

УДК 621.383.4/5
ББК 32.86
Т 78

Т78 Труды XXV Международной научно-технической конференции и школы по фотоэлектронике и приборам ночного видения в 2-х томах. Том 2. – М.: АО «НПО «Орион», 2018 г. – М.: Издательство «ОФСЕТ МОСКВА», 2018. – 611 с.

ISBN 978-5-00122-365-8 (Общ.)
ISBN 978-5-00122-367-2 (Т.2)

Государственный научный центр Российской Федерации АО «НПО «Орион» раз в 2 года проводит Международную научно-техническую конференцию и школу по фотоэлектронике и приборам ночного видения. В конференции принимают участие специалисты отечественных и зарубежных организаций, связанных с разработкой и производством изделий фотоэлектроники, приборов ночного видения, тепловизионной техники и смежных отраслей. Данный сборник состоит из двух томов. Том 1 содержит пленарные и устные доклады, том 2 – стендовые доклады, представленные на XXV конференции, состоявшейся 24–26 мая 2018 г.

Сборник предназначен для специалистов, инженеров и научных работников, специализирующихся в области разработки и применения изделий фотоэлектроники и оптико-электронных систем, а также для преподавателей, студентов и аспирантов соответствующих специальностей вузов.

ISBN 978-5-00122-365-8 (Общ.)
ISBN 978-5-00122-367-2 (Т.2)

дельных слоях GaAs и AlGaAs и гетероэпитаксиальных структурах на их основе. Данный метод является эффективным дополнением к существующим методикам входного и межоперационного контроля фоточувствительных материалов.

Литература

1. Дирочка А.И., Бурлаков И.Д. и др. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. N 5. С. 509-519.
2. Kaniewska M., Slotka I. // Crystal Research&Tech. 2001. V. 36. N. 8-10. P. 1113.
3. Брунков П.Н., Гуткин А.А., Рудинский М.Э., Ронжин О.И., Ситникова А.А., Шахмин А.А., Бер Б.Я., Казанцев Д.Ю., Егоров А.Ю., Земляков В.Е., Конников С.Г. // ФТП. 2011. Т. 45. № 6. С. 829-835.
4. Вакив Н.М., Завербный И.Р., Заячук Д.М., Круковский С.И., Мрыхин И.О. Установка электрохимического профилирования для диагностирования эпитаксиальных структур GaAs // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2005. № 3. С. 40-45.
5. Block R., Altermatt P.P., Schmidt J. // 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Spain (2008). P. 1510-1513.
6. Батавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. – М.: Радио и связь, 1985.

C52 Electrochemical capacitance-voltage profiling of AlGaAs/GaAs heteroepitaxial structures

^{1,2}Goncharov V.E., ^{1,2}Batmanovskaya N.S., ^{1,2}Pashkeev D.A., ^{1,3}Nikonov A.V.

¹Orion R&P Association, Moscow, Russia

²Moscow Technological University (MIREA), Moscow, Russia

³Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

Parameters of photosensitive semiconductors are the important factor in the technology of developing focal-plane arrays (FPAs) for promising optoelectronic dual-use systems. The photoelectric characteristics, in particular the distribution of the charge carrier density along the thickness of the heteroepitaxial structures, have a significant effect on the characteristics of the whole photodetector device, so we need to improve the characterization of the materials. FPAs of II and III generations use complex multilayer structures for which the classical techniques for controlling the photoelectric characteristics of epitaxial layers are difficult. The classical theory of capacitance-voltage methods is limited by depth of profiling of free charge carrier density. The best alternative to traditional methods is the electrochemical capacitance-voltage profiling, which allows to determine the concentration of carriers at a depth up to 50 microns.

C53 Зависимость темнового тока фотоприемников с квантовыми точками от разброса nanoостровков по размерам

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

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

E-mail: kokh@mail.tsu.ru

Исследователи уделяют большое внимание созданию различных электронных устройств на основе структур с квантовыми точками германия на кремнии с начала 1990-х годов, когда они впервые были получены в экспериментах методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Среди этих устройств инфракрасные фотоприемники, быстродействующие транзисторы и солнечные элементы [1–5]. Такой высокий интерес к гетероструктурам Ge-Si с квантовыми точками обусловлен большим количеством уникальных свойств этих структур, вызванных эффектами размерного квантования. Целый ряд новых явлений, существующих в структурах с квантовыми точками, делает их привлекательными для применения во всевозможных устройствах нано- и оптоэлектроники [6–10].

Инфракрасные фотоприемники могут использоваться в широком спектре различных применений: для военных и гражданских нужд, в энергетике, медицине и промышленности. Фотодетектор должен обладать высокими рабочими характеристиками (такими как чувствительность и обнаружительная способность), работать при высоких температурах и иметь достаточно низкую цену. На сегодняшний день основным материалом для создания инфракрасных фотоприемников является теллурид кадмия-ртути (КРТ). Однако есть некоторые технологические трудности, связанные с синтезом эпитаксиальных слоев КРТ. И теперь инфракрасные фотоприемники с квантовыми точками могут стать хорошей альтернативой традиционным детекторам [11–13].

На сегодняшний день реализованы не все потенциальные преимущества фотоприемников с квантовыми точками. Это можно объяснить как низкой степенью однородности островков в массиве, так и неоптимальной энергетической структурой таких детекторов. Например, квантовые точки могут иметь дополнительные уровни энергии, расположенные между основным и возбужденным состояниями, которые отвечают за поглощение излучения данной длины волны. Кроме того, возбужденный уровень энергии может быть довольно далек от зоны проводимости, и требуются высокие напряжения смещения. Эти факторы увеличивают темновой ток и уменьшают коэффициент поглощения. В конечном счете, это уменьшает обнаружительную способность квантово-точечных фотоприемников по сравнению с предсказанными предельными характеристиками [11–15].

Характеристики квантово-точечных фотодетекторов напрямую зависят от параметров ансамбля квантовых точек: поверхностной плотности и формы островков, их среднего размера в плоскости основания и функции распределения 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 синтеза: температуру роста, скорость осаждения и количество осажденного материала [16, 17].

В данной работе рассматриваются вопросы оптимизации условий роста в методе молекулярно-лучевой эпитаксии для создания высокоэффективных инфракрасных фотоприемников с квантовыми точками. В качестве модельной материальной системы для теоретических исследований выбраны гетероструктуры с квантовыми точками германия и кремния на поверхности кремния. Для расчетов зависимостей параметров массива квантовых точек в условиях синтеза предложена кинетическая модель роста квантовых точек различной формы на основе общей теории нуклеации. Теория улучшается путем учета изменения свободной энергии зарождения островка за счет образования дополнительных ребер островков и за счет зависимости поверхностных энергий граней квантовых точек от толщины двумерного смачивающего слоя при росте по механизму Странского–Крастанова. 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, а также обнаружительная способность фотоприемника в приближении ограничений генерационно-рекомбинационными шумами. Приводятся результаты расчетов параметров гетероструктур с квантовыми точками и их зависимости от параметров роста, а также характеристики квантово-точечных фотоприемников. Проведено сравнение рассчитанных параметров ансамблей квантовых точек и характеристик квантово-точечных фотоприемников с экспериментальными данными.

Был произведен расчет темнового тока и обнаружительной способности для фоточувствительных структур, описанных в работах [5, 9]. Показано, что при выборе для параметров модели (в том числе расстояния между энергетическими уровнями и дисперсии этих расстояний от точки к точке, определяемой разбросом островков в массиве по размерам) значений, соответствующих экспериментальным исследованиям морфологии и энергетической структуры рассматриваемых образцов, результаты моделирования хорошо соответствуют экспериментальным данным. Построены зависимости темнового тока от напряжения смещения и величины разброса значений энергии активации процессов транспорта за счет туннелирования.

Оценена максимальная обнаружительная способность указанных структур в предельном приближении работы фотодетектора в режиме ограничения фоновым излучением [11, 18]. Построены зависимости обнаружительной способности фотодетектора с квантовыми точками от условий синтеза массивов nanoостровков. На основе полученных результатов в работе предложены ростовые условия, оптимальные для создания фотодетекторов с квантовыми точками с высокими рабочими характеристиками.

Литература

1. Paul D.J. Si/SiGe heterostructures: from material and physics to devices and circuits // *Semicond. Sci. Technol.* – 2004. – V. 19. – P. R75-R108.
2. Wirths S., Buca D., Mantl S. Si-Ge-Sn alloys: From growth to applications // *Prog. Cryst. Growth Characteriz. Mater.* – 2016. – V. 62. – P. 1-39.
3. Пчеляков О. П., Болховитянов Ю. Б., Двуреченский А. В., Соколов Л. В., Никифоров А. И., Якимов А. И., Фойхтлендер Б. Кремний-германиевые наноструктуры с квантовыми точками: механизмы образования и электрические свойства // *ФТП.* – 2000. – Т. 34. – № 11. – С. 1281-1299.
4. Brunner K. Si/Ge nanostructures // *Rep. Prog. Phys.* – 2002. – V. 65. – № 27. – P. 27-72.
5. Wang K. L., Cha D., Liu J., Chen C. Ge/Si self-assembled quantum dots and their optoelectronic device applications // *Proc. of the IEEE.* – 2007. – V. 95. – № 9. – P. 1866-1882.
6. Шкляев А. А., Ичикава М. Предельно плотные массивы наноструктур германия и кремния // *Успехи физических наук.* – 2008. – Т. 178. – № 2. – С. 139-169.
7. Войцеховский А. В., Коханенко А. П., Лозовой К. А., Турапин А. М., Романов И. С. Фоточувствительные структуры на основе наногетероструктур Si/Ge для оптических систем передачи информации // *Успехи прикладной физики.* – 2013. – Т. 1. – № 3. – С. 338-343.
8. Wu J., Chen S., Seeds A., Liu H. Quantum dot optoelectronic devices: lasers, photodetectors and solar cells // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2015. – V. 48. – P. 363001 (1-28).
9. Якимов А. И. Гетероструктуры Ge/Si с квантовыми точками Ge для фотоприемников среднего ИК-диапазона // *Автоматрия.* – 2013. – Т. 49. – № 5. – С. 57-67.
10. Lozovoy K. A., Voitsekhovskiy A. V., Kokhanenko A. P., Satdarov V. G., Pchelyakov O.P., Nikiforov A.I. Heterostructures with self-organized quantum dots of Ge on Si for optoelectronic devices // *Opto-Electronics Review.* – 2014. – V. 22. – № 3. – P. 6-12. DOI: 10.2478/s11772-014-0189-8.
11. Phillips J. Evaluation of the fundamental properties of quantum dot infrared detectors // *J. Appl. Phys.* – 2002. – V. 91. – № 7. – P. 4590-4594.
12. Rogalski A., Antoszewski J., Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays // *J. Appl. Phys.* – 2009. – V. 105. – P. 091101.
13. Liu G., Zhang J., Wang L. Dark current model and characteristics of quantum dot infrared photodetectors // *Infrared Physics & Technology.* – 2015. – V. 73. – P. 36-40.
14. Yakimov A.I., Kirienko V.V., Armbrister V.A., Bloshkin A.A., Dvurechenskii A.V. Phonon bottleneck in p-type Ge/Si quantum dots // *Appl. Phys. Lett.* – 2015. – V. 107. – P. 213502.
15. Mahmoodi A., Jahromi H. D., Sheikhi M.H. Dark current modeling and noise analysis in quantum dot infrared photodetectors // *IEEE Sensors Journal.* – 2015. DOI: 10.1109/JSEN.2015.2443014.
16. Войцеховский А. В., Коханенко А. П., Лозовой К.А. Оптимизация ростовых условий для улучшения параметров фотоприемников и солнечных элементов с квантовыми точками // *Прикладная физика.* 2014. № 5. С. 45-49.
17. Liu H., Tong Q., Liu G., Yang C., Shi Y. Performance characteristics of quantum dot infrared photodetectors under illumination condition // *Opt. Quant. Electron.* – 2015. – V. 47. – P. 721-733.
18. Lozovoy K. A., Voitsekhovskiy A. V., Kokhanenko A. P., Satdarov V. G. Photodetectors and solar cells with Ge/Si quantum dots parameters dependence on growth conditions // *International Journal of Nanotechnology.* 2015. V. 12. – № 3/4. – P. 209-217.

C53 Dependence of dark current of quantum dot infrared photodetectors on the dispersion of islands by sizes

Voitsekhovskii A.V., Kokhanenko A.P., Lozovoy K.A., Douhan R.

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

E-mail: kokh@mail.tsu.ru

In this work we consider the optimization of growth conditions in the molecular beam epitaxy method for the creation of highly efficient infrared photodetectors with quantum dots. As a model material system for theoretical studies, heterostructures with quantum dots of germanium and silicon on a

silicon surface were chosen. For calculating the dependencies of parameters of the array of quantum dots under the conditions of synthesis, a kinetic model of the growth of quantum dots of various shapes is proposed on the basis of the general nucleation theory. The theory is improved by taking into account the change in the free energy of the nucleation of an island due to the formation of additional island edges and due to the dependence of the surface energies of the faces of the quantum dots on the thickness of the two-dimensional wetting layer with growth by the Stranski-Krastanov mechanism. Calculations of the noise and signal characteristics of infrared photodetectors based on heterostructures with quantum dots of germanium on silicon are carried out. Dark currents in such structures caused by thermal emission and barrier tunneling of carriers, as well as the detecting power of the photodetector in the approximation of generation-recombination noise limitations are estimated. The results of calculations of the parameters of heterostructures with quantum dots and their dependence on growth parameters are presented, as well as the characteristics of quantum dot photodetectors.

С54 Результаты разработки охлаждаемых матричных фотоприемных устройств на основе многослойных структур с квантовыми ямами

¹ Тарасов В.В., ¹ Солодков А.А., ¹ Куликов В.Б., ¹ Маслов Д.В., ¹ Барабанов А.Б.,
¹ Сабиров А.Р., ¹ Кобылин А.В., ¹ Хайлов А.В., ¹ Чекмарев В.А., ¹ Борисоглебский Н.Н.,
² Чалый В.П., ² Кацавец Н.И.

¹ АО «Центральный научно-исследовательский институт «Циклон», Москва, Россия

² АО «Светлана-Рост», С.-Петербург, Россия

E-mail: a.solodkov@cyclone-jsc.ru

АО «ЦНИИ «Циклон» разработаны охлаждаемые матричные фотоприемные устройства (МФПУ) на основе многослойных структур с квантовыми ямами (МСКЯ) 2-х типов, отличающиеся форматами (384x288 и 640x512 элементов) при одинаковом шаге элементов – 20 мкм.

Форматы МФПУ задаются матричными коммутаторами-мультиплексорами сигналов (МКМС) разработки НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл» (г. Минск, Республика Беларусь). Фоточувствительные структуры для МФПУ изготовлены методом молекулярно-лучевой эпитаксии в АО «Светлана-Рост».

МФПУ размещаются в вакуумноплотных криостатируемых корпусах разработки АО «МЗ «Сапфир» (г. Москва). Рабочая температура чувствительных элементов МФПУ обеспечивается микрокриогенными системами охлаждения линейного типа разработки ООО «НТК «Криогенная техника» (г. Омск).

Изображения внешнего вида МФПУ представлены на рис. 1.

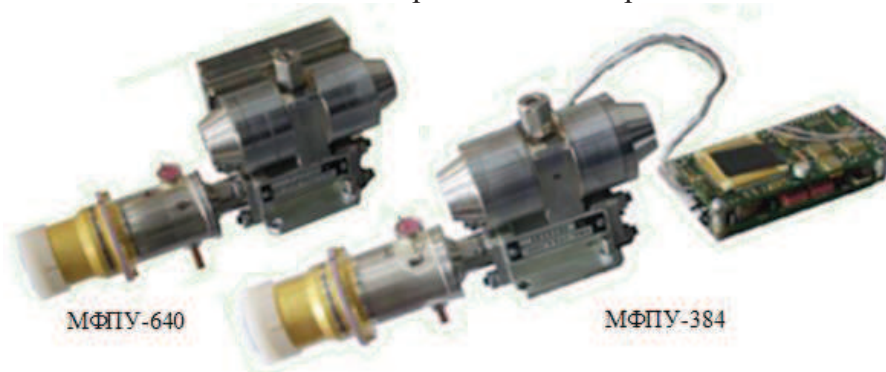


Рисунок 1. Изображения внешнего вида МФПУ

Значения фотоэлектрических параметров для МФПУ 2-х типов приведены в таблице 1.