

На правах рукописи



Сидоров Евгений Николаевич

ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
СИЛЬНО ЛЕГИРОВАННОГО GaAs:Te В УСЛОВИЯХ
КОРРЕЛИРОВАННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСИ

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Томск – 2010

Работа выполнена в Омском филиале Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН

Научный руководитель: кандидат физико–математических наук
Давлеткильдеев Надим Анварович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Гермогенов Валерий Петрович

кандидат физико-математических наук, доцент
Володин Владимир Алексеевич

Ведущая организация: Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН

Защита состоится «24» июня 2010 г. в 16:30 на заседании диссертационного совета Д212.267.07 при Томском государственном университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 34а.

Автореферат разослан «18» мая 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.267.07



Ивонин И.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Полупроводниковые твердые растворы привлекли к себе большое внимание возможностью образования непрерывных твердых растворов – кристаллических материалов, в которых происходит плавное изменение физических свойств в зависимости от состава, что обеспечивает получение полупроводниковых фаз с нужными и воспроизводимыми характеристиками. Однако практически полученные твердые растворы не оправдали надежд, поскольку с потерей сингулярности состава была утеряна самостабилизация роста, обеспечиваемая постоянством температуры кристаллизации. Материалы росли негомогенными по составу вследствие процессов ассоциации и диссоциации их структурных компонентов.

В результате кулоновского, упругого и химического взаимодействия с участием атомов основного вещества, атомов легирующих, остаточных примесей и собственных точечных дефектов в твердых растворах образуются комплексы; происходят *фазовые переходы*, обусловленные кооперативным изменением структуры в целом при сохранении неупорядоченного распределения компонентов; формируются фазы *упорядочения* с образованием сверхструктур; происходит *распад твердых растворов*, приводящий к самым разнообразным структурным состояниям.

Широкое использование полупроводниковых твердых растворов в структуре современных электронных компонентов выдвинуло проблему синтеза полупроводниковых систем с переменным составом в число наиболее актуальных задач. Детальное изучение процессов взаимодействия структурных компонентов, комплексообразования, упорядочения и фазовых превращений в полупроводниковых твердых растворах является важным для разработки и совершенствования технологии получения полупроводниковых материалов с заданными свойствами.

Изучение полупроводниковых твердых растворов на основе соединений $A^{III}B^V-A^{II}B^{VI}$, *Ge-Si* и др. показали [1, 2], что на концентрационных зависимостях свойств обнаруживаются особенности, свидетельствующие об неидеальности твердых растворов: особые точки разрыва или перегиба в окрестности некоторой критической концентрации. Такие изменения параметров полупроводниковых твердых растворов связываются с упорядочением примесного компонента.

Обычно сильно легированные полупроводники с примесями замещения рассматриваются как квазибинарные сильно разбавленные (статистические) твердые растворы, концентрационные свойства которых меняются монотонно. Поэтому, предположение о случайном распределении примеси лежит в основе теории энергетического спектра сильно легированных полупроводников и процессов рассеяния свободных носителей заряда в них. Однако, исследование эффектов легирования в соединениях $A^{III}B^V$ с примесью шестой группы показало, что зависимости ряда параметров от концентрации примесей теряют свое монотонное поведение в области концентрации примеси $10^{18} \text{ см}^{-3} < N_{np} < 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Так, при изучении спектров инфракрасного отражения и поглощения, стационарной фотолюминесценции в монокристаллах *GaAs:Te* при концентрациях

свободных носителей заряда $n_0=2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ было обнаружено уменьшение спектрального параметра, характеризующего доминирующий механизм рассеяния свободных носителей заряда [3], увеличение времени жизни плазмонов [4], увеличение интенсивности краевой фотолюминесценции [5], появление новой полосы фотолюминесценции с энергией максимума $\hbar\omega_{\text{max}} \approx 1,48 \text{ эВ}$ при $T=77 \text{ К}$ [6]. Обнаруженные изменения параметров интерпретируются с точки зрения упорядочения в примесной подсистеме кристалла. Для интерпретации привлекаются различные модельные представления:

– в твердых растворах $A^{\text{III}}B^{\text{V}}_{(1-x)}B^{\text{VI}}_x$ в результате взаимодействия между донорами возможно образование фазы упорядочения в виде сверхрешетки доноров при критических концентрациях примеси $N_{np}=(2-3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [3, 4];

– в монокристаллах *GaAs* легированных примесью VI группы донорно-вакансионные комплексы $V_{Ga}D_{As}$ обладают свойствами дипольных центров; в системе дипольных центров $V_{Ga}D_{As}$ возможен фазовый переход в состояние с ненулевой поляризацией (сегнетоэлектрический-сегнетоэластический фазовый переход) при критической концентрации свободных носителей заряда $n_0=2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и критической температуре $T_0 \approx 300 \text{ К}$ [7].

Однако существующие модели не учитывают всех наблюдаемых изменений свойств материала с ростом уровня легирования или предсказывают такие изменения параметров материала, которые в эксперименте не наблюдаются.

В данной работе предлагается рассматривать упорядочение дефектов как переход из состояния с неоднородным распределением примесных дефектов в состояние с их пространственно коррелированным распределением, для чего привлекается модель корреляции ближнего порядка.

Цель настоящей работы заключается в исследовании особенностей концентрационных зависимостей параметров, описывающих энергетический спектр и процессы рассеяния свободных носителей заряда в монокристаллах *GaAs:Te*, выращенных методом Чохральского, с концентрацией свободных носителей заряда $10^{17} \leq n_0 \leq 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, и в объяснении этих особенностей с привлечением модели корреляции ближнего порядка.

В соответствии с целью работы были поставлены следующие задачи:

1. Исследование влияния уровня легирования на спектральную зависимость краевой фотолюминесценции в температурном диапазоне $6 \div 300 \text{ К}$ серии монокристаллов *GaAs:Te*.

2. Исследование влияния уровня легирования на спектральную зависимость коэффициента поглощения электромагнитного излучения вблизи края фундаментального поглощения при 300 К в серии монокристаллов *GaAs:Te*.

3. Исследование доминирующих механизмов рассеяния при 300 К в серии монокристаллов *GaAs:Te* на основе анализа спектров инфракрасного поглощения и отражения.

Научная новизна работы заключается в следующем. Для монокристаллов *GaAs:Te*, выращенных методом Чохральского, с концентрацией свободных носителей заряда $10^{17} \leq n_0 \leq 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ впервые:

– обнаружено, что во всем исследуемом концентрационном диапазоне высокотемпературные (300 К) спектры фотолюминесценции обусловлены только

рекомбинацией свободных электронов со свободными дырками, а низкотемпературные спектры (6К) – только рекомбинацией свободных электронов с дырками, локализованными в состоянии гауссова хвоста плотности состояний валентной зоны;

– обнаружено, что концентрационные зависимости параметров, описывающих энергетический спектр свободных носителей заряда, а именно: химического потенциала, среднеквадратичной флуктуации примесного потенциала, сужения запрещенной зоны имеют немонотонный характер;

– показано, что учет корреляции ближнего порядка в распределении примесных дефектов позволяет объяснить снижение величины спектрального параметра и уменьшение коэффициента поглощения, обусловленного рассеянием на ионах примеси, в области концентраций свободных носителей заряда $n_0 > 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Научная ценность и практическая значимость работы. Арсенид галлия, в т.ч. монокристаллический, остается одним из основных материалов в современной микро- и оптоэлектронике, а также является модельным объектом для изучения различных оптических и кинетических явлений в соединениях $A^{III}B^V$, твердых растворах и структурах на их основе. Особенностью легированного *n-GaAs* является наличие избыточного дефектообразования и неоднородного распределение примеси, что ухудшает его эксплуатационные качества. Процессы корреляции и упорядочение в распределении примесных дефектов, обнаруженные в легированном *GaAs:Te*, уменьшают градиенты внутренних механических напряжений в кристалле, делая данный материал более привлекательным с практической точки зрения.

В работе на примере *GaAs:Te* получено экспериментальное подтверждение теории краевой люминесценции сильно легированных полупроводников [8], согласно которой, вклад переходов, связанных с рекомбинацией носителей, локализованных в состояниях хвостов плотности состояний, в формирование спектров фотолюминесценции возрастает с понижением температуры. Поэтому практический интерес представляет исследование спектров фотолюминесценции легированных полупроводников при температуре вблизи абсолютного нуля, анализ которых позволяет экспериментально определять величину среднеквадратичной флуктуации примесного потенциала.

В работе на примере *GaAs:Te* развит подход к учету влияния корреляции в примесной подсистеме на спектральную зависимость коэффициента поглощения свободными носителями заряда на основе структурного фактора. Данный подход может быть использован при анализе корреляционных явлений в других полупроводниковых системах.

Достоверность полученных результатов достигается использованием классических или уже опробованных в мировой научной практике экспериментальных методов и теоретических моделей, воспроизводимостью экспериментальных данных, удовлетворительным согласием результатов эксперимента с теоретическими расчетами, а также качественным согласием полученных результатов с литературными теоретическими и экспериментальными данными.

На защиту выносятся следующие положения:

1. В монокристаллах арсенида галлия, выращенных методом Чохральского, легированных теллуром, в области концентрации свободных носителей заряда $7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3} < n_0 < 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ значения химического потенциала и сужения запрещенной зоны лежат ниже теоретических. Уменьшение данных параметров обусловлено дополнительным искажением закона дисперсии у дна зоны проводимости и искажением кристаллической структуры вследствие наличия крупномасштабных флуктуаций в распределении примесных дефектов.

2. В монокристаллах арсенида галлия, выращенных методом Чохральского, легированных теллуром, в области концентрации свободных носителей заряда $n_0 > 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ обнаружено уменьшение величины среднеквадратичной флуктуации примесного потенциала. Кулоновское взаимодействие между примесными дефектами инициирует переход от состояния с неоднородным распределением примесных дефектов в состояние с их пространственно коррелированным распределением.

3. В монокристаллах арсенида галлия, выращенных методом Чохральского и легированных теллуром, уменьшение величины коэффициента поглощения инфракрасного излучения свободными носителями заряда и ослабление его спектральной зависимости при $n_0 > 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ обусловлено корреляцией ближнего порядка в распределении примесных дефектов.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных форумах: XXIV научной студенческой конференции ОмГУ (Омск, 2000); Второй всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2000); IX Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов (Гродно, 2001); 21st International Conference on Defects in Semiconductors (Giessen Germany, 2001); Международной конференции «Физика электронных материалов» (Калуга, 2002); Восьмой Российской конференции «GaAs-2002» (Томск, 2002); Четвертой всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2002); Девятой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (Екатеринбург-Красноярск, 2003); VI Международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы» (Ульяновск-Сочи, 2004); XI Республиканской научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов по физике конденсированного состояния (Гродно, 2003); Всероссийской молодежной конференции "Под знаком "сигма" (Омск, 2003, 2005); Девятой конференция «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V» (Томск, 2006).

Публикации. Материалы диссертационной работы изложены в 21 работах, 2 из которых представляют собой публикации в рецензируемых научных журналах. Список опубликованных работ приводится в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, изложенных на 138 страницах текста и включает 53 рисунка, 1 таблицу, список литературы из 164 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, сформулирована цель работы, поставлены задачи, изложена научная новизна, сформулированы защищаемые положения, описаны структура и объем диссертации.

Первая глава "*Корреляционные эффекты в полупроводниках*" содержит литературный обзор по теме диссертации, в котором приводятся экспериментальные данные, позволяющие сделать вывод о том, что предположение о случайном распределении примеси, лежащее в основе теории энергетического спектра сильно легированных полупроводников и при рассмотрении процессов рассеяния свободных носителей заряда, становится непригодным. Исследование эффектов легирования в соединениях $A^{III}B^V$ показало, что зависимости ряда параметров от концентрации примеси теряют свое регулярное поведение в области $10^{18} < N_{np} < 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Представлен обзор существующих моделей упорядочения в исследуемом материале, используемых для объяснения обнаруженных немонотонных концентрационных зависимостей. Показано, что остаются открытыми следующие вопросы: во-первых, пространственное перераспределение каких дефектов и за счет каких механизмов приводит к наблюдаемым аномалиям концентрационных зависимостей параметров в $GaAs$ легированном примесью VI группы, и, во-вторых, оправдано ли привлечение предположения о дальнем порядке? Проведенный анализ экспериментальных данных и существующих моделей упорядочения позволил сделать ряд выводов и поставить задачи исследования.

Во второй главе "*Исследование особенностей энергетического спектра носителей заряда в монокристаллах $GaAs:Te$ методом фотолюминесценции*" представлены результаты исследования спектральной зависимости краевой фотолюминесценции (ФЛ) серии монокристаллов арсенида галлия, выращенных методом Чохральского, легированных теллуром с концентрацией свободных носителей заряда $n_0 = 10^{17} \div 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в температурном диапазоне $T = 6 \div 300 \text{ К}$ и интенсивностях возбуждения ФЛ $L = 10^{18} \div 10^{20} \text{ квант} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. В качестве источников возбуждающего излучения использовались $He-Ne$ (ЛГН-118А) и Ar^+ (ЛГ-503) лазеры с $\lambda = 632,8 \text{ нм}$ и $\lambda = 488 \text{ нм}$, соответственно.

Детальный анализ формы экспериментальных спектров краевой ФЛ в работе был проведен на основе моделей BT - и VB -рекомбинации. Модель VB -рекомбинации рассматривает прямую рекомбинацию свободных электронов и дырок и прямо связывает форму спектра ФЛ с плотностью состояний (ПС) зоны проводимости. Полуширина спектра межзонной ФЛ определяется величиной химического потенциала.

Модель BT -рекомбинации предполагает, что неосновные носители заряда захватываются на локализованные состояния акцепторного типа в хвосте плотности состояний вблизи валентной зоны, а затем уже рекомбинируют с электронами. Для хвоста плотности состояний неосновных носителей заряда анализ квантовомеханических моделей дает зависимость вида [9]:

$$\rho_v(\varepsilon) = \rho_v^0 \exp \left[- \left(\frac{E}{\gamma_{h,s}} \right)^s \right], \quad (1)$$

где s может принимать значения $1/2$, $3/2$, 2 . При $s = 2$ хвост плотности состояний имеет вид участка гауссовской кривой и обусловлен флуктуацией доноров. Случаи $s = 1/2$ и $3/2$ описывают глубокий хвост плотности состояний, обуслов-

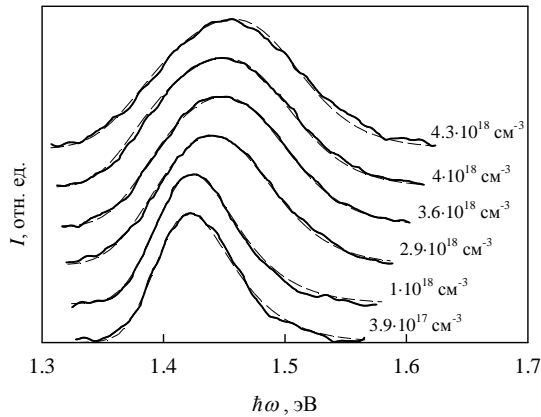


Рис.1. Спектры фотолюминесценции монокристаллов $GaAs:Te$ при $T=300K$: эксперимент (сплошная линия); подгонка с учетом непараболичности и статистического эффекта (штриховая линия). Концентрация электронов в образцах $GaAs$ указана на рисунке.

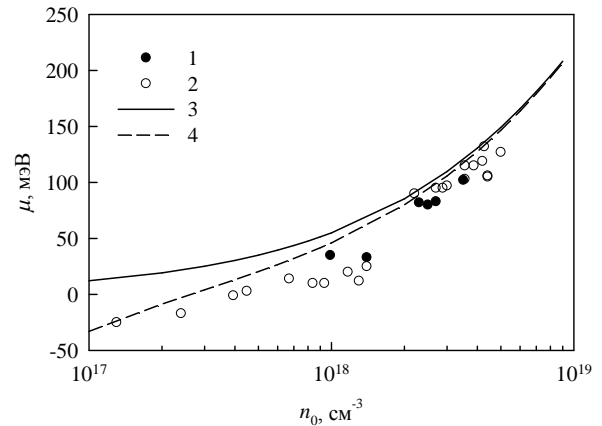


Рис.2. Концентрационная зависимость химического потенциала в монокристаллах $n-GaAs$: 1 – μ_{6K} , 2 – μ_{300K} , 3, 4 – теоретические значения для непараболической зоны проводимости при 6K и 300K, соответственно.

ленный флуктуацией акцепторов.

В области спектрального максимума спектр краевой ФЛ определяется рекомбинацией свободных электронов с дырками, локализованными в состояниях «гауссова хвоста» валентной зоны. Полуширина спектра межзонной ФЛ определяется величиной среднеквадратичной флуктуации примесного потенциала.

Обнаружено, что во всем исследуемом концентрационном диапазоне высокотемпературные спектры хорошо описываются VB -моделью, т.е. доминирует люминесценция при рекомбинации свободных электронов со свободными дырками (рис.1). Получены концентрационные зависимости химического потенциала $\mu_{300K}(n_0)$ (рис.2), величины сужения запрещенной зоны $\Delta E_{g,300K}(n_0)$ (рис.3). Зависимости $\mu_{300K}(n_0)$ и $\Delta E_{g,300K}(n_0)$ имеют немонотонный характер.

Анализ температурной эволюции спектральной зависимости краевой ФЛ, проведенный в настоящей работе, показал, что во всех исследуемых образцах краевая ФЛ не описывается с помощью VB -модели во всем исследуемом температурном диапазоне: температурная зависимость спектрального максимума не воспроизводит температурные изменения ширины запрещенной зоны и имеет немонотонный вид; температурная зависимость полуширины спектров не воспроизводит температурные изменения химического потенциала и имеет немонотонный вид. Более того, существуют температуры, при которых в спектре явно проявляются два конкурирующих канала излучательной рекомбинации.

Сделано предположение, что в исследуемых образцах с уменьшением температуры с *ВВ*-каналом начинает конкурировать *ВТ*-канал, который при низкой температуре становится доминирующим.

На рис.4 представлены результаты подгонки низкотемпературных спектров краевой ФЛ с использованием *ВТ*-модели. Видно, что учет распределения дырок по энергиям акцепторноподобных состояний в хвосте плотности состояний у края валентной зоны, позволяет достаточно хорошо описать спектраль-

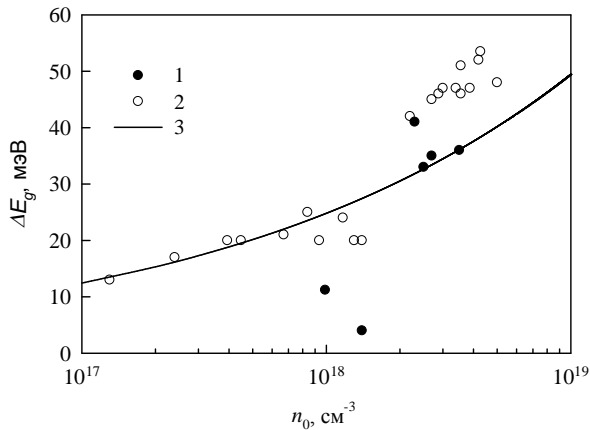


Рис.3. Концентрационная зависимость сужения запрещенной зоны в монокристаллах *n-GaAs*: 1 – $\Delta E_{g,6K}$, 2 – $\Delta E_{g,300K}$, 3 – теоретическая зависимость ΔE_g , обусловленной многочастичными эффектами.

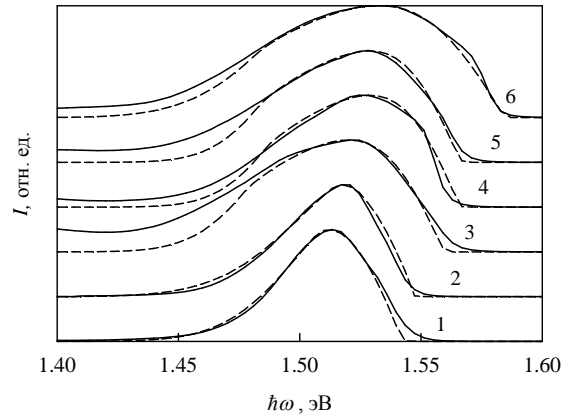


Рис.4. Экспериментальные (сплошная линия) и теоретические (штриховая линия) спектральные зависимости краевой ФЛ образцов *GaAs:Te* при $T=6K$.

n_0 : 1 – $9,9 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 2 – $1,4 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 3 – $2,3 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 4 – $2,5 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 5 – $2,7 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 6 – $3,6 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$.

ную зависимость межзонной ФЛ в районе максимума. На рисунках 2,3,5 представлены концентрационные зависимости подгоночных параметров $\Delta E_{g,6K}$, параметра спада ПС валентной зоны $\gamma_{h,6K}$, μ_{6K} . Видно, что концентрационные зависимости $\mu_{6K}(n_0)$ и $\Delta E_{g,6K}(n_0)$, полученные при подгонке низкотемпературных (6К) спектров ФЛ с использованием *ВТ*-модели качественно согласуются с концентрационными зависимостями этих параметров, полученными при подгонке комнатнотемпературных (300К) спектров ФЛ с использованием *ВВ*-модели. Можно даже говорить и о количественном согласии, если учесть, что при $n_0 \sim 10^{18} \text{cm}^{-3}$ еще проявляется зависимость химического потенциала от температуры, т.е. теоретические значения μ_{300K} меньше значений μ_{6K} . И в том, и в другом случае в области $n_0 < 2 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ значение подгоночных параметров ΔE_g и μ лежат ниже теоретических, что свидетельствует о наличии дополнительного искажения закона дисперсии и кристаллической решетки. Как сказано выше, в области спектрального максимума спектр краевой ФЛ обусловлен рекомбинацией свободных электронов с дырками, локализованными в состояниях «гаусова хвоста» валентной зоны, и поэтому подгоночный параметр γ_h определяется величиной среднеквадратичной флуктуации примесного потенциала. Из рис.5 видно, что значения γ_h , лежат выше теоретических значений среднеквадратичной флуктуации примесного потенциала в области $n_0 < 2 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ и свидетельствуют о том, что в этой концентрационной области имеют место крупномас-

штабные флуктуации в распределении примесных дефектов.

В области концентраций $n_0 > 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ значение параметров ΔE_g и μ указывает на уменьшение степени искажения закона дисперсии, а уменьшение величины $\gamma_{h,6K}$ свидетельствует о коррелированном распределении доноров.

Третья глава "Исследование особенностей энергетического спектра носителей заряда в монокристаллах GaAs:Te методом абсорбционной спектроскопии" посвящена исследованию влияния уровня легирования на спектральную зависимость коэффициента поглощения электромагнитного излучения под краем фундаментального поглощения (КФП) в образцах GaAs:Te из вышеуказанной серии. Данный метод исследования, как и анализ формы спектров краевой фотолюминесценции, является традиционным методом изучения влияния сильного легирования на электронную структуру материала. В работе изучались спектры поглощения при $T=300\text{K}$ в области $\lambda=0,8 \div 2,5 \mu\text{м}$.

Обычно экспериментально наблюдаемый спектр межзонного поглощения на частотах ниже пороговой хорошо описывается простой экспоненциальной зависимостью:

$$\alpha \sim \exp\left(-\frac{\hbar\omega_{\text{пор}} - \hbar\omega}{E_0}\right), \quad (2)$$

где E_0 – характерная энергия, не зависящая от частоты, а под пороговой частотой понимается оптическая ширина запрещенной зоны ($E_g + \mu$).

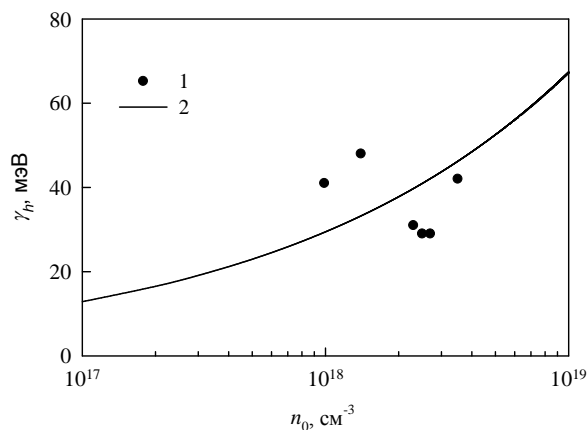


Рис.5. Среднеквадратичная флуктуация примесного потенциала в n -GaAs: 1 – $\gamma_{h,6K}$, 2 – теоретическая зависимость величины среднеквадратичной флуктуации примесного потенциала γ при $N_{np} = n_0$ [9].

Принято считать, что этот экспоненциальный низкоэнергетичный профиль $\alpha(\hbar\omega)$ в СЛП обусловлен образованием хвостов плотности состояний. Причем, в СЛП n -типа хвост ПС вблизи дна зоны проводимости в поглощении практически не проявляется. Напротив, $\alpha(\hbar\omega)$ при $\hbar\omega < \hbar\omega_{\text{пор}}$ воспроизводит плотность состояний неосновных носителей заряда – дырок. Тогда E_0 характеризует параметр хвоста плотности состояний у края зоны неосновных носителей заряда.

Часто параметр E_0 идентифицируют как оценку величины среднеквадратичной флуктуации примесного потенциала. Однако многочислен-

ные теоретические модели относительно функции ПС неосновных носителей заряда дают более сложные зависимости чем, простая экспоненциальная (соотношение (1)). Тогда такая интерпретация параметра E_0 некорректна.

В данной работе рассчитывались теоретические спектры поглощения с участием флуктуационных уровней. Причем в работе сделано предположение, что хвост ПС у края валентной зоны обусловлен флуктуациями в распределе-

нии легирующей примеси, т.е. для выражения ПС у края валентной зоны использовался гауссовский участок.

Из процедуры подгонки экспериментальных и теоретических спектров поглощения определялись параметры $\gamma_{h,300K}$ и ΔE_g . Для величины химического потенциала использовались значения μ_{300K} , полученные из анализа спектров ФЛ.

На рис.6 представлены эмпирические концентрационные зависимости

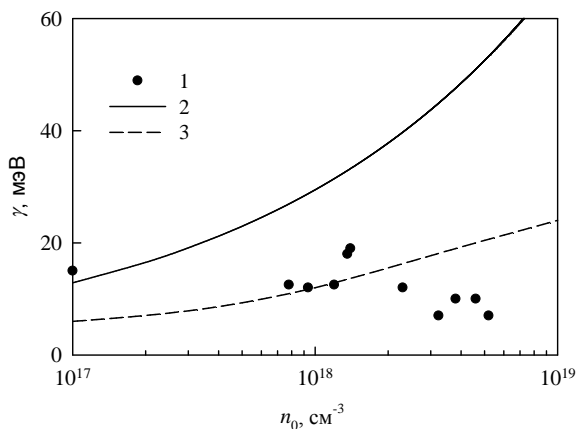


Рис.6. Концентрационная зависимость величины средневладратичной флуктуации примесного потенциала в монокристаллах *GaAs:Te*: 1 – параметр $\gamma_{h,300K}$; 2 – теоретическое значение γ при $N_{np} = n_0$ [9]; 3 – обобщение экспериментальных литературных данных относительно параметра E_0 .

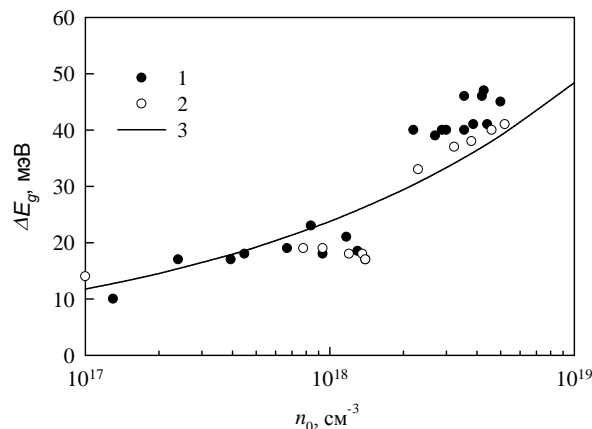


Рис.7. Концентрационная зависимость сужения запрещенной зоны в монокристаллах *GaAs:Te*: 1 – результаты анализа спектров ФЛ; 2 – результаты анализа спектров поглощения; 3 – теоретическая зависимость ΔE_g .

$\gamma_{h,300K}(n_0)$, а также параметра $E_0(n_0)$, построенного на основании литературных данных для *n-GaAs* при 300К. Видно, что зависимость $\gamma_{h,300K}(n_0)$ имеет немонотонный характер: в области концентраций $n_0 > 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ величина $\gamma_{h,300K}$ в исследуемом материале уменьшается. Т.е. характер поведения зависимости $\gamma_{h,300K}(n_0)$ повторяет характер поведения зависимости $\gamma_{h,6K}(n_0)$, полученной из анализа низкотемпературных спектров ФЛ. Однако количественного согласия нет. Это, по-видимому, объясняется тем, что в эксперименте по исследованию поглощения под КФП в данной работе зондируется более глубокий хвост ПС у края валентной зоны.

На рис.7 представлены концентрационные зависимости величины сужения запрещенной зоны $\Delta E_g(n_0)$, полученные на основе анализа спектров поглощения и спектров ФЛ. Эти параметры хорошо согласуются между собой.

В четвертой главе "Рассеяние электронов проводимости на пространственно коррелированной системе зарядов в сильно легированном *GaAs:Te*" приводятся результаты исследования доминирующих механизмов рассеяния свободных носителей заряда в образцах *GaAs:Te* из вышеуказанной серии на основе изучения спектров инфракрасного (ИК) поглощения и отражения.

В работе исследовались спектральные зависимости коэффициента поглощения свободными носителями заряда $\alpha_{\text{exp}}(\hbar\omega)$ при $T=300\text{K}$ и в диапазоне $\hbar\omega=0,113\div 0,207\text{эВ}$. Расчет проводился в рамках традиционного подхода к процессам переноса – нестационарной теории возмущения 2-го порядка. При расчете α_{theor} , обусловленного двумя конкурирующими механизмами рассеяния –

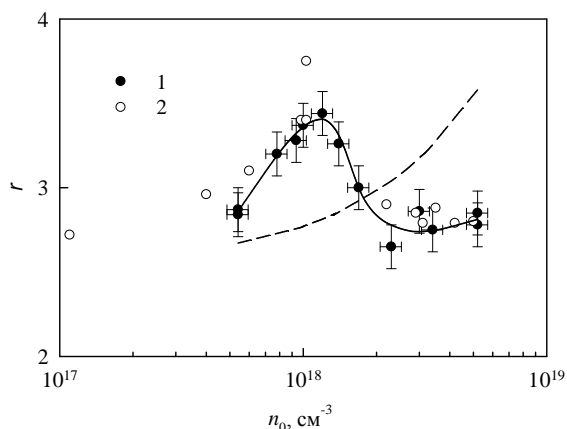


Рис.8. Экспериментальные и расчетные концентрационные зависимости спектрального параметра r в монокристаллах $GaAs:Te$: 1 – эксперимент; 2 – литературные данные; штриховая линия – расчет.

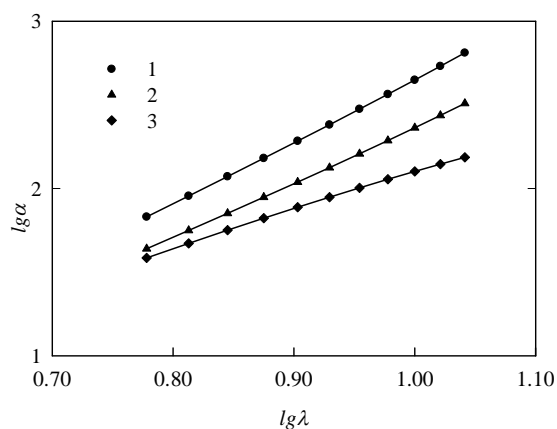


Рис.9. Расчетные спектральные зависимости коэффициента поглощения, обусловленного рассеянием на ионах примеси: 1 – без учета корреляции в расположении примесей, $r_c = 0$; 2, 3 – с учетом корреляции ближнего порядка: 2 – $r_c = 40\text{А}$, 3 – $r_c = 50\text{А}$. Полученные значения спектрального параметра: 1 – 3,7, 2 – 3,3, 3 – 2,3.

рассеянием на ионах примеси и рассеянием на полярных фононах, – использовались соотношения для полупроводников с вырожденным электронным газом с учетом непараболического закона дисперсии и экранирования.

Спектральную зависимость коэффициента поглощения свободными носителями заряда принято аппроксимировать зависимостью

$$\alpha \sim \hbar\omega^{-r}, \quad (3)$$

где r – спектральный параметр, характеризующий доминирующий механизм рассеяния.

На рис.8 представлена экспериментальная концентрационная зависимость спектрального параметра r_{exp} в исследуемом материале. Также на рис.8 штриховой линией представлена концентрационная зависимость расчетного значения r_{theor} . Монотонный рост r_{theor} демонстрирует возрастающую роль ионов примеси в рассеянии электронов с ростом уровня легирования. Из рис.8 видно, что концентрационная зависимость экспериментального значения r_{exp} немонотонна. В интервале $5 \cdot 10^{17} < n_0 < 1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ $\alpha_{\text{exp}}(\hbar\omega)$ имеет более сильную спектральную зависимость, чем $\alpha_{\text{theor}}(\hbar\omega)$, указывающую на наличие дополнительных рассеивающих центров, имеющих более сильную спектральную зависимость $\alpha(\hbar\omega)$.

При $n_0 > 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ $\alpha_{\text{exp}}(\hbar\omega)$ имеет более слабую спектральную зависимость, чем $\alpha_{\text{theor}}(\hbar\omega)$, т.е. $r_{\text{theor}} > r_{\text{exp}}$. Последнее может быть проинтерпретировано

но и как снижение рассеяния на ионах примеси, и как увеличение рассеяния на дефектах с более слабой спектральной зависимостью, а именно увеличением рассеяния на акустических фононах. Для того чтобы рассеяние на акустических фононах могло конкурировать с рассеянием на ионах примеси, нужно чтобы величина деформационного потенциала и пьезоэлектрической константы в исследуемых образцах в данном концентрационном диапазоне значительно превышали величины данных параметров для слаболегированных образцов. Однако весь набор экспериментальных данных не представляет объективных свидетельств такого увеличения.

В данной работе предполагается, что упорядочение дефектов, позволяющее объяснить экспериментальные данные, можно рассматривать как переход из состояния с неоднородным распределением примесных дефектов в состояние с их пространственно коррелированным распределением – структурный переход с перестройкой ближнего порядка.

Влияние пространственной корреляции на спектральную зависимость коэффициента поглощения свободными носителями заряда учитывался при помощи структурного фактора $S(q)$ (равного 1 при случайном распределении примеси), который определяет обратное время релаксации импульса вырожденных электронов проводимости:

$$\frac{1}{\tau(\omega)} = \frac{m^* E_F}{6\pi^2 \hbar^3} \int_0^{2k_F} |V(q)|^2 S(q) q^3 dq, \quad (4)$$

$$S(q) = \left\langle \frac{1}{N} \sum_{i,j} e^{-i\vec{q}(\vec{R}_i - \vec{R}_j)} \right\rangle, \quad (5)$$

где $V(q)$ – Фурье образ примесного потенциала.

Структурный фактор выражался через функцию парной корреляции $g(r)$, предполагающую, что в результате отталкивания между заряженными донорами существует область с радиусом r_c , окружающая каждый ионизованный донор, в которой нет других доноров.

Коэффициент поглощения в рамках квазиклассического приближения непосредственно связан с действительной частью динамической проводимости или динамического сопротивления. В данной работе для расчета спектральной зависимости коэффициента поглощения свободными носителями заряда использовалась его связь с действительной частью динамического сопротивления. Для вычисления действительной части динамического сопротивления использовалось квантово-механическое кинетическое уравнение для электронов с учетом их столкновений с ионами и с учетом структурного фактора.

На рис.9 приведены результаты расчета коэффициента поглощения свободными носителями заряда при рассеянии на ионах примеси с учетом пространственной корреляции. Видно, что учет корреляции ближнего порядка в распределении примесных дефектов позволяет объяснить снижение величины спектрального параметра r и уменьшение коэффициента поглощения, обусловленного рассеянием на ионах примеси.

Как известно, реальная часть динамической проводимости определяется средним временем релаксации импульса. Часто для оценки среднего времени релаксации импульса свободных носителей заряда используют время жизни длинноволнового плазмона свободных носителей $1/\gamma_p$, где γ_p – величина затухания плазменных колебаний. В данной главе приводятся результаты исследования связанных плазмон-фононных мод по спектрам ИК - отражения. В работе изме-

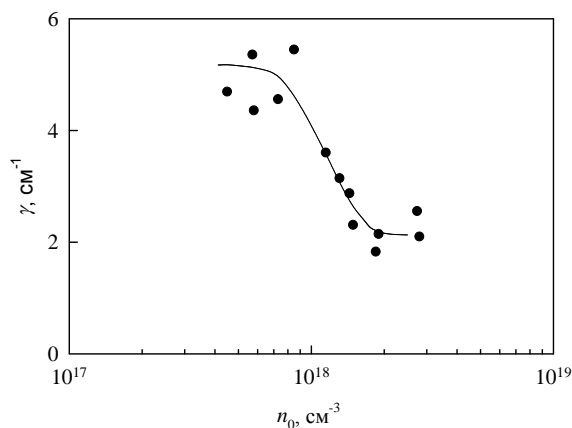


Рис.10. Зависимость величины затухания оптических колебаний решетки от концентрации свободных носителей заряда.

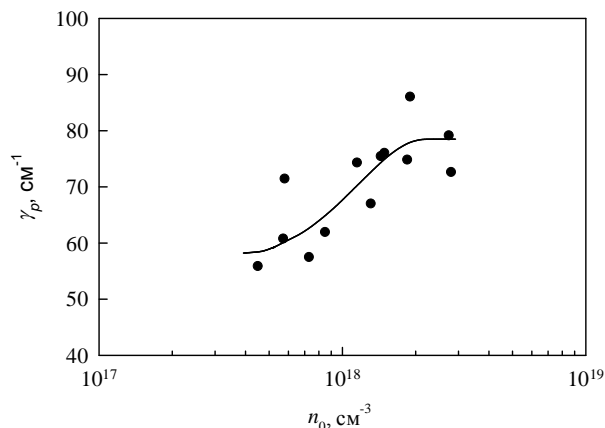


Рис.11. Зависимость обратного времени жизни плазменных колебаний от концентрации свободных носителей заряда.

рялись спектры отражения исследуемых образцов на Фурье – спектрометре IFS в диапазоне $\nu=10000/\lambda=100\div 700\text{cm}^{-1}$. Из процедуры подгонки теоретических и экспериментальных спектров, проводимой методом наименьших квадратов, определялись концентрационные зависимости подгоночных параметров: $\gamma(n_0)$ – величина затухания оптических колебаний решетки (рис.10), $\gamma_p(n_0)$ – обратное время жизни плазменных колебаний (рис.11).

Из рис.10 видно, что величина затухания оптических колебаний решетки при $n_0 > 10^{18}\text{cm}^{-3}$ начинает уменьшаться и при $n_0 \geq 2 \cdot 10^{18}\text{cm}^{-3}$ достигает значений, характерных для нелегированных монокристаллов *GaAs* ($\sim 2\text{cm}^{-1}$). Рис.11 демонстрирует обратную тенденцию концентрационной зависимости обратного времени жизни плазменных колебаний, т.е. значение γ_p возрастает и при $n_0 \geq 2 \cdot 10^{18}\text{cm}^{-3}$ – максимально.

В работе [10] обнаружено, что в полупроводниковых системах при случайном распределении примеси в области плазменной частоты обратное время релаксации импульса имеет ярко выраженный максимум. Пространственная корреляция в распределении рассеивающих примесных центров изменяет структуру данной зависимости, сглаживая этот максимум. Вышеизложенное позволило связать наблюдаемое увеличение значения подгоночного параметра γ_p при $n_0 \geq 2 \cdot 10^{18}\text{cm}^{-3}$ с подавлением генерации плазмонов вследствие коррелированного распределения примесных дефектов.

Таким образом, методами стационарной фотолюминесценции и инфракрасной спектроскопии было показано, что в монокристаллах *GaAs:Te*, выращенных методом Чохральского, в области концентраций свободных носителей

заряда $n_0=10^{17} \div 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ наблюдаются немонотонные изменения величин химического потенциала, среднеквадратичной флуктуации примесного потенциала, сужения запрещенной зоны и спектрального параметра коэффициента поглощения свободными носителями заряда. В интервале $7 \cdot 10^{17} < n_0 < 1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ поведение этих параметров свидетельствует о значительном искажении закона дисперсии свободных носителей заряда. При $n_0 \geq 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ значения параметров указывают на снижение эффективности рассеяния электронов на ионах примеси и уменьшение степени искажения закона дисперсии.

Для удобства интерпретации полученных результатов в работе условно выделено три концентрационных интервала, в которых зависимости имеют различных характер: *I* – $10^{17} < n_0 < 10^{18} \text{ см}^{-3}$, *II* – $10^{18} < n_0 < 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, *III* – $2 \cdot 10^{18} < n_0 < 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

В интервале *I* доминирующими примесными дефектами в *GaAs:Te* являются доноры Te_{As}^+ и примесные комплексы $(V_{Ga}Te_{As})^{-2}$. Концентрация последних монотонно возрастает с ростом уровня легирования, однако остается на порядок ниже, чем концентрация легирующей примеси. В литературе отсутствуют точные сведения о конфигурации данного комплекса, однако экспериментальные данные, полученные различными авторами, позволяют им предполагать, что данный дефект действует как точечный, например, при рассмотрении эффектов рассеяния электронов проводимости, при анализе данных по исследованию микромеханических свойств и т.д. Поэтому, для того, чтобы объяснить значительные искажения закона дисперсии и кристаллической решетки, превышающие эффект, обусловленный действием только ионов доноров, необходимо предположить наличие больших неоднородностей в распределении как доноров Te_{As}^+ , так и в распределении акцепторов $(V_{Ga}Te_{As})^{-2}$.

В области *II* наблюдается смена состава доминирующих рекомбинационных центров: комплекс $(V_{Ga}Te_{As})^{-2}$ сменяется комплексом $(V_{Ga}Te_{As}V_{As})^-$. Увеличение концентрации вакансий в обеих подрешетках с ростом уровня легирования стимулирует процесс диссоциации неоднородностей по вакансионному механизму. Наряду с этим, кулоновское взаимодействие между примесными дефектами Te_{As}^+ и $(V_{Ga}Te_{As}V_{As})^-$ приводит к эффектам спаривания с образованием крупномасштабных пар, которые ведут себя как дипольные рассеивающие центры с малой эффективностью рассеяния и меньшей величиной спектрального параметра. В отношении упругого взаимодействия дипольные компоненты создают деформацию разного знака и, взаимно уравновешивая друг друга, сводят к минимуму искажение кристаллической решетки.

Интервал *III* соответствует области концентрированного твердого раствора примесных дефектов, т.е. твердого раствора с пространственно коррелированным распределением дефектов.

Предположения и выводы согласуются с результатами изучения микромеханических свойств исследуемого материала [11].

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы, изложена научная и практическая ценность, приведены данные об апробации работы и публикациях.

Основные результаты и выводы

1. На основании исследования спектральной зависимости краевой фотолюминесценции серии монокристаллов $GaAs:Te$, выращенных методом Чохральского, с концентрацией свободных носителей заряда $10^{17} \leq n_0 \leq 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ установлено, что краевая люминесценция при температуре 300 К определяется только рекомбинацией свободных электронов и свободных дырок и полуширина спектра определяется величиной химического потенциала, а краевая люминесценция при температуре 6 К определяется только рекомбинацией свободных электронов и дырок, локализованных в состояниях «гауссова хвоста» валентной зоны и полуширина спектра определяется величиной среднеквадратичной флуктуации примесного потенциала.

2. На основе анализа спектральной зависимости краевой люминесценции монокристаллов $GaAs:Te$ при температурах 6 и 300 К обнаружено, что концентрационные зависимости величин химического потенциала $\mu(n_0)$, сужения запрещенной зоны $\Delta E_g(n_0)$ и среднеквадратичной флуктуации примесного потенциала $\gamma_{h,6K}(n_0)$ имеют немонотонный характер. В интервале концентраций $7 \cdot 10^{17} < n_0 < 1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$:

– экспериментальные значения μ и ΔE_g лежат ниже теоретических, что свидетельствует о дополнительном искажении закона дисперсии и искажении кристаллической решетки с доминированием деформации сжатия;

– экспериментальные значения $\gamma_{h,6K}$ превышают теоретические, что свидетельствует об увеличении неоднородности в распределении примеси.

3. На основе анализа спектральной зависимости коэффициента поглощения электромагнитного излучения под краем фундаментального поглощения монокристаллов $GaAs:Te$ при 300 К показано, что:

– концентрационная зависимость величины сужения запрещенной зоны, количественно согласуется с аналогичной зависимостью, полученной из анализа спектров фотолюминесценции;

– концентрационная зависимость среднеквадратичной флуктуации примесного потенциала $\gamma_{h,300K}(n_0)$ у края валентной зоны качественно согласуется с зависимостью $\gamma_{h,6K}(n_0)$, полученной из анализа спектров фотолюминесценции;

– в области концентраций $n_0 > 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ значения $\gamma_{h,300K}$ и $\gamma_{h,6K}$ уменьшаются, что свидетельствует об уменьшении вероятности больших флуктуаций в распределении примесных дефектов.

4. На основании теоретического изучения спектральной зависимости коэффициента поглощения свободными носителями заряда показано, что привлечение модели корреляции ближнего порядка позволяет объяснить уменьшение величины коэффициента поглощения, обусловленного рассеянием на ионах примеси и ослабление его спектральной зависимости в области поглощения свободными носителями заряда.

Личный вклад автора в получение результатов настоящей работы заключается в подготовке образцов, проведении измерений спектров фотолюминесценции, пропускания и отражения, обработке экспериментальных данных, разработке программного обеспечения для анализа спектров, анализе и обсужде-

нии результатов, формулировке выводов, подготовке публикаций к печати.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи:

1. В.А. Богданова, Н.А. Давлеткильдеев, М.М. Нукунов, Н.А. Семиколенова, Е.Н. Сидоров. Изменение механизмов рассеяния электронов проводимости в монокристаллах $GaAs:Te$ при примесном упорядочении // Сборник трудов НИИ СО РАН «Микросенсорика (материалы и элементная база)», Омск, 2002, С.70-79.
2. В.А. Богданова, Н.А. Давлеткильдеев, Н.А. Семиколенова, Е.Н. Сидоров. Эффективная масса электронов в сильно легированном арсениде галлия при упорядочении примесных комплексов // ФТП.–2002.–Т.36.–Вып.4.–С.407-411.
3. В.А. Богданова, Н.А. Давлеткильдеев, Е.Н. Сидоров, Н.А. Семиколенова. Влияние пространственной корреляции примесных дефектов на поглощение свободными носителями заряда в $n+-GaAs$ // Вестник Омского университета.–2004.–№4.–С.37-39.
4. В.А. Богданова, Н.А. Давлеткильдеев, Е.Н. Сидоров, Н.А. Семиколенова. Влияние пространственной корреляции примесных дефектов на оптическое поглощение с участием флуктуационных уровней в $n+-GaAs$ // Вестник Омского университета.–2005.–№2.–С.30-32.
5. В.А. Богданова, Н.А. Давлеткильдеев, М.М. Нукунов, Н.А. Семиколенова, Е.Н. Сидоров. Влияние пространственной корреляции примесных дефектов на снижение уровня упругих напряжений в n^+-GaAs . // Вестник Омского университета.–2005.–№4.–С.45-47.
6. В.А. Богданова, Н.А. Давлеткильдеев, Н.А. Семиколенова, Е.Н. Сидоров. Рассеяние электронов проводимости на пространственно коррелированной системе зарядов в сильно легированном $GaAs:Te$ // ФТП.–2006.–Т.40.–Вып.2.–С.166-168.
7. В.А. Богданова, Н.А. Давлеткильдеев, А.О. Мельшин, Н.А. Семиколенова, Е.Н. Сидоров. Влияние пространственной корреляции примесных дефектов на спектральную зависимость краевой фотолюминесценции монокристаллов $GaAs:Te$ // Вестник Омского университета.–2009.–№.2.–С.122-126.
8. В.А. Богданова, Н.А. Давлеткильдеев, Н.А. Семиколенова, Е.Н. Сидоров. Влияние корреляции в распределении примесных дефектов на параметры связанных плазмон- LO -фононных мод в монокристаллах $GaAs:Te$ // Вестник Омского университета.–2009.–№.2.–С.127-131.

Доклады и тезисы докладов:

1. Е.Н. Сидоров. Исследование примесного упорядочения в $GaAs(Te)$ методом фотолюминесценции // Программа XXIV научной студенческой конференции ОмГУ – Омск: Омский госуниверситет, 2000. – 47с.
2. Е.Н. Сидоров. Эффективная масса электронов в $n-GaAs$ при упорядочении примесных комплексов // Тезисы докладов Второй всероссийской моло-

дежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опти- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 4–8 декабря 2000 г.) – Санкт-Петербург: Изд-во НЕСТОР, 2000. – С.12.

3. Е.Н. Сидоров. Изменение эффективной массы электронов в *n-GaAs* при упорядочении примесных комплексов // Физика конденсированных сред: Тезисы докладов IX Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов (Гродно, 2 – 4 мая 2001 г.) – Гродно: Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, 2001. – С.279-280.

4. V.A. Bogdanova, N.A.Davletkildееv, A.A. Korotenko, N.A. Semikolenova, E.N. Sidorov. Study of electron-impurity interaction in n-type *GaAs* single crystals at ordering of impurity complexes. // The abstract of the 21st International Conference on Defects in Semiconductors. Giessen Germany, July 2001, PA124.

5. В.А. Богданова, Н.А. Давлеткильдеев, А.А. Коротенко, М.М. Нукунов, Н.А. Семиколенова, Е.Н. Сидоров. Исследование рассеяния свободных электронов в монокристаллах *GaAs:Te* при примесном упорядочении // Физика электронных материалов: материалы Международной конференции 1-4 октября 2002 года, Калуга, Россия. / Под ред. К.Г. Никифорова. – Калуга: Издательство КГПУ имени К.Э. Циолковского, 2002. – С.204-205.

6. В.А. Богданова, Н.А. Давлеткильдеев, А.А. Коротенко, М.М. Нукунов, Н.А. Семиколенова, Е.Н. Сидоров. Совершенство кристаллической структуры монокристаллов *GaAs:Te* при примесном упорядочении. // Материалы Восьмой Российской конференции “*GaAs-2002*”. Томск, 2002. – С.11-13.

7. Е.Н. Сидоров. О природе искажения закона дисперсии в монокристаллах *n-GaAs* // Тезисы докладов Четвертой всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опти- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 3 – 6 декабря 2002 г.) – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГПУ, 2002. – С.4.

8. В.А. Богданова, Е.Н. Сидоров. Уменьшение примесного рассеяния в монокристаллах *GaAs:Te* в области примесного упорядочения // Сборник тезисов Девятой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых: Тезисы докладов: В 2т. Т.1. – Екатеринбург-Красноярск: Издательство АСФ России, 2003. – С.212-213.

9. Е.Н. Сидоров, Н.А. Семиколенова. Снижение примесного рассеяния в монокристаллах *GaAs:Te* в области примесного упорядочения // Материалы всероссийской научной молодежной конференции «Под знаком Сигма», Омск. – 2003.– С.44-45.

10. Е.Н. Сидоров. Уменьшение примесного рассеяния в монокристаллах *GaAs:Te* в области примесного упорядочения // Физика конденсированного состояния: Тезисы докладов XI Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов (Гродно, 23 – 25 апреля 2003 г.) – Гродно: Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, 2003. – С.215-216.

11. В.А. Богданова, Н.А. Давлеткильдеев, Н.А. Семиколенова, Е.Н. Сидоров. Пространственная самоорганизация примесного компонента VI группы в мат-

рице *GaAs* // Тезисы докладов VI Международной конференции «Опто-, нано-электроника, нанотехнологии и микросистемы». Ульяновск-Сочи, 2004.

12. В.А. Богданова, Е.Н. Сидоров. Исследование спектров края фундаментального поглощения в объемных сверхструктурах на основе *n-GaAs* // Материалы III всероссийской научной молодежной конференции «Под знаком Сигма», Омск. – 2005. – С.113-114.

13. В.А. Богданова, Н.А. Давлеткильдеев, М.М. Нукунов, Н.А. Семиколенова, Е.Н. Сидоров. Самоорганизация примесных дефектов при распаде твердого раствора на основе соединения *GaAs:Te*. // Девятая конференция «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V» (Томск, 3-5 октября 2006).

Список цитируемой литературы

1. Н.М. Богатов, Э.Н. Хабаров. Взаимодействие структурных компонентов в полупроводниковых твердых растворах // Краснодар: Кубанский университет, 2001. -112с.

2. Е.А. Балагурова, Э.Н. Хабаров. Упорядочение твердых растворов в системах *Ge-Si*, *InAs-CdTe*, *HgTe-CdTe* // свойства полупроводниковых твердых растворов, обусловленные структурными компонентами.- Томск: ТГУ, 1978, с.3-21.

3. Балагурова Е.А., Греков Ю.Б., Кравченко А.Ф., Прудникова И.А., Прудников В.В., Семиколенова Н.А. Изменение механизма рассеяния в арсениде галлия *n*-типа с легированием // Физика и техника полупроводников.–1985.–Т.19.–Вып.9.–С.1566-1570.

4. Семиколенова Н.А. Поляритоны в арсениде галлия *n*-типа // Физика и техника полупроводников.–1988.–Т.22.–Вып.1.–С.137-140.

5. Богданова В.А., Семиколенова Н.А. Фотолюминесценция сильно легированного арсенида галлия при упорядоченном распределении примесных комплексов // Физика и техника полупроводников.–1992.–Т.26.–№5.–С. 818-821.

6. В.А. Богданова. Оптические свойства сильно легированного арсенида галлия *n*-типа // Автореферат на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук.–Омск.–1994.

7. Прудников В.В., Прудникова И.А. Фазовые переходы в пьезоэлектриках, обусловленные системой дипольных центров //Кристаллография.– 1992.–Т.37.–№5.–С.1093-1099.

8. А. П. Леванюк, В.В. Осипов. Краевая люминесценция прямозонных полупроводников // Успехи физических наук.–1981.–Т.133.–Вып.3.–С.427-477.

9. Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. Электронные свойства легированных полупроводников // М., Наука, 1979.

10. W. Szuskiewicz, P. Sobkowicz, B. Witkowska, W. Bardyszewski, C. Julien and M. Balrfski. Influence of impurity charge correlation on free-carrier absorption // Acta Physica Polonica A, Vol. 84, No. 3, 1993.

11. В.А. Богданова, Н.А. Давлеткильдеев, М.М. Нукунов, Н.А. Семиколенова. Влияние корреляции в распределении примесных дефектов на микромеханические свойства монокристаллов *GaAs:Te* // ФТТ.–2008.–Т.50.–вып.2.–С.236-241.