

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.Ф.ИОФФЕ**

---

**На правах рукописи**

**Поletaев Николай Константинович**

**ЭКСИТОННАЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ АРСЕНИДА  
ГАЛЛИЯ ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ ЧИСТОТЫ.**

**(01.04.10 - физика полупроводников)**

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

**Санкт-Петербург 2006**

**Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
Жиляев Юрий Васильевич**

**Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Пихтин Александр Николаевич  
кандидат физико-математических наук  
Брунков Павел Николаевич**

**Ведущая организация - Санкт-Петербургский Государственный  
Университет.**

**Защита диссертации состоится " \_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2006 г.**

**В " \_\_\_ " часов на заседании диссертационного совета**

**К 002.205.02 при Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе  
РАН по адресу: 194223, Санкт-Петербург, Политехническая ул.,  
д.26.**

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

**Автореферат разослан " \_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2006 г.**

**Ученый секретарь**

**Диссертационного совета К 002.205.02**

**Кандидат физико-математических наук**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы:

Широкое применение полупроводниковых материалов в быстро развивающихся сегодня областях электронной техники выдвигает задачи изучения физических закономерностей и явлений в полупроводниковых кристаллах. В частности, актуальной является задача получения эпитаксиальных слоев, высокой степени чистоты, которая представляет как научный, так и практический интерес.

Эпитаксиальный GaAs находит широкое применение в оптоэлектронных приборах, СВЧ технике и детекторах рентгеновского излучения, для которых требуется материал высокой степени чистоты ( $N_D - N_A$  не более  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ ). Определение параметров такого материала с помощью электрофизических измерений сталкивается с серьезными трудностями.

Фотолюминесценция GaAs вблизи краевой области на сегодняшний день достаточно хорошо изучена и может быть положена в основу методики определения параметров эпитаксиальных слоев арсенида галлия высокой степени чистоты. Форма спектра низкотемпературной экситонной фотолюминесценции (НТЭФЛ) и характер затухания интенсивности спектральных линий во времени содержат информацию не только о примесных центрах, участвующих в излучательных переходах, но и о центрах, не связанных с излучательной рекомбинацией. Это позволяет использовать спектры НТЭФЛ арсенида галлия для сравнительного анализа качества материала и количественных оценок параметров, определяющих свойства приборов на его основе (концентрация свободных носителей и их подвижность). Этой задачей и определяется актуальность темы данной работы.

Цель данной работы - экспериментальное изучение люминесценции чистых эпитаксиальных слоев GaAs с целью применения результатов для диагностики качества эпитаксиальных слоев GaAs высокой степени чистоты и количественных оценок электрофизических параметров материала с помощью анализа спектров НТЭФЛ. Выяснение физической природы дефектов снижающих электрофизические параметры материала и определение причин появления таких дефектов.

### Научная новизна:

Проведенные нами исследования позволили установить, что изменение электрофизических свойств чистого арсенида галлия вызвано теми же причинами, которые приводят к трансформации спектра низкотемпературной экситонной фотолюминесценции.

На электрофизические свойства эпитаксиальных слоев арсенида галлия существенное влияние оказывают центры захвата дырок, ответственные за длительное послесвечение двух спектральных линий: экситона, связанного на нейтральном доноре ( $D^0x$ ), и излучательного

перехода донор-зона ( $D^0h$ ). Увеличение концентрации таких центров в материале приводит к снижению подвижности свободных носителей.

**Основные результаты работы:**

Фотолюминесцентные и электрофизические исследования эпитаксиальных слоев арсенида галлия высокой степени чистоты показали, что:

- монотонное изменение электрофизических характеристик GaAs (концентрации мелкой примеси и подвижности свободных электронов) сопровождается плавной трансформацией спектра НТЭФЛ.
- по мере уменьшения концентрации примеси и увеличения подвижности основных носителей в спектрах низкотемпературной фотолюминесценции ( $T=2K$ ) происходит относительное увеличение интенсивности свободного экситона по сравнению с экситоном, связанным на нейтральном доноре.
- полное доминирование линии свободного экситона в спектре низкотемпературной фотолюминесценции арсенида галлия наступает при концентрации мелких доноров  $N_D-N_A \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$  и подвижности свободных электронов  $\mu_{e(T=77K)} \approx 200000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ .
- с уменьшением концентрации примеси и увеличения подвижности основных носителей происходит понижение эффективной температуры свободных экситонов, увеличение их диффузионной длины и времени жизни.

Исследование аномально длительного послесвечения линий НТЭФЛ  $D^0h$  и  $D^0x$  в эпитаксиальных слоях арсенида галлия позволило установить, что:

- длительное послесвечение наблюдается в материале с концентрацией примеси  $N_D-N_A \geq 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Концентрация центров захвата дырок в материале может быть оценена из относительной доли световой энергии, излучаемой образцом после окончания импульса возбуждения.
- центры захвата дырок, ответственные за длительное послесвечение спектральных линий НТЭФЛ  $D^0h$  и  $D^0x$ , являются двухзарядовыми.
- увеличение концентрации центров захвата дырок, ответственных за длительное послесвечение линий НТЭФЛ  $D^0h$  и  $D^0x$ , приводит к уменьшению подвижности свободных носителей в материале.
- вероятность захвата дырок центрами зависит от температуры, одноосного сжатия образца и магнитного поля, приложенного к образцу.
- вероятность захвата дырок уменьшается с ростом температуры.
- при температуре  $T=4,2K$  одноосное сжатие и магнитное поле приводят к монотонному уменьшению вероятности захвата.
- при температуре  $T=2K$  зависимость вероятности захвата от величины магнитного поля имеет локальный максимум.
- затухание интенсивности фотолюминесценции, обусловленное освобождением дырок с центров захвата, описывается законом Беккереля  $I(t)=I_0/(1+\beta t)^\alpha$ , где  $\beta$ -параметр, зависящий от системы единиц, значения показателя степени  $\alpha$  составляют:  $\alpha(D^0h) = 1$ ,  $\alpha(D^0x) = 1,3$  и не зависят от

концентрации центров в материале, температуры, одноосного сжатия и магнитного поля.

**Практическая ценность.**

Результаты фотолюминесцентных исследований позволили разработать неразрушающий бесконтактный метод определения электрофизических характеристик (концентрации и подвижности носителей) эпитаксиальных слоев n-GaAs высокой степени чистоты ( $N_D - N_A < 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ).

**Научная ценность.**

Установлена прямая связь между электрическими характеристиками n-GaAs и формой спектра НТЭФЛ. Экспериментально показано, что по мере уменьшения концентрации остаточной донорной примеси и увеличения подвижности свободных носителей в материале, в спектре НТЭФЛ доминирование линии экситона, связанного на нейтральном доноре, сменяется доминированием линии свободного экситона.

Показано, что степень чистоты арсенида галлия может быть оценена из анализа эффективной температуры подсистемы свободных экситонов и диффузионной длины свободного экситона.

Предложено объяснение особенностей длительного послесвечения спектральных линий  $D^0x$  и  $D^0h$  спектров НТЭФЛ, наблюдаемого при низких температурах в n-GaAs с концентрацией мелкой примеси  $N_D - N_A \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$ .

**Основные положения, выносимые на защиту:**

**Положение 1** (О доминировании линии свободного экситона в чистом арсениде галлия).

Полное доминирование линия свободного экситона в спектре низкотемпературной фотолюминесценции арсенида галлия наступает при концентрациях мелких доноров  $N_D - N_A < 10^{12} \text{ см}^{-3}$  и подвижности свободных электронов  $\mu_e(T=77\text{K}) > 200000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ .

**Положение 2** (Об эффективной температуре и диффузионной длине свободных экситонов в арсениде галлия высокой степени чистоты).

Эффективная температура подсистемы фотовозбужденных свободных экситонов и их диффузионная длина, определенные по спектрам НТЭФЛ при низких температурах ( $T < 4,2\text{K}$ ), отражают степень чистоты арсенида галлия: - в арсениде галлия с концентрацией мелкой донорной примеси  $(N_D - N_A) < 10^{12} \text{ см}^{-3}$  диффузионная длина свободных экситонов при  $T=2\text{K}$  составляет более 10 мкм, а их эффективная температура менее 7К.

**Положение 3** (О центрах захвата дырок в арсениде галлия):

Эпитаксиальные слои n-GaAs содержат точечные дефекты, являющиеся двухзарядовыми центрами захвата дырок, ответственными за длительное послесвечение спектральных линий  $D^0x$  и  $D^0h$ . Увеличение концентрации таких центров захвата дырок приводит к уменьшению подвижности свободных электронов в арсениде галлия и проявляется в уширении линии экситона, связанного на нейтральном доноре, в спектре НТЭФЛ.

**Объем и структура диссертации:**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 147 страниц, 49 рисунков и список литературы из 124 наименований.

**Апробация работы:**

Результаты работы докладывались на 11 Всесоюзной конференции по физике полупроводников (Кишинев 1988 г.), 8-й Международной конференции по динамическим процессам и возбужденным состояниям в конденсированных средах (Лейден 1991 г.), 6<sup>TH</sup> International workshop on expertevaluation & control of compound semiconductor material & technologies. (Budapest, Hungary, 2002 г.), I Украинской научной конференции по физике полупроводников (Одесса, 2002 г.), VI Российской конференции по физике полупроводников (СПб 2003 г.), 2<sup>ND</sup> International conference on materials science and condensed matter physics. (Кишинев, 2004 г.)

**Публикации:**

По материалам диссертации опубликовано 13 работ, из них 8 статей.

**СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, определена цель работы, приведены основные результаты работы, сформулированы выносимые на защиту научные положения.

Первая глава носит вводный характер и посвящена обзору литературы и постановке задачи исследования. Рассмотрены основные электронные и оптические свойств арсенида галлия, которые используются в диссертации.

В первом параграфе рассматривается зонная структура GaAs, его электронные свойства и состояния, связанные с примесными центрами. Приводятся сведения об энергетических уровнях, создаваемых в запрещенной зоне примесными центрами различной химической природы [1].

Во втором параграфе обсуждаются характеристики материала, влияющие на работу приборов, создаваемых на его основе: подвижность, время жизни, диффузионная длина носителей заряда. Приводятся сведения о значениях этих величин в арсениде галлия, их зависимости от температуры и концентрации примесей в материале. Рассматриваются теоретические оценки подвижности и времени жизни носителей в арсениде галлия и результаты их экспериментального определения [2, 3]. В конце параграфа рассматриваются методы определения электрофизических характеристик полупроводникового материала: концентрации свободных носителей, их подвижности и диффузионной длины. Анализируются ограничения, возникающие при применении этих методов для определения характеристик чистых эпитаксиальных слоев GaAs [4, 5].

В третьем параграфе приводятся сведения об экситонной фотолюминесценции GaAs с концентрацией примеси  $(N_D - N_A) < 10^{15} \text{ см}^{-3}$  при низкой температуре ( $T < 20 \text{ K}$ ). Рассматривается природа спектральных линий, наблюдаемых в спектре низкотемпературной экситонной фотолюминесценции (НТЭФЛ) арсенида галлия и особенности их поведения при различных внешних условиях (температуре, интенсивности возбуждения) [6, 7, 8].

Четвертый параграф посвящен обзору работ, в которых рассматривается возможность использования стационарных спектров НТЭФЛ для оценки концентрации примесей в арсениде галлия [9, 10, 11, 12].

В пятом параграфе рассматривается возможность диагностики примесных состояний в GaAs с помощью нестационарной фотолюминесценции [13, 14, 15]. Обсуждаются работы по наблюдению послесвечения экситонных линий в GaAs при низкой температуре. Рассматриваются закономерности затухания интенсивности люминесценции во времени и влияние захвата носителей на глубокие уровни на характер такого затухания. Приводятся сведения о глубоких уровнях в арсениде галлия [16, 17].

В конце главы обсуждается цель исследования, постановка задачи и методы ее решения.

Во второй главе обсуждается техника эксперимента. Приводится описание образцов, использовавшихся в наших экспериментах: их структура и характеристики, полученные с помощью холловских измерений и измерений вольтфарадным методом на барьере Шоттки. Описан метод газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе (HVPE), с помощью которого были получены образцы и обсуждаются особенности метода.

Подробно обсуждается техника измерения оптических характеристик (фотолюминесценции, отражения и пропускания) эпитаксиальных слоев при низких температурах. Описана необходимая для этих измерений криогенная техника. Приводится описание методики регистрации стационарных и задержанных во времени спектров, а также методики время-коррелированного счета фотонов, используемой для измерения затухания интенсивности послесвечения во времени. Обсуждаются методы численного расчета и программные средства, использовавшиеся при анализе экспериментальных данных.

Третья глава диссертации посвящена диагностике качества эпитаксиальных слоев с использованием стационарных спектров НТЭФЛ и исследованию возможности оценки электрических параметров материала на основе анализа стационарных спектров.

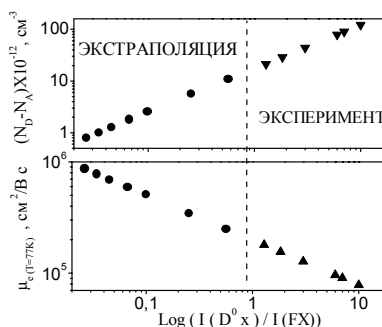
Для сравнительного анализа была выращена серия образцов с монотонно изменяющимися электрофизическими характеристиками: концентрацией мелкой примеси и подвижностью свободных носителей. Следует отметить, что измерение этих величин традиционными методами

было возможно только на части образцов (при концентрации мелкой примеси не менее  $10^{13} \text{ см}^{-3}$  и подвижности не более  $200\ 000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ). Было установлено, что по мере уменьшения концентрации примеси и роста подвижности происходит трансформация спектров НТЭФЛ. В первую очередь изменение касается соотношения интенсивностей линий свободного  $I(\text{FX})$  и связанного  $I(\text{D}^0\text{x})$  экситонов. Следует отметить, что в спектрах образцов, не поддающихся измерению электрофизическими методами, продолжает наблюдаться монотонное изменение отношения интенсивностей указанных линий. Это позволяет аппроксимировать полученную зависимость на образцы, в которых прямое измерение концентрации и подвижности невозможно, и использовать аппроксимацию для определения этих величин по спектрам НТЭФЛ. На рис.1 приведены зависимости концентрации и подвижности носителей от отношения интенсивностей  $I(\text{D}^0\text{x})/I(\text{FX})$ .

Рис.1 Зависимости концентрации фоновой примеси  $N_D-N_A$  и подвижности основных носителей  $\mu_c$  от отношения интенсивностей линий  $\text{D}^0\text{x}$  и  $\text{FX}$  в спектрах НТЭФЛ.

$\nabla$  и  $\Delta$  - величины  $N_D-N_A$  и  $\mu_{c(T=77\text{K})}$ , соответственно.

о - величины  $N_D-N_A$  и  $\mu_c$ , полученные экстраполяцией зависимости  $N_D-N_A$  и  $\mu_c$  от отношения интенсивностей спектральных линий  $\text{D}^0\text{x}$  и  $\text{FX}$ .



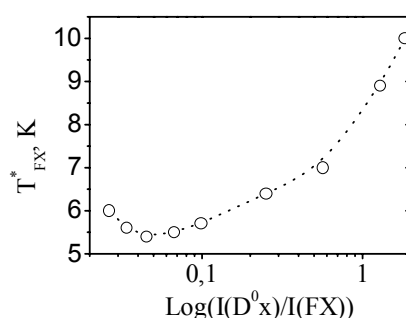
Полученные таким способом значения концентрации и подвижности в наиболее чистых образцах составляют  $N_D-N_A \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ,  $\mu \sim 800\ 000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ . Следует отметить, что полученные значения подвижности превосходят литературные данные. Причины завышенных значений подвижности удалось понять с помощью анализа формы экситонного излучения.

Спектры НТЭФЛ эпитаксиальных слоев  $\text{n-GaAs}$  с различными электрофизическими параметрами отличаются не только соотношением интенсивностей свободного и связанного на нейтральном доноре экситонов, но и формой поляритонной люминесценции. Поэтому возможно применение анализа формы поляритонного излучения для характеристики качества эпитаксиальных слоев [18]. Поляритонная люминесценция очень чувствительна к качеству материала, т.к. релаксация по энергии рожденных светом экситонов при низкой температуре определяется, в основном, их взаимодействием с примесями и дефектами. Действительно, наблюдаемая нами трансформация спектров НТЭФЛ, которая сопровождается изменениями электрических параметров эпитаксиальных слоев  $\text{n-GaAs}$  затрагивает линию поляритонного излучения. Форма поляритонного излучения может



быть рассчитана на основе модели, приведенной в работе [19]. Расчет проводится на основе феноменологических параметров, определяющих распределение свободных экситонов и их взаимодействие с кристаллической решеткой. Важнейшим параметром, определяющим форму поляритонного излучения, является эффективная температура свободных экситонов ( $T^*$ ). Она характеризует распределение экситонов по энергиям, которого они успевают достичь за время жизни и отражает как время жизни, так и эффективность процессов энергетической релаксации. Определенные по спектрам НТЭФЛ эффективные температуры свободных экситонов для рассмотренной выше серии образцов представлены на рис.2.

Рис.2 Зависимость эффективной температуры свободных экситонов от отношения интенсивностей спектральных линий  $D^0x$  и  $FX$ .

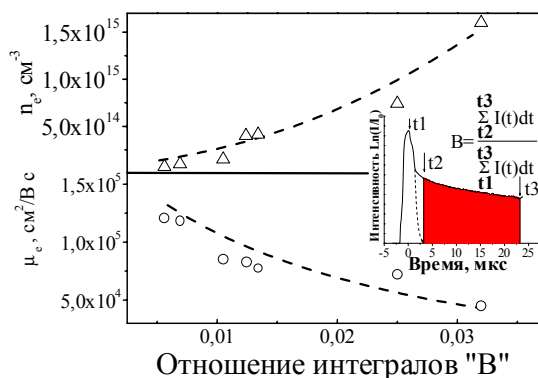


Наличие минимума на кривой обусловлено двумя конкурирующими процессами при уменьшении концентрации примеси в образце. Первый процесс связан с увеличением времени жизни экситона в результате уменьшения вероятности рекомбинации на примесных центрах, второй отражает замедление релаксации экситона по энергии, в которой примесные центры также играют заметную роль. Участок кривой, на котором происходит падение эффективной температуры экситонов при уменьшении отношения  $I(D^0x)/I(FX)$ , отражает увеличение времени жизни свободных экситонов в результате снижения концентрации примеси. Точка минимума соответствует состоянию когда увеличение времени жизни за счет уменьшения концентрации примеси компенсируется падением эффективности диссипации энергии в результате столкновений с примесью. Последней причиной обусловлен небольшой рост эффективной температуры при дальнейшем уменьшении концентрации примеси. Таким образом, эффективная температура свободных экситонов в наиболее чистых образцах определяется их взаимодействием с фононами, а не с примесными центрами. Это позволяет понять, почему при оценке подвижности носителей по соотношению линий в чистых образцах были получены завышенные результаты. Аппроксимация основывалась на участке кривой, соответствующем данным для наиболее грязных образцов, на этом участке кривой зависимость подвижности определяется только

увеличением времени жизни и еще не проявляется эффект замедления релаксации экситонов по энергии.

Еще одним изменением, происходящим при наблюдаемой трансформации спектров НТЭФЛ, связанной с изменением качества эпитаксиальных слоев является уширение линии  $D^0x$ , сопровождающее увеличение концентрации примеси в материале. Было установлено, что  $D^0x$  состоит из двух близко расположенных линий, т.е. уширение линии  $D^0x$  является неоднородным. Ключом к пониманию природы уширения является обнаруженная нами корреляция между спектральным положением  $D^0x$ , ее полушириной и длительным послесвечением, которое наблюдается на линиях  $D^0x$  и  $D^0h$  в  $n$ -GaAs. Длительное послесвечение наблюдается при низких температурах ( $T < 20K$ ) в материале с концентрацией мелкой примеси  $N_D - N_A \geq 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и обусловлено присутствием в материале центров захвата дырок [13]. Взаимосвязь между спектральными характеристиками и послесвечением  $D^0x$  и  $D^0h$  с одной стороны и спектральными характеристиками и электрофизическими характеристиками качества материала с другой позволили предположить, что данные центры захвата могут оказывать заметное влияние на качество эпитаксиальных слоев. Действительно, нами обнаружена корреляция между концентрацией центров захвата дырок  $N_Z$  в  $n$ -GaAs и электрофизическими параметрами слоев: концентрацией и подвижностью свободных носителей. Было установлено, что с ростом концентрации центров захвата, наблюдается увеличение концентрации свободных носителей в материале и уменьшение их подвижности (рис 3). Для сравнения концентраций центров захвата в различных образцах использовалось отношение интегралов "В" под кривой затухания интенсивности фотолюминесценции во времени (см. вставку на рис.3), которое отражает количество запасенных на центрах носителей, и является монотонной функцией  $N_Z$ .

**Рис.3** Изменение концентрации и подвижности основных носителей в зависимости от концентрации центров захвата дырок. На вставке приведен метод расчета отношения интегралов "В"



**Четвертая глава** посвящена экспериментальному изучению процессов заселения центров захвата дырок. Количество захваченных на центры носителей можно характеризовать отношением “В” (см. выше), которое в дальнейшем будем называть заселенностью. Мы исследовали зависимость заселенности от интенсивности возбуждающего света, температуры, одноосного сжатия и магнитного поля.

Зависимость заселенности от интенсивности возбуждения демонстрирует рост в области малых интенсивностей возбуждения (рис. 4) и уменьшение заселенности в области больших интенсивностей возбуждения, второе объясняется насыщением центров захвата.

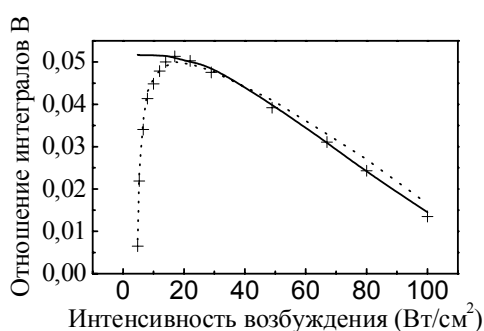
Расчеты показывают, что в области малых интенсивностей возбуждения заселенность независимых центров, захватывающих один носитель, должна стремиться к постоянной величине при уменьшении интенсивности возбуждения и не может объяснить поведения заселенности при малых интенсивностях возбуждения. Для того чтобы объяснить рост заселенности в области малых интенсивностей возбуждения мы предположили, что центром захватывается вторая дырка, причем вклад в послесвечение могут давать только двукратно заряженные центры. Такая модель приводит к системе нелинейных дифференциальных уравнений, допускающей численное решение. Результаты такого расчета, проведенного с подгонкой параметров по экспериментальным данным, приведены на рис.4 пунктирной линией. Хорошее согласие расчета и экспериментальных данных позволяют заключить, что центры являются двухзарядными дырочными ловушками.

**Рис. 4** Зависимость заселенности от интенсивности возбуждения при температуре  $T=2K$ .

Сплошная кривая – расчет заселенности для одночастичной модели центра.

Пунктир – расчет для модели, учитывающей захват двух дырок.

+ - эксперимент.



Измеренные зависимости заселенности от температуры (в диапазоне 2-20K), одноосного давления (в диапазоне до 30 Н/см<sup>2</sup>) и магнитного поля (в диапазоне до 4Т) при температуре  $T=4,2K$  показали монотонное уменьшение заселенности при изменении температуры, одноосного сжатия и магнитного поля. Однако, зависимость заселенности от магнитного поля при температуре  $T=2K$  имеет особенность.

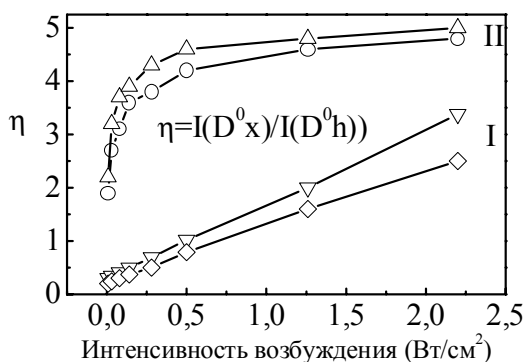
Приведенная выше совокупность экспериментальных данных позволяет составить картину процесса захвата центром дырки. Особенностью процесса является резонансный захват дырки на уровень, принадлежащий центру и, как следствие, резкая зависимость вероятности захвата от взаимного расположения этого уровня и максимума функции распределения носителей, который смещается в результате изменения температуры, одноосного сжатия или магнитного поля.

Следует отметить, что все результаты, приведенные в данной главе, справедливы, как для линии  $D^0x$ , так и для линии  $D^0h$ . Затухание интенсивностей спектральных линий  $D^0x$  и  $D^0h$ , обсуждается в пятой главе.

В спектрах фотолюминесценции, задержанных во времени относительно импульса возбуждения, присутствуют только линии  $D^0x$  и  $D^0h$ . Соотношение интенсивностей этих линий в задержанных спектрах изменяется в зависимости от величины задержки, причем интенсивность свечения линии  $D^0x$  уменьшается быстрее, чем интенсивность свечения линии  $D^0h$ . Затухание интенсивности свечения этих линий со временем хорошо описывается законом Беккереля:  $I(t)=I_0/(1+\beta t)^\alpha$ , где  $I_0=I(0)$ ,  $t$  - время после окончания импульса возбуждения,  $\beta$ -параметр, зависящий от системы единиц. Значения показателя степени  $\alpha$  для линий  $D^0x$  и  $D^0h$  различны и равны  $\alpha(D^0h)=1$ ,  $\alpha(D^0x)=1,3$ .

Наблюдение в задержанных спектрах НТЭФЛ линии  $D^0x$  указывает на присутствие в зоне проводимости электронов. Тот факт, что в задержанных спектрах всегда наблюдаются обе линии  $D^0x$  и  $D^0h$ , говорит о том, что электроны в зоне проводимости связаны с заселением центров захвата дырок. Присутствие в зоне проводимости электронов, возникающих в результате заселения центров захвата дырок, проявляется и в стационарных спектрах НТЭФЛ. С ростом интенсивности возбуждения наблюдается разное поведение отношения интенсивностей указанных линий  $\eta=I(D^0x)/I(D^0h)$  в стационарных спектрах образцов, содержащих и не содержащих центры захвата дырок (рис. 5).

Рис.5 Зависимости отношения  $I(D^0x)/I(D^0h)$  от интенсивности возбуждения. I – чистые образцы, II – образцы, содержащие центры захвата.



Быстрый рост отношения  $\eta$  в образцах, содержащих центры захвата дырок, объясняется увеличением концентрации электронов за счет захвата дырок центрами, а дальнейшее замедление роста отношения  $\eta$  - насыщением центров захвата дырок.

Взаимосвязь концентрации электронов в зоне проводимости с концентрацией заселенных центров захвата дырок позволяет понять различную скорость затухания линий  $D^0x$  и  $D^0h$ . Действительно, уменьшение концентрации заселенных центров захвата дырок приводит к уменьшению концентрации электронов, что и объясняет более быстрое, по сравнению с  $D^0h$ , затухание линии  $D^0x$ .

Исследования влияния температуры, одноосного сжатия и магнитного поля на затухание интенсивности послесвечения показали, что во всем диапазоне изменения этих величин, использовавшемся в наших экспериментах (см. гл. 4), закон затухания послесвечения и скорость затухания остаются неизменными. Эти результаты свидетельствуют о безактивационном механизме освобождения дырки. В совокупности с выводом о двухзарядовой структуре центра это позволяет предложить модель освобождения дырки в результате Оже-процесса. Действительно, выброс дырки в валентную зону происходит в результате взаимодействия двух дырок, локализованных на центре захвата. При этом одна из них переходит в состояние с меньшей энергией, а освободившаяся энергия передается второй дырке. Оценка вероятности такого процесса, проведенная для локального центра в GaAs, показала, что время освобождения дырки хорошо согласуется с характерным временем затухания интенсивности фотолюминесценции, которое наблюдается в эксперименте  $\tau \approx 10^{-5}$  с.

Для понимания природы центров захвата дырок следует отметить следующие закономерности:

- длительное послесвечение наблюдается только в образцах с заметной концентрацией доноров  $N_D - N_A > 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и только на линиях, связанных с донорами.

- при одинаковых концентрациях доноров наблюдаются различные концентрации ловушек. Существуют образцы, в которых при высокой концентрации доноров не наблюдается длительного послесвечения

- с увеличением концентрации центров захвата дырок наблюдается неоднородное уширение линии  $D^0x$  (см. гл. 3).

Эти факты позволяют предположить, что центры захвата дырок, ответственные за длительное послесвечение связаны с комплексом - {донор - собственный дефект}. Чтобы проверить это предположение были проведены эксперименты по отжигу эпитаксиальных слоев в атмосфере водорода. Известно, что отжиг в атмосфере водорода при незащищенной поверхности GaAs приводит к образованию вакансий мышьяка. Эксперименты показали, что отжиг приводит к увеличению концентрации

**центров захвата дырок в материале, что подтверждает предположение о комплексной природе центров захвата дырок.**

В Заключении представлена сводка основных выводов работы.

#### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ РАБОТЫ:

1. Электрофизические и люминесцентные свойства чистого арсенида галлия определяются одними причинами, что позволяет производить количественные оценки электрических характеристик материала на основании оптических измерений.

2. В арсениде галлия высокой степени чистоты снижение концентрации мелких доноров приводит к увеличению интегральной интенсивности излучения свободного экситона по сравнению с интегральной интенсивностью линии экситона, связанного на нейтральном доноре.

3. Полное доминирование линия свободного экситона в спектрах НТЭФЛ наступает при концентраций мелких доноров  $N_D - N_A < 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . При этих условиях подвижность свободных электронов превосходит значение  $\mu_e = 200000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  при  $T = 77\text{К}$ .

4. Степень чистоты арсенида галлия может быть оценена по величине диффузионной длины свободных экситонов и эффективной температуры подсистемы свободных экситонов, определяемых по спектрам НТЭФЛ.

5. В эпитаксиальных слоях n-GaAs могут присутствовать центры захвата дырок. Захват дырок на такие центры и их последующее освобождение приводит к аномально длительному послесвечению спектральных линий НТЭФЛ ( $D^0h$ ) и ( $D^0x$ ).

6. Присутствие в арсениде галлия центров захвата дырок, ответственных за длительное послесвечение, изменяет его электрические свойства и влияет на люминесцентные характеристики. Увеличение концентрации центров захвата дырок приводит к увеличению электронов в зоне проводимости, уменьшению подвижности свободных носителей и уширению линии экситона, связанного на нейтральном доноре, в спектре низкотемпературной экситонной фотолюминесценции.

7. Центры, ответственные за длительное послесвечение спектральных линий НТЭФЛ  $D^0h$  и  $D^0x$ , являются двухзарядными. Захват дырок центром, происходит резонансным образом. Освобождение дырки происходит в результате Оже распада.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

A1. А.В.Акимов, Ю.В.Жиляев, В.В.Криволапчук, Н.К.Полетаев, В.Г.Шофман. Экспериментальное наблюдение дырок в n-GaAs, высвободившихся в результате Оже-распада локализованных состояний. - ФТП, т.25, в.4, с.713-717 (1991).

A2. А.В.Акимов, В.В.Криволапчук, Н.К.Полетаев, В.Г.Шофман. Люминесцентное исследование долговременной кинетики носителей в эпитаксиальном арсениде галлия. - ФТП, т.27, в.2, с.310-322, (1993).

A3. В.В.Криволапчук, Н.К.Полетаев, Л.М.Федоров. Влияние метастабильных состояний на формирование стационарных спектров фотолюминесценции n-GaAs. - ФТП, т.28, в.2, с.310-314 (1994).

- A4. В.В.Криволапчук, Н.К.Полетаев. Влияние метастабильных состояний на высвечивания экситонов в n-GaAs. - ФТП, т.32, в.3, с.307-310 (1998).
- A5. В.В.Криволапчук, М.М.Мездрогина, Н.К.Полетаев. Влияние корреляции между подсистемами мелких и глубоких метастабильных уровней на экситонные спектры фотолюминесценции в n- типе GaAs. - ФТП, т.45, в.1, с.29–32 (2003).
- A6. В.В.Криволапчук, М.М.Мездрогина, Н.К.Полетаев. Заселение метастабильных состояний в n-GaAs. - ФТП, т. 45, в. 5, с.785–789 (2003).
- A7. Yu. V. Zhilyaev, N. K. Poletaev, V. M. Botnaryuk T.A. Orlova, L. M. Fedorov, Sh. A. Yusupova, A. Owens, M. Bavdaz, A. Peacock, B. O' Meara, H. Helava. Optical characterization of ultra-pure GaAs. - Phys. Stat. Sol., (c), v. 0(3), p.1024–1027 (2003).
- A8. В.М.Ботнарюк, Ю.В.Жиляев, Т.А.Орлова, Н.К.Полетаев, Л.М.Федоров, Ш.А.Юсупова. Корреляция электрофизических и люминесцентных свойств GaAs высокой чистоты. - Письма в ЖТФ, т. 30, в. 19, с. 25-29 (2004).
- A9. Yu. V. Zhilyaev, N. K. Poletaev, V. M. Botnaryuk, T.A. Orlova, L. M. Fedorov, Sh. A. Yusupova, B. O' Meara, H. Helava. Optical characterization of ultra-pure GaAs. - 6<sup>th</sup> International workshop on expertevaluation & control of compound semiconductor material & technologis. Budapest, Hungary, (2002).
- A10. В.М.Ботнарюк, Л.В.Горчак, П.В.Гаугаш, Ю.В.Жиляев, Т.А.Орлова, Н.К.Полетаев, Л.М.Федоров. Определение параметров сверхчистого GaAs с помощью анализа спектров низкотемпературной экзтонной фотолюминесценции. – В сборнике тезисов докладов 1<sup>ой</sup> Украинской научной конференции по физике полупроводников, Одесса, с.148, (2002).
- A11. В.М.Ботнарюк, Ю.В.Жиляев, Т.А.Орлова, Н.К.Полетаев, Л.М.Федоров. Корреляция электрофизических и люминесцентных свойств сверхчистого GaAs. - В сборнике тезисов докладов VI Российской конференции по физике полупроводников. Санкт-Петербург, с.417 (2003).
- A12. В.В.Криволапчук, М.М.Мездрогина, Н.К.Полетаев. Влияние метастабильных уровней на экситонные спектры фотолюминесценции в n- типе GaAs. - В сборнике тезисов докладов VI Российской конференции по физике полупроводников, Санкт-Петербург, с.60 (2003).
- A13. V. M. Botnaryuk, Yu. V. Zhilyaev, P. V. Gaugash, L. V. Gorchiak, N. K. Poletaev, T.A. Orlova, L. M. Fedorov, Sh. A. Yusupova. Diagnostics of pure layers GaAs. – In Book of abstracts of the 2<sup>ND</sup> International conference on materials science and condensed matter physics, Kishenev, p. 203 (2004).

Цитируемая литература:

1. Арсенид галлия . Получение, свойства и применение. - под редакцией, Ф.П.Кесаманлы и Д.Н.Наследова, М., Наука, с.471 (1973)/
2. Weisbuch, Borge, Vinter. Quantum Semiconductor structures - Academic Press Inc., Harcourt Brace Jovanovich Published, (1991).
3. Д. З. Гарбузов, В. Б. Халфин. Эффективность и времена излучательных переходов в прямозонном полупроводнике типа GaAs. - Л., препринт (1980).
4. Е. В. Кучис. Методы исследования эффекта Холла. - Советское радио, с.328 (1974).



5. С.М.Рывкин. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. - М., ФИЗМАТГИЗ, с.494 (1963).
6. H. Heim, P. Hiesinger, Luminescence and Excitation Spectra of GaAs. - Phys.Stat.Sol., v.B6, No.2, p.461-470 (1974).
7. H. Barrey, Bebb and E.W.Williams. Transport and optical phenomena - in Semiconductors and Semimetals ed. by R.K.Willardson and A.C. Beer, v.8, p. 394 (1972).
8. В. И. Гавриленко, А. М. Грехов, Д. В. Корбутяк, В. Г. Литовченко. Оптические свойства полупроводников. - Киев (1987).
9. К. Д. Глинчук, А. В. Прохорович. Особенности определения концентрации мелких примесей в полупроводниках из анализа спектров экситонной люминесценции. - ФТП, т.36, в.5, с.519-524, (2002).
10. Z.H.Lu, M.C.Hanna, D.M.Szmyd, E.G.Oh, and A.Majerfeld. Determination of donor and acceptor densities in high-purity GaAs from photoluminescence analysis. - Appl.Phys.Lett., 56(2) (1990).
11. G.Oelgart, S.Gramlich, T.Bergunde, E.Richter, M.Weyer. Assessment of compensation ratio in high-purity GaAs using photoluminescence. - Materials Science and Engineering, B44, p.228-232 (1997).
12. H. F. Pen, FA.J.M. Driessen, S. M. Oisthoorn and L. J. Giling. The influence of impurity concentration on exciton photoluminescence in GaAs and InP. - Semicond.Sci.Technol., 7 p.1400-1406 (1992).
13. А.В.Акимов, А.А.Каплянский, В.В.Криволапчук, Е.С.Москаленко. Письма в ЖЭТФ, 46, 35 (1987)
14. К.С.Журавлев, А.М.Гишинский. Подвижная линия акцепторной фотолюминесценции чистого GaAs. - Письма в ЖЭТФ, т.65, в.1, с.81-85 (1997).
15. К.С.Журавлев, А.М.Гишинский, А.В.Царев, А.Е.Николаенко. Кинетика фотолюминесценции GaAs под действием поверхностной акустической волны. - ФТП, т.35, в.8, с.932-936 (2001).
16. В. Набакумов, В.И.Перель, И.Н.Ясневич. Безызлучательная рекомбинация в полупроводниках. - С-Петербург (1997).
17. А. Милнс. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках - М., Мир с.562 (1977).
18. Ю.В.Жиляев, В.В.Россин, Т.В.Россина, В.В.Травников. Использование спектров поляритонной люминесценции для характеристики качества кристаллов GaAs. - ФТП, т.22, в.10, с.1885-1888 (1988).
19. В.М.Ботнарюк, Ю.В.Жиляев, В.В.Россин, Т.В.Россина, В.В.Травников. Влияние интенсивности возбуждения на люминесценцию поляритонов в арсениде галлия. - ФТТ, т.28, в.1, с.201-207 (1986).