

Si/Ge pin фотодиод с множественными квантовыми ямами

И.В. Кулинич^{1,2}, А.В. Таловская¹, Е.В. Шестериков^{1,2}

¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, kulinich@tusur.ru

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск

Аннотация — В работе приведены расчеты темнового тока, фототока и быстродействия pin фотодиода с квантовыми структурами на основе Si с Si/Ge гетероструктурой. Полученные результаты позволили провести анализ и сформулировать рекомендации по выбору конструкции Si pin фотодиода для различных сфер применения на длине волны 1,55 мкм

Ключевые слова — pin фотодиод, квантовые структуры, гетероструктура.

I. ВВЕДЕНИЕ

Недорогие фотодиоды ближнего и коротковолнового инфракрасного диапазона имеют большой потенциал для приложений телекоммуникаций, оптической локации и систем оптического зрения [1].

На сегодняшний день высокочувствительные pin фотодиоды для длины волны 1,55 мкм в основном изготавливаются из материалов группы A_3B_5 , таких как GaAs, InP, имеющих высокую стоимость производства [2]. С другой стороны, электроника на основе Si имеет наиболее развитую технологическую базу и обусловлена низкой стоимостью, но Si фотодиоды используются в диапазоне длин волн до ~ 1100 нм. В научном сообществе ведутся работы, которые направлены на получение pin фотодиодов на основе Si с высокой чувствительностью для длины волны 1,55 мкм путем реализации плоских эпитаксиальных множественных квантовых ям (МКЯ) в слоях SiGe/Si [3].

МКЯ в Si pin фотодиодах выполнены в виде квантовых структур размерами порядка 10 нм, реализация которых осуществляется путем эпитаксиального роста. МКЯ с такими размерами позволяют достигать высокие выходные параметры прибора. Реализация МКЯ с минимальными размерами затруднительна и в приложениях, где не требуются пиковых значений всех параметров, не всегда оправдана. Так, например, условно можно разделить сферы применения pin фотодиодов для [4-7]:

- Телекоммуникации: темновой ток порядка 10 нА, быстродействие – 5 нс;
- Спектральный анализ: темновой ток порядка 7 нА, быстродействие – 10 нс;

- LIDAR системы: темновой ток порядка 3 нА, быстродействие – 3 нс;

- ИК датчики: темновой ток порядка – 60 нА, быстродействие – 100 нс.

Соответственно для разных сфер применения не целесообразно использовать МКЯ с минимальными квантовыми структурами.

В данной работе рассматривается влияние конструкции МКЯ на основе SiGe слоя на ключевые параметры Si pin фотодиода для длины волны 1,55 мкм.

II. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ СТРУКТУРЫ КЯ PIN ФОТОДИОДА

На рис. 1 представлена наиболее простая в изготовлении конструкция pin фотодиода с квантовой ямой (КЯ).

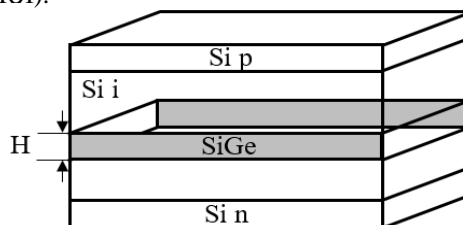


Рис. 1. Структура pin фотодиода с квантовой ямой

На данной структуре будет исследоваться влияние высоты (H) гетероструктуры на параметры исследуемого фотодиода.

Далее заданная выше структура будет делиться на ячейки, тем самым формируя квантовые нити, на которых будет исследоваться влияние ширины (L) гетероструктуры на параметры исследуемого фотодиода (рис. 2).

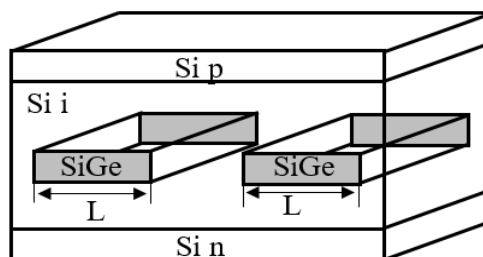


Рис. 2. Конструкция pin фотодиода с квантовыми нитями

Затем конструкция с квантовыми нитями снова делится на ячейки, формируя квантовые точки (рис. 3).

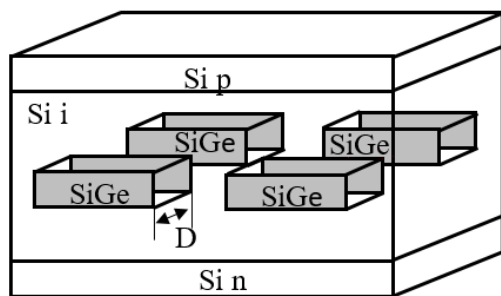
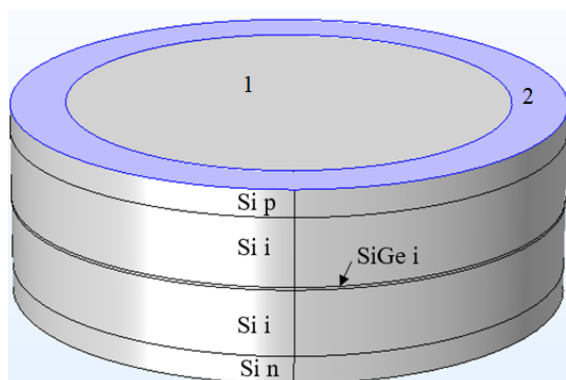


Рис. 3. Конструкция p-i-n фотодиода с квантовыми точками

В данной конструкции будет исследоваться влияние длины (D) гетероструктуры на параметры p-i-n фотодиода.

Для повышения эффективности p-i-n фотодиода в дискретном исполнении применяется конструкция в виде цилиндра. На рис. 4 представлено схематическое представление исследуемого p-i-n фотодиода. В данной работе для упрощения расчетов использовался один эпитаксиальный слой SiGe.



1 – области ввода излучения;
2 – область омического контакта

Рис. 4. Схематическое представление модели исследуемого p-i-n фотодиода

Падающая мощность входного излучения была равной 1 мВт, напряжение обратного смещения -5В.

В качестве исходных геометрических параметров были приняты следующие данные:

- Толщина p слоя – 500 нм;
- Толщина i слоя Si – 2500 нм;
- Толщина i слоя Si/Ge – 50 нм;
- Толщина p слоя – 500 нм;
- Диаметр фотодиода – 10 мкм;
- Концентрация примеси в p – слое: 10^{19} см^{-3} ;
- Концентрация примеси в p – слое: 10^{19} см^{-3} ;
- Концентрация примеси в i (Si) – слое: $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$;
- Концентрация примеси в i (SiGe) – слое: $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Расчет электрического потенциала и дрейфа носителей заряда осуществлялось на основе уравнения Пуассона (1).

$$\nabla \cdot (-\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \nabla \cdot V) = \rho. \quad (1)$$

Для области омических контактов учитывалось локальное термодинамическое равновесие на контакте.

Генерация электронно-дырочных пар учитывалось как за счет спонтанной эмиссии, так и за счет стимулированного излучения, при этом вычислялись соответствующие изменения комплексного показателя преломления и относительной диэлектрической проницаемости с помощью соотношения Крамерса-Кронинга. Расчеты в области с квантовыми ограничениями проводились на основе теории термоэлектронной эмиссии.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ P-I-N ФОТОДИОДА

A. PIN фотодиод с квантовой ямой

В табл. 1 представлены расчетные значения фототока, темнового тока и быстродействия при уменьшении толщины квантовой ямы H с 50 до 10 нм.

Таблица 1

Параметры p-i-n фотодиода с квантовой ямой

Высота (H), нм	Фототок, мкА	Темновой ток, нА	Быстродействие, нс
50	1,91	66,49	4,2
45	1,76	64,50	4,0
40	1,60	62,66	3,7
35	1,42	61,10	3,4
30	1,29	59,10	2,8
25	1,11	57,55	2,5
20	0,92	55,54	2,1
15	0,74	52,20	1,8
10	0,48	51,98	1,6

B. PIN фотодиод с квантовой нитью

Геометрические параметры для фотодиода с квантовыми нитями:

- Толщина p слоя – 500 нм;
- Толщина i слоя Si – 2500 нм;
- Толщина i слоя Si/Ge – 30 нм;
- Толщина p слоя – 500 нм;
- Диаметр фотодиода – 10 мкм.

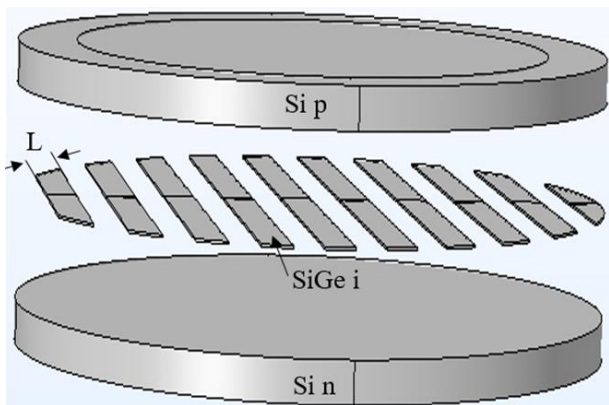


Рис. 5. Схематическое представление модели исследуемого p-i-n фотодиода с квантовыми нитями

В табл. 2 представлены расчетные значения фототока, темнового тока и быстродействия при уменьшении ширины L квантовой нити с 50 до 10 нм.

Таблица 2

Параметры p-i-n фотодиода с квантовой нитью

Ширина (L), нм	Фототок, мкА	Темновой ток, нА	Быстродействие, нс
50	1,02	22,18	3,3
45	0,93	21,23	3,1
40	0,83	20,98	2,8
35	0,72	18,89	2,4
30	0,63	16,89	2,1
25	0,54	13,31	1,8
20	0,43	10,98	1,6
15	0,32	8,50	1,4
10	0,22	6,67	1,2

С. PIN фотодиод с квантовой точкой

Геометрические параметры для фотодиода с квантовыми точками:

- Толщина p слоя – 500 нм;
- Толщина i слоя Si – 2500 нм;
- Толщина i слоя Si/Ge – 30 нм;
- Толщина p слоя – 500 нм;
- Ширина i слоя Si/Ge – 30 нм;
- Диаметр фотодиода – 10 мкм.

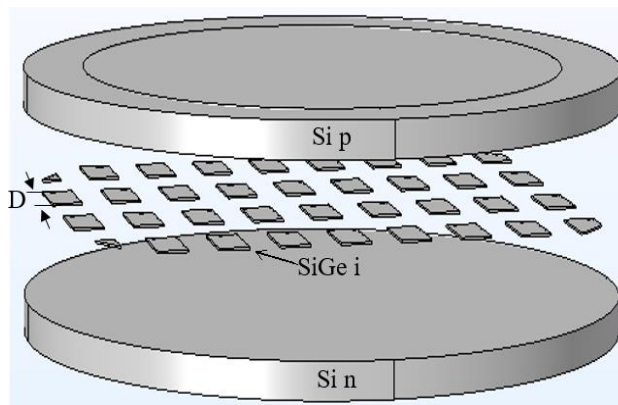


Рис. 6. Схематическое представление модели исследуемого p-i-n фотодиода с квантовыми точками

В табл. 3 представлены расчетные значения фототока, темнового тока и быстродействия при уменьшении длины L квантовой точки с 50 до 10 нм.

Таблица 3

Параметры p-i-n фотодиода с квантовой точкой

Длина (D), нм	Фототок, мкА	Темновой ток, нА	Быстродействие, нс
50	0,68	12,84	2,2
45	0,61	11,52	1,9
40	0,54	10,30	1,7
35	0,46	9,23	1,5
30	0,38	8,15	1,3
25	0,32	7,10	1,1
20	0,24	5,65	1,0
15	0,16	4,64	0,7
10	0,09	3,51	0,5

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных результатов были сформулированы следующие рекомендации по выбору структуры для p-i-n фотодиода:

- Для применения в телекоммуникационных сетях возможно использование Si диодов с размерами SiGe квантовых нитей менее 20 нм;

- Для применения в спектральных анализаторах возможно использование Si диодов с размерами SiGe квантовых точек менее 25 нм;

- Для применения в LIDAR системах возможно использование Si диодов с размерами SiGe квантовых точек менее 20 нм;

- Для применения в ИК датчиках возможно использование Si диодов с размерами SiGe квантовой ямы менее 30 нм.

ПОДДЕРЖКА

Расчеты проводились на основе разработанной методики, выполненной при финансовой поддержке РФФИ и Томской области в рамках научного проекта № 19-42-703023.

Исследования по данной тематике выполнены в рамках государственного заказа ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Коколов А.А., Коряковцев А.С., Бабак Л.И., Шеерман Ф.И., Конкин Д.А., Светличный Ю.А. Дифференциальный трансимпедансный усилитель DC-20 ГГц на основе SiGe BiCMOS технологии для интегрального оптического приемника Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2019.- Т.1.- No.1. - С. 218-223.

- [2] R. Soref, D. Buca, and S. -Q. Yu. Group IV photonics: Driving integrated optoelectronics. Opt. Photonics News 27, 32 (2016).
- [3] Zimmermann H. Silicon Technologies and Integrated Photodetectors / H. Zimmermann // Integrated Silicon Optoelectronics. Springer Series in Optical Sciences, 2009. – Vol 148. – P. 29 – 153.
- [4] TMC-8D31-000 GaAs PIN photodiode. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://componentltd.ru> (дата обращения: 1.06.2021).
- [5] M D C Whitaker1, G Lioliou1, A B Krysa, A M Barnett InGaAs x-ray photodiode for spectroscopy / M D C Whitaker1, G Lioliou1, A B Krysa, A M Barnett // Materials Research Express – 2020. – Vol. 7. – No. 10. – 5 p.
- [6] Si photodiodes for LiDAR. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://www.hamamatsu.com> (дата обращения: 1.06.2021).
- [7] Photodiode Detectors. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://www.photonics.com> (дата обращения: 1.06.2021).

Si/Ge Multiple Quantum Well pin-Photodiode

I.V. Kulinich^{1,2}, A.V. Talovskaya¹, E.V. Shesterikov^{1,2}

¹Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, kulinich@tusur.ru

²V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of RAS SB, Tomsk

Abstract — In the study, various designs of a silicon pin of a photodiode with quantum wells, filaments and dots based on Si/Ge heterostructure are considered. Calculations of the dark current, photocurrent and speed of a pin photodiode for various designs with quantum structures are presented. The results obtained made it possible to analyze and formulate recommendations for choosing a Si pin photodiode design for such applications as telecommunications, optical location and optical vision systems at wavelength of 1.55 μm.

Keywords — pin photodiode, quantum structures, heterostructure.

REFERENCES

[1] Kokolov A.A., Koryakovtsev A.S., Babak L.I., Sheerman F.I., Konkin D.A., Svetlichnyi Yu.A. Differentsial'nyi transimpedansnyi usilitel' DC-20 GGts na osnove SiGe BiCMOS tekhnologii dlya integral'nogo opticheskogo

- priemnika (Differential transimpedance amplifier DC-20 GHz based on SiGe BiCMOS technology for integrated optical receiver) Elektronika i mikroelektronika SVCh. 2019.- Т.1.- No.1. - С. 218-223
- [2] R. Soref, D. Buca, and S. -Q. Yu. Group IV photonics: Driving integrated optoelectronics. Opt. Photonics News 27, 32 (2016)
- [3] Zimmermann H. Silicon Technologies and Integrated Photodetectors / H. Zimmermann // Integrated Silicon Optoelectronics. Springer Series in Optical Sciences, 2009. – Vol 148. – P. 29 – 153.
- [4] URL: <https://componentltd.ru> (access date: 1.06.2021)
- [5] M D C Whitaker1, G Lioliou1, A B Krysa, A M Barnett InGaAs x-ray photodiode for spectroscopy / M D C Whitaker1, G Lioliou1, A B Krysa, A M Barnett // Materials Research Express – 2020. – Vol. 7. – No. 10. – 5 p.
- [6] URL: <https://www.hamamatsu.com> (access date: 03.03.2021)
- [7] URL: <https://www.photonics.com> (access date: 10.05.2021)