

Фотоэлектроника

УДК 621.383

Эпитаксиальные структуры для лавинных фотодиодов на основе InGaAs/InP

А. К. Будтолаев, П. В. Горлачук, М. А. Ладугин, А. А. Мармалюк, Ю. Л. Рябоштан,
П. Е. Хакуашев, И. В. Чинарева, И. В. Яроцкая

В настоящей работе приведены экспериментальные исследования влияния режимов МОС-гидридной эпитаксии на структурные и электрофизические свойства гетероструктур InGaAs/InP. Выбранные режимы использовались для выращивания приборных структур, на которых изготовлены планарные лавинные фотодиоды. По результатам измерения их фотоэлектрических характеристик был сделан вывод о возможности использования разработанных структур для изготовления планарных лавинных фотодиодов.

PACS: 85.60.Dw

Ключевые слова: эпитаксиальные гетероструктуры, InGaAs/InP, МОС-гидридная эпитаксия, лавинный фотодиод.

Введение

Известно, что лавинные фотодиоды (ЛФД), изготовленные на основе эпитаксиальных гетероструктур (ГС) InGaAs/InP и обеспечивающие фоточувствительность в спектральном диапазоне 0,9—1,7 мкм, имеют улучшенные параметры в части темновых токов и быстродействия по сравнению с традиционными $p-i-n$ -фотодиодами и позволяют регистрировать сверхслабые сигналы излучения [1, 2].

Для достижения улучшенных характеристик приборов необходимо выполнение ряда требований при создании ГС, к которым, в первую очередь, относятся: прецизионный контроль состава и

толщины эпитаксиальных слоев (ЭС) в процессе их формирования и обеспечение однородности состава твердого раствора по площади пластины. Необходимым и важным требованием является также обеспечение высокой чистоты поглощающего активного слоя и низкого уровня фоновой концентрации носителей заряда в нем для снижения темновых токов и повышения чувствительности фотоприемного устройства. С этой целью в качестве эпитаксиального метода получения может быть использован метод МОС-гидридной эпитаксии, который является одним из наиболее прогрессивных методов создания полупроводниковых гетероструктур различного функционального назначения, в т. ч. и для создания ЛФД [1].

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния режимов МОС-гидридной эпитаксии на структурные и электрофизические свойства гетероструктур InGaAs/InP.

Требования к гетероструктурам

Проектирование структуры проводится путем расчета толщин и концентраций в InP-, InGaAsP- и InGaAs-слоях, необходимых для получения лавинного умножения, малого темнового тока, высокой квантовой эффективности и быстродействия.

Основными критериями при выборе структуры ЛФД являются:

- для обеспечения умножения максимальное поле $p-n$ -перехода E_m должно быть не менее $4,5 \cdot 10^5$ В/см;

Будтолаев Андрей Константинович, вед. инженер-технолог.
Хакуашев Павел Евгеньевич, зам. начальника ПТК.

Чинарева 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

Горлачук Павел Владимирович, научный сотрудник.

Ладугин Максим Анатольевич, начальник лаборатории.

Мармалюк Александр Анатольевич, зам. генерального директора по науке.

Рябоштан Юрий Леонидович, ведущий инженер-технолог.

Яроцкая Ирина Валентиновна, научный сотрудник.

АО «НИИ «Полус» им. М. Ф. Стельмаха».

Россия, 117342, Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1.

E-mail: bereg@niipolyus.ru

Статья поступила в редакцию 8 февраля 2016 г.

© Будтолаев А. К., Горлачук П. В., Ладугин М. А.,
Мармалюк А. А., Рябоштан Ю. Л., Хакуашев П. Е.,
Чинарева И. В., Яроцкая И. В., 2016

- для уменьшения туннельного тока поле на гетерогранице $E_{гг}$ должно быть не более $1,5 \cdot 10^5$ В/см;
- для обеспечения высокого быстродействия поле в InGaAs-области должно быть не менее $0,1 \cdot 10^5$ В/см.

Для расчета E_m необходимо в том числе знать дозу в области поглощения Q_n , поэтому в первую очередь оценим параметры этой области.

Параметры области поглощения влияют на ряд параметров ЛФД: на квантовую эффективность, быстродействие, напряжение, темновые токи (объем), туннельные токи (поле $E_{гг}$). Верхний предел толщины области поглощения W_n можно оценить по стандартному требованию к обеспечению приемлемой квантовой эффективности η для $p-i-n$ -фотодиодов $\alpha W_n = 2$. При "правой" рабочей длине волны 1,55 мкм коэффициент поглощения в тройном соединении составляет 7000 см^{-1} , соответственно, значение W_n не должно превышать 2,9 мкм ($\eta = 0,87$). Для ЛФД толщины области поглощения выбираются несколько меньше, чем у $p-i-n$ -фотодиодов, т. к. небольшие потери в квантовой эффективности компенсируются умножением, причем при этом улучшаются остальные вышперечисленные параметры (быстродействие, напряжение, темновые и туннельные токи).

Концентрация в области поглощения, определяющая поле $E_{гг}$, должна быть минимальной. Как показано выше, фоновое значение концентрации в тройном соединении N_n определяется возможностями эпитаксии и находится в диапазоне $(0,5-1,0) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Соответственно доза в области поглощения $Q_n \leq 0,25 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Для умножения важна не только величина дозы, но и ее распределение в области умножения. Многие фирмы-производители изготавливают ЛФД на основе InGaAs/InP-структуры с разделенными областями умножения и поглощения даже не вида $p-n-i-n$, а более сложного вида, а именно, на основе $p-(i)-n-i-n$ -структуры (т. н. структура

SAGCM) [3]. Другими словами, дополнительная узкая лавинная область высокой напряженности электрического поля формируется между p - и n -областями. Заряд ионизированных доноров в этой области обуславливает перепад напряженности электрического поля между областью умножения в InP и областью поглощения в InGaAs.

В рассматриваемой структуре (при пиковом легировании и прямоугольном поле) регулируется не величина дозы (концентрации носителей заряда в слое), а толщина лавинной области, поэтому ошибка в задаваемой величине концентрации может быть критичной, причем технологически сложнее в этой структуре получить именно эту конкретную концентрацию носителей заряда. Однако именно эта структура предпочтительна с точки зрения шум-фактора и рабочего напряжения. Соотношение доз в области умножения двух структур может быть получено только с помощью численных расчетов коэффициента умножения [4]. Очевидно, что в структуре с прямоугольным полем эта доза менее $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Выбрав величину $2,4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и взяв за основу толщину пика 0,3 мкм, получим концентрацию в пике $8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Выберем толщину лавинной области 1,5 мкм.

Параметры диффузионной области. Основной параметр — глубина $p-n$ -перехода W_{np} . Будем рассматривать только диффузию цинка. Этот процесс подробно описан в [5]. Для дальнейшего анализа выберем $W_{np} = 2$ мкм. Соответственно, толщина эпитаксиального слоя InP, т.е. $W_{InP} = 3,5$ мкм.

В наших экспериментах между поглощающим и умножающим слоем использовались три нелегированных буферных слоя InGaAsP с градиентным составом для уменьшения высоты барьера валентной зоны.

Требования, предъявляемые к гетероэпитаксиальным структурам для лавинных фотодиодов, работающих в диапазоне длин волн 0,9—1,7 мкм представлены в таблице.

Таблица

Тип	Состав	$N, \text{ см}^{-3}$	$d, \text{ мкм}$
Слой умножения	InP	н/л	3,4—3,6
	InP	$(7,9-8,1) \cdot 10^{16}$	0,29—0,31
Слой буферный 1	$\text{In}_{0,855}\text{Ga}_{0,145}\text{As}_{0,3}\text{P}_{0,7}$	н/л	0,05
	$\text{In}_{0,73}\text{Ga}_{0,27}\text{As}_{0,58}\text{P}_{0,42}$	н/л	0,05
	$\text{In}_{0,65}\text{Ga}_{0,35}\text{As}_{0,75}\text{P}_{0,25}$	н/л	0,05
Слой поглощения	$\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$	$(0,5-1) \cdot 10^{15}$ н/л	1,9—2,1
Подложка	n -InP(100) диаметр 50,8 мм	$(2-5) \cdot 10^{18}$	350

Получение эпитаксиальных ГС для ЛФД

Одним из необходимых условий достижения высоких параметров ЛФД является низкая фоно-

вая концентрация носителей заряда. Обеспечение ее требует высокой чистоты используемых материалов и правильной организации производственного процесса. При этом необходимо учитывать

специфику метода МОС-гидридной эпитаксии и применяемых газовых источников. Наличие примесей и их электрическое поведение в эпитаксиальных слоях определяется конкретными условиями роста, такими как температура, соотношение элементов V и III группы в реакционной зоне и рабочее давление.

Поскольку для фотодиодных применений важнейшей характеристикой слоя поглощения является фоновая концентрация носителей заряда, особое внимание в работе уделялось получению высококачественных активных слоев InGaAs.

В ходе ряда экспериментов было исследовано влияние на чистоту эпитаксиальных слоев режимов роста в условиях МОС-гидридной эпитаксии, прежде всего, таких как температура и соотношение компонентов V и III группы. Первоначально было изучено влияние температуры роста и обнаружено наличие минимума фоновой концентрации. Можно выделить два основных источника фоновой концентрации: примесные атомы и собственные электрически активные дефекты. Источником первых являются примеси в исходных реагентах. Вторые же возникают в результате нарушений кристаллической решетки растущего слоя. Представленная на рис. 1 картина является результирующим действием указанных конкурирующих процессов.

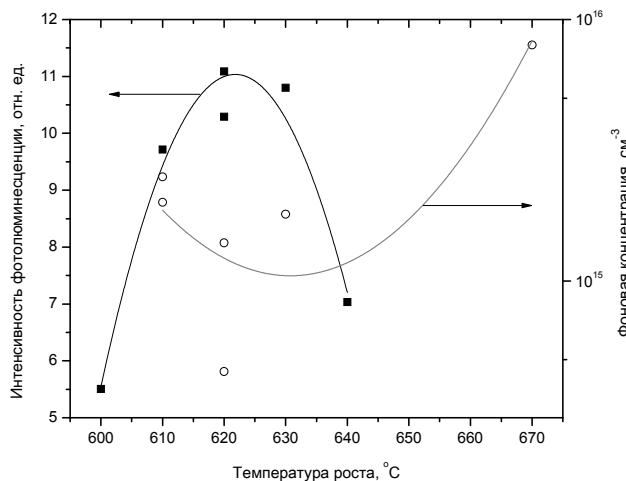


Рис. 1. Зависимость фоновой концентрации и интенсивности фотолуминесценции в слое $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ от температуры роста.

Фотолуминесцентные исследования указывают на наличие оптимального диапазона температур роста (см. рис. 1). Эти данные хорошо коррелируют с полученными ранее температурными зависимостями фоновой концентрации носителей заряда.

Соотношение компонентов пятой и третьей группы также оказывает влияние на фоновую концентрацию носителей заряда. В отличие от темпе-

ратурной зависимости, здесь наблюдается остро выраженный максимум. Причиной низкой фоновой концентрации при соотношениях V/III менее 35, по всей видимости, является компенсация примесей различного типа проводимости из-за невысокого кристаллического совершенства. Тогда как при V/III более 50 превалирует электронная проводимость. Подтверждением данного предположения является зависимость интенсивности фотолуминесценции образцов InGaAs. Данный параметр является интегральным показателем качества эпитаксиальных слоев, что демонстрируют графики на рис. 2. Видно, что существует пороговое значение отношения V/III, ниже которого качество слоев $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ значительно снижается.

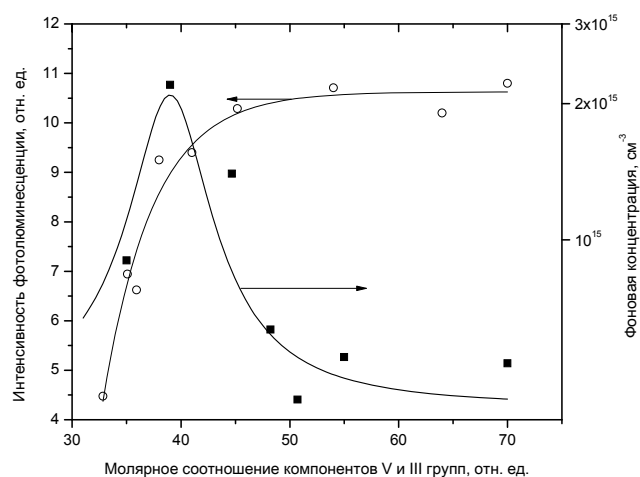


Рис. 2. Зависимость фоновой концентрации и интенсивности фотолуминесценции $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ от отношения компонентов V/III.

Выбранные режимы роста позволили достигнуть фоновой концентрации примесей для $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ на уровне $n = (0,5-2,0) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Подвижность электронов в выращенных слоях при 300 К находилась в пределах $8000-9000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Полученные результаты свидетельствуют о высоком качестве эпитаксиальных слоев InGaAs, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии, и позволяют сформировать на их основе область поглощения ЛФД с низкой фоновой концентрацией примеси.

Формирование заданного профиля легирования и, соответственно, зонной диаграммы ГС возможно только благодаря прецизионному контролю уровней легирования всех слоев, составляющих ГС. Кроме того, необходимо учитывать воздействие процесса диффузии примеси из сформированного слоя в соседние области, которые должны оставаться с как можно более низким фоновым содержанием носителей заряда. С этой це-

лю производится выбор легирующих примесей с низкими коэффициентами диффузии.

Наиболее широко используемой примесью *n*-типа в условиях МОС-гидридной эпитаксии является кремний. Эта примесь обладает целым рядом преимуществ, а именно, возможность достижения широкого диапазона концентраций, легкая управляемость, низкий коэффициент диффузии и отсутствие «эффекта памяти» [6].

В ходе работы был проведен ряд экспериментов, направленных на отработку контроля уровня легирования в слоях InP и InGaAs. На рис. 3 представлены графики зависимости концентрации донорной примеси от расхода легирующего компонента. Как видно, эта примесь является технологически удобной, поскольку характеризуется линейной зависимостью уровня легирования от расхода моносилана и позволяет получить широкий интервал концентраций кремния в слоях InP и InGaAs.

Для получения высоко- и низколегированных слоев InGaAs были проведены исследования влияния температуры роста на эффективность легирования моносиланом. Показано, что для достижения низких уровней легирования ($\leq 1E17 \text{ см}^{-3}$) целесообразно снижать температуру роста. В то время как получение высоколегированных слоев InGaAs необходимо проводить при повышенных температурах для более эффективного использования легирующего компонента.

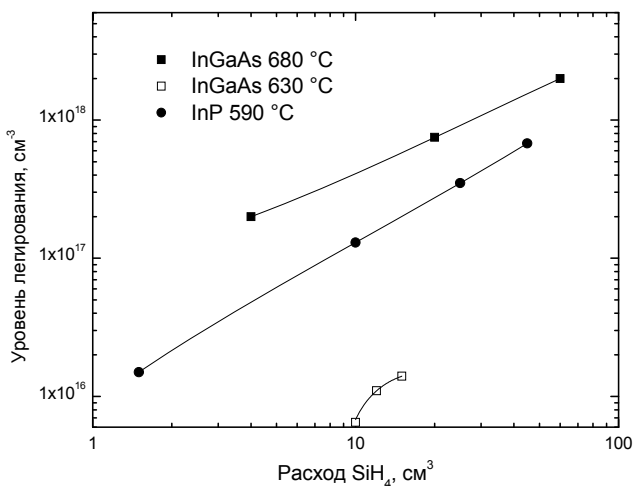


Рис. 3. Зависимость уровня легирования в слоях InP и InGaAs от расхода моносилана.

Изготовление фотодиодов

Используя гетероструктуры, выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии, по планарной технологии были изготовлены лавинные фотодиоды диаметром 250 мкм. В качестве пассивирующей, маскирующей и просветляющей использовалась пленка Si₃N₄, выращенная методом

низкотемпературного плазмохимического осаждения. Для уменьшения плотности поверхностных состояний на границе Si₃N₄/InP пластины подвергались отжигу в атмосфере водорода. Контактные окна выделялись с помощью стандартной фотолитографии с последующим плазмохимическим травлением нитридной пленки. Активная область формировалась путем диффузии цинка при температуре 500 °C из источника Zn₃P₂ в предварительно откаченной и запаянной кварцевой ампуле. Контактная система к *n*⁺- и *p*⁺-областям создавалась путем вакуумного напыления двухслойной металлизации Ti/Au. Контактные площадки к *n*⁺-области выделялись фотолитографическим методом прямым травлением металла. Для формирования омического контакта пластины отжигались в атмосфере водорода при температуре 400 °C.

Исследование фотоэлектрических параметров лавинных фотодиодов

Для изготовленного фотодиода были исследованы вольт-амперная, и вольт-емкостная (CV) характеристики. Кроме того, экспериментально определена зависимость коэффициента умножения *M* от напряжения, которая представлена на рис. 4.

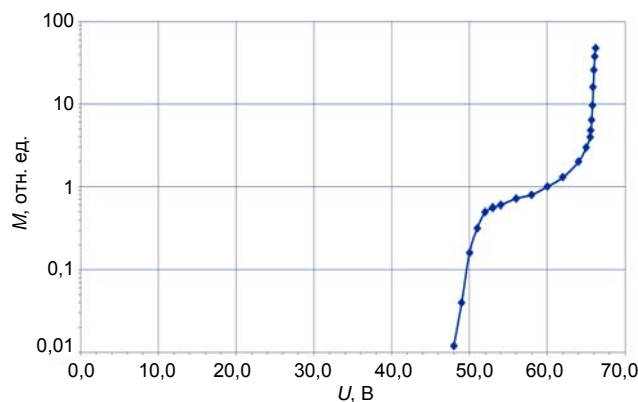


Рис. 4. Зависимость коэффициента умножения *M* от напряжения *U*.

Путем пересчета CV-характеристики был построен профиль распределения концентрации носителей заряда по глубине гетероструктуры (рис. 5).

Полученный профиль распределения концентрации носителей соответствует заданному (показан сплошной линией), что говорит о возможности использования разработанного метода эпитаксиального выращивания для изготовления лавинных фотодиодов.

Пробивное напряжение лавинного фотодиода составляло 66 В (по уровню обратного тока 1000 нА). Это свидетельствует о хорошем контроле

ле за концентрацией носителей в каждом слое, за его толщиной, а также за расположением диффузионного p - n -перехода.

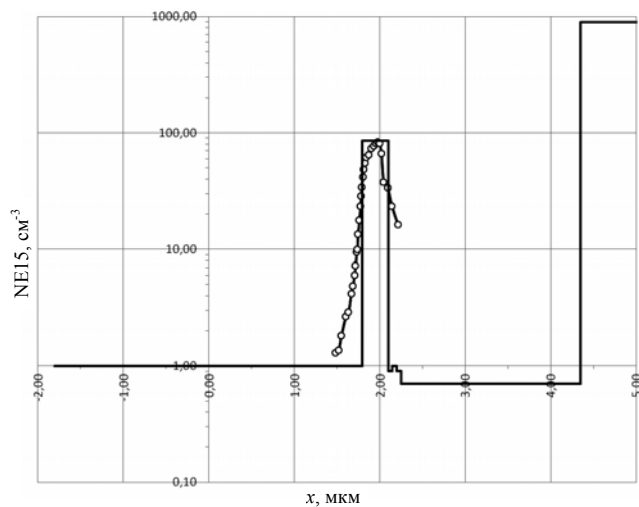


Рис. 5. Распределения концентрации носителей заряда по глубине гетероструктуры. \circ — экспериментальный профиль; — — заданный профиль

Возможно дальнейшее снижение рабочего напряжения при некотором увеличении глубины p - n -перехода. Начальный умножаемый ток не превышал 20 нА. Низкий уровень темнового тока сопоставим с соответствующими значениями для коммерческих ЛФД G8931-20 фирмы Hamamatsu [7]. Максимальное усиление — 48.

Заключение

На основании проведенных исследований были выбраны режимы роста гетероэпитаксиальных структур для изготовления лавинных фотодиодов на спектральный диапазон 0,9—1,7 мкм.

Распределение концентрации носителей заряда полученное в изготовленном фотодиоде подтверждает соответствие выращенной структуры предъявляемым требованиям к области умножения. Низкая плотность темнового тока говорит о высоком качестве слоев выращенной гетероструктуры и о её соответствии требованиям к поглощающей области.

Проведенные измерения фотоэлектрических параметров ЛФД, изготовленных на гетероструктурах, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии по разработанным режимам, подтверждают пригодность указанных гетероструктур для изготовления лавинных фотодиодов с высокими выходными параметрами. Дальнейшая работа по улучшению характеристик ЛФД должна вестись в направлении совершенствования методов изготовления планарного фотодиода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. — М.: Физматкнига, 2011.
2. Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И., Залетаев Н. Б. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 131.
3. Будтолаева А. К., Хакуашев П. Е., Чинарева И. В. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 4. С. 386.
4. Холоднов В. А., Бурлаков И. Д., Другова А. А. // Прикладная физика. 2014. № 5. С. 38.
5. Андреев Д. С., Хакуашев П. Е., Чинарева И. В., Горлачук П. В., Мармалюк А. А. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 374.
6. Fisher D. J. Diffusion in GaAs and other III-V Semiconductors. 10 Years of Research / Proc. Defect and Diffusion Forum. 1998. Vol. 157-159.
7. Сайт фирмы Hamamatsu (Япония): <http://www.hamamatsu.com>

Epitaxial structures for commercial avalanche photodiodes based on InGaAs / InP

A. K. Budtolaev¹, P. V. Gorlachuk², M. A. Ladugin², A. A. Marmaluk², Yu. L. Ryaboshtan², P. E. Khakuashev¹, I. V. Chinareva¹, and I. V. Yarotskaya²

¹ Orion R&P Association, Inc.
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

² Polyus Research Institute
Bld. 1, 3 Vvedensky str., Moscow, 117342, Russia
E-mail: bereg@itnline.ru

Received February 8, 2016

Consideration is given to an experimental investigation of the technological modes influence on structural and electrophysical characteristics of epitaxial InGaAs/InP heterostructures. In particular, the article presents the results of producing and investigating of InP, InGaAs doped and non-doped layers, as well as analyses characteristics of heterostructure samples produced. A heteroepitaxial structure was grown and a planar avalanche photodiode was made on the basis of the selected technological modes. Photoelectrical characteristics of the above-mentioned photodiode show that the developed structures may be used for production of commercial planar avalanche photodiodes.

PACS: 85.60.Dw

Keywords: InGaAs/InP, MOCVD, epitaxial heterostructures, avalanche photodiode.

REFERENCES

1. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid State Photoelectronics. Photodiodes* (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
2. I. D. Burlakov, L. Ya. Grinchenko, A. I. Dirochka, and N. B. Zaletaev, *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **2**, 131 (2014).
3. A. K. Budtolaeva, P. E. Khakuashev, and I. V. Chanareva, *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **3**, 386 (2015).
4. V. A. Kholodnov, I. D. Burlakov, and A. A. Drugova, *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 38 (2014).
5. D. S. Andreev, P. E. Khakuashev, I. V. Chanareva, P. V. Gorlachuk, and A/ A/ Marmalyuk, *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 374 (2013).
6. D. J. Fisher, *Diffusion in GaAs and other III–V Semiconductors. 10 Years of Research, in Proc.. Defect and Diffusion Forum.* **157–159**, (1998).
7. Hamamatsu (Japan): <http://www.hamamatsu.com>