

УДК 621.315.592

Исследование двухстадийной диффузии цинка в гетероструктурах InGaAs/InP

Д. С. Андреев, И. В. Чинарева

Авторами исследовалась возможность подавления раннего краевого пробоя в планарных лавинных фотодиодах на основе гетероэпитаксиальных структур InP/InGaAs. Для этого использовалась диффузия цинка в запаянной ампуле при температурах 500 °С, 450 °С. Определены распределение носителей заряда в диффузионном слое и глубина диффузии как в монокристаллическом InP, так и в лавинной структуре на основе InP/InGaAs в зависимости от режима проведения диффузии. Распределение носителей заряда в диффузионном слое в монокристаллическом InP определялось методом электрохимического профилирования с последующим измерением CV-характеристик барьера электролит-полупроводник, а глубина p-n-перехода в лавинной структуре путем пересчета CV-характеристик p-n-переходов. В результате использования двухстадийной диффузии цинка была получена конфигурация p-n-перехода с заглубленной на 1,5 мкм центральной областью и мелкой периферией (охранным кольцом) на глубине 0,65 мкм. При этом напряжение пробоя фотодиода с охранным кольцом превышает на 3В напряжение пробоя фотодиода без охранного кольца, а уровень темновых токов у всех фотодиодов вплоть до пробоя не превышает 10 нА.

PACS: 79.20.Rf, 37.20.+j

Ключевые слова: планарный лавинный фотодиод, гетероструктура InGaAs/InP, диффузия цинка, двухстадийная диффузия, глубина p-n-перехода, CV- и IV-характеристики.

Введение

Планарные лавинные фотодиоды на основе InGaAs/InP являются детекторами коротковолнового ИК-диапазона, которые определяют технические характеристики современных оптоэлектронных приборов и систем [1, 2]. Для предотвращения раннего краевого пробоя в таких планарных лавинных фотодиодах (ЛФД) часто используют структуру p-n-перехода с заглубленной центральной областью и мелкой периферией [3—10], показанной на рис. 1.

Напряжение пробоя U резкого несимметричного p-n-перехода прямо пропорционально ширине области пространственного заряда w [11]:

$$U_B = \frac{E_m \times w}{2}, \quad (1)$$

где $E_m = 4,5 \times 10^5$ В/см — максимальная напряженность электрического поля в InP; w — ширина области пространственного заряда (ОПЗ).

Если толщина полупроводникового слоя d меньше ширины ОПЗ, то до лавинного пробоя произойдет прокол p-n-перехода. Таким образом, в эпитаксиальных n-n⁺-структурах с низкой концентрацией в n-слое ОПЗ ограничивается не концентрацией носителей, а его толщиной, что можно выразить следующим соотношением:

$$w = \sqrt{\frac{2\xi_s(\varphi_k - U)}{qNB}} \leq d. \quad (2)$$

Напряжение прокола U_{BT} :

$$\frac{U_{BT}}{U_B} = \left(\frac{w}{w_m} \right) \times \left(2 - \frac{w}{w_m} \right). \quad (3)$$

Для конфигурации, представленной на рис. 1, напряжение пробоя по периферии будет меньше, чем в центре за счет большего расстояния от p-n-перехода до гетерограницы InP/InGaAs.

Андреев Дмитрий Сергеевич, ведущий инженер-технолог.
Чинарева Инна Викторовна, ведущий инженер-технолог.
АО «НПО «Орион».

111538, Москва, ул. Косинская, 9.
Тел. (495) 672-20-31. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 17 июня 2016 г.

© Андреев Д. С., Чинарева И. В., 2016

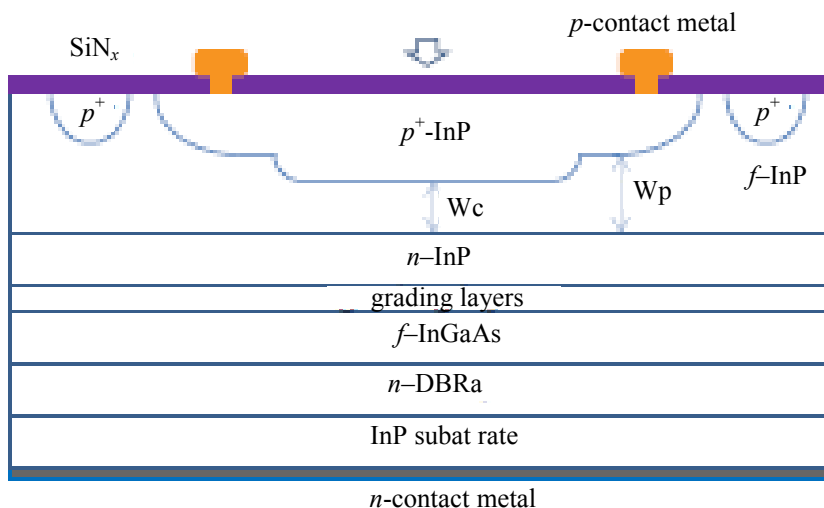


Рис. 1. Структура ЛФД.

Целью данной работы являлось исследование возможности подавления раннего краевого пробоя в планарных лавинных фотодиодах на основе гетероэпитаксиальных структур InP/InGaAs на основе конфигурации рис. 1. Для реализации подобной конфигурации авторы использовали метод двухстадийной диффузии цинка.

Описание тестовых структур и постановка экспериментов

Для изучения распределения концентрации носителей заряда в диффузионной области и предварительного выбора режимов диффузии была проведена серия экспериментов по диффузии Zn в монокристаллический InP с фоновой концентрацией $(1-10) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Диффузия проводилась в запаянной кварцевой ампуле из твердого источника Zn_3P_2 при температуре 500 °C и 450 °C. Сам процесс диффузии цинка в InP ранее детально исследовался и подробно описан в [12]. Профиль распределения концентрации носителей заряда по глубине определялся методом электрохимического профилирования и пересчета CV-характеристик барьера электролит-полупроводник на установке ECV Profiler. Погрешность измерения концентрации составила 20 %.

Кроме того, диффузия проводилась в лавинную эпитаксиальную структуру, выращенную методом МОС-гидридной эпитаксии. Структура состоит из следующих слоев, выращенных на подложке n-InP, легированной серой до концентрации $1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$:

- n-InGaAs поглощающий слой с концентрацией $N = 7 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и толщиной $d = 2,1 \text{ мкм}$;

- три нелегированных буферных InGaAsP-слоя различного состава соответствующего краю собственного поглощения при 1,1, 1,3 и 1,5 мкм для устранения барьера для дырок на границе раздела InGaAs/InP, толщиной 0,5 мкм каждый;

- зарядный легированный кремнием n^+ -InP слой с концентрацией $8 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и толщиной 0,3 мкм;
- умножающий нелегированный n-InP слой с концентрацией $1 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и толщиной 3,6 мкм.

Диффузия проводилась локально в отверстия, вскрытые в пассивирующей пленке Si_3N_4 . Топология и поперечное сечение тест-структуры показана на рис. 2.

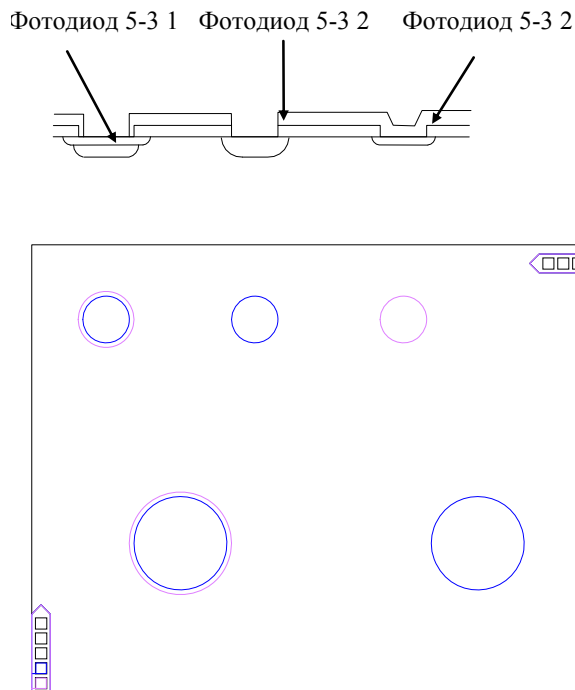


Рис. 2. Топология (вверху) и поперечное сечение тест-структуры (внизу).

Фотодиод 5-3 1 формировался путем двухстадийной диффузии в отверстие диаметром 300 мкм при 500 °С в течение 20 минут и в отверстие диаметром 250 мкм при температуре 450 °С в течение 40 минут. Таким образом, было сформировано мелкое охрannое кольцо и глубокая центральная область.

Фотодиод 5-3 2 формировался путем двухстадийной диффузии в отверстие диаметром 250 мкм при 500 °С в течение 20 минут и диффузии при температуре 450 °С в течение 40 минут. Таким образом, был сформирован фотодиод без охрannого кольца с глубокой диффузией.

Фотодиод 5-3 3 формировался путем диффузии в отверстие диаметром 250 мкм при 500 °С в течение 20 минут. Это фотодиод без охрannого кольца с мелкой диффузией.

После диффузии на тестовых структурах формировались металлизированные контакты к p^+ - и n^+ -областям напылением в вакууме золота с подслоем титана.

На тестовых структурах измерялись CV - и IV -характеристики. Измерения ВАХ производились с помощью анализатора параметров HP4145B, измерение CV -характеристик и последующий их пересчет по формуле (2) для определения профили распределения носителей заряда в лавинной структуре после проведения диффузии с помощью измерителя емкости HP4280A и системы тестирования параметров полупроводников HP4062B.

Результаты и обсуждение

Профиль распределения концентрации носителей заряда в монокристаллическом InP по глубине приведены на рис. 3.

Глубина диффузии определялась по изменению типа проводимости образца при электрохимическом профилировании. Определение типа проводимости материала на установке ECV Profiler осуществляется путем определения наклона вольт-фарадной характеристики электрохимического диода. Наклон $dC/dV > 0$ соответствует проводимости p -типа, а при $dC/dV < 0$ — n -типа. Также при изменении остаточного потенциала происходит определение типа проводимости путем получения разности потенциалов между полупроводниковым электродом и насыщенным каломельным электродом сравнения при освещении и без освещения.

Таким образом, была определена глубина диффузии для всех режимов диффузии: 0,7 мкм (450 °С 40'), 0,8 мкм (500 °С 20') и 1,8 мкм (500 °С 20'+450 °С 40'). Нужно отметить, что одностадийная диффузия дает мелкое залегание p - n -перехода, а двухстадийная — значительно глубже, что, скорее всего, объясняется ускорением диффузионных процессов за счет дефектов, образовавшихся в области первой диффузии и уменьшающей энергию активации примеси.

Профили распределения концентрации в эпитаксиальной структуре в различных тестовых элементах на одном кристалле приведены на рис. 4.

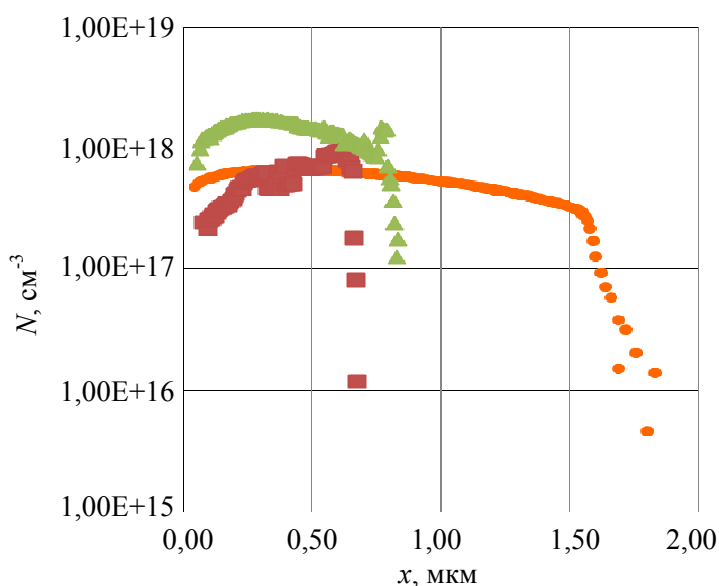


Рис. 3. Профили распределения концентрации носителей заряда в монокристаллическом InP при различных режимах диффузии. Кружки — 500 °С 20 мин + 450 °С 40 мин; квадраты — 450 °С 40 мин; треугольники — 500 °С 20 мин.

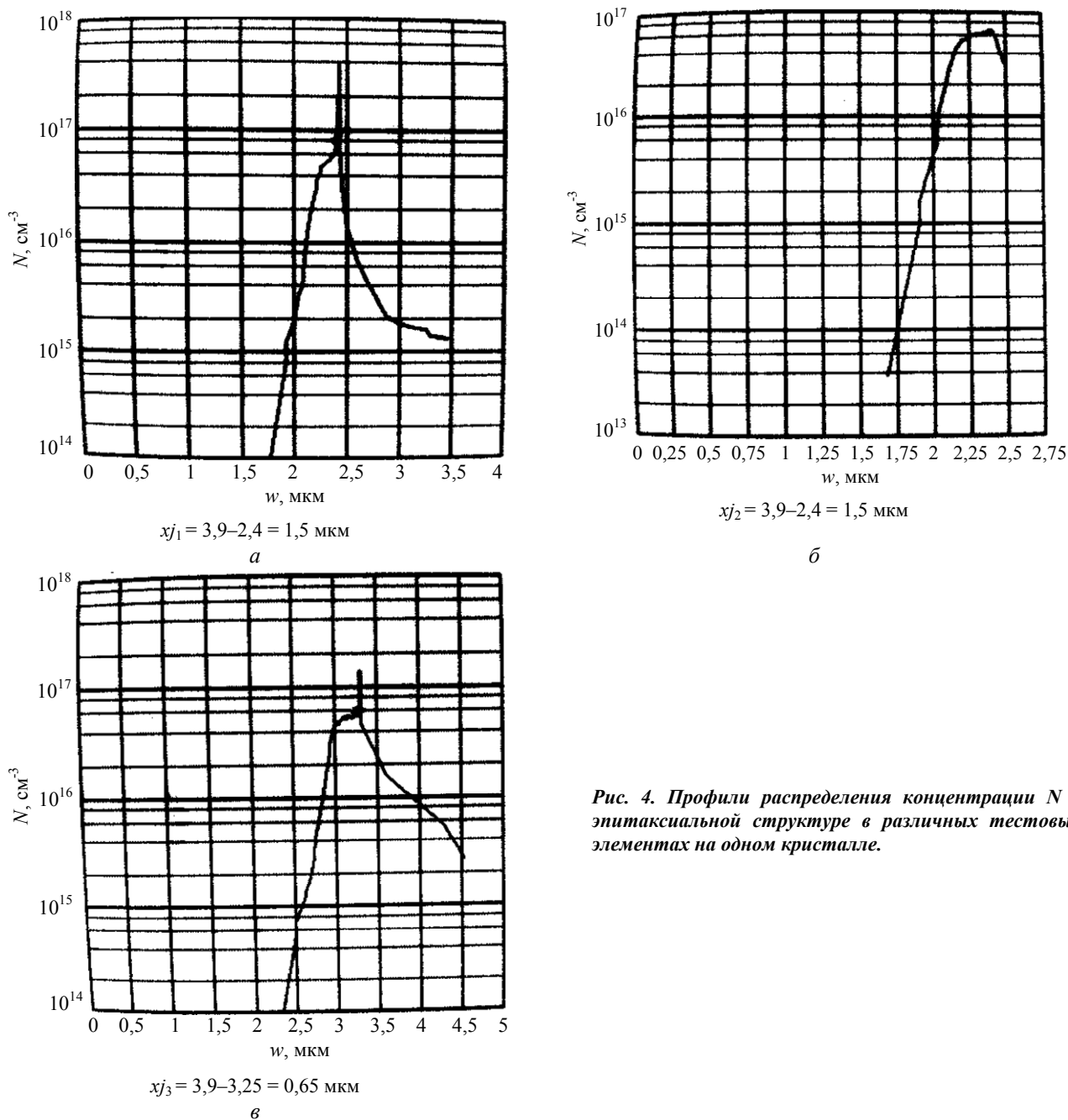


Рис. 4. Профили распределения концентрации N в эпитаксиальной структуре в различных тестовых элементах на одном кристалле.

Ширина ОПЗ w , ограниченная толщиной умножающего и зарядного слоев InP, составила 2,4 мкм для двухстадийной диффузии и 3,25 мкм для одностадийной диффузии.

Глубина диффузии:

$$x_{j1,2} = h_{n\text{-InP}} + h_{n^+\text{-InP}} - w = 1,5 \text{ мкм},$$

$$x_{j3} = h_{n\text{-InP}} + h_{n^+\text{-InP}} - w = 0,65 \text{ мкм} \quad (6)$$

Разница по глубине составила $\Delta x = 0,85$ мкм.

При этом глубина диффузии получилась одинаковая для центральной части диода с охранным кольцом и для диода без охранный кольцом. По сравнению с диффузией в монокристаллический InP, глубина диффузии в эпитаксиальном слое получилась несколько ниже. Это может быть связано с различиями в методах определения глубины диффузии.

Толщина образованной после диффузии области умножения в InP составляла 2,1 мкм и 2,95 мкм, для двухстадийной и одностадийной диффузии соответственно.

Вольт-амперные характеристики тестовых структур показаны на рис. 5.

Как видно из вольт-амперных характеристик, глубина диффузии и наличие охранный кольца влияет на форму ВАХ. При мелком p - n -переходе напряжение пробоя самое большое и составляет 80 В, но лавинного пробоя не образуется. У фотодиодов с глубоким p - n -переходом ВАХ соответствует лавинному пробоя. Напряжение пробоя фотодиода с охранным кольцом превышает напряжение пробоя фотодиода без охранный кольца на 3 В.

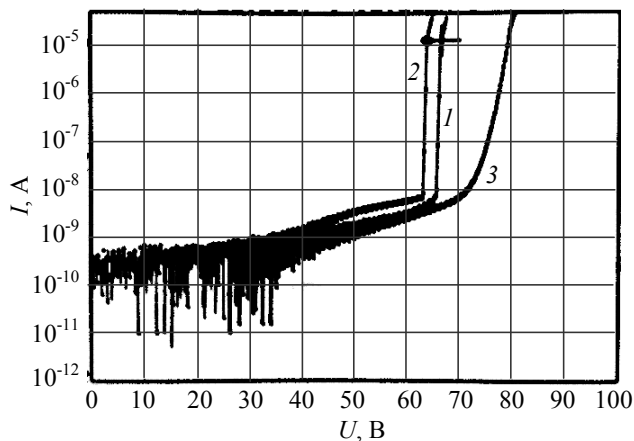


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики тестовых структур: 1 — $\varnothing 250$ мкм мелкая диффузия, + $\varnothing 300$ мкм, глубокая диффузия; 2 — $\varnothing 250$ мкм, глубокая диффузия; 3 — $\varnothing 250$ мкм, мелкая диффузия.

Уровень темновых токов у всех фотодиодов приблизительно одинаков и не превышает 10 нА вплоть до пробоя.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о возможности использования двухстадийной диффузии цинка в ампуле из источника Zn_3P_2 для получения структуры $p-n$ -перехода с заглубленной центральной областью и мелкой периферией, в которой подавляется ранний краевой пробой в планарных лавинных фото-

диодах на основе гетероэпитаксиальных структур InP/InGaAs. Для увеличения разницы по напряжению пробоя центральной области и области охранного кольца необходимо продолжать работу по оптимизации режимов двухстадийной диффузии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Современное состояние и магистральные направления развития современной фотоэлектроники. — М.: Физматкнига, 2010.
2. Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И. и др. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 131.
3. Yue A.-W., Wang R.-F., Xiong B., Shi J. // CHIN. PHYS. LETT. 2013. Vol. 30. No. 3. P. 038501-1.
4. Yoon K. H., Shin M. H., Park C. Y. // Journal of the Korean Physical Society. 2004. Vol. 45. P. S936.
5. Liu Y., Forrest S. R., Hladky J., Lange M. J., Olsen G. H., Ackley D. E. // J. Lightwave Tech. 1992. Vol. 10. No. 2. P. 182.
6. Itzler M. A., Loi K. K., McCoy S., Codd N., Komaba N. // Proc. of 12th Annual Meeting of Lasers and Electro-Optics Society. 1999. Vol. 2. P. 748.
7. Itzler M. A., Loi K. K., McCoy S., Codd N., Komaba N. // Proc. of 25th Optical Fiber Communication Conference. 2000. Vol. 4. P. 126.
8. Forrest S. R., O. Kim K., and Smith R. G. // Appl. Phys. Lett. 1982. Vol. 41. P. 95.
9. Itzler M. A., Wang C. S., McCoy S., Codd N., Komaba N. // ECOC. 1998. P. MoB03.
10. Будтолаева А. К., Хакуашев П. Е., Чинарева И. В. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 4. С. 386.
11. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1. — М.: Мир, 1984.
12. Андреев Д. С., Хакуашев П. Е., Чинарева И. В. и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 374.

Research of the two-phase diffusion of zinc in the InGaAs/InP heterostructures

D. S. Andreev and I. V. Chinareva

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

Received June 17, 2016

Authors investigated a possibility of suppression of an early regional breakdown in the planar avalanche photodiodes on the basis of heteroepitaxial structures of InP/InGaAs. Diffusion of zinc in the sealed ampoule at temperatures of 500 °C, 450 °C was used. Defined was a distribution of carriers of a charge in a diffusive layer and depth of diffusion both in the InP monocrystal, and in avalanche structure on the basis of InP/InGaAs depending on the conditions of diffusion. A distribution of charge carriers a diffusive layer in the InP monocrystal was obtained by method of electrochemical profiling on the subsequent measurement of CV characteristics of a barrier electrolyte-semiconductor, and depth $p-n$ junction in avalanche structure by recalculation of CV characteristics of $p-n$ junctions. As a result of use of the two-phase diffusion of zinc, a configuration of $p-n$ junction with the central region at a depth of 1.5 microns and the small periphery (a guarding ring) at depth of 0.65 microns has been received.

At the same time, the breakdown tension of the photodiode with a guarding ring exceeds on 3 V the breakdown tension of a photodiode without guarding ring, and the level of dark currents at all photodiodes up to breakdown doesn't exceed 10 nA.

PACS: 79.20.Rf, 37.20.+j

Keywords: planar avalanche photodiode, heteroepitaxial structures of InP/InGaAs, diffusion of zinc, two-phase diffusion, $p-n$ junction, CV and IV characteristics.

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, 2010) [in Russian].
2. I. D. Burlakov, L. Ya. Grinchenko, A. I. Dirochka, et al., *Usp. Prikl. Fiz.* **2**, 131 (2014).
3. A.-W. Yue, R.-F. Wang, B. Xiong, and J. Shi, *CHIN. PHYS. LETT.* **30**, 038501-1 (2013).
4. K. H. Yoon, M. H. Shin, and C. Y. Park, *Journal of the Korean Physical Society* **45**, S936 (2004).
5. Y. Liu, S. R. Forrest, J. Hladky, M. J. Lange, G. H. Olsen, and D. E. Ackley, *J. Lightwave Tech.* **10**, 182 (1992).
6. M. A. Itzler, K. K. Loi, S. McCoy, N. Codd, and N. Komaba, in *Proc. of 12th Annual Meeting of Lasers and Electro-Optics Society*. (1999. Vol. 2. P. 748).
7. M. A. Itzler, K. K. Loi, S. McCoy, N. Codd, and N. Komaba, in *Proc. of 25th Optical Fiber Communication Conference*. (2000. Vol. 4. P. 126).
8. S. R. Forrest, K. O. Kim, and R. G. Smith, *Appl. Phys. Lett.* 1982. **41**, 95 (1982).
9. M. A. Itzler, C. S. Wang, S. McCoy, N. Codd, and N. Komaba, *ECOC, MoB03* (1998).
10. A. K. Budtolaeva, P. E. Khakuashev, and I. V. Chinareva, *Usp. Prikl. Fiz.* **3**, 386 (2015).
11. S. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*. (New York: John Wiley and Sons. 1981; Mir, Moscow, 1984).
12. D. S. Andreev, P. E. Khakuashev, I. V. Chinareva, et al., *Usp. Prikl. Fiz.* **1**, 374 (2013).