

УДК 621.383:621.315.5

## Исследование характеристик мезаструктур матриц $p-i-n$ -диодов на основе гетероэпитаксиальных структур $Al_xGa_{1-x}N$

Д. В. Смирнов, К. О. Болтарь, М. В. Седнев, Ю. П. Шаронов

*Сформированы мезаэлементы матриц  $p-i-n$ -диодов на основе гетероэпитаксиальных структур  $Al_xGa_{1-x}N$ , изготовленных методами молекулярно-лучевой (МЛЭ) и МОС-гидридной (МОС) эпитаксии. Разделение элементов матриц формата  $320 \times 256$  с шагом  $30$  мкм осуществлялось ионно-лучевым травлением через маску фоторезиста в потоке ионов аргона, создаваемого источником Кауфмана, в вакуумной установке. Для определения необходимой глубины травления использовались методы контактной профилометрии и ультрафиолетовой спектрофотометрии, что позволило определить положение  $n$ -слоя и достаточную глубину травления образца. Погрешность толщин функциональных слоев ГЭС, указанных в сертификатах производителей, не превышала  $28\%$ . Определены скорости ионно-лучевого травления слоев  $Al_xGa_{1-x}N$  с различным составом.*

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw, 42.25.

*Ключевые слова:*  $Al_xGa_{1-x}N$ , GaN, гетероэпитаксиальные структуры,  $p-i-n$ -фотодиод, ионно-лучевое травление, видимо-слепой поддиапазон, солнечно-слепой поддиапазон, граница поглощения (пропускания).

### Введение

Одним из перспективных направлений твердотельной фотоэлектроники является совершенствование методов создания матричных фотоприемных модулей ультрафиолетового диапазона на основе гетероэпитаксиальных  $p-i-n$ -структур твердых растворов нитридов галлия и алюминия  $Al_xGa_{1-x}N$  [1—3]. Одной из ключевых операций здесь является разделение матричных фоточувствительных элементов по мезотехнологии методом ионно-лучевого травления до  $n$ -слоя. Выбор метода ионно-лучевого травления обусловлен высокой химической инертностью нитридов [4]. Особенности такого метода для структур  $Al_xGa_{1-x}N$  являются зависимость скорости травления от доли алюминия [5, 6] в твердом растворе и достаточно малая толщина рабочих слоев структуры. С другой

стороны, следует учитывать возможную погрешность по толщине при выращивании гетероэпитаксиальной структуры. В такой ситуации предъявляются повышенные требования контроля глубины травления гетероэпитаксиальных  $p-i-n$ -структур, так как возможно недотравливание или перетравливание функциональных слоев.

Основной целью данной работы является экспериментальное определение условий оптимального окончания процесса травления эпитаксиальных слоев.

### Техника проведения эксперимента

Экспериментальные исследования по разработке метода ионно-лучевого травления проводились на гетероэпитаксиальных структурах (ГЭС)  $Al_xGa_{1-x}N$  различных сочетаний слоев конфигураций, выращенных на подложках  $\alpha-Al_2O_3$  (0001) методами МОС-гидридной или молекулярно-лучевой эпитаксии. [7] Архитектура, состав и толщины слоев ГЭС  $Al_xGa_{1-x}N$  для видимо-слепых и солнечно-слепых  $p-i-n$ -фотоприемников представлены в табл. 1 (данные предоставлены поставщиками ГЭС).

Соединения нитридов галлия и алюминия имеют прочные связи в кристаллической решетке, что обуславливает их высокую химическую инертность [8]. Метод плазмохимического травления с высокой скоростью травления (до  $100$  нм/мин) обладает плохой селективностью травления маски и эпитаксиального слоя, а также низким качеством

Смирнов Дмитрий Валентинович, инженер<sup>1</sup>.  
Болтарь Константин Олегович, начальник НТК<sup>1</sup>, профессор<sup>2</sup>.  
Седнев Михаил Васильевич, начальник участка НТК<sup>1</sup>.  
Шаронов Юрий Павлович, вед. инженер-технолог<sup>1</sup>.  
<sup>1</sup>АО «НПО «Орион»».  
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.  
Тел. 8 (499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru  
<sup>2</sup>Московский физико-технический институт.  
Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 1 июля 2015 г.

© Смирнов Д. В., Болтарь К. О., Седнев М. В., Шаронов Ю. П., 2015

протравленной поверхности [9]. Вследствие этого, для травления исследуемых ГЭС на основе  $Al_xGa_{1-x}N$  выбран метод ионно-лучевого травления в среде инертного газа (как правило, аргона) через маску фоторезиста. Для создания рисунка маски использовался фотошаблон для матриц формата  $320 \times 256$  с шагом 30 мкм. Процесс травления проводился на стандартном технологическом оборудовании ионами аргона  $Ar^+$ .

Метод ионно-лучевого травления применялся в работе для формирования элементов матрицы  $p-i-n$ -фотодиодов. За окончание процесса принимали стравливание функциональных слоев до  $n$ -слоя через маску фоторезиста. С целью исключения возможности недотравливания структуры из-за неоднородности травления по площади пучка, стравливали также и некоторую часть  $n$ -слоя ( $\sim 100$  нм). Схема травления показана на рис. 1.

Таблица 1

Параметры ГЭС, предоставленные поставщиками

№ структуры, метод выращивания	Тип структуры, состав	Толщина слоя, нм	Уровень легирования в конт. слоях: $p/n$
833, молекулярно-лучевая	BC,	260	$1 \times 10^{17}$ $3 \times 10^{19}$
	$p^+$ -GaN	225	
	$i$ -GaN	495	
	$n^+$ -GaN	250	
	AlN Сапфир	430 мкм	
V-1893, МОС-гидридная	CC,	290	$(1 \div 2) \times 10^{18}$ $1 \times 10^{17}$ $3 \times 10^{18}$
	$p^+$ -GaN	200	
	$p$ -Al <sub>0,45</sub> Ga <sub>0,55</sub> N	200	
	$i$ -Al <sub>0,45</sub> Ga <sub>0,55</sub> N	710	
	$n^+$ -Al <sub>0,65</sub> Ga <sub>0,35</sub> N	1400	
	CP AlN/AlGaN	400	
	AlN Сапфир	430 мкм	
V-2052, МОС-гидридная	BC,	210	$1 \times 10^{18}$ $1 \times 10^{16}$ $3 \times 10^{18}$
	$p^+$ -GaN	340	
	$p$ -GaN	350	
	$i$ -GaN	850	
	$n^+$ -Al <sub>0,23</sub> Ga <sub>0,77</sub> N	150	
	AlN Сапфир	430 мкм	
V-2050, МОС-гидридная	CC,	240	$1 \times 10^{18}$ $1 \times 10^{16}$ $3 \times 10^{18}$
	$p^+$ -GaN	290	
	$p$ -Al <sub>0,45</sub> Ga <sub>0,55</sub> N	290	
	$i$ -Al <sub>0,45</sub> Ga <sub>0,55</sub> N	770	
	$n^+$ -Al <sub>0,64</sub> Ga <sub>0,36</sub> N	150	
	AlN Сапфир	430 мкм	

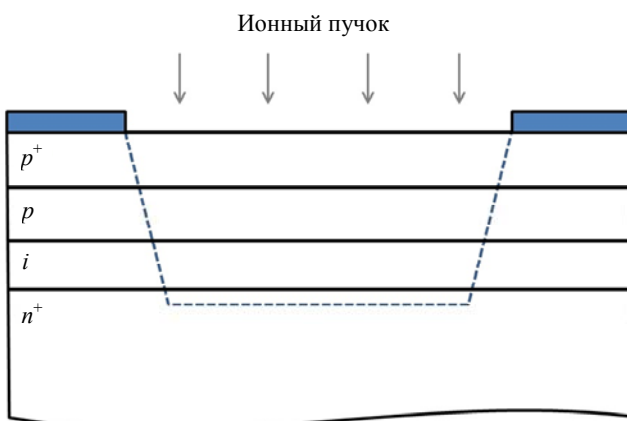


Рис. 1. Схема процесса ионно-лучевого травления эпитаксиальных структур  $Al_xGa_{1-x}N$

Для определения условий оптимального окончания процесса травления использовались методы контактной профилометрии и ультрафиолетовой спектрофотометрии. Общая глубина травления и скорости травления отдельных слоев определялись путем измерения высоты «ступенек» на контактном профилометре, образовавшихся в результате травления поверхности гетероструктур через маску фоторезиста за определенные промежутки времени при постоянных параметрах ионного пучка. Маскирование выполняли с помощью сапфирового диска. Скорость травления вычисляли по отношению измеренной высоты ступеньки к времени воздействия потока ионов аргона. Для подтверждения стравливания функциональных слоев до  $n$ -слоя, на образцах до и после процесса травления измеряли спектры поглощения и пропускания УФ-излучения в диапазоне длин волн от 200 до 800 нм с помощью ультрафиолетового спектрофотометра.

#### Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены результаты измерений глубины травления слоев  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  при постоянных параметрах ионного пучка на гетероэпитаксиальных структурах № 833 и № V-1893 видимослепого (ВС) и солнечно-слепого (СС) поддиапазонов соответственно.

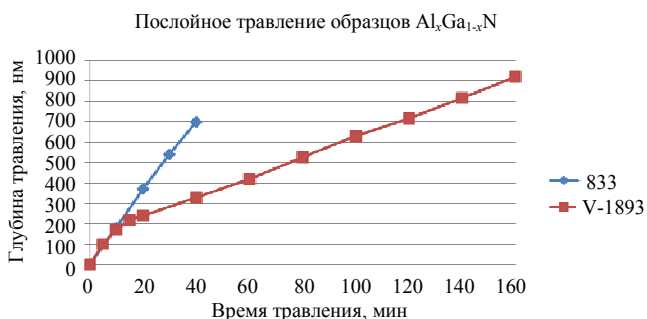


Рис. 2. Зависимость глубины травления от времени процесса для образцов 833 и V-1893 видимо-слепого и солнечно-слепого диапазонов

Глубина травления линейно возрастает со временем для каждого отдельного слоя. Для образца 833 стравливаемые функциональные слои имеют один состав GaN и, соответственно, одну постоянную скорость травления. Образец V-1893 имеет два перехода по составу функциональных слоев:  $p^+-\text{GaN} \rightarrow p-\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{N}$  и  $i-\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{N} \rightarrow n^+-\text{Al}_{0,65}\text{Ga}_{0,35}\text{N}$ . Этим переходам соответствуют изменения тангенсов угла наклона графика экспериментальной зависимости.

Поэтапное измерение высоты «ступенек» после травления исследуемых образцов позволило получить зависимость скорости травления от со-

става слоя (доли Al). Результаты измерений представлены на рис. 3.

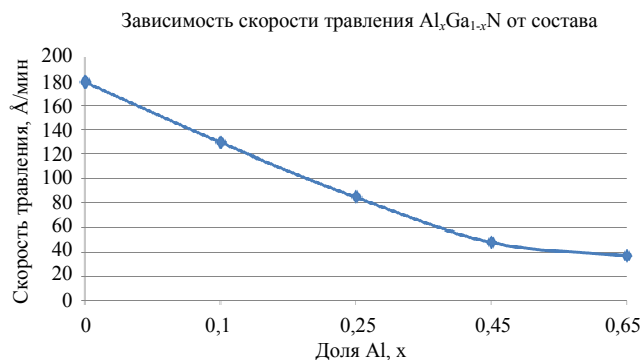


Рис. 3. Зависимость скорости травления  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  от состава слоя

Полученная зависимость используется в процессе изготовления матриц  $p-i-n$ -фотодиодов на основе  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  при расчете времени ионнолучевого травления.

Значительное снижение скорости травления при увеличении доли Al увеличивает время травления и, соответственно, воздействия ионов на маску фоторезиста. В результате может произойти частичное или полное ее стравливание. Для контроля процесса травления измерялись спектры пропускания и поглощения УФ-излучения образцами до и после процесса травления. Условием окончания процесса травления выбрано смещение границ поглощения или пропускания в область, соответствующую составу  $n$ -слоя.

На рис. 4 показано смещение границ спектров поглощения и пропускания после травления для структур видимо-слепого и солнечно-слепого диапазонов.

Из рисунка видно, что для структуры V-2052 граница поглощения (пропускания) после травления смещается с 365 нм (GaN) до ~ 320 нм ( $\text{Al}_{0,23}\text{Ga}_{0,77}\text{N}$ ). Для структуры V-2050 границы поглощения (пропускания) смещаются с 365 нм (GaN) и с 280 нм ( $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{N}$ ) до ~ 245 нм ( $\text{Al}_{0,64}\text{Ga}_{0,36}\text{N}$ ) [9, 10]. Для образцов V-2052 и V-2050 время травления и глубина травления функциональных слоев составили следующие значения: для V-2052 — 61 минуту и 0,85 мкм, для V-2050 — 109 минут и 0,72 мкм.

Погрешность определения толщин слоев ГЭС  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  по скорости травления, заданных в спецификации структур разного состава, не превышала 28 %.

Операции измерения спектров поглощения и пропускания теперь включены в процесс изготовления УФ-матриц  $p-i-n$ -фотодиодов на основе ГЭС  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ .

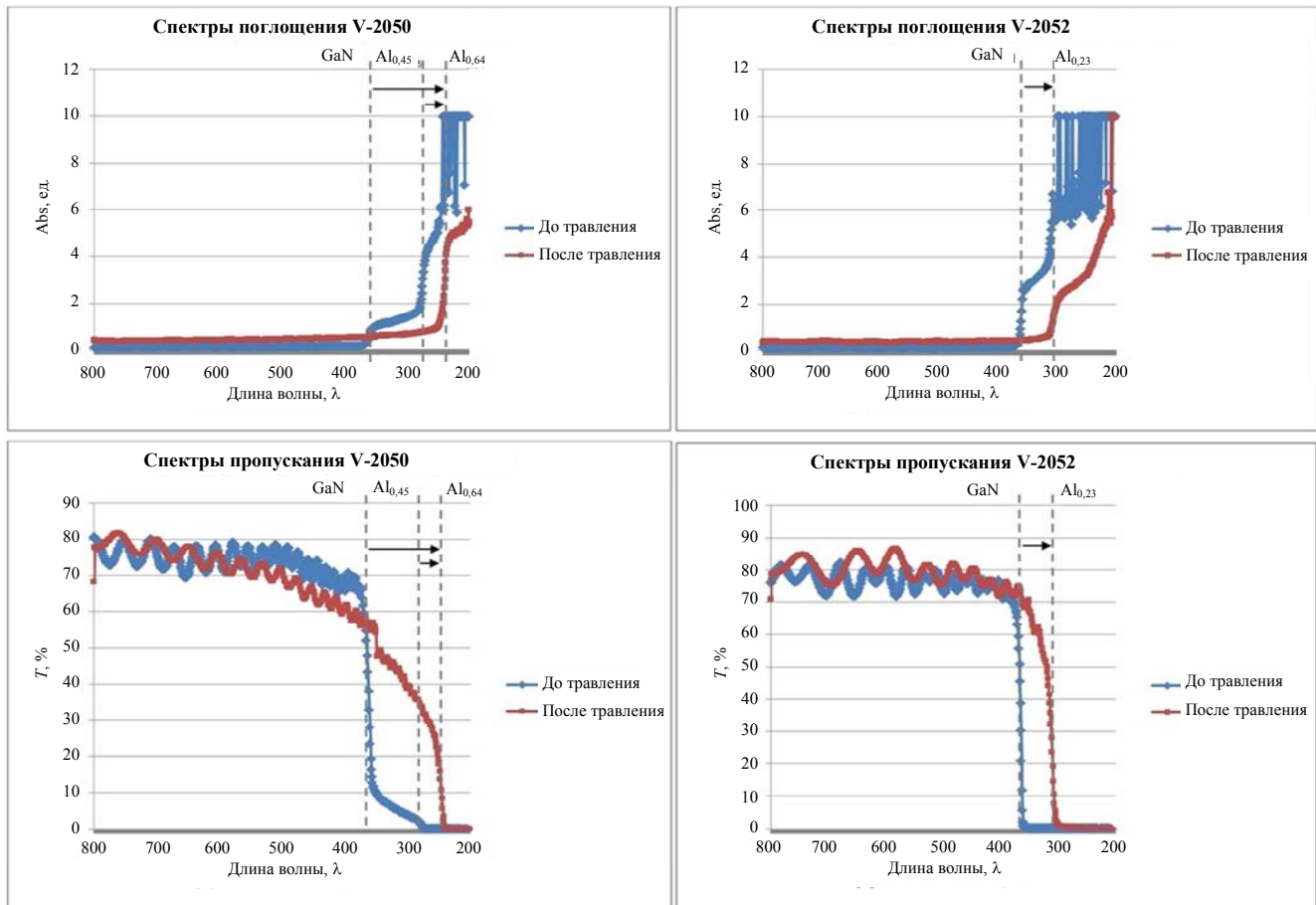


Рис. 4. Спектры поглощения (верхние графики) и пропускания (нижние графики) для структур V-2052 (BC) и V-2050 (CC)

По оси ординат отложены значения величин:  $Abs = \log_{10} \left( \frac{\Phi_o}{\Phi_T} \right)$ ;  $T = \frac{\Phi_T}{\Phi_o} \cdot 100\%$ , где  $\Phi_o$  — поток излучения, падающий на образец [Вт],  $\Phi_T$  — поток излучения, прошедший через образец [Вт]

### Выводы

В данной работе представлены результаты разработки метода формирования элементов матриц *p-i-n*-диодов на основе гетероэпитаксиальных структур  $Al_xGa_{1-x}N$ .

Разделение элементов матриц формата 320×256 с шагом 30 мкм осуществлялось ионно-лучевым травлением через маску фоторезиста в потоке ионов аргона, создаваемого источником Кауфмана, в вакуумной установке. Для определения необходимой глубины травления использовались методы контактной профилометрии и ультрафиолетовой спектрофотометрии, что позволило определить положение *n*-слоя и достаточную глубину травления образца. Погрешность толщин функциональных слоев ГЭС, указанных в сертификатах производителей, не превышала 28 %.

В результате проведенных измерений определены скорости ионно-лучевого травления слоев  $Al_xGa_{1-x}N$  с различным составом, что позволяет

определить условия оптимального окончания процесса травления эпитаксиальных слоев.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации НШ-2787.2014.9

### ЛИТЕРАТУРА

1. Филачёв А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотозлектроника. — М., Физматкнига, 2011.
2. Болтарь К. О., Чинарева И. В., Седнев М. В. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 4. С. 488.
3. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Филачёв А. М. и др. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 54.
4. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Яковлева Н. И. и др. // Успехи прикладной физики. 2013 Т. 1. № 3. С. 346.
5. Болтарь К. О., Седнев М. В., Смирнов Д. В. и др. Способ травления меза-элементов на основе эпитаксиальных *p-i-n* структур  $GaN/Al_xGa_{1-x}N$ . Заявка № 2014147928 от 27.12.2014.
6. Болтарь К. О., Зубкова Е. Н., Иродов Н. А. и др. // Прикладная физика. 2013. № 4. С. 5.
7. Болтарь К. О., Таубкин И. И., Седнев М. В. и др. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 72.

8. Болтарь К. О., Седнев М. В., Шаронов Ю. П. и др. // Прикладная физика. 2014. № 4. С. 51.  
9. Дудин С. В. // ФТП. 2006. Т. 4. № 1–2. С. 121.

10. Reine M. B. et al. // Proc. SPIE. 2006. V. 6119. P. 611901-2.  
11. John J. et al. // Proc. SPIE. 2007. V. 6585. P. 658505-2.

## Research of characteristics mesa structures of the matrixes of $p-i-n$ diodes based on the $Al_xGa_{1-x}N$ heteroepitaxial structures

*D. V. Smirnov<sup>1</sup>, K. O. Boltar<sup>1,2</sup>, M. V. Sednev<sup>1</sup>, and Y. P. Sharonov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Orion R&P Association, Inc.  
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology  
9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

Received July 1, 2015

*Mesa elements of the matrix  $p-i-n$  diodes based on  $Al_xGa_{1-x}N$  heteroepitaxial structures, grown by molecular beam (MBE) and metalorganic (ISO) epitaxy, have been formed. Separating of elements of the arrays format  $320 \times 256$  with pitch 30 micron is carried out by ion-beam etching through a mask of the photoresist in a stream of argon ions produced by the source Kaufman, in the vacuum system. To determine the required depth of the etching techniques, use is made of contact profilometry and ultraviolet spectrophotometry, allowing to determine the position of the  $n$ -layer and a sufficient depth of etching the sample. Accuracy thicknesses of functional layers HES specified in certificates of manufacturers does not exceed 28 %. The rates of ion-beam etching  $Al_xGa_{1-x}N$  layers with different composition have been defined.*

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw, 42.25.

*Keywords:*  $Al_xGa_{1-x}N$ , GaN, heteroepitaxial structures,  $p-i-n$  photodiode, ion-beam etching, visible-blind sub-band, solar-blind sub-band, cut off (cut on) edge.

### REFERENCES

1. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Photodiodes*. (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
2. K. O. Boltar, I. V. Chinareva, and M. V. Sednev, *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 488 (2013).
3. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, A. M. Filachev, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 54 (2013).
4. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, N. I. Iakovleva, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 346 (2013).
5. K. O. Boltar, M. V. Sednev, D. V. Smirnov, et al., RF Patent Application No. 2014147928 of December 27, 2014.
6. K. O. Boltar, E. N. Zubkova, N. A. Irodov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 5 (2013).
7. K. O. Boltar, I. I. Taubkin, M. V. Sednev, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 72 (2013).
8. K. O. Boltar, M. V. Sednev, Yu. P. Sharonov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 51 (2014).
9. S. V. Dudin, *Semiconductors* **4**, 121 (2006).
10. M. B. Reine et al., *Proc. SPIE* **6119**, 611901-2 (2006).
11. J. John et al., *Proc. SPIE* **6585**, 658505-2 (2007).