

УДК 621.315.592

Гетероструктуры GaN/AlN для фотоэммиттеров с отрицательным электронным средством

*А.В. Мазалов, Д.Р. Сабитов, В.А. Курешов, А.А. Падалица, А.А. Мармалюк,
Л.М. Балясный, Ю.Н. Гордиенко, Д.В. Ильевский, О.В. Чистов, Д.А. Широков*

Представлены результаты работы по созданию гетероструктур GaN/AlN для фотоэммиттеров с отрицательным электронным средством, работающих в УФ диапазоне 200–365 нм. Гетероструктуры сформированы на сапфировых подложках в условиях МОС-гидридной эпитаксии. Установлена взаимосвязь между структурным совершенством гетероструктур GaN/AlN и квантовой эффективностью фотоэммиттеров с отрицательным электронным средством.

PACS: 73.40Qv, 73.21As, 85.60Gz, 73.61Ga.

Ключевые слова: AlN, GaN, МОС-гидридная эпитаксия, УФ-фотокатод, фотоэммиттер, отрицательное электронное средство, солнечно-слепой диапазон.

Введение

Прогресс современной полупроводниковой физики и техники, в частности, квантовой электроники и фотоэлектроники, в значительной мере связан с технологией получения высококачественных полупроводниковых материалов и созданием высокосовершенных эпитаксиальных гетероструктур с заданными физическими свойствами. В течение последних лет гетероструктуры III–N интенсивно исследуются в связи с возможностью создания на их основе различных фотоэмиссионных и оптоэлектронных приборов [1–3]. Так, например, в твердом растворе AlGaN ширина запрещенной зоны может варьироваться в широком диапазоне от GaN (3,4 эВ) до AlN (6,2 эВ). Благодаря этому данный материал может применяться для создания фотоприемников, работающих в средней и ближней ультрафиолетовой областях спектра. Однако технологические труд-

ности долгое время препятствовали практической реализации всех преимуществ этих материалов.

До сих пор наиболее популярной подложкой для выращивания эпитаксиальных гетероструктур на основе GaN является сапфир. Этот материал прозрачен в ультрафиолетовой области спектра и поэтому прекрасно подходит в качестве подложки, которая одновременно служит входным УФ-окном электровакуумного фотоэмиссионного приемника, работающего на просвет. К сожалению, постоянные кристаллические решетки и коэффициенты термического расширения сапфира и эпитаксиальных слоев нитридов галлия и алюминия значительно отличаются друг от друга. В результате этих отличий в процессе эпитаксиального роста полупроводниковых слоев на сапфире и их последующего охлаждения в слоях образуется большое количество разнообразных дефектов, таких как вакансии, дислокации, межзеренные границы и др. Эти дефекты создают электронные состояния в запрещенной зоне полупроводника, являющиеся центрами рассеяния и рекомбинации носителей заряда.

Фотоэммиттер с отрицательным электронным средством, работающий на просвет, как правило, состоит из тонкого активного слоя *p*-GaN, который выращен на буферном широкозонном слое. Большая разница постоянных кристаллических решеток не позволяет выращивать тонкие слои GaN достаточно высокого структурного совершенства непосредственно на сапфировой подложке. Поэтому для выращивания на сапфировых подложках эпитаксиальных слоев GaN используются буферные слои AlN или AlGaIn, прозрачные в УФ-области спектра.

Для работы фотоэмиссионного УФ-приемника необходимо, чтобы активный слой GaN имел вы-

Мазалов Александр Владимирович, инженер
Сабитов Дамир Равильевич, инженер.
Курешов Владимир Александрович, вед. инженер.
Падалица Анатолий Алексеевич, нач. отдела.
Мармалюк Александр Анатольевич, зам. ген. директора
ОАО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стальмаха».
Россия, 117342, Москва, ул. Введенского, 3.
E-mail: aleksandrnmzl@yandex.ru
Балясный Лев Михайлович, зам. техн. директора.
Гордиенко Юрий Николаевич, техн. директор.
Ильевский Давид Валентинович, инженер.
Чистов Олег Валерьевич, начальник сектора
Широков Дмитрий Алексеевич, инженер.
ОАО «НПО «Геофизика-НВ».
Россия, 107076, Москва, ул. Матросская тишина, 23, стр. 2

Статья поступила в редакцию 20 сентября 2013 г.

© Мазалов А.В., Сабитов Д.Р., Курешов В.А., Падалица А.А., Мармалюк А.А., Балясный Л.М., Гордиенко Ю.Н., Ильевский Д.В., Чистов О.В., Широков Д.А., 2013

сокий уровень проводимости *p*-типа и создавал состояние отрицательного электронного сродства [4]. При этом высокие значения подвижности и концентрации носителей заряда можно получить только в материале, обладающем высоким структурным совершенством [5]. Это связано с тем, что в GaN преобладают собственные дефекты донорного типа, которые компенсируют акцепторную примесь.

Оптимальная толщина активной области для фотоэмиттеров, работающих на просвет, составляет порядка 100–200 нм [6]. Эти толщины определяются диффузионной длиной электронов и коэффициентом поглощения света в активной области. Получение слоя GaN высокого структурного совершенства такой малой толщины является непростой задачей из-за дефектов вблизи границы раздела активного и буферного слоёв.

До настоящего времени в литературе практически отсутствуют работы по систематическому изучению влияния параметров гетероструктур *p*-GaN/AlN на выходные характеристики фотоэмиттеров с отрицательным электронным сродством. Так, например, в работе [4] указывается на взаимосвязь между проводимостью активной области *p*-GaN и квантовой эффективностью. При этом вопросы, посвященные влиянию кристаллического совершенства слоев, оставались не изученными.

Целью данной работы является попытка установить взаимосвязь между структурным совершенством гетероструктур *p*-GaN/AlN и выходными

параметрами фотоэмиттеров с отрицательным электронным сродством.

Экспериментальный рост гетероструктур

Рост слоев проводился на установке МОС-гидридной эпитаксии горизонтального типа на подложках Al₂O₃ с ориентацией (0001). В качестве источников алюминия и азота использовался триметилалюминий (ТМАл) и аммиак (NH₃), соответственно. Источником галлия являлся триметилгаллий (ТМГал). Бисциклопентадиенил магния (Cp₂Mg) использовался в качестве источника легирующей примеси *p*-типа. Газом-носителем служил водород. Для оценки кристаллического совершенства материала были проведены измерения рентгеновских кривых качания симметричного отражения (0002) на двухкристальном рентгеновском дифрактометре и определена ширина на полувысоте (FWHM) этих кривых в угловых секундах.

Исследована серия образцов с различной толщиной буферного слоя AlN. Описание образцов и результаты их измерений представлены в таблице. Активная область во всех образцах имела одинаковый уровень легирования. Толщина активного слоя во всех образцах равнялась 150 нм. Активация атомов Mg для получения *p*-типа проводимости в слоях GaN проводилась путем высокотемпературного отжига в атмосфере азота.

В таблице приведены характеристики исследованных образцов.

Таблица

№ обр.	Толщина AlN, нм	FWHM, угл. с		Квантовая эффективность, %
		AlN	<i>p</i> -GaN	
N1	600	130	625	5
N2	470	360	620	5
N3	170	400	550	11
N4	20	700	250	17

Фотокатоды с гетероструктурами в составе фотоприемного модуля

На основе полученной гетероструктуры на сапфировой подложке был изготовлен фотокатодный УФ-узел фотоприемного устройства (ФПМ), в котором сапфировая подложка со структурой, приваренная к титановой оправе, служила входным окном ФПМ [7]. Перед помещением в вакуумный блок эмитирующая поверхность после термической очистки гетероструктуры в сверхвысоком вакууме активировалась цезием и кислородом. Кроме того, перед помещением в сборочную установку, на воздухе производился предварительный

контроль характеристик УФ-фотокатода с гетероструктурой по следующим параметрам:

- по концентрации носителей заряда в активном слое *p*-GaN, определяемой согласно эффекту Холла, путём измерения ЭДС в магнитном поле;
- по ватт-амперной характеристике интегральной чувствительности фотокатода в УФ-диапазоне;
- по спектральной зависимости фототока в электролит для прогнозирования возможной деградации гетероэпитаксиальной структуры при высокотемпературных операциях изготовления фотокатодного узла;

После активировки и контроля фототока, фотокатодный узел переносился в камеру герметизации сборочной установки, где он сочленялся с корпусом вакуумного блока ФПМ через индиевую прокладку.

Поскольку спектральный диапазон чувствительности находится в видимом-слепой области (0,2–0,38 мкм), для создания солнечно-слепого ФПМ (0,2–0,29 мкм) она должна быть подавлена каким-либо УФ-фильтром, например, интерференционным, расположенным с внешней стороны входного окна фотоприемника. УФ-фильтр должен обеспечивать достаточную «солнечную слепоту», которая определяется как отношение спектральной чувствительности на длине волны 250 нм (середина солнечно-слепого диапазона) к спектральной чувствительности на длине волны 550 нм (середина видимого диапазона).

На основе разработанного фотокатодного узла был собран фотоприемный модуль [8] с аналоговым и цифровым выходом для оснащения перспективных оптико-электронных систем обнаружения УФ-излучения [9].

Результаты и обсуждение

Исходя из результатов измерений (см. табл.) видно, что кристаллическое совершенство GaN напрямую зависит от толщины буферного слоя AlN. При уменьшении толщины AlN с 600 нм до 20 нм значение полуширины рентгеновской кривой качания *p*-GaN уменьшилось с 640 до 250 угловых секунд. На рис. 1 показаны кривые качания слоев *p*-GaN, выращенных на буферном слое AlN различной толщины. Несмотря на то, что толщины слоев *p*-GaN во всех образцах были одинаковые, пик кривой качания от образца N4 обладает наибольшей интенсивностью, что свидетельствует о наилучшем структурном совершенстве. Кроме того, значение полуширины рентгеновской кривой качания GaN, полученное на образце N4, типично для высококачественного нитрида галлия значительной толщины (2–4 мкм), созданного по традиционной технологии.

Важно отметить, что наблюдается заметное увеличение полуширины рентгеновской кривой качания буферного слоя AlN с уменьшением его толщины. По всей видимости, это связано с дефектами вблизи границы раздела буферного слоя и подложки, образующимися на начальной стадии, когда преобладает островковый рост. По мере увеличения толщины AlN плотность дефектов уменьшается путем образования дислокационных петель при сращивании островков [10]. Однако именно особенности таких буферных слоев AlN

оказывают существенное влияние на начальные этапы роста GaN и позволяют получить слои GaN более высокого кристаллического совершенства.

Измерения характеристик солнечно-слепого ФПМ продемонстрировали однозначную зависимость квантовой эффективности от полуширины рентгеновской кривой качания активного слоя. Несмотря на то, что буферный слой в образце N4 обладает более низким структурным совершенством, именно на нем удалось вырастить наиболее высококачественную активную область, которая, как следствие, показала наилучшее значение квантовой эффективности в исследуемой серии образцов (см. табл.). Созданные на основе данной структуры фотоэмиттеры продемонстрировали квантовую эффективность до 17% на длинах волн 250–280 нм (см. рис. 2).

Таким образом, прослеживается вполне ожидаемая и закономерная взаимосвязь между структурным совершенством активной области и квантовой эффективностью прибора. Другими словами, чем лучше структурное совершенство, тем выше квантовая эффективность.

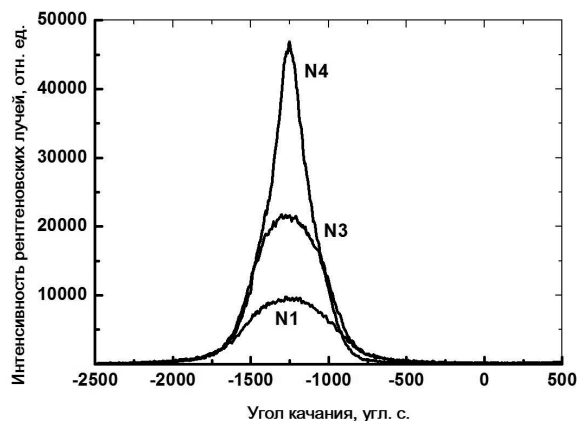


Рис. 1. Кривые качания образцов GaN с различной толщиной буферного слоя AlN: 470 нм (N1), 170 нм (N3) и 20 нм (N4).

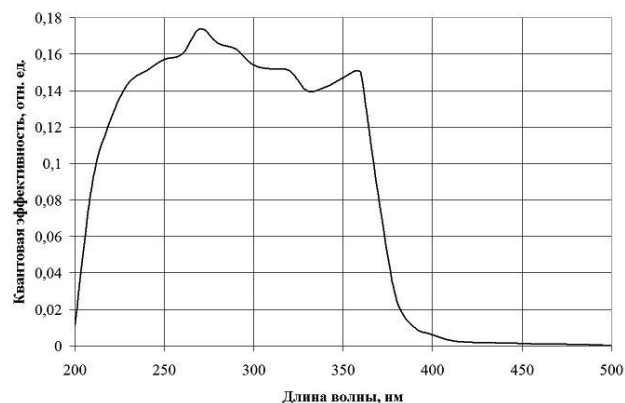


Рис. 2. Квантовая эффективность ФПМ на основе гетероструктуры N4.

Заклучение

Показано, что кристаллическое совершенство GaN напрямую зависит от толщины буферного слоя AlN. Так, при уменьшении толщины слоя AlN с 470 нм до 20 нм наблюдается сужение полуширины пиков рентгеновских кривых качания GaN с 600 до 250 угловых секунд. Определена взаимосвязь между квантовой эффективностью УФ-фотоэмиттеров с отрицательным электронным сродством и структурным совершенством активной области. Лучший из исследованных образцов продемонстрировал квантовую эффективность до 17% на длинах волн 250–280 нм.

Литература

1. Shur M.S. and Davis R.F. GaN-based materials and devices: growth, fabrication, characterization and performance. — World Scientific, 2004.
2. Takahashi K., Yoshikawa A., Sndhu A.. Wide bandgap semiconductors. Fundamental properties and modern photonic and electronic devices. — Springer, 2007.

3. Feng Z.C.. III-nitride devices and nanoengineering. — Imperial College Press, 2008.

4. Ulmer M.P., Wessels B.W., Han B, et al.// Proc. SPIE. 2003. V. 5164. P. 18.

5. I.Mizuno, T.Nihashi, T. Nagai, M. Niigaki, Y.Simizu et al.// Proc. of SPIE. 2008. V. 6945.

6. Oswald H.W, Siegmunda, Anton S. et al.// Proc. of SPIE. 2008. V. 7021.

7. Балясный Л.М. и др. Фотокатодный узел фотоэлектронного прибора Положительное решение о выдаче патента на полезную модель по заявке № 2012157614/07 (090717) от 27.12.2012 г.

8. Балясный Л.М. и др. Фотоприемный модуль на основе ЭОП с УФ ОЭС фотокатодом. Тезисы докладов российской конференции и школы по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотоэлектроники, г. Новосибирск. 2011

9. Поликарпов А, А, Яцык В.С.// Оборонная техника. 2010. № 6–7. С. 103.

10. Thapa S.B., Kirchner C., Scholz F. et al.// Journal of Crystal Growth. 2007. V. 298. P. 383.

GaN/AlN heterostructures for the photoemitters with negative electron affinity

A.V. Mazalov¹, D.R. Sabitov¹, V.A. Kureshov¹, A.A. Padalitsa¹, A.A. Marmalyuk¹,
L.M. Balyasny², Y.N. Gordienko, D.V. Ilyevskiy² O.V. Chistov², D.A. Shirikov²

¹M.F. Stelmakh RDI «Polyus»
3 Vvedensky str., Moscow, 117342, Russia.
E-mail: aleksandrmzl@yandex.ru

²Geophizika-NV R&P Association.
23, bld. 2, Matrosskaya Tishina str., 107076, Moscow.

The results of growing GaN/AlN heterostructures for 200–365 nm wavelength range photoemitters with negative electron affinity have been presented in this work. The heterostructures were grown by MOCVD on sapphire substrates. The correlation between crystal quality of the GaN/AlN heterostructures and quantum efficiency of the photoemitters with negative electron affinity has been established.

PACS: 73.40Qv, 73.21As, 85.60Gz, 73.61Ga.

Keywords: AlN, GaN, MOCVD, UV photocathode, photoemitter, negative electron affinity, solar-blind range.

Bibliography — 10 references

Received September 20, 2013