

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ПЛАЗМОНОВ В ПЕРИОДИЧЕСКИХ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ

А. И. Мухаммад¹, М. В. Лобанок¹, К. В. Чиж², В. А. Юрьев², П. И. Гайдук¹

¹⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,
e-mail: rct.muhammad@bsu.by,

²⁾ Институт общей физики имени А. М. Прохорова РАН, ул. Вавилова, 38,
Москва, Россия; e-mail: chizh@kapell.gpi.ru

Теоретически смоделированы спектры поглощения многослойных структур на основе кремния с структурированным верхним слоем. Проведено сравнение спектров для структур с различными периодами. Установлено, что широкая полоса поглощения достигается суммированием нескольких режимов плазмонного резонанса. Это позволяет менять ширину и расположение полосы поглощения, изменяя параметры верхнего слоя. Поверхностный структурированный слой кремния может быть изготовлен с использованием стандартной оптической литографии, что позволяет экономически выгодно изготавливать данные микроструктуры.

Ключевые слова: плазмоника; плазмонный резонанс; кремниевые структуры; спектры поглощения.

MODELING OF LOCALIZED PLASMONS IN PERIODIC SILICON-BASED MULTILAYER STRUCTURES

A. I. Mukhammad¹, M. V. Lobanok¹, K. V. Chizh², V. A. Yuryev², P. I. Gaiduk¹

¹⁾ Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus

²⁾ A. M. Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia
Corresponding author: A. I. Mukhammad (rct.muhammad@bsu.by)

Absorption spectra of silicon-based multilayer structures with a structured top layer are theoretically simulated. Spectra for structures with different periods are compared. It is found that the wide absorption band is achieved by summing several modes of plasmon resonance. This allows you to change the width and location of the absorption band by changing the parameters of the top layer. The surface structured layer of silicon can be manufactured using standard optical lithography, which makes it cost-effective to produce these microstructures.

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

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к оптоэлектронным приборам, использующим плазмонные эффекты, в последние годы значительно возрос [1]. Увеличение поглощения излучения при возбуждении плазмонных резонансов может быть использовано для создания различных фотоприемных устройств. Особенно актуальны такие устройства в инфракрасной области, которая используется при построении болометрических устройств. Но, поскольку плазмонные резонансы металлов наблюдаются в основном в видимой час-

ти спектра, долгое время такие устройства не считались перспективными. Однако использование альтернативных плазмонных материалов дало возможность создания таких устройств. Такие альтернативные решения связаны с использованием сильно-легированных полупроводниковых структур микрометрических размеров [2]. Увеличения концентрации носителей заряда в полупроводниковых материалах достаточно, чтобы заставить их вести себя подобно металлам. Это увеличение достигается путем легирования [3]. При выборе полупроводника как плазмонного материала необходимо учитывать подвижность носителей и ширину запрещенной зоны, чтобы исключить дополнительные оптические потери [4].

В настоящей работе проведен сравнительный анализ многослойных плазмонных структур ИК-диапазона на основе периодических кремниевых островков. Возможности сверхвысокой интеграции и точный контроль геометрии на микроуровне – преимущества кремниевой технологии, которые могут использоваться для разработки таких структур [5]. Эти преимущества могут использоваться для разработки новых фотоприемных устройств.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе исследована многослойная структура Si-SiO₂-Si. Верхний (поверхностный) слой периодически структурирован вдоль обоих направлений *x* и *y*. Толщина кремниевой решетки и слоя диоксида кремния 1,2 мкм и 0,8 мкм соответственно. Были исследованы структуры с различными периодичностями (7 и 8 мкм) и размером островка *a* = 2 мкм. Островки имели квадратную форму. Легирующие концентрации верхнего (*n*-типа) и нижнего (*p*-типа) слоев кремния $N_n = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и $N_p = 10^{19} \text{ см}^{-3}$, соответственно. Также было проведено моделирование нелегированной структуры. Оптические константы для легированного кремния были взяты в литературе [6].

Моделирование проводилось методом FDTD в программе FDTD Solution [7]. Она имеет закрытый исходный код и позволяет решать различные задачи. Для моделирования были использованы граничные условия типа PML (в подложке и над структурой), а также использовались периодические граничные условия (Periodic). Periodic позволяют рассчитать отклик всей периодической структуры, производя расчеты только для одной ячейки. Данные условия используются при периодичности самой структуры, а также периодичности электромагнитных полей. Для построения спектров поглощения был использован метод анализа Optical power (Advanced method). Чтобы рассчитать поглощение в зависимости от частоты этим методом, необходимы данные только о напряженности электрического поля и мнимой части диэлектрической проницаемости. Обе величины легко измеряются при моделировании FDTD. Для расчета был использован скорректированный готовый скрипт компании Lumerical [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Проведено моделирование плазмонных резонансов и спектров поглощения описанной выше структуры. Для начала была исследована структура Si-SiO₂-Si, в которой ни подложка, ни структурированный кремний не легирован (рисунок 1). Спектр поглощения такой структуры содержит один малоинтенсивный (коэффициент поглощения (*Pabs*) приблизительно равен 0,12) пик на длине волны около 10 мкм. Этот

пик возникает из-за молекулярного резонанса диоксида кремния. Никаких плазмонных резонансов в такой структуре не возникает. Для их появления оптические свойства кремния должны быть похожи на свойства металлов, а значит кремний должен быть легирован [3].

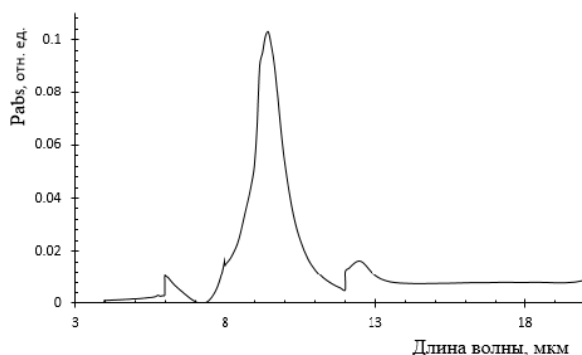


Рисунок 1. – Спектр поглощения структуры из нелегированного кремния с периодом $P = 7$ мкм и размером островка $a = 2$ мкм

Также было проведено сравнение теоретических спектров поглощения кремниевых структур с различными периодами (рисунок 2). После более подробного анализа спектра поглощения структуры с периодом 7 мкм был замечен эффект множественных резонансов. Проявление данного эффекта можно проследить по пикам поглощения в спектре. Ярко выраженный пик на длине волны 7 мкм соответствует режиму распространения поверхностных плазмонов, которые генерируются вблизи равенства периодичности и длины волны. В этом районе значение коэффициента поглощения (P_{abs}) максимально, на других частотах эффективность поглощения меньше (разница составляет 15-20% и более). Около 9,42 мкм наблюдается максимальное поглощение не структурированного высоколегированного кремния из-за небольшого значения действительной части диэлектрической проницаемости вблизи плазменной частоты [5]. Около 10 мкм возникает молекулярный резонанс диоксида кремния. На более длинных длинах волн увеличивается отражательная способность, а поглощение уменьшается. Однако на длине волны около 18 мкм наблюдается небольшой подъем коэффициента поглощения, который обусловлен появлением плазмонов в полостях между островками кремния. В полученном теоретическом спектре этот пик заметно меньше, чем в аналогичных исследованиях [5]. Возможно, это связано с не совсем корректным заданием периодических граничных условий или слишком грубой аппроксимацией оптических констант. Можно заметить, что для исследованной структуры ширина полосы частот со средней поглощательной способностью более 60% составляет около 8 мкм (6–14 мкм). Это позволяет использовать периодическую структуру такого типа в качестве основы для различных фотоприемных устройств [5].

При сравнении кривых поглощения на рисунке 2 было выявлено, что для плазмонных резонансов характерно смещение в более длинноволновую область при увеличении периода (а соответственно и расстояния между островками). Поскольку режим возникновения поверхностных плазмонов возбуждается из-за периодичности структуры, резонансная длина волны смещается с увеличением периода. Однако, положение второго режима плазмонного резонанса существенно зависит от ширины

полостей между островками, а не от периодичности. Но, поскольку при изменении периода размер островка оставался одинаковым, наблюдается такое смещение данного режима. Однако можно увидеть значительное увеличение интенсивности этого пика по сравнению с аналогичным пиком плазмонного резонанса второй структуры. Также при анализе спектра поглощения структуры с периодом 8 мкм было замечено странное поведение кривой в области длин волн 15–20 мкм. Так интенсивность пика второго режима плазмонного резонанса весьма велика по сравнению с интенсивностью пика первого режима (разница составляет около 40%). Такой разницы в аналогичных исследованиях не наблюдалось [5]. С чем это может быть связано точно неизвестно. Есть вероятность влияния граничных условий, а также грубой интерполяции данных.

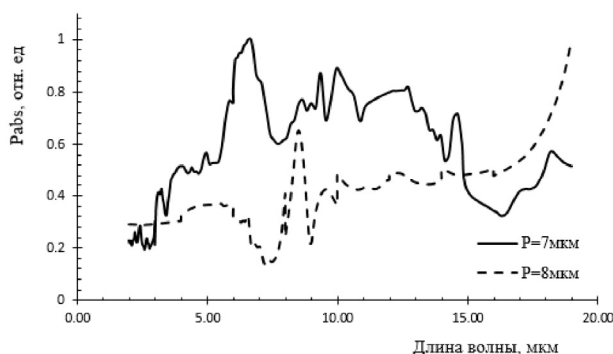


Рисунок 2. – Спектры поглощения кремниевых структур с уровнем легирования $N_p = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (структурированный кремний) и $N_p = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (подложка) и периодом $P = 7 \text{ мкм}$ (сплошная линия) и $P = 8 \text{ мкм}$ (пунктирная линия), $a = 2 \text{ мкм}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные теоретические спектры поглощения периодических структур на основе высоколегированного кремния показали возможность использования данных структур для создания широкополосных поглотителей ИК-диапазона без непосредственного применения металлов. При этом можно ожидать, что структуры типа Si-SiO₂-Si при оптимальных параметрах позволят создать широкополосные поглотители, средняя поглощающая способность которых превышает 60 % в достаточно широком диапазоне (около 8 мкм). Причем расположением этого диапазона можно управлять (смещая в более или менее длинноволновую область), изменяя период структурированного слоя. Данный результат является достаточно перспективным, так как периодически расположенные кремниевые решетки изготавливаются с использованием стандартной оптической литографии, что позволяет экономически эффективно изготавливать микромасштабные структуры.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования проводились при финансовой поддержке БРФФИ в рамках проекта № T18P-190, а также проекта ГПНИ (№ Г/Р 20162098).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. S. A. Maier, Plasmonics: Fundamentals and Applications// Springer, 2007.
2. Климов В. В., Наноплазмоника // М.: ФИЗМАТЛИТ.- 2009. – 480с.
3. Gururaj V. Naik, Alternative Plasmonic Materials: Beyond Gold and Silver/ Gururaj V. Naik, Vladimir M. Shalaev, Alexandra Boltasseva // Birck and NCN Publications.- 2013.- P. 1422.
4. West, R. Searching for better plasmonic materials/R. West, S. Ishii , G. V. Naik // Laser Photonics Rev.-2010.-Vol 4 .- P. 795–799.
5. Kazim Gorgulu1,, All-Silicon Ultra-Broadband Infrared Light Absorbers/ Kazim Gorgulu1, Abdullah Gok1, Mehmet Yilmaz // Scientific reports. – 2016.- Vol. 6.- 38589.
6. Palik, E. D. Handbook of optical constants of solids. // Academic Press. - 1985.- Vol.2.
7. Lumerical FDTD Solutions [Electronic resource]. / Lumerical Solutions, Inc. - 2003-2017. - Mode of access: <http://www.lumerical.com/> - Date of access : 14.04.2018
8. Lumerical FDTD Solutions [Electronic resource]. / Lumerical Solutions, Inc.-2003–2017. https://kb.lumerical.com/en/index.html?layout_analysis_pabs.html

РОЛЬ ИНТЕРФЕЙСА В ФОРМИРОВАНИИ МАКРОСКОПИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. А. Набережнов¹, И. В. Голосовский², П. П. Паршин³, П. Ю. Ванина⁴

¹⁾ *Физико-Технический институт им. А.Ф. Иоффе, Политехническая, 26, 194021, С.-Петербург, Россия, e-mail: alex.nabereznov@mail.ioffe.ru,*

²⁾ *НИЦ «Курчатовский институт» Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, Орлова роща, 1, 188300, Ленинградская область, Гатчина, Россия, e-mail: golosovsky_iv@pnpi.nrcki.ru*

³⁾ *НИЦ «Курчатовский институт» пл. Академика Курчатова, 1, 123182, Москва, Россия, e-mail: Parshin_PP@nrcki.ru*

⁴⁾ *С.-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Политехническая 29, 195251, С.-Петербург, Россия, e-mail: p.yu.vanina@gmail.com*

Методами упругого и неупругого рассеяния нейтронов и синхротронного излучения, а также диэлектрической спектроскопии, исследовано влияние интерфейса «нанопористая матрица – внедренный материал» на наблюдаемые макроскопические свойства полученных нанокompозитных материалов. В качестве матриц использованы пористые стекла с различным средним диаметром пор, хризотилловые асбесты, искусственные опалы и другие нанопористые матрицы. Показано, что в ряде случаев именно состояние и эффекты на интерфейсе приводят к сдвигу температур фазовых переходов, изменению спектра элементарных возбуждений и появлению новых кристаллических фаз.

Ключевые слова: интерфейс; нанокompозитные материалы; нанопористые матрицы; рассеяние нейтронов и синхротронного излучения; диэлектрическая спектроскопия.