

УДК 538.91

РОСТ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaN/GaN С ДВУМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ГАЗОМ НА ПОДЛОЖКАХ AlN/Al₂O₃ ***Т. В. Малин, В. Г. Мансуров, А. М. Гилинский, Д. Ю. Протасов,
А. С. Кожухов, А. П. Василенко, К. С. Журавлев***Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13**E-mail: mal-tv@thermo.isp.nsc.ru
gilinsky@isp.nsc.ru*

Исследована возможность использования подложек AlN/Al₂O₃ для роста гетероэпитаксиальных структур AlGaN/GaN с двумерным электронным газом. Предложен способ калибровки температуры подложек путём измерения спектров теплового излучения. Установлены различия между подложками AlN/Al₂O₃, приводящие к расхождению электрофизических параметров выращиваемых структур. На подложках AlN/Al₂O₃ получены образцы AlGaN/GaN, характеризующиеся подвижностью электронов двумерного электронного газа выше 1300 см²/В·с при концентрации электронов в канале более 1 · 10¹³ см⁻².

Ключевые слова: аммиачная МЛЭ, 2ДЭГ AlGaN/GaN, ТВПЭ GaN, подложки AlN/Al₂O₃.

Введение. Полупроводниковые структуры с двумерным электронным газом (2ДЭГ) AlGaN/GaN находят применение в сверхвысокочастотных приборах на основе транзисторов с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ) [1]. На сегодняшний день наиболее доступным и широко используемым подложечным материалом для эпитаксиального роста структур AlGaN/GaN с 2ДЭГ является сапфир. Большое различие между параметрами кристаллических решёток и коэффициентами температурного расширения GaN и сапфира ведёт к очень высокой плотности дислокаций и ухудшению электрофизических свойств слоёв GaN и гетероструктур AlGaN/GaN [2]. Помимо этой проблемы необходимо решать задачу получения слоёв GaN с металлической полярностью, которые позволяют достигать лучших электрофизических параметров, чем слои с азотной полярностью [3]. В аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) для решения таких задач выращиваются буферные слои AlN на сапфире, аккомодирующие упругие напряжения и задающие металлическую полярность [4]. Плотность дислокаций уменьшается с ростом толщины слоя AlN [5], однако выращивать толстые слои AlN методом МЛЭ сложно из-за сравнительно низкой скорости роста, не превышающей 0,5 мкм/ч. В связи с этим для роста структур с 2ДЭГ интересной является возможность использования подложек с толстыми слоями AlN на сапфире (AlN/Al₂O₃). Такие подложки получают методом хлорид-гидридной газофазной эпитаксии, скорость роста в ней достигает нескольких микрон в час. Кроме того, отработка технологии роста на AlN/Al₂O₃ позволит в дальнейшем перейти к выращиванию структур на подложках объёмного AlN, производство которого активно развивается в последнее время [6]. Слои объёмного AlN обладают высокой теплопроводностью, что важно для мощных транзисторов типа ТВПЭ [7].

Исследование исходных подложек AlN/Al₂O₃. Перед началом ростовых экспериментов оценивалось качество исходных плёнок AlN толщиной 500 нм, выращенных на сапфире методом хлорид-гидридной газофазной эпитаксии. Морфология поверхности под-

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 13-02-00985, № 12-02-00930 и № 12-02-00453) и Министерства образования и науки РФ (ГК № 16.523.12.3010).

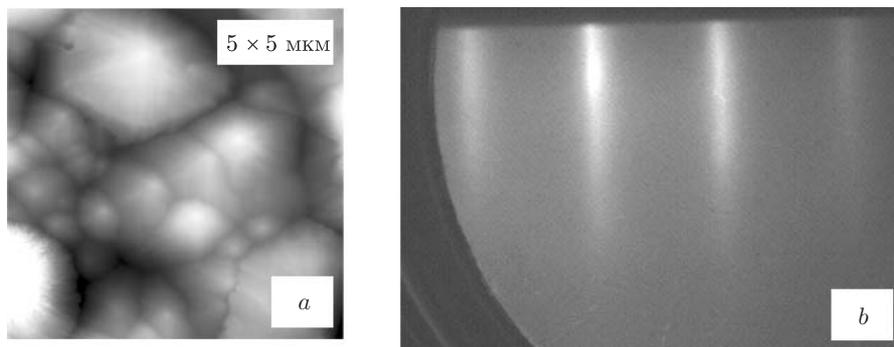


Рис. 1. Характеризация подложек $\text{AlN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ первого типа: *a* — АСМ-изображение, *b* — $2D$ дифракционная картина от поверхности AlN

ложек $\text{AlN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ анализировалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) и посредством анализа картин дифракции быстрых электронов на отражении (ДБЭО-картин). Результаты АСМ указывают на различие между исходными поверхностями исследованных подложек $\text{AlN}/\text{Al}_2\text{O}_3$. По качеству поверхности подложки можно разделить на два типа: первый тип имеет размер зёрен AlN 1500 нм и характеризуется двумерной ($2D$) дифракционной картиной от поверхности образца при среднеквадратичной шероховатости рельефа 6,3 нм (рис. 1); второй тип имеет размер зёрен 500 нм и характеризуется трёхмерной ($3D$) дифракционной картиной от поверхности образца при среднеквадратичной шероховатости 8,5 нм (рис. 2).

Структурное совершенство слоёв AlN оценивалось методом двухкristальной рентгеновской дифракции. Приведённые на рис. 3 кривые качания, полученные в симметричном отражении 0002, указывают на высокое кристаллическое совершенство слоёв AlN . На подложках $\text{AlN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ обоих типов полная ширина на полувысоте (ПШПВ) кривых качания плёнок AlN находится в диапазоне 400–500 угл. с.

Определение температуры подложек при аммиачной МЛЭ. При аммиачной МЛЭ качество выращиваемых структур определяется условиями роста: температурой подложки и соотношением потоков элементов III и V групп. Одной из важнейших задач является контроль ростовой температуры. Как правило, для определения температуры подложки ростовые установки оснащаются однополосным пирометром. При аммиачной МЛЭ нитридных структур нагрев подложек из широкозонных материалов (сапфир, карбид кремния) производится посредством бесконтактного нагрева металлического слоя молибдена, напыляемого на обратную сторону подложки, излучением спирали, расположенной на небольшом расстоянии от подложки. При этом смена типа обработки обратной стороны

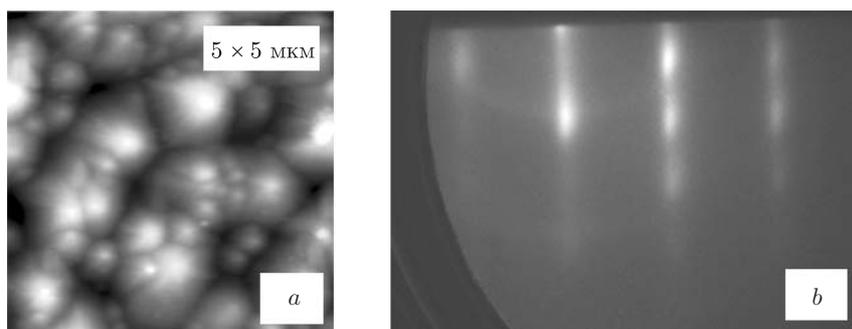


Рис. 2. Характеризация подложек $\text{AlN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ второго типа: *a* — АСМ-изображение, *b* — $3D$ дифракционная картина от поверхности AlN

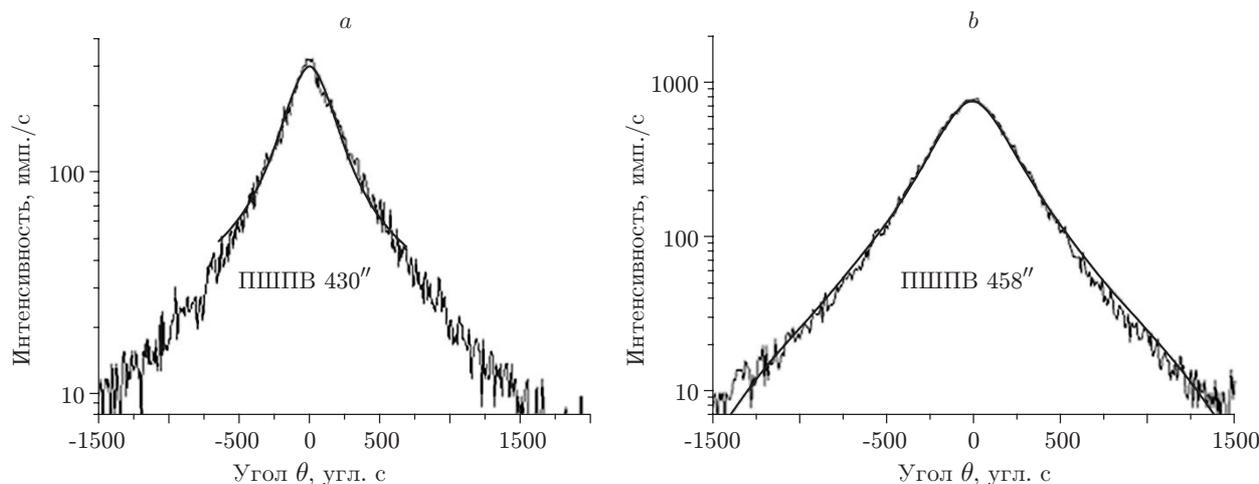


Рис. 3. Кривые качания слоёв AlN подложек AlN/Al₂O₃: *a* — первого типа с 2D дифракционной картиной от поверхности слоя AlN, *b* — второго типа с 3D дифракционной картиной

подложек, изменение режима их шлифовки между партиями или использование подложек, полированных с обратной стороны, приводят к изменениям эффективного коэффициента серости металлического слоя и регистрируемой пирометром температуры подложки на десятки градусов, что затрудняет поддержание необходимых режимов роста и требует проведения значительного количества ростовых опытов для нахождения температуры подложки.

Для обеспечения воспроизведения требуемых значений температуры подложки и определения абсолютных температур подложек с различными типами обработки обратных сторон нами измерялись спектры свечения нагретых подложек. Излучение нагретой подложки, расположенной в ростовой камере, выводилось через пирометрическое окно и передавалось в спектрометр с помощью волоконного световода. Для регистрации спектров свечения нагретых подложек использовался малогабаритный дифракционный прибор "Осеан

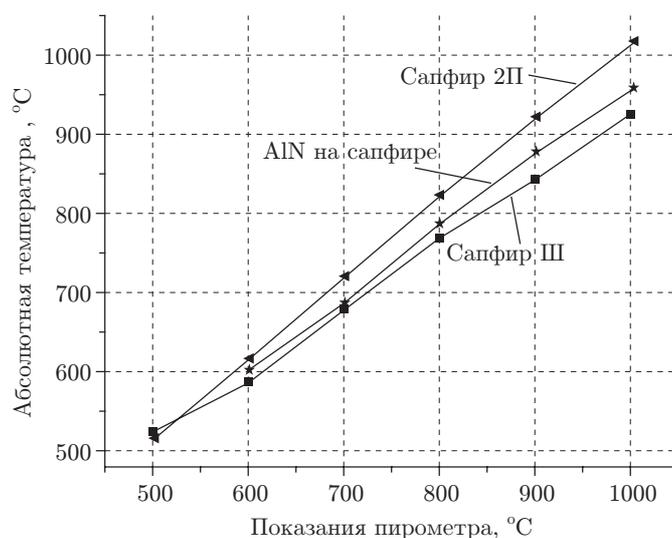


Рис. 4. Связь температуры подложки, измеряемой однополосным пирометром, и истинной температуры для двусторонне полированной подложки (Сапфир 2П), шлифованной подложки (Сапфир III) и подложки AlN/Al₂O₃ (AlN на сапфире)

Таблица 1

Конструкция гетероструктуры с 2ДЭГ на подложке AlN/Al₂O₃

Слой		Толщина слоя
GaN		2,0 нм
Al _{x=0,25} GaN (<i>n</i> -тип)		15,0 нм
Al _{x=0,25} GaN		10 нм
GaN		1200 нм
Сверхрешётка 50 периодов	AlN	1,0 нм
	GaN	1,0 нм
Подложка	AlN	500 нм
	Al ₂ O ₃	430 мкм

Optics USB4000", оснащённый многоканальным кремниевым фотодетектором. Для учёта спектральной зависимости чувствительности системы регистрации спектры нормировались с помощью спектра, полученного при измерении спектра свечения модели абсолютно чёрного тела с известной температурой, после чего производилась аппроксимация нормированных спектров. Из полученных при аппроксимации зависимостей вычислялась абсолютная температура образцов. Рис. 4 иллюстрирует связь значений температуры, регистрируемых с помощью однополосного пирометра, и соответствующей истинной температуры, определённой методом спектрально разрешённой пирометрии, для подложек с разными параметрами обработки обратной стороны.

Рост структур AlGaIn/GaN с 2ДЭГ. Эпитаксиальные слои с 2ДЭГ выращивались методом аммиачной МЛЭ на установке "СВЕ Riber 32P". В качестве источника активного азота использовался поток очищенного аммиака, источниками металлов служили стандартные эффузионные ячейки. Перед ростом все подложки подвергались высокотемпературному отжигу (1000 °С) в вакууме в течение 2 часов, поверхность AlN подвергалась очистке путём нанесения и последующего испарения Ga. Для этого при температуре 500 °С при отсутствии потока аммиака образец экспонировался в потоке атомарного Ga до полного исчезновения ДБЭО-картины, после чего температура повышалась до 850 °С до появления ДБЭО-картины вновь. Процесс очистки поверхности состоял из пяти циклов нанесения/испарения Ga. После этого на подложках выращивалась структура с 2ДЭГ (табл. 1).

Таблица 2

Параметры структур с 2ДЭГ

Номер образца	Дифракционная картина исходной поверхности AlN	Подвижность электронов в канале, см ² /В·с	Концентрация электронов в канале, см ⁻²
864	3D	1280	1,6 · 10 ¹³
865	3D	1690	1,1 · 10 ¹³
866	3D	1430	1,5 · 10 ¹³
867	2D	—	—
869	2D	—	—
870	2D	—	—

В ходе выращивания данных структур было обнаружено, что двумерный рост GaN в типичных ростовых условиях на подложках AlN/Al₂O₃, характеризующихся 2D дифракционной картиной AlN, не возможен. В то же время на подложках с 3D дифракционной картиной AlN рост структур ничем не отличался от роста на подложках сапфира. Причина такого результата в настоящее время не ясна. Возможно, это связано с наличием большого числа инверсионных доменов в слоях AlN на подложках первого типа.

Данные холловских измерений параметров структур с 2ДЭГ, выращенных на подложках AlN/Al₂O₃ обоих типов, указывают на наличие 2ДЭГ только на подложках, характеризующихся 3D дифракционной картиной AlN (табл. 2).

Заключение. В предлагаемой работе описана технология роста гетероэпитаксиальных структур AlGaN/GaN на подложках AlN/Al₂O₃. Предложен способ калибровки температуры подложек с помощью спектрально разрешённой пирометрии, позволяющий определять абсолютную температуру подложки независимо от подготовки обратной стороны. Разработан способ очистки подложек AlN/Al₂O₃ путём нанесения/испарения атомарного Ga на поверхность подложки перед ростом. В процессе экспериментов были выявлены два типа подложек AlN/Al₂O₃, отличающихся морфологией исходной поверхности. Проведены успешные ростовые эксперименты на подложках AlN/Al₂O₃ с более развитой морфологией поверхности. Полученные гетероструктуры с 2ДЭГ характеризуются подвижностью электронов двумерного электронного газа выше 1300 см²/В · с при концентрации электронов в канале более 1 · 10¹³ см⁻². Это означает, что использование подложек AlN/Al₂O₃ с более развитой морфологией поверхности позволяет получать гетероструктуры с параметрами 2ДЭГ, сопоставимыми с параметрами гетероструктур с 2ДЭГ на сапфире, технология которых хорошо отработана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров С. Б., Баранов Д. А., Кайдаш А. П. и др. СВЧ-полевые транзисторы на основе нитридов III группы // Физика и техника полупроводников. 2004. **38**, вып. 10. С. 1275–1280.
2. Kuwano N., Tsuruda T., Kida Y. et al. Dislocations in crack-free Al_xGa_{1-x}N grown on an AlN(0001) template // Phys. Status Solidi C. 2003. **0**, Is. 7. P. 2444–2447.
3. Wong M. N., Rajan S., Chu R. M. et al. N-face high electron mobility transistors with a GaN-spacer // Phys. Status Solidi A. 2007. **204**, Is. 6. P. 2049–2055.
4. Bilenko Y., Lunev A., Hu X. et al. 10 milliwatt pulse operation of 265 nm AlGaIn light emitting diodes // Jap. Journ. Appl. Phys. 2005. **44**, Pt. 2, N 3. P. L98–L100.
5. Grandjean N., Massies J. GaN and AlGaIn molecular beam epitaxy monitored by RHEED // Appl. Phys. Lett. 1997. **71**, Is. 13. P. 1816–1819.
6. Pearton S. J., Ren F., Zolper J. C., Shul R. J. GaN: Processing, defects, and devices // Journ. Appl. Phys. 1999. **86**, N 1. P. 961–1040.
7. **Advances** in MBE-Grown GaN for Light-Emitting Diodes and High Electron Mobility Transistors. Veeco Instruments, Inc. Application Note, April 2005. Note No. 1/05.

Поступила в редакцию 24 июня 2013 г.