

## ПЛАЗМОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В СТРУКТУРАХ С ОКОШЕЧНЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ КРЕМНИЕВЫМ СЛОЕМ, ИМПЛАНТИРОВАННЫМИ ИОНАМИ As<sup>+</sup>

А.И. Мухаммад<sup>1)</sup>, К.В. Чиж<sup>2)</sup>, В.Г. Плотниченко<sup>2)</sup>, В.А. Юрьев<sup>2)</sup>, П.И. Гайдук<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет,  
пр. Независимости 4, 220030 Минск, Беларусь, *ms.asjam@gmail.com*, *gaiduk@bsu.by*

<sup>2)</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,  
ул. Вавилова 38, 119991 Москва, Россия;  
*chizh@kapella.gpi.ru*, *vyuryev@kapella.gpi.ru*, *v.plotnichenko@gmail.com*

Методами Фурье-спектрометрии были исследованы экспериментальные спектры пропускания и отражения периодических структур Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si со структурированным (окошечным) поверхностным слоем Si, легированным ионами As<sup>+</sup>, в зависимости от горизонтальной геометрии поверхностного слоя. Установлено, что экспериментальные спектры пропускания и отражения находятся в хорошей корреляции с теоретическими спектрами, рассчитанными с помощью метода конечных разностей во времени. Показано, что период структуры при неизменном расстоянии между окнами влияет на спектр пропускания в диапазоне 2-8 мкм. Мы полагаем, что это может быть обусловлено плазмонными эффектами. Уровень поглощения структур с периодом 4 мкм и размером окна 2 мкм остается высоким во всем исследованном диапазоне (2-17 мкм), при этом разница между минимальным и максимальным значением не превышает 20%. Полоса поглощения с наибольшей интенсивностью для такой структуры наблюдается на длине волны 4 мкм и может быть объяснена возникновением плазмонных колебаний.

**Ключевые слова:** кремниевые структуры; Фурье-спектрометрия; спектры пропускания; ионное легирование; плазмонный резонанс.

## PLASMON ABSORPTION IN STRUCTURES WITH A WINDOW-LIKE SURFACE SILICON LAYER IMPLANTED WITH AS<sup>+</sup> IONS

A. Mukhammad<sup>1)</sup>, K. Chizh<sup>2)</sup>, V. Plotnichenko<sup>2)</sup>, V. Yuryev<sup>2)</sup>, P. Gaiduk<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian State University, 4 Nezavisimosty Ave., 220030 Minsk, Belarus,  
*ms.asjam@gmail.com*, *gaiduk@bsu.by*

<sup>2)</sup>Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,  
*chizh@kapella.gpi.ru*, *vyuryev@kapella.gpi.ru*, *v.plotnichenko@gmail.com*

Experimental transmission and reflection spectra of Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si periodic structures with a window surface layer implanted with As<sup>+</sup> ions were studied by Fourier spectrometry. The dependence of the transmission and reflection curves on the period of the structure at a constant distance between the windows was studied. It is found that the experimental transmission and reflection spectra are in good correlation with the theoretical spectra calculated using FDTD modeling. It is shown that the period of the structure at a constant distance between the windows affects the transmission spectrum in the range of 2-8 μm. This may be due to plasmon effects. The level of absorption of structures with a period of 4 μm and a window size of 2 μm remains high in the entire studied range (2-17 μm), while the difference between the minimum and maximum values does not exceed 20%. The absorption band of the highest intensity for such a structure is observed at a wavelength of 4 μm. This may be due to plasmon effects. Due to the sufficiently uniform level of absorption in the wide range, such a structure can be used as an effective absorber.

**Keywords:** silicon structures; Fourier spectrometry; transmission spectra; ion doping; plasmon resonance.

### Введение

Сильнолегированные полупроводники могут использоваться в качестве плазмон-

ных материалов в области ближнего и среднего инфракрасного диапазона [1]. При этом положение пика плазмонного

резонанса зависит не только от размера полупроводниковой плазмонной структуры, но и от количества свободных носителей заряда в полупроводнике. Увеличения концентрации носителей заряда достаточно для достижения полупроводниками металлических свойств, а возможность вместе с уровнем легирования изменять и плазменную частоту, позволяет настраивать частоту плазмонного резонанса в нужном диапазоне [2]. В частности, для сдвига плазмонного пика в ИК-диапазон кремний должен быть легирован до  $10^{19} \text{ см}^{-3} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$  [1]. Благодаря проявлению плазмонных эффектов, уровень поглощения ИК-излучения в структурах на основе высоколегированного кремния значительно увеличивается. Такие структуры могут использоваться в качестве поглотителей в чувствительных неохлаждаемых микроболометрах [3].

В настоящей работе методом Фурье-спектроскопии было проведено исследование экспериментальных спектров пропускания и отражения структур Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si в зависимости от периода поверхностного слоя при неизменном расстоянии между окнами.

### Материалы и методы

На рисунке 1 представлена модель исследуемой структуры. На кремниевой подложке были выращены слои SiO<sub>2</sub> (160 нм) и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (152 нм). На нитрид кремния осаждался поликристаллический кремний толщиной 844 нм, после осаждения кремний был легирован ионами As<sup>+</sup> с дозой D=500 мкКл/см<sup>2</sup> и энергией E = 60 кэВ. С помощью фотолитографии в поверхностном слое кремния были вытравлены до слоя Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> периодически расположенные квадратные окна размером ах а. Были изготовлены структуры с периодами окон 6-8 мкм при размере окон 2-4 мкм, а также структура с периодом 4 мкм и размером окна 2 мкм. Для активации примеси был проведен термический отжиг исследуемых структур в атмосфере азота при температуре 1050 °С в течении 60 мин.

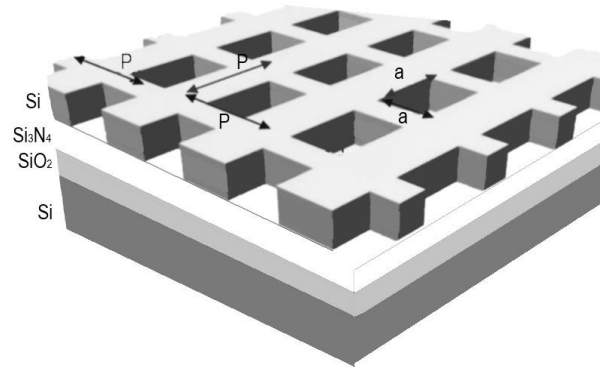


Рис. 1. Модель исследуемой структуры  
Fig. 1. Model of the structure

Спектры пропускания и отражения образцов измерялись с помощью спектрометра IFS-113v (Bruker) с прикрепленным к нему микроскопом IR Scope. В качестве эталонного образца при регистрации спектров отражения использовалось непрозрачное золотое зеркало. Спектры пропускания и отражения снимались с диафрагмой 200 мкм, накоплением 32 спектра и разрешением  $2 \text{ см}^{-1}$ . Поглощение было рассчитано как  $1 - A(\lambda) = R(\lambda) + T(\lambda)$ , где R(λ) - отраженное и T(λ) - прошедшее излучение. При анализе полученных результатов рассеяние не учитывалось. При этом в качестве поглощения анализировалось значение  $1 - A(\lambda)$ . Это означает, что меньшая сумма прошедшего и отраженного излучения дает больший уровень поглощения.

### Результаты и их обсуждение

На рисунке 2 приведены спектры отражения, пропускания и поглощения многослойной структуры Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si с поверхностным слоем, представляющим собой периодически вытравленные окна в слое сильнолегированного кремния. В качестве поглощения рассматриваются значения  $1 - R - T$ .

Уровень пропускания указанной структуры не превышает 30%, наибольшее пропускание наблюдается в диапазоне до 9 мкм, при этом в диапазоне 3-4 мкм кривая пропускания возрастает с 10% до 22%, а в диапазоне 4-9 мкм - убывает с 22% до 7%. После 9 мкм уровень пропускания не

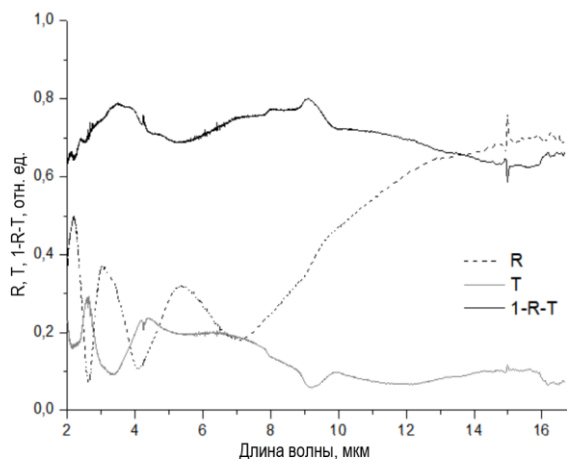


Рис. 2. Спектры отражения, пропускания и поглощения структуры Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si с размером окон 2 мкм и периодом 4 мкм

Fig. 2. Reflection, transmission, and absorption spectra of the Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si structure with a window size of 2 microns and a period of 4 microns

превышает 10%. В целом экспериментальный спектр пропускания ведет себя аналогично спектрам, полученным с помощью теоретического моделирования [4]. В спектре отражения в диапазоне до 7 мкм можно заметить влияние интерференции, которое проявляется из-за многослойности структуры. Интерференция проявляется в виде чередующихся пиков и провалов [3]. В диапазоне 7-16 мкм уровень отражения возрастает от 20% до 75%. В длинноволновой области спектра преобладает проводимость на свободных носителях, поэтому коэффициент отражения увеличивается. [2]. Учитывая все вышесказанное, можно провести анализ спектра поглощения. Полоса поглощения на длине волны около 4 мкм возникает, вероятно, из-за периодичности структуры [4]. В диапазоне 6-9 мкм происходит, по видимому, классическое поглощение свободными носителями заряда [4]. Поглощение в этом диапазоне можно контролировать, изменяя уровень легирования кремния [2]. В диапазоне длин волн 9-10 мкм наблюдается небольшой пик поглощения, обусловленный, как мы полагаем, молекулярным резонансом диоксида кремния [2]. После 10 мкм уровень поглощения медленно уменьшается практи-

чески до 60%. Уровень поглощения данной структуры во всем исследуемом диапазоне не опускается ниже 60%.

На рисунке 3 приведены спектры пропускания структур Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si с разными периодами P = 6 мкм, P = 7 мкм, P = 8 мкм. При этом расстояние между окнами оставалось неизменным (4 мкм), а размер островков варьировался от 2 до 4 мкм.

В спектральном диапазоне от 2 мкм до 4 мкм уровень пропускания уменьшается от 50% до 20% для структуры с периодом 8 мкм и до 23% для структур с периодами 6 мкм и 7 мкм. На 4 мкм для всех структур наблюдается минимум пропускания. Далее уровень пропускания возрастает до пика, причем расположение и ширина пика на полувысоте зависят от значения периода структуры. При увеличении периода от 6 мкм до 8 мкм положение максимума пика сдвигается с 5 мкм до 6 мкм, а ширина на полувысоте возрастает до 2 мкм. Смещение этого пика в спектре пропускания в более длинноволновую область с увеличением периода структуры может указывать на проявление ее плазмонных свойств.

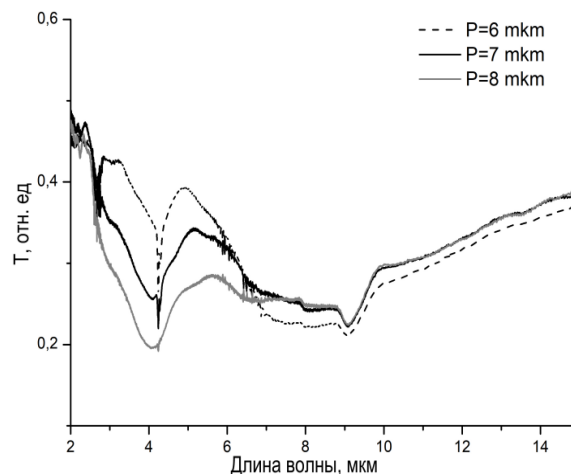


Рис. 3. Спектры пропускания структур Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si с периодами 6 мкм, 7 мкм, 8 мкм

Fig. 3. Transmission spectra of Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si structures with periods of 6 microns, 7 microns, and 8 microns

На длинах волн 7-16 мкм спектры пропускания всех структур ведут себя практически идентично. В диапазоне 6-9 мкм для всех кривых пропускания характерен

провал, который возникает, вероятнее всего, из-за увеличения поглощения свободными носителями. На длине волны 9 мкм наблюдается небольшой провал, связанный с кислородом в кремнии, а на более длинных длинах волн кривые пропускания линейно возрастают.

### Заключение

Таким образом, в работе были исследованы экспериментальные спектры пропускания и отражения периодических структур Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si в зависимости от горизонтальной геометрии поверхностного слоя. Показано, что размер окна и период структуры влияют на спектр пропускания в диапазоне 2-8 мкм. Также показано, что при увеличении периода структуры от 6 мкм до 8 мкм положение максимума пика пропускания сдвигается в более длинноволновую область вместе с увеличением ширины пика на полувывсоте. Установлено, что экспериментальные спектры пропускания и отражения находятся в хорошей корреляции с теоретическими спектрами, полученными с помощью FDTD моделирования. Показано, что уровень поглощения структур с периодом 4 мкм и размером окна 2 мкм остается вы-

соким во всем исследованном диапазоне (2-17 мкм) с разницей между максимальным и минимальным значениями около 20%. Пик поглощения для такой структуры на длине волны может быть обусловлен плазмонными эффектами.

### Благодарности

Исследования проводились при финансовой поддержке БРФФИ в рамках проекта № T18P-190, а также гранта Министерства образования, финансовый номер № 728/12.

### Библиографические ссылки/ References

1. Naik G.V., Shalaev V.M., Boltasseva A. Alternative Plasmonic Materials: Beyond Gold and Silver. *Advanced Material* 2013; 25(24): 1422-1447.
2. Gorgulu K., Gok A., Yilmaz M., Topalli K., Biyikli N., Okyay A.K. All-Silicon Ultra-Broadband Infrared Light Absorbers. *Scientific reports* 2016; (6): 38589
3. Desouky M., Mahmoud A.M., Swillam A.M. Silicon based mid-IR super absorber using hyperbolic metamaterial. *Scientific reports* 2018; 8: 236.
4. Mukhammad A.I., Chizh K.V., Plotnichenko V.G., Yuryev V.A., Gaiduk P.I. Plasmonic-Enhanced Light Absorption in Periodic Silicon Structures: The Effect of Inter-Island Distance. *Semiconductors* 2020; 54(14): 1889-1892.