

## ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 537.11

### ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ДИОДОВ ШОТТКИ Ni/AlAs/GaAs/InGaAs/GaAs

© 2009 г. Ю.А. Данилов<sup>1-3</sup>, П.Б. Демина<sup>1</sup>, М.В. Дорохин<sup>1,2</sup>, Б.Н. Звонков<sup>1</sup>,  
Е.А. Путиримова<sup>2</sup>, М.М. Прокофьева<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский физико-технический институт ННГУ им. Н.И. Лобачевского

<sup>2</sup> Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

<sup>3</sup> Научно-образовательный центр «Физика твердотельных наноструктур»  
ННГУ им. Н.И. Лобачевского

marinaprkfeva@rambler.ru

Поступила в редакцию 14.02.2009

Представлены результаты исследования электролюминесценции диодов Шоттки на основе квантово-размерных гетероструктур InGaAs/GaAs. Рассмотрена возможность применения тонкого промежуточного полупроводникового слоя AlAs для повышения интенсивности люминесценции исследованных структур. В структурах Ni/AlAs/GaAs обнаружено повышение интенсивности электролюминесценции по сравнению с интенсивностью контрольных диодов Ni/GaAs. Наибольшая электролюминесценция наблюдалась для диодов со слоем AlAs толщиной 2.5 нм. Обнаружено изменение свойств слоя AlAs при хранении, вызванное, по-видимому, его окислением.

*Ключевые слова:* диод Шоттки, электролюминесценция.

#### Введение

Диоды Шоттки являются традиционными приборами полупроводниковой микроэлектроники. В последнее время область применения диодов Шоттки расширяется: так, существенные перспективы имеет использование диодов с контактом ферромагнитный (ФМ) металл/полупроводник в качестве элемента спинтроники. Структуры с контактом Шоттки из ФМ-металла представляют собой вариант прибора, в котором информация кодируется и передается посредством спина носителей заряда. В таких приборах носители с определенным значением спина инжектируются из ферромагнетика в полупроводниковую гетероструктуру, где рекомбинируют с образованием циркулярно-поляризованного излучения [1].

В связи с вышеизложенным важную роль играют исследования электролюминесценции (ЭЛ) диодов Шоттки. Принципиальная возможность наблюдения ЭЛ на структурах с барьером Шоттки была продемонстрирована в ряде работ [1, 2]. Можно также отметить исследования ЭЛ структур с контактом из ФМ-металла [3]. Дальнейшее развитие указанных диодов в качестве приборов, использующихся в области спинтро-

ники, подразумевает детальное рассмотрение факторов, которые могут повлиять на эффективность ЭЛ.

Как показано в [3], одним из существенных факторов, оказывающих влияние на ЭЛ-свойства диодов Шоттки, является состояние границы раздела между ФМ-металлом и полупроводником. Так, дефекты, присутствующие на границе раздела Ni/GaAs, приводят к снижению интенсивности электролюминесценции диодов по сравнению с диодами с контактом Au/GaAs. Одним из приёмов повышения интенсивности электролюминесценции является введение промежуточного слоя между металлом и полупроводником [3–5].

В данной работе представлены результаты исследования диодов Шоттки Ni/GaAs на основе гетероструктур с квантовой ямой (КЯ) InGaAs/GaAs, содержащих тонкий слой AlAs между Ni и GaAs. Выбор AlAs в качестве промежуточного слоя обусловлен следующими причинами. Во-первых, AlAs является более широкозонным материалом по сравнению с GaAs, что может способствовать увеличению инжекции неосновных носителей из металла в полупроводник [4]. Во-вторых, слой AlAs может расти эпитаксиально на GaAs [4]. В-треть-

их, промежуточный слой AlAs может предотвратить взаимную диффузию атомов Ni и GaAs, которая, как было показано в [3], может привести к частичному гашению ЭЛ.

### Методика исследований

Светоизлучающие структуры были выращены методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках  $n^+$ -GaAs (100) при температуре 650°C. На первом этапе подложка подвергалась отжигу для очистки поверхности. Затем на подложке выращивался буферный слой  $n$ -GaAs толщиной 0.7 мкм с концентрацией электронов  $n = (1 - 5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . После буферного слоя выращивалась квантовая яма  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  толщиной  $d = 10 \text{ нм}$  с содержанием индия  $x = 0.20$ . Слой КЯ зарастивался покровным слоем GaAs толщиной от 20 до 300 нм. Уровень легирования (в качестве примеси использован Si) покровного слоя составлял  $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . На завершающей стадии эпитаксиального процесса наносились слои AlAs различной толщины. Толщина слоя AlAs контролировалась методом эллипсометрии и варьировалась в пределах от 2 до 13 нм.

Кристаллическое совершенство поверхности образца (пленки AlAs) перед нанесением металлических контактов оценивалось методом электронографии на отражение на электронографе ЭМР-102 при ускоряющем напряжении 50 кВ. Металлические контакты диаметром 500 мкм наносились на поверхность образцов через маску методом термического испарения. Нанесение осуществлялось при комнатной температуре подложки в вакуумной установке на базе агрегата В4-0. В объеме, откачиваемом с помощью диффузионного насоса и с применением ловушки, охлаждаемой жидким азотом, поддерживался вакуум порядка  $4 \cdot 10^{-6}$  Торр. В качестве источников металла использовались высокочистые Ni и Au.

На изготовленных диодных структурах были проведены исследования электролюминесценции, а также вольт-амперных характеристик диодов Шоттки. При исследовании ЭЛ на образец подавалось прямое смещение, возбуждаемое излучение регистрировалось со стороны подложки. Измерения ЭЛ проводились при температуре 77 К, измерения ВАХ – при температуре 300 К.

### Экспериментальные результаты

Перед нанесением металла поверхность структуры (т.е. покровный слой AlAs) исследовалась методом электронографии на отражение.

На электронограмме, полученной непосредственно после выращивания структуры, видны Кикучи-линии, что свидетельствует о высоком кристаллическом совершенстве выращенной эпитаксиальной пленки AlAs (рис. 1).

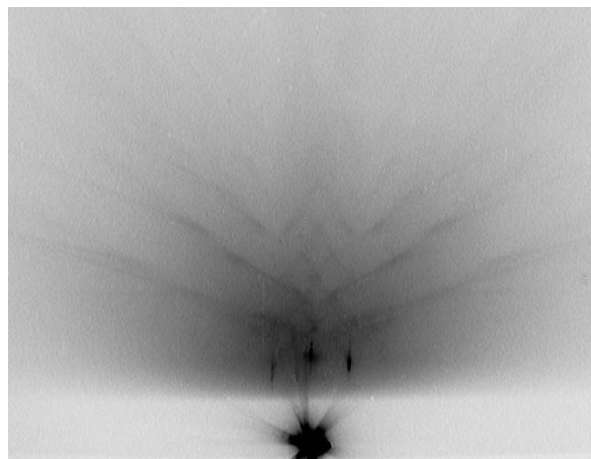


Рис. 1. Электронограмма поверхности образца, полученная непосредственно после выращивания структуры

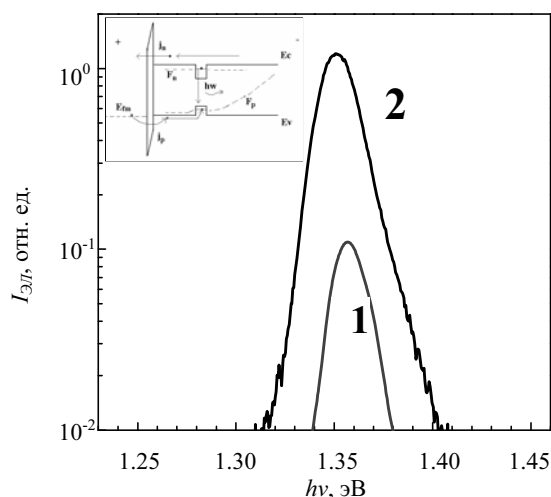


Рис. 2. Спектры электролюминесценции образцов с контактами: 1 – Ni/GaAs, 2 – Ni/2.5 нм AlAs/GaAs. Ток диода  $I_d = 10 \text{ мА}$ , температура измерений 77 К. На вставке показана предполагаемая зонная диаграмма барьера Шоттки при прямом смещении

На рис. 2 приведены спектры ЭЛ образцов с контактами Ni/GaAs и Ni/AlAs/GaAs. На спектрах наблюдается пик при энергии кванта  $\approx 1.365 \text{ эВ}$ . Значение энергии пика ЭЛ совпадает с рассчитанной по методике [5] энергией перехода между первым электронным и первым уровнем тяжелых дырок ( $e1-hh1$ ) в квантовой яме  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  со следующими параметрами:  $d_{QW} = 10.4 \text{ нм}$  и  $x = 0.17$ . Эти параметры довольно хорошо совпадают с параметрами, задавае-

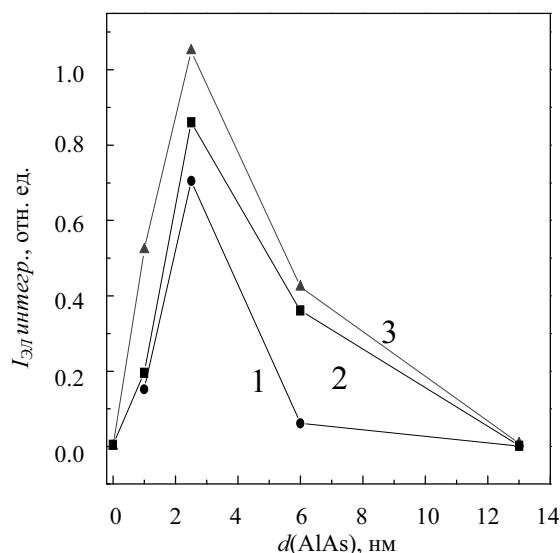


Рис. 3. Зависимость интегральной интенсивности ЭЛ от толщины слоя AlAs структур с контактами: 1 – Ni/AlAs/GaAs,  $I_d = 5$  мА; 2 – Au/AlAs/GaAs,  $I_d = 10$  мА; 3 – Ni/AlAs/GaAs,  $I_d = 10$  мА

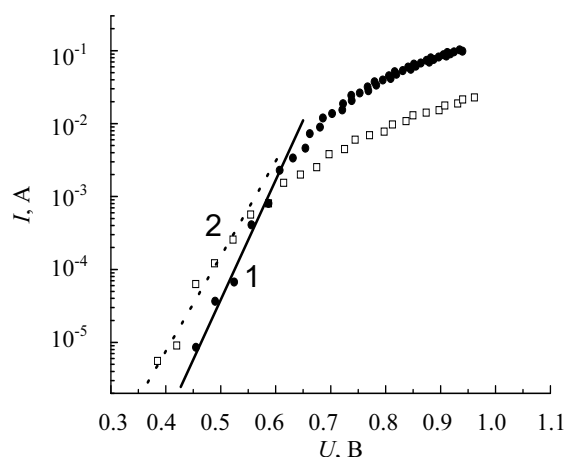


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики диода с контактом Ni/2.5 нм AlAs/GaAs: 1 – измеренные непосредственно после изготовления диода; 2 – измеренные после хранения диодной структуры в течение 45 суток. Температура измерений 300 К

Таблица

Параметры ВАХ диодов Шоттки с промежуточным слоем AlAs толщиной 2.5 нм

Параметры	Начальные значения	Измерения после хранения в течение 45 суток
Коэффициент неидеальности барьера, $n$	$1.1 \pm 0.1$	$2.0 \pm 0.1$
Высота барьера, эВ	$0.90 \pm 0.02$	$0.78 \pm 0.02$

мыми при выращивании КЯ. Из рис. 2 видно, что интенсивность ЭЛ образца с контактом Ni/AlAs/GaAs на порядок превышает интенсивность ЭЛ диода с контактом Ni/GaAs (кривые 1 и 2) при одинаковых токах диода (10 мА). Иными словами, введение подслоя AlAs позволяет на порядок повысить эффективность ЭЛ.

На рис. 3 приведены зависимости величины интегральной интенсивности ЭЛ образцов с контактами Ni/AlAs/GaAs (кривые 1 и 3) и Au/AlAs/GaAs (кривая 2) от толщины слоя AlAs. Интегральная интенсивность рассчитана путём интегрирования спектра ЭЛ от КЯ. Зависимость носит немонокотный характер и имеет максимум при толщине слоя AlAs, равной 2.5 нм. Отклонение в обе стороны от указанной толщины приводит к снижению интенсивности ЭЛ. При этом при использовании толстых (более 13 нм) слоев AlAs интенсивность ЭЛ структур снижается практически до уровня интенсивности ЭЛ структуры, не содержащей промежуточного слоя AlAs.

На рис. 4 представлены прямые ветви ВАХ исследованных диодов. Измерения проводились три раза, первое измерение проведено непосредственно после изготовления образцов

(рис. 4, кривая 1), второе измерение – после хранения в течение 45 суток (рис. 4, кривая 2) и третье измерение – после их хранения в течение 3 месяцев. Коэффициент неидеальности и высота потенциального барьера, рассчитанные по ВАХ для каждого диода, приведены в таблице. Из рис. 4 и таблицы видно, что после хранения структур наблюдается ухудшение параметров вольт-амперных характеристик: увеличение коэффициента неидеальности барьера Шоттки от 1.1 до 2, снижение высоты потенциального барьера от 0.90 до 0.78 эВ. После трех месяцев с момента изготовления структур наблюдалось снижение интенсивности ЭЛ практически до нуля и ухудшение параметров их вольт-амперных характеристик: ещё большее снижение высоты потенциального барьера и увеличение коэффициента неидеальности до значения  $> 3$ .

Электрическим измерениям можно поставить в соответствие результаты электронографических исследований поверхности образца (рис. 1, 5). Если на электронограмме, полученной сразу после изготовления структуры, видны Кикучи-линии (рис. 1), то на снимке, сделанном после хранения на воздухе в течение 45 дней, можно наблюдать лишь аморфное гало (рис. 5).

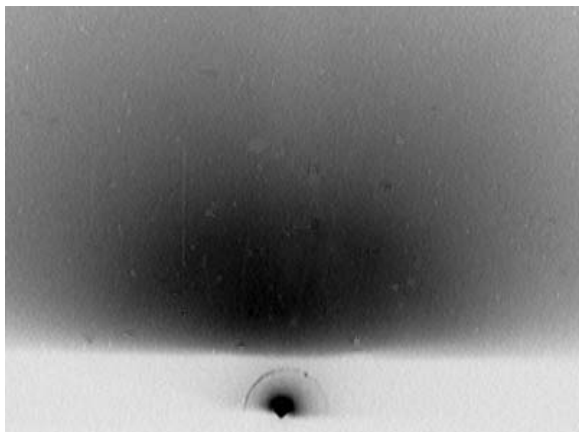


Рис. 5. Электронограмма поверхности образца, полученная после хранения на воздухе в течение 45 суток

### Обсуждение результатов

Таким образом, была определена оптимальная толщина слоя AlAs, равная 2.5 нм, при которой эффективность электрolumинесценции максимальна. Следует особо отметить, что интенсивность ЭЛ образцов с контактом Ni/AlAs/GaAs становится сравнима с интенсивностью ЭЛ образцов с контактами Au/GaAs и Au/AlAs/GaAs во всем диапазоне используемых толщин слоя AlAs (рис. 3). Повышение интенсивности ЭЛ в случае структур, содержащих промежуточный слой AlAs, может быть обусловлено предотвращением взаимной диффузии атомов металла и GaAs и исключением образования интерметаллических соединений.

Кроме того, следует отметить, что полученный вид зависимости  $I_{ЭЛ}(d_{AlAs})$  аналогичен виду зависимостей интенсивности ЭЛ от толщины слоя анодного окисла, полученных в [2] для подобных светоизлучающих структур. Возможен механизм инжекции дырок из металла, характерный для структур, содержащих туннельно-тонкий широкозонный промежуточный слой между металлом и полупроводником [2]. Подобный механизм был теоретически обоснован в [6]. Если предположить, что в исследуемых структурах действует этот механизм, то наблюдаемый на зависимости  $I_{ЭЛ}(d_{AlAs})$  максимум можно объяснить следующим образом. Повышение интенсивности ЭЛ при введении AlAs обусловлено падением напряжения на широкозонном слое, в результате которого смещается уровень Ферми и снижается барьер для дырок в металле (см. вставку на рис. 2). В структурах с тонким AlAs падение напряжения на промежуточном слое недостаточно для смещения уровня Ферми в металле к потолку валентной зоны (что необходимо для инжекции дырок из металла в валентную зону полупроводника). При толщи-

нах слоя AlAs больше оптимальной снижается вероятность тунелирования дырок.

Очевидным недостатком исследуемых структур является наблюдаемая деградация свойств при хранении. Полученные нами экспериментальные данные согласуются с результатами работы [7] и позволяют сделать предположение об окислении слоя AlAs. Окисление AlAs может иметь место даже под металлическим контактом. По данным электронографических исследований (рис. 1 и 5) видно, что с течением времени структура слоя AlAs меняется от монокристалла к аморфной плёнке. Изменение вида ВАХ исследованных структур с течением времени (рис. 4), по-видимому, обусловлено изменением характера токопереноса через плёнку AlAs по мере того, как меняются её свойства. Снижение интенсивности ЭЛ диодов при хранении может быть объяснено увеличением плотности состояний на границе раздела окисел AlAs/GaAs по сравнению с исходной. Последнее в рамках сделанного предположения приводит к увеличению вероятности безызлучательной рекомбинации.

Таким образом, можно заключить, что имеются как преимущества, так и недостатки использования промежуточного слоя AlAs в светоизлучающих структурах. К числу преимуществ можно отнести возможность существенного повышения интенсивности ЭЛ до уровня ЭЛ диодов с контактом Au/GaAs. К числу недостатков стоит отнести изменение свойств пленок AlAs при хранении, в том числе ухудшение люминесцентных свойств структур. Так как использование промежуточного слоя AlAs в структурах с контактом Ni/AlAs/GaAs позволяет получить высокую степень интенсивности ЭЛ светодиодов, представляет интерес исследование эффектов спиновой инжекции в подобных структурах. Однако для исследования спиновой инжекции и применения подобных структур в приборах спинтроники необходимо обеспечить стабильность свойств с течением времени. Вариантом преодоления этой проблемы может быть использование слоя AlGaAs, предложенное в работе [7].

### Заключение

В данной работе показано, что использование AlAs в качестве промежуточного слоя приводит к повышению эффективности электрolumинесценции структур с квантовой ямой и барьером Шоттки по сравнению со структурами, не содержащими слой AlAs. Было определено значение толщины промежуточного слоя AlAs, равное 2.5 нм, при котором эффективность ЭЛ иссле-

двух структур максимальна. Наблюдалось изменение свойств структур, содержащих слой AlAs, при их хранении на воздухе.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 08-02-00548, 08-02-97038) и программы ОФН РАН «Спин-зависимые эффекты в твердых телах и спинтроника», программ «Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант CRDF # BR4M01) и «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект № 2.2.2.2/4297).*

*Список литературы*

1. Schmidt G. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V. 38. P. R107–R122.
2. Байдусь Н.В., Демина П.Б., Дорохин М.В. и др. // ФТП. 2005. Т. 39. Вып. 1. С. 25–29.
3. Звонков Б.Н., Дорохин М.В., Ускова Е.А. и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2006. Вып. 2. С. 89–95.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Т. 2. 456 с.
5. Дроздов Ю.Н., Алешкин В.Я., Гапонова Д.М. и др. // Нанофотоника. Материалы совещания. Нижний Новгород, 11–14 марта 2002 г., ИФМ РАН. С. 219–222.
6. Card H.C., Rhoderick E.H. // Sol. State Electr. 1973. V. 16. P. 365–374.
7. Алферов Ж.И. // ФТП. 1998. Т. 32. Вып. 4. С. 3–11.

### ELECTROLUMINESCENCE OF Ni/AlAs/GaAs/InGaAs/GaAs SCHOTTKY DIODES

*Yu.A. Danilov, P.B. Demina, M.V. Dorokhin, B.N. Zvonkov,  
E.A. Pitirimova, M.M. Prokof'eva*

The investigation results of electroluminescence of Schottky diodes on InGaAs/GaAs quantum-well heterostructures have been presented. A possibility has been considered to apply a thin interfacial semiconductor AlAs layer to increase the electroluminescence intensity of the structures under study. Such an increase has been detected in Ni/AlAs/GaAs structures in comparison with control Ni/GaAs diodes. The highest electroluminescence intensity has been observed for diodes with the 2.5 nm thick AlAs layer. The change of AlAs layer properties during storage has been revealed which may be caused by its oxidation.

*Keywords:* Schottky diode, electroluminescence.