

Способ утонения обратной стороны матричного модуля InSb (100) и его влияние на кристаллическую структуру приповерхностных слоев

Е. В. Мирофьянченко, А. Е. Мирофьянченко, В. С. Попов

Проведено сравнение двух способов утонения обратной стороны матричного модуля антимолида индия (100) с применением абразивной и безабразивной шлифовки различными аналитическими методами. Показано, что включение дополнительного этапа механической шлифовки позволяет добиться существенного улучшения геометрии матричного модуля после финишной полировки в сравнении с безабразивной обработкой. Среднеарифметическое значение шероховатости поверхности после проведения всех этапов обработки не превышает допустимых значений. С помощью построения карт обратного пространства оценена степень влияния различных способов обработки на кристаллическую структуру материала.

Ключевые слова: утонение, полировка, шлифовка, ХДП, ХМП, рентгеновская дифрактометрия, атомно-силовая микроскопия, оптическая микроскопия, средневолновой ИК-диапазон спектра, InSb.

Ссылка: Мирофьянченко Е. В., Мирофьянченко А. Е., Попов В. С. // Прикладная физика. 2020. № 2. С. 46.

Reference: E. V. Mirofyanchenko, A. E. Mirofyanchenko, and V. S. Popov, Appl. Phys., No. 2, 46 (2020).

Введение

Антимонид индия является одним из самых востребованных материалов для производства фотоприёмных устройств (ФПУ) средневолнового инфракрасного (ИК) диапазона спектра. Несмотря на то, что технология

производства ИК ФПУ на InSb является хорошо отработанной, требования к предельным характеристикам детекторов постоянно повышаются и требуют постоянного поиска новых технологических решений. Предельные характеристики ИК ФПУ на основе InSb в значительной степени определяются качеством обработки поверхности полупроводникового материала [1–3].

В технологическом цикле производства МФПУ пластина InSb подвергается обработке как с лицевой, так и с обратной сторон, включающей химико-механическую (ХМП) и химико-динамическую полировку (ХДП), плазмохимическое травление (ПХТ) и др., которые потенциально могут изменять кристаллическую структуру материала и вызывать повреждения приповерхностных слоев.

Важным технологическим этапом является процесс утонения подложки антимолида индия, осуществляемый после завершения технологических этапов формирования на лицевой стороне пластины фоточувствительных элементов, резки на отдельные модули и сты-

Мирофьянченко Екатерина Васильевна^{1,2}, вед. инженер-конструктор.

Мирофьянченко Андрей Евгеньевич^{1,2}, нач. научно-исследовательской лаборатории.

Попов Виктор Сергеевич^{1,2}, нач. специального конструкторско-технологического центра, к.х.н.

¹ АО «НПО «Орион».

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

E-mail: mirofianchenko@gmail.com

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет).

Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный,

Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 15 мая 2020 г.

© Мирофьянченко Е. В., Мирофьянченко А. Е., Попов В. С., 2020

ковки с кремниевой интегральной схемой считывания (БИС). По завершении процесса на обратной стороне формируется антиотражающее покрытие (АОП).

Утонение модуля InSb – сложный технологический процесс, необходимый для улучшения пространственного разрешения и повышения квантовой эффективности ФПУ и должен удовлетворять следующим требованиям:

1) полное отсутствие остаточного нарушенного слоя, который может привести к увеличению скорости поверхностной рекомбинации и повышенным токам утечкам [4];

2) значение среднеарифметической шероховатости поверхности, Ra, InSb не должно превышать 1 нм для лучшей адгезии антиотражающего покрытия [5];

3) отсутствие завальцовки («завалов») краёв (искажение плоскопараллельности поверхности, происходящее в том случае, когда у самых краёв снимается больше материала, чем с остальной поверхности [6]), так как перепады толщины ФЧЭ приводят к возникновению повышенных значений напряжений в получаемой структуре;

4) сохранение плоскостности матричного модуля для однородности распределения сигнала с фоточувствительных элементов.

Известно, что при полирующем травлении вблизи края обрабатываемой поверхности скорость растворения всегда немного больше [7], поэтому применяемый авторами [8] безабразивный способ утонения обратной стороны матричного модуля, хоть и не вносит дополнительных напряжений, но может формировать так называемые «завалы» (завальцовки) на краях пластины. Неравномерность толщины ФЧЭ вызывает появление избыточных напряжений в тонкой структуре, что может приводить к образованию трещин и отслоению АОП при последующих операциях. Для планаризации поверхности полупроводниковых материалов успешно применяется механическая шлифовка [9]. При этом механическая шлифовка имеет свои ограничения и по мнению ряда авторов [10, 11] может быть применена только до толщин в 30-40 мкм из-за вносимых напряжений, после которого следует этап свободного травления (ХДП).

В данной работе проводилось сравнение двух способов утонения обратной стороны пластин InSb с использованием методов опти-

ческой и атомно-силовой микроскопии, а также рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения.

Эксперимент

Для исследований использовались нелегированные пластины антимонида индия ориентации (100) *n*-типа проводимости с концентрацией носителей заряда $\sim 4\text{--}6 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ при 77 К. Плотность дислокаций контролировалась методом ямок травления и составила $\sim 10^2 \text{ см}^{-2}$ для всех образцов. Лицевая и обратная сторона пластин обрабатывалась согласно [12] до толщины пластины 550 мкм. После проведения дисковой резки, модули размером ($\sim 9,6 \times 11$ мм) разделили. На трёх модулях проводили процесс утонения согласно режиму I (режим I, рис. 1). На трёх других провели процесс утонения, включающей этап механической шлифовки (режим II, рис. 1). ХМП в режиме I проводили с использованием ткани с применением травителя на основе молочной кислоты, перекиси водорода, этиленгликоля и раствора хлорида натрия [8]. Этап ХДП проводили в гидродинамических условиях по способу вращающегося диска в устройстве типа «бочка» в травителе на основе винной, плавиковой, азотной кислот и перекиси водорода [8]. Процесс ХМП в режиме II проводили в тех же условиях, что и в режиме I, абразивная шлифовка осуществлялась на установке Logitech PM5 с использованием алмазной суспензии с размером частиц 1 мкм. Этап ХДП осуществляли в тех же условиях, что и в режиме I.

Режим I	Режим II
ХМП Утонение до толщины базовой области фоточувствительного элемента 80±100 мкм	ХМП 220±200 мкм
	Абразивная шлифовка (1 мкм)
ХДП 10±15 мкм	ХДП 10±15 мкм

Рис. 1. Блок-схема процессов полировки.

Результаты и обсуждение

Первый этап сравнения качества утонения двумя способами состоял из оценки поверхности на каждом этапе обработки с помощью оптической микроскопии в режиме дифференциально-интерференционного контраста (ДИК) (Nikon LV150). В основе метода лежит интерференция поляризованного света [13]. Использование данного режима позволяет получить информацию о рельефе поверхности, недоступной в режимах светлого и темного поля.

На рисунке 2 показан левый верхний угол матричного модуля после первого и второго этапов обработки согласно режиму I. На рис. 2, б показан левый верхний угол после этапа ХДП и нанесения просветляющего покрытия.

По существенной разнице в цветовой гамме изображения в режиме ДИК уже после первого этапа обработки (ХМП) можно судить о значительном истончении периферических областей матричного модуля по сравнению с центральной частью. После этапа финишной

обработки (ХДП) неоднородность утонения достигает критических значений по краям матричного модуля, приводя к полной непригодности фоточувствительных элементов в угловых областях. На рис. 2, б полное отсутствие материала InSb в угловой области позволяет наблюдать In столбы, расположенные между матричным модулем и БИС считывания, что свидетельствует о полной потере фоточувствительных элементов в данной области.

В случае режима II после первого этапа обработки (ХМП) в режиме ДИК также наблюдаются перепады высот на краях модуля (рис. 3, а), однако после проведения этапа механической шлифовки (рис. 3, б) удалось добиться высокой однородности по толщине. Механическая шлифовка позволила добиться настолько равномерной поверхности по всему матричному модулю, что даже после финишной обработки поверхности с толщиной удаляемого слоя 50–70 мкм по режиму II отсутствовали «завалы» (завальцовки) по краям пластины (рис. 3, в).

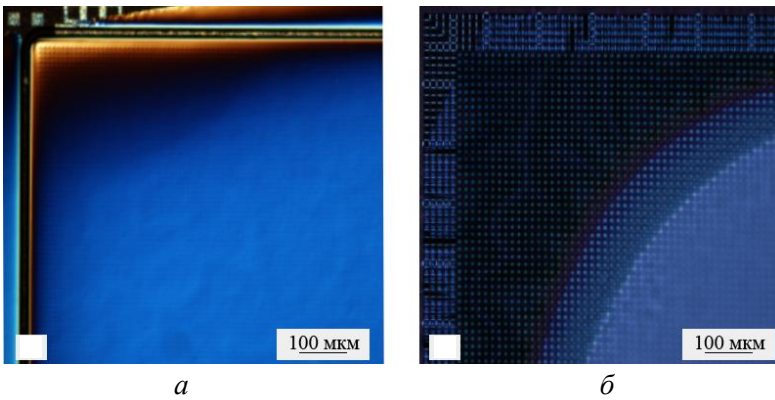


Рис. 2. Изображение левого верхнего угла ФЧЭ после проведения последовательных этапов утонения (режим I): а – этап ХМП; б – этап ХДП.

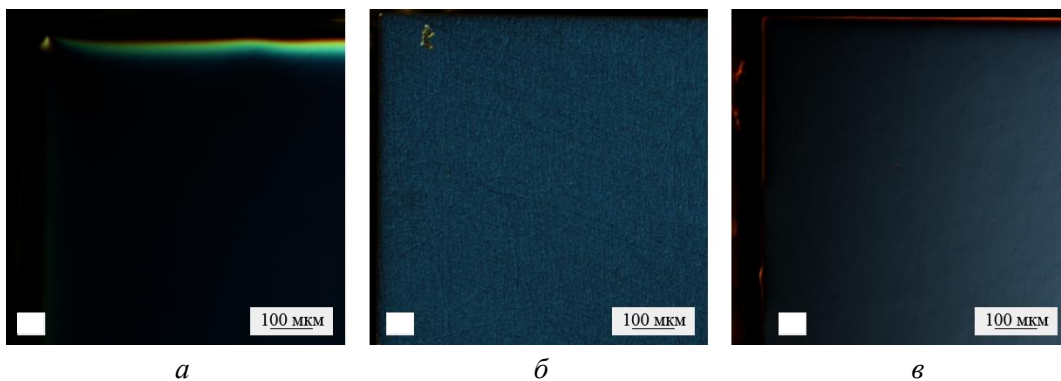


Рис. 3. Изображение верхнего левого угла МФЧЭ после проведения последовательных этапов утонения (режим II): а – этап ХМП; б – абразивная шлифовка; в – этап ХДП.

Оценку шероховатости поверхности проводили на атомно-силовом микроскопе (АСМ) Ntegra Maximus в полуконтактном режиме сканирования. Среднее значение среднеарифметической шероховатости, Ra, на серии сканов размером 25×25 мкм после каждого этапа обработки для обоих режимов представлены в табл. 1.

Поскольку первым этапом обработки для обоих режимов является ХМП, с различием лишь в толщине удаляемых слоев, то шероховатость поверхности должна находиться на

одном уровне, что и подтверждается данными из табл. 1. После этапа механической шлифовки по режиму II с применением абразива значение Ra значительно возросло, поэтому качество обработки поверхности после проведения финишной обработки поверхности (ХДП), с точки зрения шероховатости, несколько хуже, чем для режима I. Тем не менее значение Ra удовлетворяет требованиям, предъявляемым при обработке обратной стороны пластины [5]. Профили поверхности после каждого этапа обработки показаны на рис 4.

Таблица 1

Значение параметра Ra после каждого этапа обработки для режимов I-II

Режим	Значение среднеарифметической шероховатости, Ra, нм		
	Этап 1 (ХМП)	Этап 2 (механическая шлифовка) 1 мкм	Этап 3 (ХДП)
I	0,52	–	0,59
II	0,55	4,95	0,81

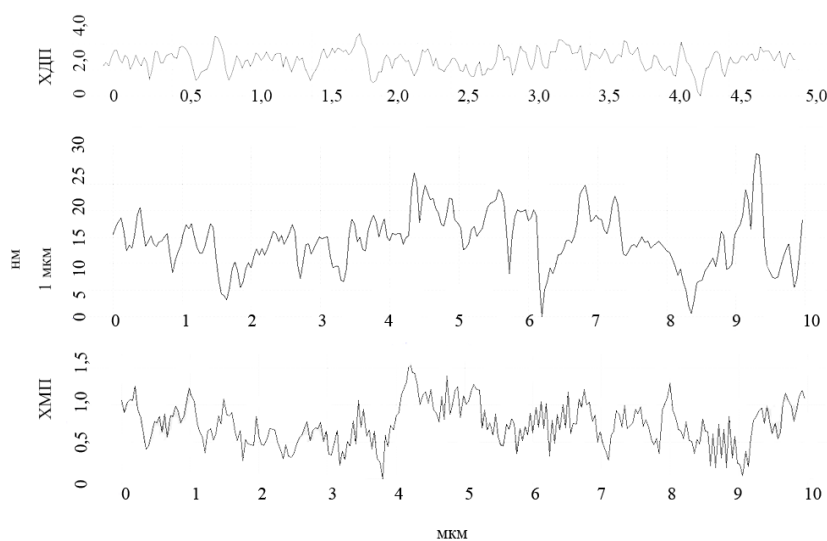


Рис. 4. Профили поверхности после каждого этапа для режима II.

Выше описанные методы анализа качества поверхности позволяют оценить геометрию модуля на краях структуры и шероховатость поверхности, но способны провести оценку структурных свойств приповерхностной области материала. Как упоминалось ранее, после проведения операции утонения, нарушенный слой должен отсутствовать, так как дефекты образующие в этой области материала могут непосредственно влиять на свойства p-n-перехода и ухудшать электрофизические характеристики прибора.

Структурные характеристики исследовались методами рентгеновской дифрактомет-

рии высокого разрешения на многоцелевом рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Discover в двух- и трехкристальной геометрии (излучение Cu Kα1 1,54 Å). Значение полной ширины на половине высоты (ПШПВ) кривых дифракционного отражения (КДО), рассчитанная в рамках динамической теории рассеяния рентгеновских лучей, [14] составляет 18 угловых секунд. Значения ПШПВ КДО для отражения (004) для двух режимов утонения приведены в табл. 2. Значение ПШПВ является комплексной оценкой структурного совершенства, используемая многими авторами [15, 16].

Таблица 2

Значения ПШПВ КДО для отражения (004) для двух режимов утонения (угловые секунды)

Режим	Значения ПШПВ КДО (угловые секунды)		
	Этап 1 (ХМП)	Этап 2 (механическая шлифовка) 1 мкм	Этап 3 (ХДП)
I	30	–	20
II	28	34	22

Значения ПШПВ КДО на финишных этапах близки к теоретическим значениям. Оценить влияние обработки на структуру материала не удастся. Таким образом, обычно применяемая для характеристики нарушенных слоёв значение ПШПВ кривой качания не передает степень искажения поверхностного слоя антимида индия на финишных этапах обработки. Для дальнейшей оценки качества полировку использовали интенсивность диффузного рассеяния [17].

Сравнение структурного совершенства приповерхностного слоя после финишного этапа обработки проводилось для симметричного наклонного отражения (220). Данная геометрия эксперимента позволяет анализировать тонкие приповерхностные слои. На рис. 5 показана карта обратного пространства после проведения всех этапов процессов утонения для модифицированной технологии.

Для количественного сравнения качества обработки поверхности после финишного этапа утонения по двум технологиям применялась разработанная авторами методика, основанная на разнице между значением диффузной компоненты рентгеновского рассеяния и динамического рассеяния от образца для наклонного симметричного отражения (220) (1). Оценка качества кристаллической структуры полимеров на основании значения интенсивности, интегрированной по всем измерениям карты обратного пространства, использовалась авторами работы [18]. Однако, данный метод не позволяет оценить структурные нарушения, возникшие в приповерхностной области материала, так как их вклад в общую интенсивность достаточно мал. Был использован метод оценки степени структурных нарушений по значению интенсивности, дополнительно присутствующей над коге-

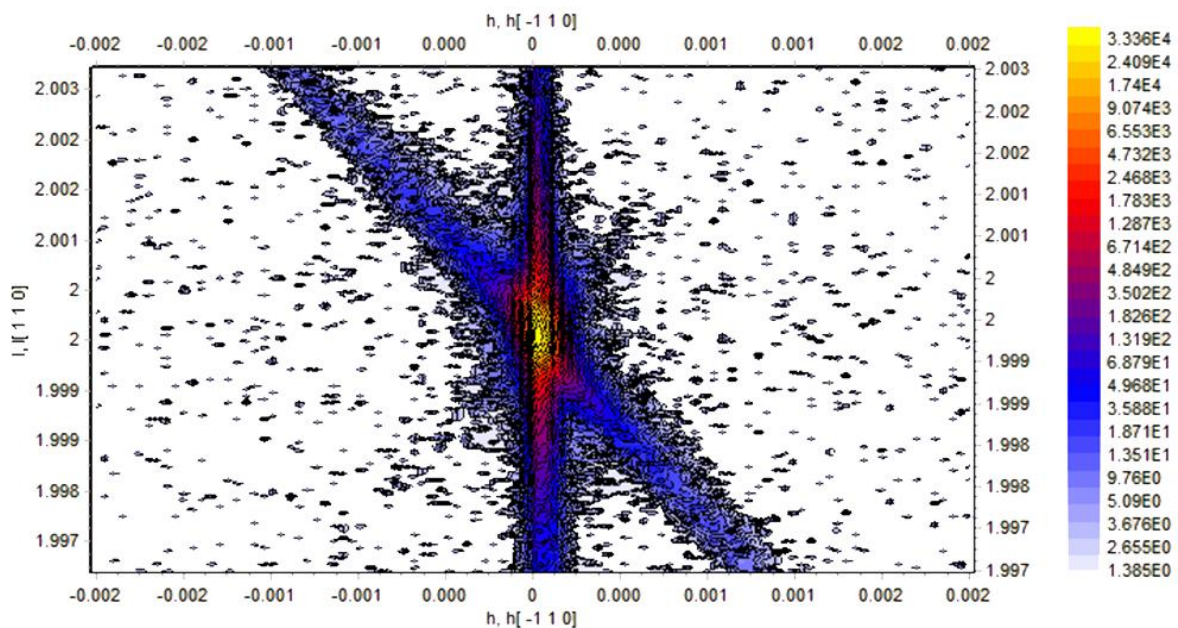


Рис. 5. Карта обратного пространства (220) утонённой структуры после проведения всех этапов обработки режима II.

рентной компонентой рентгеновского излучения:

$$I_{odd} = 4\pi \iint I_{excess} q_x, q_y dq_x dq_y,$$

где I_{excess} уровень интенсивности, дополнительно присутствующий над выбранным минимальным уровнем, который соответствует минимальной интенсивности динамической компоненты рентгеновского излучения. Значения параметра I_{odd} для образцов обрабатываемых по режиму I и II составляет 2,25 и $2,31 \times 10^{-3}$ относительных единиц соответственно. Данные значения различаются незначительно, что свидетельствует о том, что с точки структурных нарушений, механическая шлифовка, на промежуточном этапе, привносит структурные нарушения, которые могут быть устранены с помощью ХДП.

Выводы

Проведено сравнение двух способов утонения обратной стороны матричного модуля антимонида индия (100) методами оптической и атомно-силовой микроскопии, рентгеновской дифрактометрии. Включение дополнительного этапа механической шлифовки позволяет добиться улучшенной геометрии матричного модуля после финишной полировки без завальцовки краев. Значение $R_a = 0,81$ нм после финишной обработки по режиму II несколько уступает режиму I, где значение R_a не превышает 0,59 нм, из-за резкого увеличения шероховатости на этапе механической шлифовки, при этом оба значения удовлетворяют требованиям к шероховатости при утонении обратной стороны матричного модуля. Методами рентгеновской дифрактометрии показано, что применение абразивной шлифовки вызывает появление дополнительного количества дефектов и увеличивает значение ПШПВ КК в среднем на 20 %. Однако этап ХДП позволяет устранить нарушенный слой, возникший на предыдущем этапе обработки. С помощью карт обратного пространства показано, что оба способа обработки поз-

воляют проводить утонение с минимальными нарушениями кристаллической решетки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang W., Fan Y., Si J., Wu W., Hou Z. / 6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optoelectronic Materials and Devices for Sensing, Imaging, and Solar Energy (Xiamen. 2012). P. 772–778.
2. Allen L. P., Dallas G., Blanchet K., Vangala S. R., Santeufemio C., Goohue W. D., Roehl E., Jones C. E., Barton J., Zide B., Difilippo V., Jones K. S. // Defense and Security Symposium (Orlando. 2007). P. 65–73.
3. Levchenko I., Tomashyk V., Stratiychuk I., Malanych G., Korchoviy A., Kryvyi S., Kolomys O. // Applied Nanoscience. 2018. Vol. 8. P. 949.
4. Rogalski A., Adamiec K., Rutkowski J. Narrow-gap Semiconductor Photodiodes. – Washington: SPIE Publications, 2000.
5. Луфт Б. Д. Физико-химические методы обработки поверхности полупроводников. – М.: Радио и связь, 1982.
6. Xie X., Boning D. / 2015 MRS Spring Meeting (San Francisco. 2005). P. W5.1.1–W5.1.11.
7. Перевоицков В. А., Гусев В. К. // Журн. прикл. химии. 1970. Т. 43. № 6. С. 1238.
8. Киселева Л. В., Лопухин А. А., Мезин Ю. С., Савостин А. В., Власов П. В., Вяткина О. С. // Прикладная физика. 2015. № 5. С. 84.
9. Mullany B., Byrne G. // J. of Materials Processing Technology. 2003. Vol. 132. № 1-3. P. 28.
10. Meng Q., Zhang X., Lu Y., Si J. // Opt Quant Electron. 2017. Vol. 49. P. 211.
11. Zhang X., Meng Q., Zhang L., Lv Y. // Infrared Physics & Technology. 2014. V. 63. P. 28.
12. Болтарь К. О., Власов П. В., Ерошенко В. В., Лопухин А. А. // Прикладная физика. 2014. № 4. С. 45.
13. Анисович А. Г. // Литье и металлургия. 2012. № 3 (67). С. 147.
14. Боуэн Д. К. Высокора разрешающая рентгеновская дифрактометрия и топография. – СПб.: Наука, 2002.
15. Carini G. A., Samarda G. S., Zhong Z., Sidons D. P., Bolotnikov A. E., Wright G. W., Barber B., Arnone C., James R. B. // J. Electronic Materials. 2005. Vol. 34. № 6. P. 804.
16. Carini G. A., Arnone C., Bolotnikov A. E., Samarda G. S., Wames R. DE, Dinan J. H., Markunas J. K., Raghathamachar B., Sivananthan S., Smith R., Zhao J., Zhong Z., James R. B. // J. Electronic Materials. 2006. Vol. 35. P. 1495.
17. Park S. H., Chang J. H. // Journal of the Korean Physical Society. 2006. Vol. 49. P. 934.
18. Alexander L. E. X-Ray Diffraction Methods in Polymer Science. – New York: Wiley-Interscience, 1969.

The influence of back thinning technique of the InSb (100) FPA on its geometric characteristics and crystal structure

E. V. Mirofyanchenko^{1,2}, A. E. Mirofyanchenko^{1,2}, and V. S. Popov^{1,2}

¹ Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

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

Received May 15, 2020

Two methods of back thinning of InSb (100) FPA using abrasive and non-abrasive polishing are compared by various analytical methods. It is shown that an extra stage of mechanical grinding allows to achieve a significant improvement in the geometry of the FPA after finishing polishing in comparison with non-abrasive technique. Finish value the arithmetical mean height does not exceed the permissible values. The degree of influence of various processing methods on the crystal structure of the material is estimated by the reciprocal space maps.

Keywords: thinning, polishing, grinding, CMP, X-ray diffractometry, atomic force microscopy, optical microscopy, mid-wave IR spectral range, InSb.

REFERENCES

1. W. Wang, Y. Fan, J. Si, W. Wu, and Z. Hou, in *Proc. 6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optoelectronic Materials and Devices for Sensing, Imaging, and Solar Energy* (Xiamen, 2012), pp. 772–778.
2. L. P. Allen, G. Dallas, K. Blanchet, S. R. Vangala, C. Santeufemio, W. D. Goohue, E. Roehl, C. E. Jones, J. Barton, B. Zide, V. Difilippo, and K. S. Jones, in *Proc. Defense and Security Symposium* (Orlando, 2007), pp. 65–73.
3. I. Levchenko, V. Tomashyk, I. Stratiychuk, G. Malanych, A. Korchoviy, S. Kryvyi, and O. Kolomys, *Applied Nanoscience* **8**, 949 (2018).
4. A. Rogalski, K. Adamiec, and J. Rutkowski, *Narrow-gap Semiconductor Photodiodes* (Washington: SPIE Publications, 2000).
5. B. D. Luft, *Physicochemical methods for surface treatment of semiconductors* (Radio and communication, Moscow, 1982).
6. X. Xie and D. Boning, in *Proc. 2015 MRS Spring Meeting* (San Francisco, 2005), pp. W5.1.1–W5.1.11.
7. V. A. Perevoshchikov and V. K. Gusev, *Journal. app. chemistry* **43**, 1238 (1970).
8. L. V. Kiseleva, A. A. Lopukhin, Yu. S. Mezin, A. V. Savostin, P. V. Vlasov, and O. S. Vyatkina, *Applied Physics*, No. 5, 84 (2015).
9. B. Mullany and G. Byrne, *J. of Materials Processing Technology* **132** (1-3), 28 (2003).
10. Q. Meng, X. Zhang, Y. Lu., and J. Si, *Opt Quant Electron* **49**, 211 (2017).
11. X. Zhang, Q. Meng, L. Zhang, and Y. Lv, *Infrared Physics & Technology* **63**, 28 (2014).
12. K. O. Boltar, P. V. Vlasov, V. V. Eroshenkov, and A. A. Lopukhin, *Applied Physics*, No. 4, 45 (2014).
13. A. G. Anisovich, *Casting and metallurgy* **67**, 147 (2012).
14. D. K. Bowen, *High-resolution X-ray diffractometry and topography* (Science, St. Petersburg, 2002).
15. G. A. Carini, G. S. Samarda, Z. Zhong, D. P. Siddons, A. E. Bolotnikov, G. W. Wright, B. Barber, C. Arnone, and R. B. James, *J. Electronic Materials* **34**, 804 (2005).
16. G. A. Carini, C. Arnone, A. E. Bolotnikov, G. S. Samarda, R. DE Wames, J. H. Dinan, J. K. Markunas, B. Raghathamachar, S. Sivananthan, R. Smith, J. Zhao, Z. Zhong, and R. B. James, *J. Electronic Materials* **35**, 1495 (2006).
17. S. H. Park and J. H. Chang, *Journal of the Korean Physical Society* **49**, 934 (2006).
18. L. E. Alexander, *X-Ray Diffraction Methods in Polymer Science* (Wiley-Interscience, New York, 1969).

