

STUDY OF A SEMICONDUCTOR IR PHOTODIODE IN THE NEAR-INFRARED RANGE

*Anastasia Evgeniyevna Strelkova ^{1a}, Yuri Vladimirovich Sakharov ¹,
Sergey Alexandrovich Sanko ²*

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin pr., 634050 Tomsk, Russia

² Research Institute of Semiconductor Devices, 99a Krasnoarmeyskaya st., 634034, Tomsk Russia

^a subbotinakisa96@gmail.com

ABSTRACT

The aim of this research is to study the characteristics of semiconductor IR photodiodes grown on a GaAs basis at the Department of Semiconductor Materials Science of JSC “NIIPP”. The purpose of creating the studied pin-photodiode structure is its application as an optical radiation receiver for a GaAs-based IR emitter with a peak wavelength of 850 ± 10 nm. The choice of a heterostructure based on GaAs as the material for the photodiode is determined by the need to achieve a higher level of consistency between the emitter and the receiver, higher speed performance for creating optoelectronic pairs used as galvanic isolation in various micro-assemblies, as well as the higher resistance of GaAs to external influences in outer space. The article provides a detailed examination of the physical principles behind the operation of the device under study and its design features. A comprehensive analysis of the main operational parameters determining the efficiency of the photodiode's functioning in the infrared range has been conducted, including spectral sensitivity, dark current, response time (speed), and noise characteristics. Particular attention is paid to the optimization of these parameters to improve reliability and expand the areas of application for the device.

KEYWORDS

Photodiode; IR range; gallium arsenide; current-voltage characteristics; charge-current characteristics; p-n junction doping concentration.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ИК-ФОТОДИОДА В БЛИЖНЕМ ИК-ДИАПАЗОНЕ

*Анастасия Евгеньевна Стрелкова ^{1a}, Юрий Владимирович Сахаров ¹,
Сергей Александрович Санько ²*

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634050 Томск, пр. Ленина, 40

² Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов, Россия, 634034 Томск, ул. Красноармейская, 99а

^a subbotinakisa96@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Целью настоящего исследования является исследование характеристик полупроводниковых ИК фотодиодов, выращенных на основе GaAs в отделе полупроводникового материаловедения АО «НИИПП». Целью создания исследуемой фотодиодной структуры pin-фотодиода является ее применение в качестве приемника оптического излучения ИК-излучателя на основе GaAs с пиковой длиной волны 850 ± 10 нм. Выбор в качестве материала фотодиода гетероструктуры на основе GaAs обусловлен необходимостью достижения более высокого уровня согласованности излучателя и приемника, более высокого быстродействия для создания оптоэлектронных пар, применяемых в качестве гальванической развязки в микросборках различного назначения, а также более высокой устойчивостью GaAs к внешним воздействиям в космическом пространстве [1–3]. В статье детально рассмотрены физические принципы работы исследуемого прибора, его конструктивные особенности. Проведен комплексный анализ основных эксплуатационных параметров, определяющих эффективность функционирования фотодиода в инфракрасном диапазоне, включая спектральную чувствительность, темновой ток, быстродействие и шумовые характеристики. Особое внимание уделено вопросам оптимизации этих параметров для повышения надежности и расширения областей применения прибора.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Фотодиод; ИК-диапазон; арсенид галлия; вольт-амперные характеристики; вольт-фарадные характеристики; концентрация примеси p-n-перехода.

Введение

В современной оптоэлектронике ключевое значение имеют приборы, обеспечивающие надежную гальваническую развязку и передачу сигналов. В этом контексте оптоэлектронные пары (оптопары), состоящие из излучателя и фотоприемника, являются неотъемлемыми компонентами микросборок различного назначения, особенно в условиях повышенных радиационных нагрузок, характерных для космической техники и военной электроники [4–7].

Наиболее перспективным материалом для создания таких пар является арсенид галлия (GaAs) и твердые растворы на его основе (AlGaAs, InGaAs). Это обусловлено его более высокой радиационной стойкостью по сравнению с кремнием, что достигается за счет большей ширины запрещенной зоны ($\sim 1,42$ эВ), и более высокой подвижностью носителей заряда, обеспечивающей высокое быстродействие приборов.

Целью данной работы является исследование характеристик полупроводникового ИК-фотодиода, разработанного на основе

гетероструктуры p-i-n GaAs, с пиком спектральной чувствительности, согласованным с длиной волны излучения ИК-светодиода (850 ± 10 нм), а также анализ его конструктивных и технологических особенностей, обеспечивающих требуемые эксплуатационные параметры.

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания высоконадежных оптоэлектронных пар (оптопар) для гальванической развязки в микросборках специального назначения. Ключевым требованием к таким парам является совместимость излучателя и приемника, а также высокое быстродействие и устойчивость к внешним воздействиям.

Арсенид галлия (GaAs) выбран в качестве базового материала благодаря ряду преимуществ: более высокой, по сравнению с кремнием, радиационной стойкости и большей подвижности носителей заряда, что обеспечивает малое время отклика [8]. Целью данного исследования является экспериментальная проверка соответствия разработанной p-i-n-структуры фотодиода требованиям

технического задания (ТЗ) и подтверждение возможности дальнейшего использования в составе оптопары в спектральном диапазоне длин волн 850–870 нм.

1. Разработка эпитаксиальной структуры. Технологический маршрут изготовления фотодиода

При разработке структуры фотодиода основное внимание уделено выбору толщины и уровня легирования обедненного i-слоя. На основе литературных данных [9–11] коэффициент поглощения (α) GaAs на длине волны ~870 нм составляет $\sim 1000 \text{ см}^{-1}$, следовательно, глубина проникновения излучения ($1/\alpha$) равна 10 мкм. Для обеспечения высокого быстродействия и квантовой эффективности толщина i-слоя выбрана равной 10 мкм, а концентрация примеси – минимальной ($\sim 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$).

В табл. 1 представлены параметры, которым должен соответствовать разрабатываемый фотодиод.

Согласно требованиям технического задания, необходимо разработать кристалл фотодиода, совместимый с изготавливаемыми на АО «НИИПП» светодиодами. Из перечня изготавливаемых на предприятии светодиодов следует, что все они работают в ближнем ИК-диапазоне, следовательно и фотодиод должен работать в области ближнего ИК-диапазона. Основной диапазон длин волн для светодиодов составляет 850–870 нм, и фотодиод необходимо разрабатывать под данный диапазон.

По совокупности перечисленных параметров наиболее оптимальным матери-

алом для изготовления фотодиода является арсенид галлия (GaAs). По основным параметрам между соединениями на основе GaAs и кремнием (Si) наблюдается равенство, однако по быстродействию и радиационной стойкости GaAs превосходит Si, что является значительным преимуществом при разработке фотодиода для оптопары.

Первым этапом при разработке структуры фотодиода является выбор толщины и концентрации обедненного i-слоя. Согласно литературным данным, концентрация примеси должна быть минимальной, а толщина обедненного i-слоя должна обеспечивать баланс между быстродействием и квантовой эффективностью согласно отношению $1/\alpha$ [12, 13]. Исходя из [14], коэффициент поглощения α арсенида галлия на длине волны 870 нм составляет 1000 см^{-1} , а значит, для полного поглощения излучения на данной длине волны необходимо, чтобы толщина обедненного i-слоя составляла 10 мкм ($\alpha = 1/1000 \text{ см}$). Толщины обкладочных слоев делают минимальными, а концентрацию примеси – порядка 10^{18} см^{-3} для повышения быстродействия структуры [15]. Для формирования контактов к структуре и пропуска излучения без потерь в обедненный i-слой необходимо наличие широкозонного слоя с высокой концентрацией примеси и малым сопротивлением [16]. В итоге для разрабатываемого ИК-фотодиода была предложена структура на основе GaAs, которая должна обеспечить требуемые параметры. Разработанная структура фотодиода представлена в табл. 2.

Таблица 1. Параметры разрабатываемого фотодиода

Table 1. Parameters of the photodiode under development

Условное обозначение ФД / Photodiode type	Длина волны излучения λ_d , мкм / Radiation wavelength, λ_d , μm	Макс. темновой ток при $U_{\text{обр}} = 10 \text{ В}$, нА / Max dark current at $U_{\text{rev}} = 10 \text{ В}$, нА	Емкость кристалла при $U_{\text{обр}} = 10 \text{ В}$ и $f_{\text{изм}} = 1 \text{ МГц}$, пФ / Crystal capacity at $U_{\text{rev}} = 10 \text{ В}$ и $f_{\text{change}} = 1 \text{ МГц}$, пФ	Напряж. пробоя, В / Breakdown voltage, V	Время нарастания, нс / Rise time, ns	Чувствительность, А/Вт / Responsivity, A/W
FTN-7	0,65–0,89	≤ 5	< 20	> 20	≤ 10	$> 0,3$

Таблица 2. Паспорт разработанной структуры фотодиода

Table 2. Passport of the developed photodiode structure

Материал слоя / Layer material	Концентрация слоя, см^{-3} / Layer concentration, cm^{-3}	Толщина слоя, мкм / Layer thickness, μm
Подложка GaAs (n -тип) / Substrate GaAs (n -type)	$(1...5) \cdot 10^{18}$	200...250
Буферный слой (n^+ -тип) / Buffer layer (n^+ -type)	$(1...7) \cdot 10^{18}$	3...10
Обкладочный слой (n^+ -тип) / Covering layer (n^+ -type)	$(3...8) \cdot 10^{17}$	2...6
Обедненный i -слой (v -тип) / Depleted i -layer (v -type)	$(2...5) \cdot 10^{14}$	10...30
Обкладочный слой (p^+ -тип) / Casing layer (p^+ -type)	$(1...6) \cdot 10^{18}$	0,1...2
Широкозонный слой (p^+ -тип) / Broadband layer (p^+ -type)	$(2...8) \cdot 10^{18}$	3...6
Контактный слой p^+ -слой / Contact layer (p^+ -type)	$(1...5) \cdot 10^{18}$	0,5...2,5

Структура выращивается согласно паспорту, после чего из готовой эпитаксиальной структуры изготавливается фотодиодный кристалл.

2. Исследование ВАХ фотодиода

После проведения постростовых процессов, на выращенной пластине диаметром 50 мм для формирования контактов к p - и n -слоям структуры, а также разделения

пластины на чипы размерами $1,12 \times 1,12$ мм были проведены исследования характеристик полученных кристаллов. В первую очередь проведено исследование ВАХ. Для построения ВАХ фотодиода было измерено 10 фотодиодов. Результаты измерений для всех приборов представлены в виде одной усредненной кривой: рис. 1 – для прямой ветви ВАХ, рис. 2 – для обратной ветви ВАХ.

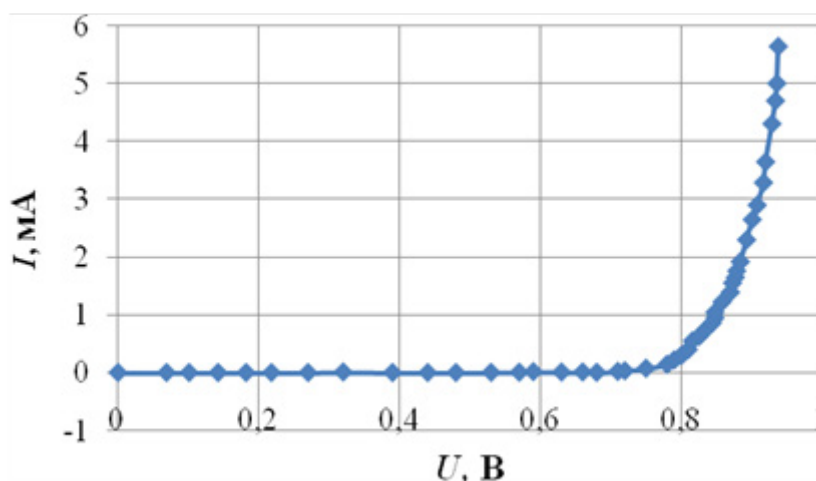


Рис. 1. Прямая ВАХ фотодиода

Fig. 1. Forward I-V characteristics of a photodiode

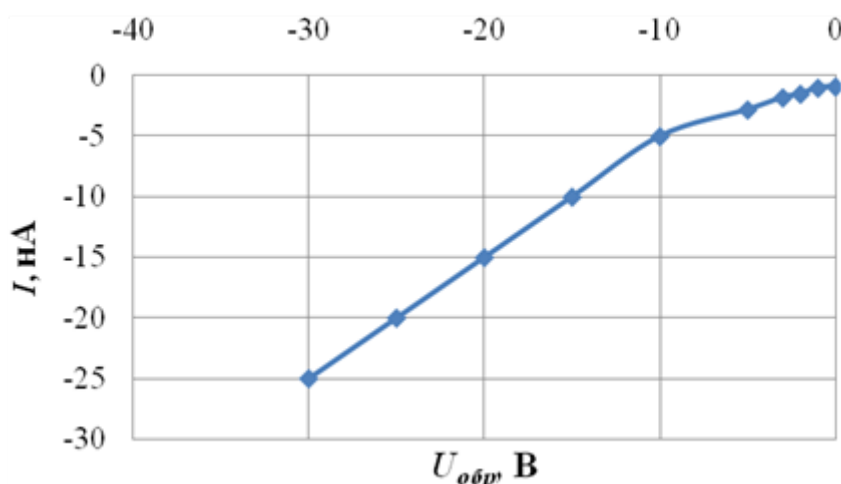


Рис. 2. Обратная ВАХ фотодиода

Fig. 2. Reverse I-V characteristic of a photodiode

Таблица 3. Значение темнового тока при подаче обратного смещения

Table 3. Dark-current value with reverse bias applied

$U_{обр}, \text{В} /$ $U_{rev}, \text{В}$	0	1	2	3	5	10	15	20	25	30
$I, \text{нА} /$ $I, \text{нА}$	0,9	1	1,5	1,8	2,8	5	10	15	20	25

Обратная ветвь показывает, что лавинный пробой структуры не наступает даже при напряжении 30 В, что соответствует требованию ТЗ (>20 В). Усредненные значения темнового тока при различных обратных смещениях приведены в табл. 3.

При напряжении смещения 10 В темновой ток составляет 5 нА, что соответствует предельному значению ТЗ. Отмечено, что часть образцов показывает значения ниже 5 нА, что указывает на потенциал для улучшения качества пост-ростовой технологии.

3. Исследование ВФХ фотодиода

Вольт-фарадная характеристика (C-V характеристика) отражает зависимость емкости фотодиода от приложенного обратного напряжения смещения. Она критически важна для понимания конструкции перехода, уровня легирования и быстродействия фотодиода. При работе в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах диоды обычно сме-

щаются в обратном направлении с помощью сравнительно большого обратного напряжения, чтобы уменьшить время пролета носителей и снизить барьерную емкость перехода [17].

Измерение барьерной емкости и ее зависимости от напряжения позволяет определить толщину p-n-перехода и распределение концентрации примеси в нем. Важной особенностью этого метода является его высокая чувствительность и возможность использования без повреждения полупроводникового прибора [18].

Емкостные методы измерения применяют для определения концентрации легирующей примеси в активном слое, высоты потенциального барьера, толщины p-n-перехода. Для ее определения необходимо построить зависимость $1/C_0^2(U)$. Если данная зависимость ложится на прямую, то считается, что переход резкий, и угол наклона этой прямой дает значение концентрации примеси, а пересече-

ние данной прямой с осью напряжений – значение контактной разности потенциалов [19].

Измерив зависимость $1/C_6^2$ и получив прямую, наклон которой определяет значение концентрации примеси в р-п-переходе, можно определить эту концентрацию из формулы [19]:

$$\left(\frac{1}{C_6}\right)^2 = \frac{2 \cdot (U_{\text{обр}} + U_k)}{q \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot N_0 \cdot S^2}, \quad (1)$$

где U_k – контактная разность потенциалов ($\approx 1,4$ В для GaAs); $U_{\text{обр}}$ – поданное напряжение смещения фотодиода (В).

Выразив из данной формулы значение концентрации, получим:

$$N_0 = \frac{2}{q \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S^2 \cdot \text{tg}(\beta)}, \quad (2)$$

где $\text{tg}(\beta)$ – тангенс угла наклона зависимости $1/C_6^2$ ($1/\text{В} \cdot \Phi^2$).

Далее используя формулу 1 можно построить зависимость концентрации от ширины ОПЗ. Ширину ОПЗ можно рассчитать по формуле:

$$x = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{C_6}. \quad (3)$$

Были подготовлены образцы кристаллов в корпусе, смонтированные на алюминиевую шайбу. Для фотодиодов проведено исследование ВФХ на приборе Е7-20. Измерена барьерная емкость р-п-перехода на частотах 1 МГц, 500 кГц, 200 кГц, 50 кГц, 10 кГц при подаче обратного смещения на р-п-переход в диапазоне от 0 В до 40 В, а также ВАХ фотодиода. Поскольку кристаллы установлены в корпус и смонтированы на шайбу, необходимо исключить паразитную составляющую емкости, которая складывается из емкостей корпуса, шайбы и соединительных проводов. Для этого была измерена паразитная емкость на указанных частотах и учтена при обработке полученных результатов. После измерения барьерной емкости (C_6) на разных частотах при подаче обратного напряжения смещения, была построена зависимость $C_6(U)$, представленная на рис. 3.

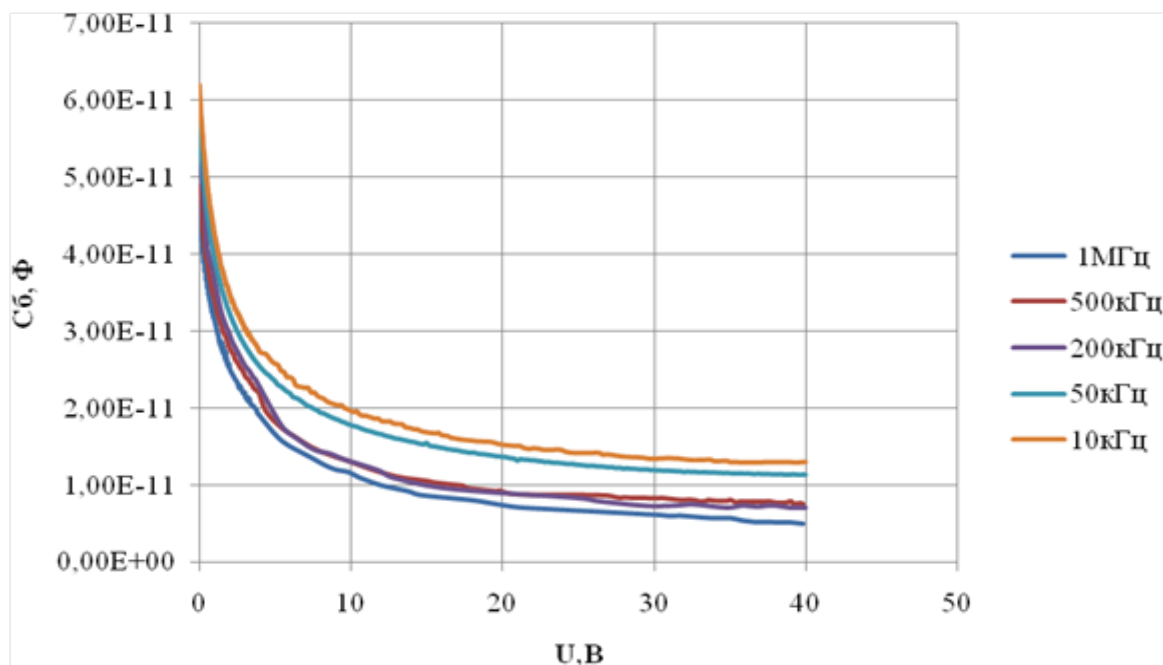


Рис. 3. ВФХ р-п-перехода площадью $1,25\text{мм}^2$ фотодиодного кристалла FTN-7

Fig. 3. Electrical characteristics of the p-n junction in a 1 mm^2 area of the FTN-7 photodiode crystal

Далее были выполнены расчет отношения $(1/C_0)^2$ и построение зависимости $(1/C_0)^2$ от напряжения смещения (рис. 4).

Линейный характер зависимостей на рис. 4 свидетельствует о резком р-п-переходе и относительно однородном распределении примеси в ОПЗ. Используя тангенс угла наклона прямых, по формуле (2) была рассчитана концентрация примеси (N) [20]:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2}{q \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot N \cdot S^3}. \quad (4)$$

Результаты расчетов сведены в табл. 4. Значения хорошо согласуются с паспортными данными структуры ($\sim 2\text{--}5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$).

4. Исследование спектральной чувствительности

Для оценки спектрального диапазона работы фотодиода была измерена его абсолютная спектральная чувствительность. Измерения проводились дискретным способом с использованием набора светодиодов с различными длинами волн излучения, в соответствии с табл. 5.

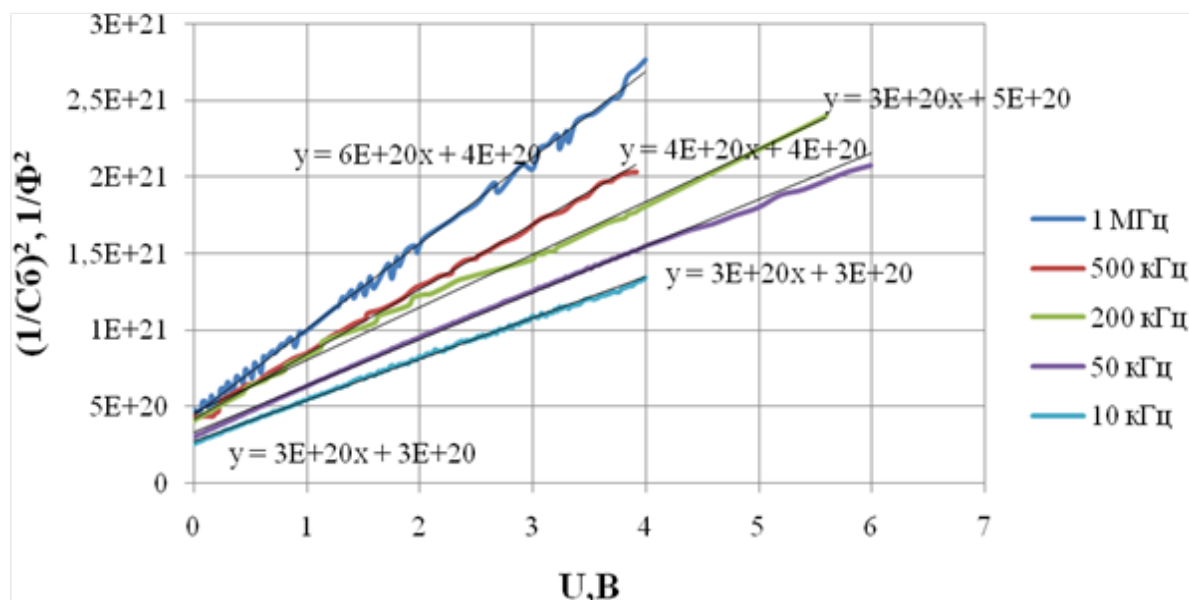


Рис. 4. Зависимость $(1/C_0)^2$ от напряжения смещения

Fig. 4. Dependence $(1/C_0)^2$ on bias voltage

Таблица 4. Результаты расчета концентрации примеси на различных частотах

Table 4. Results of impurity concentration calculations at various frequencies

f , кГц / kHz	10	50	200	500	1000
$\operatorname{tg} \alpha$	3	3	3	4	6
N , 10^{14} см^{-3} / N , 10^{14} cm^{-3}	3,6	3,6	3,6	4	6

Таблица 5. Данные для определения спектральной чувствительности фотодиодов

Table 5. Data for determining the spectral sensitivity of photodiodes

Данные для расчета			Результаты расчета	
Светодиод, № / Photodiode, No.	Длина волны, нм / Wavelength, nm	Мощность излучения при заданном токе, мВт Radiant power at a given current, mW	Тангенс угла наклона / Tangent of the inclina- tion angle	Чувствительность ФД, А/Вт / Photodiode responsivity, A/W
1	875	18	2900	1,2
2	863	41	9670	1,7
3	750	25	4340	1,3
4	695	39	4650	0,9
5	620	37	1270	0,24
6	592	16	476	0,22
7	523	38	832	0,16
8	457	87	1331	0,10

Мощность излучения каждого светодиода и его длина волны предварительно измерялись на калиброванном оборудовании (комплекс Instrument systems IS-2).

Поместив фотоприемники изолированное от внешней среды пространство было проведено измерение зависимости фототока фотодиода в фотодиодном режиме от расстояния между фотодиодом и светодиодом. Поскольку зависимость фототока от расстояния между источником и приемником подчиняется закону обратных квадратов, это позволило рассчитать чувствительность по формуле (5) [20]

$$S_{\phi} = \frac{\operatorname{tg}(\theta) \cdot \pi \cdot \operatorname{tg}(\alpha)^2}{P_e \cdot A_{\text{фд}}}, \quad (5)$$

где $A_{\text{фд}}$ – площадь фотодиода; $\operatorname{tg} \theta$ – тангенс угла наклона зависимости фототока от расстояния между приемником и излучателем; P_e – оптическая мощность излучения на светодиоде при заданном токе; α – угол распространения излучения.

Результаты расчетов для восьми образцов сведены в табл. 5, а усредненная зависимость абсолютной чувствительности представлена на рис. 5.

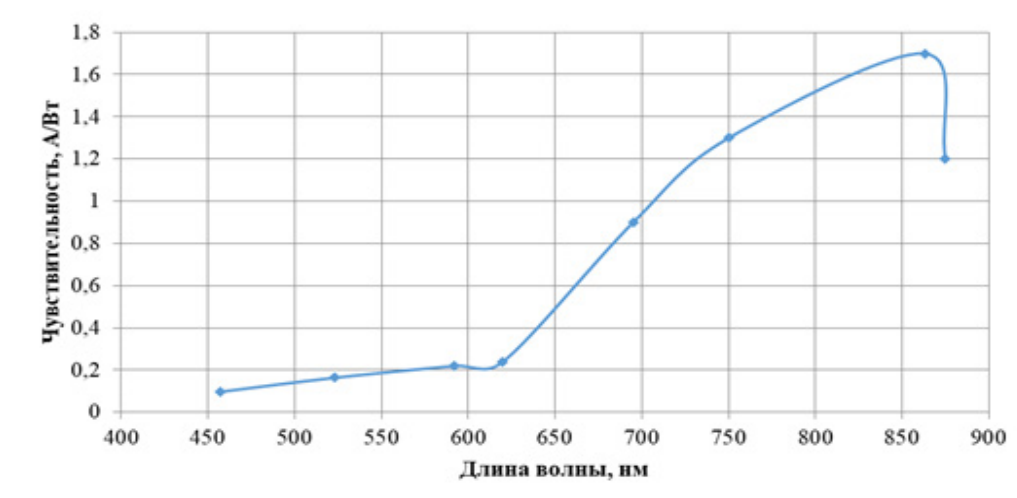


Рис. 5. Зависимость чувствительности фотодиода

Fig. 5. Dependence of photodiode responsivity

Из полученной зависимости следует что максимум чувствительности фотодиода приходится в диапазоне длин волн 850–865 нм, полученный результат довольно близок к ожидаемому результату, при этом чувствительность в указанном диапазоне достигает 1,7 А/Вт (стоит отметить что данное значение получено с использованием силиконового оптически прозрачного компаунда, применяемого для заливки светодиодов, которое в среднем добавляет от 10 до 50% к мощности, следовательно максимальное значение абсолютной чувствительности для фотодиодного кристалла составляет не менее 0,8 А/Вт, что удовлетворяет требованиям ТЗ.

Для подтверждения достоверности полученных данных, а также более подробного исследования спектра, образцы фотодиодов были исследованы на монохроматоре. Была измерена относительная спектральная чувствительность, а результаты измерения представлены на рис. 6.

Сравнение результатов (рис. 5 и 6) демонстрирует их хорошую сходимость, что подтверждает правильность измерения дискретным методом при помощи светодиодов и демонстрирует высокую спектральную чувствительность разработанного фотодиода в диапазоне 850–870 нм.

5. Исследование параметров быстродействия

Быстродействие фотодиода оценивалось по времени нарастания и спада фотоимпульса. Измерения проводились с использованием в импульсном режиме ИК-светодиода 3Л139БМ в качестве источника излучения в соответствии с методикой, приведенной в ГОСТ 17772-88. Паспортное значение времени нарастания/спада характеристики данного диода составляет не более 10 нс и фактически составляет 6 нс. На рис. 7 приведена осциллограмма импульсной характеристики фотодиода при обратном смещении 10 В.

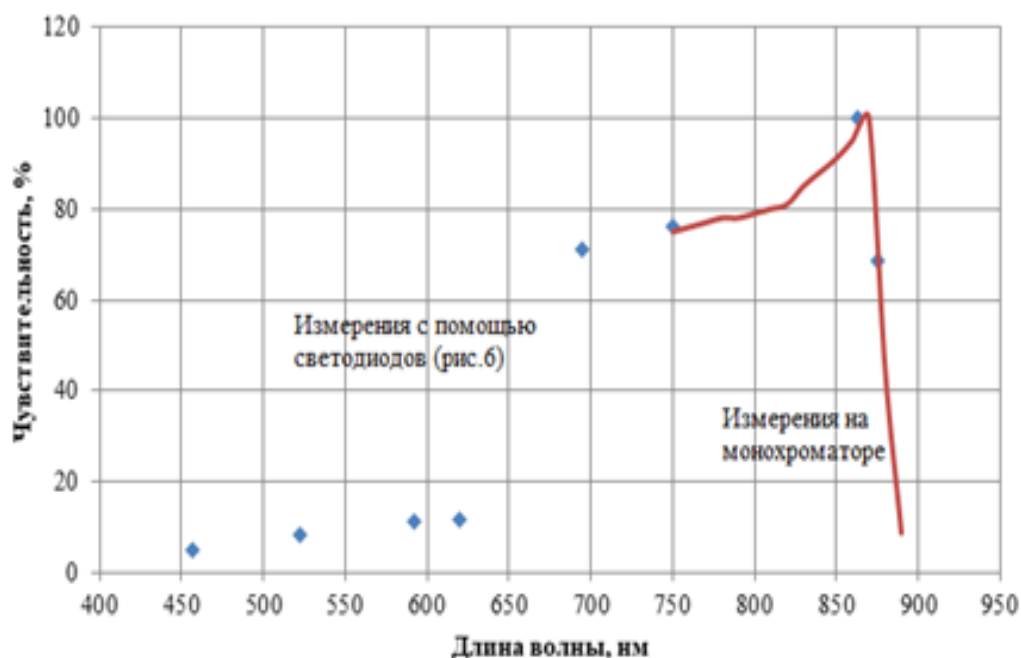


Рис. 6. Относительная спектральная чувствительность фотодиода

Fig. 6. Relative spectral responsivity of the photodiode

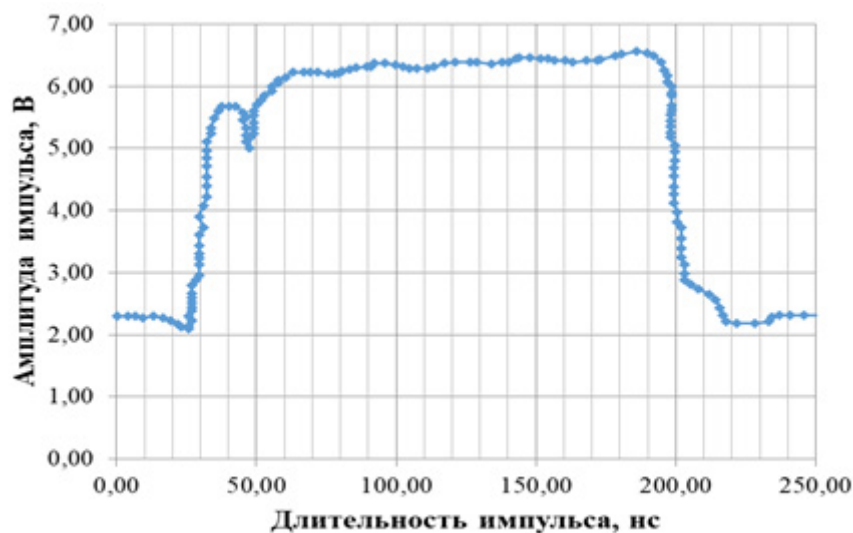


Рис. 7. Импульсная характеристика фотодиода

Fig. 7. Pulse response of a photodiode

Измеренное время нарастания выходного импульса составило ~ 8 нс. Время спада фотоимпульса, определенное по осциллограмме (рис. 7), составляет ~ 15 нс, что также свидетельствует о высоком быстродействии прибора. Полученные временные параметры подтверждают пригодность разработанного фотодиода для работы в составе высокоскоростных оптоэлектронных пар.

Выводы

Проведенные исследования позволили всесторонне оценить характеристики разработанного ИК-фотодиода на основе гетероструктуры GaAs и подтвердить его соответствие требованиям технического задания.

По ВАХ фотодиода установлено, что его обратный ток при смещении 10 В составляет 5 нА, что соответствует предельному значению ТЗ. Отсутствие лавинного пробоя вплоть до 30 В подтверждает высокое качество р-і-n-перехода и наличие технологического запаса у данной структуры, а также возможность применения в более жестких условиях.

Анализ вольт-фарадных характеристик (ВФХ) показал линейный характер зависимости $(1/C\delta)^2 = f(U)$, что свидетельствует

о резком р-n-переходе и однородном распределении примеси в области объемного заряда. Рассчитанная концентрация примеси в обедненном слое составила $\sim 3,6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, что хорошо согласуется с паспортными данными разработанной эпитаксиальной структуры. Барьерная емкость кристалла на частоте 1 МГц при напряжении смещения 10 В не превышает 17 пФ, что удовлетворяет требованию ТЗ (< 20 пФ).

Исследование спектральной чувствительности показало, что максимум абсолютной чувствительности приходится на диапазон длин волн 850–870 нм и достигает 1,7 А/Вт (или 0,8 без применения заливочных компаундов, повышающих эффективность), что значительно превышает требуемое значение (0,3 А/Вт). Сравнение результатов, полученных дискретным методом с использованием светодиодов, и измерений на монохроматоре продемонстрировало их хорошую сходимость, что подтверждает достоверность разработанной методики.

Оценка быстродействия показала, что время нарастания фотоимпульса составляет ~ 8 нс., а время спада – ~ 15 нс. Полученные значения соответствуют требованию ТЗ (≤ 10 нс) и подтверждают дрейфовый меха-

низм переноса носителей в *i*-слое, что является преимуществом *p-i-n*-конструкции перед классическими *p-n*-переходами.

Таким образом, в результате работы экспериментально подтверждено, что разработанная эпитаксиальная структура GaAs *p-i-n* позволяет изготавливать фотодиоды, полностью удовлетворяющие техническим требованиям по темновому току, напряжению пробоя, барьерной емкости, спектральной чувствительности и быстродействию. Полученные результаты создают основу для дальнейшей оптимизации конструкции (в частности, уточнения толщины *i*-слоя с целью улучшения баланса между квантовой эффективностью и временем отклика) и внедрения разработанных фотодиодов в состав высоконадежных оптоэлектронных пар для микросборок специального назначения.

Благодарности / Acknowledgments

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта FEWM 2024-0004.

The research was carried out with financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the FEWM 2024-0004 project.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Torshina I.P., Yakushenkov Yu.G. Selection of radiation detector for optoelectronic device design: textbook. Moscow: MIIГАiK Publishing House, 2017. 58 p. (In Russian). [Торшина И.П., Якушенков Ю. Г. Выбор приемника излучения при проектировании оптико-электронного прибора: учебное пособие. М.: Изд-во МИИГАиК, 2017. 58 с.].
2. Danilina T.I., Smirnova K.I. Micro- and nanotechnology processes: textbook. Tomsk: V-Spectrum, 2004. 259 p. (In Russian). [Данилина Т.И., Смирнова К.И. Процессы микро- и нанотехнологии: учебное пособие. Томск: В-Спектр, 2004. 259 с.].
3. Filippov S.N. Investigation of charge transfer mechanisms in photodiodes based on epitaxial layers of cadmium-mercury-tellurium solid solutions. In: Proceedings of the 50th Scientific Conference of MIPT «Modern Problems of Fundamental and Applied Sciences». Vol. 5. Moscow, 2007. P. 176–178. (In Russian). [Филиппов С.Н. Исследование механизмов переноса заряда в фотодиодах на основе эпитаксиальных слоев твердых растворов кадмий-ртуть-теллур. В сб.: Труды 50-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук». Т. 5. М.: 2007. С. 176–178].
4. Aguilar-González M.A. Synthesis and characterization of barium ferrite – silicananocomposites // Materials Characterization. 84, 175–181 (2013).
5. Fisher D.J. Diffusion in GaAs and other III–V semiconductors. 10 Years of Research. In: Defect and Diffusion Forum. Vol. 157–159. Trans Tech Publications, 1998.
6. Gradoboev A.V., Rubanov P.V. Degradation of LEDs based on heterostructures AlGaAs by irradiation with electrons. // Izvestiya VUZov. Phizika (Russian Physics Journal). 54(1/2), 195–197 (2011).
7. Gromov D.V. Materials science for micro- and nanoelectronics: textbook. Moscow: MEPhI, 2008. 156 p. (In Russian). [Громов Д. В. Материаловедение для микро- и нанoeлектроники: учебное пособие. М.: МИФИ, 2008. 156 с.].
8. Varenik Yu.A. Means of measuring volt-capacitance characteristics of semiconductor structures: PhD Thesis in Engineering Sciences: 05.11.01. Penza, 2010. 310 p. (In Russian). [Вареник Ю.А. Средства измерения вольт-фарадных характеристик полупроводниковых структур // диссертация кандидата технических наук: 05.11.01. Пенза, 2010. 310 с.].
9. Filachyov A.M., Taubkin I.I., Trishenkov M.A. The current state and main directions of development of solid-state photoelectronics. Moscow: Fizmatkniga, 2010. (In Russian) [Филачев А.М., Таубкин И.И., Тришенков М.А. Современное состояние и магистральные направления развития твердотельной фотоэлектроники. М.: Физматкнига, 2010].
10. Mikhailova M. P., Moiseev K.D., Voronina T.I., et al. Interface roughness scattering in type II broken-gap GaInAsSb/InAs single heterostructures // Journal of Applied Physics. 102, 113710 (2007). DOI: 10.1063/1.2817813.
11. Hoang A. M., Chen G., Haddadi A., Razeghi M. Demonstration of high performance bias-selectable dual-band short-/mid-wavelength infrared photodetectors based on typeII InAs/GaSb/AlSb superlattices // Applied Physics Letters. 102, 011108 (2013). DOI: 10.1063/1.4773593.
12. Haywood S., Missons M. QWIP Detectors for the MWIR / ed. A. Krier. Mid-Infrared semiconductor optoelectronics. Vol. I. London: Springer-Verlag London Limited, 2006 P. 429–452.
13. Remenny M.A., Matveev B.A., Zotova N.V., et al. InAs and InAs(Sb)(P) (3-5 μm) immersion lens photodiodes for portable optic sensors / ed. F. Baldini, J.

Homola, R.A. Lieberma. In: Proceedings of SPIE. Vol. 6585. SPIE, 2007. Art. 658504. DOI: 10.1117/12.722847.

14. Notargiacomo, A. Fabrication of air-bridge Schottky diodes on germanium for high speed IR detectors / A. Notargiacomo, V. Foglietti, E. Cianci [et al.] // Microelectronic Engineering. – 2011. – Vol. 88, no. 8. – P. 2714–2716.

15.] Li, X.-J. Observation of Fano resonance in the photoluminescence from silicon nanocrystals / X.-J. Li, D.-Q. Zhu, B.-H. Liao [et al.] // Chinese Physics Letters. – 2003. – Vol. 20, no. 2. – P. 311–314.

16. Sokolovskii G.S., Rafailov E.U., Deryagin A.G., et al. Picosecond InP photoconductors produced by deep implantation of heavy ions. In: Proceedings of SPIE. Vol. 2816. SPIE, 1996. P. 106–109. DOI: 10.1117/12.255158.

17. Park K.-S., Oh K.-R., Kim J.-S., et al. An InGaAs/InP p-i-n-JFET OEIC with a wing-shaped p⁺-InP layer // IEEE Photonics Technology Letters. 4, 387–389 (1992).

18. Norton, P. HgCdTe infrared detectors / P. Norton // Opto-Electronics Review. – 2002. – Vol. 10, no. 3. – P. 159–174.

19. Joshi A.M., Heine F., Feifel T. Rad-hard, ultrafast, InGaAs photodiodes for space applications / ed. R.T. Howard, R.D. Richards. In: Proceedings of SPIE. Vol. 6220. SPIE, 2006. Art. 622003. DOI: 10.1117/12.666055.

20. Ru Guoping, Zheng Yanlan, Li Aizhen. The wavelength shift in GaInAsSb photodiode structures // Journal of Applied Physics. 77, 6721–6723 (1995). DOI: 10.1063/1.359088.