

УДК 621.315.5:621.383

## Исследование скорости ионно-лучевого травления гетероэпитаксиальных структур $\text{GaN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

К.О. Болтарь, Е.Н. Зубкова, Н.А. Иродов, М.В. Седнев, Д.В. Смирнов, Ю.П. Шаронов

*Представлены результаты измерения скорости ионно-лучевого травления гетероэпитаксиальных структур  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  (ГС), различных сочетаний слоевых конфигураций, выращенных на подложках  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (0001) методами МОС-гидридной или молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).*

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

*Ключевые слова:* AlGaN, ионное травление,  $p-i-n$ -фотодиоды, ультрафиолетовые фотодиоды, молекулярно-лучевая эпитаксия, МОС-гидридная эпитаксия.

### Введение

Перспективным направлением развития современной микрофотоэлектроники является разработка крупноформатных матриц фоточувствительных элементов ультрафиолетового диапазона спектра на основе гетероэпитаксиальных  $p-i-n$ -структур  $\text{GaN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  [1]. Размеры отдельных элементов (пикселей) в матрицах фоточувствительных элементов ультрафиолетовых фотоприемных устройств формата  $320 \times 256$ ,  $640 \times 512$  и более составляют  $10 \times 10 - 30 \times 30$  мкм [2–6]. Суммарная толщина функциональных слоев  $p-i-n$ -структур составляет 1–2 мкм.

Для изготовления фоточувствительных элементов используется мезотехнология. Основным инструментом для формирования единичных фотодиодов в матрицах являются методы «сухого» ионного травления: реактивное ионное травление, в т.ч. с применением высокоплотной индуктивно-связанной плазмы, высокочастотное катодное и ионно-лучевое травление ионами инертных газов. Применение методов «сухого» ионного травления обусловлено химической инертностью соединений GaN и  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  и необходимостью

разделения фоточувствительных пикселей на глубину залегания  $n+$ -слоя [5–7].

Очевидно, что при разработке технологии изготовления фоточувствительных элементов скорость травления является важным параметром. Целью данной работы было исследование скорости ионно-лучевого травления гетероэпитаксиальных структур  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  (ГС), различных сочетаний слоевых конфигураций, выращенных на подложках  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (0001) методами МОС-гидридной или молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).

### Техника эксперимента и архитектура гетероструктур

Исследование скорости ионно-лучевого травления выполнено на гетероэпитаксиальных структурах  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  с различным сочетанием слоевых конфигураций, выращенных на подложках  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (0001) методами МОС-гидридной или молекулярно-лучевой эпитаксии. Архитектура, состав и толщины слоев ГС AlGaN для видимослепых (BC) и солнечно-слепых (CC)  $p-i-n$ -фотоприемников представлены в таблице (данные предоставлены поставщиками ГС).

Ионное травление ГС осуществляли в вакуумной установке в потоке ионов аргона, создаваемого источником Кауфмана. Обрабатываемые пластины с ГС находились на охлаждаемом подложкодержателе при температуре 15–20 °С. Режимы ионного травления выбирались из условия приемлемой скорости травления, отсутствия глубоких повреждений структур и маски фоторезиста.

Для определения скорости ионно-лучевого травления измеряли высоты «ступенек», образовавшихся в результате травления поверхности гетероструктур через маску за определенные промежутки времени при постоянных параметрах

Болтарь Константин Олегович, начальник НТК<sup>1</sup>, профессор<sup>2</sup>.

Зубкова Елена Николаевна<sup>1</sup>, инженер-технолог НТК.

Иродов Никита Александрович<sup>1</sup>, инженер НТК.

Седнев Михаил Васильевич<sup>1</sup>, начальник участка НТК.

Смирнов Дмитрий Валентинович<sup>1</sup>, инженер НТК.

Шаронов Юрий Павлович<sup>1</sup>, вед. инженер-технолог НТК.

<sup>1</sup>ОАО «НПО «Орион»».

Россия, 111396, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.

Тел.: (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 30 сентября 2013 г.

© Болтарь К.О., Зубкова Е.Н., Иродов Н.А., Седнев М.В., Смирнов Д.В., Шаронов Ю.П., 2013

Параметры ГС, предоставленные поставщиками

№ структуры, метод эпитаксии	Тип структуры состав фильтр	Толщина слоя, нм	Уровень легирования в конт. слоях: р/п	Подложка, буфер
831, молекулярно-лучевая	CC,	250	8×10 <sup>16</sup> 5×10 <sup>17</sup>	Сапфир 430 мкм, AlN –200 нм
	p-GaN-	225		
	p <sub>i</sub> -Al <sub>0,45</sub> Ga <sub>0,55</sub> N	215		
	n <sub>i</sub> -Al <sub>0,45</sub> Ga <sub>0,55</sub> N	520		
833, молекулярно-лучевая	BC,	260	1×10 <sup>17</sup> 3×10 <sup>19</sup>	Сапфир 430 мкм, AlN-250 нм
	p <sup>+</sup> GaN-	225		
	n <sub>i</sub> GaN	495		
	n <sup>+</sup> GaN			
V-1892, МОС-гидрид	BC	215	(1–2) ×10 <sup>18</sup> (1–5) ×10 <sup>17</sup> 3×10 <sup>18</sup>	Сапфир 430 мкм, AlN/AlGaN-сверхрешетка, Al <sub>0,45</sub> Ga <sub>0,55</sub> N, Al <sub>0,6</sub> Ga <sub>0,4</sub> N
	p <sup>+</sup> -GaN	330		
	p-GaN	370		
	n <sub>i</sub> — GaN	820		
	n <sup>+</sup> -Al <sub>0,25</sub> Ga <sub>0,75</sub> N			
V-1893, МОС-гидрид	CC,	290	(1–2) ×10 <sup>18</sup> 1×10 <sup>17</sup> 3×10 <sup>18</sup>	Сапфир 430 мкм, AlN-сверхрешетка AlN/ AlGaN- Al <sub>0,45</sub> Ga <sub>0,55</sub> N Al <sub>0,6</sub> Ga <sub>0,4</sub> N
	p <sup>+</sup> -GaN-	200		
	p-Al <sub>0,45</sub> Ga <sub>0,55</sub> N-	200		
	n <sub>i</sub> -Al <sub>0,45</sub> Ga <sub>0,55</sub> N-	710		
	n <sup>+</sup> GaN -Al <sub>0,65</sub> Ga <sub>0,35</sub> N			

ионного пучка. Маскирование выполнялось при помощи сапфирового диска. Последовательно, после каждого травления, измеряли полученную «ступеньку» на контактном профилометре Dektak XT Bruker, маскировали следующий участок, и возобновляли процесс ионно-лучевого травления. Скорость травления вычисляли по отношению измеренной высоты ступеньки ко времени воздействия потока ионов аргона.

### Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены результаты измерений глубины синхронного травления слоев GaN при

постоянных параметрах ионного пучка на гетероэпитаксиальных структурах № 833 и № V-1892 (см. таблицу). Эти структуры выращены молекулярно-лучевой и МОС-гидридной эпитаксией, соответственно. Глубина травления линейно и одинаково возрастает со временем для обоих образцов. Скорость травления составляет 18 нм/мин.

На рис. 2 представлены результаты измерения глубины ионно-лучевого травления гетероэпитаксиальных структур GaN/Al<sub>0,45</sub>Ga<sub>0,55</sub>N/Al<sub>0,65</sub>Ga<sub>0,35</sub>N (№ 831) и GaN/Al<sub>0,45</sub>Ga<sub>0,55</sub>N /Al<sub>0,6</sub>Ga<sub>0,4</sub> (V-1893) (см. таблицу). Глубина травления монотонно возрастает с увеличением времени травления. При

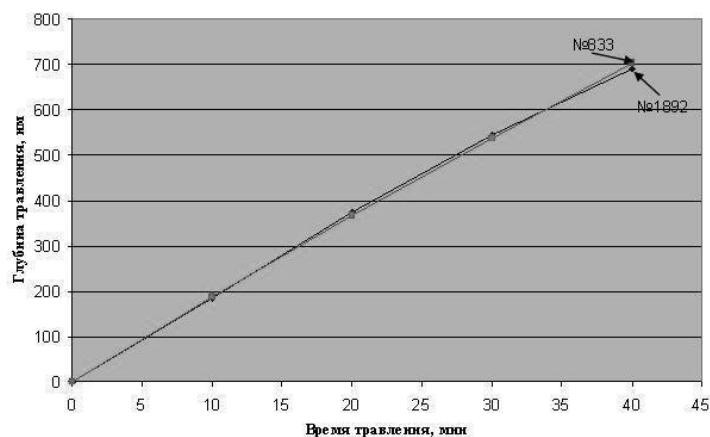


Рис. 1. Изменение глубины синхронного ионно-лучевого травления гетероэпитаксиальных структур GaN/Al<sub>0,45</sub>Ga<sub>0,55</sub>N /Al<sub>0,65</sub>Ga<sub>0,35</sub>N (№ 831) и GaN/Al<sub>0,45</sub>Ga<sub>0,55</sub>N /Al<sub>0,6</sub>Ga<sub>0,4</sub> (V-1892) от времени травления ионами аргона при постоянных параметрах ионного пучка.

этом из рис. 2 видно, что зависимость глубины от времени травления можно аппроксимировать линейными участками. Точки пересечения аппроксимирующих прямых дают значения границы слоя с постоянным составом. У образцов № 831 и V-1893 при травлении GaN эти величины дают, практически, одинаковые значения 200 нм, что на 20–30% меньше, чем указанные в таблице данные производителей ГС. Толщина слоя с содержанием алюминия  $x = 0,45$  составляет 330 нм и 300 нм у образцов № 831 и V-1893, соответственно. Сравнение спектров поглощения, измеренных до и после травления слоя, удаляемого с постоянной скоростью, подтверждает отсутствие слоя этого состава.

Изменение глубины от времени ионно-лучевого травления гетероэпитаксиальных слоев постоянного состава GaN,  $Al_{0,25}Ga_{0,75}N$ ,  $Al_{0,45}Ga_{0,55}N$  представлено на рис. 3. Наклоны зависимостей глубины от времени дают значения скоростей ионно-лучевого травления слоя Al Ga<sub>x</sub> N посто-

янного состава  $x$ . Скорости травления ГС составов  $x = 0$ ;  $x = 0,25$ ;  $x = 0,45$  равны 18, 8,3 и 4,3 нм/мин, соответственно.

Из полученных экспериментальных результатов определены скорости ионно-лучевого травления ионами аргона эпитаксиальных слоев GaN и  $Al_xGa_{1-x}N$  с молярной долей алюминия  $x = 0; 0,1; 0,25; 0,45; 0,65$ . и зависимость скорости травления от состава.

Зависимость скорости травления  $Al_xGa_{1-x}N$  ионами Ar энергией ~1кэВ и плотностью тока 0,2 мА/см<sup>2</sup> от состава показана на рис. 4. Скорость травления существенно уменьшается с увеличением содержания мольной доли алюминия в эпитаксиальном слое.

### Заключение

В пределах ошибки метода измерения при синхронном травлении ГС не обнаружено различия скоростей травления слоев  $Al_xGa_{1-x}N$  одинакового

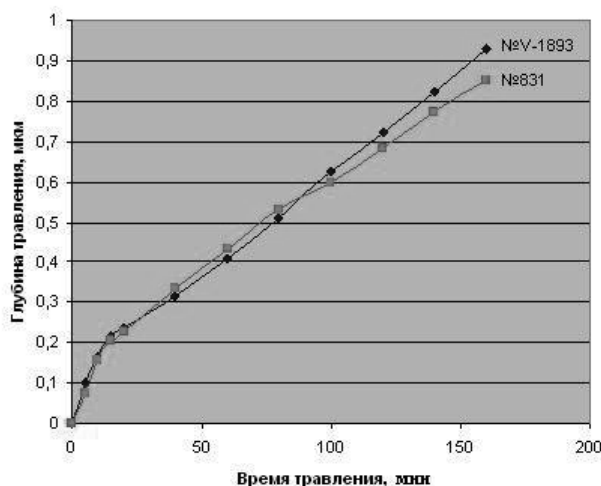


Рис. 2. Изменение глубины ионно-лучевого травления гетероэпитаксиальной структуры GaN /  $Al_{0,45}Ga_{0,55}N$  /  $Al_{0,65}Ga_{0,35}N$  (№ 831) и GaN /  $Al_{0,45}Ga_{0,55}N$  /  $Al_{0,6}Ga_{0,4}$  (V-1893) от времени травления ионами аргона при постоянных параметрах ионного пучка.

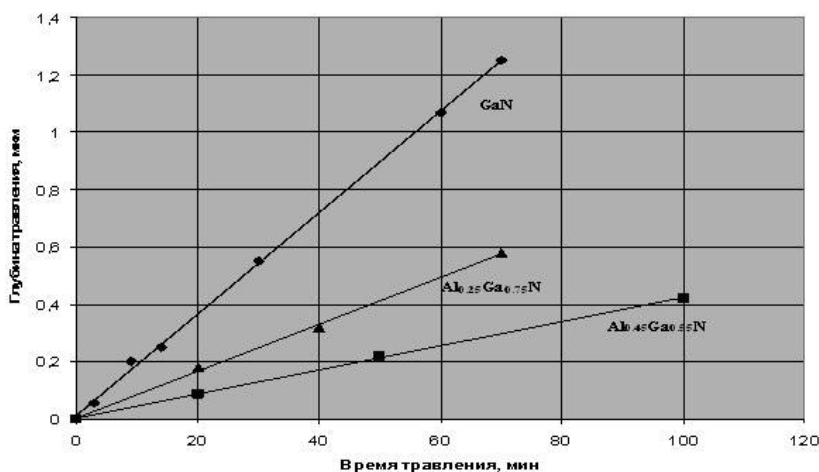


Рис. 3. Изменение глубины ионно-лучевого травления, за определенные промежутки времени при постоянных параметрах ионного пучка, гетероэпитаксиальных слоев GaN/ $Al_xGa_{1-x}N$  с различной мольной долей алюминия

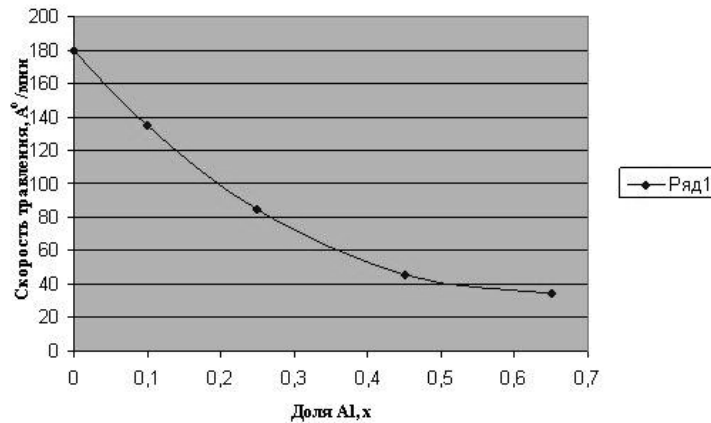


Рис. 4. Зависимость скорости травления  $Al_xGa_{1-x}N$  от состава. Энергия ионов Ar — 1Кэв, плотность тока — 0,2 мА/см<sup>2</sup>.

состава, выращенных методами молекулярно-лучевой и МОС-гидридной эпитаксии.

Скорость ионно-лучевого травления ионами аргона эпитаксиальных слоев  $Al_xGa_{1-x}N$  уменьшается с увеличением содержания мольной доли алюминия в эпитаксиальном слое почти на порядок при изменении молярной доли алюминия от 0 до 0,65. Это обстоятельство создает определенные затруднения для определения момента окончания процесса травления при формировании  $p-i-n$ -фотодиодов по мезотехнологии и повышает требования к определению состава и толщин ГС.

#### Литература

1. Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. —М.: Физматкнига, 2011.

2. Аверин С.В., Кузнецов П.И., Житов В.А. и др. // ЖТФ, 2011. Т. 81. № 2. С. 138

3. Бурлаков И.Д., Болтарь К.О., Яковлева Н.И., и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 344

4. D. Hofstetter et al. // Electronics Letters. 2008. V. 44. No. 16. P. 986

5. Болтарь К.О., Чинарева И.В., Седнев М.В., и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 4. С. 488

6. M.V.Reine et al. // Proc. of SPIE. 2006. V. 6119. P. 611901–1

7. Chen Jie, Xu Jintong, Wang Ling et al. // Proc. of SPIE. V. 6621. P. 62211D-1

## Research of speed of ionic-beam etching heterostructures $GaN/Al_xGa_{1-x}N$

K.O. Boltar<sup>1,2</sup>, J.P. Sharonov<sup>1</sup>, M.V. Sednev<sup>1</sup>, D.V. Smirnov<sup>1</sup>, E.N. Zubkova<sup>1</sup>, and N.A. Irodov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Orion R&P Association

46/2, Enthusiastov sh., Moscow, 111123, Russia

E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology,

9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

**Results of measurement of speed of ionic-beam etching heterostructures  $Al_xGa_{1-x}N$  (ГС), various combinations слоевых the configurations formed on substrates  $\alpha-Al_2O_3$  (0001) methods MOVPE or molecular-beam epitaxy are presented.**

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

Keywords: AlGa<sub>x</sub>N, solar-blind photodiodes,  $p-i-n$  photodiodes, ultra-violet photodiodes, MOVPE, MBE.