

## Влияние разброса глубины $p$ - $n$ -перехода на параметры лавинных фотодиодов на основе InGaAs/InP

А. К. Будтолаев, П. Е. Хакуашев, И. В. Чинарёва

В данной статье говорится о допустимых отклонениях глубины диффузии, выборе оптимального типа эпитаксиальных структур для изготовления лавинных InGaAs/InP-фотодиодов. При изготовлении ЛФД особое внимание уделяется созданию определённой конфигурации электрического поля в структуре. Конфигурация электрического поля в структуре зависит от исходных параметров структуры и от процессов диффузии. Отклонения от параметров приводят к неработоспособности ЛФД. Было представлено два типа структуры: тип 1 – с равномерным легированием лавинной области (треугольное поле) и тип 2 – с пиковым легированием лавинной области (прямоугольное поле). Указанные эпитаксиальные структуры выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии. Типичные параметры структуры типа 1: лавинная область  $n$ -InP толщиной 3,9 мкм и уровнем легирования  $1,7 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , область поглощения  $n$ -InGaAs толщиной 2,35 мкм и уровнем легирования не более  $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Типичные параметры структуры типа 2: лавинная область  $n$ -InP толщиной 3,6 мкм и уровнем легирования не более  $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , заряженная область  $p^+$ -InP толщиной 0,3 мкм и уровнем легирования  $8,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , область поглощения  $n$ -InGaAs толщиной 2,1 мкм и уровнем легирования не более  $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . В обеих структурах  $p$ - $n$ -переход создавался в лавинной области  $n$ -InP методом диффузии цинка. Для каждой структуры при различных глубинах  $p$ - $n$ -перехода, создаваемого диффузией, рассчитывалось напряжение, при котором обеспечивался коэффициент умножения равный 10. Структура типа 1 работоспособна в диапазоне глубин  $p$ - $n$ -перехода  $x_0 = (1,77-2,18)$  мкм при рабочих напряжениях (56–75) В. Допустимый разброс  $\Delta x_0 = 0,41$  мкм ( $\pm 10$  %). Структура типа 2 работоспособна в диапазоне глубин  $p$ - $n$ -перехода  $x_0 = (2,50-3,40)$  мкм при рабочих напряжениях (49–61) В. Допустимый разброс  $\Delta x_0 = 0,90$  мкм ( $\pm 15$  %). При изготовлении InGaAs/InP ЛФД структура с пиковым легированием в лавинной области (тип 2) обладает большей технологической устойчивостью по сравнению со структурой с равномерным легированием лавинной области (тип 1). Допустимые отклонения по глубинам  $p$ - $n$ -перехода составляют ( $\pm 15$  %) для структуры типа 2, и ( $\pm 10$  %) для структуры типа 1.

**Ключевые слова:** лавинный фотодиод, эпитаксиальные гетероструктуры, InGaAs/InP, глубина  $p$ - $n$ -перехода.

### Введение

Одной из основных задач при изготовлении лавинных InGaAs/InP-фотодиодов (ЛФД) является создание определенной конфигурации электрического поля в структуре, которое отвечает за характеристики лавинного фотодиода [1–3]. Конфигу-

рация поля определяются как параметрами исходных эпитаксиальных структур, так и процессами диффузии при изготовлении ЛФД (глубиной  $p$ - $n$ -перехода).

Отклонения от необходимых параметров эпитаксиальных структур либо от необходимых параметров диффузии приводят к неработоспособности ЛФД. Оценка требований к параметрам слоев  $p^+i-n-i-n^+$ -структуры, при которых возможно достижение минимальных значений рабочего напряжения при заданном значении коэффициента умножения и при отсутствии заметного вклада в темновой ток туннельной компоненты была проведена в [4].

Целью данной работы являлось определение допустимых отклонений глубины диффузии и выбор оптимального типа эпитаксиальных структур

Будтолаев Андрей Константинович, ведущий инженер-технолог.

Хакуашев Павел Евгеньевич, зам. начальник ПТК по производству, к.т.н.

Чинарёва Инна Викторовна, ведущий инженер-технолог. АО «НПО «Орион».

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

Тел. 8 (495) 672-20-31. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 17 марта 2017 г.

© Будтолаев А. К., Хакуашев П. Е., Чинарёва И. В., 2017

для изготовления лавинных InGaAs/InP-фото-диодов.

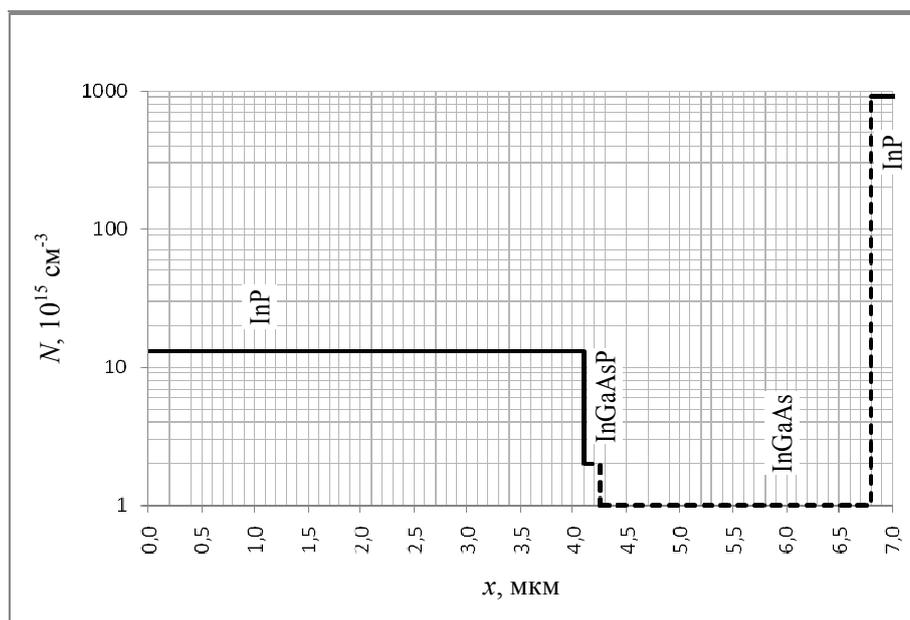
### Типы эпитаксиальных структур

Для изготовления InGaAs/InP-ЛФД используются два типа структур: тип 1 – с равномерным легированием лавинной области (треугольное поле) и тип 2 – с пиковым легированием (прямоугольное поле). Указанные эпитаксиальные структуры выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии [5]. Типичные параметры структуры типа 1: лавинная область *n*-InP толщиной 3,9 мкм и уровнем легирования  $1,7 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , область поглощения *n*-InGaAs толщиной 2,35 мкм и уровнем легирова-

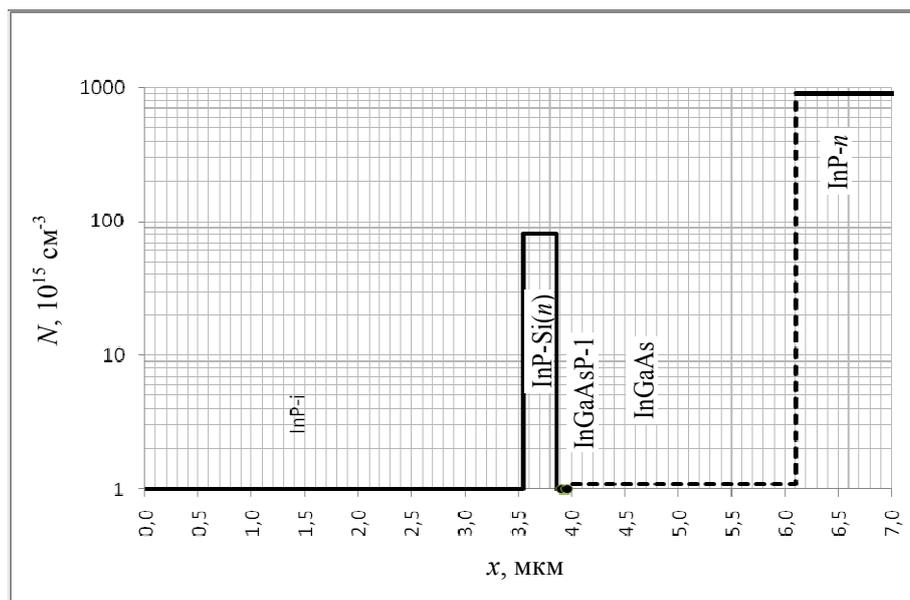
ния не более  $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Типичные параметры структуры типа 2: лавинная область *n*-InP толщиной 3,6 мкм и уровнем легирования не более  $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , зарядная область *n*<sup>+</sup>-InP толщиной 0,3 мкм и уровнем легирования не более  $8,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , область поглощения *n*-InGaAs толщиной 2,1 мкм и уровнем легирования не более  $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$  [6]. В обеих структурах *p*-*n*-переход создавался в лавинной области *n*-InP методом диффузии цинка [7].

На рис. 1 графически представлены оба типа структур.

Экспериментально измеренное распределение примеси для структур типа 2 представлено на рис. 2.



а



б

Рис. 1. Зависимость уровня легирования *N* от глубины *p*-*n*-перехода *x* для InGaAs/InP ЛФД: а) – структура типа 1; б) – структура типа 2.

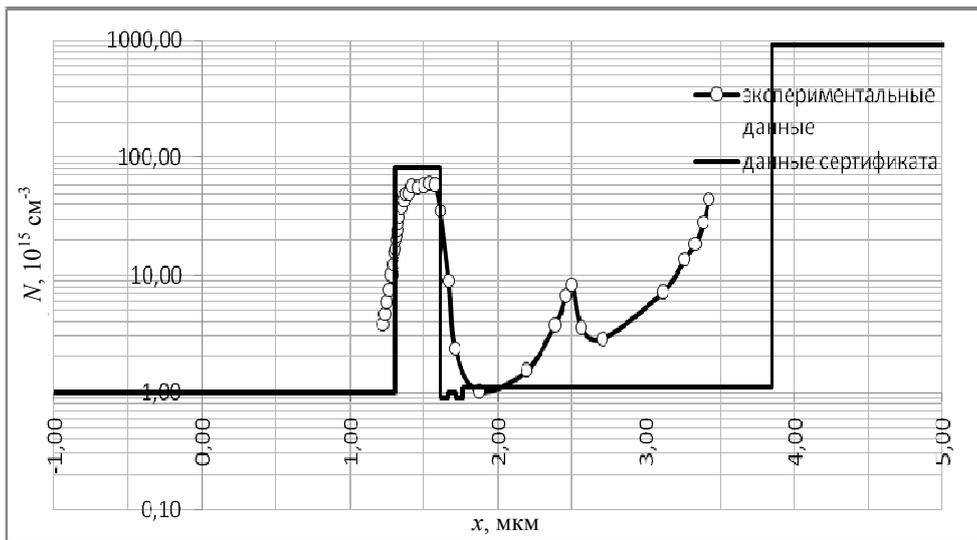


Рис. 2. Распределение примеси  $n$  для структур типа 2.

Экспериментально измеренное распределение примеси для удобства интегрирования далее аппроксимировалось распределением Гаусса (рис. 3),

что позволяет рассчитать полевые распределения в структуре (рис. 4), а также напряжения и коэффициент умножения (рис. 5).

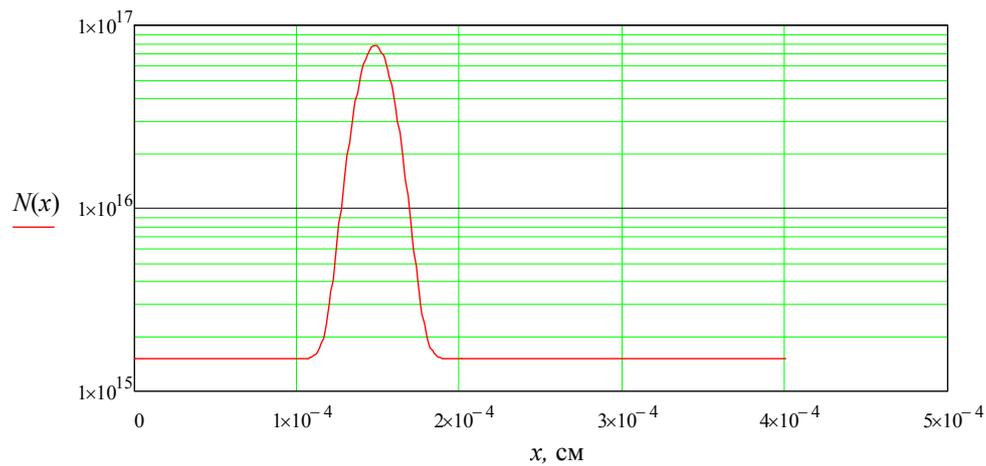


Рис. 3. Аппроксимация распределения примеси в структуре типа 2.

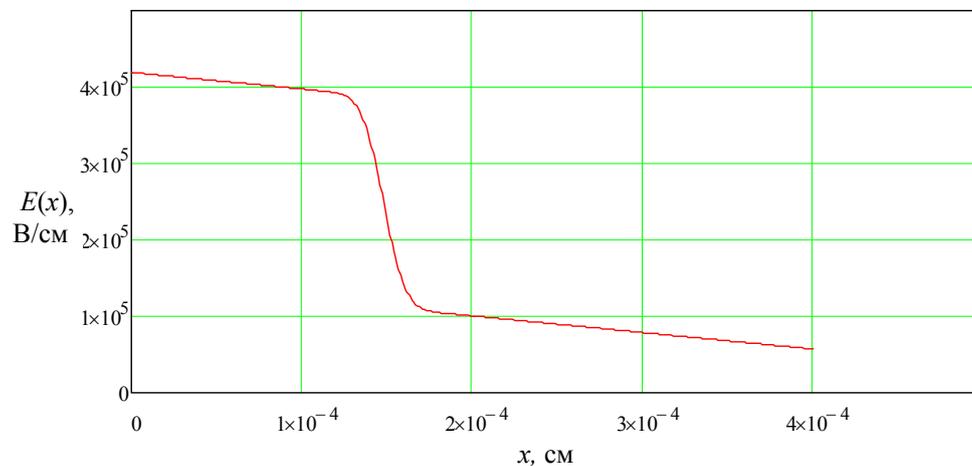


Рис. 4. Распределение электрического поля  $E(x)$  в структуре типа 2.

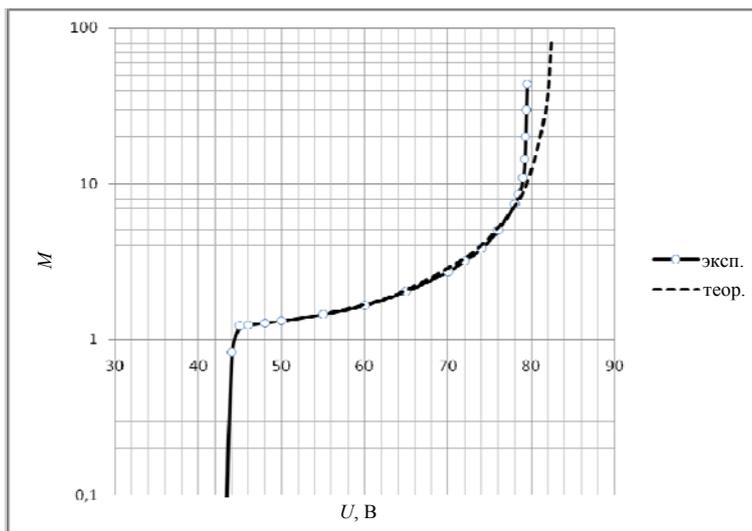


Рис. 5. Экспериментальные и расчетные зависимости коэффициента умножения  $M$  от напряжения  $U$  для структуры типа 2.

Как видно из рис. 5, экспериментальные результаты хорошо согласуются с расчетом до коэффициентов умножения не более 10. Повышенные значения умножения при  $M > 10$ , очевидно, связаны с влиянием краевого пробоя.

### Критерии работоспособности ЛФД

Критерии работоспособности можно сформулировать следующим образом:

- для обеспечения умножения максимальное поле должно быть не менее  $4 \times 10^5$  В/см;
- для уменьшения туннельного тока поле на гетерогранице должно быть не более  $1,5 \times 10^5$  В/см;
- для обеспечения быстродействия фотодиода при рабочем напряжении должен быть обеспечен полный прокол структуры.

### Методика и результаты расчета

Для каждой структуры для различных глубин  $p-n$ -перехода, создаваемого диффузией, рассчитывалось напряжение, при котором обеспечивался коэффициент умножения, равный 10. Методика расчета коэффициента умножения была приведена в статье [8]. Результаты расчета – зависимости рабочего напряжения ЛФД от глубины  $p-n$ -перехода приведены на рис. 6, 7.

Структура типа 1 работоспособна в диапазоне глубин  $p-n$ -перехода  $x_0 = (1,77-2,18)$  мкм при рабочих напряжениях (56–75) В. Допустимый разброс  $\Delta x_0 = 0,41$  мкм (т. е.  $\pm 10\%$ ).

Структура типа 2 работоспособна в диапазоне глубин  $p-n$ -перехода  $x_0 = (2,50-3,40)$  мкм при рабочих напряжениях (49–61) В. Допустимый разброс  $\Delta x_0 = 0,90$  мкм (т. е.  $\pm 15\%$ ).

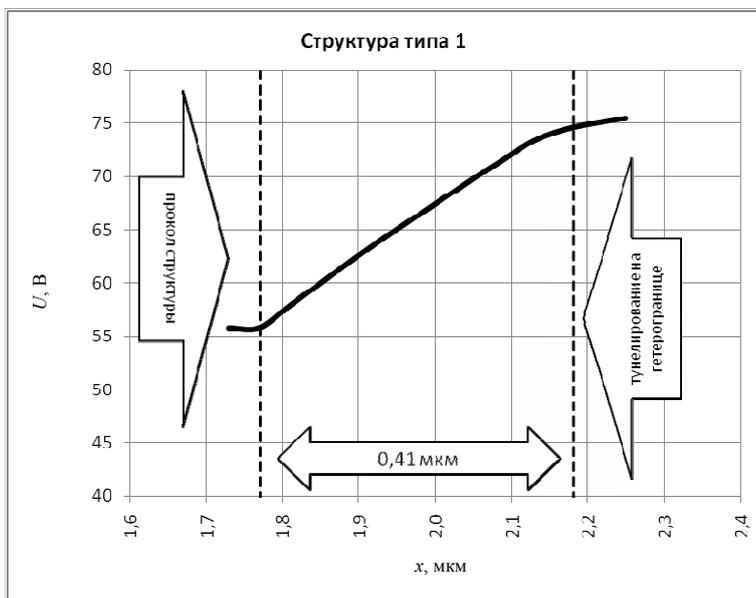


Рис. 6. Зависимости рабочего напряжения ЛФД  $U$  при  $M = 10$  от глубины  $p-n$ -перехода  $x$  для структуры 1.

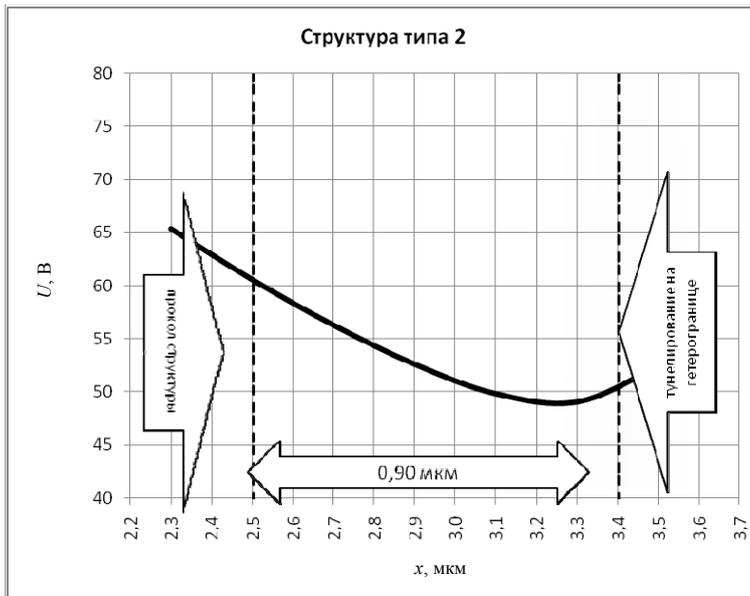


Рис. 7. Зависимости рабочего напряжения ЛФД  $U$  от глубины  $p$ - $n$ -перехода  $x$  для структуры 2.

Под технологической устойчивостью авторы понимают максимально допустимый разброс глубины диффузии в лавинном слое, при которой возможно сохранение работоспособности ЛФД.

### Заключение

Исследования показали, что при изготовлении InGaAs/InP ЛФД-структура с пиковым легированием в лавинной области (тип 2) обладает большей технологической устойчивостью по сравнению со структурой с равномерным легированием лавинной области (тип 1). Допустимые отклонения по глубинам  $p$ - $n$ -перехода составляют  $\pm 15\%$  для структуры типа 1 и  $\pm 10\%$  для структуры типа 2.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Филачёв А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 2. С. 162.
2. Бурлаков И. Д., Филачёв А. М., Холоднов В. А. // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 1. С. 52.
3. Бурлаков И. Д., Филачёв А. М., Холоднов В. А. // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 2. С. 167.
4. Макаров М. Э., Климанов Е. А. // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 2. С. 190.
5. Будтолаев А. К., Горлачук П. В., Ладугин М. А., Мармалюк А. А., Рябоштан Ю. Л., Хакуашев П. Е., Чинарёва И. В., Яроцкая И. В. // Прикладная физика. 2016. № 1. С. 82.
6. Филачёв А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. – М.: Физматкнига, 2011.
7. Андреев Д. С., Хакуашев П. Е., Чинарёва И. В., Горлачук П. В., Мармалюк А. А. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 374.
8. Будтолаев А. К., Кравченко Н. В., Хакуашев П. Е., Чинарёва И. В. // Прикладная физика. 2017. № 4. С. 37.

PACS: 85.30.-z

## Influence of the spread of the depth of the $p$ - $n$ junction on the parameters of InGaAs/InP avalanche photodiodes

A. K. Budtolaev, P. E. Khakuashev, and I. V. Chinareva

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

Received March 17, 2017

Consideration is given to the allowable variation of the depth of the diffusion and the selection of the optimal type of epitaxial structures for the manufacture of avalanche InGaAs/InP photodiodes (APD).

*It is necessary to create a specific configuration of the electric field in the APD. The configuration of the electric field in the p–n structure depends on initial parameters of the structure and processes of diffusion. Deviations from parameters can disable the APD. Two structure types were presented: type 1 – with uniform doping of the multiplication region (triangular field) and type 2 – with peak doping of the multiplication region (rectangular field). These epitaxial structures were grown by using the molecular beam epitaxial (MBE) technologies. Typical parameters of the structure type 1: the thickness 3.9  $\mu\text{m}$  from multiplication region and doping in multiplication region  $1.7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , the thickness 2.35  $\mu\text{m}$  from area of absorption n-InGaAs and doping no more  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . Typical parameters of the structure type 2: the thickness 3.6  $\mu\text{m}$  from multiplication region n-InP and doping no more  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , in the charging layer n<sup>+</sup>-InP the thickness 0.3  $\mu\text{m}$  and doping  $8.5 \times 10^{16}$ , the thickness 2.1  $\mu\text{m}$  from area of absorption n-InGaAs and doping no more  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . The p–n-junction was formed the multiplication region n-InP by diffusion of zinc. Voltage was calculated for each structure at different depths p–n-junction produced by diffusion, which provides a multiplication factor of 10. The structure of the type 1 is operable in a depth range of p–n-transition  $x_0 = (1.77\text{--}2.18) \text{ mm}$  at operating voltages (56–75) V. Allowable variation  $\Delta x_0 = 0,41 \text{ }\mu\text{m}$  ( $\pm 10 \%$ ). The structure type 2 is operable in a range of depths p–n-transition  $x_0 = (2.50\text{--}3.40) \text{ microns}$  at operating voltages (49–61) V. Allowable variation  $\Delta x_0 = 0.90 \text{ }\mu\text{m}$  ( $\pm 15 \%$ ). In the manufacture of InGaAs/InP APD structure doped with a peak in the multiplication area (type 2) has a higher technological reliability than the structure with uniform doping multiplication region (type 1). The allowable variation for the depths p–n-junction are  $\pm 15 \%$  in the structure type 2, and  $\pm 10 \%$  in the structure type 1.*

*Keywords:* APD, epitaxial heterostructures, InGaAs/InP, depth p–n-junction.

#### REFERENCES

1. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, Usp. Prikl. Fiz. **3** (2), 162 (2015).
2. I. D. Burlakov, A. M. Filachev, and V. A. Kholodnov, Usp. Prikl. Fiz. **4** (1), 52 (2016).
3. I. D. Burlakov, A. M. Filachev, and V. A. Kholodnov, Usp. Prikl. Fiz. **4** (2), 167 (2016).
4. M. E. Makarov and E. A. Klimanov, Usp. Prikl. Fiz. **4** (2), 190 (2016).
5. A. K. Budtolaev, P. V. Gorlachuk, M. A. Ladugin, A. A. Marmaluk, Yu. L. Ryaboshtan, P. E. Khakuashev, I. V. Chinareva, and I. V. Yarotskaya, Prikl. Fiz. No. 1, 82 (2016).
6. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid State Photoelectronics* (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
7. D. S. Andreev, P. E. Khakuashev, I. V. Chinareva, P. V. Gorlachuk, and A. A. Marmaluk, Usp. Prikl. Fiz. **1** (3), 374 (2013).
8. A. K. Budtolaev, N. V. Kravchenko, P. E. Khakuashev, and I. V. Chinareva, Prikl. Fiz. No. 4, 37 (2017).