

УДК 621.383

## Фотодетекторы ультрафиолетового диапазона на основе эпитаксиальных слоев GaN и $Al_xGa_{1-x}N$

Н. М. Шмидт, В. В. Лундин, А. В. Сахаров,  
А. С. Усиков, Е. Е. Заварин

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

А. В. Говорков, А. Я. Поляков, Н. Б. Смирнов

Государственный институт редких металлов (ГИРЕДМЕТ), Москва, Россия

*На отечественном материале GaN, выращенном эпитаксией из металлоорганических соединений на сапфировых подложках ориентации 0001, получены металл—полупроводник—металл (МПМ) — фотодетекторы и фотодетекторы на барьере Шоттки на спектральный диапазон 200–365 нм с параметрами, близкими к параметрам лучших зарубежных аналогов, в частности, плотность тока утечки  $\sim 10^{-8}$  А/см<sup>2</sup>. Приведены параметры фотодетекторов с барьером Шоттки на основе  $Al_{0,1}Ga_{0,9}N$ , а также результаты исследования влияния структурных особенностей эпитаксиальных слоев на их электрофизические свойства и параметры УФ-фотоприемников. Показано, что хаотическое распределение заряженных центров, связанное с границами доменов мозаичной структуры, типичной для III-нитридов, приводит к низким значениям высоты барьеров Шоттки, большим токам утечки и замороженной фотопроводимости на легированных слоях GaN. Введение кремния в небольших количествах сводит этот эффект к минимуму и позволяет получить высоту барьеров Шоттки, близкую к разности работ выхода GaN-металл.*

Прямозонные полупроводники GaN и  $Al_xGa_{1-x}N$  — очень удобные материалы для разработки фотодетекторов ультрафиолетового спектрального диапазона. Изменяя содержание Al в твердых растворах на основе GaN, можно получать материал с шириной запрещенной зоны от 3,43 до 6,2 эВ, покрывая, таким образом, спектральный диапазон 200—365 нм. Этот спектральный диапазон представляет практический интерес для УФ-астрономии, мониторинга озонового слоя, датчиков пламени, для контроля чистоты воды. В последние годы были созданы фотодетекторы на основе III-нитридов: фотоспротивления, *pin*-фотодиоды, МПМ-фотодетекторы на барьерах Шоттки [1–3]. Несмотря на определенный прогресс, выявлен ряд проблем, препятствующих реализации потенциальных возможностей III-нитридов. Эти проблемы обусловлены, главным образом, качеством эпитаксиальных слоев, которые имеют малые диффузионные длины носителей заряда, высокую плотность дислокаций ( $\sim 10^8$ – $10^9$  см<sup>-2</sup>) и замороженную фотопроводимость.

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния структурных особенностей эпитаксиальных слоев на их электрофизические свойства и параметры УФ-фотоприемников, а также приведены параметры УФ-фотодетекторов на барьере Шоттки и МПМ-фотодетекторов, созданных на отечественных материалах.

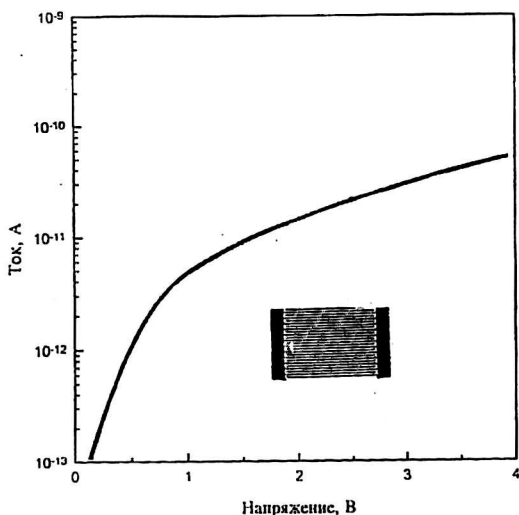
## Эксперимент

Слои GaN и  $Al_{0,1}Ga_{0,9}N$  были выращены эпитаксией из металлоорганических соединений на сапфировых подложках ориентации (0001). Процесс проводился в горизонтальном реакторе с индуктивным нагревом, в потоке водорода, при давлении 200 мбар. Рост детально описан в работах [4, 5].

Фотодетекторы на барьере Шоттки получили на нелегированных и слаболегированных кремнием слоях GaN и  $Al_{0,1}Ga_{0,9}N$  толщиной 3 мкм. Была использована планарная конструкция. Напыление металлов проводилось электронным лучом. В качестве омического контакта использовали Ti/Au ( $100 \text{ \AA} / 500 \text{ \AA}$ ). Шоттки контакт состоял из полупрозрачных слоев Ni/Au ( $100 \text{ \AA} / 500 \text{ \AA}$ ) диаметром 500—1500 мкм с контактной точкой диаметром 100 мкм Ni/Au ( $200 \text{ \AA} / 500 \text{ \AA}$ ). Последовательное сопротивление фотодетекторов на барьере Шоттки — 200 Ом.

МПМ-фотодетекторы были получены на полуизолирующих эпитаксиальных слоях GaN толщиной 2 мкм. Для получения полуизолирующих слоев в процессе эпитаксиального роста вводили акцепторную примесь Mg. Сопротивление слоев  $\sim 10^8$  Ом. Конструкция МПМ-фотодетектора приведена на рис. 1 (вставка). МПМ структура была сформирована из барьеров Шоттки Ti/Au ( $200 \text{ \AA} / 500 \text{ \AA}$ ), представляющих собой два электрода. Эти электроды имеют по 12 пальцев шириной 5 мкм и с таким же расстоянием между ними. Площадь активной области  $250 \times 250$  мкм.

Рис. 1. Конструкция и ВАХ МПМ-фотодетекторов



На полученных фотодетекторах измерялись спектральные, вольт-амперные характеристики и абсолютная чувствительность.

## Результаты

На полученных МПМ-фотодетекторах наблюдались малые значения темнового тока (см. рис. 1). Наблюдаемые значения тока при смещениях меньше

10 В в пять раз меньше таких же показателей в работе [6]. Характер зависимости тока от напряжения позволяет говорить о смешанном механизме протекания тока: туннельном и термоэлектронной эмиссии. На рис. 2, кривая 1 приведена зависимость спектральной чувствительности МПМ-фотодетектора при смещении меньше 5 В. Она имеет типичный вид с резким спадом в области длин волн меньше 370 нм. Абсолютная чувствительность при этих смещениях ~50 мА/Вт. При смещениях больше 5 В чувствительность увеличивается на несколько порядков. Этот эффект наблюдался во многих работах [1, 2, 7] и может быть связан с захватом дырок акцепторными примесями в дефектных областях фотодетектора [1].

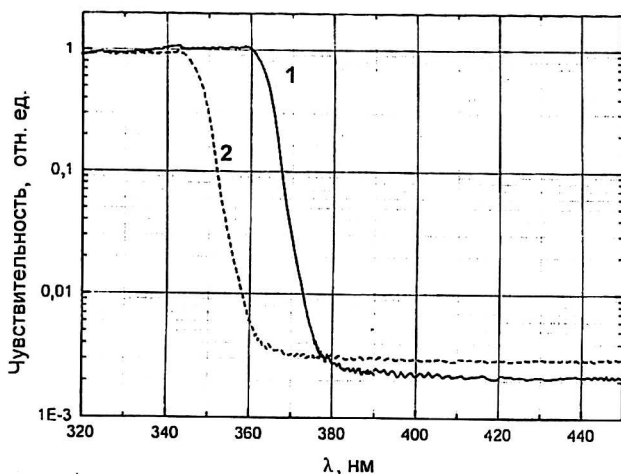


Рис. 2. Спектральные характеристики фотодетекторов на основе GaN (кривая 1) и  $Al_{0,1}Ga_{0,9}N$  (кривая 2)

Для изготовления фотодетекторов с барьером Шоттки были использованы нелегированные и слабелегированные кремнием слои GaN и  $Al_{0,1}Ga_{0,9}N$ . Предыдущие исследования [8] показали, что эти два типа слоев сильно отличаются по своим электрофизическим свойствам (таблица).

№ образца	Эпитаксиальный слой	Толщина, мкм	Si, $см^{-3}$	Концентрация, $см^{-3}$		Угол разворота доменов, мин	Подвижность, $см^2V^{-1}c^{-1}$	
				C-V $N_d - N_a$	Холл		300 К	80 К
413	GaN	4	н/л	$4 \cdot 10^{15}$	$1,5 \cdot 10^{17}$	20	70	20
644	GaN	3	н/л	$2 \cdot 10^{15}$	$10^{17}$	20	30	20
646	GaN	4	$< 10^{18}$	$2 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^{17}$	20	400	200
598	GaN	3	$< 10^{18}$	$2 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^{17}$	6	550	1000
602	$Al_{0,1}Ga_{0,9}N$	6	н/л	$2 \cdot 10^{16}$	$10^{18}$	20	20	20
601	$Al_{0,1}Ga_{0,9}N$	5	$< 10^{18}$	$10^{18}$	$2 \cdot 10^{18}$	20	100	20

При близких значениях концентрации носителей, полученных из данных по измерению эффекта Холла, в геометрии Ван-дер-Пау значения подвижности для слоев GaN при комнатной температуре отличаются почти на порядок, а при 80 К — почти в 50 раз. Для слоев  $Al_{0,1}Ga_{0,9}N$  разница существенно меньше.

Результаты предыдущих исследований с помощью бесконтактной электро-статической электронно-силовой микроскопии [8] показали, что наблюдаемое различие в электрофизических свойствах вызвано нерегулярным распределением зарядов в мозаичной (столбчатой) структуре, типичной для III-нитридов [9]. Причем эти заряды распределены в дислокационных стенках (границах доменов) мозаичной структуры.

Введение атомов кремния в концентрациях  $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$  существенно уменьшает влияние заряженных центров при комнатной температуре. Однако при  $T < 300 \text{ К}$  свести к минимуму влияние заряженных центров удавалось только на слоях с хорошо сформированной мозаичной структурой, т. е. структурой, имеющей, по данным рентгеновской дифрактометрии, малые углы разворота между границами доменов.

C—V-измерения с помощью ртутного зонда показали, что значения  $N_d - N_a$  для легированных слоев в приповерхностной области ( $\sim 1 \text{ мкм}$ ) на несколько порядков ниже концентрации носителей заряда, определенной из холловских измерений, а для слаболегированных слоев эти значения практически совпадают.

Таким образом, исходное состояние поверхности этих двух типов слоев совершенно различное, для нелегированных слоев приповерхностная область обеднена носителями. Кроме того, анализ состава приповерхностной области методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (ЭСХА) показал, что для нелегированных слоев нарушена стехиометрия этой области: концентрации Ga и N ниже на несколько процентов за счет присутствия углерода и кислорода. Для слаболегированных слоев такого сильного отклонения стехиометрии не наблюдается.

Разное состояние поверхности этих слоев приводит к тому, что высота барьеров Шоттки, напыленных в одном процессе на эти слои, существенно отличается: для слаболегированных слоев — 1,02 эВ, что близко к разности работ выхода GaN и Ni, а для нелегированных слоев — не более 0,5 эВ. Такие же малые значения высоты барьеров наблюдаются на слоях  $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}$ . Токи утечки обратносмещенных барьеров на этих слоях отличаются на несколько порядков (рис. 3). Максимальные значения наблюдаются для слоев AlGaN (см. рис. 3, кривая 4), так как слои имеют высокую концентрацию носителей заряда ( $10^{18} \text{ см}^{-3}$ ). Для слоев GaN максимальные значения токов (см. рис. 3, кривая 3) наблюдаются на нелегированных слоях, для слаболегированных — они на несколько порядков ниже (см. рис. 3, кривые 1 и 2). Следует отметить, что минимальные значения тока близки к лучшим значениям, приведенным в [3].

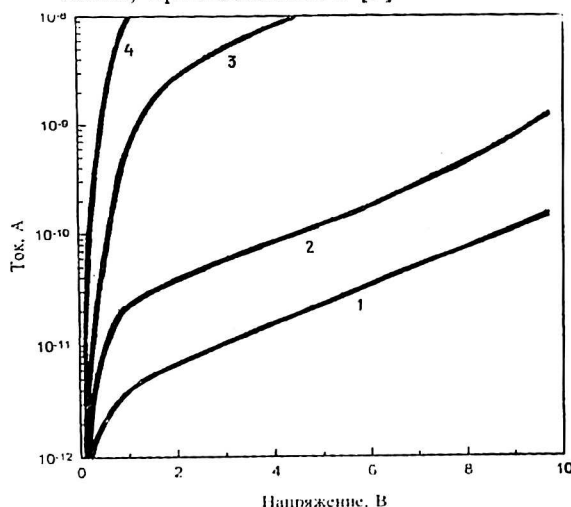


Рис. 3. Обратные ветви вольт-амперных характеристик фотодетекторов с барьером Шоттки диаметром 600 мкм на основе эпитаксиальных слоев GaN и  $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}$ :

1, 2 — GaN, слаболегированный кремнием;  
3 — GaN нелегированный; 4 —  $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}$

На этих же слоях была исследована замороженная фотопроводимость. Наиболее сильно этот эффект проявляется при температурах ниже 300 К. На рис. 4 представлены температурные зависимости тока обратносмещенных барьеров до и после освещения дейтериевой лампой при 80 К. Максимальные значения замороженной фотопроводимости, в том числе и при комнатной температуре, наблюдаются для нелегированных слоев GaN (см. рис. 4, кривая 1), для слаболегированных кремнием слоев при комнатной температуре замороженная фотопроводимость не наблюдается, для образцов с меньшей подвижностью (см. рис. 4, кривая 2) — замороженная фотопроводимость проявляется при температурах ниже комнатной.

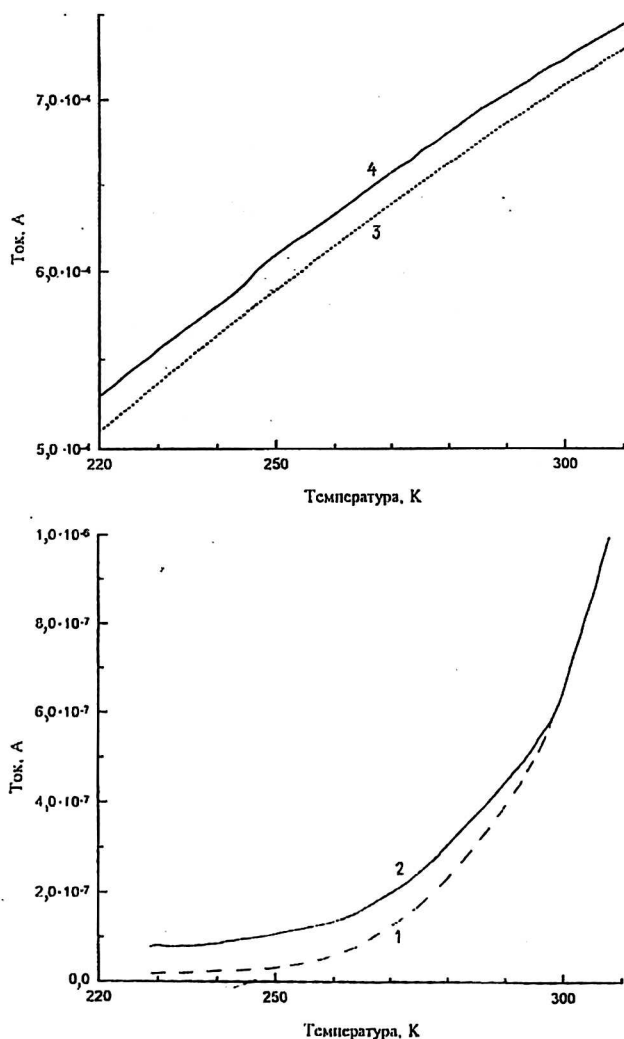


Рис. 4. Температурная зависимость темнового тока (1, 3) и тока после освещения УФ-дейтериевой лампы при 85 К (2, 4) для GaN, слаболегированного Si (1, 2), и нелегированного (3, 4)

Проведенные исследования ВАХ и замороженной фотопроводимости показали, что оба наблюдавшихся ранее эффекта влияют на параметры фотоприемников. Хаотическое распределение заряженных центров в приповерхностной области в нелегированных слоях приводит к низким значениям высоты барьеров Шоттки, большим токам утечки и появлению замороженной фотопроводимости. Введение кремния уменьшает влияние заряженных центров, и для хорошо сформированной мозаичной структуры позволяет получить величину барьера, определяемого разностью работ выхода GaN—металл, и минимальные токи утечки, а также свести к минимуму эффект замороженной фотопроводимости.

На барьерах Шоттки с минимальными токами утечки были определены значения абсолютной чувствительности на длине волны 330 нм с помощью спектрофотометра и калиброванного УФ кремниевого фотоприемника. Абсолютная чувствительность имеет значение 100 мА/Вт. Эти значения ниже максимальных, приведенных в [3], что связано с потерями на поглощение в прозрачном электроде, толщина которого не оптимизирована. Спектральная характеристика для фотодиода на основе GaN имеет такой же вид, как у МПМ-фотодетектора (см. рис. 2, кривая 1), а для фотодетектора на основе  $Al_{0,1}Ga_{0,9}N/GaN$  смещена в более коротковолновую область (см. рис. 2, кривая 2).

### Выводы

На отечественном материале GaN получены МПМ-фотодетекторы и фотодетекторы на барьере Шоттки с параметрами, близкими к лучшим зарубежным аналогам. Возможна дальнейшая оптимизация параметров фотодетекторов на барьерах Шоттки как путем улучшения структурного совершенства эпитаксиальных слоев, так и условий формирования барьеров Шоттки.

### Литература

1. Shur M. S., Khan M. A.//MRS Bull. 1997. V. 22. № 1. P. 44—73.
2. Pearton S. J. et al.//J. Appl. Phys. 1999. V. 86. № 1. P. 1—9.
3. Dubos J. Y.//Phys. Stat. Sol. (a). 1999. V. 176. № 1. P. 5—15.
4. Usikov A. S. et al.//Electrochem. Soc. Proceed. 1997. V. 34. P. 110—115.
5. Lundin W. V. et al. Book. 8 Europ. Works. Metal-Organic Vapour Phase Epitaxy and Related Growth Techn. — Prague, Czech Republic. 1999. P. 53—58.
6. Monroy E., Cale F., Munoz E.//Phys. Stat. Sol. (a). 1999. V. 176. № 1. P. 5—15.
7. Huang Z. C., Mott D. B., Shu P. K.//J. Electron. Mater. 1997. V. 26. № 3. P. 330—333.
8. Schmidt N. M., Emtsev V. V., Kryzhanovsky A. S. et al.//Phys. Stat. Sol. (b). 1999. V. 216. № 1. P. 581—586.
9. Ponce F. A.//MRS Bull.//1997. V. 22. № 1. P. 51—54.
10. Guo J. D., Feng M. S., Guo R. J. et al.//Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. № 18. P. 2657—2659.

## Ultra-violet photodetectors based on GaN and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ epitaxial layers

*N. M. Schmidt, W. V. Lundin, A. V. Sakharov, A. S. Usikov,  
E. E. Zavarin*

loffe Physico-Technical Institute, St.-Petersburg, Russia

*A. V. Govorkov, A. Ya. Polyakov, N. B. Smirnov*

State Institute of Rare Metals (GIREDMET), Moscow, Russia

*MSM photodetectors and Schottky barrier photodetectors over spectral range 200–365 nm with characteristics close to those of the best foreign analogs, in particular, leakage current density of about  $10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup>, have been obtained using domestic GaN grown by MOCVD on sapphire substrates of (0001) orientation. The characteristics of  $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}$  Schottky barrier photodetectors have been given. The effect of epilayer structural peculiarities on electro-physical properties of the epilayers and on parameters of the UV photodetectors has been investigated. Random distribution of charged centers, which is associated with domain boundaries of the mosaic structure being typical of III-nitrides, has been shown to result in a low Schottky barrier height, a high leakage current, and persistent photoconductivity in undoped GaN. The introduction of low Si concentration minimizes the effect as well as allows the Schottky barrier height to be obtained close to the difference between work functions of GaN and metal.*