

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Б.П. КОНСТАНТИНОВА

(На правах рукописи)

УДК 621.315.592

КУРЯТКОВ Владимир Вениаминович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И  
ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОДЕТЕКТОРОВ  
УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА НА ОСНОВЕ  
ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ  $Al_xGa_{1-x}N$

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

ГАТЧИНА  
2006

Работа выполнена в Отделении физики высоких энергий  
Петербургского института ядерной физики  
им. Б.П. Константинова РАН.

- Научные руководители — доктор физико-математических наук  
В.М. Самсонов
- доктор физико-математических наук  
В.И. Кучинский
- Официальные оппоненты — доктор физико-математических наук,  
профессор А.Н. Пихтин
- доктор физико-математических наук,  
профессор Г.Г. Зегря
- Ведущая организация — Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет

Защита состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2006 г. в \_\_\_\_\_ часов на  
заседании диссертационного совета Д.002.115.01 при Петербургском  
институте ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН по адресу: 188300,  
Ленинградская область, г. Гатчина, Орлова роща.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ПИЯФ РАН.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2006 г

Ученый секретарь  
диссертационного совета

И.А. Митропольский

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время фотодетекторы и светодиоды ультрафиолетового диапазона (УФ) находят все более широкое применение в научных исследованиях, в частности, в исследовании биологических объектов, в исследовании космоса, а также в бытовых приборах и электронной аппаратуре.

Вполне закономерно, что именно широкозонные полупроводники, такие как GaN, AlGaN и AlN (далее III-нитриды), привлекли внимание разработчиков приборов [1, 2]. Так, например, AlGaN может быть выращен с составом в широком диапазоне, от GaN(3,42 эВ) до AlN(6,2 эВ).

Солнечное ультрафиолетовое излучение с длиной волны короче  $\lambda = 280$  нм ( $h\nu \sim 4,43$  эВ) интенсивно поглощается верхними слоями земной атмосферы, и использование  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  с  $x > 0,4$  ( $E_g \sim 4,2$  эВ) открывает уникальную возможность для разработки нового поколения фотодетекторов.

Фотодетекторы, работающие в спектральном диапазоне 240÷280 нм и не чувствительные к солнечному освещению (solar-blind), не имеют лимита по фоновому излучению и могут иметь сравнимые с фотоумножителями характеристики.

Серьезной проблемой при создании приборов УФ диапазона спектра является получение высоколегированных слоев AlGaN *n*- и *p*-типа с высоким составом AlN и обеспечение достаточно низкого рабочего напряжения и малой мощности потребления. Один из путей решения этой проблемы заключается в использовании сверхрешёток (СР) [3]. В связи с этим, исследование электрических и оптических свойств СР для приборов дальней УФ области спектра представляет значительный интерес.

Таким образом, получение высококачественных слоев  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  и сверхрешёток на их основе, разработка фотодетекторов УФ диапазона и исследование их электрических и оптических характеристик, является **весьма актуальным**.

**Цель работы** заключается в разработке технологии получения фотодетекторов УФ спектрального диапазона на основе твердых растворов  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  и исследовании электрических и оптических характеристик.

Для этого необходимо решить следующие **задачи**:

1. Получить слои GaN и AlGaN высокого кристаллического качества методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) с аммиаком и исследовать их оптические и электрические характеристики.
2. Исследовать легирование магнием и кремнием слоев  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ .

3. Исследовать легирование магнием и кремнием, электрические и оптические характеристики СР  $\text{AlN}/\text{Al}_{0,08}\text{Ga}_{0,92}\text{N}$ .

4. Разработать технологию изготовления фотодетекторов УФ диапазона спектра 250÷380 нм, исследовать оптические и электрические характеристики фотодетекторов.

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. Впервые получены систематические данные об оптических свойствах короткопериодных сверхрешёток (КПСР)  $\text{AlN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  в области средних составов  $\text{AlN}$  от 0,50 до 0,85.
2. Показано, что эффективная ширина запрещенной зоны,  $E_g$ , КПСР  $\text{AlN}/\text{Al}_{0,08}\text{Ga}_{0,92}\text{N}$  при ширине ямы 0,50 и 0,75 нм может быть изменена заданным образом на ~ 100÷400 мэВ путем изменения периода в интервале от 1,25 нм до 2,25 нм.
3. Получены и исследованы слои *n*-типа  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}:\text{Si}$ , выращенные методом МПЭ с газовыми источниками аммиака и силана, с высоким уровнем легирования ( $>10^{19} \text{ см}^{-3}$ ) вплоть до состава  $x \sim 0,85$ .
4. Исследовано вхождение магния в слюях  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}:\text{Mg}$ ,  $0 \leq x \leq 1$ , выращенных МПЭ с постоянной скоростью роста, при стехиометрическом соотношении III/V элементов в диапазоне температур 780÷820°C и установлено, что вхождение Mg уменьшается более чем на порядок при изменении состава от  $x=0$  до  $x=1$ .
5. Исследовано влияние кислорода на легирование магнием слоев  $\text{GaN}:(\text{Mg}+\text{O})$  и  $\text{Al}_{0,08}\text{Ga}_{0,92}\text{N}:(\text{Mg}+\text{O})$  с концентрацией  $\text{Mg } 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , выращенных МПЭ с использованием аммиака. Установлено, что кислород в твердой фазе снижает энергию активации акцептора.
6. Исследованы оптические и электрические характеристики  $\text{GaN}$  и  $\text{AlGaN}$ , выращенных методом МПЭ с аммиаком, и найдены условия получения слоев высокого кристаллического качества  $\text{GaN}$  и  $\text{AlGaN}$  на Si (111) и на сапфире (0001).

**Практическая ценность работы:**

1. Разработана технология роста слоев  $\text{GaN}$  и  $\text{AlGaN}$  высокого кристаллического качества методом МПЭ с аммиаком на кремнии (111) и на сапфире (0001).
2. Исследовано легирование твердых растворов  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  *n*- и *p*-типа различного состава ( $0 \leq x \leq 1$ ).
3. Исследовано легирование магнием и кремнием КПСР  $\text{AlN}/\text{Al}_{0,08}\text{Ga}_{0,98}\text{N}$ .

4. Обнаружено уменьшение энергии активации акцептора магния в эпитаксиальных слоях GaN и  $\text{Al}_{0,08}\text{Ga}_{0,98}\text{N}$ , выращенных методом МПЭ с аммиаком в присутствии кислорода.
5. Разработана технология изготовления фотодетекторов УФ диапазона спектра 250÷380 нм.
6. Показано, что Шоттки диоды с размером мезы  $86 \times 86 \text{ мкм}^2$ , изготовленные на эпитаксиальных слоях *n*-GaN, выращенных МПЭ с аммиаком на Si(111), имеют плотность темнового тока  $\sim 2,10 \cdot 10^{-8} \text{ А/см}^2$  при напряжении  $-2 \text{ В}$  и плотность мощности шума на частоте  $1 \text{ Гц}$   $\sim 9 \cdot 10^{-29} \text{ А}^2/\text{Гц}$  при нулевом напряжении.
7. Исследованы оптические и электрические характеристики фотодетекторов диапазона длин волн 250÷380 нм на основе КПСР  $\text{AlN}/\text{Al}_{0,08}\text{Ga}_{0,92}\text{N}$ , выращенных на сапфире (0001) методом МПЭ.
8. Исследованы шумовые характеристики фотодиодов на  $\text{AlGaN-GaN}$ , выращенных методом МОСГЭ. Показано, что спектральная плотность мощности шума в  $\text{AlGaN-GaN}$  фотодиодах, измеренная для частоты  $1 \text{ Гц}$ , имеет экспоненциальную зависимость от обратного напряжения и может быть аппроксимирована линейной зависимостью:  

$$S_i^* = (I_{\text{темн}}^2 / f^2) \sqrt{A / A_0}$$
, где  $A_0$  – характеристический параметр площади,  $A$  – площадь диода,  $\gamma$  – коэффициент равный 1,  $f$  – частота.
9. Разработан метод травления  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  и СР  $\text{AlN}/\text{AlGaN}$  в плазме  $\text{CF}_4/\text{Ar}$  для состава твердого раствора  $0 \leq x \leq 1$ . Впервые показано, что скорость травления  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  и СР  $\text{AlN}/\text{AlGaN}$  в плазме  $\text{CF}_4/\text{Ar}$  не зависит от состава твердого раствора во всем диапазоне  $0 \leq x \leq 1$ .

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Кремний является мелким донором в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  с энергией активации  $20 \div 26 \text{ мэВ}$  независимо от состава твердого раствора в диапазоне  $0,56 < x < 0,85$  и концентрации кремния в диапазоне  $10^{18} \div 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .
2. В слоях  $\text{GaN:Mg}$  и  $\text{AlN:Mg}$ , выращенных МПЭ с аммиаком с постоянной скоростью роста при стехиометрическом соотношении III/V элементов в диапазоне температур  $780 \div 820^\circ\text{C}$ , вхождение Mg отличается на порядок,  $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  и  $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , соответственно.
3. В эпитаксиальных слоях *p*-типа  $\text{GaN}:(\text{Mg}+\text{O})$  и  $\text{Al}_{0,08}\text{Ga}_{0,92}\text{N}:(\text{Mg}+\text{O})$ , с концентрацией Mg  $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , выращенных МПЭ с аммиаком, энергия активации акцептора может быть снижена с  $200 \pm 20 \text{ мэВ}$  до  $145 \pm 20 \text{ мэВ}$  и с  $250 \pm 20 \text{ мэВ}$  до  $195 \pm 20 \text{ мэВ}$ , соответственно, при соотношении концентраций Mg и O в твердой фазе  $\text{Mg/O} = 40$ .

4. Эффективная ширина запрещенной зоны,  $E_g$ , КПСР  $\text{AlN}/\text{Al}_{0,08}\text{Ga}_{0,92}\text{N}$  с шириной ямы 0,50 и 0,75 нм может быть изменена заданным образом с 4,50 до 5,30 эВ путем изменения периода от 1,25 до 2,25 нм.
5. Скорость травления  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  в  $\text{CF}_4/\text{Ar}$  плазме ИСП (индуктивно связанная плазма) /РИП (реактивно ионная плазма) не зависит от состава твердого раствора при соотношении потоков газов  $\text{CF}_4/\text{Ar} = 20/4$  sccm, ИСП=300Вт, РИП=150Вт и давлении = 10 мТорр.
6. Использование КПСР  $\text{AlN}/\text{Al}_{0,08}\text{Ga}_{0,92}\text{N}$  в приборных структурах, выращенных методом МПЭ с аммиаком, позволяет создать солнечно-слепые фотоприемники с низким уровнем темнового тока и высокой обнаружительной способностью при нулевом напряжении.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: 4-я Всероссийская конференция “Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы”, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 2005, Санкт-Петербург, Россия; The Materials Research Society Meeting, Boston, Massachusetts, 2005, USA; 4-я Международная конференция “Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCN4)”, 2004 г. Санкт-Петербург, Россия; 46<sup>th</sup> Electronic Materials Conference, Univ. of Notre Dame, IN, USA, 2004; 5<sup>th</sup> International Conf. on Nitride Semiconductor, ICNS-5, 2003, Nara, Japan; 45<sup>th</sup> Electronic Materials Conference, Salt Lake City, USA, 2003; 8<sup>th</sup> Wide-bandgap III-Nitride Workshop, Richmond, USA, 2003; 44<sup>th</sup> Electronic Materials Conference, Univ. of California, S. Barbara, 2002; International Workshop on Nitride Semiconductors, 2002, Aachen, Germany; 7<sup>th</sup> Wide Bandgap III-Nitride Workshop, Richmond, Virginia, 2002, USA; 4<sup>th</sup> International Symposium on Blue Laser and Light Emitting Diodes, (ISBLLED-4), 2002, Córdoba, Spain; ICNS-4, 2001, Denver, Colorado, USA; MRS Fall Meeting, 2000, Boston, Massachusetts, USA; 18<sup>th</sup> Annual North American Conference on Molecular Beam Epitaxy, Phoenix, Arizona, 2000, USA; 4-е Всероссийское совещание “Нитриды галлия, индия и алюминия - структуры и приборы”, Санкт-Петербург, 2000, Россия.

**Публикации.** Основные материалы диссертации опубликованы в 18 научных работах. Полный список приведен в конце автореферата.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, списка литературы, включающего 245 наименований. Основная часть работы изложена на 175 страницах машинописного текста. Работа содержит 83 рисунков и 5 таблиц.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во ВВЕДЕНИИ** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются основные задачи и цель работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**ПЕРВАЯ глава** посвящена обзору литературных данных по фотодетекторам УФ диапазона спектра на основе  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ . Приведены сведения по получению, структуре, оптическим и электрическим свойствам GaN и AlGaN фотодетекторов дальней УФ области ( $\lambda < 360$  нм). Большая плотность дефектов эпитаксиальных слоев, от  $10^7$  до  $10^{10}$   $\text{см}^{-2}$ , ограничивала характеристики III-нитридных приборов. Необходимо разработать технологию получения слоев GaN и AlGaN высокого качества. Для приборов УФ области спектра необходимо получить слои *n*- и *p*- типа  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  с составом близким к AlN. Легирование таких слоев и получение омических контактов представляет значительные трудности. Требуется выявить влияние дислокаций на механизм протекания тока. Показано, что в литературе отсутствуют данные по получению качественных слоев GaN и AlGaN и сверхрешеток на их основе, выращенных методом МПЭ с использованием аммиака, не разработана технология легирования этих слоев.

**Во ВТОРОЙ главе** описаны методика проведения исследований и метод роста эпитаксиальных слоев.

**В первом разделе** описаны основные этапы подготовки и проведения процесса эпитаксиального роста на установке МПЭ РИБЕР32.

**Во втором разделе** рассмотрены основные методики, применявшиеся в рамках диссертационной работы для измерения параметров эпитаксиальных слоев и гетероструктур, включая электрические, оптические и кристаллические свойства.

**В третьем разделе** описаны технологические процессы ионно-плазменного травления для формирования меза-структур.

**В ТРЕТЬЕЙ главе** приведены результаты исследования эпитаксиальных пленок GaN, AlGaN и слоев КПСР.

**В первом разделе** приведены результаты исследования оптических и электрических свойств  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  слоев с  $0 \leq x \leq 1$ , выращенных методом МПЭ с аммиаком на подложках Si(111) *n*- и *p*- типа.

Путем оптимизации режимов нуклеации и роста буферного слоя, а именно, температуры и скорости роста, соотношения потоков элементов III и V группы на кремниевых и сапфировых подложках были получены эпитаксиальные слои и гетероструктуры на основе GaN, AlN и AlGaN с высоким кристаллическим совершенством.

Показано, что образование нитрида кремния при чередовании потоков алюминия и аммиака способствует формированию высокотемпературного буферного слоя AlN высокого качества на кремниевых подложках.

Установлено, что использование высокотемпературного AlN буфера на сапфировых подложках позволяет получать эпитаксиальные слои GaN и AlGaN высокого качества, имеющие полярность элемента III группы.

**Во втором разделе** приведены результаты исследования оптических и электрических свойств GaN, выращенного методом МПЭ с аммиаком на Si(111). Изучена температурная зависимость края фотолуминесценции в диапазоне температур 77÷495 К для образцов с низкой фоновой концентрацией носителей, определенной методами измерения вольтфарадных характеристик и Раман-спектров. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны GaN близка к зависимости для объемного GaN и хорошо описывается моделями Паслера и Варшни. Показано, что концентрация электронов в GaN, полученная из измерений вольтфарадных характеристик, может быть оценена из измерений относительной интенсивности Раман-спектров  $A_1(LO)$  и  $E_2^2$  мод для GaN. Оценена энергия связи свободных экситонов  $29 \pm 2$  мэВ.

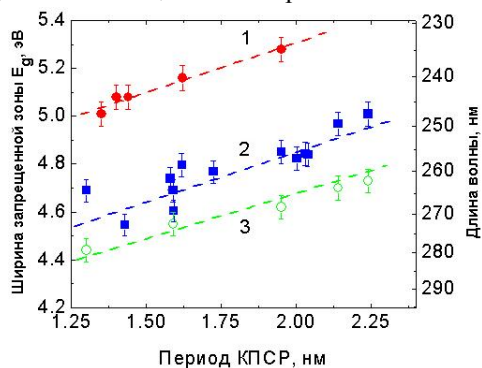


Рис. 1. Зависимость эффективной ширины запрещенной зоны от периода сверхрешетки:

- 1- яма два монослоя (отражение);
- 2- яма три монослоя (отражение);
- 3- яма три монослоя (катодолуминесценция).

Обсуждается вклад различных механизмов в уширение линии свободных экситонов.

**В третьем разделе** исследованы оптические и кристаллические характеристики КПСР AlN/AlGaIn. Параметры сверхрешеток определялись из спектров рентгеновской дифракции (РД). Эффективный состав вычислялся из положения "0" пика, используя закон Вегарда, а период - по положению "+1" и "-1" пиков РД. Эффективная ширина запрещенной зоны, ( $E_g$ ) КПСР, определялась из измерений оптического отражения.



Получена зависимость эффективной ширины запрещенной зоны,  $E_g$  КПСР, от периода в диапазоне 1,25÷2,25 нм (рис. 1). При постоянном периоде изменение толщины ямы на один монослой (МС) приводит к изменению  $E_g$  на величину  $400\pm 30$  мэВ. При постоянной толщине ямы и изменении толщины барьера  $E_g$  изменяется на  $100\pm 20$  мэВ. Промежуточные заданные значения сдвига  $E_g$  можно получить изменением толщины ямы или толщины барьера. Сдвиг катодоллюминесценции (КЛ) объясняется флуктуациями периода сверхрешетки. Эти флуктуации приводят к локальному изменению ширины эффективной запрещенной зоны. Носители диффундируют в области с меньшей  $E_g$ , где и происходит преимущественная рекомбинация с длиной волны большей, чем в среднем по объему.

**ЧЕТВЕРТАЯ глава** посвящена изучению электрических и оптических свойств слоев  $n$ -,  $p$ -типа на основе GaN, AlGaN и КПСР.

**В первом разделе** исследовано легирование кремнием слоев AlGaN различного состава, выращенных методом МПЭ с аммиаком. Высокий уровень легирования  $n$ -типа (концентрация электронов  $>10^{19}$  см<sup>-3</sup>) слоев  $Al_xGa_{1-x}N$  был получен вплоть до состава  $x\sim 0,85$ . При таком уровне легирования из-за сильного вырождения концентрация электронов слабо зависит от температуры. Дальнейшее увеличение состава приводит к резкому уменьшению концентрации электронов и для чистого AlN она составляет  $\sim 1\cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Это связано с резким возрастанием энергии активации донорного уровня кремния с  $\sim 30$  мэВ для  $x=0,85$  до  $\sim 265$  мэВ для  $x=1$ . Обсуждаются возможные модели такого поведения. Наиболее близко согласуется с нашими экспериментальными данными модель, основанная на изменении диэлектрической постоянной [4]. В рамках этой модели, при энергиях ионизации больше чем энергия поперечных фононов, необходимо использовать высокочастотную, а не низкочастотную диэлектрическую постоянную. Из модели следует, что для AlGaN с составом  $x > 0,8$  энергия ионизации донора резко изменяется.

**Во втором разделе** исследовано влияние кислорода на легирование магнием слоев GaN:(Mg+O) и  $Al_xGa_{1-x}N:(Mg+O)$  ( $0\leq x\leq 0,08$ ) с концентрацией Mg  $\sim 1\cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup>, выращенных МПЭ. Показано, что в эпитаксиальных слоях  $p$ -типа GaN:(Mg+O) и  $Al_{0,08}Ga_{0,92}N:(Mg+O)$  с концентрацией Mg  $1\cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup> взаимодействие Mg и O в твердой фазе снижает энергию активации дырок с  $200\pm 20$  мэВ до  $145\pm 20$  мэВ и с  $250\pm 20$  мэВ до  $195\pm 20$  мэВ, соответственно, при соотношении Mg/O = 40.

**В третьем разделе** исследовано легирование слоев  $Al_{0,04}Ga_{0,96}N$  магнием. Установлено, что оптимальным, с точки зрения легирования,

является диапазон концентрации Mg  $2 \div 7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . В области концентрации магния  $< 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  уменьшается концентрация акцепторных уровней. С ростом уровня легирования проявляется амфотерная природа магния. Магний встраивается не только в катионную подрешётку, замещая атомы галлия, но и анионную, замещая атомы азота и образуя глубокий донорный уровень. В области концентрации магния больше  $7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  концентрация дырок падает из-за сильного возрастания эффекта самокомпенсации. Показано, что увеличение состава  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  приводит к резкому возрастанию энергии активации уровня магния.

**В четвертом разделе** исследовано легирование магнием и кремнием КПСР двух типов -  $\text{AlN}/\text{Al}_{0,08}\text{Ga}_{0,92}\text{N}$  (I) и  $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{N}/\text{GaN}$  (II).

Для получения слоев *p*-типа высокого уровня легирования с эффективным составом  $x > 0,1$  было предложено использовать СР [3]. Среди соединений  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  нитриды имеют самые большие величины спонтанной и пьезоэлектрической поляризации, что приводит к возникновению в гетероструктурах сильных электрических полей, значительно изменяющих зонную диаграмму полупроводника. В результате в области ям сверхрешётки образуется двумерный газ носителей тока, эффективная концентрация которого может на порядки превышать концентрацию в  $\text{AlGaN}$  такого же состава.

Определены оптимальные толщины барьеров ( $d_b$ ) и ям ( $d_w$ ), составляющих сверхрешётку, для получения высокой концентрации электронов и дырок, хорошей проводимости в поперечном направлении и требуемой эффективной ширины запрещенной зоны. Для КПСР (I) оптимальными являются  $d_b = 1,25 \text{ нм}$  и  $d_w = 0,5 \text{ нм}$ , а для КПСР (II) -  $d_b = 5 \text{ нм}$  и  $d_w = 2 \text{ нм}$ . Выращенные с использованием указанных размеров сверхрешетки имели концентрацию электронов  $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  и  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и концентрацию дырок  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  для типов (I) и (II), соответственно. Из-за сильного вырождения двумерного газа все легированные КПСР, как *n*- так и *p*-типа, имели очень слабую температурную зависимость проводимости в интервале  $100 \div 350 \text{ К}$ .

**ПЯТАЯ глава** посвящена приборам УФ диапазона, разработанным и изготовленным в результате проведенных исследований. Приводятся данные исследования электрических и оптических характеристик полученных приборов.

**Первый раздел** посвящен исследованию характеристик фотодиода на барьере Шоттки, изготовленном на *n*- $\text{GaN}$ , выращенном МПЭ на кремнии Si(111). Исследованы электрические, оптические и шумовые характеристики фотодиодов.

Показано, что диоды на барьере Шоттки с размером мезы  $86 \times 86 \text{ мкм}^2$  имеют рекордные темновые токи и шумовые характеристики на момент выполнения работы. Плотность темновых токов  $\sim 2,1 \cdot 10^{-8} \text{ А/см}^2$  при напряжении  $-2 \text{ В}$  и плотность мощности шума на частоте  $1 \text{ Гц}$   $\sim 9 \cdot 10^{-29} \text{ А}^2/\text{Гц}$  при нулевом напряжении.

**Во втором разделе** проведено детальное исследование вольт-амперных и шумовых характеристик  $p-i-n$  фотодиодов на основе  $\text{AlGaIn-GaN}$ . Диодные структуры были выращены на сапфире методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Введение дополнительного углубленного окна  $p\text{-Al}_{0,13}\text{Ga}_{0,87}\text{N}$  позволило увеличить квантовую эффективность за счет прохождения большего количества света до внутренней области поглощения по сравнению с фотодиодами на  $\text{GaN}$  гетеропереходах. Получены значения квантовой эффективности  $\sim 38\%$  для  $\lambda \sim 360 \text{ нм}$  и  $\sim 22\%$  для  $\lambda \sim 300 \text{ нм}$  при напряжении  $-15 \text{ В}$ .

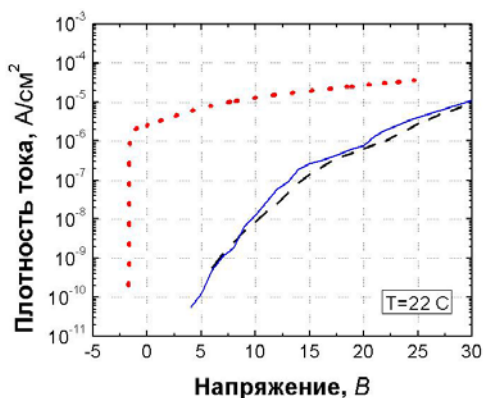


Рис. 2. Зависимость плотности тока от напряжения обратного смещения. Сплошная и пунктирная линии показывают плотность темнового тока для диода диаметром  $50 \text{ мкм}$  и  $250 \text{ мкм}$  соответственно. Точечная линия показывает вольт-амперную характеристику при освещении с  $\lambda = 260 \text{ нм}$ .

Полупрозрачный  $p$ -контакт,  $\text{Ni}(50\text{Å})/\text{Au}(100\text{Å})$ , полностью покрывал поверхность мезы диода, способствуя однородному распределению электрического поля в активной области диода. Типичная вольт-амперная характеристика ( $I-V$ ) для описываемых устройств показана на рис. 2 для двух мез диаметром  $50$  и  $250 \text{ мкм}$ . Все измеренные диоды показали очень низкие токи утечки при малых напряжениях, менее чем  $1 \cdot 10^{-10} \text{ А/см}^2$  при  $-5 \text{ В}$ . Плотность тока при обратном напряжении не зависела от размеров структуры.

Измерение  $I-V$  в диапазоне температур от  $20^\circ\text{C}$  до  $250^\circ\text{C}$  показало энергию активации темнового тока  $\sim 0,4 \text{ эВ}$  для напряжений обратного смещения от  $-1 \text{ В}$  до  $-20 \text{ В}$ . При нулевом напряжении типичное значение дифференциального сопротивления фотодиода диаметром  $250 \text{ мкм}$  было

равно  $R_0 \sim 2,5 \cdot 10^{14}$  Ом и, соответственно,  $R_0 A \sim 1,13 \cdot 10^{11}$  Ом·см<sup>2</sup>. Для диода с диаметром мезы 50 мкм  $R_0 > 4 \cdot 10^{15}$  Ом.

Исследована зависимость плотности мощности шума в диапазоне частот от 1 Гц до 1 кГц от напряжения. Для напряжений ниже 10 В спектр шума близок к  $1/f$  типу шума. При более высоких уровнях обратного смещения наблюдается зависимость типа  $1/f^\gamma$ , где  $\gamma = 3$ . Это может быть связано со сложной природой возникновения шума, в частности, из-за влияния генерационно-рекомбинационных процессов. На частотах выше 1 кГц наблюдался только тепловой и дробовый шум.

Измерение температурной зависимости плотности мощности шума показало на активационное поведение с энергией активации  $0,37 \div 0,42$  эВ, что подтверждает соответствие между  $I-V$  измерениями и измерениями шума.

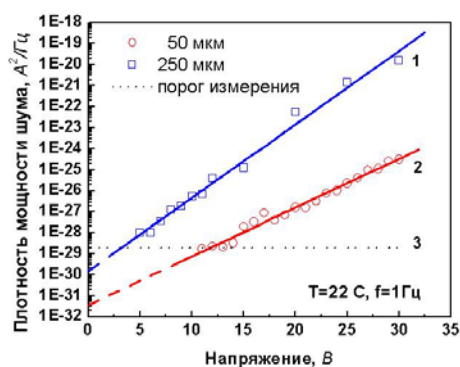


Рис.3. Зависимости спектральной плотности шума от напряжения обратного смещения, измеренные при комнатной температуре для частоты 1 Гц для диодов диаметром 250 мкм (1) и 50 мкм (2). Горизонтальная пунктирная линия (3) показывает пороговое значение шума измерительной системы.

Зависимость спектральной плотности шума  $S_n$  от напряжения, измеренная для частоты 1 Гц при комнатной температуре, показана на рис. 3. Измерения показали экспоненциальную зависимость  $S_n$  от напряжения, а изменения величины  $S_n$  составили восемь и пять порядков при изменении напряжения от  $-5$  В до  $-30$  В для фотодиодов большего и меньшего диаметра, соответственно. Такая зависимость позволила экстраполировать  $S_n$  для нулевого напряжения, при котором работает большинство фотодетекторов регистрации изображения. Получены экстраполированные к нулевому напряжению значения  $S_n$  равные  $1,5 \cdot 10^{-30}$  А<sup>2</sup>/Гц и  $3,6 \cdot 10^{-32}$  А<sup>2</sup>/Гц для диодов диаметром 250 мкм и 50 мкм, соответственно.

Для диодов с диаметром 50 мкм при нулевом напряжении смещения получена спектральная плотность шума  $3,6 \cdot 10^{-32}$  А<sup>2</sup>/Гц. На основе данных измерений шумовых и токовых характеристик сделано

вычисление лимита обнаружительной способности для комнатной температуры  $2,4 \cdot 10^{14}$  см Гц<sup>1/2</sup> Вт<sup>-1</sup>. Фоновый лимит обнаружительной способности составил  $3,5 \cdot 10^{13}$  см Гц<sup>1/2</sup> Вт<sup>-1</sup>. Обнаружительная способность фотодиода сравнима с обнаружительной способностью фотоумножителей ультрафиолетового диапазона спектра.

Впервые показано, что зависимость плотности мощности шума от темнового тока может быть описана феноменологическим выражением  $S_i^* = (I_{\text{темн.}}^2 / f^2) \sqrt{A / A_0}$ , где  $A_0$  – характеристический параметр площади и  $A$  – площадь диода. Зависимость плотности мощности шума от площади диода указывает на объемную, а не на поверхностную природу шума.

**В третьем разделе** изложено получение и исследование оптических и электрических параметров фотодетекторов УФ диапазона на КПСР AlN/AlGa(In)N, не чувствительных для области видимого света.

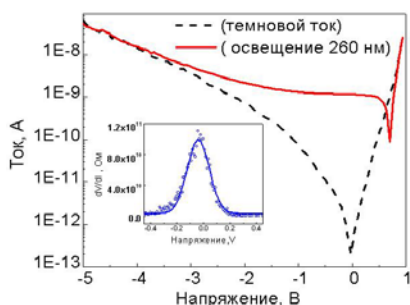


Рис. 4. Вольтамперная характеристика фотодиода для  $\lambda=260$  нм (I).

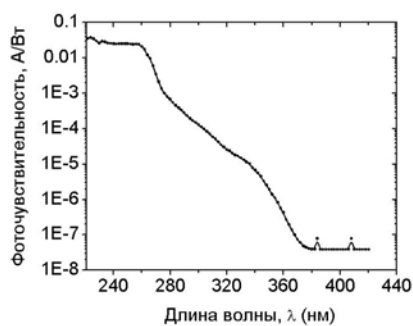


Рис. 5. Спектральная фоточувствительность фотодиода для  $\lambda=260$  нм (II).

Эпитаксиальные структуры двух типов (I) и (II) были выращены на сапфире методом МПЭ с использованием аммиака. Приборная структура (I) содержит буферный слой AlN 40 нм, выращенный на сапфире, затем  $\sim 1$  мкм GaN буферный слой, легированный кремнием, две  $n$ - и  $p$ -типов AlN/AlGa(In)N сверхрешетки, и 10 нм  $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}(\text{In})\text{N}:\text{Mg}$  контактный слой. Каждая  $n$ - и  $p$ -тип КПСР содержит 150 пар  $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}(\text{In})\text{N}$  квантовых ям, толщиной  $\sim 0,75$  нм, разделенных барьерами AlN толщиной  $\sim 1,0$  нм.

Структура (II) содержит буферный слой AlN 40 нм, затем буферный слой КПСР  $\sim 300$  нм со средним составом  $\sim 0,7$  прозрачным до длин волн 240 нм, затем  $n$ -,  $i$ -, и  $p$ -типа слои КПСР AlN/ $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}$  различной толщины и оптической ширины запрещенной зоны, от  $\sim 4,96$  эВ

(~250 нм) в *i*-слое до ~ 5,17 эВ (~240 нм) в *n*- и *p*-слоях. КРСР были легированы кремнием и магнием в *n*- и *p*- областях, соответственно, и не легированы в *i*-области.

Типичная вольтамперная (I-V) характеристика диода (I) представлена на рис. 4. Измерен темновой ток утечки  $0,5 \div 0,6$  пА при обратном напряжении  $\leq 0,1$  В. Ток утечки при напряжении -5 В ниже чем 50 пА. Из зависимости (dV/dI) от напряжения, показанной на вставке рис. 4, получено значение дифференциального сопротивления фотодетектора при нулевом напряжении  $\sim 1 \cdot 10^{11}$  Ом и значение характеристического произведения  $R_0A \sim 6,2 \cdot 10^8$  Ом см<sup>2</sup>. Спектральная зависимость фоточувствительности показана на рис. 5. Фоточувствительность в диапазоне длин волн от 260 нм до 380 нм падает на шесть порядков, показывая на нечувствительность для видимой области спектра.

Фоточувствительность 25 мА/Вт была измерена для длины волны 260 нм. Это соответствует внешней квантовой эффективности 12,5%.

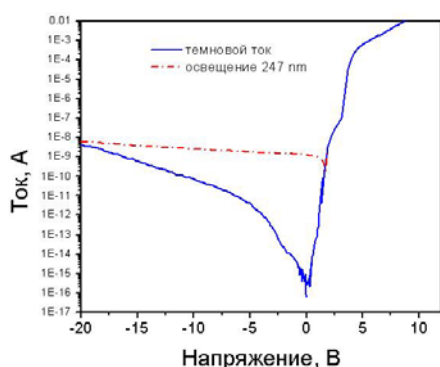


Рис. 6. Вольтамперная характеристика фотодиода для  $\lambda=247$  нм(II).

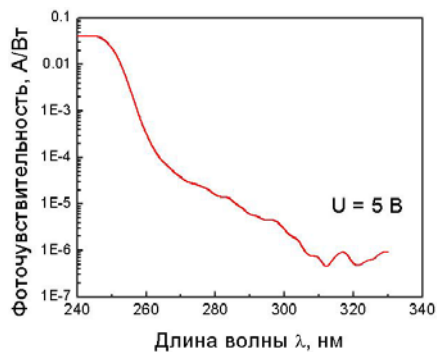


Рис. 7. Спектральная фоточувствительность фотодиода для  $\lambda=247$  нм (II).

Расчет обнаружительной способности фотодиода для нулевого напряжения смещения, использующий значение  $R_0A$  полученное выше, дает величину  $D^* = 1,4 \cdot 10^{12}$  см Гц<sup>1/2</sup>Вт<sup>-1</sup>.

Типичная вольтамперная (I-V) характеристика *p-i-n* фотодетектора (II) представлена на рис. 6. Измерен темновой ток утечки  $0,3 \div 0,5$  фА при обратном напряжении  $\leq 0,1$  В. Ток утечки при напряжении -20 В ниже чем 5 нА. Получено значение дифференциального сопротивления фотодиода

при нулевом напряжении  $\sim 6,6 \cdot 10^{14}$  Ом и значение характеристического произведения  $R_0 A \sim 1,5 \cdot 10^{11}$  Ом см<sup>2</sup>. Спектральная зависимость фоточувствительности фотодиода (II) показана на рис. 7. Фотодетектор имеет фоточувствительность 15 мА/Вт и 62 мА/Вт и внешнюю квантовую эффективность 7,5% и 30% при напряжении равном нулю и -10 В, соответственно. Расчет обнаружительной способности фотодиода (II) для нулевого напряжения смещения, использующий значение  $R_0 A$ , полученное выше, дает величину  $D^* = 4,5 \cdot 10^{13}$  см Гц<sup>1/2</sup>Вт<sup>-1</sup>.

Разработанные и изготовленные солнечно-слепые фотодетекторы показали рекордные значения темновых токов и обнаружительной способности для приборов, изготовленных на слоях, выращенных методом МПЭ с аммиаком.

**Четвертый раздел** посвящен демонстрации возможности изготовления светодиодов УФ диапазона спектра (262 нм и 280 нм), изготовленных на основе легированных КПСР. Мощность излучения светодиодов составила 160 мкВт (280 нм) и 100 мкВт (262 нм) при прямом импульсном токе 250 А/см<sup>2</sup>.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Оптимизация режимов нуклеации и роста буферного слоя, а именно, температуры и скорости роста, соотношения потоков элементов III и V группы позволяет получать эпитаксиальные слои и гетероструктуры на основе GaN, AlN и AlGaIn с высоким кристаллическим совершенством на кремниевых и сапфировых подложках.
2. Образование нитрида кремния при чередовании потоков алюминия и аммиака способствует формированию высокотемпературного буферного слоя AlN высокого качества на кремниевых подложках.
3. Использование высокотемпературного AlN буфера на сапфировых подложках позволяет получать эпитаксиальные слои GaN и AlGaIn высокого качества, имеющие полярность элемента III группы.
4. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны GaN близка к зависимости для объемного GaN и хорошо описывается моделями Паслера и Варшни. Концентрация электронов в GaN может быть оценена из измерений интенсивности Раман-спектров  $A_1(LO)$  и  $E_2^2$  мод. Оценена энергия связи свободных экситонов  $29 \pm 2$  мэВ.
5. Эффективная ширина запрещенной зоны,  $E_g$ , короткопериодных сверхрешеток (КПСР) AlN/Al<sub>0,08</sub>Ga<sub>0,92</sub>N с шириной ямы 0,50 и 0,75 нм может быть изменена заданным образом с 4,50 до 5,30 эВ путем изменения периода с 1,25 до 2,25 нм.

6. Показано, что в результате легирования магнием и кремнием КПСР  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}/\text{GaN}$  может быть достигнута концентрация дырок  $\sim 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и электронов  $\sim 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , соответственно.
7. Показано, что кремний является мелким донором в слоях  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}:\text{Si}$  с энергией активации  $20 \div 26$  мэВ независимо от состава твердого раствора в диапазоне  $0,56 < x < 0,85$ .
8. Установлено, что в эпитаксиальных слоях  $p$ -типа  $\text{GaN}:(\text{Mg}+\text{O})$  и  $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}:(\text{Mg}+\text{O})$ , выращенных МПЭ с аммиаком, энергия активации акцептора может быть снижена с  $200 \pm 20$  мэВ до  $145 \pm 20$  мэВ и с  $250 \pm 20$  мэВ до  $195 \pm 20$  мэВ, соответственно, при соотношении  $\text{Mg}/\text{O} = 40$ .
9. Показано, что входение Mg уменьшается с  $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  до  $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  в слоях GaN и AlN, соответственно, выращенных МПЭ с аммиаком с постоянной скоростью роста в диапазоне температур  $780 \div 820$  °С.
10. Показано, что использование КПСР  $\text{AlN}/\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}$  в приборных структурах, выращенных методом МПЭ с аммиаком, позволяет создать солнечно-слепые фотоприемники с высокой обнаружительной способностью при нулевом напряжении.
11. Экспериментально установлено, что скорость травления  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  и CP  $\text{AlN}/\text{AlGaN}$  в ИСП/РИП плазме при соотношении потоков газов  $\text{CF}_4/\text{Ar} = 20/4$  сссм, ИСП(ИСП)=300 Вт, РИТ(РИЕ)=150 Вт, давлении = 10 мТорр не зависит от состава твердого раствора во всем диапазоне  $0 \leq x \leq 1$ .
12. Показано, что спектральная плотность мощности шума в  $\text{AlGaIn-GaN}$  фотодиодах, измеренная для частоты 1 Гц, имеет экспоненциальную зависимость от напряжения и может быть аппроксимирована линейной зависимостью:  $S_i^* = (I_{\text{темн}}^2/f^2) \sqrt{A/A_0}$ , где  $A_0$  – характеристический параметр площади,  $A$  – площадь диода,  $\gamma$  – коэффициент равный 1,  $f$  – частота.

#### Список цитированной литературы

1. M. Razezghi and A. Rogalski, "Semiconductor Ultraviolet Detectors," Applied Physics Reviews, J. Appl. Phys., **79**(10), 7433÷7473 (1996)
2. S. Donati, "Photodetectors", Prentice Hall (2000).
3. E. F. Schubert, W. Grieshaber, I. D. Goepfert, "Enhancement of deep acceptor activation in semiconductors by superlattice doping", Appl. Phys. Lett., **69**, 3737÷3739 (1996).
4. J. Hwang, W. J. Schaff, L. Eastman, et al. "Si doping of high-Al-mole fraction  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  alloys with rf plasma-induced molecular-beam-epitaxy", Appl. Phys. Lett., **81**, 5192÷5194 (2002).



**Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Борисов Б.А., **Курятков В.В.**, Никишин С.А., Holtz M., and Temkin N., “Короткопериодные AlN/AlGaN сверхрешетки для светодиодов, работающих в дальнем ультрафиолете”, 4-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы», ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 2005, Санкт-Петербург, Россия.
2. Никишин С.А., Борисов Б.А., **Курятков В.В.** и др. “Short period superlattices of AlN/AlGaN for deep UV light emitting diodes,” 4-я Международная конференция “Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCN4)”, г. С.-Петербург, Июль 3÷5, 2004, Россия.
3. С. Никишин, Г. Кипшидзе, **В. Курятков** и др. “GaN *p-n* переходы на Si(111) и сапфире(0001),” 4-е Всероссийское совещание “Нитриды галлия, индия и алюминия - структуры и приборы”, Санкт-Петербург, Сентябрь 18÷19, 2000, Россия.
4. Б. А. Борисов, С. Н. Никишин, **В.В. Курятков**, В. И. Кучинский и др. “Повышенная излучательная рекомбинация квантовых ям AlGaN, выращенных методом молекулярно пучковой эпитаксии”, ФТП, 2006, т. 40, вып.4, стр. 460÷463.
5. **Kuryatkov V.**, Borisov B, Saxena J, et al., “Analysis of nonselective plasma etching of AlGaN by CF<sub>4</sub>/Ar/Cl<sub>2</sub>”, J. Appl. Phys., 2005, **97**(7), Art.No.073302.
6. B. Borisov, **V. Kuryatkov**, Yu. Kudryavtsev, et al., “Si-doped Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (0.56 ≤ x ≤ 1) layers grown by molecular beam epitaxy with ammonia”, Appl. Phys. Lett., 2005, **87**, 132106.
7. K. Zhu, **V. Kuryatkov**, B. Borisov, et al. “Evolution of Surface Roughness of AlN and GaN Induced by Inductively Coupled Cl<sub>2</sub>/Ar Plasma Etching”, J. Appl. Phys., 2004, **95**, 4635÷4641.
8. **V. Kuryatkov**, A. Chandolu, B. Borisov, et al. “Solar-blind ultraviolet photodetectors based on superlattices of AlN/AlGa(In)N”, Appl. Phys. Lett., 2003, **82** (9), 1323÷1325.
9. S. A. Nikishin, **V. V. Kuryatkov**, A. Chandolu, et al., “Deep Ultraviolet Light Emitting Diodes Based on Short Period Superlattices of AlN/AlGa(In)N”, Jpn. J. Appl. Phys., 2003, **42**, L1362÷L1365.

10. **V. Kuryatkov**, K. Zhu, B. Borisov, et al., “Electrical properties of p–n junctions based on superlattices of AlN/AlGa(In)N”, Appl. Phys. Lett., 2003, **83**, 1319÷1321.
11. G. Kipshidze, **V. Kuryatkov**, B. Borisov, et al., “Deep ultraviolet AlGaInN-based light-emitting diodes on Si (111) and sapphire”, Phys. Stat. Sol. (a), 2002, **192**, 286÷291.
12. G. Kipshidze, **V. Kuryatkov**, B. Borisov, et al. “AlGaInN-based ultraviolet diodes grown on Si (111)”, Appl. Phys. Lett., **80**, 2002, 3682÷3684.
13. Zubrilov A. S., Nikishin S. A., Kipshidze G. D., **Kuryatkov V. V.**, et al. “Optic properties of GaN grown on Si (111) by gas source molecular beam epitaxy with ammonia”, J. Appl. Phys., 2002, **91** (3), 1209÷1212.
14. Kipshidze G., **Kuryatkov V.**, Borisov B., et al. “Mg and O codoping in p-type GaN and Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (0<x<0.08)”, Appl. Phys. Lett., 2002, **80** (16), 2910÷2912.
15. **V.V. Kuryatkov**, H. Temkin, J. C. Campbell, R.D. Dupuis, “Low-noise photodetectors based on heterojunctions of AlGaInN-GaN”, Appl. Phys. Lett., 2001, **78**, 3340÷3342.
16. **Kuryatkov V. V.**, Kipshidze G. D., Nikishin S. A., Deelman P. W., and Temkin H., “AlGaInN-based photodetectors grown by gas source molecular beam epitaxy with ammonia”, Phys. Stat. Sol. (a), 2001, **188** (1), 317÷320.
17. Deelman P. W., Bicknell-Tassius R. N., **Kuryatkov V. V.**, Nikishin S. A., and Temkin H., “Low noise GaN Schottky diodes on Si(111) by MBE”, Appl. Phys. Lett., 2001, **78**, 2172÷2174.
18. Nikishin S., **Kuryatkov V.**, Kipshidze G., et al. “Gas source molecular beam epitaxy of high quality Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (0≤x≤1) on Si(111)”, J.Vac.Sci. Technol. B, 2001, **19** (4), 1409÷1412.