

УДК 621.315.59

PACS: 85.60.-q

Исследование влияния на ВАХ матричных фоточувствительных элементов на основе XVn -InGaAs-структур характеристик процессов пассивации поверхности

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

Представлены результаты исследования влияния на вольтамперные характеристики (ВАХ) элементов матриц фоточувствительных элементов (ФЧЭ) на основе XVn -InGaAs структур характеристик формирования пассивирующего покрытия и используемых материалов, а также воздействие потока низкоэнергетических ионов аргона. Пассивирующие покрытия получали методами магнетронного и резистивного напыления диэлектрических материалов сульфида цинка (ZnS), монооксида кремния (SiO) и фторида иттрия (YF₃). Показано, что воздействие низкоэнергетических ионов аргона приводит к катастрофическому увеличению темновых токов непассивированных элементов матриц.

Ключевые слова: XVn -InGaAs структура, пассивация, Si, ZnS, YF₃, вольтамперная характеристика.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-3-56-62

Введение

Одним из наиболее актуальных направлений развития оптико-электронных приборов является использование матричных фотоприемных устройств видимого и ближнего инфракрасного диапазона ($\lambda = 0,9 \div 1,7$ мкм) на основе $p-i-n$ -фотодиодов, изготовленных на основе гетероэпитаксиальных XVn -InGaAs структур [1–6]. Преимуществами этих матриц

являются низкие темновые токи и шумы при комнатной температуре, что обеспечивает удельную обнаружительную способность $D^* \sim 10^{13}$ см·Гц^{1/2}/Вт, а стабилизация температуры фотоприемника обеспечивается относительно недорогими системами термоэлектрического охлаждения.

Поверхность большинства полупроводников A_3B_5 характеризуется высокой плотностью поверхностных состояний в запрещенной зоне, что приводит к жесткому закреплению уровня Ферми, положение которого на поверхности практически не зависит от природы адсорбированных атомов и, соответственно, появлению токов утечки диодов через эти поверхностные уровни [1–6]. Это обстоятельство отрицательно сказывается на работе многих микро- и оптоэлектронных приборов, мешая в полной мере раскрыть высокие потенциальные возможности этих полупроводников [7–9].

Для устранения нежелательного воздействия поверхности на свойства приборов в технологии активно развивается направление пассивации поверхности в рамках которого разрабатываются различные способы обра-

Трухачев Антон Владимирович¹, инженер-технолог 2 кат.

E-mail: orionmoscow@mail.ru

Трухачева Наталия Сергеевна¹, инженер-технолог 2 кат.

Седнев Михаил Васильевич¹, начальник участка, к.т.н.

Болтарь Константин Олегович^{1,2}, нач. НТК, профессор, д.ф.-м.н.

¹ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет).

Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 11 мая 2022 г.

© Трухачев А. В., Трухачева Н. С., Седнев М. В., Болтарь К. О., 2022

ботки поверхности, связанные с нанесением на нее различных покрытий. Технология пассивации поверхности полупроводника должна решить три задачи [10]:

- устранить или уменьшить плотность интерфейсных состояний в запрещенной зоне;
- предотвратить реакции взаимодействия поверхности полупроводника с атмосферой в течение всего времени жизни полупроводникового прибора и воспрепятствовать их образованию;
- обеспечить достаточный барьер, чтобы электроны полупроводника не терялись в пассивирующем слое.

Использование пассивации, с одной стороны, позволяет существенно уменьшить плотность поверхностных состояний в запрещенной зоне, снизить скорость поверхностной рекомбинации и за счет этого улучшить многие характеристики различных приборов, а с другой стороны, позволяет существенно замедлить процессы окисления полупроводниковой поверхности в атмосфере.

Снижение скорости поверхностной рекомбинации с помощью пассивации позволяет существенно улучшить характеристики фотопреобразовательных $p-n$ -структур. Даже в GaAs-гомоструктурах большой площади ($0,25 \text{ см}^2$) после обработки в растворах сульфида натрия и сульфида аммония в 3 раза понизился краевой рекомбинационный ток и практически исчезли шунтирующие утечки при малом прямом смещении [11, 12]. Аналогичные результаты были получены в дальнейшем и на структурах еще большей площади (до 16 см^2).

Пассивация GaAs-гомоструктурных солнечных элементов с тонким эмиттером (в несколько сотен нанометров) приводит к существенному возрастанию фототока, увеличению fotocувствительности, особенно в коротковолновой области спектра (так, например, fotocувствительность диода с эмиттером толщиной 600 нм на длине волны 400 нм после пассивации возросла в 4,5 раза), и к уменьшению тока насыщения [13, 14]. Эти эффекты связываются со снижением скорости поверхностной рекомбинации при пассивации с 5×10^6 до 10^3 см/с . В дальнейшем была показана возможность увеличения коротковолновой fotocувствительности и на $p-n$ -гетероструктурах на основе AlGaAs с относительно

толстым (несколько микрометров) эмиттером [15].

Пассивация приводит к заметному уменьшению темнового тока в меза-диодах на основе GaAlSb, InAsSb, GaSb / GaInAsSb / GaAlAsSb и к повышению fotocувствительности, внешнего квантового выхода и обнаружительной способности фотоприемников инфракрасного излучения InAsPSb / InAs, InGaAs [1–5, 16–19].

Важным элементом архитектуры гетероэпитаксиальных XBn -InGaAs структур, является барьерный В-слой, выполненный из широкозонного, по отношению к InGaAs, полупроводника AlInAs толщиной $\sim 100 \text{ нм}$. При формировании элементов матриц фотодиодов травлением контактного слоя и p -слоя барьерный слой обеспечивает, одновременно функцию пассивирующего покрытия. Однако толщина этого слоя слишком мала для защиты поверхности от внешних воздействий.

В работе представлены результаты исследования влияния на вольтамперные характеристики (ВАХ) элементов матриц fotocувствительных элементов (ФЧЭ) на основе XBn -InGaAs структур процессов формирования пассивирующего покрытия и используемых материалов, а также воздействия потока низкоэнергетичных ионов аргона. Пассивирующие покрытия получали методами магнетронного и резистивного напыления диэлектрических материалов сульфида цинка (ZnS), монооксида кремния (SiO) и фторида иттрия (YF₃). Показано, что воздействие низкоэнергетичных ионов аргона, имитирующее ускоренное старение ФЧЭ, приводит к катастрофическому увеличению темновых токов не пассивированных элементов матриц. Защита поверхности меза элементов fotocувствительных матриц напылением, перечисленными выше пассивирующими покрытиями, дает реальную возможность повышения устойчивости МФЧЭ на основе XBn -InGaAs структур к внешним воздействиям.

Подготовка образцов и техника эксперимента

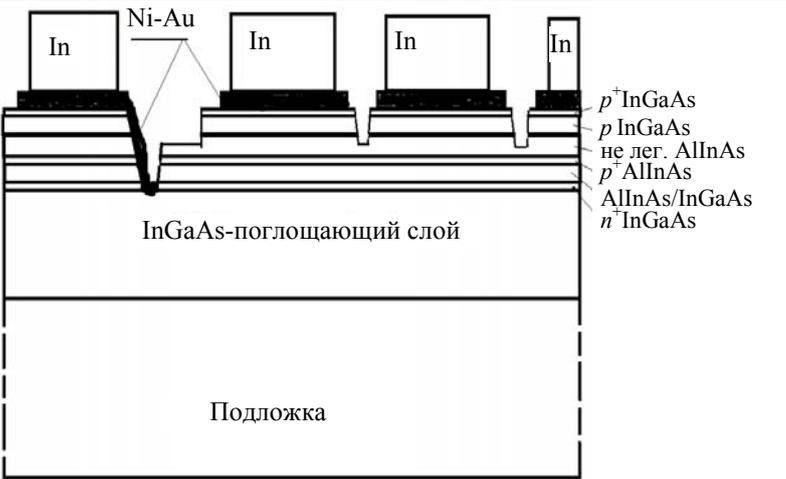
Для исследований использовали матрицы fotocувствительных элементов формата 320×256 с шагом 30 мкм, изготовленных на

основе XBn -InGaAs гетероэпитаксиальных структур. Фрагмент матрицы без пассивирующего покрытия схематично изображен на рисунке в таблице 1. На половину площади матриц, изготовленных без пассивации напыляли диэлектрическое покрытие, на часть матриц напыляли сульфид цинка (ZnS) методом

магнетронного распыления при давлении аргона в камере $(1,6-3) \times 10^{-1}$ Па и мощности генератора 150 Вт. На другие сульфид цинка (ZnS), монооксид кремния (SiO) и фторид иттрия (YF_3) резистивным напылением при остаточном давлении в камере 4×10^{-4} Па со скоростью напыления $1,9-2,0$ Å/с.

Таблица 1

Исследуемые структуры и их характеристики

Тип структуры, состав фильтр	Подложка, буфер	
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	n -InP(100) $2-4 \times 10^{18}$ 350 мкм 51 мм, n -InP $5,0 \times 10^{17}$ буфер 340 нм	

Для исследования влияния на ВАХ ФЧЭ воздействия потока низкоэнергетичных ионов аргона применяли метод ВЧ-катодного распыления ионами аргона поверхности при рабочем давлении в камере 10^{-1} Па, напряжении смещения 300 В и мощности $0,14$ Вт/см².

Качество пассивации поверхности характеризуется уменьшением или увеличением темнового тока фотодиодов, который определяется по результатам измерений ВАХ. Измерения ВАХ проводились на зондовой установке с помощью анализатора параметров полупроводников, разработанного для измерений параметров полупроводниковых структур, обеспечивающей измерение тока 10^{-14} А.

Измерения темнового тока и фототока выполняли в экранированном плотной тканью от фонового излучения пространстве зондов и матриц фотодиодов при температуре 20–25 °С, значение потока излучения было постоянным ($\Phi = 1,5 \times 10^{-4}$ Вт/см²). Источником для формирования светового потока служила лампа накаливая. Освещение фотодиодов осуществлялось со стороны контактов к p^+ -области.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Маскирование половины исследуемой матрицы при напылении пассивирующего покрытия или ионной обработки позволило наблюдать влияние процесса на поверхность одной матрицы с участком, защищенным пассивирующим покрытием, и без такового.

МФЧЭ без пассивирующего покрытия были подвергнуты действию ионной очистки, которое эмитирует процесс ускоренного старения поверхности при длительном воздействии окружающей среды. До и после обработки были измерены ВАХ отдельных элементов матриц (см. рис. 1 и 2). До ионной обработки и напыления пассивирующего покрытия темновые токи элементов МФЧЭ имеют типичные значения около 1 рА при напряжении обратного смещения $0,5 \div 1,0$ В. Полный ток, являющийся суммой темнового и фототока, можно считать равным фототоку в диапазоне напряжений смещения до <-4 В, поскольку темновой значительно меньше в этом диапазоне смещений.

Как видно из рис. 1, после обработки поверхности потоком низкоэнергетичных ионов и электронов методом высокочастотного катодного травления на МФЧЭ без пассивирующего покрытия и на незащищенных маской участках наблюдается катастрофический рост темнового тока и уменьшение фототока, а на защищенных участках МФЧЭ значения темнового и полного тока сохраняются.

Результаты исследований по формированию пассивирующих покрытий, выполненных методами магнетронного и резистивного напыления диэлектрических материалов сульфида цинка (ZnS), монооксида кремния (SiO) и фторида иттрия (YF₃), представлены в таблице 2. На всех матрицах МФЧЭ до начала эксперимента были измерены ВАХ и повторно после нанесения пассивирующего покрытия. Как видно из таблицы 2, темновые токи изменились незначительно в диапазоне напряжений обратного смещения до 0,5 В.

Тем не менее, по предварительным данным анализа обратных ветвей ВАХ отдельных элементов матриц, пассивированных разными способами, установлено определенное различие в зависимости темнового тока от напряжения смещения. На рис. 2 представлены ВАХ элементов матриц пассивированных сульфидом цинка толщиной 0,25 мкм, сформированных резистивным напылением и высокочастотным магнетронным распылением.

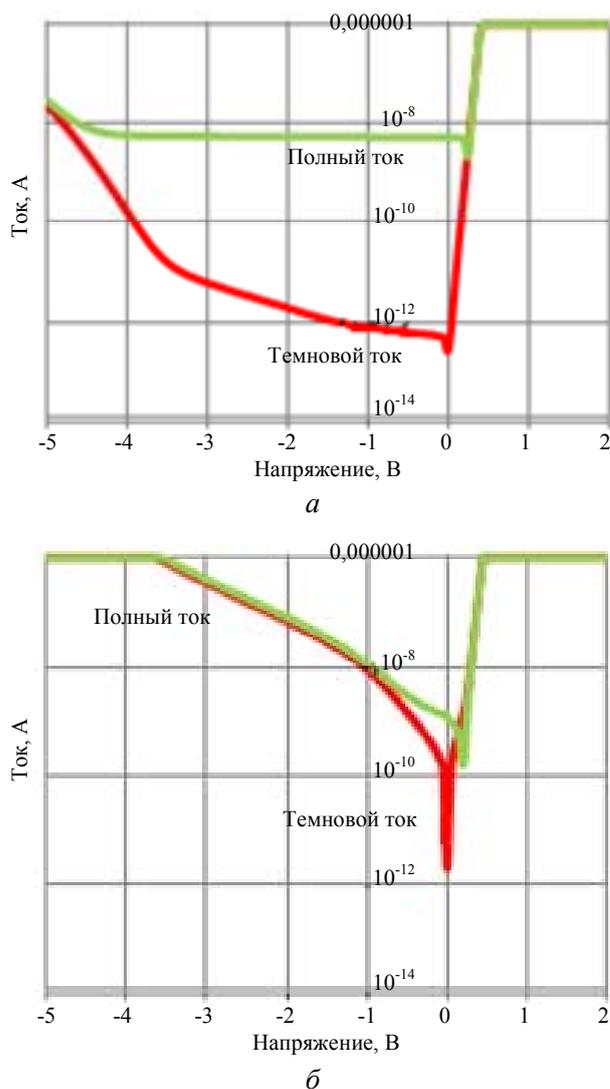


Рис. 1. ВАХ элемента матрицы без пассивирующего покрытия: а – до обработки низкоэнергетичными ионами аргона; б – после обработки

Таблица 2

Темновой I_m и фото I_ϕ токи при напряжении 0,5 В до и после формирования пассивирующего покрытия

Материал покрытия и способ формирования	ZnS Магнетронный		ZnS Резистивный		SiO Резистивный		YF ₃ Резистивный		Без покрытия	
	I_T	I_ϕ	I_T	I_ϕ	I_T	I_ϕ	I_T	I_ϕ	I_T	I_ϕ
	Темновые I_T (пА) и фото I_ϕ (нА) токи при напряжении 0,5 В									
До напыления	0,5	4,9	0,4	7,4	0,6	4,7	1,2	4,5	0,6	5,4
После напыления	0,6	7,8	0,2	9,8	0,6	5,4	1,1	5,7	–	–
После ион. очистки	0,6	7,9	0,3	8,3	0,7	4,3	0,9	5,6	1460	2,9

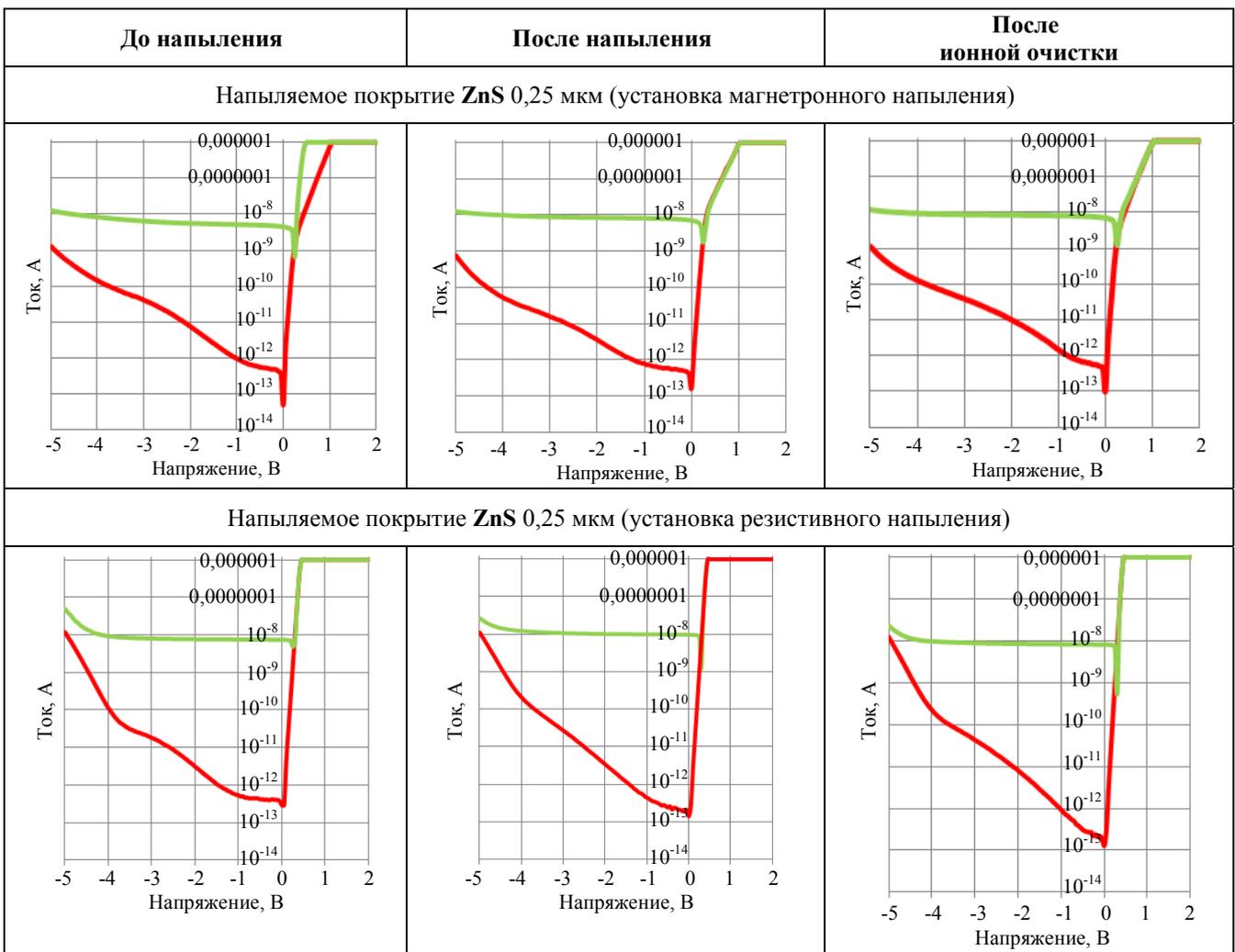


Рис. 2. ВАХ МФЧЭ с нанесенными пассивирующими покрытиями из ZnS и без покрытия

Из рис. 2 видно, что темновые и фоновые токи исходных и пассивированных ZnS магнетронным распылением и резистивным напылением элементов матриц почти не отличаются. Некоторое различие темновых и фоновых ВАХ элементов МФЧЭ на основе XBn -InGaAs структур с покрытием из сульфида цинка, пассивированных магнетронным распылением и резистивным осаждением, связаны, по-видимому, с параметрами исходных XBn -InGaAs структур или технологией изготовления ФЧЭ на их основе, а не методом нанесения сульфида цинка.

Ускоренное старение защищенной поверхности ФЧЭ под воздействием обработки низкоэнергетичными ионами аргона существенно не изменяет темновые и фоновые токи ВАХ элементов МФЧЭ на основе XBn -InGaAs структур, в отличие от незащищенных поверхностей матриц (см. рис. 1).

Заключение

Воздействие низкоэнергетичных положительно заряженных ионов аргона на незащищенную диэлектрическим защитным покрытием поверхность МФЧЭ на основе гетероэпитаксиальных XBn -InGaAs структур приводит к катастрофическому росту темновых токов и уменьшению амперваттной чувствительности элементов матриц.

Увеличение темновых токов и падение амперваттной чувствительности элементов матриц после обработки незащищенной поверхности МФЧЭ низкоэнергетичными ионами аргона согласуется с предположением о возрастании скорости рекомбинации на границе фоточувствительного слоя.

Пассивация поверхности МФЧЭ на основе гетероэпитаксиальных XBn -InGaAs структур напылением защитных покрытий из

сульфида цинка (ZnS), монооксида кремния (SiO) или фторида иттрия (YF₃) позволяет обеспечить защиту от воздействия низкоэнергетических ионов аргона на основные фотоэлектрические параметры и, возможно, повышает срок сохраняемости МФПУ на основе *XBn-InGaAs* структур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дирочка А. И., Курбатов Л. Н. Фотоэлектроника. Базовые лекции по электронике. Т. 2. Твёрдотельная электроника. – М.: Техносфера, 2009.
2. Пономаренко В. П. Квантовая фотосенсорика. – М.: АО «НПО «Орион», 2018.
3. Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И., Залетаев Н. Б. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 131.
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. Седнев М. В., Болтарь К. О., Иродов Н. А., Демидов С. С. // Прикладная физика. 2015. № 3. С. 73.
6. Трухачева Н. С., Седнев М. В., Трухачев А. В., Макарова Э. А. // Прикладная физика. 2018. № 2. С. 41.
7. Маделунг О. Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп. – М.: Мир, 1967. С. 57, 27, 60.
8. Белый В. И., Белосудов В. П. Свойства поверхности соединений A₃B₅ и физико-химические процессы на границе раздела A₃B₅ – металл: сб. научных трудов «Современные проблемы физической химии поверхности полупроводников». – Новосибирск: «Наука», 1988. С. 43.
9. Viktorovitch P. // Revue Phys. Appl. 1990. Vol. 25. P. 895.
10. Green A. M., Spicer W. E. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1993. Vol. 11. P. 1061.
11. Бессолов В. Н., Лебедев М. В. // ФТП. 1998. Т. 32. № 11. С. 1281.
12. Carpenter M. S., Melloch M. R., Lundstrom M. S., Tobin S. P. // Appl. Phys. Lett. 1988. Vol. 52. P. 2157.
13. Яковлева Н. И., Болтарь К. О., Седнев М. В., Патрашин А. И., Иродов Н. А. // Прикладная физика. 2014. № 6. С. 45.
14. Mauk M. G., Xu S., Arent D. J., Mertens R. P., Borghs G. // Appl. Phys. Lett. 1989. Vol. 54. P. 213.
15. Новиков Е. Б., Хасиева П. В., Шакиашвили Г. А. // ФТП. 1990. Т. 24. С. 1276.
16. Андреев И. А., Куницына Е. В., Лантрапов В. М., Львова Т. В., Михайлова М. П., Яковлев Ю. П. // ФТП. 1997. Т. 31. С. 653.
17. Sinharoy S. // Thin Solid Films. 1990. Vol. 187. P. 231.
18. Spicer W. E., Lindau I., Skeath P. R., Su C. Y., Chye P. W. // Phys. Rev. Lett. 1980. Vol. 44. № 6. P. 420.
19. Spicer W. E., Chye P. W., Skeath P. R., Su C. Y., Lindau I. // Journal of Vacuum Science and Technology. 1979. Vol. 16. P. 1422.

PACS: 85.60.-q

Focal plane arrays based on *XBn-InGaAs* structures surface passivation influence of methods on the current-voltage characteristics

A. V. Trukhachev¹, N. S. Trukhacheva¹, M. V. Sednev¹, and K. O. Boltar^{1,2}

¹ Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orionmoscow@mail.ru

² Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

Received May 11, 2022

*The focal plane arrays based on *XBn-InGaAs* structures passivated by different dielectric materials (ZnS, SiO, YF₃) after low energy argon ions treatment are presented current-voltage characteristics. Surface passivation coating were obtained by magnetron sputtering and resistive deposition methods of dielectric materials (ZnS, SiO, YF₃). It was shown, that low energy argon ions treatment leads to the unpassivated focal plane arrays dark current drastic increase.*

Keywords: *XBn-InGaAs structure, surface passivation, SiO, ZnS, YF₃, current-voltage characteristic.*

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-3-56-62

REFERENCE

1. I. Dirochka and L. N. Kurbatov, *Photoelectronics. Basic lectures on electronics. Tom. 2. Solid-state electronics.* (Technosphere, Moscow, 2009).
2. V. P. Ponomarenko, *Quantum photosensory.* (JSC "NPO "Orion", Moscow, 2018).
3. I. D. Burlakov, L. Ya. Grinchenko, A. I. Dirochka, and N. B. Zaletaev, *Usp. Prikl. Fiz.* **2** (2), 131 (2014).
4. J. K. Kim, M. J. Cich, G. A. Keeler, S. D. Hawkins, and T. R. Fortune, *Applied Physics Letters* **95**, 031112 (2009).
5. M. V. Sednev, K. O. Boltar, N. A. Irodov, and S. S. Demidov, *Applied Physics*, No. 3, 73 (2015) [in Russian].
6. N. S. Trukhacheva, M. V. Sednev, A. V. Trukhachev, E. A. Makarova, and K. V. Naumova, *Applied Physics*, No. 2, 41 (2018) [in Russian].
7. O. Madelung, *Physics of semiconductor compounds of elements of Groups III and V* (Mir, Moscow, 1967), pp. 27, 57, 60.
8. V. I. Bely and V. R. Belosudov, *Properties of the surface of A₃B₅ compounds and physico-chemical processes at the interface of A₃B₅ – metal / Modern problems of physical chemistry of the surface of semiconductors, Collection of scientific papers* ("Science", Novosibirsk, 1988), p. 43.
9. P. Viktorovitch, *Revue Phys. Appl.* **25**, 895 (1990).
10. A. M. Green and W. E. Spicer, *J. Vac. Sci. Technol. A* **11**, 1061 (1993).
11. V. N. Bessolov and M. V. Lebedev, *Semiconductors* **32** (11), 1141 (1998).
12. M. S. Carpenter, M. R. Melloch, M. S. Lundstrom, and S. P. Tobin, *Appl. Phys. Lett.* **52**, 2157 (1988).
13. N. I. Yakovleva, K. O. Boltar, M. V. Sednev, A. I. Patrashin, and N. A. Irodov, *Applied Physics*, No. 6, 45 (2014) [in Russian].
14. M. G. Mauk, S. Xu, D. J. Arent, R. P. Mertens, and G. Borghs, *Appl. Phys. Lett.* **54**, 213 (1989).
15. E. B. Novikov, R. V. Khasieva, and G. A. Shakiashvili, *Physics and technics of semiconductors* **24**, 1276 (1990).
16. I. A. Andreev, E. V. Kunitsyna, V. M. Lantratov, T. V. Lvova, M. P. Mikhailova, and Yu. P. Yakovlev, *Physics and technics of semiconductors* **31**, 653 (1997).
17. S. Sinharoy, *Thin Solid Films* **187**, 231 (1990).
18. W. E. Spicer, I. Lindau, P. R. Skeath, C. Y. Su, P. W. Chye, *Phys. Rev. Lett.* **44** (6), 420 (1980).
19. W. E. Spicer, P. W. Chye, P. R. Skeath, C. Y. Su, and I. Lindau, *Journal of Vacuum Science and Technology* **16**, 1422 (1979).