

# ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.12737/article\_5926a059824a22.24626416

Мамаев В.В., инженер,  
Новиков С.А., инженер,  
Петров С.И., кан. физ.-мат. наук  
ЗАО «Научное и технологическое оборудование», Санкт-Петербург  
Зайцев С.В., мл. н.с.,  
Прохоренков Д.С., инж.-исс.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ НИТРИДОВ III-ЕЙ ГРУППЫ НА СТРУКТУРНОЕ СОВЕРШЕНСТВО ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ СВЧ ТРАНЗИСТОРОВ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА\*

petrov@semiteq.ru

Показано, что использование высокотемпературных буферных слоев  $AlN/AlGaN$ , выращенных на сильно рассогласованных подложках методом МЛЭ при использовании аммиака и экстремально высокой температуре (до 1150 °С), позволяет кардинально улучшить структурное совершенство активных слоев и понизить плотность дислокаций в них до значений  $4-5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ . Представлены результаты выращивания слоев  $AlN$  с использованием  $Ga$  в качестве сурфактанта. В гетероструктурах с двумерным электронным газом, выращенных с использованием сурфактанта была достигнута подвижность носителей до 2000  $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . Получены транзисторы С диапазона с КПД 50 % при удельной мощности 5 Вт/мм на 4ГГц. Представлены результаты выращивания буферных слоев  $Al_xGa_{1-x}N$  с высоким содержанием  $Al$  ( $x=70\%$ ) для нитридных фотокатодов. Плотность дислокаций в слое  $Al_{0.7}Ga_{0.3}N$ , непосредственно прилегающем к активной области, составила  $1-2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ . Были получены УФ фотокатоды, которые показали квантовую эффективность в режиме пропускания 14–16 %.

**Ключевые слова:** нитридные гетероструктуры  $AlN/AlGaN$ , УФ фотокатоды, СВЧ транзисторы, плотность дислокаций.

**Введение.** Среди всего спектра материалов особый интерес представляют нитриды металлов третьей группы (III-N), так как они обладают уникальными свойствами и интенсивно исследуются с целью создания оптоэлектронных и СВЧ мощных высокотемпературных приборов на их основе. Особо отмечаются эффекты спонтанной и пьезоэлектрической поляризации, которые приводят к повышению концентрации двумерного электронного газа, что делает их наиболее подходящими материалами для изготовления транзисторов с высокой подвижностью электронов, сочетающих в себе высокие рабочие частоты и высокие удельные мощности [1]. Прямозонная структура энергетических зон позволяет проектировать и создавать оптоэлектронные приборы, работающие в широком спектральном диапазоне [2].

Одной из основных проблем при изготовлении приборов на основе III-нитридов является отсутствие недорогих согласованных по параметру решетки подложек. Выращивание на рассогласованных подложках приводит к высокой плотности дислокаций в  $GaN$  ( $10^9-10^{10} \text{ см}^{-2}$  для МЛЭ,  $10^8-10^9 \text{ см}^{-2}$  для МОГФЭ), что усложняет

задачу получения приборных гетероструктур [2]. В слоях, выращиваемых при помощи МОГФЭ, плотность дислокаций в среднем на порядок полтора меньше, чем в слоях, получаемых при помощи МЛЭ. Уменьшение плотности дислокаций, связано с характерными для МОГФЭ более высокими температурами подложки, что выражается в лучшей, по сравнению с МЛЭ, коалесценцией зародышевых блоков на начальном этапе роста. В методе МЛЭ условие сохранения высокого вакуума для обеспечения пролета частиц без столкновений (режима баллистического пролета) не позволяет увеличить отношение  $V/III$  до значений сравнимых с МОГФЭ, и увеличение температуры роста ограничено термическим разложением материала. При этом метод МЛЭ обладает рядом достоинств по сравнению с МОГФЭ, а именно: позволяет осуществлять *in situ* диагностику роста на уровне одного монослоя и получать резкие гетерограницы, обеспечивает высокую чистоту камеры роста и выращиваемого материала, предоставляет возможность построения высоковакуумных кластерных систем, более безопасен [3].

Одним из важнейших применений III-N материалов является изготовление мощных полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов в канале (HEMT) на основе гетероструктур AlGaIn/GaN, обладающих рядом преимуществ по сравнению с аналогичными СВЧ транзисторами на основе традиционных полупроводников.

Электрофизические параметры таких транзисторов сильно зависят от качества эпитаксиальных слоев, а, следовательно, зависят от конструкции буферных и барьерных слоев и условий их получения.

Другим важным применением нитридов металлов третьей группы является создание так называемых солнечно-слепых ультрафиолетовых фотоприемников на основе фотокатодов. Максимальная чувствительность фотоприемников должна обеспечиваться в спектральном диапазоне с длинами волн от 240 до 290 нм, поскольку излучение в более коротковолновых диапазонах сильно поглощается атмосферой, а излучение с большими длинами волн занимает заметную часть спектра солнечной радиации [4]. Существенным достоинством приборов на основе соединений  $Al_xGa_{1-x}N$  является возможность управления в них длинноволновой границы фоточувствительности в пределах от 360 до 200 нм за счет изменения состава твердого раствора ( $x=0-1$ , соответственно). Получение р-легированных активных слоев таких фотокатодов является сложной технологической задачей. Повышенная плотность дислокаций, возникающая вследствие рассогласования параметров решетки слоя и подложки, приводит к увеличению компенсации носителей заряда и, соответственно, уменьшению эффективности р-легирования. Таким образом, задача снижения плотности дислокаций в буферном слое между подложкой и активной областью является актуальной и для создания нитридных фотокатодов.

В настоящей работе представлены результаты выращивания высокотемпературных буферных слоев AlN методом аммиачной МЛЭ, а также исследование возможности использования Ga в качестве сурфактанта для роста таких слоев. Представлены результаты выращивания транзисторных гетероструктур, а также структур с высоким содержанием алюминия для УФ-фотокатодов.

**Экспериментальная часть.** Гетероструктуры на основе GaN были выращены на подложках  $Al_2O_3$  (0001) в Прикладной лаборатории ЗАО «НТО» на установках МЛЭ серии STE3N российского производства, выпускаемых ЗАО «НТО» под торговой маркой SemiTEq. Уникальными особенностями данного оборудования яв-

ляются значительно расширенный диапазон рабочих температур подложки и отношений V/III. В частности, благодаря криопанелям увеличенной площади и усиленной системе откачки в ростовой камере обеспечивается вакуум не хуже  $5 \cdot 10^{-3}$  Па при увеличении температуры подложки до  $970^\circ C$  при потоке аммиака  $400 \text{ см}^3/\text{мин}$ . В результате дополнительной модернизации узла нагрева образца и ростового манипулятора обеспечивается возможность длительного роста с вращением на подложках диаметром до 100 мм при температуре до  $1200^\circ C$  (показания пирометра). При этом вакуум находится на уровне не хуже  $1 \cdot 10^{-3}$  Па (при потоке аммиака  $60 \text{ см}^3/\text{мин}$ ).

В качестве инструментов для in-situ контроля скорости роста и состояния ростовой поверхности использовалась лазерная интерферометрия и отраженная дифракция быстрых электронов ОДБЭ (RHEED). Свойства выращенных образцов исследовались при помощи просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ), Холловских измерений и рентгеновской дифракции.

#### **Использование высокотемпературного буферного слоя для снижения плотности дислокаций в слоях GaN и AlGaIn**

Как уже говорилось выше основной проблемой при изготовлении приборов на основе III-нитридов, является отсутствие недорогих рассогласованных по параметру решетки подложек. Выращивание на рассогласованных подложках приводит к высокой плотности дислокаций, что сказывается на приборных характеристиках.

Одним из способов улучшения структурного совершенства выращиваемых слоев является повышение поверхностной подвижности атомов за счет увеличения ростовых температур. Увеличение температур для роста GaN ограничивается термическим разложением материала, что отрицательно сказывается на качестве растущего слоя.

В тоже время термическое разложение AlN происходит при более высоких температурах по сравнению с GaN. В связи с этим было предложено выращивать на начальном этапе роста относительно “толстый” буферный слой AlN при экстремально высокой для МЛЭ температуре.

При оптимизации условий выращивания начальных слоев AlN использовались слои толщиной 200 нм. Структурное совершенство этого слоя чрезвычайно важно для совершенства всей последующей структуры. Поэтому, для выращивания слоя AlN использовалась температура нагревателя образца, которая с одной стороны не приводит к его значительному износу, а с другой стороны обеспечивает экстремально высокую температуру подложки –  $1200^\circ C$ . Улучшение кристаллического совершенства многослойной

гетероструктуры подтверждается данными рентгеновской дифракции: значения полуширин пиков (0002) слоев AlN и GaN уменьшаются в 1,5–

2 раза при увеличении температуры роста слоя AlN (рис. 1).

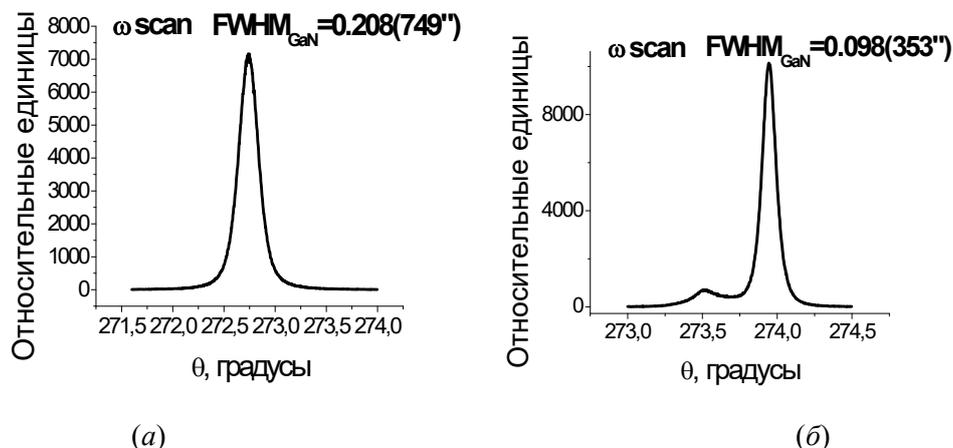


Рис. 1. Рентгеновская дифракция для слоев GaN толщиной 1 мкм, выращенных на тонком зародышевом слое AlN (а) и на «толстом» слое AlN (б)

При исследовании ОДБЭ в течение начального этапа роста установлено, что увеличение температуры подложки приводит к более быстрому переходу из трехмерного в двумерный режим роста (переход из точек в тяжи при наблюдении ОДБЭ). Кроме того, при использовании меньшей температуры роста даже после перехода в тяжи на них остаются утолщения, что свидетельствует о более грубой поверхности по сравнению с выращиванием AlN при повышенной температуре.

При выращивании на «толстых» слоях AlN слоев AlGaN или GaN необходимо использовать специальные технологические приемы для снижения влияния напряжений, вызванных различием в параметрах решетки. Для этой цели между слоями AlN, AlGaN и GaN можно использовать слои градиентного состава, либо многопериодные комбинации тонких слоев  $Al_xGa_{1-x}N/Al_yGa_{1-y}N$  (сверхрешеточных структур – СР). Установлено, что использование второго варианта, СР  $Al_xGa_{1-x}N/Al_yGa_{1-y}N$ , позволяет получить слои AlGaN и GaN с более высоким структурным совершенством.

Было исследовано влияние указанных режимов роста на свойства слоев AlGaN. Увеличение состава Al в тройном растворе  $Al_xGa_{1-x}N$  от  $x=0.3$  до  $x=0.5$  при помощи выравнивания потоков галлия и алюминия приводит уменьшению шероховатости поверхности и улучшению структурных свойств. Увеличение состава Al при помощи увеличения температуры роста в течение роста  $Al_{0.3}Ga_{0.7}N$  выше температуры заметного термического разложения приводит к увеличению шероховатости поверхности и снижению структурных свойств.

В итоге для улучшения качества структур

предложен способ получения низкодислокационных буферных слоев AlN/сверхрешетка/AlGaN, выращенных при экстремально высоких температурах.

Выращивание на начальной стадии роста слоев AlN толщиной более 200 нм при температуре 1150 °С на подложке, а затем выращивание переходных областей AlGaN, включая сверхрешетки, при температуре 900–920 °С привело к улучшению свойств всей структуры. Оптимизация сверхрешетки AlN-AlGaN состояла в подборе параметров (шаг, состав, температура) позволяющих сохранить высокий процент алюминия в твердом растворе, при этом обеспечивающих схлопывание прорастающих дислокаций путем загиба их на гетерограницах. Итоговая оптимизация позволила выйти на твердый раствор AlGaN с содержанием алюминия 50 % при сохранении 2D режима роста.

При помощи сканирующей просвечивающей электронной микроскопии (STEM) получено изображение гетероструктуры, состоящей из слоев AlN, сверхрешетки AlN-AlGaN,  $Al_{0.5}Ga_{0.5}N$ , GaN (рис. 2). Установлено, что плотность дислокаций находится на уровне  $2-4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ,  $3-5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ ,  $(8-10) \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$  для слоев AlN, AlGaN, GaN соответственно.

Максимальная подвижность электронов в слаболегированном кремнием слое GaN толщиной 1.5 мкм находится на уровне  $600-650 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при концентрации электронов  $3-5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Экспериментальные значения подвижности и плотности дислокаций согласуются с данными расчетов [5, 6]. Для сравнения типичные значения подвижности электронов в слоях GaN, выращенных методом МЛЭ на сапфире или SiC с использованием различных тон-

ких буферных слоев (обычно GaN, AlGaN или AlN толщиной менее 50 нм) составляют 350–400 см<sup>2</sup>/В·с [7, 8].

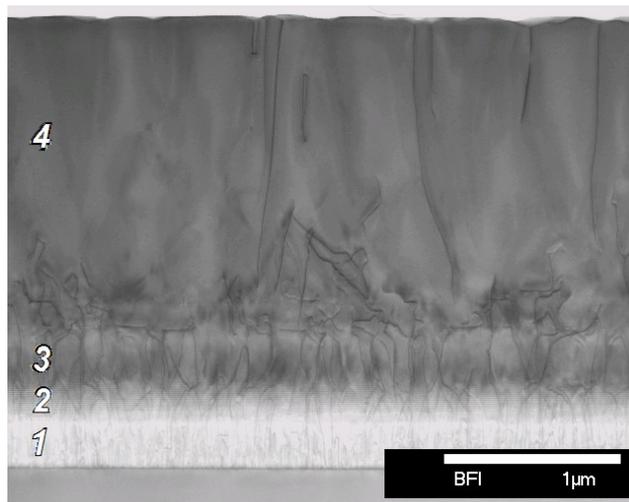


Рис. 2. Изображение скола многослойной гетероструктуры полученное с помощью STEM; указаны слои 1 – AlN; 2 – SLS; 3 – Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N; 4 – GaN

Использование указанных слоев GaN в двойной гетероструктуре с барьерным слоем Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N различного состава ( $x = 0.25–0.4$ ) позволило контролируемо изменять слоевое сопротивление, концентрацию и подвижность в двумерном электронном газе в диапазоне 230–400 Ом/ед.пл.,  $(1.0–1.8) \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> и 1300–1700 см<sup>2</sup>/В·с, соответственно. При этом барьерный слой состоял из тонкого слоя AlN толщиной 1 нм и модулировано легированного кремнием слоя AlGaN толщиной 24 нм.

#### Использование Ga в качестве сурфактанта для улучшения структурного совершенства буферных слоёв.

Было исследовано влияние потока сурфактанта Ga и температуры подложки при выращивании буферного слоя AlN на свойства гетероструктуры AlN/AlGaN/GaN/AlGaN. Было проведено выращивание нескольких серий гетероструктур с двумерным газом, отличающиеся потоком сурфактанта Ga при росте слоя AlN. Рассмотрено влияние соотношения потоков Al и Ga в диапазоне от 20:1 до 1:1 при температурах подложки от 1050 °С до 1150 °С. При этом необходимо отметить, что данные соотношения потоков являются достаточно условными, поскольку определялись по скорости роста при температуре подложки менее 800 °С, при которой десорбция с поверхности и термическое разложение нитрида галлия не так существенны. При температурах выше 1000 °С и небольшом потоке аммиака (60 sccm) скорость термического разложения нитрида галлия существенно выше скорости его роста, кроме того становится существенной десорбция металлов (в большей степени Ga) с поверхности. Таким образом, реальное

соотношение потоков Al:Ga при температурах подложки 1050–1150 °С заметно выше и существенно отличается от температуры 800 °С. Было установлено, что даже использование равных потоков Al и Ga не приводит к изменению скорости роста AlN при температуре подложки 1150 °С, что говорит о том, что атомы галлия не встраиваются в решетку AlN, при этом обеспечивается ускоренный переход в двумерный режим роста. При температуре подложки 1050 °С и отношениях потоков алюминия и галлия 1:1–2:1 наблюдается небольшое увеличение скорости роста AlN. На рис. 3 представлена картина отраженной дифракции быстрых электронов (ОДБЭ, RHEED) во время роста слоя AlN при различных соотношениях потоков Al/Ga при температуре 1150 °С.

Видно, что наиболее быстрый переход к двумерной картине роста происходит при соотношении потоков около 10:1. Эти данные коррелируют с данными подвижности в двумерном электронном газе (рис. 4). Для сравнения на рисунке также представлены значения подвижности электронов в гетероструктуре, выращенной без использования сурфактанта (для наглядности точка обозначена на рисунке как точка, соответствующая отношению потоков 100:1).

Следует отметить, что при повторных экспериментах для одних и тех же значений отношения Al:Ga наблюдался определенный разброс значений подвижности, а на графике приведены максимальные полученные значения. При этом, можно заключить, что подвижность в двумерном электронном газе в гетероструктурах AlN/AlGaN/GaN/AlGaN, выращенных при температуре 1150 °С с использованием сурфактанта

на 10–30 % выше, чем в аналогичных структурах без сурфактанта, а оптимальное соотношение потоков Al:Ga находится в диапазоне от 15 до 5. При использовании других температур подложки оптимальный диапазон будет отли-

чаться. Уменьшение температуры подложки приведет к уменьшению десорбции галлия и, соответственно, увеличению оптимального соотношения Al:Ga.

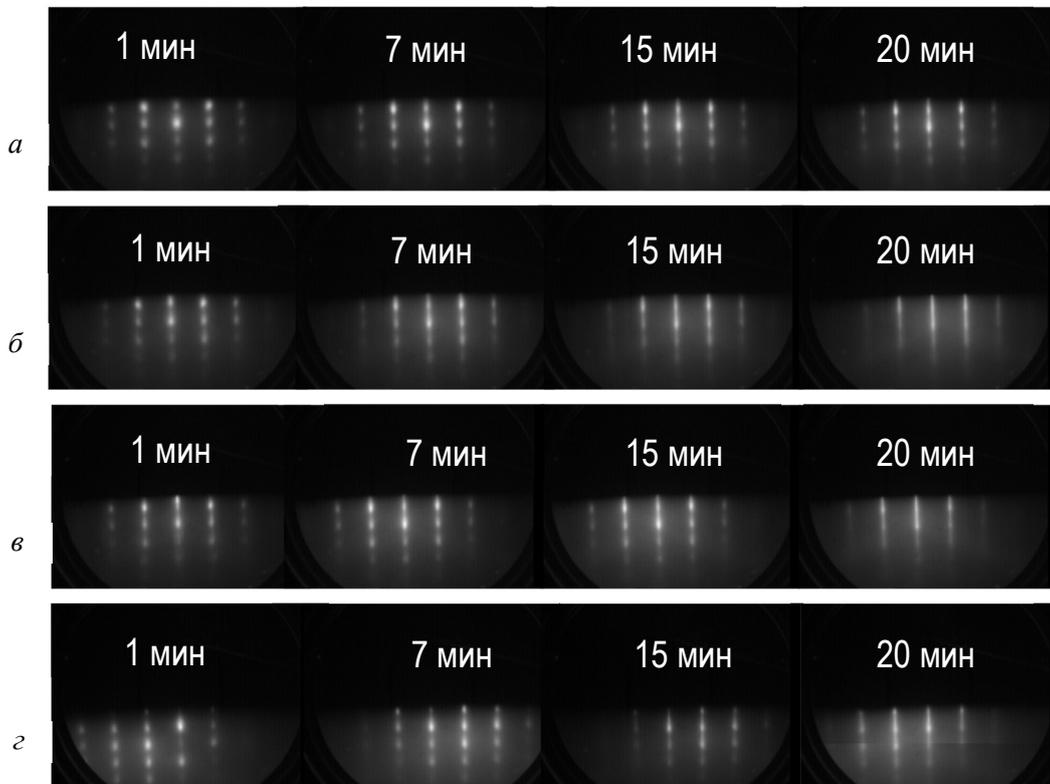


Рис. 3. Картина отраженной дифракции быстрых электронов (ОДБЭ, RHEED) во время роста слоя AlN при различных соотношениях потоков Al/Ga при температуре 1150°C, а) – без Ga, б) – 10:1, в) – 2:1, г) – 1:1

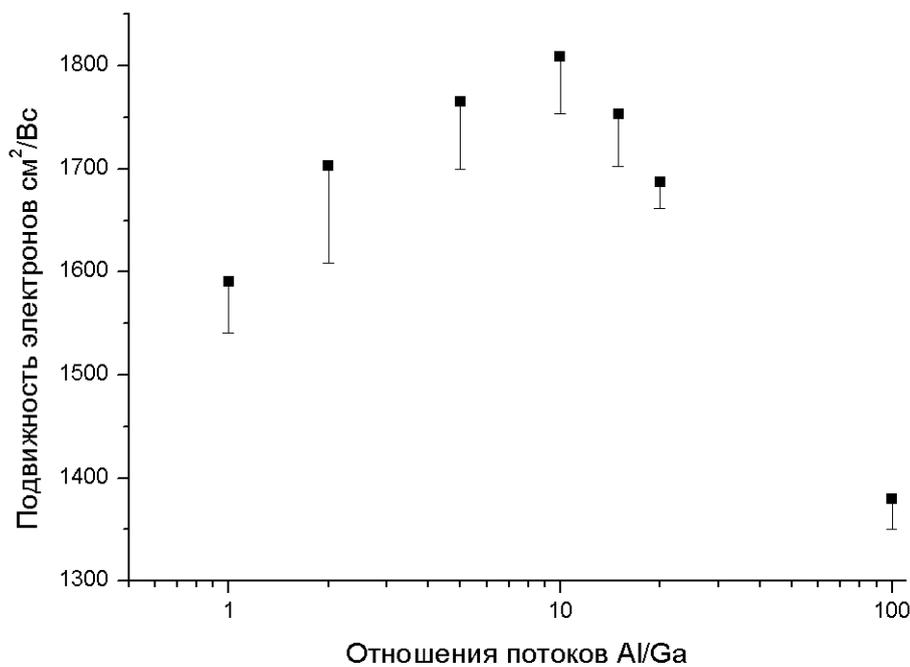


Рис. 4. Зависимость подвижности в двумерном газе GaN/AlGaN в гетероструктуре AlN/AlGaN/GaN/AlGaN от соотношения потоков алюминия и сурфактанта Ga в течении роста буферного слоя AlN. Указана максимальная подвижность электронов

Максимальная подвижность в двумерном электронном газе  $1800 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  при концентрации  $1,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  была получена при соотношении потоков алюминия к галлию 10:1. При понижении концентрации в двумерном электронном газе до  $1,0 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  за счет понижения уровня легирования была получена подвижность до  $2000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ . В настоящее время проводятся исследования плотности дислокаций в гетероструктурах, полученных с использованием сурфактанта.

Применение, описанных выше, технологий и конструкций на подложках SiC, позволило создать полевые транзисторы, которые продемонстрировали статические параметры мирового уровня: ток сток-исток до  $1\text{--}1.2 \text{ А/мм}$ , крутизна  $180\text{--}200 \text{ мС/мм}$ , напряжение пробоя более  $50 \text{ В}$ , токи утечки менее  $100 \text{ мкА}$  при напряжении  $50 \text{ В}$ . Достигнуто КПД  $50\%$  при удельной мощности  $5 \text{ Вт/мм}$  на  $4 \text{ ГГц}$ .

Транзисторы продемонстрировали долговременную стабильность параметров в течение более  $3500$  часов при температуре  $85 \text{ }^\circ\text{C}$ . Данные параметры получившихся устройств подтвер-

ждают высокое качество гетероструктур и правильность выбора конструкций и условий роста.

#### Рост буферных слоев с высоким содержанием Al для нитридных фотокатодов.

Одним из важных применений структур на основе нитридов металлов третьей группы является создание так называемых солнечно-слепых ультрафиолетовых фотоприемников на основе фотокатодов.

Максимальная чувствительность фотоприемников в этих системах должна обеспечиваться в спектральном диапазоне с длинами волн от  $240$  до  $290 \text{ нм}$ , поскольку излучение в более коротковолновых диапазонах сильно поглощается атмосферой, а излучение с большими длинами волн занимает заметную часть спектра солнечной радиации. На рис. 5 представлена зависимость ширины запрещенной зоны от состава алюминия в твердом растворе AlGa<sub>2</sub>N. Содержание алюминия в буферном слое AlGa<sub>2</sub>N должно обеспечивать пропускание при длине волны более  $240\text{--}250 \text{ нм}$ . Таким образом необходимо использовать буферные слои с содержанием алюминия не менее  $70\text{--}80 \%$ .

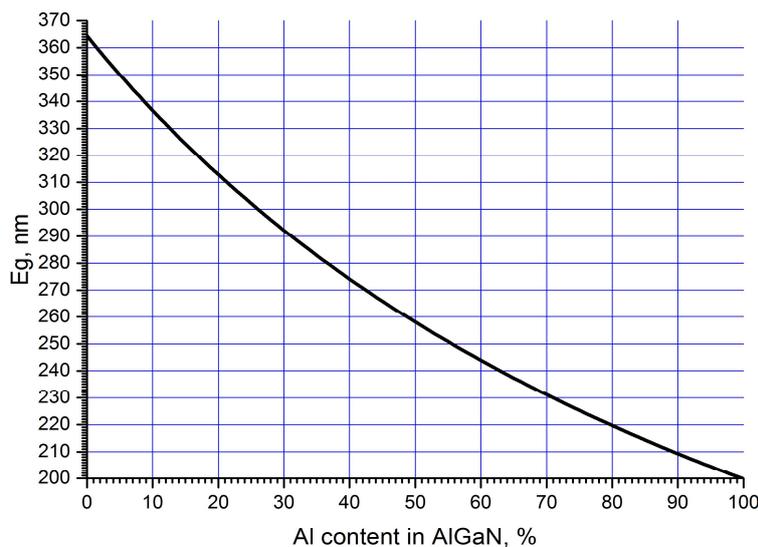


Рис. 5. Зависимость ширины запрещенной зоны от состава алюминия в твердом растворе AlGa<sub>2</sub>N

Для выращивания буферных слоев с содержанием алюминия выше  $70\%$  прозрачных в ультрафиолетовом диапазоне, использовались режимы сходные описанным выше (экстремально высокая температура подложки, использование сурфактанта). По изображениям гетероструктур AlN/CP/Al<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>N полученным просвечивающей электронной микроскопией была оценена плотность дислокаций в слое Al<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>N (рис. 6), непосредственно прилегающем к активной области, которая составила  $1\text{--}2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ .

Была проведена приборная апробация технологии низкодислокационных буферных слоев для получения нитридных фотокатодов. Выращивание активных слоев p-GaN происходило

при помощи плазменного источника аммиака. Для легирования использовался источник Mg. Калибровка потока магния производилась при помощи датчика Байарда-Альперта. Далее структуры обрабатывались на установке формирования фотокатода в ЦНИИ "Электрон". В вакуумной камере установки, имеющей предельное давление  $5 \cdot 10^{-11} \text{ Торр}$ , образцы подвергались очистке методом прогрева в вакууме, после чего производилась их активировка цезием и кислородом по технологии близкой к описанной в работе [9]. На рис. 7 представлены результаты измерений квантового выхода в режиме пропуска для конечных структур.

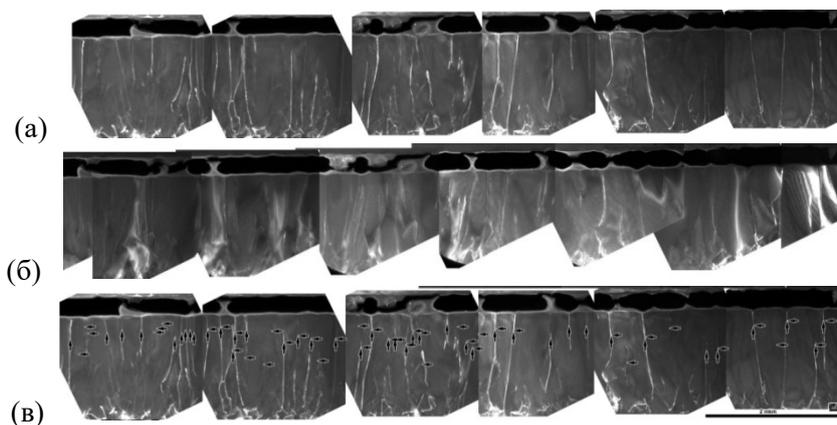


Рис. 6. ТЕМ изображения гетероструктуры AlN/CP/Al<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>N в двух взаимортогональных отражениях (а) –  $g=(0002)$ , (б) –  $g=(-12-10)$  и (в) суперпозиция винтовых, краевых и смешанных дислокаций

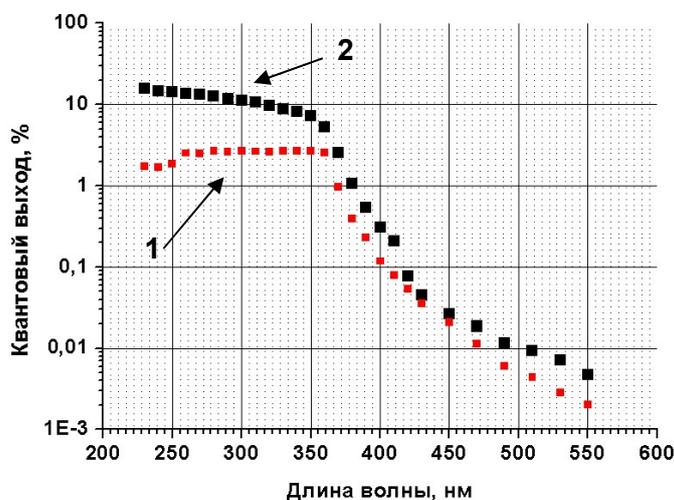


Рис. 7. Зависимость квантового выхода от длины волны фотокатода с активной областью p-GaN в режиме пропускания.

1 – неоптимизированная структура с высокой плотностью дислокаций,  
2 – структура со сниженной плотностью дислокаций

Снижение плотности дислокаций в буферных слоях за счет оптимизации условий роста, а также оптимизация условий роста активного слоя p-GaN позволила совместно с ЦНИИ "Электрон" получить фотокатоды, которые показали квантовую эффективность в режиме отражения 30 % в режиме пропускания на уровне 14–16 %.

**Заключение.** Использование высокотемпературных буферных слоев AlN позволяет значительно улучшить структурное совершенство нитридных гетероструктур и повысить подвижность электронов в слоях GaN.

Установлено, что использование сурфактанта Ga при высокотемпературной аммиачной МЛЭ AlN позволяет на 10–30 % увеличить подвижность в двумерном электронном газе в гетероструктурах, выращенных при температуре подложки 1150 °С, а оптимальное соотношение потоков Al:Ga находится в диапазоне от 15 до 5. В гетероструктурах с двумерным электронным газом GaN/AlGaN была получена подвижность

электронов до 2000 см<sup>2</sup>/В·с.

Получены структуры буферных слоев с содержанием алюминия >70 % (прозрачных в ультрафиолетовом диапазоне до 230 нм) с плотностью дислокаций в слое, непосредственно прилегающем к активной области, 3–5·10<sup>9</sup> см<sup>-2</sup>.

Была проведена приборная апробация технологии. получены транзисторы С диапазона с КПД 50 % при удельной мощности 5 Вт/мм на 4 ГГц, а также УФ фотокатоды с квантовой эффективностью в режиме пропускания 14–16%.

*\*Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта РФФИ 14-41-08048 р\_офи\_м и Программы стратегического развития БГТУ им В.Г. Шухова на 2012–2016 годы.*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shur M. S. GaN based transistors for high power applications //Solid-State Electronics. 1998. Т. 42. №. 12. С. 2131–2138.

2. Ambacher O. Growth and applications of group III-nitrides //Journal of Physics D: Applied Physics. 1998. Т. 31. №. 20. С. 2653.

3. Akasaki I., Amano H. Crystal growth of column-III nitride semiconductors and their electrical and optical properties //Journal of crystal growth. 1996. Т. 163. №. 1. С. 86-92.

4. Айнбунд М.Р., Суриков И.Н., Чернова О.В., Чихунов В.В. Малогабаритный солнечно-слепой усилитель яркости 2+ поколения //Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2007. №. 1. С. 69–74.

5. Н. М. Ng, D. Doppalapudi, T. D. Moustakas, N. G. Weimann and L. F. Eastman. The role of dislocation scattering in n-type GaN films //Applied physics letters. 1998. Т. 73. №. 6. С. 821-823

6. Weimann, N. G., Eastman, L. F., Doppalapudi, D., Ng, H. M., and Moustakas, T. D. Scatter-

ing of electrons at threading dislocations in GaN //Journal of Applied Physics. 1998. Т. 83. №. 7. С. 3656–3659.

7. Webb, J. B., Tang, H., Bardwell, J. A., Moisa, S., Peters, C., and MacElwee, T. Defect reduction in GaN epilayers and HFET structures grown on (0001) sapphire by ammonia MBE //Journal of crystal growth. 2001. Т. 230. №. 3. С. 584–589.

8. Nakamura S., Mukai T., Senoh M. In situ monitoring and Hall measurements of GaN grown with GaN buffer layers //Journal of applied physics. 1992. Т. 71. №. 11. С. 5543–5549.

9. Айнбунд М.Р., Вилькин Е.Г., Пашук А.В., Петров А.С., Суриков И.Н. Солнечно-слепые УФ-фотокатоды на основе гетероструктур AlGaIn с границей спектральной чувствительности в диапазоне 300-330 нм //Письма в Журнал технической физики. 2012. Т. 38. №. 9. С. 88–95.

---

**Mamaev V.V., Petrov S.I., Novikov S.A., Zaycev S.V., Prohorenkov D.S.**

**THE INFLUENCE OF CONDITIONS OF FORMATION OF HETEROSTRUCTURES BASED ON NITRIDES OF III GROUP, ON THE STRUCTURAL PERFECTION OF THE INSTRUMENT STRUCTURES FOR MICROWAVE TRANSISTORS, AND OPTOELECTRONIC DEVICES IN THE ULTRAVIOLET RANGE.**

*It is shown that using high temperature buffer layer AlN/AlGaIn grown on strongly mismatched substrates by MBE using ammonia and extremely high temperatures (up to 1150°C), allows you to dramatically improve the structural perfection of the active layers and lower dislocation density up to values of 4-5.10<sup>9</sup> cm<sup>-2</sup>. The results of growing AlN layers using Ga as the surfactant. In heterostructures with two-dimensional electron gas grown with the use of surfactant was achieved carrier mobility up to 2000 cm<sup>2</sup>/V·s. The resulting transistors range with an efficiency of 50% at a power density of 5 W/mm at 4 GHz. The results of growing buffer layers Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N with high Al content (x=70%) for the nitride. The dislocation density in the layer of the Al<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>N immediately adjacent to the active area, made up of 1-2·10<sup>9</sup> cm<sup>-2</sup>. Was obtained by UV photo cathodes, which showed the quantum efficiency in transmission of 14–16 %.*

**Key words:** nitride heterostructures AlN/AlGaIn UV photo cathodes, microwave transistors, the density of dislocations.

---

**Мамаев Виктор Викторович**, инженер.

ЗАО «НТО»

Адрес: Россия, 194156, Санкт-Петербург, пр. Энгельса, д. 27

**Новиков Сергей Андреевич**, инженер.

ЗАО «НТО»

Адрес: Россия, 194156, Санкт-Петербург, пр. Энгельса, д. 27

**Петров Станислав Игоревич**, кандидат физико-математических наук, начальник прикладной лаборатории.

ЗАО «НТО»

Адрес: Россия, 194156, Санкт-Петербург, пр. Энгельса, д. 27

E-mail: petrov@semiteq.ru

**Зайцев Сергей Викторович**, младший науч. сотрудник

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Прохоренков Дмитрий Станиславович**, инженер-исследователь

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.