

УДК 621.315

PACS: 85.60.-q

Исследование скорости травления *nVp*-гетероструктур на основе InGaAs

Н. С. Трухачева, М. В. Седнев, А. В. Трухачев, Э. А. Макарова, К. В. Наумова

В статье представлены результаты исследования влияния глубины химического травления на ВАХ элементов в матрицах ФЧЭ коротковолнового ИК-диапазона формата 320×256 с шагом 30 мкм, изготовленных на основе гетероэпитаксиальных структур с поглощающим слоем InGaAs. Матрицы ФЧЭ изготовлены по мезапланарной технологии на $nV(\text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As})p$ -структурах на подложках InP. На основе проведенных исследований оптимизирован процесс травления мезы на промежуточной операции маршрута изготовления МФЧЭ, что позволяет определить глубину травления, требуемую для получения низких темновых токов и оптимальной ампер-ваттной чувствительности. Изготовлены высокоэффективные матрицы фотодиодов форматов 320×256 с шагом 30 мкм и 640×512 с шагом 15 мкм с дефектностью, не превышающей 0,5 %.

Ключевые слова: InGaAs, матрица фоточувствительных элементов, МФЧЭ, гетероэпитаксиальные структуры, ГЭС, вольт-амперная характеристика, ВАХ, темновой ток, ампер-ваттная чувствительность, химическое травление.

Введение

В последнее время обозначилась тенденция ко все более расширяющемуся использованию гетероэпитаксиальных структур на основе соединений элементов III и V групп для решения задач микрофотоэлектроники. Актуальной задачей является создание матричных фотоприемных устройств (МФПУ) ближнего инфракрасного диапазона мегапиксельного формата на эпитаксиальных слоях $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ [1–7].

Перспективным развитием применения *n-V-p*-структур для разработки технологии фотодиодов с фотоактивным слоем $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ является использование в качестве широкозонного материала слоев $\text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As}$ с согласованным периодом решетки. Нелегированный AlInAs барьерный и пассивирующий слои позволяют изолировать элементы матрицы друг от друга, не открывая поверхность InGaAs, одновременно уменьшая ток диффузии электронов [3, 4].

Целью данной работы являлось исследование влияния глубины химического травления на

вольт-амперную характеристику (ВАХ) элементов в матрицах фоточувствительных элементов (ФЧЭ) коротковолнового ИК-диапазона, имеющих формат 320×256 с шагом 30 мкм и изготовленных на основе гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) с поглощающим слоем InGaAs

Подготовка образцов и техника эксперимента

Схематическое изображение фрагмента матрицы, изготовленной по мезапланарной технологии, а также параметры исследуемых образцов представлены в табл. 1. На сильно легированном слое $p^{++}\text{-In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ фотолитографией и напылением никель-золото получали омические контакты, причем толщина металла составляла 0,18–0,22 мкм. Особенно ответственным процессом в мезапланарной технологии является процесс жидкостного травления мезаэлементов фотодиодной матрицы по фоторезистивной маске. Сложность операции состоит в необходимости прецизионного жидкостного травления слоев гетероэпитаксиальной структуры разного химического состава ($\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}-\text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As}$) на глубину около 200 нм на пластине 50,8 мм. Данная операция должна обеспечить разделение фоточувствительной структуры большой площади на отдельные фотодиоды, составляющие массив элементов матрицы. Для травления использовали раствор на основе фосфорной кислоты следующего состава: $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ (1:4:45) [4].

Трухачева Наталия Сергеевна, инженер-технолог 2 кат.
Седнев Михаил Васильевич, нач. участка, к.т.н.
Трухачев Антон Владимирович, инженер-технолог 2 кат.
Макарова Элина Алексеевна, инженер 2 кат.
Наумова Ксения Владимировна, инженер.
АО «НПО «Орион».
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.
E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 10 апреля 2018 г.

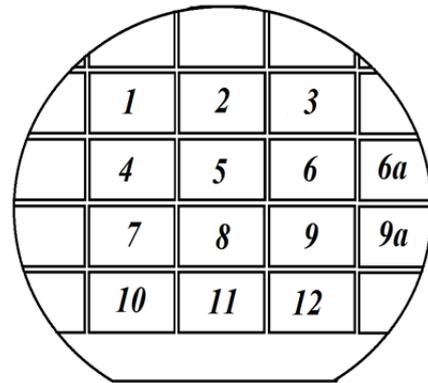
© Трухачева Н. С., Седнев М. В., Трухачев А. В., Макарова Э. А., Наумова К. В., 2018

Таблица 1

Исследуемые структуры и их характеристики

№ структуры	Тип структуры состав фильтр	Толщина слоя, нм	Уровень легирова- ния в конт. слоях: p/n	Подложка, буфер	
V-2436-3	$p^+-In_{0,53}Ga_{0,47}As:Zn$ $p-In_{0,53}Ga_{0,47}As:Zn$ $i-AlInAs$ $p-AlInAs$ $AlGaInAs$ $n^+-In_{0,53}Ga_{0,47}As$ $n-In_{0,53}Ga_{0,47}As$	54 107 107 5,4 54 5,4 1600	$1,2 \times 10^{19}$ $1,6 \times 10^{18}$ н/л $8,0 \times 10^{17}$ н/л $8,0 \times 10^{17}$ $1,0 \times 10^{16}$	$n-InP(100)$ $2-4 \times 10^{18}$ 350 мкм 51 мм, $n-InP$ $5,0 \times 10^{17}$ -буфер 340нм	

Схема расположения матриц форматов 320×256 с шагом 30 мкм и 640×512 с шагом 15 мкм на пластине диаметром 50,8 мм представлена на рис. 1. Видно, что из такой пластины можно получить 12 матриц, но при условии однородных по толщине и с требуемыми электрофизическими свойствами ГЭС, а также при выполнении всех необходимых требований технологии изготовления в соответствии с сопроводительным листом на всей полезной площади исходной пластины.



Влияние глубины травления ГЭС при формировании мезы на ВАХ элементов матриц определяли по изменению темновых токов и фототоков при увеличении длительности травления. Измерение ВАХ выполняли по методике, описанной в [3]. Измерение глубины травления осуществляли на контактном профилемере, обеспечивающим погрешность не более 2 нм.

Рис. 1. Схема расположения матриц форматов 320×256 с шагом 30 мкм и 640×512 с шагом 15 мкм на пластине диаметром 50,8 мм.

Исследование скорости травления используемых в работе многослойных ГЭС на основе $In_{0,53}Ga_{0,47}As-Al_{0,48}In_{0,52}As$ в обозначенном выше растворе фосфорной кислоты выполняли, после-

довательно измеряя ступеньку, образующуюся после травления открытого от фоторезиста, предварительно нанесенного кистью на поверхность остальной части пластины. На рис. 2 схематично показана последовательность выполнения этих операций.

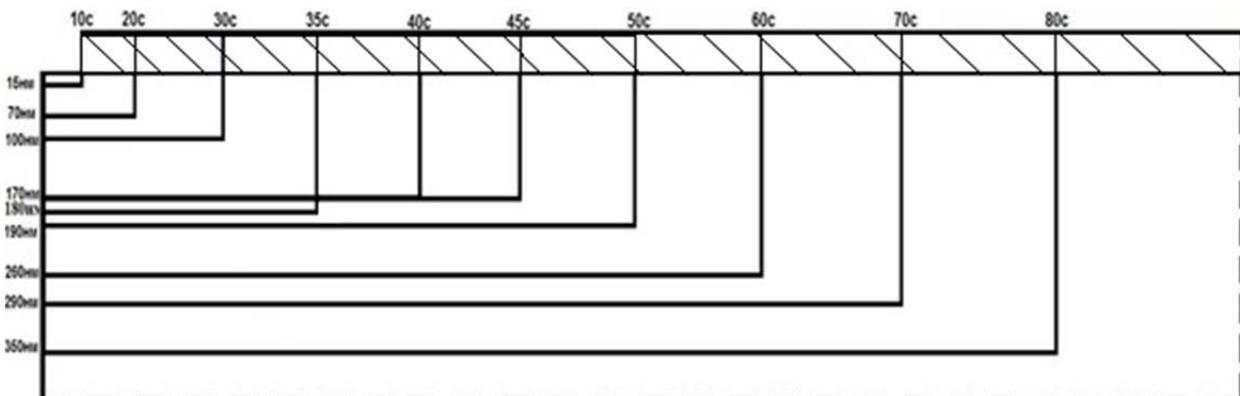


Рис. 2. Схема последовательности выполнения травления ГЭС на основе $In_{0,53}Ga_{0,47}As-Al_{0,48}In_{0,52}As$.

Экспериментальные результаты

На рис. 3 представлены типичные ВАХ отдельных элементов пяти матриц формата 320×256, измеренные после промежуточного жидкостного травления пластины с 12-ю матрицами. Номера представленных ВАХ соответствуют элементам матриц: № 5-центр, № 1 и № 2 нижних угловых матриц, № 3 и № 4 верхних угловых матриц относительно базового среза пластины (см. рис. 1).

Оказалось, что темновые токи элементов нижних угловых матриц отличаются более чем на порядок от темновых токов верхних угловых матриц. Следует отметить, что в пределах одной матрицы эти токи отличаются незначительно. Наибольшее значение темнового тока измерено в центральной матрице № 5. Глубина травления составила 340, 340, 310, 320 и 320 нм для элементов матриц с №№ 1, 2, 5, 3 и 4 от уровня металла соответственно.

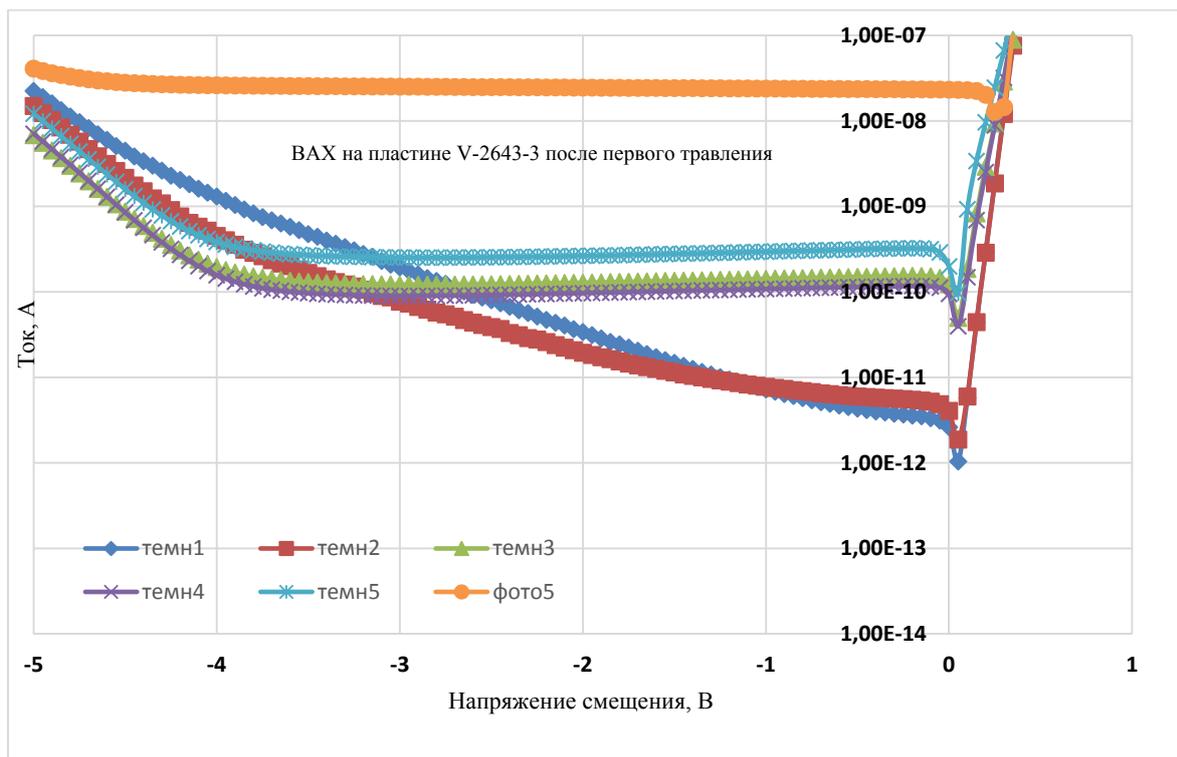


Рис. 3. ВАХ элементов матриц, расположенных на краях и в центре пластины диаметром 50,8 мм.

Минимальная скорость травления в течении временного отрезка 28 с составила 3,9 нм/с в центре пластины. На краях глубина травления больше, а скорость достигает 5 нм/с. Из этого следует, что неоднородность скорости травления по пластине составляет 22 %.

Изменение глубины травления мезы при последовательном увеличении длительности травления двух элементов отдельной матрицы (после

резки пластины) от верха золотого контакта представлено на рис. 4. Средняя скорость травления равна 6,3 нм/с и совпадает со скоростью травления в течение 30 с после начала травления. Далее изменение глубины замедляется в течение 20 с. На временном отрезке 50–57 с скорость травления возрастает в три раза относительно средней и составляет 18 нм/с, но постепенно возвращается к среднему значению.

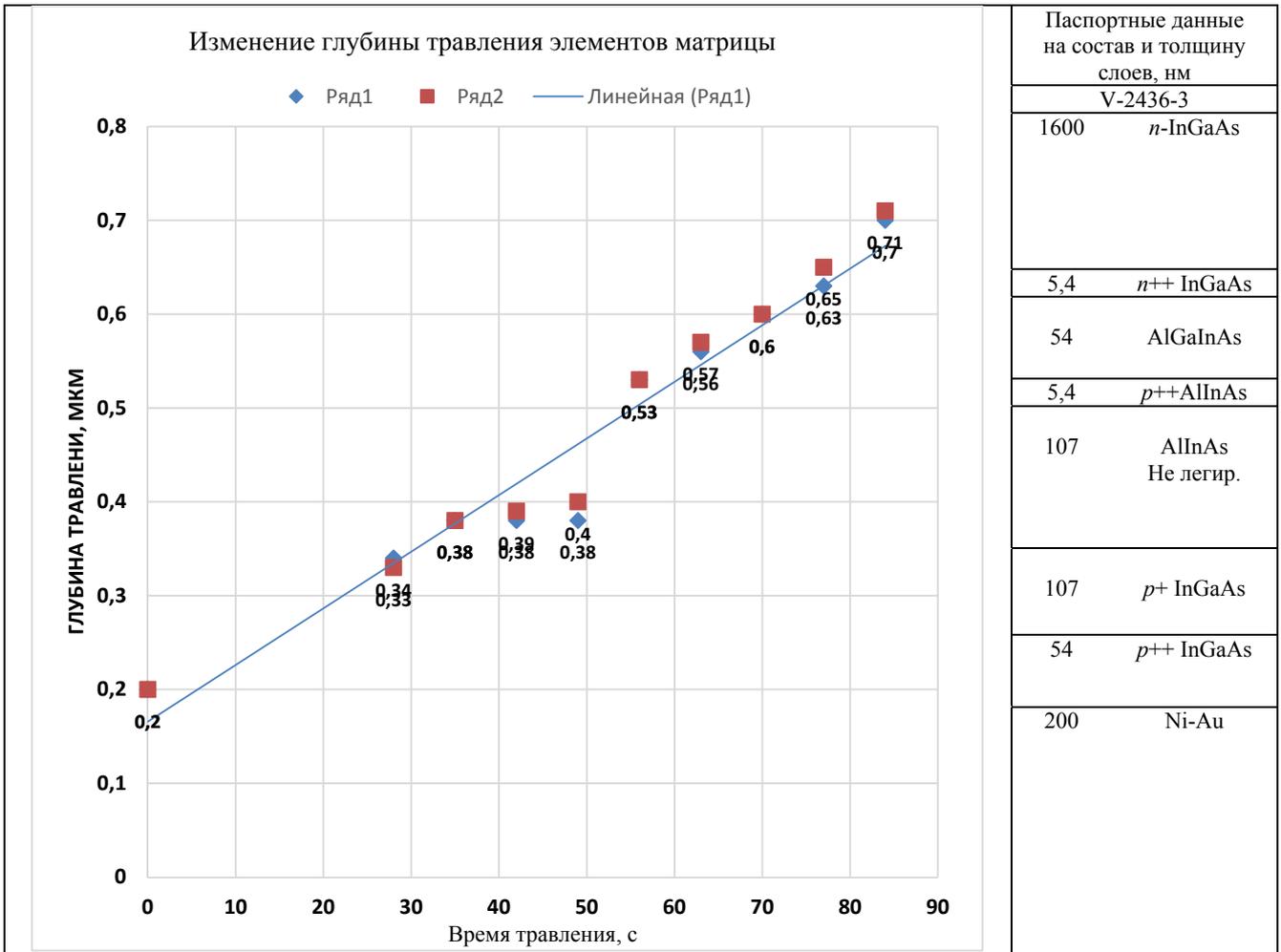


Рис. 4. Изменение глубины мезы при увеличении длительности травления двух элементов матрицы ФЧЭ.

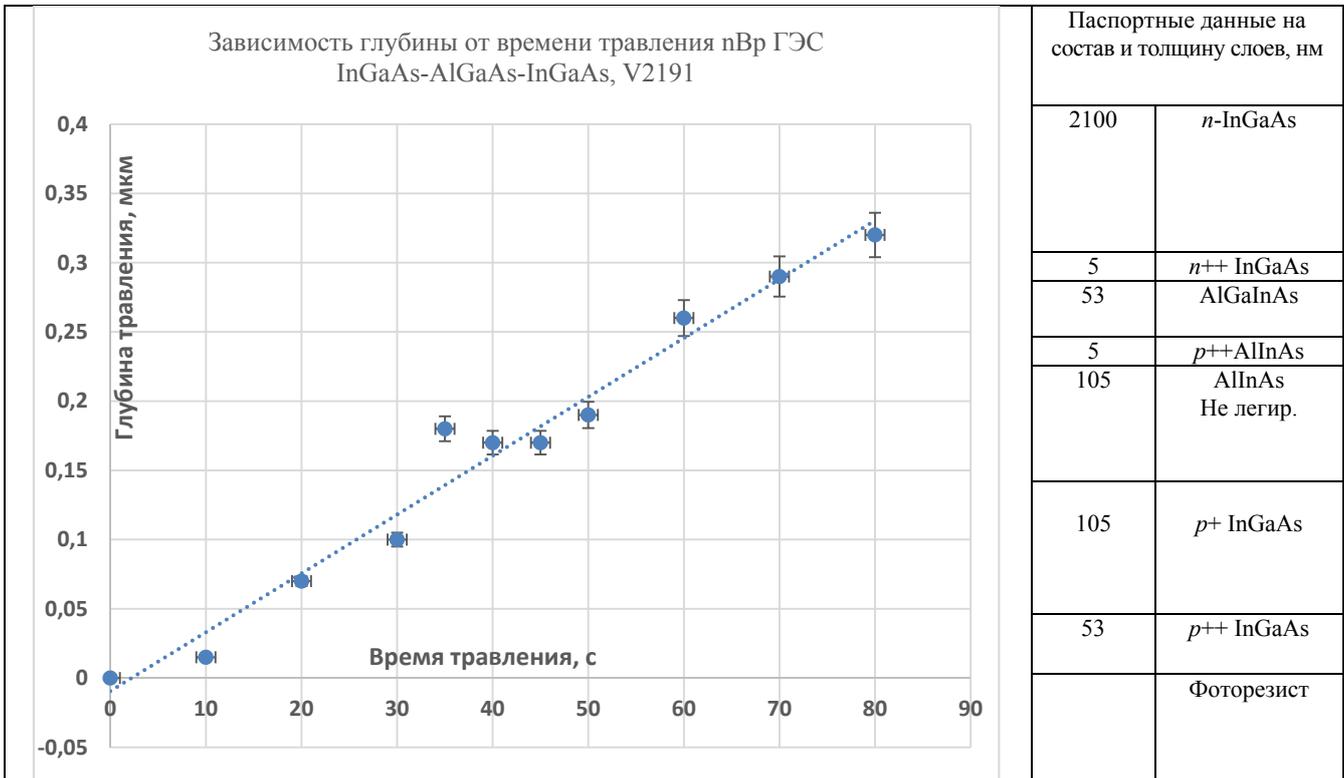


Рис. 5. Зависимость глубины травления пластины nVr ГЭС V-2191 от времени.

Подобная картина также наблюдается при травлении *nVp* ГЭС V-2191. Зависимость глубины от времени травления этой пластины представлена на рис. 5. Средняя скорость меньше и составляет 4,4 нм/с.

В правой части рис. 4 и 5 схематично изображены толщины и состав слоев исследуемых пластин, взятые из сертификатов на купленные пластины. Как видно, значительное замедление процесса травления соответствует травлению слоя AlInAs.

Обсуждение результатов

Для формирования массива элементов матрицы фотодиодов на *nVp* ГЭС структуре необходимым условием является разделение контактного p^{++} -слоя InGaAs, которое осуществляется жидкостным травлением промежутков между контактными площадками. Ширина зазоров составляет 1÷2 мкм для обеспечения максимальной площади каждого фотодиода. В то же время травления на глубину p^{++} -слоя недостаточно, поскольку соседние элементы матрицы будут соединены конечной проводимостью этих зазоров по фотодиодному p -слою InGaAs, что может приводить к значительному увеличению эффективной площади отдельного элемента и, соответственно, фотоэлектрической взаимосвязи в матрице. Поэтому травление между элементами необходимо выполнять на глубину, обеспечивающую максимальное электрическое сопротивление между соседними контактными площадками. Для обеспечения этого условия необходимо полностью стравить слой InGaAs в промежутках топологических элементов, формирующих отдельные фотодиоды.

К сожалению, выполнить это условие, не удалив часть пассивирующего слоя AlInAs и используя только один травитель, невозможно. Однако, как показали проведенные исследования зависимости глубины от времени травления, скорость травления AlGaAs замедляется на временном промежутке 30÷50 с, что можно объяснить особенностями травления неоднородных по химическому составу поверхностей вследствие образования гальванических потенциалов, ускоряющих или замедляющих протекание реакции. В нашем случае это остатки (островки) недотравленного слоя InGaAs на поверхности пассивирующего AlInAs, что с неизбежностью должно происходить при травлении ступеньки на поверхности, закрытой маскирующим покрытием из фоторезиста.

При травлении через маску, сформированную металлическим контактом Ni-Au, увеличение средней скорости травления вполне ожидаемо из-за присутствия гальванической пары «металл-полупроводник», что подтверждается полученными

результатами. Средняя скорость травления по маске фоторезиста составляет 4,4 нм/с (рис. 5), а по маске Ni-Au – 6,3 нм/с (рис. 4).

К тому же следует отметить, что процесс травления осуществлялся при естественном (неконтролируемом) и люминесцентном освещении, которое приводит к возникновению фотоЭДС на поверхности *nVp*-ГЭС. Из рис. 3 следует, что при освещении потоком излучения $\Phi = 10^{-4} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$ величина фотоЭДС составляет 0,3 В [3, 8]. Исследование влияния этого фактора на скорость травления слоев ГЭС не проводилось, но, безусловно, представляет интерес.

Сложность технологической операции прецизионного жидкостного травления слоев гетероэпитаксиальной структуры разного химического состава ($\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}-\text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As}$) на глубину около 200 нм на пластине 50,8 мм, обеспечивающей разделение фоточувствительной структуры большой площади на отдельные фотодиоды, составляющие массив элементов матрицы, возрастает также из-за неоднородности скорости травления мезы по пластине, что приводит к отличающейся глубине травления. Как было показано выше, глубина травления слоев $p^{++}-p$ $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ с суммарной толщиной 160 нм отличается на 30 нм по пластине диаметром 50,8 мм при травлении на максимальную глубину 140 нм, что составляет 21 %. Как видно из ВАХ, представленных на рис. 3, темновой ток элементов матриц ФЧЭ, измеренный после первого промежуточного травления, уменьшается в соответствии с увеличением глубины травления. Наименьший ток 10^{-2} нА при напряжении смещения –1 В наблюдается у элементов матриц на краю пластины при глубине травления 140 нм, что более чем на порядок превышает среднее значение темнового тока фотодиодов матриц, сформированных травлением на необходимую (более толщину слоев $p^{++}-p$ $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$) глубину. Для пластины V-2463 эта величина, по данным сертификата, составляет 160 нм. Время, необходимое для полного стравливания этого слоя по всей пластине, составит $(160-110) \text{ нм} / (5 \text{ нм/с}) = 10 \text{ с}$.

Замедление скорости травления *n-V-p*-ГЭС на временном промежутке 30÷50 с, как установлено из проведенных исследований (см. рис. 4 и 5), позволяет выполнить дополнительное травление на необходимую глубину, сохраняя при этом достаточную толщину пассивирующего слоя AlGaAs.

Заключение

Таким образом, на основе проведенных исследований оптимизирован процесс травления мезы на промежуточной операции маршрута изготовления МФЧЭ коротковолнового ИК-диапазона

на основе *n-B-p* ГЭС $nB(\text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As})p$ -структурах на подложках InP, что позволяет определить глубину травления, требуемую для получения низких темновых токов и оптимальной амперваттной чувствительности. Изготовлены высокоэффективные матрицы фотодиодов форматов 320×256 с шагом 30 мкм и 640×512 с шагом 15 мкм с дефектностью не превышающей 0,5 %.

Экспериментально показано влияние глубины травления $nB(\text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As})p$ -структур на подложке InP с поглощающим слоем InGaAs на темновые токи фотодиодов в матрицах формата 320×256 с шагом 30 мкм.

Опробован метод двухступенчатого травления ГЭС, обеспечивающий получение высокоэффективных фотодиодных матриц.

Показана необходимость продолжения исследования факторов, влияющих на глубину травления, и поиска метода селективного травления слоя InGaAs на пассивирующем слое AlInAs.

Авторы выражают благодарность сотрудникам предприятия к.т.н. Киселевой Л. В., Саво-

стину А. В., Мирофьянченко А. Е., Мирофьянченко Е. В., Каишубе А. С. за участие в обсуждении результатов и высказыванию критических замечаний при написании этой публикации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И., Залетаев Н. Б. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 123.
2. Дирочка А. И., Курбатов Л. Н. Фотоэлектроника. Базовые лекции по электронике. Т. 2. Твёрдотельная электроника. – Москва. Техносфера, 2009.
3. Седнев М. В., Болтарь К. О., Иродов Н. А., Демидов С. С. // Прикладная физика. 2015. № 3. С. 73.
4. Kim J. K., Cich M. J., Keeler G. A., Hawkins S. D., Fortune T. R. // Applied Physics Letters. 2009. Vol. 95. P. 031112.
5. Sadao Adachi, Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors. – John Wiley & Sons, Ltd. 2009.
6. Болтарь К. О., Смирнов Д. В., Савостин А. В., Шаронов Ю. П., Киселева Л. В. Способ изготовления многоэлементного фотоприемника на основе эпитаксиальных структур InGaAs/InP. Заявка № 2013118764 от 24.04.13.
7. D. Sheela, Nandita Das Gupta // Semiconductor Science and Technology. 2008. Vol. 23. P. 035018.

PACS: 85.60.-q

Investigation of the etching rate of nBp heterostructures based on InGaAs

N. S. Trukhacheva, M. V. Sednev, A. V. Trukhachev, E. A. Makarova, and K. V. Naumova

Orion R&P Association
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

Received April 10, 2018

Consideration is given to the results of chemical etching depth impact on the current-voltage characteristics of the elements in 320×256 FPAs with a 30 μm pixel pitch based on the heteroepitaxial structures with the absorbing InGaAs layer. The FPAs were made on mesaplanar $nB(\text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As})p$ -structures on the InP substrates. As a result of the research, the process of mesa etching on the interim operation of the FPAs production technology was optimized. It allowed us to define the etching depth required to obtain low dark currents and optimal ampere-watt sensitivity. The high-performance 320×256 FPAs had 30 μm pixel pitch and 640×512 FPAs had 15 μm pixel pitch were fabricated. Presence of defects wasn't exceed 0.5 per cent.

Keywords: InGaAs, Focal Plane Array, heteroepitaxial structures, current-voltage characteristic, dark current, ampere-watt sensitivity, chemical etching.

REFERENCES

1. I. D. Burlakov, L. Ya. Grinchenko, A. I. Dirochka, and N. B. Zaletaev, Usp. Prikl. Fiz. **2** (2), 123 (2014).
2. A. I. Dirochka and L. N. Kurbatov, *Photoelectronics*, Vol. 2. (Teknosfera, Moscow, 2009) [in Russian].
3. M. V. Sednev, K. O. Boltar, N. A. Irodov, and S. S. Demidov, Prikl. Fiz., No. 3, 73 (2015).
4. J. K. Kim, M. J. Cich, G. A. Keeler, S. D. Hawkins, and T. R. Fortune, Applied Physics Letters **95**, 031112 (2009).
5. Sadao Adachi, *Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors*. (John Wiley & Sons, Ltd., 2009).
6. K. O. Boltar, D. V. Smirnov, A. V. Savostin, et al., RF Patent, No. 2013118764, April 24, 2013.
7. D. Sheela and Nandita Das Gupta, Semiconductor Science and Technology **23**, 035018 (2008).