pm \hbar\omega_4 \approx \Delta_p$ (ω_4 - собственная частота междолинного β -фонона, Δ_p - энергетический зазор между эквивалентными экстремумами, появляющийся под действием одноосного упругого напряжения $P_{II}[III]$). С помощью использованной нами методики было показано, что предполагаемая в других работах роль неполярной оптики в рассеянии электронов в Ge сильно преувеличена, т.к. это рассеяние - изотропно и не может объяснить наблюдаемое на опыте различие между $\alpha_n(\omega)$ и $\alpha_1(\omega)$.

Такие же исследования были проведены на кристаллах кремния. Было установлено, что в недеформированных образцах как акустическое, так и междолинное рассеяние имеет слабую анизотропию. В де-

формированных до $P_{II}[100] = 10^4$ кгс/см² образцах наклон зависимости $d_n(\omega)$ и $\alpha_1(\omega)$ был заметно различим, а их отношение существенно меньше β . Обяснить наблюдаемые особенности этих зависимостей оказалось возможным лишь в предположении существенной анизотропии междолинного β -рассеяния.

К моменту постановки этих исследований изучение рассеяния носителей с высокими энергиями в p-GaP только начиналось. Единственное, что можно было считать действительно установленным: - измеряемая в обычных кристаллах p-GaP зависимость $\alpha \sim \omega^{-Z}$ с $Z = 1,4 \div 1,8$ очень плохо коррелировала с теми механизмами, которые считались актуальными в этом материале для носителей с малыми энергиями. Было известно также, что измерения при 300 К на этих кристаллах спектры $\alpha(\omega)$ могут быть заметно искажены фотоионизацией доноров.

Проведенные нами исследования поглощения ИК излучения одноосно сдвинутыми кристаллами p-GaP показали: 1) для $P_{II}[100] = (6 \div 8) \cdot 10^3$ кгс/см² и $T \approx 300$ К все доноры оказываются ионизованными (под действием такой деформации донорные уровни приближаются к зоне проводимости, что способствует дополнительной их ионизации) и зависимости $\alpha(\omega)$ оказываются свободными от искажений, связанных с фотоионизацией; 2) отличия между $\alpha_1(\omega)$ и $\alpha_n(\omega)$ еще большие, чем в Ge и Si ($\alpha_1(\omega) \sim \omega^{-1,8}$, $\alpha_n(\omega) \sim \omega^{-1,1}$); 3) так же как в этих двух полупроводниках, в GaP отношение $d_1(\omega)/\alpha_n(\omega) < \beta$; 4) значение показателя степени для $\alpha_n(\omega)$ - значительно меньше минимально возможного значения $Z = 1,5$, полученного для классических механизмов.

При рассмотрении ИССН в Ge и Si учитывались только внутризонные промежуточные состояния, участвовавшие в поглощении света. В GaP представление X-зоны проводимости распадается на два состояния X_1 и X_3 , расположенные друг над другом на сравнительно не большом энергетическом расстоянии $E_{1,3} = 0,32$ эВ. В этом случае возможны прямые оптические переходы в вышележащую зону Δ_2' и необходим учет промежуточных состояний в этой зоне. Такой тип переходов мы называли β -рассеянием, т.к. вклад их в $\alpha(\omega)$ может быть весьма заметным.

Именно учет этого вклада позволил объяснить и описать последние три особенности в ИССН p-GaP, о которых говорилось выше. Нам было показано, что β -рассеяние мало влияет на $d_1(\omega)$, заметно изменяя $\alpha_n(\omega)$, а его параметр анизотропии $L_1/L_n \ll 1$, что принципиально отличает его от классических механизмов рассеяния. Этим и объясняется аномально слабая зависимость $\alpha_n(\omega)$.

В случае больших одноосных деформаций, при значениях $\hbar\omega < \Delta_F, E_{1,2}$ для коэффициента α_1 оказалось возможным пренебречь как виртуальными (в минимум X_3), так и междолинными (в эквивалентные долины X_1) переходами и связать его величину только с акустическими и оптическими фононами. Так как вклад последних легко считается, то это позволило впервые определить для акустических фононов значение константы деформационного потенциала $\Xi_d = -15,6$ эВ.

Сдвигивая кристаллы п-GaP в направлении [111], включающем сдвиговую компоненту, мы определили константу деформационного потенциала Ξ_u' для зон Δ_1 и Δ_2' по сдвигу максимума полосы поглощения при переходах $X_1 \rightarrow X_3$: $\Xi_u' = 11$ эВ.

Проведенные нами на сильнолегированных кристаллах п-Ge ($N_d \approx 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) измерения ИК поглощения на обычных и деформированных образцах привели к зависимостям $\alpha \sim \omega^{-2}$, не описываемым с точки зрения обычных представлений о рассеянии носителей: увеличение концентрации примесей с $2 \cdot 10^{17}$ до $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ не приводило к увеличению наклона $\alpha_0(\omega)$, что свидетельствовало бы об увеличении вклада примесного рассеяния. К тому же зависимость $\alpha_n(\omega)$ описывалась выражением $\alpha_n \sim \omega^{-2}$ с $\gamma = 1,35$ - также меньшим, чем возможно для любого известного классического механизма рассеяния. Эти особенности привели нас к выводу о том, что в сильнолегированных кристаллах наряду с обычным упругим электрон-фононным взаимодействием появляется неупругое, при котором импульс частично передается примесным атомам. Проведенный нами расчет такого типа рассеяния дал зависимость $\alpha \sim \omega^{-2}$ с $\gamma = 1/2$ и фактор анизотропии $L_{\perp}/L_{\parallel} = 0,4$. Появление такого типа рассеяния компенсирует увеличение вклада обычного кулоновского (при увеличении концентрации доноров) для которого $\gamma = 7/2$, и объясняет слабую спектральную зависимость коэффициента $\alpha_n(\omega)$.

В пятой главе представлены результаты исследований структуры мелких донорных состояний в Si и GaP и описана методика, с помощью которой были определены примесные потенциалы деформации для ряда наиболее часто используемых в технологии донорных примесей. Как уже говорилось, уровень легирования и однородность распределения примесей по образцу самым существенным образом влияют на проводимость кристалла и измеряемые в нем эффекты. Это влияние может только увеличиться при появлении в объеме образца всевозможных напряжений, созданных специально или возникающих в нем случайным образом (например, из-за разных коэффициентов термического расширения подложки и самого кристалла). Поэтому исследование этого влияния (в том числе одноосных упругих напряжений) на

структуру мелких донорных состояний и определение их параметров имеет как научный, так и практический смысл.

Известно, что на структуру и положение донорных состояний многодолинных полупроводников оказывает большое влияние взаимодействие эквивалентных долин между собой (долино-орбитальное взаимодействие); благодаря ему шестикратно вырожденные донорные состояния в Si расщепляются на синглет, триплет и дуплет, а в GaP эти состояния (вырожденные при $T > 50$ К трехкратно для доноров $V_{\perp}$ группы) расщепляются на синглет и дуплет, а в случае доноров IV группы остаются трехкратно вырожденными.

Одноосная упругая деформация P [100] нарушает эквивалентность долин и уменьшает долино-орбитальное взаимодействие, в результате чего синглет в Si приближается к опускающемуся минимуму на величину $\delta E = \frac{3}{2} \Delta \left(\alpha^2 + \frac{4}{3} \alpha + 4 \right)^{1/2} + \frac{1}{3} (S_{\parallel} - S_{\perp}) \left(2 \Xi_u - \frac{1}{2} \Xi_u^* \right) P - 3 \Delta$,
$$a = (S_{\parallel} - S_{\perp}) \Xi_u^* P (3 \Delta)^{-1}$$

где Δ - матричный элемент долино-орбитального взаимодействия, $S_{\parallel}, S_{\perp}$ - константы жесткости кристаллического кремния, для сжатия: $P < 0$. Легко видеть, что в случае $\Xi_u = \Xi_u^*, \delta E$ стремится к насыщению при $P \rightarrow \infty$. Если же эти константы не равны, то после перестройки с-зоны при больших значениях $P \geq 6 \cdot 10^3 \text{ кгс/см}^2$ основное примесное состояние - синглет $1s(A_1)$ будет либо монотонно приближаться, либо удаляться от нижайшего минимума [100]. При построении различных моделей обычно считалось, что $\Xi_u = \Xi_u^*$. Однако действительное соотношение между этими константами было неизвестно.

Ответ на этот вопрос мы получили с помощью следующей методики. Кристаллы п-Si, легированные P, As и Sb были подвергнуты одноосному сжатию при $T \approx 20$ К, когда ионизована лишь незначительная часть доноров. Происходящие при этом изменения положения примесного состояния приводило к изменению количества ионизованных доноров, что легко фиксировалось холловскими измерениями. При этом учитывалось уменьшение вероятности термических выбросов в зону проводимости, связанное с появляющимся энергетическим зазором между эквивалентными долинами, и вклад вышележащих примесных состояний, возрастающий с увеличением давления.

Проведя такие измерения, мы определили, что константы примесных потенциалов деформации указанных примесей в кремнии не равны аналогичной зонной константе и имеют следующие значения: для фосфора ($\Xi_u - \Xi_u^* = 0,12$ эВ, $\Delta = 2,16$ мэВ, для сурьмы ($\Xi_u - \Xi_u^* = 0,06$ эВ, $\Delta = 2,19$ мэВ и для мышьяка ($\Xi_u - \Xi_u^* = 0,4$ эВ

$$\Delta = 3,9 \text{ мэВ.}$$

Примерно такого же рода исследования были проведены и на кристаллах п-Ge с тем лишь отличием, что в последнем случае донорными примесями могут быть как элементы VI, так и IV групп. Это могло привести к различному поведению примесных состояний под действием одноосных деформаций $RH[100]$, что также требовало специального изучения. На кристаллах п-Ge, легированных серой (VI группа) и оловом (IV группа), было показано, что эти примеси действительно имеют различную структуру и по-разному зависят от одноосного давления. Оказалось, что для серы $\Delta = 0,018 \text{ эВ}$, $\Sigma_n^* - \Sigma_n^* = 1,2 \text{ эВ}$.

В этой же главе приведены результаты исследований влияния на примесные состояния в кремнии симметричных одноосных деформаций $RH[111]$. Считалось, что такие деформации, не нарушающие эквивалентность долин, не приводят к изменению положения основного донорного состояния $Is(A_1)$. Однако оказалось, что и в этом случае энергия ионизации доноров E_i изменяется. Причем, в отличие от $RH[100]$, E_i - увеличивается по квадратичному закону $E_i \sim AP^2$. Нам удалось выяснить, что это увеличение является следствием 2-х причин: изменения под действие сдвиговых деформаций эффективной массы плотности состояний (около 20% всего эффекта) и появляющегося взаимодействия (из-за наличия тригональной компоненты в деформации $[111]$) между лигандным состоянием T_2^* и основным донорным состоянием $Is(A_1)$. Также была определена константа этого взаимодействия $\hbar = 0,6 \text{ эВ}$.

В шестой главе приведены результаты исследований эффектов, проходящих в валентных зонах изучаемых кристаллов. В предыдущих главах изучались особенности рассеяния электронов, структуры примесных состояний и определялись параметры, непосредственно связанные с зонами проводимости, и поэтому разные в различных образцах. Однако, валентные зоны этих полупроводников качественно подобны, поэтому эффекты, связанные с этими зонами, должны быть общими для них всех. Так, в исследованных кристаллах существуют анизотропия зон тяжелых и легких дырок и вырождение их в точке Г, поэтому в гальваномагнитных и оптических эффектах участвуют носители двух типов: тяжелые и легкие дырки.

С помощью измеренных (на различных кристаллах p- InSb , вырезанных в различных кристаллографических направлениях) полевых и температурных зависимостей коэффициента Холла R и поперечного магнитосопротивления $\rho_{\perp}$ были определены анизотропия зоны тяжелых дырок, вклад легких в проводимость образцов и их подвиж-

ности и концентрации. Оказалось, что анизотропия коэффициентов Холла для образцов, вырезанных в направлениях $[100]$ и $[111]$ в плоскости (110) не превышает ~1,5 %, отношение концентрации легких дырок к тяжелым при 77 К $p_2/p_1 \approx 1\%$ и $\mu_2 = 10^5 \text{ см}^2/\text{В.с.}$

Хотя, как видно из наших результатов для InSb и литературных данных для Ge и Si, количество легких дырок, участвующих в переносе зарядов, невелико вклад их в проводимость может быть значительным. Это приводит к заметному несовпадению некоторых экспериментальных зависимостей с расчетными из условия наличия только тяжелых дырок. Так, в p-Ge в решеточной области рассеяния вместо ожидаемой зависимости $\mu \sim T^{-1,5}$ измеряется зависимость $\mu \sim T^{-2,3}$. Авторы большинства предыдущих работ объясняли это несоответствие расчета с экспериментом участием в рассеянии оптических фононов. Нам удалось показать, что это участие определяется наличием легких дырок. Проведенное каким-либо способом снятие вырождения зон легких и тяжелых дырок приводило измеряемые зависимости в соответствие с теорией: $\mu \sim T^{-1,5}$.

Как уже сообщалось, анизотропия валентных зон исследованных полупроводников, в общем, невелика, тем не менее существуют эффекты, обязанные своим появлением именно этой анизотропии. В частности, к таким эффектам относится нечетное магнитосопротивления (НМС), измеряемое в полупроводниковых кристаллах р-типа. По данным авторов теоретических работ величина и характер этого эффекта определяются как тяжелыми, так и легкими дырками. Наши предыдущие исследования тоже как будто свидетельствовали в пользу заметного участия легких дырок в явлениях, измеряемых на кристаллах с р-проводимостью. Однако, в данном случае проведенные нами на кристаллах p-Ge и p-Si измерения НМС, подтвердив в общих чертах выводы теории, показали тем не менее отсутствие вклада легких дырок в наблюдаемые зависимости НМС от магнитного и электрического полей и температур (во всяком случае, в том виде, как его предсказывала теория).

До сих пор речь шла только о гальваномагнитных явлениях. Но не менее интересным оказывается проявление особенностей структуры валентных зон в оптических исследованиях. Это хорошо видно, например, из проведенных нами измерений поглощения ИК излучения в кристаллах InSb , CdHgTe и InHgTe в собственной области проводимости. Оказалось, что основное поглощение света происходит при переходах валентных электронов из зоны легких в зону тяжелых дырок. Причем, эти переходы, благодаря вырождению зон, существуют во всей области ИК спектра.

В работе проведен учет этого поглощения и получены выражения, с помощью которых его можно выделить из измеренного и таким образом изучать только внутризонные переходы носителей. Благодаря этому получены новые данные о вкладах различных механизмов в рассеяние носителей в этих материалах. Показано, что носители в CdHgTe при комнатных температурах и концентрациях примесей до $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ рассеиваются преимущественно на полярных фононах, а в менее совершенных кристаллах MnHgTe необходим также учет рассеяния на короткодействующих потенциалах дефектов структуры.

7-ая глава посвящена исследованиям особенностей проводимости кристаллов p-CdHgTe (КРТ), появляющимся в связи с особенностями химического строения, технологии выращивания и зонного спектра. Они могут проявляться при измерении различных оптических, электрических и гальваномагнитных эффектов. В данной главе детально рассмотрен последний случай. Здесь необходимо иметь в виду следующее. В узкозонных (УЗ) и безделевых (БД) кристаллах КРТ эффективная масса электронов очень мала ($m_e^* \approx 0,01 m_0$), а подвижность велика. Это приводит к существенному квантованию s -зоны уже в области магнитных полей $B \geq 0,2 \text{ Тл}$, связанному с ним магнитному вымораживанию электронов на донорные состояния (отделившиеся от зоны проводимости в квантовых В) и переходам металл-неметалл (М-Н) различного типа. Кроме того, отсутствие запрещенной зоны или ее малая величина приводит к тому, что акцепторные уровни могут попасть в зону проводимости и, при достаточной их концентрации, образовать в ней протяженную примесную зону. Все это может тем или другим способом проявиться в измеряемых гальваномагнитных эффектах. И авторы большого числа работ, посвященных исследованиям кристаллов КРТ, именно с их помощью объясняли наблюдаемые на зависимостях $R(B)$ и $\rho_1(B)$ особенности.

Однако, с другой стороны, известно также, что совершенство подавляющего числа образцов КРТ оставляет желать лучшего. Все они состоят из кристаллитов, разориентированных относительно друг друга на малые углы, с большим количеством собственных дефектов и солидной компенсацией. Все это может привести к различного вида неоднородностям, потенциальному рельефу дна зоны проводимости и т.д. Наконец, из-за особенностей химического строения и специфических травителей на поверхности образцов КРТ появляются различные слои, в которых могут находиться встроенные заряды. Компенсация этих зарядов свободными электронами или дырками часто приводит к появлению дополнительных проводимостей (помимо основной), существенно искажающих наблюдаемые зависимости.

В работе было исследовано влияние таких несовершенств (прежде всего херринговских неоднородностей и поверхностной проводимости) на магнитополевые зависимости $R(B)$ и $\rho_1(B)$, измеренные при разных температурах гелиевого диапазона на УЗ и БД кристаллах. Был проведен соответствующий расчет, который дал достаточно хорошее согласие с экспериментом и показал, что проявление таких несовершенств может полностью скрыть глубокие физические процессы, о которых говорилось выше.

Так, наличие херринговских неоднородностей может привести к наблюдаемому на образцах КРТ спадающему $R(B)$ в квантовых магнитных полях и излому зависимостей $\lg \rho_1(\lg B)$, измеренных в той же области В. Показано что наклон зависимости $\lg \rho_1(\lg B)$ в этом случае часто определяется наклоном $\lg \rho_n(\lg B)$.

Обнаруженное нами размерное квантование приповерхностного проводящего слоя приводит к неожиданно большому его вкладу в проводимость образцов КРТ в квантовых В. Показано, что в нетравленных образцах многие из наблюдаемых особенностей зависимостей $R(B)$ и $\rho_1(B)$ могут быть следствием вклада в проводимость образцов p-KPT этого проводящего слоя.

Тем не менее, в УЗ образцах p-KPT оказалось возможным наблюдать при гелиевой температуре и магнитное вымораживание электронов. Для этого их компенсация должна быть минимальной (так чтоб измеренные и посчитанные по формуле Брукса-Херринга значения подвижности были близкими). В этом случае именно магнитное вымораживание ответственно за наблюдаемую температурную зависимость $R(B)$ и $\rho_1(B)$. Показано, что отсутствие такой зависимости на слабо компенсированных БД образцах p-KPT свидетельствует об отсутствии донорных состояний в открывающейся в квантовых В запрещенной зоне.

В этой же главе представлены результаты исследований гальваномагнитных явлений, измеренных на УЗ образцах $(\text{Mn}, \text{Hg})\text{Te}$. Показано, что благодаря обменному взаимодействию электронов с парамагнитными ионами Mn^{2+} свойства этих кристаллов существенно отличаются от других полупроводников. Так, несмотря на узкую зону и большую величину зеэмановского g -фактора, суммарный g -фактор в таких кристаллах может быть, как показывают расчеты, близок к нулю. Что хорошо подтверждается магнитополевыми зависимостями $\rho_1(B)$, измеренными в области осцилляций Шубникова-де-Гааза на образцах $\text{Mn}_x\text{, Hg}_{1-x}\text{Te}$.

Основные результаты и выводы.

Проведенные в данной работе исследования позволили полу-

чить новые сведения о влиянии на магнитополевые и температурные зависимости проводимости полупроводниковых кристаллов особенностей зонного спектра, неоднородностей и несовершенств образцов, а также донорных и акцепторных примесей; впервые определить некоторые константы и параметры зон и механизмов рассеяния, с помощью которых оказалось возможным рассчитать эти зависимости; изучить структуры мелких донорных состояний многодолинных полупроводников; оценить влияние неоднородностей и неоднородного распределения проводимости на некоторые явления, измеряемые в узкозонных кристаллах; выяснить вклад легких дырок и их анизотропии в гальваномагнитные эффекты, измеряемые в валентных зонах исследованных кристаллов.

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Разработаны и освоены новые методики исследований:

- а) анизотропии рассеяния с помощью анизотропии электропроводности в интегрально изотропных многодолинных кристаллах;
- б) структуры и параметров мелких доноров в многодолинных полупроводниках с помощью деформаций и холловских измерений;
- в) поглощения свободными носителями поляризованного ИК излучения в одноосно деформированных многодолинных кристаллах.

2. Изучены особенности рассеяния электронов с низкими энергиями (на дне с-зоны) в объемных кристаллах и эпитаксиальных слоях фосфида галлия в широком диапазоне температур (77 ± 500 К) и концентраций примесей ($N_i = 10^{16} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$). Определены вклады различных механизмов рассеяния электронов.

3. Впервые в этом материале измерены ряд констант и параметров. В частности, константы деформационного потенциала E_d и E_{ii} , константа связи с междолинным фоном P_i и др., необходимые для расчетов температурных и спектральных зависимостей подвижности и коэффициента поглощения света свободными электронами.

4. Изучены особенности рассеяния электронов с высокими энергиями в одноосно деформированных кристаллах Ge и Si. Показан большой вклад междолинного рассеяния, которое в этом случае имеет ярко выраженный анизотропный характер.

5. Показано, что в случае рассеяния электронов с высокими энергиями в кристаллах фосфида галлия необходим учет прямых виртуальных переходов в вышележащую долину зоны Δ_2 (j_i -рассеяние). При поглощении носителями поляризованного света в ИК области это рассеяние может существенным образом изменить за-

висимости $\alpha_n(\omega)$, мало изменяя $\alpha_1(\omega)$.

6. Обнаружено и исследовано неупругое электрон-фононное взаимодействие, заметным образом проявляющееся при рассеянии носителей в высоколегированных полупроводниках ($N_i \geq 10^{18} \text{ см}^{-3}$), изменяющее вид зависимостей $\alpha_n(\omega)$ и $\alpha_o(\omega)$.

7. Изучено рассеяние электронов с высокими энергиями в кристаллах CdHgTe и MnHgTe. Показано, что при комнатных температурах электроны в КРТ рассеиваются, в основном, на полярных оптических фононах, в МРТ кроме этого существенный вклад вносит рассеяние на короткодействующих потенциалах дефектов кристаллической решетки.

8. Впервые определены константы потенциалов деформации примесей P, Sb и As в кремнии и S и Si в фосфиде галлия. Показано, что в последнем случае доноры IV и VI групп имеют качественно различную структуру.

9. Обнаружена нелинейная зависимость мелких донорных состояний в Si от величины одноосной симметричной деформации R_{II} , определяемая изменением эффективной массы электронов на дне зоны проводимости и взаимодействием между лигандным состоянием T_2^* и основным донорным состоянием $1s (A_1)$. Определена константа этого взаимодействия.

10. Изучены особенности нечетного магнитосопротивления в кристаллах p-Ge и p-Si, возникающего в греющих электрических полях. Показано отсутствие ожидаемого вклада легких дырок в эти эффекты.

11. Изучено влияние херринговских неоднородностей и неоднородного распределения проводимости по образцу на гальваномагнитные эффекты, измеряемые в узкозонных кристаллах n-CdHgTe. Показано, что эти несовершенства могут заметным образом изменить вид зависимостей $R(B)$ и $\rho_1(B)$, измеренных при гелиевых температурах в квантующих магнитных полях.

12. Изучены особенности гальваномагнитных эффектов, измеренных в той же области магнитных полей и температур на узкозонных кристаллах MnHgTe. Показано, что вклад обменного взаимодействия в эффективный g-фактор электронов может существенным образом уменьшить его величину, так что для состава $x = 0,11$ его значение становится близким к нулю.

13. Определены вклад легких дырок в концентрацию свободных носителей в валентной зоне антимонида индия и их подвижность.

14. Показано что в слабо компенсированном n-CdHgTe наблюдаемые в узкозонных кристаллах особенности магнитополевых за-

зависимостей могут быть следствием магнитного вымораживания свободных электронов на отделяющиеся в квантовых магнитных полях донорные состояния, что приводит также к температурной зависимости проводимости и коэффициента Холла.

Результаты работы опубликованы в следующих статьях:

1. Беляев А.Е., Городничий О.П. О необходимости учета междолинного рассеяния электронов в фосфиде галлия. // Укр. физ. жур. - 1979. - 24, №8. - с. 1222-1224.
2. Баранский П.И., Городничий О.П., Савчук А.У. Определение эффективной массы плотности состояния электронов и количества основных минимумов энергии в зоне проводимости фосфида галлия. // Физ. техн. полупр. - 1976. - 10, №8. - с. 1567-1569.
3. Баранский П.И., Беляев А.Е., Городничий О.П. Пьезосопротивление одноосно деформированного фосфида галлия. // Физ. техн. полупр. - 1976. - 10, №1. - с. 185-187.
4. Belyaev A.E., Gorodnichii O.P. Determination of scattering anisotropy parameter with the use of measurements of anisotropic electrical conductivity. // Crys. Res. Tech. - 1985. - 20, N11. - K118-120.
5. Баранский П.И., Беляев А.Е., Городничий О.П. Влияние сдвиговой деформации на междолинное взаимодействие в фосфиде галлия. // Физ. техн. полупр. - 1977. - 11, №8. - с. 1594-1597.
6. Баранский П.И., Беляев А.Е., Городничий О.П. Пьезосопротивление, возникающее в условиях симметричного расположения оси деформации относительно всех изоэнергетических эллипсоидов в p -GaP. В кн. Технология получения и электрические свойства соединений A_3B_5 . - Ленинград, 1961. - с. 281-283.
7. О механизмах рассеяния в фосфиде галлия. / Баранский П.И., Беляев А.Е., Городничий О.П., Сытилина Н.Г., Томчук П.М. // Физ. техн. полупр. - 1979. - 13, №3. - с. 488-493.
8. Влияние иттербия на электрофизические свойства эпитаксиальных слоев p -GaP. / Баранский П.И., Беляев А.Е., Городничий О.П., Макаренко В.Г. // Физ. техн. полупр. - 1989. - 22, №1. - с. 158-161.
9. Особенности рассеяния электронов в кристаллах кремния, содержащих кластеры. / Винецкий Р.М., Городничий О.П., Шейхет Э.Г. // Физ. техн. полупр. - 1981. - 15, №5. - с. 1002-1005.
10. Пьезосопротивление кристалла кремния, одноосно деформированного вдоль направления [111]. / Беляев А.Е., Винецкий Р.М., Городничий О.П., Горюлюк С.С., Остафийчук П.Г. // Укр. физ. жур. - 1985. - 30, №3. - с. 926-930.
11. Исследование анизотропии поглощения света свободными носите-

- лями в полупроводниках. / Демиденко З.А., Томчук П.М., Беляев А.Е., Городничий О.П. // Препринт Института физики АН УССР. - 1985. - 42 с.
12. Anisotropy of infrared spectral absorption in uniaxially-stressed n -GaP. / Belyaev A.E., Gorodnichii O.P., Demidenko Z.A., Tomchuk P.M. // Infrared Phys. - 1983. - 23, N6. - p. 277-280.
 13. Влияние междолинного рассеяния на спектр поглощения света свободными носителями в одноосно деформированных многодолинных полупроводниках. / Беляев А.Е., Городничий О.П., Демиденко З.А., Томчук П.М. // Укр. физ. жур. - 1982. - 27, №5. - с. 66-671.
 14. Free carrier absorption in uniaxially stressed n -Si. / Belyaev A.E., Gorodnichii O.P., Demidenko Z.A., Pidlisny E.V., Tomchuk P.M. // Solid Stat. Com. - 1982. - 42, N6. - p. 441-445.
 15. Беляев А.Е., Городничий О.П. Влияние одноосной упругой деформации на положение примесных уровней в GaP. // Укр. физ. жур. - 1981. - 26, №3. - с. 497-499.
 16. Belyaev A.E., Gorodnichii O.P., Vinetskii R.M. Determination of the deformation potential of shallow donors in silicon. // Sol. Stat. Com. - 1982. - 44 N3. - p. 403-406.
 17. Особенности поглощения света свободными носителями в p -GaP. / Беляев А.Е., Городничий О.П., Демиденко З.А., Томчук П.М. // Укр. физ. жур. - 1985. - 30, №1. - с. 120-127.
 18. Спектры ИК поглощения одноосно деформированного фосфида галлия p -типа. / Беляев А.Е., Городничий О.П., Пидлисний Е.В. // Физ. техн. полупр. - 1980. - 14, №5. - с. 988-990.
 19. Баранский П.И., Беляев А.Е., Городничий О.П. Определение констант деформационного потенциала в легированном фосфиде галлия. // Укр. физ. жур. - 1980. - 25, №9. - с. 1557-1558.
 20. Беляев А.Е., Городничий О.П., Пидлисний Е.В. Величина отношения констант деформационного потенциала в p -GaP. // Доклады АН УССР, сер. А. - 1981. - №7. - с. 51-53.
 21. Изучение относительного смещения зон Δ_1 и Δ_2' в многодолинных полупроводниках под влиянием сдвиговой деформации. / Баранский П.И., Беляев А.Е., Городничий О.П., Пидлисний Е.В. // Физ. техн. полупр. - 1978. - 12, №4. - с. 823-828.
 22. Effect of doping on the anisotropic free carrier absorption in n -Ge. / Belyaev A.E., Gorodnichii O.P., Demidenko Z.A., Tomchuk P.M. // Acta Phys. Pol. - 1987. - 47, N4. - p. 549-552.

23. Дополнительный механизм рассеяния в сильно легированных полупроводниках.

- проводниках./ Беляев А.Е., Городничий О.П., Демиденко З.А., Павлов Р.М.// Укр.физ.жур.-1966.-32, №10.-с.1571-1574.
24. Поглощение света свободными носителями в узкозонных полупроводниках в области собственной проводимости./ Баранский П.И., Городничий О.П., Шевченко Н.В., Боднарчук О.А.// Физ.техн.полупр.-1969.-23, №3.-с.579.
25. Баранский П.И., Беляев А.Е., Городничий О.П. Влияние пластической деформации на гальваномагнитные и фотоэлектрические свойства p -CdHgTe.// Физ.техн.полупр.-1990.-24, №1.-с.121-125.
26. Беляев А.Е., Винецкий Р.М., Городничий О.П., Деформационный потенциал нижайшего примесного состояния мышьяка в кремнии.// Укр.физ.жур.-1983.-28, №1.-с.1097-1099.
27. The nonlinear effect of uniaxial stress for shallow donors in silicon./ Belyaev A.E., Gorodnichii O.P., Vikhain V.S., Vinetskii R.M.// Phys.Stat.Sol.(b).-1985.-130.-p.K47-K50.
28. Беляев А.Е., Городничий О.П. Влияние одноосной упругой деформации на положение примесных уровней в фосфиде галлия.// Укр.физ.жур.-1981.-26, №3.-с.497-499.
29. Баранский П.И., Беляев А.Е., Городничий О.П. Донорные примеси IV и VI групп и уровни, создаваемые ими в GaP. В кн. Легирование полупроводников.-Москва, 1962.-с.419-423.
30. Баранский П.И., Городничий О.П., Эффект Холла и поперечное магнитосопротивление в p -JnSb.// Укр.физ.жур.-1969.-14, №8.-с.1363-1366.
31. Baranskii P.I., Gorodnichii O.P. Concentration dependence of the Hall-factor in InSb.// Phys.St.Sol.-1969.-35.-p.K123-126.
32. Бабич В.М., Баранский П.И., Городничий О.П. К вопросу о природе магнитосопротивления p - и p -JnSb.// Укр.физ.жур.-1971.-15, №11.-с.1921-1925.
33. К вопросу о температурной зависимости подвижности носителей тока в p -Ge при рассеянии на акустических фоновых.// Баранский П.И., Городничий О.П., Тхорик Ю.А., Шварц Ю.М.// Физ.техн.полупр.-1974.-8, №2.-с.426-427.
34. Нечетное магнитосопротивление в p -Ge в сильных электрических полях./ Баранский П.И., Винецкий Р.М., Городничий О.П., Жидков А.В.// Физ.техн.полупр.-1978.-12, №6.-с.1631-1634.
35. Нечетное магнитосопротивление в Ge и Si p -типа при слабом разогреве носителей тока./ Баранский П.И., Винецкий Р.М., Городничий О.П., Жидков А.В.// Физ.техн.полупр.-1980.-14, №2.-с.367-369.
36. Baranskii P.I., Gorodnichii O.P., Shevchenko N.V. IR optical absorption and reflection spectra in narrow gap semiconduc.// Ukrated Phys.-1980.-30, №3.-p.259-263.

37. Влияние неоднородностей на гальваномагнитные эффекты в кристаллах $Cd_{1-x}Hg_xTe$ в квантующих магнитных полях./ Городничий О.П., Горбатюк И.Н., Корнюшин Ю.В., Раренко И.М.// Укр.физ.жур.-1984.-29, №4.-с.584-588.
38. Longitudinal magnetoresistance in $(Cd,Hg)Te$ crystals in quantizing magnetic fields./ Gorodnichii O.P., Gorbatyuk I.N., Rarenko I.M., Vinetskii R.M.// Phys.Stat.Sol.(b).-1985.-130.-p.K169-K173.
39. Баранский П.И., Городничий О.П., Продольное магнитосопротивление в JnSb p -типа.// Физ.техн.полупр.-1988.-2, №5.-с.854-861.
- ✓ 40. Влияние поверхностной проводимости на гальваномагнитные эффекты в p - $Cd_{1-x}Hg_xTe$.// Белев О.Г., Баранский П.И., Бекетов Г.В., Винецкий Р.М., Городничий О.П.// Физ.техн.полупр.-1987.-24, №5.-с.1021-1025.
41. Влияние ультразвука на гальваномагнитные эффекты в p -(Cd,Hg)Te Баранский П.И., Винецкий Р.М., Городничий О.П., Горбатюк И.Н., Олих Я.М., Раренко И.М.// Физ.техн.полупр.-1986.-20, №6.-с.1104-1106.
42. Городничий О.П., Шевченко Н.В. Исследование особенностей проводимости JnSb и $(Cd,Hg)Te$, фоточувствительных в ИК диапазоне.// Оптикоэлектроника и полупроводниковая техника.-1989.-14.-с.92-96.
43. Баранский П.И., Беляев А.Е., Городничий О.П. Об особенностях некоторых гальваномагнитных эффектов, наблюдаемых в $(Cd,Hg)Te$ // Сб. Электронная техника.-1989.-6, №7. с.244
44. Особенности осцилляций Шубникова-де-Гааза в $MnO_{11}Hg_{0,89}Te$. /Беляев А.Е., Городничий О.П., Семенов Ю.Г., Шевченко Н.В., Боднарчук О.А., Раренко И.М.// Физ.техн.полупр.-1988.-22, №2.-с.335-338.
45. Беляев А.Е., Городничий О.П., Пидлисний Е.В. Спектры ИК поглощения одноосно деформированных кристаллов p -GaP.// В кн. Спектры молекулярных кристаллов.- Киев, 1980.-241 с.

Подп. к печ. 5 10 90. Формат 60 × 84/16 Бумага офс
Печ. офс. Усл. печ. л. 1,39 Уч.-изд. л. 1 Тираж 120
Зак. 0-4295. Бесплатно.

Киевская книжная типография научной книги. Киев, Репина, 4.

*Размещено в библиотеке
Ф. 0.16.25.1
12/01-90*

Орден Ленина и Орден Дружбы Народов
Академия наук Украинской ССР
Институт полупроводников

Городничий

На правах рукописи
УДК 621.315.592.

ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЗОННОЙ СТРУКТУРЫ, ПРИМЕСЕЙ И
ДЕФЕКТОВ НА ПРОЦЕСС ПЕРЕНОСА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников
и диэлектриков

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

К и е в
1990

О С О Б Е Т В И Е

Разрешается копировать экземпляр
диссертации

16 октября 1990