

УДК 621.31:535.215

PACS: 85.60.Gz; 68.65.Hb; 81.10.Aj

Темновой ток фотодетекторов на основе многослойных структур с квантовыми точками

А. П. Коханенко, А. В. Войцеховский, К. А. Лозовой, Р. Духан,
В. В. Дирко, Н. Ю. Акименко

Описывается поведение многослойного фотодетектора с квантовыми точками германия в кремнии и его параметры при различных рабочих режимах. Рассматриваются вопросы оптимизации условий роста в методе молекулярно-лучевой эпитаксии для повышения эффективности инфракрасных фотоприемников с квантовыми точками. В качестве модельной материальной системы для теоретических исследований выбраны многослойные гетероструктуры с квантовыми точками германия на поверхности кремния. В представленной работе разработана теоретическая модель для учета наличия в фотодетекторах нескольких слоев квантовых точек, а также рассогласования квантовых точек по размерам. Проведены расчеты шумовых и сигнальных характеристик инфракрасных фотоприемников на основе гетероструктур с квантовыми точками германия на кремнии. Оценены темновые токи в таких структурах, вызванные тепловой эмиссией и барьерным туннелированием носителей. Для проверки модели мы сравнили теоретические значения темнового тока с экспериментальными результатами, полученными в работах других исследователей.

Ключевые слова: инфракрасные фотодетекторы, темновой ток, шумовые характеристики, наногетероструктуры, молекулярно-лучевая эпитаксия, квантовые точки.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-5-42-48

Введение

Полупроводниковые детекторы с рабочей температурой, близкой к комнатной, стали

Коханенко Андрей Павлович¹, профессор, д.ф.-м.н.

E-mail: kokh@mail.tsu.ru

Войцеховский Александр Васильевич¹, профессор, д.ф.-м.н.

E-mail: vav43@mail.tsu.ru

Лозовой Кирилл Александрович¹, доцент, к.ф.-м.н.

E-mail: lka@sibmail.com

Духан Рахаф¹, аспирант.

E-mail: rd_dh_k_h_r@hotmail.com

Дирко Владимир Владиславович¹, аспирант.

E-mail: vovenmir@gmail.com

Акименко Наталья Юрьевна², доцент, к.т.н.

E-mail: n_akimenko@inbox.ru

¹ Томский государственный университет.

Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

² Тихоокеанский государственный университет.

Россия, 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.

Статья поступила в редакцию 25 мая 2022 г.

© Коханенко А. П., Войцеховский А. В., Лозовой К. А.,
Духан Р., Дирко В. В., Акименко Н. Ю., 2022

необходимыми в сфере оптического обнаружения (особенно в видимом и инфракрасном диапазонах спектра) в различных быстро развивающихся областях применений. В таких приложениях, как детектирование света, фотоприемники на основе кремния стали одними из ведущих представителей благодаря высокой чувствительности и короткому временному отклику, что привело к созданию усовершенствованных кремниевых фотоприемных устройств, превратившихся в массивы детекторов большого формата со встроенной электроникой. Основным преимуществом такого подхода является то, что это недорогая технология, позволяющая адаптироваться под разработку систем различного назначения на основе существующей кремниевой технологии. Согласованность коэффициентов теплового расширения материалов массива детекторов и схемы считывания также позволяет работать в широком интервале рабочих температур [1].

С момента появления метода молекулярно-лучевой эпитаксии, который расширил

возможности для создания большего количества устройств на основе полупроводниковых материалов, и после большого успеха структур с квантовыми ямами для инфракрасного детектирования, квантовым системам было уделено много внимания [2]. Это стимулировало разработку структур на основе квантовых точек, способных обнаруживать инфракрасное излучение. В последние десятилетия структуры с квантовыми точками доказали свою эффективность по сравнению с другими типами полупроводников, и они стали интересной областью для исследований из-за их высокого коэффициента фотопроекции, низкого темнового тока и способности работать в условиях повышенных температур. Они стали предметом для изучения не только с точки зрения фундаментального понимания всей физики и новых процессов, характерных для низкоразмерных систем, но и с точки зрения их применения в инфракрасной оптоэлектронике [3]. В настоящее время можно надежно и воспроизводимо изготавливать практически бездефектные устройства на квантовых точках. На сегодняшний день инфракрасные детекторы с квантовыми точками уже использовались в ряде приложений квантовой фотоники, включая эксперименты в области квантовых коммуникаций в оптоволокне и в свободном пространстве [4].

В данной работе будет описано поведение многослойного фотодетектора с квантовыми точками германия в кремнии и его параметры при различных рабочих режимах. В представленной работе разработана теоретическая модель, описанная в [5, 6], для учета наличия в фотодетекторах нескольких слоев квантовых точек, а также рассогласования квантовых точек по размерам [7]. Проведен расчет параметров таких фотоприемников: рассчитаны темновой ток, фототок и обнаружительная способность. Для проверки модели мы сравнили теоретические значения темнового тока с экспериментальными результатами, полученными в работах других исследователей [1, 8].

Модель

Мы будем рассматривать фотоприемник с несколькими слоями, содержащими квантовые точки. Схематическое изображение структуры слоев многослойного фотодетектора с квантовыми точками представлено на рис. 1. На этом рисунке K – количество слоев квантовых точек, L – расстояние между слоями с квантовыми точками, a_{QD} – средний размер квантовых точек, L_{QD} – среднее расстояние между квантовыми точками в плоскости слоя.

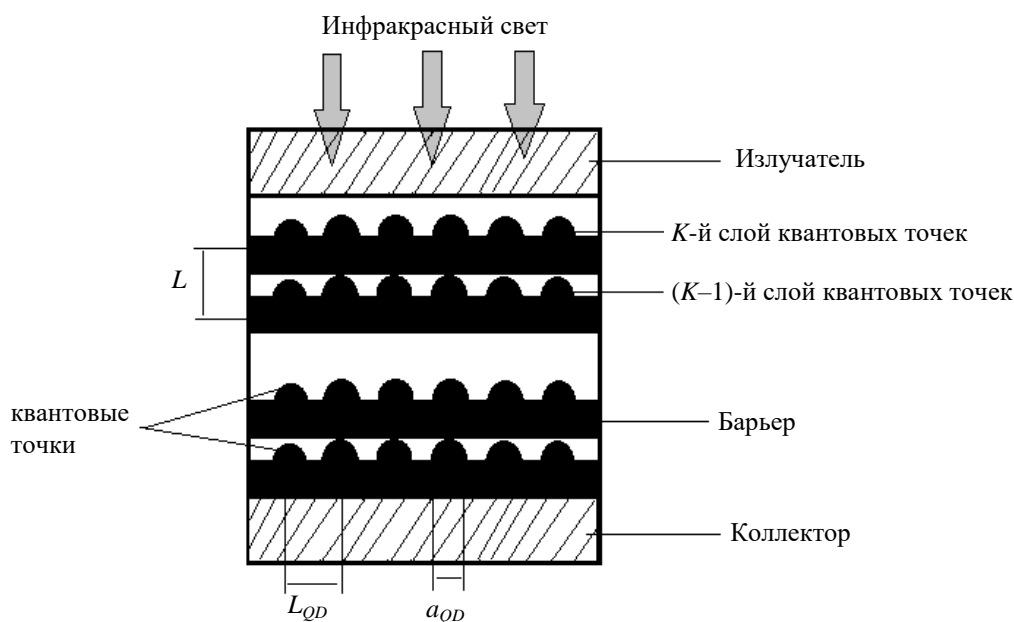


Рис. 1. Схематическое изображение структуры слоев многослойного фотодетектора на квантовых точках

Каждый слой с квантовыми точками состоит из периодического распределения одинаковых квантовых точек с плотностью Σ_{QD} и слоевой плотностью легирующих доноров, равной Σ_D . Каждая квантовая точка имеет большое количество связанных состояний, чтобы принять больше электронов, поскольку предполагается, что латеральный размер квантовых точек a_{QD} достаточно велик. Поперечный размер мал по сравнению с расстоянием между слоями квантовых точек L для обеспечения единого уровня энергии, связанного с квантованием в поперечном направлении. Бокковое расстояние между квантовыми точками L_{QD} определяется их поверхностной плотностью и равно $\sqrt{\Sigma_{QD}}$.

Согласно модели [5, 6], плотность темнового тока в фотоприемнике на квантовых точках выражается следующим образом

$$j_d = j_{\max} \Sigma_{QD} \int_0^{\infty} \exp\left(\frac{e\phi N_K}{kT}\right) dr^2,$$

где e – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; T – температура; N_K – среднее число электронов в квантовой точке, принадлежащих K -му слою с квантовыми точками; j_{\max} – максимальная плотность тока, которая может быть рассчитана с использованием соотношения Ричардсона–Дешмана [9]:

$$j_{\max} = A^* T^2,$$

где A^* – постоянная Ричардсона.

Темновой ток после интегрирования можно выразить как

$$j_d = j_{\max} \frac{\Theta}{N} \exp\left(e \frac{V + V_D - (N/N_{QD})V_{QD}}{(K+1)kT}\right).$$

В этой формуле используется следующий безразмерный параметр:

$$\Theta = \frac{\pi}{4} \left[\operatorname{erf} \left(0,47 L_{QD} \sqrt{\frac{N \Sigma_{QD}^{3/2}}{\varepsilon_0 \varepsilon_r kT}} \right) \right]^2 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r kT}{e^2 \sqrt{\Sigma_{QD}}},$$

а также введены характеристические напряжения V_D и V_{QD} , равные

$$V_D = \frac{e}{2\varepsilon_0 \varepsilon_r} K(K+1) \Sigma_D L,$$

и

$$V_{QD} = \frac{e}{2\varepsilon_0 \varepsilon_r} K(K+1) \Sigma_{QD} L(1-\nu) N_{QD},$$

где

$$\nu = \frac{0,72\sqrt{2}}{\pi K L \sqrt{\Sigma_{QD}}}.$$

В приведенных выше выражениях V – приложенное напряжение, ε_r – диэлектрическая проницаемость материала, из которого изготовлена квантовая точка, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, N_{QD} – максимальное число электронов в квантовой точке, N – среднее число электронов в квантовой точке.

С другой стороны темновой ток можно рассчитать и другим способом:

$$j_d = e v_d n_{3D},$$

где v_d – дрейфовая скорость электронов, n_{3D} – трехмерная плотность электронов, которая может быть выражена как

$$n_{3D} = 2 \left(\frac{m_b kT}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right),$$

где m_b – эффективная масса электрона; E_a – полная энергия активации процесса переноса электронов, включая перенос в микро- и наномасштабах [10]:

$E_a = E_{0,m} \exp(-E/E_0) + E_{0,n} - \beta E$, – напряженность приложенного электрического поля; $E_{0,m}$

– энергия активации в микромасштабе; $E_{0,n}$ – энергия активации в наномасштабе; E_0 и β – экспериментально определяемые параметры, характеризующие скорость изменения энергии активации с изменением величины электрического поля.

Отсюда можно получить плотность темнового тока в альтернативной форме:

$$j_d = 2ev_d \left(\frac{m_b kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \times \exp \left(- \frac{E_{0,m} \exp(-E/E_0) + E_{0,n} - \beta E}{kT} \right).$$

Таким образом, мы можем записать соотношение баланса темновых токов следующим образом:

$$2ev_d \left(\frac{m_b kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \times \exp \left(- \frac{E_{0,m} \exp(-E/E_0) + E_{0,n} - \beta E}{kT} \right) = j_{\max} \frac{\Theta}{N} \exp \left(e \frac{V + V_D - (N/N_{QD})V_{QD}}{(K+1)kT} \right).$$

Решая это уравнение, мы можем определить среднее число электронов в квантовой точке N .

Другими важными параметрами фотодетектора с квантовыми точками являются фототок детектора, протекающий при наличии сигнала, и обнаружительная способность. Фо-

тоток можно выразить как

$$j_p = e\Phi\eta g_p,$$

где Φ – плотность падающего светового потока; η – квантовая эффективность; g_p – коэффициент усиления фотопроводимости. Квантовую эффективность можно рассчитать как

$$\eta = \delta NK\Sigma_{QD},$$

где δ – площадь сечения захвата электронов. Используя соотношение между квантовым выходом и средним числом электронов в квантовой точке, фототок можно выразить как

$$j_p = \delta e g_p NK\Sigma_{QD}\Phi.$$

Если пренебречь тепловым шумом, то обнаружительную способность D^* такого фотоприемника можно определить как

$$D^* = \frac{R_i \sqrt{A}}{\sqrt{4eI_d g_n}},$$

где R_i – токовая чувствительность фотоприемника с квантовыми точками; A – площадь фотоприемной площадки; I_d – темновой ток; g_n – коэффициент усиления шума. Мы будем считать, что $g_n = g_p$.

Чувствительность фотоприемника можно представить следующим образом:

$$R_i = \frac{\delta e g_p NK\Sigma_{QD}}{h\nu}.$$

В результате можно рассчитать обнаружительную способность:

$$D^* = \frac{\delta g_p NK\Sigma_{QD}}{h\nu \sqrt{8g_n v_d \left(\frac{m_b kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \exp \left(- \frac{E_{0,m} \exp(-E/E_0) + E_{0,n} - \beta E}{kT} \right)}}.$$

Результаты

В результате решения полученных уравнений темновой ток, фототок и обнаружительная способность были представлены как функции температуры и приложенного электрического поля. При расчетах использовались следующие значения параметров модели: $E_{0,m} = 34,6$ мэВ, $E_{0,n} = 210$ мэВ, $E_0 = 1$ кВ/см, $\alpha = 2$ мэВ см/кВ, $L = 30$ нм, $K = 10$, $N_{QD} = 8$, $\Sigma_{QD} = 4 \times 10^{10}$ см⁻², $\Sigma_D = 0,3 \Sigma_{QD}$.

Для проверки используемой модели расчетные значения темнового тока сравнивались с экспериментальными результатами, полученными в работах [1, 8].

На рис. 2 представлены экспериментальные и расчетные темновые вольт-амперные характеристики (ВАХ) фотоприемника с квантовыми точками германия на кремнии из работы [1] для разных температур.

Кроме того, для дальнейшей проверки мы сравнили полученные нами теоретические расчеты с экспериментальными результатами из работы [8], показанные на рис. 3.

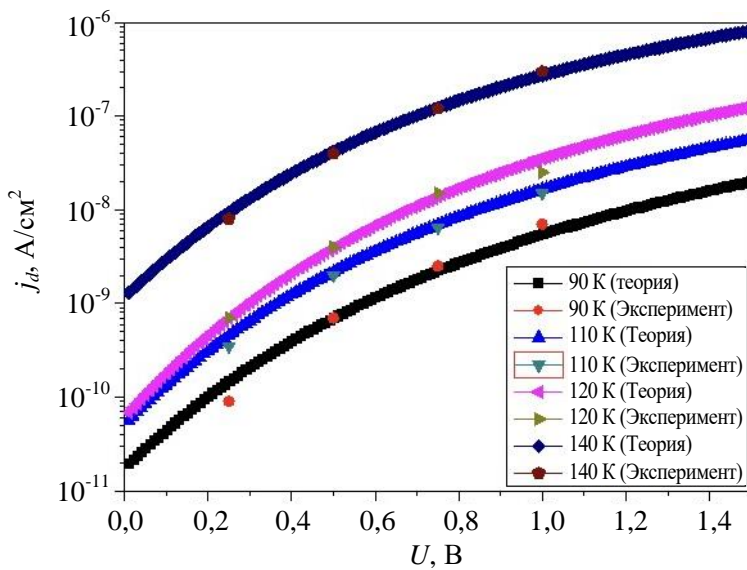


Рис. 2. Темновые вольт-амперные характеристики многослойных фотоприемников на основе квантовых точек германия в кремнии при различных температурах из работы [1]

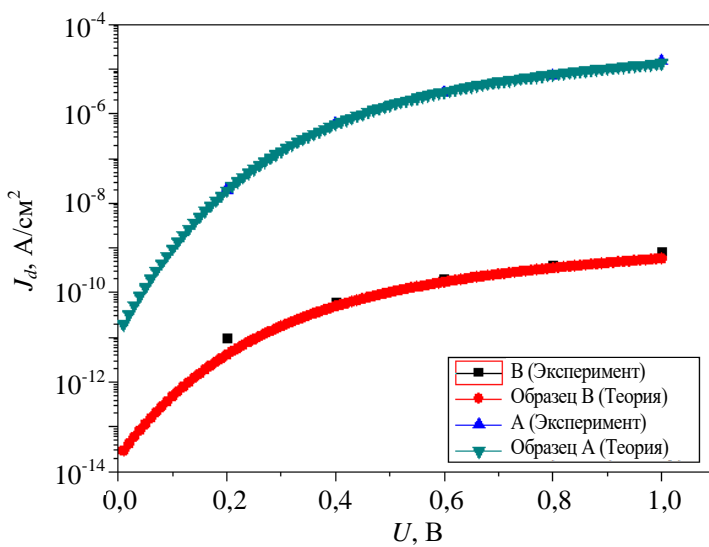


Рис. 3. Темновые вольт-амперные характеристики для многослойных фотоприемников на основе квантовых точек германия в кремнии из работы [8]

Сравнение с экспериментом позволяет установить, что, подобрав значения энергий

активации $E_{0,m}$ и $E_{0,n}$ в соответствии с экспериментальными данными по энергетической

структуре фотоприемников с квантовыми точками, можно получить хорошее соответствие между теорией и результатами экспериментальных измерений темновой ВАХ [11].

Заключение

Таким образом, в работе проведен расчет параметров фотоприемников: рассчитаны темновой ток, фототок и обнаружительная способность. Выделены результаты для сравнения их с параметрами других типов фотоприемников, рассмотрена разница между ними. Показано, что многослойные фотодетекторы с квантовыми точками могут обеспечить лучшие характеристики, а именно более высокую рабочую температуру (из-за большого времени жизни носителей), низкий темновой ток и высокий коэффициент фотоэлектрического усиления. В результате моделирования темновой ток, фототок и обнаружительная способность представлены в этой работе как функции числа слоев с квантовыми точками, температуры и приложенного электрического поля. Показано, что при выборе для параметров модели значений, соответствующих экспериментальным исследованиям, результаты моделирования хорошо соответствуют экспериментальным данным. Кроме того, сделан вывод о том, что многослойные Ge/Si фотоприемники на основе германиевых квантовых точек с высокой степенью однородности островков по размеру обладают высокой обнаружительной способностью и низкими шумовыми токами, что указывает на перспективность создания фотоприемников на их основе.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSWM-2020-0048.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yakimov A. I. // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2013. Vol. 49. P. 467.
2. Войцеховский А. В., Кульчицкий Н. А., Мельников А. А., Несмелов С. Н., Коханенко А. П., Лозовой К. А. // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 9. С. 20.

3. Siontas S., Li D., Wang H., Aravind A. V. P. S., Zaslavsky A., Pacifici D. // Materials Science in Semiconductor Processing. 2019. Vol. 92. P. 19.

4. Izhnin I. I., Lozovoy K. A., Kokhanenko A. P., Khomyakova K. I., Douhan R. M. H., Dirko V. V., Voitsekhevskii A. V., Fitsych O. I., Akimenko N. Yu. // Applied Nanoscience. 2022. Vol. 12. P. 253.

5. Martyniuk P., Rogalski A. // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences. 2009. Vol. 57. P. 103.

6. Liu H., Zhang J. // Infrared Physics & Technology. 2012. Vol. 55. P. 320.

7. Духан П. М. Х., Коханенко А. П., Лозовой К. А. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2018. Т. 61. № 7. С. 8.

8. Wang K. L., Cha D., Liu J., Chen C. // Proceedings of the IEEE. 2007. Vol. 95. P. 1866.

9. Mahmoodi A., Jahromi H. D., Sheikhi M. H. // IEEE Sensors Journal. 2015. Vol. 15. P. 5504.

10. Lin L., Zhen H. L., Li N., Lu W., Weng Q. C., Xiong D. Y., Liu F. Q. // Appl. Phys. Lett. 2010. Vol. 97. P. 193511.

11. Войцеховский А. В., Коханенко А. П., Лозовой К. А. // Прикладная физика. 2016. № 6. С. 42.

PACS: 85.60.Gz; 68.65.Hb; 81.10.Aj

Dark current of photodetectors based on multilayer structures with quantum dots

A. P. Kokhanenko¹, A. V. Voitsekhovskii¹, K. A. Lozovoy¹, R. Douhan¹, V. V. Dirko¹,
and N. Yu. Akimenko²

¹ Tomsk State University
36 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia
E-mail: kokh@mail.tsu.ru

² Pacific National University
136 Tikhookeanskaya st. Khabarovsk, 680035, Russia

Received May 25, 2022

This paper describes the behavior of a multilayer photodetector with germanium quantum dots in silicon and its parameters under various operating conditions. The issues of optimizing the growth conditions in the method of molecular beam epitaxy to increase the efficiency of infrared photodetectors with quantum dots are considered. Multilayer heterostructures with germanium quantum dots on the silicon surface were chosen as a model material system for theoretical studies. In the present work, a theoretical model has been developed to take into account the presence of several layers of quantum dots in photodetectors, as well as the mismatch of quantum dots in size. The noise and signal characteristics of infrared photodetectors based on heterostructures with germanium quantum dots on silicon are calculated. The dark currents in such structures caused by thermal emission and barrier tunneling of carriers are estimated. To test the model, we compared the theoretical values of the dark current with the experimental results obtained in the works of other researchers.

Keywords: Infrared photodetectors, dark current, noise characteristics, nanoheterostructures, molecular beam epitaxy, quantum dots.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-5-42-48

REFERENCES

1. A. I. Yakimov, Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing **49**, 467 (2013).
2. A. V. Voitsekhovskii, N. A. Kulchitskii, A. A. Melnikov, S. N. Nesmelov, A. P. Kokhanenko, and K. A. Lozovoy, Nano- and microsystem technology, No. 9, 20 (2014) [in Russian].
3. S. Siontas, D. Li, H. Wang, A. V. P. S. Aravind, A. Zaslavsky, and D. Pacifici, Materials Science in Semiconductor Processing **92**, 19 (2019).
4. I. I. Izhmin, K. A. Lozovoy, A. P. Kokhanenko, K. I. Khomyakova, R. M. H. Douhan, V. V. Dirko, A. V. Voitsekhovskii, O. I. Fitsych, and N. Yu. Akimenko, Applied Nanoscience **12**, 253 (2022).
5. P. Martyniuk and A. Rogalski, Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences **57**, 103 (2009).
6. H. Liu and J. Zhang, Infrared Physics & Technology **55**, 320 (2012).
7. R. M. H. Douhan, A. P. Kokhanenko, and K. A. Lozovoy, Russian Physics Journal **61**, 1194 (2018).
8. K. L. Wang, D. Cha, J. Liu, and C. Chen, Proceedings of the IEEE **95**, 1866 (2007).
9. A. Mahmoodi, H. D. Jahromi, and M. H. Sheikhi, IEEE Sensors Journal **15**, 5504 (2015).
10. L. Lin, H. L. Zhen, N. Li, W. Lu, Q. C. Weng, D. Y. Xiong, and F. Q. Liu, Appl. Phys. Lett. **97**, 193511 (2010).
11. A. V. Voitsekhovskii, A. P. Kokhanenko, and K. A. Lozovoy, Applied Physics, No. 6, 42 (2016) [in Russian].