

*На правах рукописи*

Дижур Сергей Евгеньевич

**ЭФФЕКТ ЗАМОРОЖЕННОЙ ТУННЕЛЬНОЙ  
ФОТОПРОВОДИМОСТИ В ДВУМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ  
СИСТЕМЕ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО  $\delta$ -ЛЕГИРОВАННОГО  
СЛОЯ В GaAs**

01.04.10 — физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2006 г.

Работа выполнена в Институте радиотехники и электроники РАН

Научный руководитель — кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
Котельников Игорь Николаевич

Официальные оппоненты — доктор физико-математических наук,  
Алтухов Игорь Витальевич

кандидат физико-математических наук,  
Трофимов Владимир Тимофеевич

Ведущая организация — Институт общей физики РАН

Защита состоится на заседании диссертационного совета Д 002.231.01  
при Институте радиотехники и электроники РАН  
«22» сентября 2006 г. в 10<sup>00</sup> по адресу 125009 Москва ГСП-9, Моховая 11,  
корп.7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ РАН.

Автореферат разослан «11» августа 2006 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-  
математических наук,  
профессор

Артёменко Сергей Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На протяжении последних лет акценты в интересе к полупроводниковым структурам сместились в сторону нанотехнологий. Современные способы получения таких систем (например, метод молекулярно-лучевой эпитаксии [1]) позволяют получать системы с квантовыми точками, напряжёнными слоями, дельта-слоями и пр. Структуры с предельно неоднородным (дельта-,  $\delta$ -) легированием [2,3] вызывают огромный интерес для фундаментальных исследований в области физики твёрдого тела, а также при отработке новых способов изготовления полупроводниковых структур. С практической точки зрения, эти структуры перспективны для создания высокоэффективных электронных устройств. Однако, формирование  $\delta$ -слоя, находящегося в полупроводнике вблизи (около 20 нм) высококачественной границы с металлом, связано с рядом трудностей. Поэтому, изучению таких структур уделено крайне мало внимания.

Данная работа посвящена исследованию влияния внешнего излучения на электронную систему в приповерхностном  $\delta$ -слое таких структур. Исследуемые GaAs структуры с  $\delta$ -легированным кремнием слоем ( $\text{Al}/\delta\text{Si-GaAs}$ ) обладают важным свойством: практически монослойная легирующая примесь кремния создаёт потенциальную яму в однородном (от границы с металлом до подложки) объёме полупроводника, и туннельно-прозрачный барьер между Al и  $\delta$ -слоем позволяет контролировать изменение как заполненных, так и пустых подзон в этой квантовой яме через туннельный ток.

Эффект замороженной, или удержанной (persistent), фотопроводимости (ЗФП) наблюдался, как правило, в  $n$ -легированных GaAs и AlGaAs структурах. ЗФП проявляется в виде изменения проводимости после облучения образца излучением видимого, инфракрасного или рентгеновского диапазонов [2]. В литературе этот эффект объяснялся за счёт влияния примесных состояний: DX-центров, EL2-центров, глубоких уров-

ней, примесных уровней в подложке, барьерных примесей. Подавляющее большинство таких работ было выполнено с помощью магнитотранспортных измерений, не позволяющих получить информацию о незаполненных подзонах и проследить за изменением потенциального профиля структур вне области проводящих каналов. При этом, эффект ЗФП определялся, в основном, по изменениям в концентрации носителей. Туннельная структура типа Al/ $\delta$ -GaAs является наиболее подходящим объектом для исследования эффекта замороженной фотопроводимости в  $\delta$ -слоях. Преимущества такой системы заключаются в следующем. Кроме возможности анализа спектра как пустых, так и заполненных состояний в двумерной электронной системе  $\delta$ -слоя, через туннельное сопротивление можно контролировать изменения потенциального барьера на границе между алюминием и  $\delta$ -слоем, возникающие после подсветки. Как показали расчёты, по туннельным спектрам возможно отличить изменения (после засветки) числа заряженных центров в объёме полупроводника от ионизации DX-центров в самом  $\delta$ -слое.

Целью работы являлось изучение состояний двумерной электронной (2D) системы  $\delta$ -слоя после облучения и получение информации о механизмах, определяющих свойства носителей в двумерной электронной системе после подсветки излучением видимого или инфракрасного диапазонов.

Научная новизна. Благодаря технике туннельной спектроскопии [4] и высококачественным туннельным структурам Al/ $\delta$ -GaAs, впервые наблюдался и описан эффект замороженной туннельной фотопроводимости (ЗТФП); проведены исследования влияния энергии кванта излучения на этот эффект; определена зависимость ЗТФП от температуры и найдена критическая температура эффекта; проведены сравнения экспериментально полученных данных с результатами самосогласованных расчётов для структур с  $\delta$ -слоями; показано, что эффект ЗТФП зависит как от числа заряженных центров в объёме GaAs, так и от величины

заряда на границе эпитаксиального слоя и подложки. При этом, влияние фотоионизации DX-центров на электронный спектр двумерных подзон отличается от ЗТФП, приводя к равномерному сдвигу подзон в  $\delta$ -слое. В туннельной системе Al/ $\delta$ -GaAs при подстройке уровней в режиме ЗТФП впервые наблюдались эффекты отражения электронов на пороге эмиссии LO-фононов.

#### Положения, выносимые на защиту.

- Обнаружение эффекта замороженной туннельной фотопроводимости, заключающегося в сгущении пустых подзон к заполненным состояниям после засветки структуры Al/ $\delta$ -GaAs при низких температурах.
- Обнаружение влияния энергии кванта излучения на эффект замороженной туннельной фотопроводимости.
- Эффект замороженной туннельной фотопроводимости существует лишь при температурах ниже критической  $T_c = 45 \pm 3$  К.
- Доказательство равномерности сдвига уровней при изменении зарядового состояния доноров в самом  $\delta$ -слое.
- Наблюдение отражения электронов на пороге эмиссии LO-фононов при туннелировании в двумерную электронную систему с помощью эффекта замороженной туннельной фотопроводимости.

Достоверность результатов не вызывает сомнений, подтверждена исследованиями на большом количестве образцов и теоретическими расчётами. Часть результатов согласуется с рядом исследований, выполненными как при участии автора, так и другими научными группами.

Практическая ценность работы обусловлена следующим. В результате облучения, состояния незаполненных уровней меняются на десятки мэВ. Это позволяет, в принципе, создать на основе туннельных  $\delta$ -легированных структур, например, высокоэффективные фотоэлектрические при-

ёмники. Благодаря тому, что замороженные состояния сохраняются при гелиевых температурах в течение продолжительного времени (изменения не превышают 0.1% в час), на основе таких систем возможно создание элементов памяти. Засветка, так же как, например, магнитное поле или давление, может применяться в качестве инструмента воздействия на электронную систему, вызывая эффект ЗТФП. Это, в частности, продемонстрировано в представляемой работе.

Апробация работы. Результаты диссертации были доложены на российских и международных конференциях: II всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой оптики и наноэлектронике (С.-Петербург, 2000); Нанофотоника (Н. Новгород, 2001); International Symposium Nanostructures: Physics and Technology (St. Petersburg, Russia, 2001 — 2006); Российская конференция по физике полупроводников (Н. Новгород, 2001, С.-Петербург, 2003, Москва, 2005); 3rd International Conference 'Physics of low-dimensional structures - 3' (Chernogolovka, Moscow District, Russia, 2001); International Conference on the Physics of Semiconductors (Edinburg, Scotland, UK, 2002, Vienna, Austria, 2006); 15th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (Oxford, UK, 2002); 2nd Asian Conference on High Pressure Research (Nara, Japan, 2004); 16th International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems (Albuquerque, New Mexico, 2005); на семинаре "Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления" (Троицк, Московская. обл 2005, 2006); на VIII Международной Школе-семинаре молодых ученых "Проблемы физики твердого тела и высоких давлений" (Сочи, 2004); на конкурсах молодых специалистов ИРЭ РАН (2003 — 2005).

Основные публикации по материалам диссертации приведены в конце автореферата. Результаты диссертации полностью опубликованы в 30 работах, из них 5 статей в ведущих российских и 1 статья в зарубежном журналах, 7 статей в трудах конференций и тезисы докладов 15 всерос-

сийских и международных конференций. Общий объём опубликованных работ по теме диссертации составил 81 страницу.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Она содержит 96 страниц, 29 рисунков, 1 таблицу и библиографию из 42 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, перечислены полученные в диссертации новые результаты, их практическая ценность, представлены положения, выносимые на защиту, и описана структура диссертации.

В главе 1 приводится краткий обзор свойств полупроводниковых структур с  $\delta$ -слоями и основных результатов исследований эффекта замороженной фотопроводимости (ЗФП).

В разделе 1.1 описываются структуры с  $\delta$ -легированными слоями, даётся представление об их зонном строении, перспективах использования для изучения свойств двумерного электронного газа, возникающего в квантовой яме  $\delta$ -слоя.

В разделе 1.2 вводятся основные понятия, связанные с замороженной фотопроводимостью. Рассматриваются известные по литературе физические механизмы возникновения эффекта ЗФП и приводится краткий обзор экспериментальных работ, посвящённых этому эффекту. Ранее, этот эффект исследовался, в основном, магнитотранспортными методами, а применение метода туннельной спектроскопии должно позволить установить связь между засветкой и положениями уровней (как заполненных, так и пустых) в квантовой яме  $\delta$ -слоя. Влияние подсветки на

спектр пустых состояний в  $\delta$ -слое ранее не наблюдалось. Это привело к необходимости введения нового понятия ”замороженной туннельной фотопроводимости” (ЗТФП).

В разделе 1.3 обсуждаются многочастичные явления в туннельных полупроводниковых структурах, для наблюдения которых может быть использована засветка как способ изменения электронного состояния системы. Обозначен круг задач, для решения которых применение ЗТФП может быть целесообразно: исследование межподзонных резонансных поляронов, эффектов взаимодействия электронов с ЛО-фононами при туннелировании.

В главе 2 описываются объекты исследований (туннельные переходы Al/ $\delta$ -GaAs) и метод их исследования — туннельная спектроскопия; вводится понятие туннельного спектра; описаны использованные экспериментальные методики исследования.

Раздел 2.1 посвящён структурам Al/ $\delta$ -GaAs, их внутреннему строению, геометрии туннельных контактов и кратко описан способ их выращивания методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Представлен энергетический профиль дна зоны проводимости такой системы, полученный с помощью самосогласованных расчётов.

Туннельные структуры с одиночным приповерхностным  $\delta$ -легированным слоем Al/ $\delta$ -GaAs были выращены в ИРЭ РАН методом МЛЭ [5]. На каждом из образцов находилось по два туннельных затвора. Исследовались образцы с затворами разных геометрических форм: узкие полоски и восьмиугольники двух размеров. Заряд легирующей примеси кремния на глубине  $\sim 20$  нм от границы раздела Al/GaAs создаёт сильно асимметричный потенциальный профиль, в котором образуются уровни размерного квантования.

В разделе 2.2 описан метод туннельной спектроскопии, введено понятие туннельного спектра и указан способ его измерения.

Близость  $\delta$ -слоя к границе раздела металл-полупроводник позволяет измерять туннельный ток в структурах Al/ $\delta$ -GaAs. Приложение по-



ложительного смещения  $U$  между Al затвором и каналом приводит к туннелированию электронов из заполненных подзон в яме  $\delta$ -слоя в металлический электрод, при отрицательном напряжении электроны из металла туннелируют во все подзоны квантовой ямы ниже уровня Ферми в Al электроде. Проводимость  $\sigma(U) \simeq \sum_i D_i(U)\rho_i(U)$ , где  $D_i(U)$  есть туннельная прозрачность барьера для уровня  $E_i$ ,  $\rho_i(E)$  — плотность состояний в двумерной электронной системе, и суммирование ведётся по каждой  $i$ -той подзоне. Поскольку плотность 2D состояний имеет форму ступеньки, на зависимости  $d\sigma/dU$  от  $U$  появляется ”провал”, когда уровень Ферми в алюминии пересекает дно подзоны. Для возможности сравнения образцов с различающимися величинами  $\sigma$ , введено понятие ”туннельного спектра”, определяемого как зависимость логарифмической производной  $S(U) = d \ln \sigma / dU \equiv (d\sigma/dU)/\sigma$  туннельной проводимости от  $U$  и измеряемой в обратных вольтах.

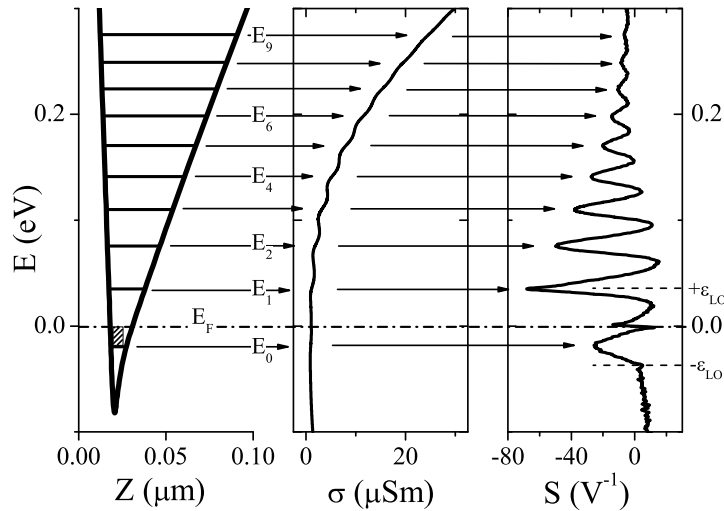


Рис. 1. Потенциальный профиль дна зоны проводимости туннельного перехода Al/ $\delta$ -GaAs, туннельная проводимость и туннельный спектр. Обозначены положения десяти первых энергетических уровней  $E_i$  в  $\delta$ -легированном слое (заполнена только одна подзона).

Раздел 2.3 описывает эксперименты по изучению эффекта ЗТФП при различных засветках и температурах.

Для подсветки образцов использовались три источника излучения: светодиоды видимого (красного) и ближнего инфракрасного диапазонов с энергиями квантов  $\simeq 2$  и  $\simeq 1.3$  эВ, соответственно, и CO<sub>2</sub>-лазер с энергией  $\simeq 0.13$  эВ. Энергия ширины  $E_g$  запрещённой зоны GaAs при температуре  $T = 4.2$  К равна 1.52 эВ. Это позволило исследовать влияние энергии светового кванта на величину эффекта.

Для определения температурной зависимости эффекта ЗТФП были проведены серии экспериментов, состоящие в охлаждении не засвеченного образца до 4.2 К, засветки, последующего отогрева до промежуточных температур, вплоть до температуры  $\simeq 80$  К, и обратного охлаждения с измерением туннельных спектров во всех этих точках.

Эксперименты под квазигидростатическим давлением были выполнены в диапазоне до 2.5 ГПа при температуре 4.2 К в системе цилиндр-поршень.

Глава 3 Посвящена результатам экспериментов. Показана связь времени насыщения эффекта ЗТФП с геометрией туннельных затворов при различных энергиях облучающих квантов. Определена температурная зависимость ЗТФП. Найдена критическая температура эффекта. Проведено сравнение с результатами измерений под давлением.

В разделе 3.1 описаны результаты первых наблюдений эффекта ЗТФП. Было показано, что при гелиевых температурах положения незаполненных подзон  $E_i$  после засветки красным светодиодом значительно сдвигаются, "сгущаясь" к основному состоянию  $E_0$ , которое практически не меняется. Именно такое поведение и было названо эффектом ЗТФП. При дальнейшем увеличении времени засветки  $t$ , начиная с некоторого значения  $t_S$ , положения подзон более не изменялись: эффект достигал насыщения. При этом наблюдалась полная воспроизводимость замороженных состояний после отогрева образцов до комнатной температуры.

Раздел 3.2 представляет результаты исследований зависимости положения двумерных подзон от времени засветки и энергии квантов излучения (больше и меньше ширины запрещённой зоны) при различных гео-

метриях туннельных затворов. Сравнение результатов для образцов с близкими параметрами (вырезанных из одной пластины), но с различной геометрией туннельных затворов, позволило выявить дополнительные особенности ЗТФП для случаев засветок светодиодом видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов.

Выяснилось, что при засветке видимым излучением важную роль играет малая прозрачность Al затвора. Это приводит к тому, что времена до насыщения эффекта ЗТФП для туннельных затворов различной геометрии могут отличаться на несколько порядков.

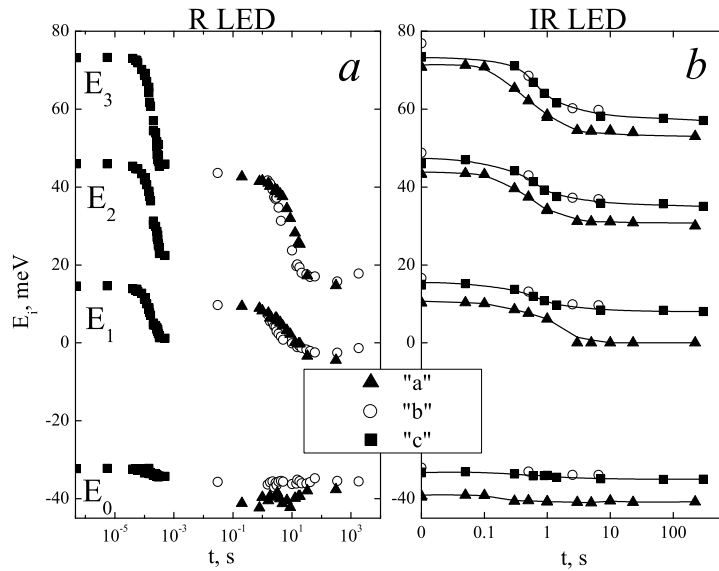


Рис. 2. Зависимость положения подзон от времени засветки  $t$  красным и ИК светом для разных геометрий туннельных затворов. Образцы типа "а" и "б": октеты 0.7 и 0.2 мм, образцы типа "с" – полоски шириной 10  $\mu\text{м}$ .

Изменения в туннельных спектрах после облучения видимым и ИК светом качественно не отличаются. Тем не менее, максимальная величина эффекта в случае подсветки с энергией квантов  $h\nu < E_g$  оказывается примерно вдвое меньше, чем для  $h\nu > E_g$ .

В этом же разделе приводятся результаты наблюдения ЗТФП при облучении структуры Al/ $\delta$ -GaAs CO<sub>2</sub>-лазером с энергией  $h\nu \simeq 0.13$  эВ  $\ll E_g$ . Сдвиг подзон, в этом случае, при засветке до насыщения оказался

таким же, как и для ИК-светодиода.

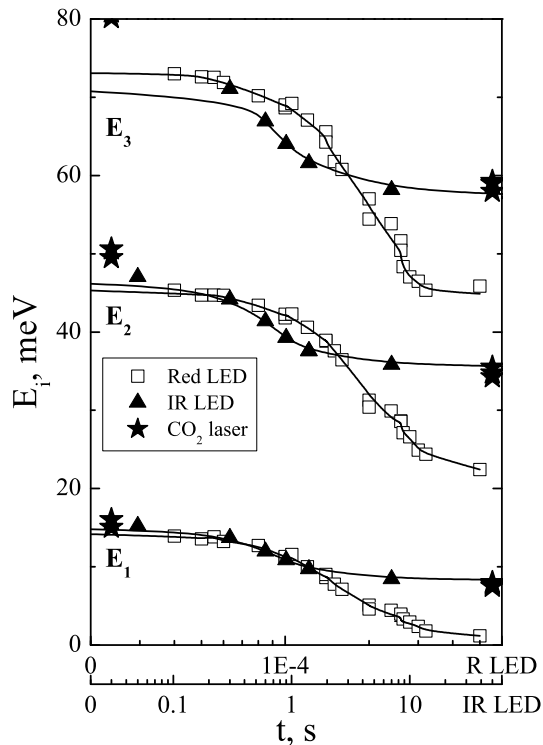


Рис. 3. Влияние засветки излучением с разными энергиями квантов на сдвиг пустых подзон.  $\square$  – красный светодиод  $h\nu_R \simeq 2$  эВ  $> E_g$ ;  $\blacktriangle$  – ИК светодиод  $h\nu_{IR} \simeq 1.3$  эВ  $< E_g$ . Отдельно показаны оси  $t$  для красного светодиода (верхняя шкала) и ИК (нижняя).  $\star$  – положения подзон до и после засветки  $\text{CO}_2$ -лазером с  $h\nu_{\text{CO}_2} \simeq 0.13$  эВ  $\ll E_g$  в течение времени  $t > t_s \simeq 600$  с.

В разделе 3.3 описываются результаты исследований температурных зависимостей эффекта ЗТФП.

Точные измерения туннельных спектров в режиме ЗТФП при температуре 77 К и засветке красным светом показали отсутствие эффекта сгущения 2D подзон: уровни размерного квантования сдвигаются к зоне проводимости приблизительно на одну и ту же величину  $\sim 1$  мэВ. Была проведена серия измерений туннельных спектров при температурах от 4.2 до 76 К после засветки образца при 4.2 К, из которых найдена критическая температура  $T_c = 45 \pm 3$  К, ниже которой эффект ЗТФП сохраняется, а при более высокой, положения подзон возвращаются практически к своим темновым значениям.

Глава 4 содержит анализ экспериментальных данных.

В разделе 4.1 приводятся оценки коэффициента пропускания излучения в структуре  $\text{Al}/\delta\text{-GaAs}$ . В области энергий  $\simeq 2$  эВ GaAs является хорошо поглощающим материалом с глубиной поглощения  $\sim 1$  мкм. Поэтому, в подзатворную область образцов типа "а" и "b" (октеты 0.7 и 0.2

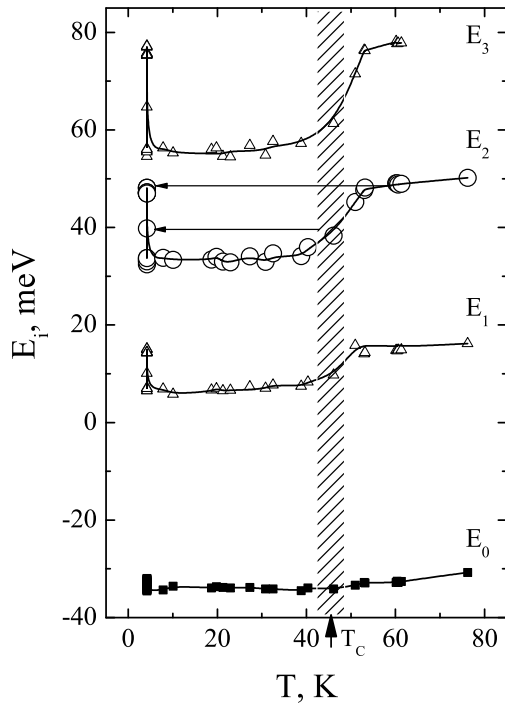


Рис. 4. Температурная зависимость эффекта ЗТФП. Показаны положения подзон до и после засветки при  $T = 4.2$  К и отогрева засвеченного образца до температуры  $T$ . Отмечено положение критической температуры  $T_c = 45 \pm 3$  К. На примере подзоны  $E_2$  стрелками показано, к каким положениям возвращается эта подзона при охлаждении до 4.2 К образца, отогретого до температуры  $T$ .

мм) излучение может проникать, лишь проходя через Al-плёнку. Оценки соответствующего коэффициента прохождения показывают, что это должно приводить к сильному ослаблению интенсивности излучения. В образцах типа "с", (узкие полоски шириной  $\sim 10$  мкм), засветка приграничных с затвором областей, проникновение излучения под затвор на его краях (дифракционные эффекты) и фотогенерируемые процессы дрейфа и диффузии неравновесных носителей заряда под затвором приводят к тому, что характерные времена  $t_S$  не ограничиваются малой прозрачностью Al-плёнки, а определяются мощностью излучения, попадающего в GaAs с краёв затвора. В работе показано, что характерные времена насыщения эффекта ЗТФП для образцов разных типов, облучаемых красным светодиодом, различаются на 4–5 порядков вследствие малой прозрачности Al-плёнки. Оценка прозрачности при гелиевых температурах даёт величину  $\sim 10^{-4} - 10^{-5}$ .

В случае же засветки с энергией квантов  $h\nu < E_g$  (ИК светодиод), GaAs становится прозрачным. Это приводит к тому, что подзатворная область образцов засвечивается падающим излучением за счёт отражения

от задней и боковых границ образцов, слоев металлизации. Как следствие, характерные времена насыщения эффекта ЗТФП не зависят от геометрии образцов.

В разделе 4.2 выдвигаются предположения о происходящих в туннельной структуре Al/ $\delta$ -GaAs процессах после воздействия на неё облучения.

Полученные результаты выявляют два эффекта в исследованных структурах при гелиевой температуре после засветки красным светом: ”сгущение” 2D уровней размерного квантования и увеличение концентрации электронов в двумерной электронной системе (ДЭС). Туннельная спектроскопия позволяет контролировать квантовую яму: туннельный ток определяется потенциальным барьером на гетерогранице Al/GaAs, а положение уровней в туннельном спектре связано с потенциальным профилем ямы в глубине полупроводника. Поскольку проводимость  $\sigma$  при  $U = 0$  зависит от высоты барьера  $\Phi_S$  на границе раздела Al/GaAs как  $\sigma \propto \exp(-2(\Phi_S + E_F)/\mathcal{E}_{00})$ , где  $\mathcal{E}_{00}$  характерная энергия туннелирования, наблюдаемое поведение  $\sigma(t)$  показывает пренебрежимо малое изменение  $\Phi_S$  после подсветки. Следовательно, сгущение 2D подзон в  $\delta$ -слое в режиме ЗТФП может быть объяснено только уширением профиля потенциальной ямы со стороны объёма GaAs. По всей видимости, это связано с уменьшением концентрации заряженных акцепторов  $N_a$  в объёме GaAs вследствие фотовозбуждения захваченных на акцепторные уровни электронов вне области  $\delta$ -легирования. Проведённый оценочный расчёт зависимости от концентрации примесных центров положений подзон  $E_i(N_a)$ , качественно подтверждает это предположение.

Наблюдаемое отсутствие ЗТФП при температуре 77 К и равномерный сдвиг уровней размерного квантования позволил сделать предположение, что такое поведение можно связать с увеличением концентрации активных примесей (например, за счёт фотоионизации DX-центров) в самом  $\delta$ -слое. Моделирование в программе самосогласованных расчётов показало практически однородный сдвиг уровней в этом случае.

Раздел 4.3 описывает возможный механизм возникновения эффекта ЗТФП. Обнаруженные различия после засветки красным и ИК светом,

по-видимому, связаны с генерацией электронно-дырочных пар, которая возникает, в дополнение к фотоионизации глубоких центров и акцепторных состояний в GaAs, только для излучения с  $h\nu > E_g$ . В этом случае, статическое электрическое поле приповерхностного  $\delta$ -слоя приводит к пространственному разделению фотогенерируемых электронов и дырок в области между  $\delta$ -слоем и подложкой. Электроны "сваливаются" в  $\delta$ -слой и стекают в омические контакты по 2D-каналу. Дырки же, двигаясь в сторону объёма GaAs, могут накапливаться в области границы эпитаксиального слоя и подложки. Оставшийся после выключения подсветки заряд дырок, действуя как "обратный затвор", может значительно опустить уровень Ферми в глубине GaAs, уменьшая тем самым изгиб зон в обеднённой области между  $\delta$ -слоем и подложкой. Таким образом, можно предположить, что при  $h\nu > E_g$  уменьшение заряда акцепторных или глубоких центров в эпитаксиальном слое GaAs, за счёт их фотоионизации, приводит к уширению потенциальной ямы приповерхностного  $\delta$ -слоя, которое вызывает "сгущение" пустых уровней (эффект ЗТФП) и некоторое увеличение концентрации электронов в 2D-канале. Кроме того, процесс накопления заряда дырок на "обратном затворе" структуры, возникающий за счёт генерации электронно-дырочных пар, вызывает дополнительное "распрямление" потенциального профиля от  $\delta$ -слоя в объём GaAs.

В случае  $h\nu < E_g$  генерации электрон-дырочных пар не возникает и сдвиг незаполненных уровней в  $\delta$ -слое может быть обусловлен только перезарядкой примесных центров в эпитаксиальных слоях, а возможно, и глубоких состояний в подложке. Последнее может приводить к эффекту ЗФП в подложке образца, что в свою очередь, изменит распределение потенциала вблизи 2D-канала. В результате отсутствия межзонных переходов при  $h\nu < E_g$  можно ожидать, что сдвиг уровней окажется меньше, чем для  $h\nu > E_g$ , что и наблюдается в эксперименте.

Эти предположения подтверждаются и результатами расчётов:

а) с уменьшением уровня  $p$ -легирования (соответствующее уменьшению концентрации заряженных центров, вызванному фотоионизацией) и

б) опусканием дна зоны проводимости в объёме GaAs (соответствующее накоплению положительного заряда на границе обеднённой области или границе эпитаксиального слоя и подложки за счёт образования электрон-дырочных пар).

В обоих случаях наблюдается хорошее согласие теории и эксперимента.

В разделе 4.4 обсуждаются эффекты, связанные с наличием DX-центров в области  $\delta$ -слоя и их фотоионизацией.

Влияние фотоионизации DX-центров в  $\delta$ -слое если и имеет место, то даёт лишь незначительный вклад для исследованных образцов с  $N_{Si} < 5 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Эксперименты при высоких гидростатических давлениях подтверждают, что уровень DX-центров находится значительно выше уровня Ферми в  $\delta$ -слое при атмосферном давлении. Следовательно, число носителей  $N_{DX}$ , захваченных на эти центры в процессе охлаждения образца, не превышает нескольких процентов от концентрации ДЭС. Оценки показывают, что при  $E_{DX} = E_C + 170 \text{ мэВ}$ , где  $E_{DX}$  есть уровень DX-центров, а  $E_C$  – дно зоны проводимости,  $N_{DX} \sim 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Фотоионизация DX-центров может объяснить наблюдавшийся равномерный сдвиг подзон с  $\Delta E_i \simeq 1 \text{ мэВ}$  при  $T = 77 \text{ К} > T_c$ .

Глава 5 описывает применение ЗТФП для достижения условий резонанса при исследованиях многочастичных особенностей в туннельных спектрах.

В разделе 5.1 приводятся примеры задач, в решении которых применение ЗТФП как способа изменения состояния электронной системы может оказаться наиболее действенным инструментом.

Раздел 5.2 описывает эффект отражения электронов при туннелировании. Исследованы структуры Al/ $\delta$ -GaAs, в которых наблюдали туннелирование в одну или в несколько подзон ДЭС приповерхностного  $\delta$ -легированного слоя. Используя внешние воздействия, было возможно расталкивать подзоны  $\delta$ -слоя с помощью диамагнитного сдвига в параллельном магнитном поле или сгущать их за счёт эффекта ЗТФП. Обнаружено отражение электронов на пороге эмиссии ЛО-фонона при



включении новой подзоны в процесс туннелирования, когда к неупругому туннелированию в пределах одной подзоны добавляются межподзонные переходы электронов в двумерной системе с испусканием ЛО-фонона.

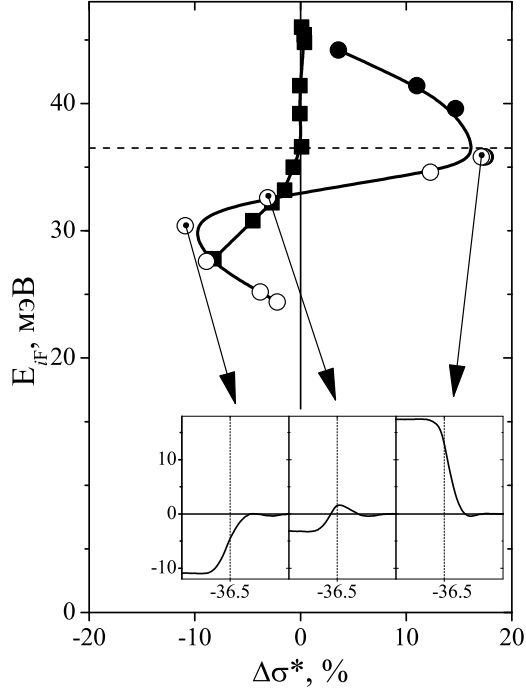


Рис. 5. Экспериментальная зависимость амплитуды ступеньки  $\Delta\sigma^*$  в туннельной проводимости от положения уровня  $E_{1F}$  для образца с одной заполненной подзоной и от  $E_{2F}$  для образца с двумя заполненными подзонами.

Для выяснения причины появления отражения (отрицательная ступенька проводимости  $\Delta\sigma^* = \Delta\sigma_{phl}/\sigma_0 < 0$ , где  $\Delta\sigma_{phl}$  есть изменение проводимости, вызванное электрон-фононным взаимодействием, и  $\sigma_0$  – фооновая проводимость) наиболее удобным объектом является ДЭС малой плотности с концентрацией 2D-электронов  $\simeq 5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . В образцах с энергией Ферми  $E_F$  всего 20 мэВ в единственной заполненной подзоне, в процессе туннелирования участвуют не более двух подзон на пороге эмиссии ЛО-фонона.

Вблизи порога испускания фонона, туннельный ток, в основном, определяется переходами в незаполненные состояния основной подзоны  $E_0$ . При этом  $\Delta\sigma^* > 0$ , что соответствует обычным процессам неупругого туннелирования — открытию дополнительного канала тока с уровня Ферми металла при испускании ЛО-фонона. Подъём дна  $E_{1F} = E_1 - E_F$  над порогом за счёт диамагнитного сдвига показал, что  $\Delta\sigma^*$  остаётся положительной. В этом случае открывается дополнительный канал

для туннелирования внутри одной подзоны с испусканием LO-фонона во всей области барьера между металлом и ДЭС. Следовательно, туннельная проводимость должна возрасти, а вклад от неупругого внутривозонного электрон-фононного рассеяния  $\Delta\sigma_{inter}$  соответствовать положительной ступеньке в проводимости. После подсветки образца излучением светодиода до насыщения эффекта ЗТФП, величина  $E_{1F}$  оказывается существенно ниже порога. Электроны из металла туннелируют уже в две подзоны ДЭС. С включением второй подзоны  $E_1$  ( $E_1 - E_0 > \varepsilon_{LO}$ ) в туннельный перенос заряда, электроны могут, испустив LO-фонон с ненулевой компонентой импульса  $k_z$  в направлении туннелирования, перейти в подзону  $E_0$ . В результате, добавочный вклад  $\Delta\sigma_{intra}$  в проводимость, связанный с такими переходами, оказывается меньше нуля. Качественно это можно объяснить обратным рассеянием (отражением) туннелирующих электронов при столкновении с LO-фононами, эмитированными при межподзонных переходах в ДЭС. В этом случае, относительная проводимость в области порога определяется уже обоими вкладами:  $\Delta\sigma^* = (\Delta\sigma_{intra} + \Delta\sigma_{inter})/\sigma_0$ . Когда величина  $|\Delta\sigma_{inter}|$  превысит  $\Delta\sigma_{intra}$ ,  $\Delta\sigma^*$  окажется отрицательной, что и наблюдается в эксперименте.

Полученные результаты показывают, что процесс, соответствующий отражению электронов, связан с включением в процесс туннелирования новой подзоны и эмиссией LO-фононов при переходах электронов из этой подзоны в основное состояние в области ДЭС. Это согласуется с расчётами [6] для 3D туннельных систем, где анализ мнимой части собственной энергии электрон-фононной системы, показал наличие эффекта отражения при туннелировании.

В заключении приведены основные результаты диссертации.

Основные результаты, полученные в работе

1. Исследовано влияние облучения видимым светом на структуры Al/ $\delta$ -GaAs с приповерхностным дельта-легированным слоем с помощью метода туннельной спектроскопии. Обнаружен эффект заморожен-

ной туннельной фотопроводимости в таких структурах при гелиевых температурах: незаполненные уровни размерного квантования в яме  $\delta$ -слоя сгущаются к основному состоянию. При этом, сдвиг пустых уровней составлял  $10 \dots 50$  мэВ, в то время как энергия заполненного состояния изменялась на  $2 \dots 5$  мэВ.

2. Определено влияние энергии кванта излучения на эффект ЗТФП. Показано, что эффект ЗТФП при засветке видимым (красным) светом с энергией  $h\nu \simeq 2$  эВ примерно вдвое превышает результат воздействия излучения ближнего инфракрасного диапазона с энергией  $\simeq 1.3$  эВ. Обнаружено, что после воздействия излучением  $\text{CO}_2$ -лазера с  $h\nu \simeq 0.13$  эВ  $\ll E_g$  величина эффекта совпадает с результатом засветки ИК-светодиодом.
3. Получена зависимость эффекта ЗТФП от температуры. Найдена критическая температура  $T_c = 45 \pm 3$  К, ниже которой эффект ЗТФП сохраняется. При более высокой  $T > T_c$  положения подзон возвращаются практически к своим "темновым" значениям.
4. Показано, что с помощью метода туннельной спектроскопии в туннельных структурах с  $\delta$ -слоем можно отличить изменение зарядового состояния в объёме GaAs от зарядового состояния в  $\delta$ -слое.
5. Сделан вывод о том, что при межзонной подсветке ( $h\nu > E_g$ ) в наблюдаемый эффект дают вклад процессы фотовозбуждения в объёме GaAs:
  - а) межзонные переходы электронов с последующим накоплением положительного заряда в глубине полупроводника
  - б) ионизация глубоких центров в эпитаксиальном слое и/или подложке.При  $h\nu < E_g$  сдвиг подзон связан только с последним процессом.
6. Применение эффекта замороженной туннельной фотопроводимости позволило обнаружить и исследовать отражение электронов на пороге эмиссии  $LO$ -фононов при туннелировании в двумерную элек-

тронную систему  $\delta$ -слоя в GaAs. Кроме того, удалось проследить переход от обычного неупругого туннелирования к эффекту отражения электронов.

Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях:

1. И.Н. Котельников, С.Е. Дижур. Туннельная спектроскопия 2D подзона дельта-слоя в режиме замороженной туннельной фотопроводимости. Нанопотоника. Материалы совещания. Нижний Новгород 26-29 марта 2001 г. Институт физики микроструктур РАН. с. 236-239
2. И.Н. Котельников, С.Е. Дижур. Межподзонный резонансный полярон в приповерхностном дельта-легированном слое GaAs. Нанопотоника. Материалы совещания. Нижний Новгород 26-29 марта 2001 г. Институт физики микроструктур РАН. с. 159-162
3. I.N. Kotel'nikov, S.E. Dizhur. Persistent 2D states of  $\delta$ -layer quantum well and resonant polaron in  $\delta$ -GaAs/Al structures. Proceedings of 9th International Symposium Nanostructures: Physics and Technology, St. Petersburg, Russia, June 17-22, 2001, с.286-289.
4. И.Н. Котельников, С.Е. Дижур, Ю.В. Федоров, А.В. Гук. Резонансный 2D-полярон в приповерхностном дельта-легированном слое GaAs. V Российская конференция по физике полупроводников. 2001, Нижний Новгород, 10-14 сентября. Тезисы докладов. т.2 с. 308.
5. S.E.Dizhur, I.N.Kotel'nikov, V.A.Kokin, and F.V.Shtrom 2D-subband spectra variations under persistent tunnelling photoconductivity condition in tunnel delta-GaAs/Al structures PLDS Vols. 11/12 (2001) pp.233–244,
6. I.N. Kotel'nikov, S.E. Dizhur, F.V. Shtrom Many-body lines in tunneling spectra of Al/ $\delta$ -GaAs junctions near resonant polaron threshold. Pro-

- ceedings of 10th International Symposium Nanostructures: Physics and Technology, St. Petersburg, Russia, June 17-21, 2002, c.323-326.
7. E. M. Dizhur, A. N. Voronovsky, I. N. Kotelnikov, S. E. Dizhur, and M. N. Feiginov Experimental study of pressure influence on tunnel transport into 2DEG. Phys. Stat. Sol. (b) 235, No2, pp. 531-535 (2003), WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
  8. I. N. Kotel'nikov, E. M. Dizhur, A. N. Voronovsky, S. E. Dizhur, V. A. Kokin and M. N. Feiginov Tunneling spectroscopy near-surface delta-layer in GaAs at high pressure Proceedings of the 11th International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology", St. Petersburg, Russia, June, 23-28, 2003, pp. 117-118, Ioffe Institute, St. Petersburg, 2003.
  9. И.Н. Котельников, С. Е. Дижур, Ф. В. Штром, Н. А. Варванин, Поляронные и пороговые фоновые особенности в туннельных спектрах структур на основе GaAs с дельта-легированием Тезисы докладов 6-ой Российской конференции по физике полупроводников, С.-Петербург, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 27-31 октября 2003 г., сс. 347-348
  10. С. Е. Дижур, И.Н. Котельников, Н.А. Мордовец, В.А.Кокин, Ф. В. Штром Туннельная спектроскопия приповерхностного дельта-легированного слоя как метод исследования "замороженных" состояний в GaAs Тезисы докладов 6-ой Российской конференции по физике полупроводников, С.-Петербург, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 27-31 октября 2003 г., сс. 510-511.
  11. I.N. Kotel'nikov, S.E. Dizhur Polaron singularities in tunnelling spectra of high density 2D electron system in delta-layer Proceedings of 12th International Symposium Nanostructures: Physics and Technology, St. Petersburg, Russia, June, 21-25, 2004, pp. 366-367. Ioffe Institute, St.Petersburg, 2004

12. Е.М.Дижур, А.Н.Вороновский, А.В.Федоров, И.Н.Котельников, С.Е.Дижур Переход приповерхностного  $\delta$ -слоя туннельной структуры Al/ $\delta$ (Si)-GaAs в диэлектрическое состояние под давлением Письма в ЖЭТФ, т. 80, в.6, сс. 489-492 (2004).
13. И. Н. Котельников, С. Е. Дижур Рассеяние с участием LO-фононов при туннелировании в двумерную электронную систему дельта-слоя Письма в ЖЭТФ т.81, в. 9, сс. 574-577 (2005)
14. I. N. Kotel'nikov, S. E. Dizhur, N. A. Mordovets Decrease of tunnelling conductance near LO-phonon emission threshold in Al/delta-GaAs junctions Proceedings of 13th International Symposium Nanostructures: Physics and Technology, St. Petersburg, Russia, June 20-25, 2005, pp.171-172.
15. И.Н.Котельников, С.Е.Дижур Пороговые особенности и межподзонный полярон в туннельной системе Al/delta-слой GaAs VII Российская конференция по физике полупроводников "Полупроводники-2005" Москва, 18-23 сентября 2005 г. (Звенигород, пансионат "Ершово") Тезисы докладов. Москва, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 2005, Вт II-15с с.215
16. С.Е.Дижур, И.Н.Котельников, М.Е.Фейгинов Температурная граница эффекта замороженной туннельной фотопроводимости в переходе Al/d-GaAs VII Российская конференция по физике полупроводников "Полупроводники-2005" Москва, 18-23 сентября 2005 г. (Звенигород, пансионат "Ершово") Тезисы докладов. Москва, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 2005, Вт II-16с с.216
17. И.Н. Котельников, С.Е. Дижур, М.Н. Фейгинов, Н.А. Мордовец Влияние энергии фотонов и температуры на эффект замороженной туннельной фотопроводимости структур Al/delta-GaAs Физика и техника полупроводников т.40 в.7, сс. 839-845, 2006
18. С.Е. Дижур, И.Н. Котельников, Е.М. Дижур Отражение электронов при туннелировании и межподзонный полярон в двумерной элек-

тронной системе дельта-слоя в GaAs Радиотехника и электроника, т.51, в.5, стр.625-632, 2006

#### ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ченг Л. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры / Под редакцией Ченга Л., Плога К., перевод с английского под ред. Ж.И. Алферова // М. : Мир, 1989. – 584 с.
2. Шик А.Я. Полупроводниковые структуры с дельта-слоями / Шик А.Я.// ФТП. – 1992. – Т. 26, №7. – С. 1161.
3. Schubert E.F., Delta Doping of Semiconductors / Schubert E.F. // Cambridge : Cambridge University Press, 1996. – 616 с.
4. Wolf E.L., Principles of Electron Tunneling Spectroscopy / Wolf E.L. // Oxford : Oxford Univ. Press, 1985. – 576 с.
5. Котельников И.Н., Межподзонные резонансные поляроны в туннельных переходах Al/delta-GaAs / Котельников И.Н., Кокин В.А., Федоров Ю.В., Гук А.В., Талбаев Д.Т. // Письма в ЖЭТФ. – 2000. – Т. 71, №9. – С. 564–569
6. Appelbaum J.A., Interface Effects in Normal Metal Tunneling / Appelbaum J.A., Brinkman W.F.// Phys. Rev. B. 2. – 1970. – Т. 2 №4. – С. 907-915