

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наноструктуры Ge/Si, содержащие до 10 чередующихся наноразмерных слоев Si и Ge, созданные методом молекулярно-лучевой эпитаксии с использованием частичной ионизации молекулярных пучков (облучение ионами Ge^+ при эпитаксии квантовых точек Ge), обладают интенсивной фотолюминесценцией в ближней инфракрасной области спектра $\sim 1,4\text{--}1,7$ мкм. Установлено, что интенсивность полосы фотолюминесценции в области энергии $\sim 0,8$ эВ в наноструктурах Ge/Si с квантовыми точками Ge, сформированными с использованием ионизации пучков ионов Ge^+ при эпитаксиальном росте КТ Ge, в 3–4 раза превышает интенсивность аналогичных наноструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge, созданными без облучения. Преимущество использования ионно-молекулярных пучков при эпитаксии состоит также в стабилизации спектрального положения излучения в инфракрасной области спектра $\sim 0,8$ эВ.

Работа выполнена по программе ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма 8.2 (задание 2.2.1).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Brehm M. Site-controlled and advanced epitaxial Ge/Si quantum dots: fabrication, properties, and applications / M. Brehm, M. Grydlik // *Nanotechnology*. – 2017. – V. 28. – P. 392001-1–392001-22.
2. Photoluminescence of compact GeSi quantum dot groups with increased probability of finding an electron in Ge / A.F. Zinovieva [et. al.] // *Scientific Reports*. – 2020. – V. 10. – P. 9308-1–9308-8.
3. Near-infrared photoresponse in Ge/Si quantum dots enhanced by localized surface plasmons supported by aluminium nanodiscs / A.I. Yakimov [et. al.] // *J. Appl. Phys.* – 2020. – V. 128, № 14. – P. 143101-1–143101-9.
4. Lasing from glassy quantum dots in crystalline Si / M. Grydlik [et. al.] // *ACS Photonics*. – 2016. – V. 3. – P. 298–303.
5. Nucleation and epitaxial growth of Ge nanoislands on Si surface pre-patterned by ion irradiation / J.V. Smagina [et. al.] // *Phys. Status Solidi A*. – 2013. – Vol. 210, № 8. – P. 1522–1524.
6. [6] Light-emitting tunneling nanostructures based on quantum dots in Si and GaAs / V. G. Talalaev [et. al.] // *Semiconductors*. – 2012. V. 46, № 11. – P. 1460–1470.
7. Self-assembling SiGe and SiGeC nanostructures for light emitters and tunneling diodes / K. Eberl [et. al.] // *Thin Solid Films*. – 2000. – V. 369. – P. 33–38.

ЗАВИСИМОСТЬ ИК-ПОГЛОЩЕНИЯ СТРУКТУРЫ Si/SiO₂/Si ОТ УРОВНЯ ЛЕГИРОВАНИЯ Si -СЛОЕВ

А. И. Мухаммад, П. И. Гайдук

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: rct.muhammadAI@bsu.by

Методом конечных разностей во временной области получены спектры поглощения инфракрасного излучения для структур Si/SiO₂/Si с поверхностным островковым Si-слоем различного типа и уровня легирования. Обнаружено, что при легировании островкового слоя от $3 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ до $8 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ширина полосы с интенсивностью поглощения выше 70% в спектре поглощения структуры Si/SiO₂/ n^+ -Si составила более 16 мкм. Показано, что структура с подложкой p -типа, легированной до $5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и островковым Si-слоем n -типа, легированным до $7 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ поглощает более 75% падающего на него излучения в диапазоне 4–20 мкм. Установлено, что использование в качестве островкового слоя как нелегированного кремния, так и ма-

териала с большим количеством носителей заряда (металл) резко уменьшает эффективность поглощения излучения структурой в исследованном диапазоне.

Ключевые слова: кремниевые структуры; спектры поглощения; легированный кремний; плазмонный резонанс.

DEPENDENCE OF THE IR-ABSORPTION OF THE Si/SiO₂/Si STRUCTURE ON THE DOPING LEVEL OF THE SILICON LAYERS

A. I. Mukhammad, P. I. Gaiduk

Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus

Corresponding author: A. I. Mukhammad (rct.muhammadAI@bsu.by)

The absorption spectra of infrared radiation of Si/SiO₂/Si structures with an insular surface layer are calculated using the finite difference time domain method. The absorption spectra were modeled depending on the doping level of the silicon island layer. It is established that the doping level of the silicon island layer affects the absorption value of structures. It is shown that a wide absorption band (more than 16 microns) with an intensity of more than 75% occurs at the doping level of the silicon island layer in the range of $3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ – $8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. It is shown that a variant of the structure with a p-type substrate doped to $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ and an island Si-layer of n-type doped to $7 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ absorbs more than 75% in the range of 4–20 microns. It is found that the use an island layer of unalloyed silicon or a material with a large number of charge carriers (metal) can affect a decrease in the absorption intensity of the structure.

Key words: silicon structures; absorption spectra; doped silicon; plasmon resonance.

ВВЕДЕНИЕ

Сильнолегированный кремний является важным и перспективным материалом. Высокий уровень легирования позволяет, например, использовать кремний в качестве плазмонного материала в инфракрасной (ИК) области [1]. Плазмоны представляют собой сильно локализованные поверхностные волны, которые существуют на границе раздела двух сред с противоположными диэлектрическими проницаемостями [2]. Плазмонные колебания, возникающие в инфракрасной области, могут увеличивать чувствительность структуры к падающему на нее излучению, а, следовательно, и чувствительность ИК-фотодетекторов на основе таких структур. Для возникновения и поддержания в таких структурах плазмонных колебаний поверхностный слой периодически структурируют, например, изготавливают его в виде массива островков [3]. При этом положение пика плазмонного резонанса зависит как от размера полупроводниковой плазмонной структуры, так и от количества свободных носителей заряда в полупроводнике. Увеличения концентрации носителей заряда достаточно для достижения полупроводниками свойств плазмонных материалов, а возможность вместе с уровнем легирования изменять плазмонную частоту, позволяет настраивать частоту плазмонного резонанса в нужном диапазоне [2].

В данной работе была исследована зависимость величины поглощения структур Si/SiO₂/Si от типа и уровня легирования поверхностного островкового Si-слоя.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теоретическое моделирование спектров поглощения инфракрасного излучения проводилось для структуры, приведенной на рисунке 1, на выносном рисунке представлено поперечное сечение исследуемой структуры в плоскости XZ. Поверхностный (островковый) слой структуры состоял из массива периодически расположенных островков легированного кремния высотой 800 нм. Уровень легирования островков варьировался от $9 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ до $1 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$, были исследованы структуры с разным типом легирования островков. Также для сравнения были рассчитаны спектры поглощения структур с островковым слоем из нелегированного кремния и серебра. Островки размером 2 мкм расположены с периодом 4 мкм на диэлектрическом слое диоксида кремния (SiO_2) толщиной 310 нм. Указанные слои располагались на подложке из кремния толщиной 2,5 мкм. В качестве подложки использовался кремний p -типа с уровнем легирования $7 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

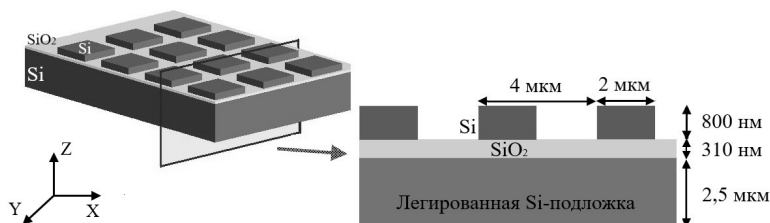


Рисунок 1. Модель исследованной периодической структуры, на выносном рисунке модель структуры в плоскости XZ

Моделирование проводилось методом конечных разностей во временной области (the finite difference time domain method, FDTD) в программе FDTD Solutions [4]. Над и под структурой применялись граничные условия идеально согласованных слоев, в остальных случаях – периодические граничные условия. В области моделирования была использована сетка с шагом 75 нм, в области структуры шаг сетки был уменьшен до 25 мкм. Поглощение определялось соотношением $A(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda)$, где $R(\lambda)$ – отраженное и $T(\lambda)$ – прошедшее излучение. Оптические характеристики диоксида кремния, серебра и нелегированного кремния были взяты из литературы, для расчета оптических характеристик высоколегированного кремния был использован подход Друде [2, 5].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2 приведены зависимости величины поглощения структур $p^+ \text{-Si/SiO}_2/n^+ \text{-Si}$ и $p^+ \text{-Si/SiO}_2/p^+ \text{-Si}$ от уровня легирования островкового слоя. Для исследования влияния типа подложки на величину поглощения также были получены спектры поглощения структур $n^+ \text{-Si/SiO}_2/n^+ \text{-Si}(p^+ \text{-Si})$ с различным типом легирования подложки. В целом зависимости поведения кривых поглощения от уровня легирования островкового слоя оказываются схожими. Можно заметить, что большое влияние на интенсивность поглощения оказывает сочетание типов легирования подложки и островкового слоя. Так структура с подложкой p -типа и островковым слоем n -типа (рис. 2, а) поглощает более 70% практически во всем диапазоне 4–20 мкм для большинства исследованных значений уровней легирования островкового слоя. При этом структура с подложкой n -типа и островковым слоем p -типа наоборот в среднем

поглощает меньше практически при всех исследованных значениях уровня легирования островкового Si-слоя. На рисунке 2а выделена область I, которая включает в себя диапазон от $3.5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ до $8 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, при этих значениях уровня легирования островкового слоя наблюдается наибольшая ширина полосы поглощения с интенсивностью более 75% среди всех исследованных значений уровня легирования. Если количество носителей заряда в островковом слое превышает $8 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, уменьшается величина поглощения в диапазоне 4–8 мкм, при этом в диапазоне 10–18 мкм поглощение превышает 90%. А если количество носителей заряда в островковом слое меньше $3 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, величина поглощения в диапазоне 10–18 мкм резко падает, а в диапазоне 5–9 мкм – возрастает.

Для всех полученных зависимостей характерно наличие на длине волны около 9,5 мкм уменьшения величины поглощения до 65–75%, похожее на небольшой провал. Этот провал наиболее хорошо заметен на рисунке 2, б (область II). При увеличении уровня легирования островкового слоя провал на длине волны 9,5 мкм увеличивается и расширяется. При этом величина поглощения в диапазоне 12–18 мкм практически не изменяется при увеличении уровня легирования островкового слоя и составляет около 80–85%.

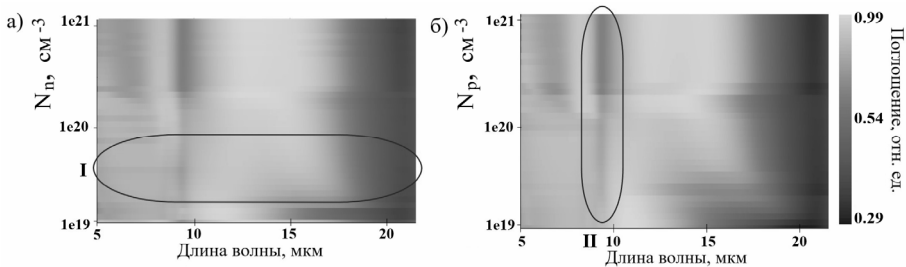


Рисунок 2. Зависимость величины поглощения структуры $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/n^+-\text{Si}$ (а) и структуры $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/p^+-\text{Si}$ (б) от уровня легирования островкового слоя

На рисунке 3 приведены спектры поглощения структур с островковым слоем из Si, $n^+-\text{Si}$ и Ag. Структура $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/n^+-\text{Si}$ показывает величину поглощения выше 80% во всем исследованном диапазоне (кроме небольшого провала до 75% в диапазоне 9,5–10 мкм). Замена островкового слоя из легированного кремния на слой из не легированного кремния приводит к уменьшению величины поглощения практически во всем исследованном диапазоне, кроме области 8–12 мкм, где наблюдается небольшой пологий пик с максимумом интенсивности около 97% на 12 мкм. Поведение кривой поглощения структуры $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/\text{Ag}$ в диапазоне

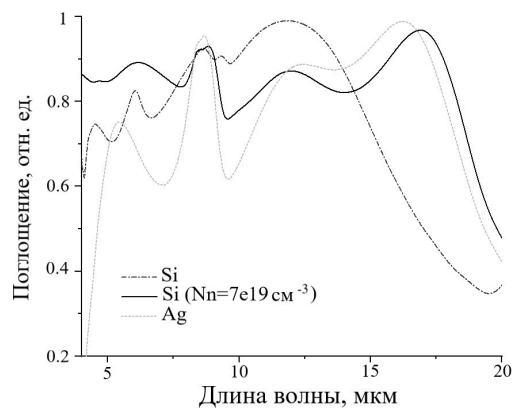


Рисунок 3. Теоретически рассчитанные спектры поглощения структур $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/\text{Si}$, $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/n^+-\text{Si}$ и $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/\text{Ag}$

4–10 мкм напоминает поведение кривой поглощения структуры $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/\text{Si}$, а в диапазоне 10–20 мкм – поведение кривой поглощения структуры $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/n^+-\text{Si}$.

У всех структур, приведенных на рисунке 3, на длине волны 9 мкм наблюдается пик поглощения, а также увеличение поглощения на длине волны около 9 мкм (перед резким провалом) наблюдается и на рисунках 2, а, б. Скорее всего этот пик объясняется колебанием мостиковых групп Si-O-Si в слое диоксида кремния [6]. За величину поглощения в диапазоне 4–5 мкм вероятно отвечает возникающий в островковом слое плазмонный резонанс, поскольку период островкового слоя составляет 4 мкм [3, 7]. Наибольшее пропускание здесь наблюдается у структуры $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/n^+-\text{Si}$, а наименьшее – у структуры с островковым слоем из серебра. Мы предполагаем, что серебряный слой содержит слишком много носителей заряда, что в сочетании с микронным размером островков не позволяет возникать плазмонному резонансу в инфракрасном диапазоне [7]. На рисунках 2, а и 2, б заметно насколько ослабляется поглощение в диапазоне 4–5 мкм при увеличении уровня легирования островкового слоя. При этом в диапазоне 12–20 мкм, судя по всему, за величину поглощения отвечают колебания, возникающие на границе раздела подложка/диоксид кремния, поскольку разница в поведении кривых поглощения структур $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/n^+-\text{Si}$ и $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/\text{Ag}$ невелика. Также исходя из работ [3,7,8] на поглощение в диапазоне 12–20 мкм влияет взаимодействие колебаний, возникающих на границах раздела островковый слой/диоксид кремния и диоксид кремния/подложка. Возможно поэтому уровень поглощения в диапазоне 12–20 мкм на рисунках 2, а, б различается для разного уровня легирования [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, с помощью метода конечных разностей во временной области были получены зависимости спектров поглощения структур $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/\text{Si}$ от типа и уровня легирования островкового Si-слоя. Установлено, что в диапазоне от 4 мкм до 20 мкм уровень легирования островкового слоя влияет на величину поглощения структуры, увеличение уровня легирования выше $8 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ приводит к уменьшению величины поглощения в диапазоне 4–10 мкм, а уменьшение уровня легирования ниже $3 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ уменьшает величину поглощения в диапазоне 10–20 мкм. Установлено, что достичь широкой полосы поглощения с интенсивностью больше 75% можно с помощью легирования кремниевого островкового слоя от $3 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ до $8 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Показано, что использование в качестве островкового слоя как нелегированного кремния, так и материала с большим количеством носителей заряда (например, серебра) резко уменьшает величину поглощения структуры в исследованном диапазоне. Установлено, что полоса поглощения с величиной более 80% увеличивается для структур с разным типом легирования подложки и островкового слоя. Так для структуры с подложкой *p*-типа, легированной до $5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и островковым слоем *n*-типа, легированным до $7 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ полоса поглощения с эффективностью более 75% составляет около 16 мкм.

Исследования выполнены в рамках проекта T22-030 Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (№ ГР 20221052)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Tan, C.L., Emerging technologies for high performance infrared detectors / Tan C.L., Mohseni H. // Nanophotonics. - 2018.- Vol. 8.- P. 169–197.

2. Майер, С.А. Плазмоника: теория и приложения/ С.А. Майер - Ижевск, НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2011 – 292с.
3. Gorgulu, K All-Silicon Ultra-Broadband Infrared Light Absorbers / K. Gorgulu, A. Gok, M. Yilmaz // Scientific reports. – 2016.- Vol. 6.- 38589.
4. Nanophotonic FDTD Simulation Software [Electronic resource] // Lumerical FDTD – Mode of access: <https://www.lumerical.com/products/fdtd/>. – Date of access: 01.2020
5. E. D. Palik, Handbook of optical constants of solids vol. 2, London: Academic Press, 1091 p, 1985.
6. Optical constants of silica glass from extreme ultraviolet to far infrared at near room temperature/ Kitamura R. [et. all] //Applied Optics. - 2007.- Vol. 46.- No. 33.- P. 8118–8133.
7. Мухаммад, А.И. Влияние толщины n-Si подложки и уровня ее легирования на поглощающие свойства кремниевых плазмонных структур в инфракрасном диапазоне / А. И. Мухаммад, П. И. Гайдук // ЖПС. – 2021.– Т. 88.– №6.– С. 923–930.
8. Silicon based mid-IR super absorber using hyperbolic metamaterial/ M. Desouky [et. all] // Scientific reports. - № 8.- 2018.- pp. 2036.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДИФИКАЦИИ ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ НАНОПОРИСТЫХ МАТРИЦ

А. А. Набережнов¹, Е. Ю. Королева^{1,2}, А. Ю. Молоков¹, А. А. Сысова¹

¹⁾ *ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, ул. Политехническая, 26, 194021, С.-Петербург, Россия, e-mail: alex.naberezhnov@mail.ioffe.ru*

²⁾ *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, 29, 195251, С.-Петербург, Россия, e-mail: e.yu.koroleva@mail.ioffe.ru*

На основе пористых щелочно-боросиликатных стекол со средним диаметром каналов (пор) 6 нм (PG6), в которых внутренняя поверхность каналов (интерфейс) покрыта тонким слоем аморфного диоксида титана, изготовлены образцы нанокomпозитных материалов, содержащие введенный в поровое пространство сегнетоэлектрик NaNO_2 . Исследована структура и получены температурные и частотные зависимости диэлектрического отклика нанокomпозитов. Показано, что появление дополнительного интерфейса приводит к значительному изменению электрофизических свойств данных нанокomпозитов по сравнению с аналогичными материалами, но без модификации внутренней поверхности каналов (пор).

Ключевые слова: ограниченная геометрия; сегнетоэлектрические нанокomпозитные материалы; диэлектрическая спектроскопия; дифракция рентгеновского излучения.

USE OF INTERFACE MODIFICATION TO CONTROL THE PROPERTIES OF FERROELECTRIC NANOCOMPOSITES BASED ON NANOPOROUS MATRICIES

A. A. Naberezhnov¹, E. Yu. Koroleva^{1,2}, A. Yu. Molokov¹, A. A. Sysoeva¹

¹⁾ *Ioffe Institute, Polytechnicheskaya 26, 194021, St.-Petersburg, Russia*

²⁾ *Peter the Great St.-Petersburg Polytechnical University, Polytechnicheskaya 29, 195251, St.-Petersburg, Russia*

Corresponding author: A. A. Naberezhnov (alex.naberezhnov@mail.ioffe.ru)