

На правах рукописи

ТИМОШНЕВ Сергей Николаевич

ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА ГРАНИЦ РАЗДЕЛА  
Cs/InGaN, Cs/GaN, Ba/GaN, Ba/AlGaN  
И ФОРМИРОВАНИЕ АККУМУЛЯЦИОННОГО СЛОЯ

Специальность:

01.04.10 - Физика полупроводников

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Санкт-Петербургском Академическом университете – научно-образовательном центре нанотехнологий РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
Бенеманская Галина Вадимовна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
Мамаев Юрий Алексеевич

доктор физико-математических наук  
Пронин Игорь Иванович

Ведущая организация: Российский Государственный Педагогический  
Университет им. А.И. Герцена

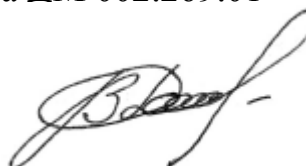
Защита состоится "5" октября 2011 г. в 15 час. на заседании объединенного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций ДМ 002.269.01 при Учреждении Российской академии наук Санкт-Петербургском Академическом университете – научно-образовательном центре нанотехнологий РАН по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Хлопина д.8, корп.3, СПб АУ НОЦНТ РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПб АУ НОЦНТ РАН.

Автореферат разослан "2" сентября 2011 г.

Ученый секретарь объединенного совета ДМ 002.269.01

доктор физико-математических наук



В.Г. Дубровский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Значительный интерес к исследованию электронных и структурных свойств полупроводниковых соединений на основе нитридов III группы обусловлен их большой практической значимостью. В последнее время нитриды III группы, а именно GaN, AlN, InN и их тройные соединения  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  и  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , широко применяются для создания оптоэлектронных приборов, работающих в спектральном диапазоне от ультрафиолетового до инфракрасного, различных электронных полупроводниковых устройств, работающих при высоких температурах, напряжениях, частотах.

В настоящее время при переходе от микро- к нанoeлектронике важным направлением является создание AlGaN/GaN-гетеропереходных полевых транзисторов с затвором Шоттки (HFET). Гетероструктуры AlGaN/GaN, InGaN/GaN являются наиболее перспективным объектом для создания мощных высокочастотных транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT). Применение таких транзисторов может существенно улучшить параметры усилителей, модуляторов и других современных электронных устройств.

Благодаря большой значимости для современного развития нанотехнологий, исследование электронных и структурных свойств поверхности, интерфейсов и наноразмерных объектов является одним из актуальных направлений физики поверхности полупроводников. Применение нано- и гетероструктур на основе нитридов III группы для современных оптических и электронных устройств резко увеличивает роль поверхности и ее влияние на характеристики приборов. Повышенные требования к знанию электронных свойств поверхности, интерфейсов и нанобъектов определяет актуальность данных исследований.

Создание и исследование новых наноразмерных объектов является важным как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения. Наноразмерные объекты можно определить как системы, в которых, по крайней мере, одно измерение не превышает 100 нм. В настоящее время зарядовый аккумуляционный слой на свободной поверхности полупроводника является новым и актуальным объектом исследований. Аккумуляционный слой может сформироваться непосредственно вблизи поверхности полупроводника *n*-типа, когда приповерхностный изгиб зон соответствует обогащению, т.е. изгиб зон вниз. При этом минимум зоны проводимости на поверхности  $E_{CBM}$  располагается ниже уровня Ферми  $E_F$ , и образуется узкая потенциальная яма. При достаточно малой ширине приповерхностного потенциала происходит ограничение движения электронов в направлении нормали  $z$  к поверхности, т.е. наблюдается эффект размерного квантования в аккумуляционном слое, и электроны могут занимать несколько локальных квантовых уровней. Вдоль поверхности ( $x$ - $y$ ) движение электронов не ограничено, и соответствующие компоненты энергии не квантуются. Такие электронные состояния являются вырожденным двумерным электронным газом (2DEG).

Аккумуляционный слой был недавно обнаружен для чистых поверхностей  $n$ -InAs(110) [1],  $n$ -InN [2] и для ультратонких интерфейсов Cs/ $n$ -InAs(110) [3], Cs/ $n$ -InSb(110) [4, 5]. Следует отметить, что все эти материалы – узкозонные In-содержащие полупроводники.

В ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН в нашей группе была начата работа по поиску способов формирования аккумуляционного слоя на поверхности широкозонного полупроводника  $n$ -GaN(0001). Было обнаружено, что аккумуляционный слой может быть сформирован на границе раздела Cs/ $n$ -GaN [6]. Таким образом, в настоящее время существует достаточно мало полупроводниковых материалов, на поверхности которых удалось наблюдать или искусственно создать аккумуляционный слой. Поэтому создание индуцированных аккумуляционных слоев на поверхности широкозонных полупроводников III-нитридов в ряду InGaN, GaN, AlGaN с изменяющейся шириной запрещенной зоны является актуальной задачей.

**Цель диссертационной работы.** Целью работы является установление электронной структуры, определение процессов и закономерностей формирования границ раздела Cs/ $n$ -GaN(0001), Ва/ $n$ -GaN(0001), Cs/ $n$ -In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N(0001) и Ва/ $n$ -Al<sub>0.16</sub>Ga<sub>0.84</sub>N(0001) в диапазоне субмонослойных Cs и Ва покрытий, определение условий для целенаправленной модификации электронных свойств границ раздела и увеличения квантового выхода фотоэмиссии, поиск способов создания аккумуляционного слоя, определение механизмов формирования потенциальной ямы аккумуляционного слоя, а также определение условий для управления энергетическими параметрами аккумуляционного слоя.

**Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:**

1. Провести исследования по поиску собственных поверхностных состояний атомарно-чистых поверхностей  $n$ -GaN(0001) и индуцированных адсорбцией поверхностных зон.
2. Исследовать и определить влияние субмонослойных покрытий Cs или Ва на электронную структуру границ раздела Cs/ $n$ -In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N(0001), Cs/ $n$ -GaN(0001), Ва/ $n$ -GaN(0001) в условиях сверхвысокого вакуума  $P \sim 10^{-8}$  Па с использованием метода пороговой фотоэмиссионной спектроскопии (ПФС) при возбуждении  $s$ - и  $p$ -поляризованным светом (в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН).
3. Исследовать и определить влияние субмонослойных покрытий Ва на электронную структуру границ раздела Ва/ $n$ -GaN(0001) и Ва/ $n$ -Al<sub>0.16</sub>Ga<sub>0.84</sub>N(0001) в условиях сверхвысокого вакуума  $P \sim 10^{-8}$  Па с использованием метода ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (УФЭС).
4. Определить условия для целенаправленной модификации электронных свойств границ раздела и увеличения квантового выхода фотоэмиссии.
5. Установить способы создания аккумуляционного слоя, определить механизмы формирования потенциальной ямы аккумуляционного слоя для исследуемых границ раздела в диапазоне субмонослойных покрытий.

6. Определить условия для целенаправленного изменения изгиба зон, энергетических параметров аккумуляционного слоя и плотности состояний 2DEG.
7. Провести модификацию теории пороговой фотоэмиссии Урбаха для определения параметров аккумуляционного слоя.

**Объекты и методы исследования.** В настоящей работе впервые проведены исследования электронных свойств границ раздела Cs/*n*-In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N(0001), Cs, Ва/*n*-GaN(0001) и Ва/*n*-Al<sub>0.16</sub>Ga<sub>0.84</sub>N(0001). Для разных систем использованы разные фотоэмиссионные методы: пороговая фотоэмиссионная спектроскопия при возбуждении поляризованным светом и ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия на синхротроне BESSY II, Германия. Граница раздела Ва/*n*-GaN(0001) исследована двумя методами.

**Научная новизна работы.** Работа содержит ряд экспериментальных результатов, полученных впервые в мировой практике, а также ряд новых модельных представлений. Ниже перечислены наиболее важные из них:

1. Впервые исследована *in situ* в сверхвысоком вакууме  $P \sim 10^{-8}$  Па и установлена электронная структура границ раздела Cs/*n*-In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N(0001) и Ва/*n*-Al<sub>0.16</sub>Ga<sub>0.84</sub>N(0001) в диапазоне субмонослойных Cs или Ва покрытий.

2. Впервые для одних и тех же образцов *n*-GaN(0001) электронная структура границы раздела Ва/*n*-GaN(0001) исследована и определена двумя методами: УФЭС и пороговой фотоэмиссионной спектроскопией *in situ* в сверхвысоком вакууме  $P \sim 10^{-8}$  Па.

3. Впервые обнаружена пороговая фотоэмиссия электронов из вырожденного 2D электронного газа в зоне проводимости при наличии аккумуляционного слоя на границе раздела Cs/*n*-In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N(0001). Фотоэмиссия возбуждается светом из области прозрачности *n*-In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N, что кардинально отличает ее природу от традиционной фотоэмиссии, для которой характерно возбуждение электронов валентной зоны. Определен высокий квантовый выход фотоэмиссии из аккумуляционного слоя, сравнимый с квантовым выходом традиционного фотокатода Cs/GaAs.

4. Впервые для образцов *n*-Al<sub>0.16</sub>Ga<sub>0.84</sub>N(0001) и *n*-In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N(0001) создан аккумуляционный слой за счет адсорбции Ва или Cs в диапазоне субмонослойных покрытий.

5. Определены условия для целенаправленного изменения электронной структуры, изгиба зон, плотности состояний 2DEG и энергетических параметров аккумуляционного слоя на поверхности *n*-In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N(0001), *n*-GaN(0001) и *n*-Al<sub>0.16</sub>Ga<sub>0.84</sub>N(0001) при адсорбции Cs или Ва.

6. Проведена модификация теории Урбаха для случая пороговой фотоэмиссии из аккумуляционного слоя, и найдены энергетические параметры аккумуляционного слоя с учетом экспериментальных данных.

7. Обнаружен новый эффект – появление осцилляционной структуры в спектрах пороговой фотоэмиссии границы раздела Cs/*n*-In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N(0001) при возбуждении в области прозрачности *n*-In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N(0001). Природа эффекта

обусловлена наличием аккумуляционного слоя и интерференцией Фабри-Перо в плоскопараллельной пластине образца.

8. Впервые обнаружено кардинальное изменение спектра фотоэмиссии из валентной зоны для полупроводников  $n\text{-GaN}(0001)$  и  $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$  при адсорбции Ва, что обусловлено подавлением собственных поверхностных состояний.

9. Установлены значения энергий связи для собственных поверхностных состояний  $n\text{-GaN}(0001)$ .

#### **Практическая значимость работы.**

Экспериментальные результаты по созданию вырожденного 2D электронного газа в аккумуляционном слое могут быть использованы при создании высоко-мощных электронных и оптоэлектронных устройств, работающих при повышенных температурах, токах и напряжениях. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и создании транзисторов на гетероструктурах, например AlGaN/GaN, для получения высокой электронной подвижности.

Определены условия для формирования аккумуляционных слоев с высоким квантовым выходом фотоэмиссии в заданном спектральном диапазоне, что может быть использовано при создании селективных фотокатодов на основе нитридов III группы.

#### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Аккумуляционный слой на поверхности полупроводников  $n\text{-In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}(0001)$ ,  $n\text{-GaN}(0001)$  и  $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$  создается за счет адсорбции Cs или Ва в диапазоне субмонослойных покрытий.

2. Управление энергетическими параметрами потенциальной ямы аккумуляционного слоя и плотностью состояний вырожденного 2D электронного газа осуществляется за счет изменения Cs или Ва субмонослойного покрытия на поверхности  $n\text{-In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}(0001)$ ,  $n\text{-GaN}(0001)$  и  $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$ .

3. Фотоэмиссия из полупроводника  $n$ -типа при возбуждении  $s$ -поляризованным светом в области прозрачности обусловлена наличием аккумуляционного слоя и происходит из вырожденного 2D электронного газа в зоне проводимости.

4. Процесс формирования электронной структуры границ раздела Ва/ $n\text{-GaN}(0001)$  и Ва/ $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$  при субмонослойной адсорбции включает:

- кардинальное изменение положения края зоны проводимости на поверхности от положения выше уровня Ферми на атомарно-чистой поверхности до положения существенно ниже уровня Ферми с переходом от обеднения к обогащению электронами приповерхностной области и формированию аккумуляционного слоя,

- уменьшение энергетической ширины спектра фотоэмиссии из валентной зоны от  $\sim 10$  эВ для атомарно-чистой поверхности до  $\sim 1.5$  эВ при увеличении Ва покрытия до монослоя,

- спад интенсивности фотоэмиссии с собственных поверхностных состояний подложки.

5. Осцилляционная структура в спектрах пороговой фотоэмиссии границы раздела Cs/n-In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N(0001) при возбуждении в области прозрачности подложки обусловлена наличием аккумуляционного слоя и интерференцией Фабри-Перо в плоскопараллельной пластине образца.

**Апробация работы.** Основные результаты работы были представлены и обсуждались на следующих Всероссийских и международных конференциях и симпозиумах: 14 Международном симпозиуме “Nanostructures: Physics and Technology” (Санкт-Петербург, 2006), Всероссийских конференциях “Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы” (Москва, 2007; Санкт-Петербург, 2008; Москва, 2010), 17th International Vacuum Congress/13th International Conference on Surface Science/ International Conference on Nanoscience and Technology (Stockholm, 2007), Международном симпозиуме «Физика низкоразмерных систем и поверхностей» (Ростов-на Дону, 2008, 2010), The 25th European Conference on Surface Science ECOS-25 (Liverpool, 2008), X Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2008), Международной Зимней Школе по физике полупроводников (Санкт-Петербург – Зеленогорск, 2009), XIII Международном симпозиуме «Нанофизика и наноэлектроника», (Нижний Новгород, 2009), 4-ой Всероссийской конференции «Химия поверхности и нанотехнология» (Хилово, 2009).

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 20 печатных работах, из них 8 статей из перечня ВАК ведущих рецензируемых научных журналов и изданий [A1-A8] и в 12 тезисах докладов [A9-A20].

**Личный вклад автора.** Все результаты, представленные в работе, получены соискателем лично, либо в соавторстве при его непосредственном участии.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка цитируемой литературы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель работы, научная новизна и практическая значимость работы. Представлены основные положения, выносимые на защиту, а также кратко излагается содержание диссертации.

**Первая глава** диссертации носит обзорный характер.

В §1.1 дано определение аккумуляционного слоя, описаны условия возникновения аккумуляционного слоя, рассматриваются энергетические и пространственные характеристики аккумуляционного слоя. Проведен анализ существующих экспериментальных и теоретических работ по исследованию аккумуляционного слоя. До наших исследований аккумуляционный слой был

обнаружен только на поверхности узкозонных In-содержащих полупроводников InAs, InSb, InN.

В §1.2 обсуждается кристаллическая и электронная структура нитридов III группы:  $n$ -GaN(0001),  $n$ -In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N(0001) и  $n$ -Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N(0001). Описаны структурные особенности III-нитридов, представлена атомная структура GaN(0001) гексагональной модификации, приведены электронные характеристики: ширина запрещенной зоны, ионизационная энергия, работа выхода.

В §1.3 рассмотрены имеющиеся экспериментальные данные исследований электронной структуры GaN(0001) с помощью метода ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии. Проведен анализ теоретических и экспериментальных работ по исследованию спектров фотоэмиссии из валентной зоны и поверхностных состояний для GaN(0001). Также представлена единственная работа по расчету плотности поверхностных состояний для GaN.

В §1.4 представлены результаты экспериментальных исследований адсорбции Cs на поверхности  $p$ -GaN(0001), которые в основном касаются понижения работы выхода и изменения электронного сродства на поверхности.

В §1.5 изложены принципы, на которых основываются методы фотоэмиссионной спектроскопии. Показано различие в процессах возбуждения фотоэмиссии из объема и из приповерхностной области. Рассмотрены два основных экспериментальных метода, используемых в работе для изучения электронной структуры полупроводников и границ раздела металл/полупроводник: ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия и пороговая фотоэмиссионная спектроскопия.

Использование метода ПФС позволяет проводить исследования двумя различными “зондами”: 1)  $s$ -поляризованный свет позволяет сканировать приповерхностную область  $\sim 30$  нм и исследовать квази-объемную фотоэмиссию, 2) нормальная компонента  $p$ -поляризованного света позволяет сканировать непосредственно поверхность  $\sim 0.5$  нм и получать информацию о поверхностных электронных состояниях.

УФЭС с энергиями возбуждения 30÷400 эВ позволяет исследовать фотоэмиссию из валентной зоны и основных уровней.

В конце главы сформулированы основные задачи диссертационной работы.

**Вторая глава** посвящена описанию методики экспериментов.

В §2.1 описывается экспериментальная установка, созданная на базе универсальной сверхвысоковакуумной установки УСУ-4. Все эксперименты проводились в условиях сверхвысокого вакуума  $P \sim 1 \cdot 10^{-8}$  Па. Атомы Cs или Ba наносились на поверхность образцов из стандартных источников. Образец InGaN подвергался отжигу при температуре  $\sim 450^\circ\text{C}$ , а образцы GaN при температуре  $\sim 650^\circ\text{C}$ .

В §2.2 приведена методика фотоэмиссионных измерений с помощью метода ПФС. Метод впервые использован для исследования фотоэмиссии из



аккумуляционного слоя в области приповерхностного изгиба зоны проводимости. Для возбуждения фотоэмиссии использовался монохроматический свет от лампы накаливания КГМ-300 в диапазоне  $340 \text{ нм} < \lambda < 900 \text{ нм}$ , а также использовались гелий-неоновый ( $\lambda=632.8 \text{ нм}$ ,  $h\nu=1.96 \text{ эВ}$ ) и азотный ( $\lambda=337 \text{ нм}$ ,  $h\nu=3.68 \text{ эВ}$ ) лазеры мощностью не более 5 мВт. Измерялся интегральный фотоэмиссионный ток в диапазоне  $10^{-5} \div 10^{-13} \text{ А}$ , ошибка измерений не превышала 5%.

В §2.3 описана экспериментальная установка MUSTANG для фотоэмиссионных исследований методом УФЭС на синхротроне BESSY II, Германия. Все эксперименты проводились в условиях сверхвысокого вакуума  $P \sim 3 \cdot 10^{-8} \text{ Па}$ . Образцы GaN и AlGaN подвергались отжигу при температуре  $\sim 650^\circ\text{C}$ .

В §2.4 описаны исследуемые образцы  $n\text{-In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}(0001)$ ,  $n\text{-GaN}(0001)$  и  $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$ . Представлены сведения о методах роста образцов, а также приведены данные атомно-силовой микроскопии по морфологии поверхности.

Также описана оригинальная методика определения потока адсорбированных атомов с относительной точностью до 10%, основанная на использовании эталонного образца W(110). Отметим, что 1 монослой (МС) соответствует концентрации адсорбата, при которой один атом металла приходится на один атом Ga на поверхности GaN(0001)  $1 \times 1$ , и равняется  $9.9 \cdot 10^{14} \text{ атом/см}^2$ . При малой концентрации In и Al для всех исследуемых образцов  $n\text{-In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}(0001)$ ,  $n\text{-GaN}(0001)$  и  $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$  1 МС можно считать одинаковым.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных фотоэмиссионных исследований электронных свойств границ раздела Cs/ $n\text{-In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}(0001)$  и Cs, Ва/ $n\text{-GaN}(0001)$ , выполненных с помощью метода пороговой фотоэмиссионной спектроскопии.

В §3.1 приведены результаты исследований спектров пороговой фотоэмиссии  $I_S(h\nu)$  при напылении Cs в субмонослойном режиме на  $n\text{-In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}(0001)$ . Отметим, что ширина запрещенной зоны  $E_g = 3.1 \text{ эВ}$ . Главным и необычным эффектом нанесения Cs покрытий является обнаружение объемной фотоэмиссии  $I_S(h\nu)$  с высоким квантовым выходом при возбуждении в области прозрачности образца, где невозможно возбуждение валентных состояний InGaN. Появление фотоэмиссии наблюдалось уже при незначительных субмонослойных Cs покрытиях  $\sim 0.1 \text{ МС}$ . Для чистой поверхности  $n\text{-InGaN}$  возбуждение фотоэмиссии электронов из валентной зоны возможно лишь при энергиях  $h\nu > 6.5 \text{ эВ}$ .

На рис. 1 представлены зависимости фотоэмиссионного тока  $I_S(h\nu)$  для интерфейса Cs/ $n\text{-InGaN}$  при трех различных покрытиях Cs. Исследование спектров  $I_S(h\nu)$  показало, что адсорбция Cs приводит к резкому уменьшению фотоэмиссионного порога  $h\nu_S$ , а также к появлению и в дальнейшем значительному увеличению интенсивности фотоэмиссионного тока. Спектральная полоса возбуждения фотоэмиссии достаточно узкая, при этом

максимальная полуширина соответствует  $\sim 0.5$  эВ при Cs покрытии 1 МС. В коротковолновой области спектр резко обрывается, так что при энергиях возбуждения  $h\nu > 3.3$  эВ фотоэмиссия не наблюдается. По мере увеличения Cs покрытия происходит увеличение квантового выхода фотоэмиссии, значительный сдвиг всего спектра и, следовательно, фотоэмиссионного порога в низкоэнергетическую область. Неординарность обнаруженного эффекта заключается в том, что энергия порогов уменьшается настолько, что оказывается в видимой области спектра, т.е. в области прозрачности образца.

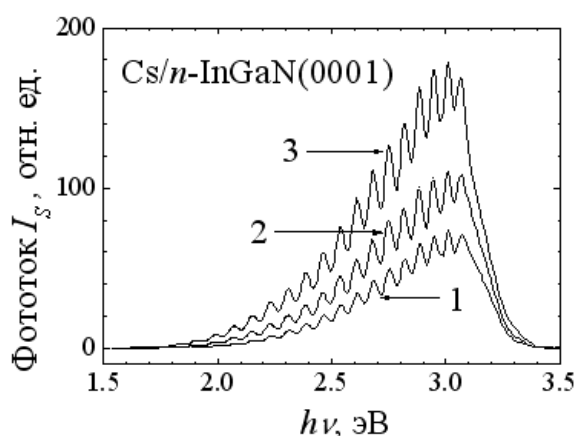


Рис. 1. Спектры пороговой фотоэмиссии  $I_S(h\nu)$  для различных Cs покрытий на поверхности  $n$ -InGaN: 1 - 0.25 МС, 2 - 0.60 МС, 3 - 1.00 МС

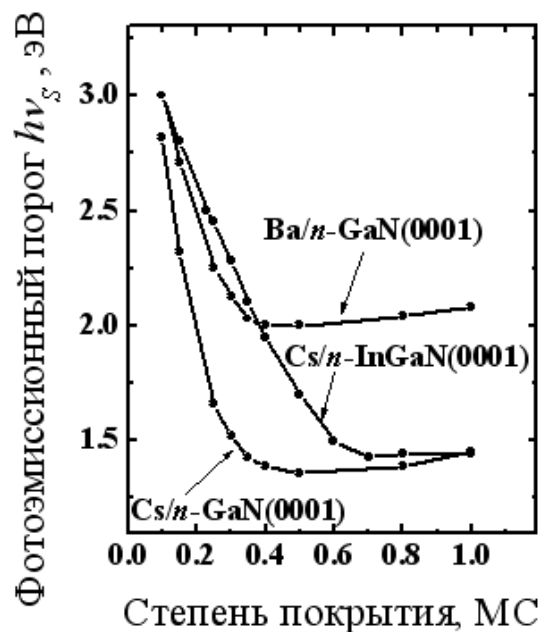


Рис. 2. Кривые изменения фотоэмиссионных порогов для интерфейсов Cs/ $n$ -InGaN(0001), Cs, Ba/ $n$ -GaN(0001) как функции степени субмонослойного покрытия Cs или Ba

Для Cs/ $n$ -InGaN порог  $h\nu_s$  резко уменьшается с ростом Cs покрытия и достигает минимального значения  $1.45 \pm 0.05$  эВ при покрытии  $\sim 0.7$  МС (рис. 2).

В §3.2 приведены результаты исследований спектров пороговой фотоэмиссии  $I_S(h\nu)$  для Cs/ $n$ -GaN в диапазоне субмонослойных Cs покрытий 0.1÷1.0 МС для двух образцов GaN(0001)  $n$ -типа различного структурного совершенства. Отметим, что ширина запрещенной зоны  $E_g = 3.4$  эВ. Показано, что с ростом Cs покрытия обнаруживается появление фотоэмиссии при возбуждении в области прозрачности и наблюдается резкое уменьшение фотоэмиссионного порога  $h\nu_s$ . Эти эффекты наблюдаются для всех исследуемых образцов независимо от их структурного совершенства. Фотоэмиссия  $I_S(h\nu)$  возбуждается в области прозрачности GaN, где невозможно возбуждение валентных состояний.

По мере увеличения Cs покрытия происходит увеличение квантового выхода фотоэмиссии, значительный сдвиг всего спектра и, следовательно,

фотоэмиссионного порога в низкоэнергетическую область. Энергия порогов уменьшается настолько, что оказывается в видимой области спектра, т.е. в области прозрачности GaN. Минимальное значение энергии порога  $h\nu_s$  соответствует  $1.40\pm 0.05$  эВ (рис. 2).

В §3.3 представлены результаты исследования спектров пороговой фотоэмиссии  $I_s(h\nu)$  при напылении Ва на поверхность  $n$ -GaN(0001). Как и при адсорбции Cs, в этом случае был обнаружен аналогичный эффект: появление фотоэмиссии в области прозрачности, уменьшение фотоэмиссионного порога  $h\nu_s$  и увеличение квантового выхода фотоэмиссии с ростом Ва покрытия. Основным является то, что порог фотоэмиссии  $h\nu_s$  резко сдвигается в область прозрачности образца GaN при увеличении субмонослойного покрытия Ва. На рис. 2 приведена кривая изменения фотоэмиссионного порога  $h\nu_s$  как функция Ва покрытия. Уменьшение энергии порога  $h\nu_s$  не столь значительно, как в случае адсорбции Cs. Минимальное значение порога  $h\nu_s$  для GaN соответствует  $1.95\pm 0.05$  эВ при Ва покрытии  $\sim 0.4$  МС.

В §3.4 показано, что фотоэмиссия при возбуждении в области прозрачности InGaN или GaN не может быть обусловлена возбуждением электронов валентной зоны. Обнаруженный нами эффект свидетельствует о принципиальном отличии природы фотоэмиссии для интерфейсов Cs/ $n$ -In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N(0001), Cs/ $n$ -GaN(0001) и Ва/ $n$ -GaN(0001) от фотоэмиссии для всех известных полупроводниковых фотокатодов, для которых характерно возбуждение электронных состояний валентной зоны. Отметим, что пороговая фотоэмиссия является квази-объемной и соответствует сигналу из приповерхностной области  $\sim 30$  нм образцов. Показано, что для интерфейсов Cs/ $n$ -InGaN, Cs/ $n$ -GaN и Ва/ $n$ -GaN фотоэмиссия происходит из квази-металлических состояний вблизи уровня Ферми. Следовательно, порог фотоэмиссии соответствует работе выхода. При этом кардинально изменяется положение края зоны проводимости на поверхности от положения выше уровня Ферми на атомарно-чистой поверхности до положения существенно ниже уровня Ферми с переходом от обеднения к обогащению электронами приповерхностной области.

Совокупность результатов свидетельствует о том, что впервые обнаружена “нетрадиционная” фотоэмиссия, природа которой связана с возбуждением электронов из зоны проводимости в случае формирования в узкой приповерхностной области  $n$ -InGaN или  $n$ -GaN вырожденного 2D электронного газа. Таким образом, обнаружено образование зарядового аккумуляционного слоя. При этом формирование аккумуляционного слоя индуцируется адсорбцией и происходит за счет приповерхностного изгиба зон, когда край зоны проводимости на поверхности сдвигается ниже уровня Ферми (рис. 3). Аккумуляционный слой на поверхности  $n$ -In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N(0001) создан впервые.

Определено, что для одного и того же образца максимальный квантовый выход фотоэмиссии из аккумуляционного слоя при энергии возбуждения  $h\nu \sim 3.0$  эВ для границы раздела Cs/ $n$ -GaN может превосходить в  $\sim 4$  раза квантовый

выход фотоэмиссии для границы раздела Ва/*n*-GaN. Установлено, что квантовый выход фотоэмиссии из аккумуляционного слоя сравним с квантовым выходом традиционного фотокатода Cs/GaAs и зависит от совершенства образца. Формирование аккумуляционного слоя наблюдается для всех исследованных образцов InGaN и GaN независимо от их структурного совершенства.

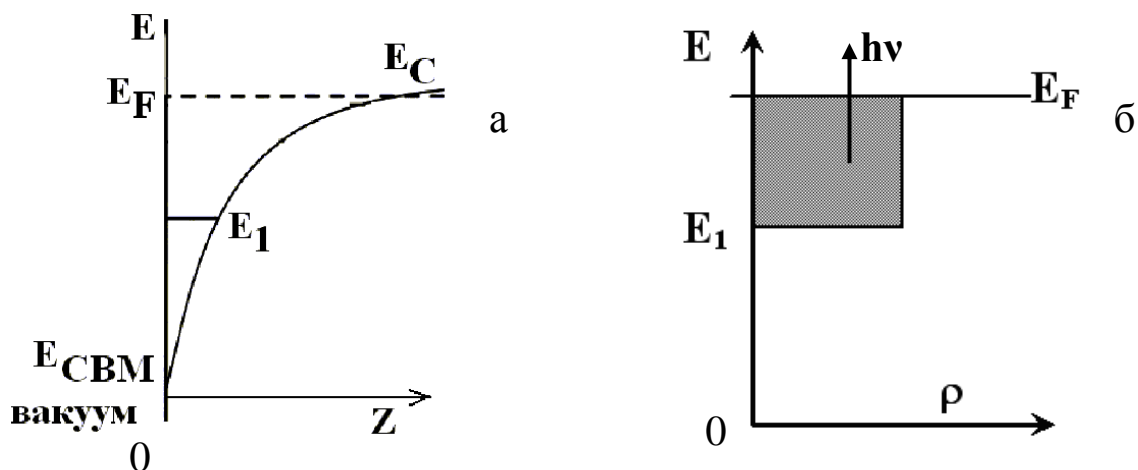


Рис. 3. Схематическое изображение приповерхностного изгиба зоны проводимости при формировании аккумуляционного слоя с уровнем размерного квантования  $E_1$  (а). Плотность состояний  $\rho$  для уровня  $E_1$  в плоскости поверхности  $xy$  (б)

В §3.5 предложена модель пороговой фотоэмиссии из аккумуляционного слоя. Проведена модификация теории Урбаха для случая пороговой фотоэмиссии из локальной зоны на уровне Ферми (рис. 3б). Выполнены расчеты матричного элемента фотоэмиссии для границ раздела Cs/*n*-InGaN(0001), Cs/*n*-GaN(0001), Ва/*n*-GaN(0001) в диапазоне субмонослойных покрытий. Определено положение первого уровня размерного квантования в аккумуляционном слое. Установлено, что энергетическими параметрами потенциальной ямы аккумуляционного слоя можно целенаправленно управлять, изменяя степень субмонослойного покрытия адсорбата.

На рис. 4 приведены экспериментальный спектр фотоэмиссии  $I_S(h\nu)$  (кривая 1) для Ва покрытия 0.4 МС на *n*-GaN и рассчитанный спектр фотоэмиссии (кривая 2), который хорошо совпадает с экспериментальным. Получена спектральная зависимость квадрата модуля матричного элемента фотоэмиссии  $|M_S|^2$  (кривая 3).

В §3.6 обсуждаются результаты, полученные при развитии исследований фотоэмиссии из поверхностных зон, индуцированных адсорбцией Cs и Ва на поверхности *n*-GaN(0001). Детальный анализ спектров поверхностной фотоэмиссии  $I_P(h\nu)/I_S(h\nu)$  в широком диапазоне субмонослойных покрытий показывает, что для адсорбции как Cs, так и Ва, начиная с покрытий ~0.3 МС, ниже уровня Ферми  $E_F$  последовательно начинают формироваться индуцированные поверхностные зоны.

Установлено, что индуцированные адсорбцией Ва поверхностные зоны расположены ниже уровня Ферми на 0.1 эВ и 0.3 эВ и имеют полуширину  $\sim 0.05$  эВ. Положение Cs-зон относительно уровня Ферми соответствует 0.35 эВ и 0.50 эВ. Полуширина Cs-зон составляет 0.18 эВ и 0.5 эВ, соответственно, что значительно превосходит полуширины зон для бариевых покрытий.

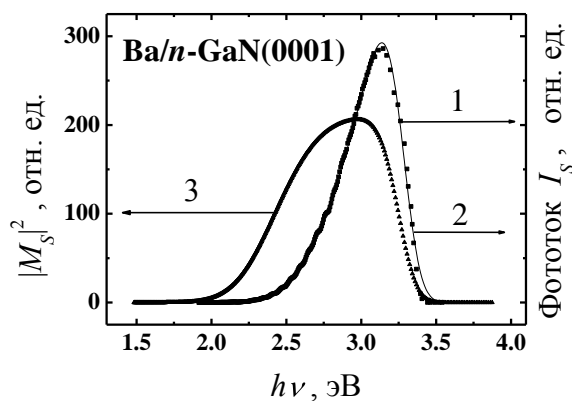


Рис. 4. Спектр фотоэмиссии  $I_S(h\nu)$  для интерфейса Ва/ $n$ -GaN(0001) при Ва покрытии 0.4 МС – 1, рассчитанный спектр фотоэмиссии – 2, квадрат модуля матричного элемента фотоэмиссии  $|M_S|^2$  – 3

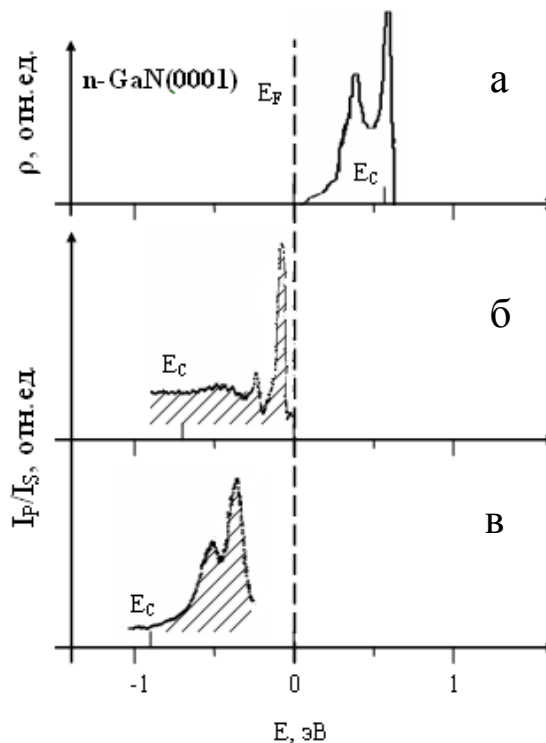


Рис. 5. а – теоретический спектр плотности незаполненных поверхностных состояний Ga-оборванных связей  $n$ -GaN [7], б, в – спектры  $I_F/I_S$  поверхностной фотоэмиссии для Ва/ $n$ -GaN, Cs/ $n$ -GaN, соответственно

На рис. 5а представлен рассчитанный спектр плотности незаполненных поверхностных состояний оборванных связей Ga на поверхности  $n$ -GaN(0001) [7]. На рис. 5б и 5в приведены полученные спектры фотоэмиссии из поверхностных зон, индуцированных адсорбцией Ва и Cs, соответственно. Анализ теоретического и экспериментальных спектров показывает, что природа индуцированных Cs (Ва) зон связана с заполнением поверхностных состояний оборванных связей Ga при взаимодействии с адсорбированными атомами, что приводит к заполнению и сдвигу поверхностных зон ниже  $E_F$ .

В §3.7 рассмотрена осцилляционная структура в спектрах пороговой фотоэмиссии границ раздела Cs/ $n$ -In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N(0001), Cs/ $n$ -GaN(0001) и Ва/ $n$ -GaN(0001). Впервые в спектрах пороговой фотоэмиссии для Cs/ $n$ -InGaN обнаружено появление ярко выраженных осцилляций фотоэмиссионного тока. На рис. 6 приведены спектральные зависимости фотоэмиссионного тока  $I_S(h\nu)$  (кривая 1) и коэффициента отражения света  $R_S(h\nu)$  (кривая 2), полученные *in situ* для границы раздела Cs/ $n$ -InGaN(0001) при Cs покрытии 0.7 МС. Видны

ярко выраженные осцилляции в обоих спектрах. Отметим, что максимумы коэффициента отражения света совпадают с минимумами фототока.

Следует подчеркнуть, что как сама фотоэмиссия, так и эффект осцилляций в спектрах фотоэмиссии обнаружены при возбуждении образца InGaN в области прозрачности. Исходя из экспериментальных результатов, можно заключить, что природа осцилляций в спектрах фотоэмиссии связана, во-первых, с интерференцией света из области прозрачности, возникающей в плоскопараллельной пластине образца InGaN или GaN, и, во-вторых, с наличием в приповерхностной области 2DEG в аккумуляционном слое (рис. 7). При этом фотоэмиссия из аккумуляционного слоя (при условии  $h\nu \geq \phi$ ) может возбуждаться светом, падающим как со стороны вакуума, так и многократно отраженным в плоскопараллельной пластине InGaN или GaN (рис. 7).

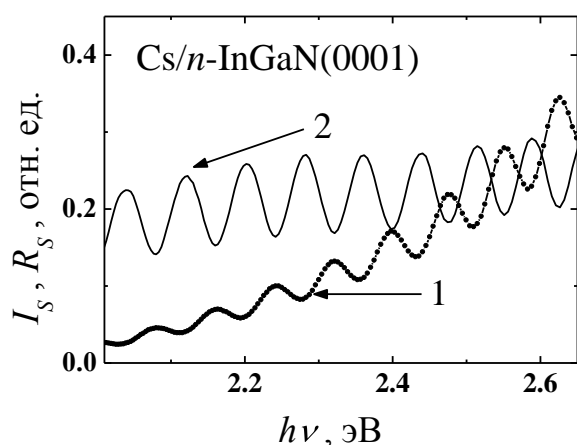


Рис. 6. Осцилляции в спектре пороговой фотоэмиссии  $I_s(h\nu)$  (кривая 1) и спектре отражения  $R_s(h\nu)$  (кривая 2) для интерфейса Cs/n-InGaN при Cs покрытии 0.7 МС

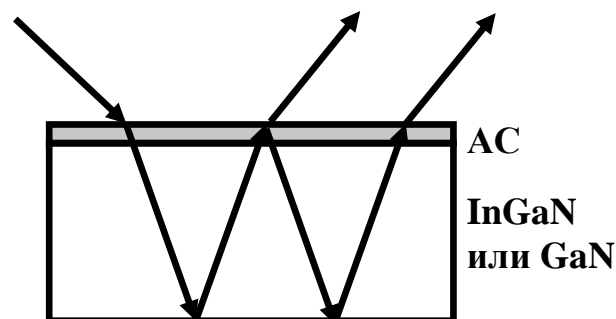


Рис. 7. Схема интерференции Фабри-Перо при наличии аккумуляционного слоя AC на поверхности

По оценке, сделанной для интерференции Фабри-Перо в плоскопараллельных пластинах различной толщины, периодам осцилляций  $\delta = 0.080$  эВ,  $\delta = 0.070$  эВ и  $\delta = 0.065$  эВ соответствуют следующие толщины образцов 3.32 мкм (InGaN), 3.83 мкм (GaN образец №1) и 4.15 мкм (GaN образец №2). Приведенные оценки хорошо согласуются с данными о толщине эпитаксиальных слоев InGaN и GaN, полученными в процессе роста.

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований электронных свойств границ раздела Ва/n-GaN(0001) и Ва/n-Al<sub>0.16</sub>Ga<sub>0.84</sub>N(0001), выполненных на синхротроне BESSY II, Германия с помощью метода ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии.

В §4.1 приведены данные фотоэмиссионных исследований УФЭС образца n-GaN(0001) и границы раздела Ва/n-GaN(0001) при различных энергиях возбуждения 60÷400 эВ. Данный образец был также исследован с помощью метода пороговой фотоэмиссионной спектроскопии. На рис. 8 представлен обзорный спектр, полученный для чистого образца n-GaN(0001) при энергии

возбуждения 400 эВ. Видно, что в спектре доминируют пики основных уровней Ga 3*d* и Ga 3*p* при незначительной интенсивности спектра валентной зоны VB. Поэтому структуру валентной зоны *n*-GaN следует исследовать при меньших энергиях возбуждения  $h\nu = 80\div 130$  эВ.

Установлено, что ширина спектра фотоэмиссии из валентной зоны чистого *n*-GaN(0001) соответствует  $\sim 10$  эВ (рис. 9). Ширина и форма полученных нами спектров фотоэмиссии хорошо совпадают с экспериментальными данными других авторов, например [8]. При этом значительно большую ширину спектра фотоэмиссии из валентной зоны по сравнению с теоретическими расчетами авторы объясняют наличием в этой области собственных поверхностных состояний.

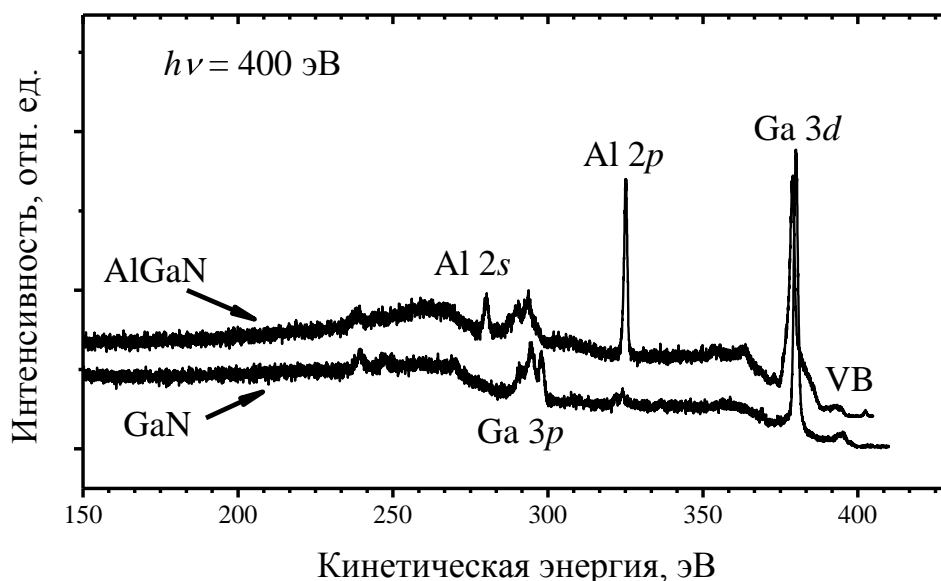
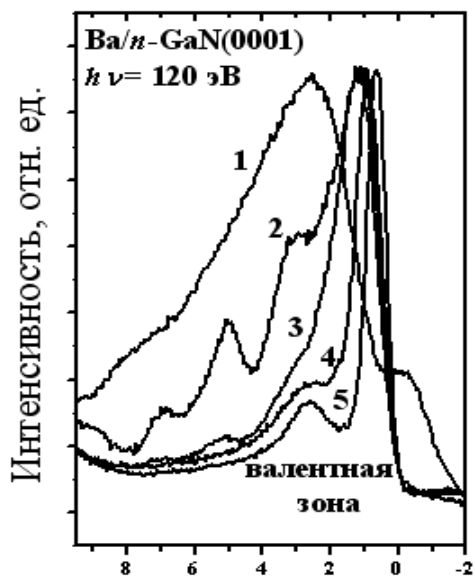


Рис. 8. Спектры нормальной фотоэмиссии для чистых образцов GaN и AlGaN, энергия возбуждения 400 эВ

На рис. 9 (кривая 1) представлен спектр фотоэмиссии из валентной зоны для чистой поверхности *n*-GaN(0001). Особенность на низкоэнергетическом плече максимума валентной зоны в запрещенной зоне *n*-GaN вблизи  $E_{VBM}$  была обнаружена ранее другими авторами и связана с собственными поверхностными состояниями подложки [9].

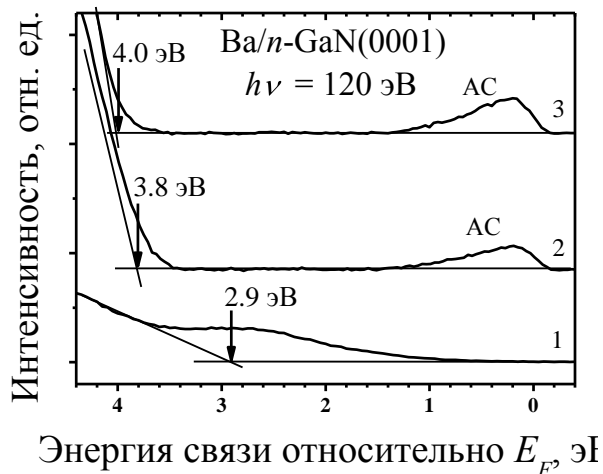
Эволюция спектра фотоэмиссии из валентной зоны *n*-GaN при увеличении Ва покрытия представлена на рис. 9 (кривые 2-5). Обнаружено, что наиболее сильные изменения наблюдаются в области энергий связи  $0\div 10$  эВ по отношению к  $E_{VBM}$ . В этой области интенсивность фотоэмиссии резко уменьшается при увеличении барьерного покрытия. Обнаружен новый эффект - кардинальное уменьшение ширины спектра валентной зоны до  $\sim 1.5$  эВ при Ва покрытия 0.6 МС. Анализ показывает, что этот эффект сужения спектра вызван подавлением ряда собственных поверхностных состояний GaN. Полученная

малая ширина спектра  $\sim 1.5$  эВ валентной зоны  $n$ -GaN хорошо согласуется с теоретическими расчетами [8]. Установлено, что адсорбция Ва на  $n$ -GaN(0001) позволяет выявить положение собственных поверхностных состояний при энергиях связи 2.9 эВ, 5.0 эВ и 6.9 эВ относительно края валентной зоны  $E_{VBM}$  (рис. 9).



Энергия относительно  $E_{VBM}$  эВ

Рис. 9. Спектры нормальной фотоэмиссии из валентной зоны Ва/ $n$ -GaN(0001) при Ва покрытиях: 1 – чистый образец, 2 – 0.3 МС, 3 – 0.4 МС, 4 – 0.5 МС, 5 – 0.6 МС. Энергия фотонов 120 эВ



Энергия связи относительно  $E_F$ , эВ

Рис. 10. Спектры нормальной фотоэмиссии для Ва/ $n$ -GaN и появление пика ниже  $E_F$ : 1 – чистый образец, 2 – 0.5 МС, 3 – 0.6 МС. Энергия фотонов 120 эВ. Стрелками указано положение края валентной зоны  $E_{VBM}$

Впервые для адсорбции Ва на поверхности  $n$ -GaN методом УФЭС обнаружено, что при покрытии 0.5 МС возникает новый фотоэмиссионный пик в запрещенной зоне вблизи уровня Ферми (рис. 10). Одновременно с возникновением пика происходит значительное увеличение энергетического интервала  $E_{VBM} - E_F = 3.8$  эВ по сравнению с исходным значением для чистой поверхности  $E_{VBM} - E_F = 2.9$  эВ. Обнаружено, что дальнейшее увеличение Ва покрытия до 0.6 МС приводит к изменению положения края валентной зоны  $E_{VBM}$  относительно уровня Ферми до 4.0 эВ. Такое неординарное поведение свидетельствует об изгибе зон вниз и доказывает образование аккумуляционного слоя. Таким образом, природа нового фотоэмиссионного пика на уровне Ферми связана с созданием 2DEG в аккумуляционном слое, индуцированном адсорбцией Ва.

В процессе формирования границы раздела Ва/ $n$ -GaN(0001) с ростом Ва покрытий до 0.3 МС наблюдается уменьшение интенсивности фотоэмиссии основного уровня Ga 3d в  $\sim 5$  раз.

В §4.2 приведены данные фотоэмиссионных исследований УФЭС образца  $n$ -Al<sub>0.16</sub>Ga<sub>0.84</sub>N(0001) и границы раздела Ва/ $n$ -Al<sub>0.16</sub>Ga<sub>0.84</sub>N(0001) при различных



энергиях возбуждения  $60\div 400$  эВ. На рис. 8 представлен обзорный спектр, полученный для чистого образца  $n\text{-AlGaN}(0001)$  при энергии возбуждения 400 эВ. В спектре доминируют пики остовных уровней Ga  $3d$ , Al  $2p$ , Ga  $3p$  и Al  $2s$  при незначительной интенсивности спектра валентной зоны VB. Как и для GaN структуру валентной зоны  $n\text{-AlGaN}$  наиболее эффективно исследовать при энергиях возбуждения  $h\nu = 80\div 130$  эВ.

Установлено, что ширина спектра фотоэмиссии из валентной зоны чистого  $n\text{-AlGaN}(0001)$  соответствует  $\sim 10$  эВ. Ширина и форма полученных нами спектров фотоэмиссии из валентной зоны имеют сходную структуру со спектрами валентной зоны  $n\text{-GaN}$ .

При адсорбции Ва на поверхности  $n\text{-AlGaN}$  наблюдаются два наиболее ярких эффекта: 1) впервые для  $n\text{-AlGaN}$  обнаружено появление нового фотоэмиссионного пика в запрещенной зоне вблизи уровня Ферми. Природа пика связана с созданием 2DEG в аккумуляционном слое, индуцированным адсорбцией Ва; 2) обнаружено сильное сужение спектра фотоэмиссии из валентной зоны до  $\sim 1.5$  эВ за счет подавления собственных поверхностных состояний.

В процессе формирования границы раздела Ва/ $n\text{-AlGaN}$  обнаружено резкое изменение положения края валентной зоны  $E_{VBM}$  относительно уровня Ферми от 3.2 эВ для чистой поверхности  $n\text{-AlGaN}$  до 4.1 эВ для Ва покрытия 0.6 МС. Подчеркнем, что величина  $E_{VBM} - E_F = 4.1$  эВ заметно превосходит ширину запрещенной зоны, которая для  $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$  составляет  $E_g = 3.7$  эВ. Такое неординарное поведение возможно при формировании аккумуляционного слоя в узкой области вблизи поверхности образца. При адсорбции Ва на поверхности  $n\text{-AlGaN}(0001)$  наблюдается также резкое уменьшение интенсивности пиков остовных уровней Ga  $3d$ , Al  $2p$ .

**В заключении** сформулированы основные результаты:

1. Установлено положение собственных поверхностных состояний  $n\text{-GaN}(0001)$ , расположенных при энергиях связи 2.9 эВ, 5.0 эВ и 6.9 эВ относительно края валентной зоны  $E_{VBM}$ .
2. Обнаружены поверхностные зоны, индуцированные адсорбцией Cs и Ва, на  $n\text{-GaN}(0001)$ . Положение Cs-зон относительно  $E_F$  соответствует 0.35 эВ и 0.50 эВ. Положение Ва-зон относительно  $E_F$  соответствует 0.1 эВ и 0.3 эВ.
3. Впервые наблюдалась «нетрадиционная» пороговая фотоэмиссия для границы раздела Cs/ $n\text{-In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}(0001)$  при возбуждении  $s$ -поляризованным светом в области прозрачности InGaN. Установлено, что природа фотоэмиссии связана с возбуждением электронов из 2DEG в аккумуляционном слое в зоне проводимости. Квантовый выход фотоэмиссии из аккумуляционного слоя достаточно высок и сравним с квантовым выходом для традиционного фотокатода Cs/GaAs.
4. Для всех исследуемых образцов  $n\text{-In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}(0001)$ ,  $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$  и  $n\text{-GaN}(0001)$  за счет адсорбции Cs или Ва в диапазоне субмонослойных покрытий установлено формирование аккумуляционного слоя независимо от структурного совершенства образца. В процессе формирования

аккумуляционного слоя край зоны проводимости на поверхности меняет свою позицию от положения выше  $E_F$  до положения ниже  $E_F$ .

5. Предложен способ целенаправленного изменения изгиба зон, энергетических параметров потенциальной ямы аккумуляционного слоя, плотности состояний 2DEG и квантового выхода фотоэмиссии, заключающийся в изменении степени субмонослойного покрытия Cs или Ba на поверхности  $n\text{-In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}(0001)$ ,  $n\text{-GaN}(0001)$  и  $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$ .

6. Для анализа спектров пороговой фотоэмиссии из аккумуляционного слоя модифицирована теория Урбаха для случая фотоэмиссии из локальной поверхностной зоны. Установлено положение первого уровня размерного квантования в аккумуляционном слое, и рассчитан матричный элемент возбуждения фотоэмиссии.

7. Обнаружена осцилляционная структура в спектрах пороговой фотоэмиссии для интерфейса Cs/ $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  при возбуждении в области прозрачности. Природа эффекта обусловлена интерференцией Фабри-Перо в плоскопараллельной пластине  $\text{InGaN}$  и наличием аккумуляционного слоя.

8. Установлено кардинальное уменьшение ширины спектра фотоэмиссии из валентной зоны чистых  $n\text{-GaN}(0001)$  и  $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}(0001)$  от  $\sim 10$  эВ до  $\sim 1.5$  эВ при Ва покрытии 0.6 МС. Природа эффекта связана с подавлением собственных поверхностных состояний подложки.

### **Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:**

- [A1] Бенеманская, Г.В. Аккумуляционный зарядовый слой ультратонких интерфейсов Cs, Ba/ $n\text{-GaN}(0001)$ : электронные и фотоэмиссионные свойства / Г.В. Бенеманская, М.Н.Лапушкин, С.Н. Тимошнев // ФТТ. – 2007. – Т. 49. - Вып. 4. – С. 613-617.
- [A2] Бенеманская, Г.В. Эффект самоорганизации наноструктур на поверхности  $n\text{-GaN}(0001)$  при адсорбции Cs и Ba / Г.В. Бенеманская, В.С. Вихнин, С.Н. Тимошнев // Письма ЖЭТФ. – 2008. – Т. 87. – Вып. 2. – С. 119-123.
- [A3] Бенеманская, Г.В. Аккумуляционный нанослой - 2D электронный канал ультратонких интерфейсов Cs/ $n\text{-InGaN}(0001)$  / Г.В. Бенеманская, В.Н. Жмерик, М.Н. Лапушкин, С.Н. Тимошнев // ФТТ. – 2009. – Т. 51. – Вып. 2. – С. 372-376.
- [A4] Бенеманская, Г.В. Аккумуляционный нанослой и поверхностные состояния ультратонких интерфейсов Cs, Ba/ $n\text{-GaN}$  / Г.В. Бенеманская, С.Н. Тимошнев, Г.Э. Франк-Каменецкая // Известия РАН. Серия физическая. – 2009. – Т. 73. – № 5. - С. 710-712.
- [A5] Benemanskaya, G.V. Surface states and accumulation nanolayer induced by Ba and Cs adsorption on the  $n\text{-GaN}(0001)$  surface / G.V. Benemanskaya, M.N. Lapushkin, S.N. Timoshnev // Surf. Sci. – 2009. Vol. 603. – I.16. - P. 2474-2478.
- [A6] Бенеманская, Г.В. Электронная структура границы раздела Ba/ $n\text{-AlGaIn}(0001)$  и формирование вырожденного 2D электронного газа / Г.В. Бенеманская, В.Н. Жмерик, М.Н. Лапушкин, С.Н. Тимошнев // Письма ЖЭТФ. – 2010. – Т. 91. – Вып. 12. – С. 739-743.
- [A7] Вихнин, В.С. Модель формирования периодической сверхструктуры, индуцированной подвижными дефектами на поверхности полупроводника /

- В.С. Вихнин, Г.В. Бенеманская, С.Н. Тимошнев // Известия РАН. Серия физическая. – 2010. – Т. 74. – № 9. – С. 1377-1381.
- [A8] Бенеманская, Г.В. 2D-вырожденный электронный газ на границах раздела  $Va/n$ -AlGa $N$  и  $Va/n$ -Ga $N$  / Г.В. Бенеманская, С.Н. Тимошнев, М.Н. Лапушкин, Г.Э. Франк-Каменецкая // Известия РАН. Серия физическая. –2011. – Т. 75. – № 5. – С. 2-5.
- [A9] Benemanskaya, G.V. Self-organizing chain-like nanostructures created by Cs and Ba adatoms on GaN(0001)  $n$ -type surface / G.V. Benemanskaya, G.E. Frank-Kamenetskaya, V.S. Vikhnin, S.N. Timoshnev // Proc. 14 Int. Symp. NANO-2006. – St.Petersburg, 2006. – P. 93-94.
- [A10] Бенеманская, Г.В. Электронные свойства и энергетические параметры 2D аккумуляционных слоев Cs,  $Va/n$ -Ga $N$ (0001) интерфейсов / Г.В. Бенеманская, М.Н. Лапушкин, С.Н. Тимошнев // 5-ая Всероссийская конференция “Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы”. Тезисы докладов. – Москва, 2007. – С. 153-154.
- [A11] Benemanskaya, G.V. Creation of accumulation layer on  $n$ -Ga $N$  and  $n$ -InGa $N$  surfaces / G.V. Benemanskaya, M.N. Lapushkin., S.N. Timoshnev // IVC17/ICSS13 and ICN+T2007. – Sweden, Stockholm, 2007. – P. SS01-Or6.
- [A12] Бенеманская, Г.В. Аккумуляционный нанослой и поверхностные состояния ультратонких интерфейсов Cs,  $Va/n$ -Ga $N$  / Г.В. Бенеманская, С.Н. Тимошнев, Г.Э. Франк-Каменецкая // Международный симпозиум «Физика низкоразмерных систем и поверхностей» Low Dimensional Systems (LDS). – Ростов-на Дону, 2008. – С. 59-61.
- [A13] Бенеманская, Г.В. Аккумуляционный нанослой ультратонких интерфейсов Cs,  $Va/n$ -InGa $N$  / Г.В. Бенеманская, М.Н. Лапушкин, С.Н. Тимошнев, В.Н. Жмерик // 6-ая Всероссийская конференция “Нитриды галлия, индия и алюминия“. Тезисы докладов. – Санкт-Петербург, 2008. – С. 155-156.
- [A14] Timoshnev, S.N. Accumulation nanolayer on the ultrathin Cs,  $Va/n$ -Ga $N$  interfaces / S.N. Timoshnev, G.V. Benemanskaya, M.N. Lapushkin // 25 Intern. Conf. ECOSS-25. – Liverpool, 2008. – P. 718-719.
- [A15] Тимошнев, С.Н. Аккумуляционный нанослой ультратонких интерфейсов Cs,  $Va/n$ -Ga $N$  / С.Н. Тимошнев, Г.В. Бенеманская // X Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике. Тезисы докладов. – Санкт-Петербург, 2008. – С. 32.
- [A16] Тимошнев, С.Н. 2D электронный канал – аккумуляционный слой на поверхности  $n$ -Ga $N$ (0001) / С.Н. Тимошнев // Международная Зимняя Школа по физике полупроводников. Тезисы докладов. – Санкт-Петербург – Зеленогорск, 2009. – С. 21-22.
- [A17] Бенеманская, Г.В. Создание аккумуляционных нанослоев на поверхности  $n$ -Ga $N$ (0001) и  $n$ -InGa $N$ (0001) / Г.В. Бенеманская, С.В. Иванов, М.Н. Лапушкин, С.Н. Тимошнев, Н.М. Шмидт // XIII Международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника». Тезисы докладов. – Нижний Новгород, 2009. – С. 125-126.
- [A18] Бенеманская, Г.В. Аккумуляционный нанослой на поверхности  $n$ -InGa $N$  при адсорбции Cs / Г.В. Бенеманская, С.Н. Тимошнев, Г.Э. Франк-Каменецкая // 4-ая Всероссийская конференция «Химия поверхности и нанотехнология». – Хилово, 2009. – С. 249-251.
- [A19] Бенеманская, Г.В. Фотоэмиссионная спектроскопия  $n$ -AlGa $N$  и ультратонких интерфейсов  $Va/n$ -AlGa $N$  при синхротронном возбуждении / Г.В. Бенеманская, М.Н. Лапушкин, С.Н. Тимошнев, В.Н. Жмерик // 7-ая Всероссийская конференция “Нитриды галлия, индия и алюминия - структуры и приборы“. – Москва, 2010. – С. 193-194.

- [A20] Бенеманская, Г.В. вырожденный 2D электронный газ на границах раздела Ва/*n*-AlGaN и Ва/*n*-GaN / Г.В. Бенеманская, С.Н. Тимошнев, М.Н. Лапушкин, Г.Э. Франк-Каменецкая // Международный симпозиум «Физика низкоразмерных систем и поверхностей» Low Dimensional Systems (LDS-2). – Ростов-на-Дону, 2010. – С. 31-34.

### Список цитированной литературы

- [1] Olsson, L.Ö. Charge accumulation at InAs surfaces / L. Ö. Olsson, C. B. M. Andersson, M. C. Håkansson, J. Kanski, L. Ilver, U. O. Karlsson // Phys. Rev. Lett. – 1996. – Vol. 76. – I. 19. – P. 3626-3629.
- [2] Mahboob, I. Origin of electron accumulation at wurtzite InN surfaces / I. Mahboob, T.D. Veal, L.F.J. Piper, C.F. McConville, H. Lu, W.J. Schaff, J. Furthmueller, F. Bechstedt // Phys. Rev. B. – 2004. – Vol. 69. – I. 20. – P. 201307(4).
- [3] Olsson, L.Ö. Anomalous quenching of photoemission from bulk states by deposition of Cs on InAs(100) / L.Ö. Olsson, L. Ilver, J. Kanski, P. O. Nilsson, B. J. Kowalski, M. C. Håkansson, U. O. Karlsson // Phys. Rev. B. – 1995. Vol. 52. – I. 3. – P. 1470-1473.
- [4] Betti, M.G. Density of states of a two-dimensional electron gas at semiconductor surfaces / M.G. Betti, V. Corradini, G. Bertoni, P. Casarini, C. Mariani, A. Abramo // Phys. Rev. B. – 2001. – Vol. 63. – I. 15. – P. 155315(10).
- [5] Betti, M.G. Cesium-induced electronic states and space-charge-layer formation in Cs/InSb(110) interface / M.G. Betti, R. Biagi, U. del Pennino, C. Mariani, M. Pedio // Phys. Rev. B. – 1996. – Vol. 53. – I. 20. – P. 13605-13612.
- [6] Benemanskaya, G.V. Electron accumulation layer at the Cs-covered GaN(0001) *n*-type surface / G.V. Benemanskaya, V.S. Vikhnin, N.M. Shmidt, G.E. Frank-Kamenetskaya, I.V. Afanasiev // Appl. Phys. Lett. – 2004. – Vol. 85. – № 8. - P. 1365-1367.
- [7] Segev, D. Electronic structure of nitride surfaces / D. Segev, C.G. Van de Walle // J. Cryst. Growth. – 2007. – Vol. 300. – I. 1. – P. 199-203.
- [8] Strasser, T. Valence-band photoemission from the GaN(0001) surface / T. Strasser, C. Solterbeck, F. Starrost, W. Schattke // Phys. Rev. B. – 1999. – Vol. 60. – I. 16. – P. 11577-11585.
- [9] Bermudez, V.M. Study of oxygen chemisorption on the GaN(0001)-(1x1) surface / V.M. Bermudez // J. Appl. Phys. - 1996. - Vol. 80. - I. 2. – P. 1190.