

УДК 621.31:535.215

Темновой ток и обнаружительная способность фотоприемников с квантовыми точками германия на кремнии

А. В. Войцеховский, А. П. Коханенко, К. А. Лозовой

В данной работе проведен расчет шумовых и сигнальных характеристик фотоприемников инфракрасного диапазона на основе материала с квантовыми точками германия на кремнии. Оценивается темновой ток через такие структуры, обусловленный тепловой эмиссией носителей и туннелированием носителей в поле, а также обнаружительная способность фотодетектора в приближении работы в режиме ограничения генерационно-рекомбинационными шумами. Предлагаются ростовые условия в методе молекулярно-лучевой эпитаксии, благоприятные для создания массивов квантовых точек, которые в дальнейшем могут использоваться для создания инфракрасных фотодетекторов.

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

Ключевые слова: инфракрасные фотодетекторы, темновой ток, обнаружительная способность, шумовые и сигнальные характеристики, наногетероструктуры, молекулярно-лучевая эпитаксия.

Введение

С начала 1990-х годов, когда впервые были получены структуры с квантовыми точками германия на кремнии [1, 2], большое внимание исследователей уделяется созданию различных оптоэлектронных устройств на основе этого материала, в частности, созданию фотодетекторов инфракрасного диапазона [3—10]. Столь высокий интерес к наногетероструктурам с квантовыми точками Ge на Si обусловлен рядом уникальных свойств, характеризующих подобного рода структуры.

Инфракрасные (ИК) фотодетекторы применяются в целом ряде областей: от военной сферы до гражданских нужд, в энергетике и медицине, в промышленности и строительстве. Основными требованиями при выборе фотоприемников являются хорошие рабочие характеристики, работа при как можно более высоких температурах, низкая стоимость изготовления. И если до сих пор, несмотря на высокую стоимость, обусловленную

технологическими сложностями при выращивании эпитаксиальных слоев, основным материалом для создания фотоприемников инфракрасного диапазона являлся теллурид кадмия-ртути (КРТ), то теперь инфракрасные фотодетекторы с квантовыми точками могут стать им более дешевой, но не менее эффективной альтернативой [11—13].

Принципы работы инфракрасного фотодетектора с квантовыми точками аналогичны принципам работы инфракрасного фотодетектора с квантовыми ямами. Отличие состоит лишь в том, что в квантовой точке носитель ограничен в своем движении во всех трех направлениях [14]. Ожидается, что благодаря этому ограничению фотодетекторы с квантовыми точками могут обеспечивать лучшие рабочие характеристики, а именно более высокие рабочие температуры, низкий темновой ток и высокий коэффициент фотоэлектрического усиления [13], что, в конечном счете, выливается в высокие чувствительность и обнаружительную способность [15].

В данной работе проведен расчет шумовых и сигнальных характеристик фотоприемников инфракрасного диапазона на основе материала с квантовыми точками германия на кремнии. Оценивается темновой ток через такие структуры, обусловленный тепловой эмиссией носителей и туннелированием носителей в поле, а также обнаружительная способность фотодетектора в приближении работы в режиме ограничения флуктуациями фоновым излучением.

Войцеховский Александр Васильевич, профессор.

Коханенко Андрей Павлович, профессор.

Лозовой Кирилл Александрович, аспирант.

Томский государственный университет.

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

Тел. (3822) 413-517. Факс (3822) 412-772.

E-mail: vav43@mail.tsu.ru; kokh@mail.tsu.ru; lka@sibmail.com

Статья поступила в редакцию 8 июня 2016 г.

© Войцеховский А. В., Коханенко А. П., Лозовой К. А., 2016

Характеристики фотоприемных устройств на основе наногетероструктур с квантовыми точками напрямую зависят от параметров ансамбля квантовых точек: поверхностной плотности, среднего размера в плоскости основания и разброса их по размерам. В то же время основным методом получения массивов квантовых точек на сегодняшний день является их самоорганизация в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии. В связи с этим, управлять параметрами формирующихся таким образом островков можно лишь косвенно, контролируя условия роста: температуру подложки и скорость осаждения германия [16].

Поэтому одной из целей данной работы также являлось определение оптимальных, с точки зрения дальнейшего приборного применения, ростовых условий для создания фотоприемников с максимальной обнаружительной способностью.

Оптимизация параметров массивов квантовых точек для создания на их основе фотодетекторов ИК-диапазона

Темновой ток фотодетектора — это ток, вызванный иными источниками, чем фототок, обусловленный возбуждением носителей падающим сигнальным излучением. Известно, что в фотодетекторах с квантовыми точками основными источниками темнового тока является возбуждение носителей за счет тепловой эмиссии и туннелирования в присутствии электрического поля. В этом случае плотность темнового тока может быть оценена следующим выражением из работы [17]:

$$j_d = 2q \left(\frac{2\pi m^* K_B T}{h^2} \right)^{3/2} \times \exp\left(\frac{-E_a}{K_B T}\right) \mu F \left[1 + \left(\frac{\mu F}{v_s} \right)^2 \right]^{-1/2}, \quad (1)$$

$$j_d = q\mu F \left[1 + \left(\frac{\mu F}{v_s} \right)^2 \right]^{-1/2} \left(\frac{2\pi m^* K_B T}{h^2} \right)^{3/2} \times \exp\left(-\frac{E_{0,m} \exp(-F/F_0) + E_{0,n} - \alpha F - \sigma_E^2/2K_B T}{K_B T} \right) \operatorname{erfc}\left(-\frac{E_{0,n} - \sigma_E^2/2K_B T}{\sqrt{2}\sigma_E} \right). \quad (3)$$

Рассмотрим теперь влияние параметров ансамбля квантовых точек (среднего размера, поверхностной плотности и дисперсии функции распределения по размерам) на удельную обнаружительную способность D^* фотодетектора с квантовыми точками [20]:

где q — заряд электрона, m^* — эффективная масса носителя в барьерном слое, K_B — постоянная Больцмана, h — постоянная Планка, E_a — энергия активации, F — приложенное электрическое поле, μ — подвижность и v_s — максимальная скорость носителей.

Энергия активации представляется в виде суммы вкладов от двух различных механизмов генерации носителей [18]:

$$E_a = E_{0,m} \exp(-F/F_0) + E_{0,n} - \alpha F \quad (2)$$

где $E_{0,m}$ и $E_{0,n}$ — энергии активации при нулевом смещении для двух различных механизмов электронного транспорта — микроскопического и наноразмерного [19]. Энергия активации $E_{0,m}$ определяется как разность между уровнем Ферми и нижним энергетическим уровнем зоны проводимости барьерного слоя и соответствует процессу тепловой эмиссии. Энергия активации $E_{0,n}$ равна энергии ионизации квантовой точки и связана с туннелированием носителей через барьер. F_0 и α — подгоночные параметры, характеризующие скорости изменения энергий активации с напряжением [13].

Из-за неизбежного существования разброса по размеру между квантовыми точками в массиве, энергия активации за счет туннелирования будет меняться от точки к точке, и ее можно описать гауссовым распределением с дисперсией σ_E^2 . Величина σ_E описывает разброс в значениях энергии активации $E_{0,n}$, вызванный неоднородностью размеров островков. С учетом этого распределения среднюю плотность темнового тока фотодетектора можно записать в следующем виде [13]:

$$D^* = \frac{q g_{ph} \eta \sqrt{A_d \Delta f}}{h\nu I_n}, \quad (4)$$

где g_{ph} — коэффициент фотоэлектрического усиления, η — внешняя квантовая эффективность детектора, ν — частота падающего излучения,

A_d — площадь фоточувствительной области приемника, Δf — полоса пропускания (эквивалентная ширина полосы частот) усилителя. В качестве тока шума I_n возьмем генерационно-рекомбинационный шумовой ток:

$$I_{ng-r}^2 = 4qg_n I_d \Delta f, \quad (5)$$

где g_n — коэффициент усиления шума. Может быть показано, что коэффициент усиления шума g_n фотоприемника на квантовых точках связан с другой важной величиной — вероятностью захвата носителей заряда p_c обратно в квантовую точку [20]:

$$g_n = \frac{1}{n_{QD} p_c F_F}. \quad (6)$$

Здесь n_{QD} — число слоев с квантовыми точками. Вероятность захвата носителей заряда p_c обычно величина, много меньшая единицы.

Выражение (6) аналогично выражению для фотоприемников с квантовыми ямами за исключением появления в знаменателе степени заполнения F_F , характеризующей эффективную концентрацию квантовых точек в слоях и появляющуюся из-за дискретности слоев квантовых точек. Степень заполнения F_F пропорциональна кубическому корню из объема квантовой точки V (то есть характерному размеру островка) и обратно пропорциональна среднему расстоянию между квантовыми точками s , которое обратно пропорционально корню из поверхностной плотности островков N [11]. Обычно степень заполнения F_F имеет величину порядка 0,1—0,6 единиц [20—22].

По аналогии с фотоприемниками на квантовых ямах коэффициент фотоэлектрического усиления для фотодетекторов с квантовыми точками может быть выражен через вероятность захвата носителей в квантовую точку с использованием понятия степени заполнения [20]:

$$g_{ph} = \frac{1 - p_c / 2}{n_{QD} p_c F_F}. \quad (7)$$

В отличие от традиционных однородных полупроводниковых фотодетекторов коэффициент фотоэлектрического усиления g_{ph} (7) и коэффициент усиления шума g_n (6) фотоприемника с квантовыми точками не равны друг другу, что объясняется существенной неоднородностью структуры фотодетектора [20]. Кроме того, обе эти величины могут зависеть от напряжения смещения, приложенного к детектору [23].

В результате, подставив (3), (5) в (4), используя выражения для коэффициента фотоэлектрического усиления g_{ph} (7) и коэффициента усиления шума g_n (6) и сохраняя только те параметры, которые определяются условиями синтеза наноразмерных островков, получим:

$$D^* \propto \sqrt{\frac{L_{av} \sqrt{N}}{\exp[(E_L \delta L)^2 / 2K_B T]}}. \quad (8)$$

В этом выражении за L_{av} обозначен средний размер квантовых точек в плоскости основания, а E_L — некая постоянная, характеризующая изменение положения энергетических уровней в квантовой точке с изменением ее размера dE/dL . Здесь мы считали, что разброс в значениях энергии активации σ_E пропорционален разбросу квантовых точек в массиве по размерам δL . Величина E_L по данным теоретических расчетов составляет ≈ 15 мэВ/нм при размере квантовой точки ≈ 15 нм [24].

Из анализа выражения (8) можно сделать вывод о том, что также как и в случае работы фотодетектора в режиме ограничения флуктуациями фонового излучения (см. [25]), удельная обнаружительная способность фотоприемника на квантовых точках при заданном среднем размере квантовых точек в ансамбле (определяемом требуемой длиной волны поглощения) увеличивается с ростом поверхностной плотности квантовых точек и с уменьшением разброса наноструктур по размерам. Из выражения (8) видно, что в случае учета генерационно-рекомбинационных шумов фотоприемника зависимость его обнаружительной способности от однородности массива квантовых точек становится более резкой (экспоненциальный рост). Этот факт говорит о необходимости максимального увеличения однородности островков в массиве для достижения высоких рабочих характеристик фотодетекторов на квантовых точках.

Был произведен расчет темнового тока и обнаружительной способности для фоточувствительных структур на основе кремния с квантовыми точками германия. При расчетах использовались следующие значения параметров модели [9, 13, 14]: $E_{0,m} = 60$ мэВ, $E_{0,n} = 300$ мэВ, $F_0 = 4$ кВ/см, $\alpha = 2$ мэВ см кВ⁻¹, $\mu = 1000$ см²/(В с), $v_s = 10^7$ см/с, $m^* = 0,56m_e$, $m_e = 9,1 \times 10^{-31}$ кг. Определялись зависимости темнового тока от температуры, напряжения смещения и величины разброса значений энергии активации процессов транспорта за счет туннелирования.

На рис. 1 изображена зависимость темнового тока от величины разброса по энергиям активации процессов туннелирования носителей для фо-

топриемника на квантовых точках с модельными параметрами, перечисленными выше, при напряжении смещения $U = 5$ В и различных рабочих температурах T .

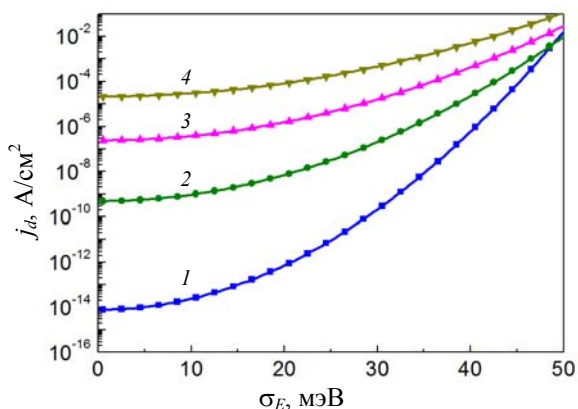


Рис. 1. Плотность темнового тока для фотоприемников на основе квантовых точек германия на кремнии как функция разброса в значениях энергии активации σ_E при напряжении смещения $U = 5$ В и различных рабочих температурах T . 1 — 77 К; 2 — 100 К; 3 — 120 К; 4 — 140 К.

Из рис. 1 видно, что с ростом разброса параметров островков в ансамбле наблюдается очень резкое экспоненциальное увеличение темнового тока фотоприемника. Таким образом, увеличение неоднородности квантовых точек по размерам значительно ухудшает рабочие характеристики фотодетектора на квантовых точках.

Для верификации используемой модели проводилось сравнение рассчитанных величин темнового тока с экспериментальными результатами, полученными в работах [9, 26]. В этих работах описываются инфракрасные фотоприемные элементы на основе гетероструктур, содержащих слой квантовых точек германия в матрице кремния. Фотодетекторы представляли собой вертикальные p^+-p-p^+ -структуры со встроенными в p -область десятью слоями квантовых точек Ge с размерами в плоскости основания около 15 нм и поверхностной плотностью порядка 3×10^{11} см $^{-2}$, разделенными промежутками Si. Площадь фоточувствительной области была равна $A_d = 10^{-2}$ см 2 .

Был произведен расчет величины генерационно-рекомбинационных шумов при различных напряжениях смещения для фотоприемников, описанных в работах [9, 26]. Для оценки параметров модели использовалось сравнение рассчитанных по формуле (3) темновых вольт-амперных характеристик с экспериментальными кривыми из работы [9]. При этом для моделирования изменения темновых вольт-амперных характеристик с температурой величины параметров α и F_0 были зафиксированы, так как они, вероятно, не зависят от температуры, а варьировались только параметры $E_{0,m}$ и $E_{0,n}$.

На рис. 2 представлены экспериментальные и расчетные темновые вольт-амперные характеристики фотодетектора с квантовыми точками германия на кремнии из работы [9] для различных температур. Расчетным кривым на рис. 2 соответствуют следующие значения параметров модели: $F_0 = 6,5$ кВ/см, $\alpha = 1$ мэВ см кВ $^{-1}$. Значения параметров $E_{0,m}$ и $E_{0,n}$ указаны в таблице.

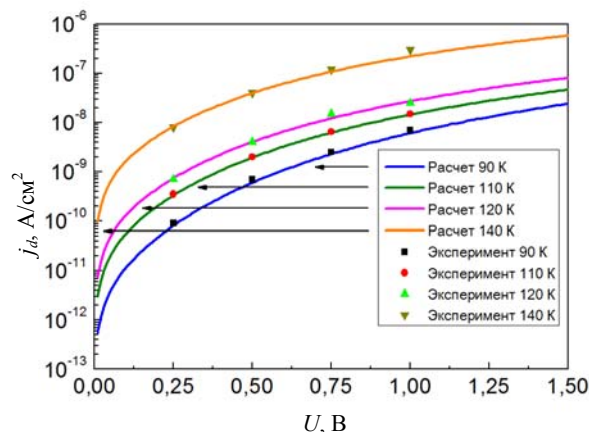


Рис. 2. Темновые вольт-амперные характеристики фотоприемников из работы [9] при различных температурах детектора: $T = 90, 110, 120$ и 140 К (теория и эксперимент [9]).

Таблица

Значения параметров модели, использованные для моделирования темновых вольт-амперных характеристик фотодетекторов с квантовыми точками германия в кремнии из работы [9]

Температура, К	90	110	120	140
Параметр $E_{0,m}$, мэВ	38	39	40	41
Параметр $E_{0,n}$, мэВ	261	313	336	369

Из рис. 2 видно, что путем тщательного выбора величины энергий активации $E_{0,m}$ и $E_{0,n}$ можно получить хорошее согласие предсказаний теории и экспериментальных фактов. Из результатов подбора этих параметров (см. таблицу) следует, что характер изменения темновых вольт-амперных характеристик фотодетектора с квантовыми точками с температурой определяется, в основном, изменением величины $E_{0,n}$, отвечающей за энергию активации за счет процессов ионизации квантовых точек. Это изменение может быть вызвано как изменением положения дискретных энергетических уровней в квантовой точке, так и изменением эффективной энергии ионизации квантовой точки за счет изменения заселенности уровней в квантовой точке и в барьере. Следует также отметить, что полученные значения параметра $E_{0,n}$ приблизительно соответствуют энергетическому расстоянию между основным состоянием дырок в квантовой точке с размерами в плоскости основа-

ния около 15 нм и потолком валентной зоны кремния (барьерного слоя), которое, согласно работе [27], может быть оценено величиной около 360 мэВ.

В то же время с ростом температуры параметр $E_{0,m}$, характеризующий тепловую эмиссию носителей заряда, увеличивается незначительно, и это увеличение вызвано, вероятно, изменением положения уровня Ферми с температурой, определяемое изменением степени заполнения энергетических уровней в системе.

На основе выражения (8) можно также оценить ростовые условия, благоприятные для создания фотоприемников инфракрасного диапазона на основе наноструктур кремния с квантовыми точками германия.

При численном моделировании зависимости δL и N от условий роста использовалась разработанная в [28, 29] кинетическая модель расчета параметров квантовых точек германия на кремнии, которая основана на обобщении классической теории зародышеобразования и позволяет определить температурные зависимости поверхностной плотности квантовых точек и функции плотности распределения островков по размерам для различных скоростей роста (см. [16]). Расчет проводился для массивов квантовых точек со средними размерами 10, 15 и 20 нм. Температура и скорость роста выбирались так, чтобы обеспечить постоянство среднего размера.

В соответствии с рис. 3, достижению высоких обнаружительных способностей фотоприемников с квантовыми точками способствует выращивание массивов наноразмерных островков при высоких температурах роста (500—600 °С), так как эти режимы синтеза обеспечивают уменьшение разброса нанокластеров по геометрическим размерам.

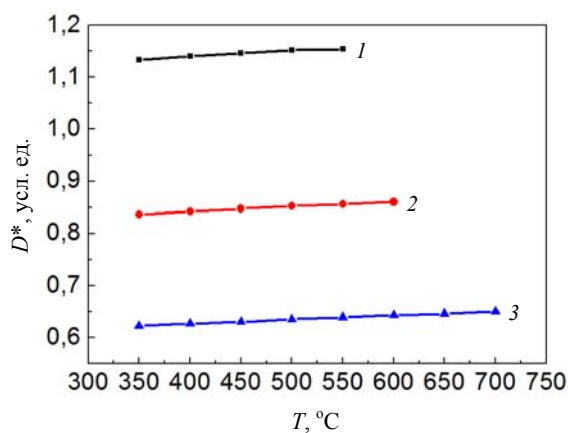


Рис. 3. Зависимость обнаружительной способности фотодетекторов от температуры роста квантовых точек для трех средних размеров: 10 (кр. 1), 15 (кр. 2) и 20 (кр. 3) нм (с учетом наличия генерационно-рекомбинационных шумов).

Заключение

В работе рассчитан темновой ток через структуры с квантовыми точками германия на кремнии, обусловленный тепловой эмиссией носителей и туннелированием носителей в поле, а также обнаружительная способность фотодетектора с квантовыми точками в приближении работы в режиме ограничения генерационно-рекомбинационными шумами. Проведено сравнение рассчитанных темновых вольт-амперных характеристик с экспериментом, которое подтверждает применимость используемой модели темнового тока. На основе теоретической модели, позволяющей рассчитывать параметры квантовых точек, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, произведена оптимизация ростовых условий для создания фотодетекторов с квантовыми точками с высокими рабочими характеристиками.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № р-а 16-42-700759.

ЛИТЕРАТУРА

1. Eaglesham D. J., Cerullo M. // Phys. Rev. Lett. 1990. Vol. 64. No. 16. P. 1943.
2. Mo Y.-W., Savage D. E., Swartzentruber B. S., Lagally M. G. // Phys. Rev. Lett. 1990. Vol. 65. No. 8. P. 1020.
3. Пчеляков О. П., Болховитянов Ю. Б., Дзуреченский А. В., Соколов Л. В., Никифоров А. И., Якимов А. И., Фойхтлендер Б. // ФТП. 2000. Т. 34. № 11. С. 1281.
4. Brunner K. // Rep. Prog. Phys. 2002. Vol. 65. No. 27. P. 27.
5. Wang K. L., Cha D., Liu J., Chen C. // Proc. of the IEEE. 2007. Vol. 95. No. 9. P. 1866.
6. Шкляев А. А., Ичкава М. // Успехи физических наук. 2008. Т. 178. № 2. С. 139.
7. Войцеховский А. В., Коханенко А. П., Лозовой К. А., Турапин А. М., Романов И. С. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 338.
8. Aqua J.-N., Berbezier I., Favre L. // Physics Reports. 2013. Vol. 522. P. 59.
9. Якимов А. И. // Автометрия. 2013. Т. 49. № 5. С. 57.
10. Пчеляков О. П., Дзуреченский А. В., Никифоров А. И., Войцеховский А. В., Григорьев Д. В., Коханенко А. П. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2010. Т. 53. № 9. С. 59.
11. Phillips J. // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 91. № 7. P. 4590.
12. Rogalski A., Antoszewski J., Faraone L. // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 105. P. 091101.
13. Liu G., Zhang J., Wang L. // Infrared Physics & Technology. 2015. Vol. 73. P. 36.
14. Yakimov A. I., Kirienko V. V., Armbrister V. A., Bloskin A. A., Dvurechenskii A. V. // Appl. Phys. Lett. 2015. Vol. 107. P. 213502.
15. Mahmoodi A., Jahromi H. D., Sheikhi M. H. // IEEE Sensors Journal. 2015. Vol. 15. P. 5504.
16. Войцеховский А. В., Коханенко А. П., Лозовой К. А. // Прикладная физика. 2014. № 5. С. 45.

17. Liu H., Tong Q., Liu G., Yang C., Shi Y. // Opt. Quant. Electron. 2015. Vol. 47. P. 721.
18. Liu H., Zhang J. // Infrared Physics & Technology. 2012. Vol. 55. P. 3320.
19. 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.
20. Rogalski A. Infrared Detectors. — Boca Raton: CRC Press, 2011.
21. Ye Z., Campbell J., Chen Z., Kim E.-T., Madhukar A. // Applied Physics Letters. 2003. Vol. 83. P. 1234.
22. Campbell J. C., Madhukar A. // Proceedings of IEEE. 2007. Vol. 95. P. 1815.
23. Куес Р. Дж., Крузе П. В., Патли Э. Г., Лонг Д., Цвиккер Г. Р., Милтон А. Ф., Тейч М. К. Фотоприемники видимого и ИК-диапазонов. — М.: Радио и связь, 1985.
24. Dvurechenskii A. V., Nenashev A. V., Yakimov A. I. // Nanotechnology. 2002. Vol. 13. P. 75.
25. Lozovoy K. A., Voitsekhovskiy A. V., Kokhanenko A. P., Saidarov V. G. // International Journal of Nanotechnology. 2015. Vol. 12. No. 3/4. P. 209.
26. Yakimov A., Timofeev V., Bloshkin A., Nikiforov A., Dvurechenskii A. // Nanoscale Research Letters. 2012. Vol. 7. P. 494 (1-6).
27. Yakimov A. I., Stepina N. P., Dvurechenskii A. V., Nikiforov A. I., Nenashev A. V. // Physical Review B. 2001. Vol. 63. P. 045312 (1-6).
28. Дубровский В. Г. // ФТП. 2006. Т. 40. С. 1153.
29. Lozovoy K. A., Kokhanenko A. P., Voitsekhovskiy A. V. // Crystal Growth & Design. 2015. Vol. 15. No. 3. P. 1055.

Dark current and detectivity of photodetectors with quantum dots of germanium on silicon

A. V. Voitsekhovskii, A. P. Kokhanenko, and K. A. Lozovoy

Tomsk State University
36 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia
E-mail: vav43@mail.tsu.ru; kokh@mail.tsu.ru; lka@sibmail.com

Received June 8, 2016

In this work, theoretically estimations of noise and signal characteristics of infrared photodetectors based on the Ge/Si quantum dots are done. A dark current in such detectors caused by thermal emission and tunneling of charge carriers, as well as detectivity in generation-recombination noise limited operation mode are calculated. The growth conditions for quantum dots arrays grown by the method of molecular beam epitaxy are supposed for creation of infrared photodetectors based on these structures.

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

Keywords: infrared photodetectors, dark current, detectivity, noise and signal characteristics, nanostructures, molecular beam epitaxy.

REFERENCES

1. D. J. Eaglesham and M. Cerullo, Phys. Rev. Lett. **64**, 1943 (1990).
2. Y.-W. Mo, D. E. Savage, B. S. Swartzentruber and M. G. Lagally, Phys. Rev. Lett. **65**, 1020 (1990).
3. O. P. Pchelyakov, Yu. B. Bolkhovityanov, A. V. Dvurechenskii, L. V. Sokolov, A. I. Nikiforov, A. I. Yakimov, and B. Voightlander, Semiconductors **34**, 1229 (2000).
4. K. Brunner, Rep. Prog. Phys. **65** (27), 27 (2002).
5. K. L. Wang, D. Cha, J. Liu, and C. Chen, Proc. IEEE **95**, 1866 (2007).
6. A. A. Shklyayev and M. Ichikawa, Physics Uspekhi **51**, 133 (2008).
7. A. V. Voytsekhovskiy, A. P. Kokhanenko, K. A. Lozovoy, A. M. Turapin, and I. S. Romanov, Usp. Prikl. Fiz. **1**, 338 (2013).
8. J.-N. Aqua, I. Berbezier, and L. Favre, Physics Reports. **522**, 59 (2013).
9. A. I. Yakimov, Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. **49**, 467 (2013).
10. O. P. Pchelyakov, A. V. Dvurechenskii, A. I. Nikiforov, A. V. Voitsekhovskii, D. V. Grigor'ev, and A. P. Kokhanenko, Russian Physics Journal **53**, 943 (2011).
11. J. Phillips, J. Appl. Phys. **91**, 4590 (2002).
12. A. Rogalski, J. Antoszewski, and L. Faraone, J. Appl. Phys. **105**, 091101 (2009).
13. G. Liu, J. Zhang, and L. Wang, Infrared Physics & Technology **73**, 36 (2015).
14. A. I. Yakimov, V. V. Kirienko, V. A. Armbrister, A. A. Bloshkin, and A. V. Dvurechenskii, Appl. Phys. Lett. **107**, 213502 (2015).
15. A. Mahmoodi, H. D. Jahromi, and M. H. Sheikhi, IEEE Sensors Journal **15**, 5504 (2015).

16. A. V. Voytsekhovskiy, A. P. Kokhanenko, and K. A. Lozovoy, *Prikl. Fiz.*, No. 5, 45 (2014).
17. H. Liu, Q. Tong, G. Liu, C. Yang, and Y. Shi, *Opt. Quant. Electron.* **47**, 721 (2015).
18. H. Liu and J. Zhang, *Infrared Physics & Technology* **55**, 3320 (2012).
19. 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).
20. A. Rogalski, *Infrared Detectors* (Boca Raton: CRC Press, 2011).
21. Z. Ye, J. Campbell, Z. Chen, E.-T. Kim, and A. Madhukar, *Applied Physics Letters* **83**, 1234 (2003).
22. J. C. Campbell and A. Madhukar, *Proceedings of IEEE* **95**, 1815 (2007).
23. R. J. Kies, P. V. Kruze, E. G. Patli, D. Iond, G. R. Zvikker, A. F. Milton, and M. K. Tache, *Photodetectors for Vision and Infrared Ranges* (*Radio Svyaz'*, Moscow, 1985) [in Russian].
24. A. V. Dvurechenskii, A. V. Nenashev, and A. I. Yakimov, *Nanotechnology* **13**, 75 (2002).
25. K. A. Lozovoy, A. V. Voitsekhovskiy, A. P. Kokhanenko, and V. G. Satdarov, *International Journal of Nanotechnology* **12** (3/4), 209 (2015).
26. A. Yakimov, V. Timofeev, A. Bloshkin, A. Nikiforov, and A. Dvurechenskii, *Nanoscale Research Letters* **7**, 494 (2012).
27. A. I. Yakimov, N. P. Stepina, A. V. Dvurechenskii, A. I. Nikiforov, and A. V. Nenashev, *Physical Review B.* **63**, 045312 (2001).
28. V. G. Dubrovskii, *Semiconductors* **40**, 1123 (2006).
29. K. A. Lozovoy, A. P. Kokhanenko, and A. V. Voitsekhovskiy, *Crystal Growth & Design* **15**, 1055 (2015).