

ПЛАЗМОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СТРУКТУРЕ Si/SiO₂/Si: АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ СПЕКТРА ПОГЛОЩЕНИЯ

А. И. Мухаммад, П. И. Гайдук

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

С помощью метода конечных разностей во временной области (FDTD) проведено моделирование спектров поглощения структуры (островки Si)/SiO₂/Si. Обнаружен эффект множественного резонанса для структуры с размером островка 4 мкм и периодом их повторения 8 мкм. Для такой структуры обнаружена широкая полоса (>12 мкм) высокого уровня поглощения излучения (>80%). Для спектрального диапазона 10–20 мкм выявлено, что широкие полосы поглощения возникают благодаря распространяющимся поверхностным плазмонам на границе разделов диэлектрика и слоев высоколегированного кремния.

Ключевые слова: ИК-фотодетекторы; плазмонный резонанс; кремниевые структуры; спектры поглощения.

PLASMON ABSORPTION OF INFRARED RADIATION IN THE Si/SiO₂/Si STRUCTURE: ANALYSIS OF FEATURES OF THE ABSORPTION SPECTRUM

A. I. Mukhammad, P. I. Gaiduk

*Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus
Corresponding author: A. I. Mukhammad (rct.muhammad@bsu.by)*

The time domain finite difference (FDTD) method was used to model the absorption spectra of the structure (Si islands)/SiO₂/Si. The effect of multiple resonance was found for a structure with an islands size of 4 microns and period of 8 microns. A wide band (>12 microns) of high radiation absorption (>80%) was found for this structure. For the spectral range of 10–20 microns, it was found that wide absorption bands occur due to propagating surface plasmons at the boundary of the dielectric sections and layers of high-alloyed silicon.

Key words: IR photodetectors; plasmon resonance; silicon structures; absorption spectra.

ВВЕДЕНИЕ

Инфракрасные (ИК) фотоприемники играют важную роль в медицине, биологии, военной технике [1]. Разработка ИК-фотоприемников нового поколения связана с их сенсификацией в ИК диапазоне, например, за счет увеличения поглощения света. Перспективным методом является использование плазмонных структур, которые могут увеличивать поглощение света как в широком спектральном диапазоне, так и в отдельных спектральных областях [2]. Одна из основных проблем в этом направлении связана с поиском подходящего материала, который может использоваться как плазмонный в ИК диапазоне. Традиционные металлы (серебро, золото, медь и т. д.) не подходят, поскольку плазмонные эффекты металлов проявляются в основном в видимой области спектра. Недавно было обнаружено, что высоколегированные по-

лупроводники могут быть альтернативой металлам в качестве плазмонных материалов в инфракрасной области [2–3]. В частности, установлено, что у сильнолегированного кремния более высокая интенсивность плазмонных мод в инфракрасном диапазоне по сравнению с металлами [4].

В настоящей работе с помощью FDTD моделирования изучен эффект плазмонного поглощения в многослойных кремниевых структурах с периодически структурированным верхним слоем, а также проведен анализ положения и интенсивности пиков поглощения в сравнении с пространственным распределением электрического и магнитного полей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей работе проводилось моделирование структуры, состоящей из трех слоев: периодически расположенные кремниевые островки на слое диоксида кремния, поддерживаемые плоской подложкой из кремния (рисунок 1). Кремниевые островки квадратной формы с размером 4 мкм и периодичностью 8 мкм расположены на слое диэлектрика. Толщина островков составляет 1.2 мкм, промежуточного слоя SiO_2 – 0.8 мкм, а толщина подложки – 2.5 мкм.

Для достижения плазмонного эффекта поверхностные кремниевые островки (n-тип) и кремниевая подложка (p-тип) сильно легированы до концентрации $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Оптические константы для легированного кремния взяты из работы [5]. Моделирование проводилось с помощью FDTD метода в программе FDTD Solutions [6]. Для моделирования использовались периодические граничные условия, а также граничные условия идеально согласованных слоев (над и под структурой). Для сокращения времени расчета использовалась неоднородная сетка с минимальным шагом 30 нм в области поверхностного слоя. Поглощение определялось соотношением $A(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda)$, где $R(\lambda)$ – отраженное, $T(\lambda)$ – прошедшее излучение.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2 приведены спектры поглощения структуры с размером островков 4 мкм, а также структуры со сплошным поверхностным слоем. Моделирование проводилось в диапазоне длин волн от 8 мкм до 20 мкм. Для упрощения анализа исследуемый диапазон был разделен на две области (8 – 11 мкм и 11 – 20 мкм), которые отличаются проявлением эффектов плазмонного поглощения.

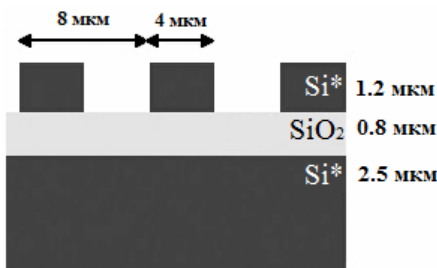


Рисунок 1. – Модель исследуемой структуры

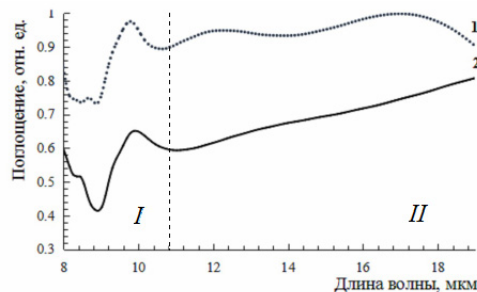


Рисунок 2. – Спектр поглощения структуры с периодом 8 мкм и размером островка 4 мкм (I) и со сплошным поверхностным слоем (2)

В спектре поглощения островковой структуры (рис. 2) на длине волны около 8 мкм наблюдается небольшой пик с интенсивностью около 80%. Далее на длине волны около 9 мкм наблюдается плавный подъем до 98%. В области I на длине волны около 9.5 мкм наблюдается максимальное поглощение неструктурированного высоколегированного кремния, поскольку его плазменная частота равна 9,42 мкм [2]. Также в диапазоне 9.5–10 мкм возникает молекулярный резонанс диоксида кремния [4]. Мы предполагаем, что поглощение в этом диапазоне, скорее всего, связано с валентными антисимметричными колебаниями мостиковых групп Si – O – Si [7]. Эта полоса поглощения также характерна для спектра поглощения структуры со сплошным поверхностным слоем [3]. В области II увеличивается отражательная способность высоколегированного кремния, а поглощение уменьшается [4]. Так на рисунке 2 в диапазоне 11–14 мкм можно отметить, что кривая поглощения образует пологий пик с интенсивностью около 95%, далее интенсивность кривой медленно уменьшается до 90–92%. В диапазоне 15–20 мкм можно заметить еще один пологий пик с интенсивностью поглощения около 98% на длине волны 17.5 мкм. Мы предполагаем, что такое поведение кривой поглощения можно объяснить плазмонными модами, возникающими между слоем диоксида кремния и поверхностным островковым слоем (12 мкм) и плазмонными модами, возникающими между слоем диоксида кремния и кремниевой подложки (18 мкм). Можно заметить, что в спектре поглощения 2 (рис. 2) в области II пики поглощения отсутствуют, а в диапазоне 15–20 мкм кривая поглощения медленно и линейно возрастает.

Пространственное распределение поля может дать дополнительную информацию о прошедшем и отраженном излучении. На рисунке 3 представлены расчетные распределения поля для структуры с размером островка 4 мкм. Распределение полей рассчитано для четырех точек в спектре поглощения структуры с использованием метода FDTD.

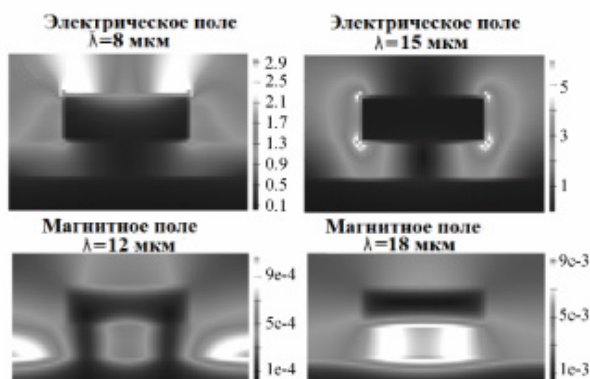


Рисунок 3. – Рассчитанные распределения магнитного и электрического поля для структуры с периодом 8 мкм и размером островка 4 мкм на длинах волн $\lambda=8 \mu\text{м}$, $\lambda=12 \mu\text{м}$, $\lambda=15 \mu\text{м}$, $\lambda=18 \mu\text{м}$

Пространственное распределение электрического поля на длине волны $\lambda = 8 \mu\text{м}$ показывает его сосредоточение на верхней части кремниевых островков, где падающее излучение интерферирует с отраженным [3]. Пространственное распределение магнитного поля на длине волны $\lambda = 12 \mu\text{м}$ показывает его удержание между двумя соседними островками. Можно предположить, что поглощение в этом диапазоне происходит от «боковых» распространяющихся поверхностных плазмонов [3]. Магнитное

поле при $\lambda = 18$ мкм сосредоточено ниже кремниевых островков в слое диоксида кремния. Пик поглощения на этой длине волны может быть обусловлен плазмонными модами, поддерживаемыми диэлектрическим слоем между слоями кремния [3]. Пространственное распределение электрического поля на длине волны $\lambda = 15$ мкм показывает его удержание в верхней и нижней частях кремниевых островков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом FDTD проведено моделирование спектра поглощения структуры Si/SiO₂/Si с периодом 8 мкм и размером островков 4 мкм. Показано, что полоса пропускания со средней поглощающей способностью более 90 %, составляет около 10 мкм. Проведен анализ пространственного распределения полей, полученного FDTD методом. Показано, что появление пиков поглощения в спектре исследуемой структуры можно объяснить наличием плазмонных колебаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Kaikai Du Wavelength and Thermal Distribution Selectable Microbolometers Based on Metamaterial Absorbers / Kaikai Du, Qiang Li, Weichun Zhang, Yuanqing Yang, Min Qiu// IEEE Photonics Journal. – Vol. 7. – Is. 3, – 2015.
2. Tan C. L., Mohseni H. Emerging technologies for high erformance infrared detectors / C.L. Tan, H. Mohseni // Nanophotonics. – Vol. 8. – pp. 169-197. – 2018.
3. Gorgulu, K. All-Silicon Ultra-Broadband Infrared Light Absorbers / K. Gorgulu, A. Gok, M. Yilmaz // Scientific reports. – Vol. 6. – p. 38589.–2016.
4. Мухаммад, А.И., Гайдук П.И. Моделирование локализованных плазмонов в структурах на основе кремния // сборник статей 1 международной научно-технической конференции «ОПТО-, МИКРО И СВЧ ЭЛЕКТРОНИКА - 2018» г. Минск, 22-26 октября 2018 года, под редакцией Н.С. Казака [и др.]. – стр. 320-323. – 2018.
5. E. D. Palik, Handbook of optical constants of solids vol. 2, London: Academic Press, 1091 p, 1985.
6. Lumerical FDTD Solutions [Electronic resource]. Lumerical Solutions, Inc, 2003-2020, Mode of access: <http://www.lumerical.com/> - Date of access : 14.02.2020
7. Власов А. Г. Инфракрасные спектры неорганических стекол и кристаллов / Под редакцией Власова А. Г., Флоринской В. А. и др.// Химия, Ленинград, 1972, 304с– Р. 86–89.

ВЛИЯНИЕ МОЩНОСТИ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ СПЕКТРОВ ЭПР ОБРАЗЦОВ СПЕЧЕННЫХ ПОРОШКОВ НАНОАЛМАЗА ДЕТОНАЦИОННОГО СИНТЕЗА

**А. Н. Олешкевич¹, В. Ю. Долматов², Нгуен Тхи Тхань Бинь³, С. Мунгцецег⁴,
Г. Шилагарди⁴, Т. М. Лапчук¹, Н. М. Лапчук¹**

¹⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,
e-mail: lapchukn@gmail.com,

²⁾ ФГУП «СКТБ «Технолог», 192076, пр. Советский, 33-а, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: diamondcentre@mail.ru

³⁾ Каунг Бинь университет, Провинция Каунг Бинь, Вьетнам, e-mail: binhnttquangbinhuni.edu.vn

⁴⁾ Национальный университет Монголии, Улан-Батор, Монголия,
e-mail: munkhtsetsegs@gmail.com

В работе исследуется влияние СВЧ излучения на структуру композиционного материала, полученного спеканием при высоком давлении (8 ГПа) и высокой температуре (1800 °С) порошка детонационного наноалмаза. Анализируются изменения па-