

Исследование глубины и скорости ионного травления QWIP-структур

А. В. Трухачев, М. В. Седнев, Н. С. Трухачева, К. О. Болтарь, А. И. Дирочка

В работе исследованы зависимости скорости ионно-лучевого травления верхнего контактного слоя ($GaAs:Si$), активной области, состоящей из пятидесятикратного чередования барьерных слоев ($Al_xGa_{1-x}As$) и квантовых ям ($GaAs:Si$), нижнего контактного слоя ($GaAs:Si$) по глубине QWIP-структур на основе $GaAs-AlGaAs$, изготовленных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), с целью определения влияния состава различных слоев на скорость травления и возможности завершения процесса травления на необходимую глубину по времени.

Ключевые слова: QWIP-структура, ионно-лучевое травление, длинноволновый ИК-диапазон, гетероструктуры, молекулярно-лучевая эпитаксия.

Ссылка: Трухачев А. В., Седнев М. В., Трухачева Н. С., Болтарь К. О., Дирочка А. И. // Прикладная физика. 2019. № 6. С. 54.

Reference: A. V. Trukhachev, M. V. Sednev, N. S. Trukhacheva, K. O. Boltar, and A. I. Dirochka, Prikl. Fiz., 6, 54 (2019).

Введение

Одним из наиболее перспективных методов регистрации инфракрасного излучения длинноволнового диапазона $8\div 12$ мкм в настоящее время является ИК-детектирование на основе гетероэпитаксиальных структур с множественными квантовыми ямами (КЯ) или Quantum Well Infrared Photodetector – инфракрасный приёмник на квантовых ямах, сокращённо QWIP [1–4].

Наибольшее распространение получили квантово-размерные гетероструктуры на основе соединений группы A_3B_5 , в частности, наибольшую перспективу для применения в технологии создания фотоприёмных

устройств на основе QWIP-структур имеют твердые растворы на основе арсенида галлия-алюминия [4]. Приборы на квантовых ямах обладают высокой пороговой чувствительностью (у лучших приборов эквивалентная шуму разность температур (ЭШРТ) ниже 20 мК), сравнительно узкой полосой спектральной чувствительности и возможностью ее подстройки в широком диапазоне [3].

Перспективность таких гетероструктур заключается в высоком уровне развития технологии выращивания эпитаксиальных слоев GaAs различными эпитаксиальными методами (молекулярно-лучевая и жидкофазная эпитаксии), а также в возможности высокого уровня интеграции фотоприёмных элементов и электронных элементов обработки сигналов [3].

Развитие технологии производства матричных фотоприёмников на основе QWIP GaAs/AlGaAs-приёмников показало, что эти структуры обладают высокой технологичностью, воспроизводимостью и, что особенно важно, однородностью параметров по элементам в матрицах форматов $256\times 256\dots 640\times 512$ и др. [4]. QWIP-фотоприёмники работают в длинноволновом ИК-диапазоне и имеют полосу чувствительности от 7,5 до 9 мкм.

Трухачев Антон Владимирович, инженер-технолог 2 кат.
Седнев Михаил Васильевич, начальник участка, к.т.н.
Трухачева Наталия Сергеевна, инженер-технолог 2 кат.
Болтарь Константин Олегович, нач. НТК, д.ф.-м.н.
Дирочка Александр Иванович, гл. спец., д.ф.-м.н.
АО «НПО «Орион».
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.
E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 11 ноября 2019 г.

© Трухачев А. В., Седнев М. В., Трухачева Н. С., Болтарь К. О., Дирочка А. И., 2019

Использование фотоприемников на основе QWIP-структур позволяет создавать крупноформатные матричные фотоприемные устройства. Матрицы на квантовых ямах (QWIP-матрицы) составляют серьезную конкуренцию фотоприемникам, выполненным на основе теллурида кадмия ртути (КРТ) в диапазоне 8–12 мкм.

Существенными недостатками QWIP GaAs/AlGaAs-приемников являются низкий коэффициент преобразования излучения (~ 4 %), что обусловлено малым значением коэффициента собственного поглощения, а также необходимость более глубокого охлаждения, чем приемников на КРТ [4].

Для изготовления фоточувствительных элементов используется мезотехнология. Основными инструментами для формирования отдельных элементов в матрицах являются методы «сухого» ионного травления, а именно: реактивное ионное травление, в том числе с применением высокоплотной индуктивно-связанной плазмы, высокочастотное катодное и ионно-лучевое травление ионами инертных газов. При этом не допускается разрезание

нижнего контактного слоя до буферного слоя [5]. Применение методов «сухого» ионного травления обусловлено необходимостью разделения фоточувствительных пикселей с максимально возможной площадью элементов матрицы на глубину до начала нижнего контактного слоя.

В настоящей работе выполнены исследования скорости ионно-лучевого травления QWIP-структур на основе эпитаксиальных слоев GaAs/AlGaAs и определены возможности использования скорости травления QWIP-структур от времени для установления момента окончания травления на необходимую глубину.

Подготовка образцов и техника эксперимента

Для эксперимента были использованы две QWIP-структуры – M2272 и A181, изготовленные разными производителями – ЗАО «Светлана-Рост» и АО «НПО «Орион» соответственно. Паспортные характеристики обеих структур приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики структур M2272 и A181

№ структуры	Буферный слой GaAs	Контактный слой GaAs:Si		Барьерный слой Al _x Ga _{1-x} As		Квантовая яма GaAs:Si ×50		Барьерный слой Al _x Ga _{1-x} As ×50		Контактный слой GaAs:Si	
		Толщина слоя, нм	Толщина слоя, нм	Концентрация Si см ⁻³	Состав x AlAs	Толщина слоя, нм	Концентрация Si см ⁻³	Состав x AlAs	Толщина слоя, нм	Толщина слоя, нм	Концентрация Si см ⁻³
M2272	800	1200	1×10 ¹⁸	0,27	45	5,0	4,5×10 ¹⁷	0,27	45	1200	1×10 ¹⁸
A181	200	1150	1×10 ¹⁸	0,25	51	5,0	3×10 ¹⁷	0,25	51	785	1×10 ¹⁸

Ионное травление осуществлялось в потоке ионов аргона, создаваемом источником Кауфмана, в вакуумной установке. Обрабатываемые пластины находились на охлаждаемом подложкодержателе. Температура охлаждения подложки составляла + 5 °С.

Процесс проводился на установке ионного травления со следующими параметрами: рабочий газ – Ar;

давление остаточных газов в камере – 2×10⁻⁴ Па;

рабочее давление Ar в камере во время процесса – 8×10⁻³ Па;

энергия ионов Ar – 1 кэВ;
плотность тока – 0,2 Вт/см².

Измерение глубины травления поверхности выполняли с помощью контактного профилометра, обеспечивающего погрешность не более 20 Å. Определение глубины ионно-лучевого травления проводили измерением высоты «ступенек», образовавшихся в результате травления, при маскировании участков поверхности слоем фоторезиста через определенные временные интервалы. Скорость травления вычисляли по отношению

измеренной высоты ступеньки к времени воздействия потока ионов аргона.

Последовательно после очередного травления измеряли полученную «ступеньку» на профилометре, маскировали следующий участок и возобновляли процесс ионного травления.

Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены экспериментально полученные результаты измерения глубины ионного травления QWIP-структур на ос-

нове гетероэпитаксиальных слоев GaAs и $Al_xGa_{1-x}As$ от времени для пластин M2272 и A181. Из рисунка видно, что зависимости глубины травления от времени аналогичны для обоих образцов. С увеличением времени травления наблюдаются три характерных участка с линейным ростом глубины травления. Экспериментальные значения глубины травления аппроксимируются прямыми линиями, наклон которых практически совпадает на начальном и заключительном участках времени травления и уменьшается на среднем для пластин M2272 и A181. Такое поведение объясняется отличием скоростей травления различных по составу функциональных слоев структуры.

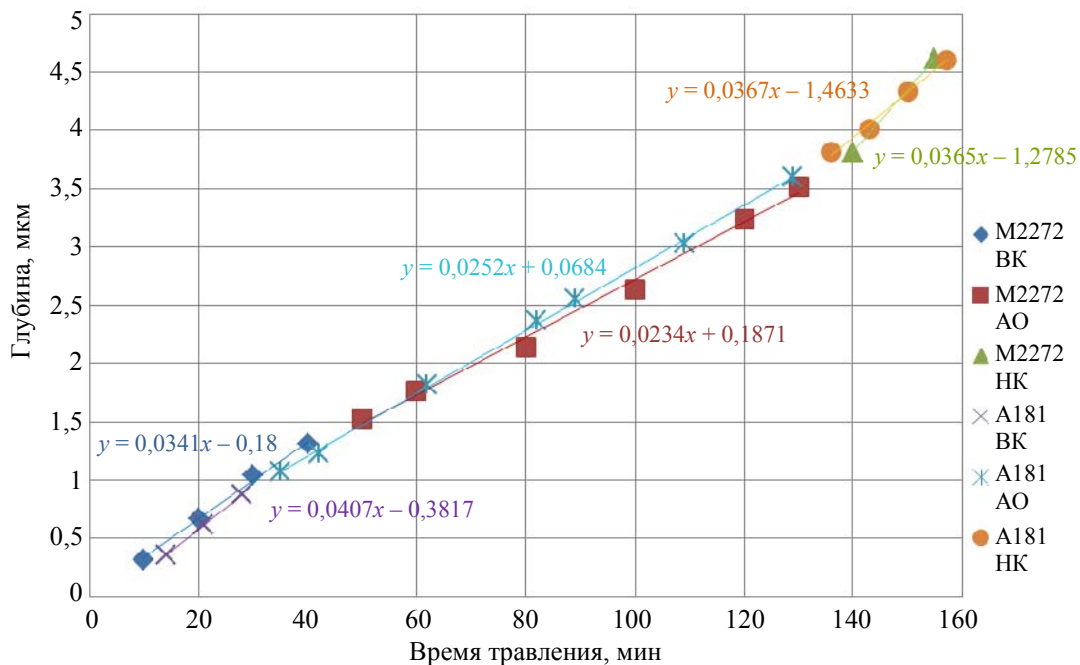


Рис. 1. Глубина ионного травления QWIP-структур на основе гетероэпитаксиальных слоев GaAs и $Al_xGa_{1-x}As$ от времени.

Из полученных экспериментальных результатов определены средние скорости ионно-лучевого травления ионами аргона контактных слоев GaAs:Si и активной области (чередующиеся между собой барьерные слои из $Al_xGa_{1-x}As$ с мольной долей алюминия $x = 0,27$ и слои квантовых ям из GaAs:Si). На рис. 2 представлены зависимости средних скоростей травления по глубине QWIP-структур разных производителей. Скорость травления уменьшается при переходе от травления верхнего контактного слоя к активной

области, а потом при переходе к травлению нижнего контактного слоя возвращается к начальным значениям. При этом можно заметить, что толщина верхнего и нижнего контактных слоев пластины A181 меньше, чем M2272, а толщина активной области, наоборот, больше. Эти обстоятельства создают определенные затруднения для определения момента окончания процесса травления при формировании QWIP-структур по мезотехнологии и повышают требования на определение состава и толщин QWIP-структур.

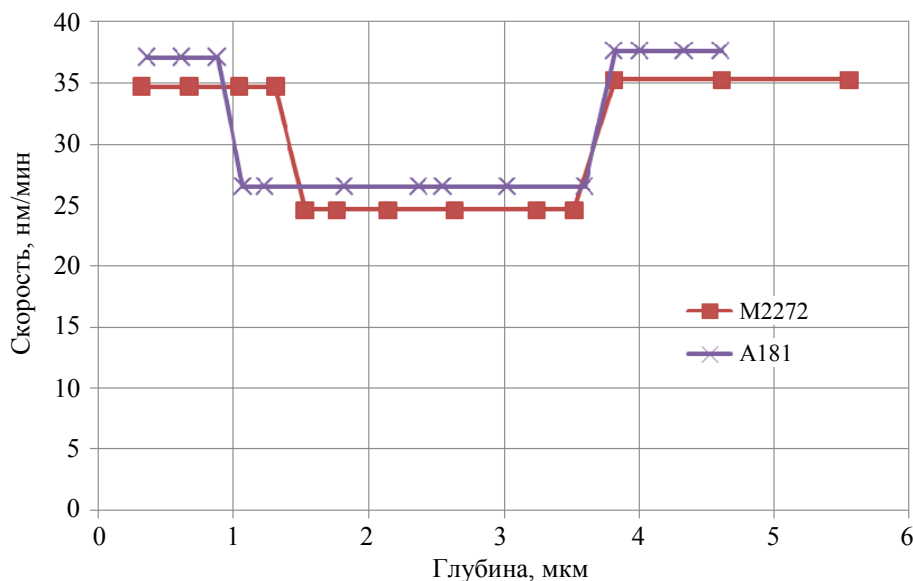


Рис. 2. Скорость ионного травления по глубине QWIP-структур.

В табл. 2 представлены результаты измерений глубин ионно-лучевого травления гетероэпитаксиальных слоев GaAs и Al_xGa_{1-x}As за определенные промежутки времени при постоянных параметрах ионного пучка, средние значения скорости травления контактных слоев из GaAs и активных областей из Al_xGa_{1-x}As, а также расположение этих областей в соответствии с паспортными данными по глубине структур.

Средние скорости травления функциональных слоев структур разных производителей примерно равны и составляют около

36 нм/мин для верхнего и нижнего контактных слоев из GaAs, и ~ 26 нм/мин для активной области, состоящей из пятидесяти чередующихся барьерных слоев и квантовых ям. Незначительные отличия в скоростях травления могут быть связаны как с особенностями выращивания слоев разными поставщиками, так и погрешностью определения высоты ступенек после каждого травления. Соотношение скоростей ионного травления контактных слоев (GaAs) к активной области (Al_xGa_{1-x}As)/(GaAs:Si) у обоих образцов составило 1,4.

Таблица 2

Сравнение скорости ионно-лучевого травления по глубине ГЭС пластин M2272 и A181

M2272				A181			
Время травления, мин.	Глубина травления, мкм	Средняя скорость травления нм/мин	Состав по глубине ГЭС (из паспорта)	Время травления, мин.	Глубина травления, мкм	Средняя скорость травления нм/мин	Состав по глубине ГЭС (из паспорта)
10	0,32	34,7	GaAs	14	0,36	37,1	GaAs
20	0,67		GaAs	21	0,62		GaAs
30	1,04		GaAs	28	0,88		GaAs /AO
40	1,31	28	GaAs /AO	35	1,07	27,1	AO
50	1,53	24,6	AO	42	1,23	26,5	AO
60	1,77		AO	62	1,82		AO
80	2,14		AO	82	2,37		AO
100	2,64		AO	89	2,55		AO
120	3,24		AO	109	3,03		AO
130	3,52	30	AO	129	3,6	27,1	AO
140	3,82		AO / GaAs	136	3,82		AO / GaAs
155	4,62		GaAs	143	4,01		37,6
			150	4,34	GaAs		
			157	4,61	GaAs		

* GaAs – верхний контактный слой; AO – активная область (Al_xGa_{1-x}As)/(GaAs:Si); GaAs – нижний контактный слой.

Из табл. 2 и рис. 2 отчетливо видно, что изменение скорости травления происходит при переходе границы контактных (из GaAs) и активных (из $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) областей QWIP-структур разных производителей.

Изображения фрагментов изготовленной по описанной технологии матрицы фоточувствительных элементов на основе QWIP-структур формата 384×288 с шагом 25 мкм, сфор-

мированных ионно-лучевым травлением, представлены на рис. 3. Фоточувствительные элементы матрицы разделены канавками, дно которых проходит по нижнему контактному слою. На правом фрагменте рис. 3 видны элементы решетки в верхнем контактном слое. Индиевые микроконтакты сформированы вакуумным напылением по «lift-off»-технологии.

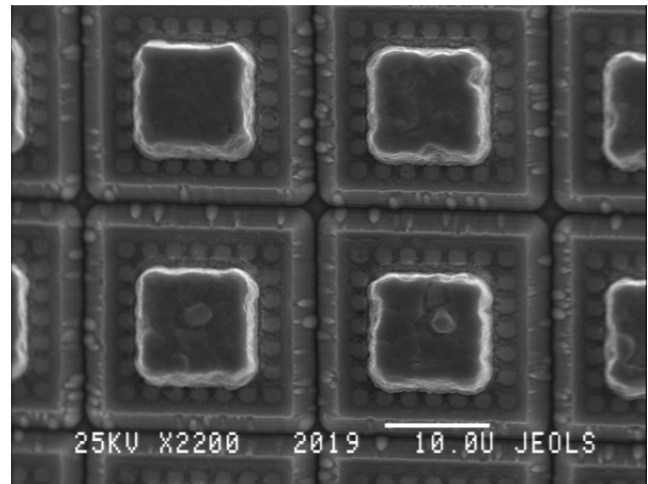
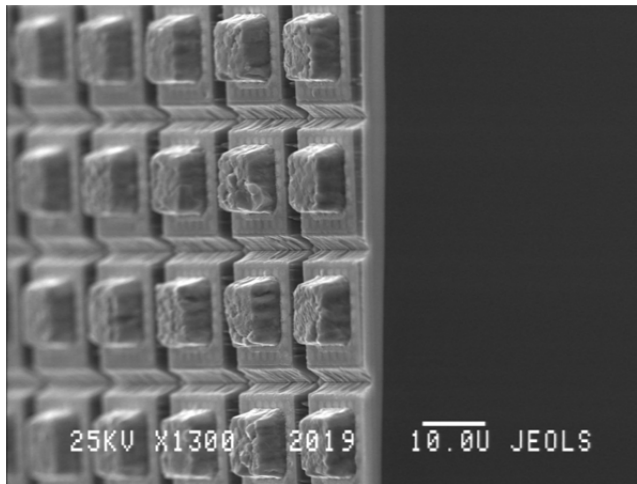


Рис. 3. Фоточувствительные элементы QWIP-структур, сформированные ионно-лучевым травлением.

Заключение

В работе исследованы зависимости скорости ионно-лучевого травления по глубине QWIP-структур, а также влияние состава гетероэпитаксиальных слоев на скорость травления.

Из полученных экспериментальных результатов следует, что скорости процесса ионного травления для QWIP-структур разных производителей близки. Это делает возможным определение завершения процесса травления на необходимую глубину по времени травления. Также продемонстрировано влияние состава гетероэпитаксиальных слоев на скорость травления: более высокая скорость травления верхнего и нижнего контактных слоев по сравнению с меньшей скоростью травления активной области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Седнев М. В. // Прикладная физика. 2007. № 5. С. 58.
2. Седнев М. В., Болтарь К. О., Мезин Ю. С., Климанов Е. А., Шаронов Ю. П. // Прикладная физика. 2012. № 1. С. 90.

3. Бурлаков И. Д., Дирочка А. И., Корнеева М. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 5. С. 509.
4. Cocle Olivier, Rannou Christophe, Forestier Bertrand, Bois Paul Jouglu Philippe F., Costard Eric M., Manissadjian A., Gohier D. Qwip compact thermal imager: CATHERINE-XP and its evolutions. SPIE Defense & Security 2007 – [6542-127] ORLANDO 2007.
5. Седнев М. В., Болтарь К. О., Шаронов Ю. П., Лопухин А. А. // Прикладная физика. 2013. № 4. С. 51.
6. Трухачев А. В., Седнев М. В., Трухачева Н. С. // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 55.
7. Никонов А. В., Скребнева П. С., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2017. № 1. С. 31.
8. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптоэлектронных приборов. Учебник. – Издательство: Логос, 2012.
9. Болтарь К. О., Зубкова Е. Н., Иродов Н. А., Седнев М. В., Смирнов Д. В., Шаронов Ю. П. // Прикладная физика. 2013. № 4. С. 5.
10. Driesen M., Wouters K., Puers R. / Proceedings of the Eurosensors XXIII conference, Procedia Chemistry, 2009. Vol. 1. P. 796–799.
11. Yeo-Song Seol, Jae-Ice Ha, Chul-Kyu Bok, Hee-Kook Park, Kye-Hwan Oh // Materials Chemist. and Physics. 1993. Vol. 35. P. 134.
12. Трухачева Н. С., Седнев М. В., Трухачев А. В., Макарова Э. А., Наумова К. В. // Прикладная физика. 2018. № 2. С. 41.

Research of depth and speed of ion-beam etching of the QWIP-structures

A. V. Trukhachev, M. V. Sednev, N. S. Trukhacheva, K. O. Boltar, and A. I. Dirochka

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

Received November 11, 2019

Consideration is given to research of the depth-speed dependences of QWIP-structures different layers ion-beam etching. The study was intended to establish the influence of the different layers composition on the etching speed. Another aim of the study also is to determine etching process completion possibility to the required depth on time.

Keywords: QWIP-structure, ion-beam etching, long-wave infrared range, LWIR, heterostructure, molecular beam epitaxy.

REFERENCES

1. I. D. Burlakov, K. O. Boltar, and M. V. Sednev, Prikl. Fiz., No. 5, 58 (2007).
2. M. V. Sednev, K. O. Boltar, J. S. Mezin, E. A. Klimanov, and J. P. Sharonov, Prikl. Fiz., No. 1, 90 (2012).
3. I. D. Burlakov, A. I. Dirochka, M. D. Korneeva, et al., Usp. Prikl. Fiz. **2** (5), 509 (2014).
4. Olivier Cocle, Christophe Rannou, Bertrand Forestier, Paul Jouglia Philippe F. Bois, Eric M. Costard, A. Manisadjian, and D. Gohier. *Qwip compact thermal imager: CATHERINE-XP and its evolutions*. (SPIE Defense & Security 2007 – [6542-127] ORLANDO, 2007).
5. M. V. Sednev, K. O. Boltar, J. P. Sharonov, and A. A. Lopukhin, Prikl. Fiz., No. 4, 51 (2014).
6. A. V. Trukhachev, N. S. Trukhacheva, and M. V. Sednev, Prikl. Fiz., No. 5, 55 (2018).
7. A. V. Nikonov, P. S. Skrebneva, and N. I. Iakovleva, Prikl. Fiz., No. 1, 31 (2017).
8. Y. G. Yakushenkov, *Electro-optical devices: Theory and design* (Logos, Moscow, 2004) [in Russian].
9. K. O. Boltar, J. P. Sharonov, M. V. Sednev, D. V. Smirnov, E. N. Zubkova, and N. A. Irodov, Prikl. Fiz., No. 4, 5 (2013).
10. M. Driesen, K. Wouters, and R. Puers, in *Proceedings of the Euroensors XXIII conference, Procedia Chemistry* **1**, 796 (2009).
11. Yeo-Song Seol, Jae-I-Ice Ha, Chul-Kyu Bok, Hee-Kook Park, and Kye-Hwan Oh, *Materials Chemistry and Physics* **35**, 134 (1993).
12. N. S. Trukhacheva, M. V. Sednev, A. V. Trukhachev, E. A. Makarova, and K. V. Naumova, Prikl. Fiz., No. 2, 41 (2018).