

УДК 621.315.5

## Ионно-лучевое травление для формирования мезаструктур МФПУ

М. В. Седнев, К. О. Болтарь, Ю. П. Шаронов, А. А. Лопухин

*Представлены результаты исследований профилей, формируемых ионно-лучевым травлением полупроводниковых структур через маску, изготовленную методами фотолитографии. Минимальные размеры областей, незащищенных маской на двух исследованных структурах были равны: 2 и 5 мкм соответственно. Показано, что скорость травления падает с уменьшением ширины свободного от маски промежутка. Эффект отражения ионного пучка от вертикальных стенок, формируемых при травлении, может быть использован для изготовления субмикронных разделяющих мезаобластей.*

PACS: 85.60.-q

**Ключевые слова:** МФПУ, ионно-лучевое травление, гетероэпитаксиальные структуры, микрофотоэлектроника.

### Введение

В последнее время обозначилась тенденция ко все более расширяющемуся использованию гетероэпитаксиальных структур на основе соединений III и V групп для решения задач микрофотоэлектроники. Актуальной задачей является создание матричных фотоприемных устройств (МФПУ) ультрафиолетового и ближнего инфракрасного диапазонов спектра на эпитаксиальных слоях  $Ga_xAl_{1-x}N/Al_2O_3$ ,  $In_xGa_{1-x}As/InP$  мегапиксельного формата [1, 2].

МФПУ на основе мезаструктур привлекательны малой фотоэлектрической взаимосвязью соседних пикселей, поскольку объемы, генерирующие фототок, разделены (см. рис. 1). Это достоинство приборов на основе фотодиодных мезаструктур особенно очевидно при использовании технологии перевернутого кристалла (освещение со стороны подложки), так как отражение принимаемого излучения от поверхности V-образных канавок, формирующих фоточувствительные пиксели, может улучшать пороговые характеристики МФПУ.

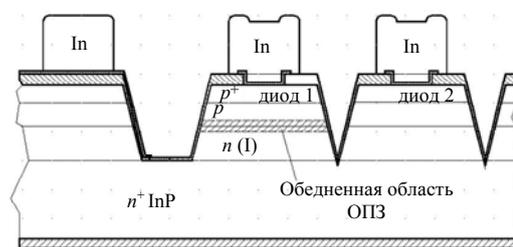


Рис. 1. Схематическое изображение фрагмента фотодиодных матричных структур

Заметим, что широкие канавки могут уменьшить фоточувствительную площадь пикселя.

Разработку мезатехнологии сдерживает ряд технологических проблем, одной из которых является получение разделяющих канавок необходимой глубины с минимальной шириной.

Целью данной работы являлось исследование профилей, формируемых ионно-лучевым травлением полупроводниковых структур через маску, изготовленную методами фотолитографии для совершенствования процесса изготовления мезаструктур.

### Анализ процессов травления

При жидкостном травлении эпитаксиального слоя через маску фоторезиста процесс растворения идет изотропно. Поэтому минимальное расстояние между пикселями обычно превышает толщину функционального эпитаксиального слоя, необходимого для формирования элементов фотоприемной матрицы. Толщина этого слоя определена длиной поглощения регистрируемого излучения и может составлять величину от долей до нескольких микрометров. Например, толщина функционального слоя эпитаксиальных структур, используемых для изготовления фотоприемников (ФП) на диапазон спектра 1—3 мкм, составляет 2—5 мкм. Формирование мезаструктур жидкост-

Седнев Михаил Васильевич, начальник участка<sup>1</sup>.  
 Болтарь Константин Олегович, начальник НТК<sup>1</sup>, профессор<sup>2</sup>.  
 Шаронов Юрий Павлович, ведущий инженер<sup>1</sup>.  
 Лопухин Алексей Алексеевич, начальник участка<sup>1</sup>.  
<sup>1</sup>ОАО «НПО «Орион».  
 Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.  
 Тел. (499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru  
<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет).  
 Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 15 июля 2014 г.

© Седнев М. В., Болтарь К. О., Шаронов Ю. П., Лопухин А. А., 2014

ным травлением может значительно уменьшить фоточувствительную площадь пикселя. Например, при шаге 15 мкм и глубине травления 3 мкм «растр» составит, как минимум, 6 мкм, вследствие чего уменьшение составит не менее  $(15 \cdot 15 - 9 \cdot 9) / 15 \cdot 15 = 0,64$  площади пикселя. Другими словами, теряется почти две трети падающего излучения.

Метод травления ионами инертного газа позволяет воспроизводить с прецизионной точностью размеры маски, нанесенной на поверхность любого материала [3, 4]. При этом процесс травления идет анизотропно в направлении падения ионов рабочего газа. Однако травление на значительную глубину сопровождается уменьшением площади маски вследствие клиновидной формы периметра (пологость края) и соответствующего ее распыления, что приводит к увеличению размера разделяющей канавки и уменьшению фоточувствительной площади, но в значительно меньшей степени, чем при жидкостном травлении. Этим эффектом можно пренебречь, если скорость ионного травления материала значительно больше скорости травления маски и профиль края маски близок к вертикальному [4—7].

Недостатками ионного травления являются образование радиационных повреждений решетки поверхностных слоев и возможность осаждения распыляемых атомов на вертикальные стенки формируемой структуры. Это может приводить к образованию слоя, шунтирующего  $p-i-n$ -переход. Сочетание ионного и химического травления позволяет получать приемлемые результаты при разработке технологии формирования мезаструктур [5, 7].

### Техника эксперимента

Исследование профилей полупроводниковых структур, сформированных ионно-лучевым травлением через маску, изготовленную методами фотолитографии, осуществлялось на конфокальном и контактном профилометрах. Для формирования профилей были использованы полупроводниковые материалы с различными скоростями ионного травления. Травление выполнялось ионами аргона, параметры ионного пучка были постоянными во всех экспериментах. Минимальные размеры областей, незащищенных маской, на исследованных структурах равны 2 мкм. В исследованиях были использованы структуры с плоской поверхностью и с островками напыленной металлизации толщиной 0,15—0,2 мкм и площадью  $10 \cdot 10$  мкм<sup>2</sup>.

### Экспериментальные результаты

Ионные методы травления для формирования элементов МФПУ позволяют уменьшить раз-

меры топологических элементов. Важнейшими параметрами процесса ионного травления являются скорость распыления материала и скорость распыления защитной маски, формирующей элементы топологии [4, 10]. Измерение профилей травления позволило определить скорости травления ряда материалов, которые представлены в таблице.

Таблица

*Скорости ионно-лучевого травления различных материалов ионами аргона с постоянными значениями параметров ионного пучка*

| Материал                                      | Скорость травления, нм/мин | Толщина функционального слоя, мкм |
|---|----------------------------|-----------------------------------|
| GaN   | 20                         | 0,3—1,0                           |
| Ga <sub>x</sub> Al <sub>1-x</sub> N, x = 0,25 | 7                          | 0,4—0,6                           |
| x = 0,45                                      | 4,6                        | 0,3—0,4                           |
| x = 0,6                                       | 3,3                        | 0,2—0,3                           |
| Фоторезист                                    | 10-15                      | 1,0—4,0                           |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (сапфир)       | 2,6                        |                                   |
| InP   | 37                         | 1,0—3,0                           |
| In <sub>0,53</sub> Ga <sub>0,47</sub> As      | 48                         | 2,0—3,0                           |
| In  | 83                         | 2,0—10,0                          |
| Mo  | 5,3                        | 0,03—0,10                         |
| Au  | 30                         | 0,03—0,10                         |
| Ni  | 12,5                       | 0,03—0,10                         |

Наиболее эффективными материалами для изготовления масок являются пленки с малым коэффициентом распыления. Согласно данным, представленным в таблице, к ним относятся окись алюминия, молибден, титан и др. По ряду причин технического и экономического характера наиболее часто для маскирования поверхности при ионном травлении применяется фоторезист. Этот выбор определен относительной простотой формирования защитной маски достаточной толщины.

Типичные профилограммы мезаструктур матриц  $p-i-n$ -фотодиодов с шагом 30 мкм на основе ГЭС In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/InP показаны на рис. 2. Минимальные размеры областей, незащищенных маской на двух исследованных структурах были равны 2 мкм на одной (рис. 2, а, в) и 5 мкм на другой (рис. 2, б, г). Измерение профилей выполнялось непосредственно после травления без удаления остатков маски. Травление выполнено на глубину около 4 мкм. Из рис. 2, в видно, что ионное травление в двухмикронном промежутке идет медленнее, чем на других участках, незащищенных фоторезистом. При этом скорость травления падает с уменьшением ширины свободного от маски промежутка, что следует из сравнения профилограмм, представленных на рис. 2, в и 2, г.

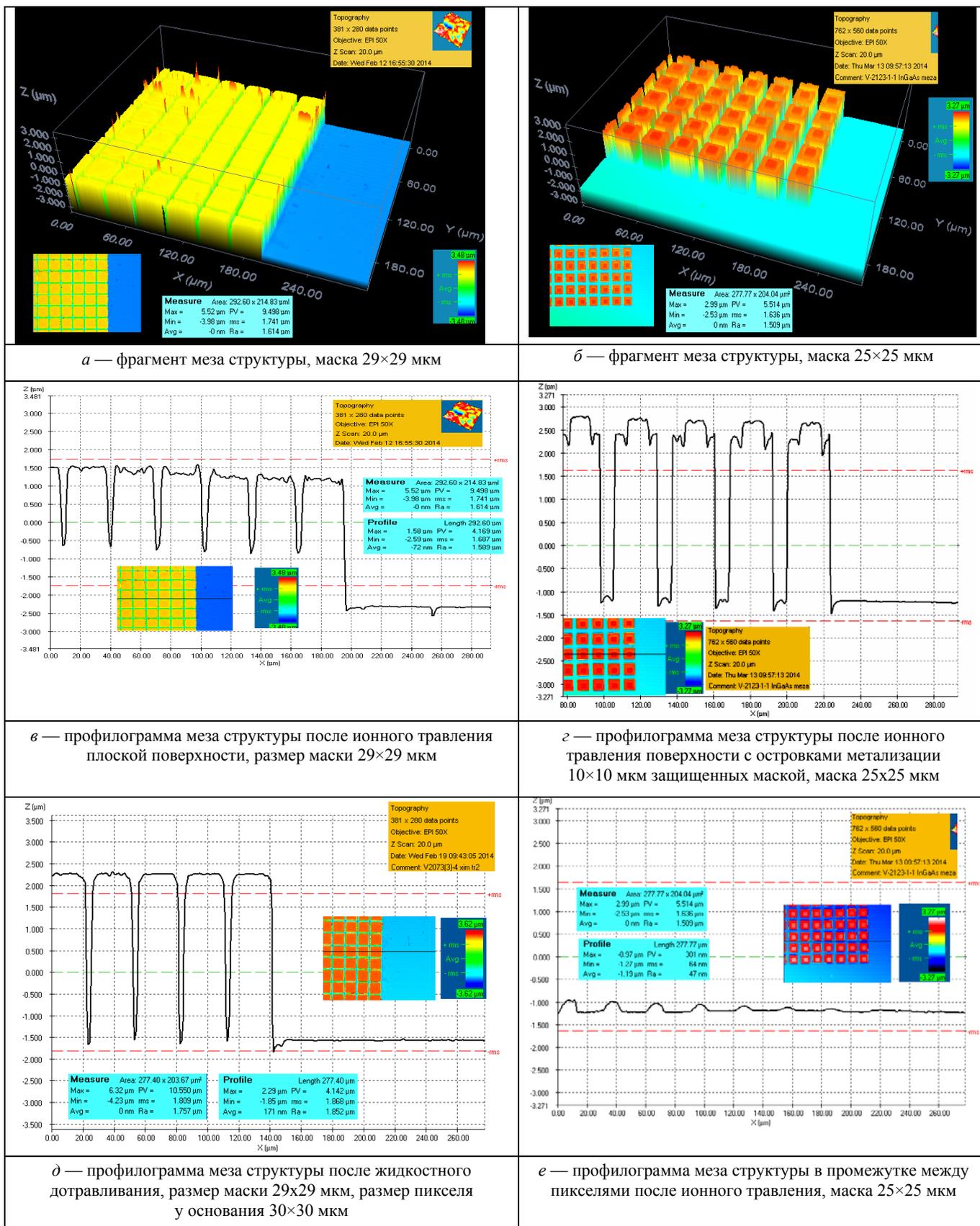


Рис. 2. Формирование мезаструктур ионным травлением

На представленных профилях видны характерные для ионного травления особенности, которые можно описать следующим образом.

– Ускоренное травление поверхности, прилегающей к проекции маски, что обусловлено действием суммы потоков ионов, облучающих

поверхность нормально и отраженных от стенок, формируемых в процессе травления элементов [4—7]. Поэтому форма поверхности дна канавок, образующихся в процессе травления, зависит от ширины участка, открытого для травления. Профилограмма поверхности структуры в промежутке между пикселями после ионного травления представлена на рис. 2, *e*, маска  $25 \times 25$  мкм (ширина открытого участка 5 мкм). По этой же причине необходимо при расчете времени травления закладывать большую толщину маски (см. рис 2, *b*).

– Осаждение распыляемых атомов и их соединений на вертикальные стенки и край маски в процессе травления изменяет профиль маски (см. рис. 2, *b* и 2, *e*). Инородные частицы на краях маски приводят к появлению выступов значительной высоты (рис. 2, *a*).

На рис. 2, *d* показана профилограмма мезаструктуры после жидкостного травления профиля, полученного ионным травлением и удаления остатков маски фоторезиста, размер маски  $29 \times 29$  мкм. Длина плоского участка вершины пикселя составляет 20 мкм. Это на 9 мкм меньше длины ребра квадрата маски до травления. Химическим травлением было удалено 2 мкм на сторону.

Из полученных результатов можно оценить изменение размеров маски в процессе ионного травления. Эта величина составляет  $0,5 \cdot (29 - 20 - 4)$  мкм = 2,5 мкм на сторону. В тоже время образовавшаяся в результате травления V-образная канавка позволяет «изолировать» пиксели без потери фоточувствительной площади.

### Заключение

Экспериментально показано, что применение ионно-лучевого травления для изготовления матриц фоточувствительных элементов через маску фоторезиста позволяет формировать мезаэлементы в функциональных слоях гетероэпитаксиальных структур  $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  с шагом до 30 мкм [9—11]. Одновременно подтвер-

ждены возможности данного метода для создания матриц мега-пиксельного формата.

При уменьшении ширины свободного от маски промежутка до размера толщины фоторезиста скорость травления в зазоре снижается относительно скорости распыления свободной от маски поверхности, что, по-видимому, является следствием осаждения распыляемых атомов и их соединений на вертикальные стенки и, соответственно, изменения профиля маски в процессе травления.

Таким образом, сочетание ионного и жидкостного травления позволяет получать приемлемые результаты при формировании мезаструктур МФПУ.

Работа выполнена по гранту Президента  
Российской Федерации НШ-2787.2014.9.

### Литература

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Современное состояние и магистральные направления развития твердотельной фотозлектроники. — М.: Физматкнига, 2011.
2. Дирочка А. И., Курбатов Л. Н. Фотозлектроника. Базовые лекции по электронике. Т. 2. Твердотельная электроника. — М.: Техносфера, 2009.
3. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Седнев М. В. // Прикладная физика. 2007. № 5. С. 58.
4. Per G. Gloersen // J. Vac. Sci. Technol. 1975. V. 12. Jan./Feb. P. 28.
5. Болтарь К. О., Корнеева М. Д., Мезин Ю. С., Седнев М. В. // Прикладная физика. 2011. № 1. С. 96.
6. Ивановский Г. Ф., Петров В. И. Ионно-плазменная обработка материалов. — М.: Радио и связь, 1986.
7. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Седнев М. В. Патент РФ № 2308788 от 20.01.06. Способ сборки фотоприемного устройства.
8. Болтарь К. О., Таубкин И. И., Седнев М. В., и др. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 71.
9. Болтарь К. О., Яковлева Н. И., Кравченко Н. В. и др. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 61.
10. Седнев М. В., Зубкова Е. Н., Шаронов Ю. П. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 350.
11. Болтарь К. О., Смирнов Д. В., Савостин А. В. и др. Способ изготовления многоэлементного фотоприемника на основе эпитаксиальных структур  $\text{InGaAs}/\text{InP}$ . Заявка № 2013118764 от 24.04.13.

## Effects of ion-beam etching at formation of mesa-structures with submicron size

M. V. Sednev<sup>1</sup>, K. O. Boltar<sup>1,2</sup>, Y. P. Sharonov<sup>1</sup> and A. A. Lopukhin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Orion R&P Association, Inc.  
46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (State University)  
9 Institute al., Dolgoprudnyi, Moscow Region, 141700, Russia

Received July 15, 2014

*The research results of ion-beam etching semiconductor structures profiles are presented. The etching carried out through photolithographic mask. The minimum sizes free from mask areas on two investigated structures were 2 microns on one and 5 microns on another. It is shown that etching speed falls with reduction of free from mask space. The ion-beam reflection from vertical walls formed during etching may be used for manufacturing of submicron separating meza areas.*

PACS: 85.60.-q

*Keywords:* FPA, ion-beam etching, heteroepitaxial structures, microphotoelectronics.

### References

1. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *The Current Status and Main-Line Trackage for Development of Photoelectronics* (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
2. A. I. Dirochka and L. N. Kurbatov, *Photoelectronics. Solid State Electronics* (Tekhnosfera, Moscow, 2009) [in Russian].
3. I. D. Burlakov, K. O. Boltar, and M. V. Sednev, *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 58 (2007).
4. Per G. Gloersen, *J. Vac. Sci. Technol.* **12**, 28 (1975).
5. K. O. Boltar, M. D. Korneeva, Yu. S. Mezin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 96 (2011).
6. G. F. Ivanovsky and V. I. Petrov, *Ion-Plasma Treatment of Materials* (Radio i Svyaz', Moscow, 1986) [in Russian].
7. I. D. Burlakov, K. O. Boltar, and M. V. Sednev, RF Patent No. 2308788.
8. K. O. Boltar, I. I. Taubkin, M. V. Sednev, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 71 (2013).
9. K. O. Boltar, N. I. Yakovleva, N. V. Kravchenko, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 61 (2013).
10. M. V. Sednev, E. N. Zubkova, and Yu. P. Sharonov, *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 350 (2013).
11. K. O. Boltar, D. V. Smirnov, A. V. Savostin, et al., Invention Application No. 2013118764, April 24, 2013.