

**ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ *n*-Si ПОДЛОЖКИ И УРОВНЯ ЕЕ ЛЕГИРОВАНИЯ
НА ПОГЛОЩАЮЩИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЕВЫХ ПЛАЗМОННЫХ СТРУКТУР
В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ**

А. И. Мухаммад*, П. И. Гайдук

УДК 535.34:546.28

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2021-88-6-887-894>

Белорусский государственный университет,
Минск, Беларусь; e-mail: mukhammad@bsu.by

(Поступила 7 октября 2021)

С использованием метода конечных разностей во временной области рассчитаны спектры поглощения структур $Si/SiO_2/Si_3N_4/Si^+$ и $Si/SiO_2/Si^+$ с островковым поверхностным слоем в зависимости от толщины подложки и уровня ее легирования. Обнаружено, что толщина *i*-Si подложки не влияет на общую величину поглощения структуры. При этом увеличение толщины *n*-Si подложки приводит к уширению полосы поглощения интенсивностью >70 %. Установлено, что уровень легирования подложки оказывает влияние на поглощение структур и ширину полосы с поглощением >80 %. Показано, что при уровне легирования подложки в диапазоне $2 \cdot 10^{19}—5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ сохраняется широкая полоса поглощения интенсивностью >80 %. Для доказательства существования плазмонных эффектов проанализированы дисперсионные соотношения колебаний, возникающих в структуре $Si^+/SiO_2/Si^+$ с неструктурным поверхностным слоем. Установлено, что нарушение фазового синхронизма мод на обеих границах раздела *Si*/диэлектрик при существенной разнице между уровнями легирования подложки и поверхностного слоя может влиять на уменьшение поглощения.

Ключевые слова: плазмонное поглощение, кремниевая структура, спектр поглощения, легированный кремний, дисперсионная кривая.

The absorption spectra of $Si/SiO_2/Si_3N_4/Si^+$ and $Si/SiO_2/Si^+$ structures with an island surface layer are calculated using the finite difference time domain method. The absorption spectra were modeled depending on the thickness of the substrate and its doping level. It was found that the thickness of the *i*-Si substrate does not affect the overall absorption of the structure. At the same time, an increase in the thickness of the *n*-Si substrate leads to an expansion of the absorption band with an intensity of more than 70%. It is established that the doping level of the substrate affects the absorption value of the structures and bandwidth with an absorption value above 80%. It is shown that a wide absorption band with intensity of more than 80% occurs at the doping level of the substrate in the range of $2 \cdot 10^{19}—5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Dispersion relations in the $Si^+/SiO_2/Si^+$ structure with an unstructured surface layer are obtained. These dispersion relations may indicate the existence of plasmon oscillations in the system. It is established that a violation of the phase synchronization of the modes at both *Si*/dielectric interfaces at a significant difference between the doping levels of the substrate and the surface layer can lead to a decrease in the absorption.

Keywords: plasmonic absorption, silicon structure, absorption spectrum, doped silicon, dispersion curve.

**INFLUENCE OF THE THICKNESS OF THE *n*-Si SUBSTRATE AND ITS DOPING LEVEL
ON THE ABSORBING PROPERTIES OF SILICON PLASMON STRUCTURES IN THE INFRA-
RED RANGE**

A. I. Mukhammad*, P. I. Gaiduk (Belarusian State University, Minsk, Belarus; e-mail: mukhammad@bsu.by)

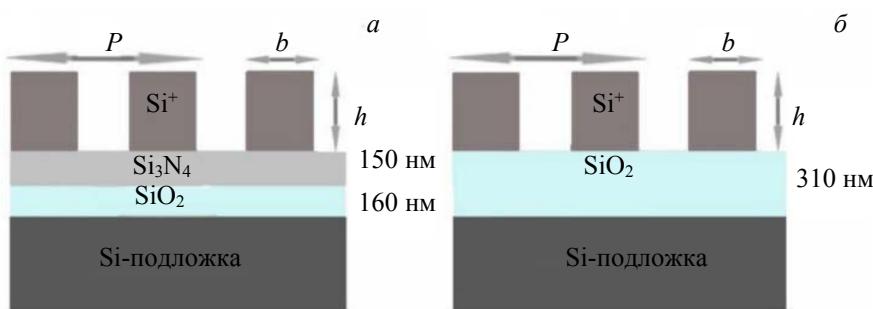
Введение. В последнее время интерес к поверхностным плазмонам и связанным с ними плазмонным структурам, с помощью которых электромагнитную энергию можно локализовать в очень малом (субволновом) объеме [1]. Связь между падающим излучением и коллективными колебаниями свободных носителей заряда в проводящих слоях приводит к появлению поверхностных плазмонов и проявлению плазмонных эффектов [2]. В среднем и дальнем ИК-диапазонах плазмонные эффекты можно использовать при разработке приборов ночного видения, ИК-фотодетекторов и микроболометров для их спектральной сенсибилизации [3]. В качестве плазмонных материалов чаще всего применяются благородные металлы, такие как золото или серебро, однако в среднем и дальнем ИК-диапазонах их использование ограничено из-за фиксированного значения плазменной частоты, расположенной в УФ- (или видимой) области [2]. Для применения плазмонных эффектов в ИК-диапазоне необходимы материалы, плазменная частота которых находится в этом диапазоне. В то же время плазменная частота полупроводников может быть настроена с помощью изменения концентрации свободных носителей заряда [2]. Альтернативным плазмонным материалом в среднем и дальнем ИК-диапазонах может служить кремний, легированный до $1 \cdot 10^{19}$ — $1 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Возможность применения легированного кремния как плазмонного материала в среднем и дальнем ИК-диапазонах подтверждена в [1—6].

В работах [1, 3, 4, 6] показано, что кремниевые структуры, состоящие из чередующихся слоев легированного кремния и диэлектрика, могут быть использованы в ИК-диапазоне как поглотители. Такой поглотитель обычно состоит из нижнего сплошного проводящего слоя (подложки), промежуточного слоя диэлектрика и поверхностного проводящего слоя [7]. Промежуточный диэлектрический слой в зависимости от толщины позволяет возникающим на границах раздела диэлектрика и проводящего слоя плазмонным колебаниям либо поддерживаться независимо, либо образовывать связанные моды. Для усиления связи падающей электромагнитной волны со свободными электронами поверхностный слой структурируют (чаще периодически). Он представляет собой квадратные или цилиндрические островки, пирамидальные или дендроподобные структуры, прямоугольную сетку. Период поверхностного слоя в большинстве случаев имеет субволновой размер [1, 3, 4, 6, 7]. В зависимости от геометрии и конфигурации поверхностного слоя, а также состава и геометрии слоя диэлектрика можно получить узко- или широкополосный поглотитель [1, 3, 4].

В настоящей работе исследовано влияние подложки на поглощение оптического излучения на примере многослойной структуры $\text{Si}/\text{SiO}_2/(\text{Si}_3\text{N}_4)/\text{Si}^+$, которая может обеспечить высокий уровень поглощения оптического излучения в ИК-диапазоне [4]. Проведено теоретическое моделирование зависимости величины поглощения от толщины и уровня легирования подложки.

Расчет. Теоретическое моделирование спектров поглощения проводилось для структур $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}^+$ и $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}^+$ (рис. 1). Поверхностный слой в указанных структурах представляет собой массив квадратных кремниевых островков размером $b = 2 \text{ мкм}$, высотой $h = 850 \text{ нм}$, расположенных с периодом $P = 4 \text{ мкм}$. Поверхностный слой легирован до концентрации $N_n = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. У структуры $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}^+$ (рис. 1, а) диэлектрический слой состоит из Si_3N_4 и следующего за ним слоя SiO_2 толщиной 150 и 160 нм, у структуры $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}^+$ (рис. 1, б) — из SiO_2 толщиной 310 нм. Указанные структуры располагались на подложке из кремния. Толщина подложки 0.1—2.5 мкм, уровень легирования подложки изменяется в диапазоне $1 \cdot 10^{19}$ — $1 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$. При расчетах дисперсионных кривых использована структура со сплошным поверхностным слоем толщиной 850 нм, слоем диэлектрика (SiO_2) 310 нм, расположенная на n - Si подложке толщиной 1.5 мкм с уровнем легирования $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Моделирование поглощения оптического излучения в островковых структурах $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}^+$ и $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}^+$ проводилось методом конечных разностей во временной области (finite difference time domain, FDTD) [8] в программе FDTD Solution [9]. Для 3D-моделирования использовались граничные условия идеально согласованных слоев (PML), расположенных над и под структурой, а также периодические граничные условия во всех остальных случаях. Шаг сетки составлял 5 нм в области структуры и 75 нм в прилегающих к структуре областях. Такой выбор обусловлен требованием высокой точности расчетов, а также сокращением времени и объема памяти, необходимых для моделирования. Шаг развертки по времени рассчитан в соответствии с критерием Куранта—Фридрихса—Леви [8]. Моделирование проводилось в диапазоне длин волн 3—25 мкм.

Рис. 1. Схемы структур Si/SiO₂/Si₃N₄/Si⁺ (а) и Si/SiO₂/Si⁺ (б)

Величина поглощения рассчитывалась в соответствии с соотношением $A(\lambda) + R(\lambda) + T(\lambda) = 1$, где $A(\lambda)$, $R(\lambda)$, $T(\lambda)$ — доля поглощенного, отраженного и прошедшего излучений соответственно. Диэлектрические проницаемости нитрида кремния, диоксида кремния и нелегированного кремния взяты из [10, 11]. Диэлектрическая проницаемость легированного кремния рассчитана с помощью модели Друде, которая описывает поведение свободных электронов в металлах или легированных полупроводниках [12]. Плазменная частота (частота собственных колебаний газа свободных электронов) кремния с разным уровнем легирования также рассчитана с использованием модели Друде [12]. Плазменная частота зависит от концентрации свободных носителей заряда и их эффективной массы, т. е. изменением концентрации свободных носителей заряда можно варьировать значение плазменной частоты.

Дисперсионное соотношение для поверхностных плазмонов, распространяющихся вдоль границы раздела SiO₂/Si⁺, рассчитано с помощью формулы [12]:

$$\mathbf{k} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1(\omega)\epsilon_2(\omega)}{\epsilon_1(\omega) + \epsilon_2(\omega)}},$$

где \mathbf{k} — волновой вектор; c — скорость света в вакууме; $\epsilon_1(\omega)$ и $\epsilon_2(\omega)$ — диэлектрические проницаемости Si⁺ и SiO₂. Выражение справедливо как для поглащающих материалов (диэлектрическая проницаемость имеет комплексное значение), так и для непоглащающих [12]. Диэлектрическая проницаемость легированного кремния — комплексная величина, поэтому рассчитанные значения волнового вектора также комплексные. В настоящей работе рассматривается только действительная часть волнового вектора. Теоретически рассчитанные дисперсионные соотношения для структуры Si⁺/SiO₂/Si⁺ с неструктурным поверхностным слоем получены с помощью метода конечных разностей во временной области. Моделирование проводилось в 2D-режиме, перпендикулярно структуре использовались граничные условия Блоха, а над и под структурой — граничные условия PML. При моделировании дисперсионных кривых шаг сетки во всей области расчета 0.25 нм, диапазон моделирования 0—160 ТГц. Для получения дисперсионных соотношений проводились развертка параметров по поперечному волновому вектору и поиск частот с сильными резонансами [1].

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 приведены зависимости уровня поглощения структур *n*-Si⁺/SiO₂/Si⁺ и *i*-Si/SiO₂/Si⁺ от толщины подложки при различных уровнях легирования ($5 \cdot 10^{19}$ см⁻³ [4] и $1 \cdot 10^{14}$ см⁻³). Зависимости кардинально различаются. На рис. 2, а видно, что при увеличении толщины подложки полоса с уровнем поглощения >70 % уширяется. При толщине подложки 0.1—1.0 мкм ширина такой полосы в среднем ~12 мкм, а увеличение толщины до 1.0—2.5 мкм приводит к ее уширению до 14—15 мкм. Зависимости на рис. 2, б иные. В частности, максимальный уровень поглощения ~43 % во всем диапазоне толщин практически в два раза меньше, чем у структуры с высоколегированной подложкой. Полоса поглощения в диапазоне 16—20 мкм, характерная для структуры Si⁺/SiO₂/Si⁺, на рис. 2, б исчезает. В диапазоне 12—15 мкм поглощение уменьшается до 30 %, а для структуры Si⁺/SiO₂/Si⁺ в диапазоне 10—14 мкм характерно наибольшее поглощение. В диапазоне 6—8 мкм интенсивность поглощения 25—30 % не изменяется, тогда как на рис. 2, а в этом диапазоне наблюдается явная зависимость величины поглощения от толщины подложки. На рис. 2, б видны две полосы поглощения в выделенных областях I и II. В области I для всех толщин наблюдается максимум поглощения на $\lambda = 4$ мкм, возникающий скорее всего из-за периодичности поверхностного слоя структуры [4]. Такая же полоса поглощения имеется и на рис. 2, а. Влияние пе-

риода структуры на спектр поглощения подробно описано в [4], в настоящей работе период выбран таким, чтобы проявляющийся на длине волны, равной периоду, резонанс не накладывался на максимумы поглощения, обусловленные другими механизмами, что упрощает сравнительный анализ спектров поглощения. В области II интенсивная полоса поглощения не зависит от толщины подложки. В диапазоне 9.0—9.5 мкм поглощение достигает практически 45 %, что можно объяснить колебаниями мостиковых групп Si-O-Si [13].

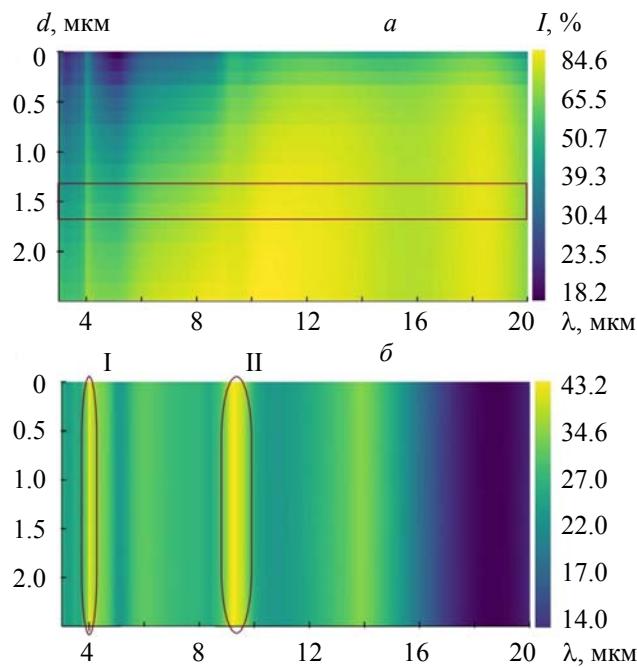


Рис. 2. Зависимость уровня поглощения структур $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/\text{Si}^+$ (а) и $i\text{-Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}^+$ (б) от толщины подложки d

В настоящей работе при моделировании оптических свойств выбрана толщина подложки 1.5 мкм, что обусловлено возможным использованием структур $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}^+$, $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}^+$ в качестве поглотителя в микроболометрах. Максимизация поглощения при минимизации размеров, а следовательно, и массы поглотителя — важное условие, которое стоит учитывать при разработке микроболометров [7]. Поэтому важно выбрать толщину подложки такой, чтобы получить высокий уровень поглощения при минимально возможном увеличении размеров структуры. Поскольку толщина нелегированной подложки не оказывает заметного влияния на уровень поглощения, основным критерием выбора толщины была максимизация поглощения структуры $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/\text{Si}^+$ (рис. 2, а). Отметим, что ширина полосы с уровнем поглощения $>70\%$ слабо изменяется при толщинах подложки 1.5—2.5 мкм и для дальнейших исследований толщина подложки выбрана минимальной из этого диапазона.

На рис. 3 приведены зависимости поглощения от уровня легирования подложки для структур $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/\text{Si}^+$ и $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}^+$. Сплошная линия на рис. 3, а — изменение плазменной длины волны при изменении уровня легирования. На длинах волн, близких к плазменной, наблюдается малое поглощение в легированной подложке [12], поэтому в этой области излучение поглощается в поверхностном структурированном слое. В диапазоне 5.0—5.5 мкм величина поглощения для всех исследуемых уровней легирования подложки уменьшается, поскольку при уровне легирования поверхностного слоя $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ его плазменная длина волны ~ 5 мкм. На длинах волн больше плазменной подложка — поглащающая, а значит, она оказывает влияние на величину поглощения всей структуры [12].

Из рис. 3, а видно, что при увеличении уровня легирования подложки ширина полосы поглощения с интенсивностью $>80\%$ увеличивается, затем уменьшается и полоса сдвигается в более коротковолновую область. Ширина такой полосы при уровне легирования подложки $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ составля-

ет 5 мкм (диапазон 14—19 мкм), при увеличении уровня легирования подложки до $(3—5) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ — 15 мкм (4—19 мкм), а при уровне легирования подложки $3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ширина полосы 4.5 мкм (4.0—8.5 мкм). При дальнейшем увеличении уровня легирования подложки ширина полосы поглощения с интенсивностью >80 % практически не изменяется. Вместе с тем необходимо отметить, что при уровнях легирования подложки $>5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ спектры поглощения структуры практически идентичны.

В диапазоне 15—20 мкм имеет место полоса поглощения, характерная для структур со всеми исследуемыми значениями уровня легирования подложки. На рис. 3, *a* (штриховая линия) показано смещение полос плазмонного поглощения [4] в более коротковолновую область при увеличении уровня легирования подложки. В этом диапазоне плазмонные колебания вероятнее всего возникают на внутренних границах раздела в структуре Si/SiO₂/Si подобно тому, как это происходит в структурах типа металл-диэлектрик-металл [1, 4]. Видно также, что при увеличении уровня легирования подложки интенсивность поглощения в диапазоне 15—20 мкм уменьшается (от 98 % при уровне легирования подложки $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ до 70 % при $1 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$). При этом ширина полосы поглощения практически не изменяется.

В диапазоне 10—15 мкм поглощение обусловлено, по-видимому, взаимодействием колебаний на границах раздела подложка/SiO₂ и SiO₂/островковый слой [1, 4]. Наблюдаются зависимости поглощения от уровня легирования подложки. Максимум поглощения (>90 %) достигается при уровне легирования подложки $\sim 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, при дальнейшем увеличении уровня легирования подложки в диапазоне 10—15 мкм происходит плавное уменьшение поглощения до 40 % при уровне легирования подложки $1 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Таким образом, увеличение легирования подложки приводит к ослаблению поглощения в диапазоне 10—15 мкм, при этом максимальное поглощение в этом диапазоне наблюдается при близких значениях легирования подложки и поверхностного слоя. Полосу поглощения на $\lambda = 9.5$ мкм, характерную практически для всех исследуемых структур, можно объяснить наличием в структуре слоя диоксида кремния. Согласно [13], в этом диапазоне находится полоса поглощения SiO₂, обусловленная колебаниями мостиковых групп Si-O-Si. Величина поглощения в диапазоне 4—7 мкм составляет >90 % для всех уровней легирования подложки, что можно объяснить возникновением распространяющихся поверхностных плазмонов, обусловленных периодичностью поверхностного слоя [1, 4].

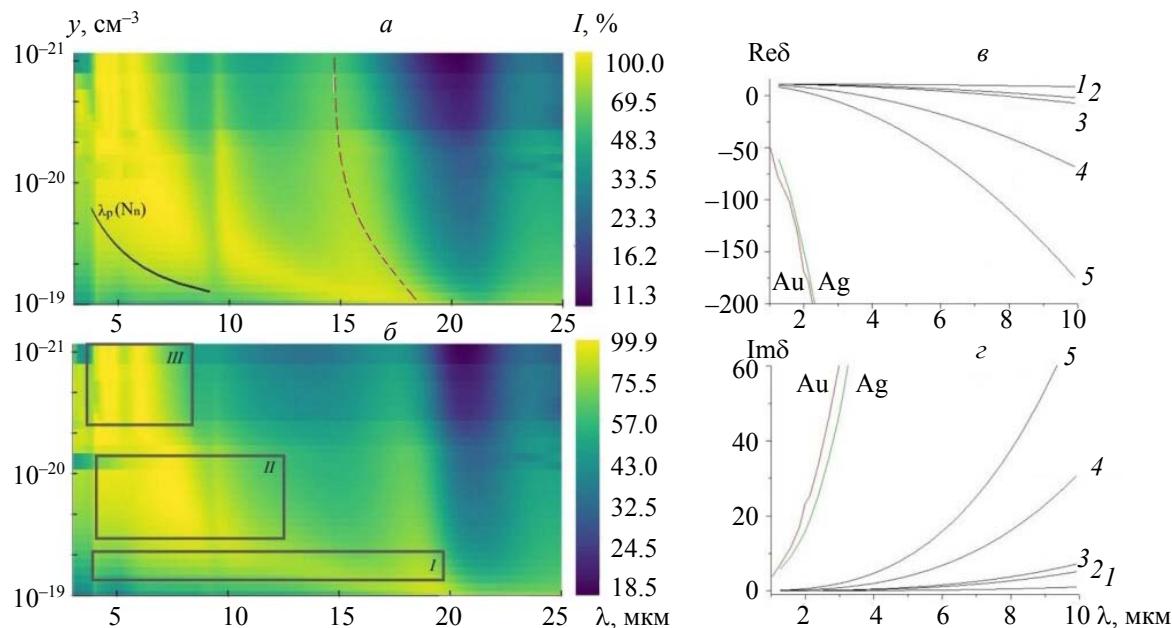


Рис. 3. Зависимость поглощения структур Si⁺/SiO₂/Si⁺ (*a*) и Si⁺/SiO₂/Si₃N₄/Si⁺ (*b*) от уровня легирования подложки (*y*); диэлектрические проницаемости для некоторых металлов и кремния с разным уровнем легирования (*c*): $1 \cdot 10^{-19}$ (1), $3 \cdot 10^{-19}$ (2), $7 \cdot 10^{-19}$ (3), $3 \cdot 10^{-20}$ (4) и $7 \cdot 10^{-20}$ (5)

На рис. 3, б приведена зависимость поглощения от уровня легирования подложки для структуры $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}^+$. Уменьшение толщины слоя SiO_2 и появление дополнительной границы раздела с Si_3N_4 вносят изменения в поведение полос поглощения. Так, для структуры $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}^+$ поглощение в диапазоне 15—20 мкм имеет меньшую интенсивность по сравнению со структурой $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/\text{Si}^+$, а сдвиг полосы поглощения в более коротковолновую область с увеличением уровня легирования подложки на рис. 3, б менее выражен, чем на рис. 3, а. Возможно, это связано с дополнительной границей раздела диэлектрик/диэлектрик, поскольку поглощение в этом диапазоне может быть связано с возникновением плазмонных колебаний на внутренних границах раздела Si/SiO_2 . При уровне легирования подложки $3 \cdot 10^{20}$ — $1 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ поглощение в диапазоне 15—20 мкм не поднимается выше 60 %, при уровне легирования $4 \cdot 10^{19}$ — $3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ поглощение 70—75 %, а при уменьшении уровня легирования подложки до $1 \cdot 10^{19}$ — $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ поглощение увеличивается до 80—90 %. В диапазоне 10—15 мкм, где проявляется взаимодействие мод плазмонных колебаний на границах разделов, поглощение на рис. 3, б также меньше, чем на рис. 3, а. При этом тенденция уменьшения поглощения в этом диапазоне при увеличении уровня легирования сохраняется для структуры $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}^+$, как и для $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/\text{Si}^+$. Полоса поглощения, характерная для диоксида кремния, также наблюдается на рис. 3, б.

В диапазоне 4—9 мкм зависимости поглощения от уровня легирования подложки структур $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/\text{Si}^+$ и $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}^+$ схожи. Полоса поглощения с интенсивностью >90 % в этом диапазоне для обеих структур имеет одинаковую ширину, которая уменьшается при увеличении уровня легирования подложки, а также сдвигается в более коротковолновую область. Такое поведение зависимостей свидетельствует о большом влиянии на величину поглощения в этом диапазоне горизонтальной геометрии островкового поверхностного слоя. Таким образом, величина поглощения в диапазоне 4—6 мкм не зависит от состава диэлектрика, но зависит от уровня легирования подложки. Можно выделить три области, в которых спектры поглощения структур с разными уровнями легирования подложки схожи (рис. 3, б). В области 1 уровень легирования подложки изменяется от $2 \cdot 10^{19}$ до $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, а поглощение в диапазоне 4—20 мкм не опускается ниже 70 %, но и не поднимается выше 85 %. Структура поглощает значительную часть излучения в широкой области. Область 2 содержит спектры поглощения структур с уровнем легирования подложки $4 \cdot 10^{19}$ — $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Величина поглощения в этой области также не опускается ниже 70 %, но в более узком диапазоне 4—16 мкм, а в диапазоне от 5—8 мкм поглощение >85 %. В области 3 уровень легирования подложки находится в диапазоне $4 \cdot 10^{20}$ — $1 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$, а ширина полосы с поглощением >70 % сужается еще больше и составляет ~4 мкм (от 4 до 8 мкм). При этом практически во всем диапазоне поглощение >90 %. Таким образом, с увеличением уровня легирования подложки ширина полосы поглощения с интенсивностью >70 % сужается, поэтому при проектировании широкополосного ИК-поглотителя лучше выбирать уровень легирования в диапазоне $2 \cdot 10^{19}$ — $4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ либо близкие к ним. При увеличении уровня легирования подложки > $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ теряется широкая полоса поглощения, а при уменьшении уровня легирования подложки ниже $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ снижается поглощение во всем диапазоне.

Диэлектрические проницаемости для кремния с разным уровнем легирования (рассчитанные с помощью модели Друде) [12], золота и серебра приведены на рис. 3, в [10]. Видно, что при увеличении легирования кремния резко уменьшается действительная и увеличивается мнимая части диэлектрической проницаемости и высоколегированный кремний начинает проявлять металлоподобные свойства. У благородных металлов в диапазоне 1—10 мкм значения действительной части диэлектрической проницаемости значительно ниже, а потери (мнимой части диэлектрической проницаемости), наоборот, выше. Поскольку увеличение легирования подложки уменьшает ширину полосы поглощения с высокой интенсивностью, использование благородных металлов в поглотителях в ИК-области нецелесообразно по сравнению с высоколегированным кремнием.

На рис. 4 представлены полученные с помощью FDTD-моделирования и аналитические дисперсионные соотношения колебаний в структуре $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/\text{Si}^+$. Колебательные полосы диоксида кремния 14 и 30 ТГц возникают из-за колебаний связей Si-O-Si и O-Si-O [13]. Поскольку показатель преломления диоксида кремния в ИК-диапазоне не является константой [10], линия распространения света в SiO_2 представляет не прямую, как для воздуха, а кривую. При расчетах в соответствии с [10] и значениями, полученными с помощью модели Друде, диэлектрическая проницаемость считается комплексным числом, поэтому дисперсионные кривые могут пересекать линию распространения света

в воздухе [12]. Между двумя колебательными полосами диоксида кремния имеет место колебательная полоса так называемых щелевых плазмонных колебаний [1], выше — колебательная полоса объемных плазмонов. В легированном кремнии объемные плазмоны возникают на частоте, равной плазменной [1].

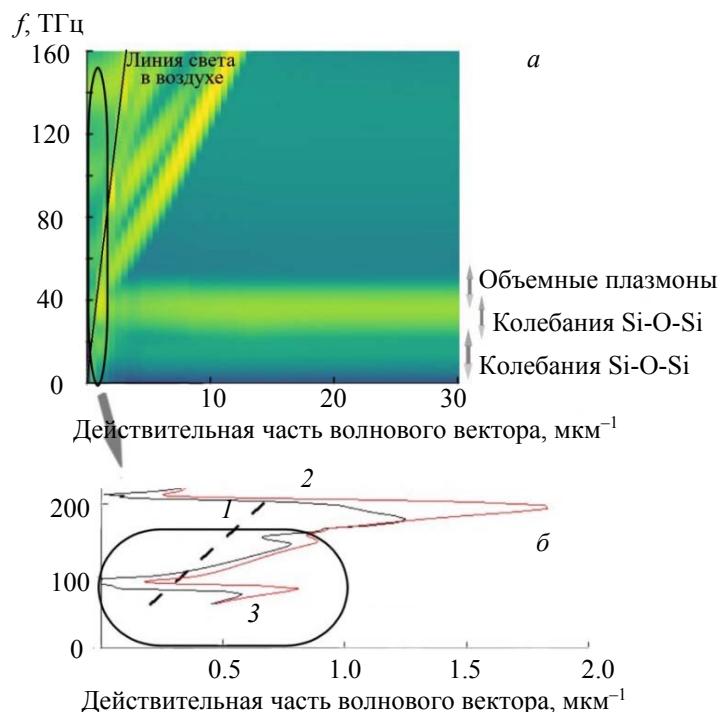


Рис. 4. Полученные с помощью FDTD-моделирования (а) и аналитические (б) дисперсионные кривые распространения света в воздухе (1) и в диоксиде кремния (2), дисперсионные кривые поверхностных плазмонов, распространяющихся вдоль границы раздела Si^+/SiO_2 (3)

Поскольку поверхностные плазмоны имеют характер связанных колебаний, им отвечают участки дисперсионных кривых, расположенные справа от дисперсионной кривой света, распространяющиеся в воздухе (линии света) [12]. На рис. 4, а справа от линии света видны линии, характерные для распространяющихся поверхностных плазмонов на границе Si^+/SiO_2 . Аналитическое дисперсионное соотношение металлоподобное вещество/диэлектрик/металлоподобное вещество (МДМ) приводится в [12], оно представляет собой неявную функцию и может быть решено численно [1]. Однако нахождение дисперсионных соотношений для структуры МДМ может быть затруднено, если металлоподобные слои имеют различные диэлектрические проницаемости. Вместе с тем связь между поверхностными плазмонами на двух границах раздела структуры МДМ резко меняется при различных диэлектрических проницаемостях металлоподобных слоев [12], что приводит к нарушению фазового синхронизма мод на двух границах раздела. Возможно, это также влияет на уменьшение поглощения при увеличении уровня легирования подложки (рис. 3, а и б). Уровень легирования поверхностного слоя для исследуемых структур $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. На рис. 3, в видны различия диэлектрических проницаемостей для кремния, легированного до $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и легированного до $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Поэтому величина поглощения структур со значительным отличием в уровне легирования подложки и поверхностного слоя меньше.

Заключение. С помощью метода конечных разностей во временной области получены зависимости поглощения света структурами $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}^+$ и $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}^+$ от толщины и уровня легирования подложки. Установлено, что с увеличением толщины *n*-Si-подложки, легированной до $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, уширяется полоса поглощения с интенсивностью $>70\%$. При толщине подложки $\geq 1 \text{ мкм}$ уширение полосы поглощения замедляется. Показано, что использование *i*-Si-подложки резко уменьшает величину поглощения до 44 %, причем независимо от толщины подложки. Полосы поглощения на $\lambda = 4$ и

9.0—9.5 мкм возникают независимо от толщины подложки и уровня ее легирования и обусловлены поглощением в поверхностном структурированном слое и слое диэлектрика.

Теоретическое моделирование зависимости поглощения островковой структуры $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/\text{Si}^+$ от уровня легирования подложки показывает, что для сохранения широкой полосы поглощения с интенсивностью >80 % уровень легирования подложки должен находиться в диапазоне $2 \cdot 10^{19}$ — $5 \cdot 10^{19}$ см⁻³. При увеличении легирования подложки полосы плазмонного поглощения в диапазоне 15—20 мкм сдвигаются в более коротковолновую область, а их интенсивность снижается. Увеличение уровня легирования подложки приводит к ослаблению поглощения в диапазоне 10—15 мкм, а максимальное поглощение наблюдается при одинаковом уровне легирования поверхностного слоя и подложки. Показано, что добавление дополнительной границы раздела $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ в структуре $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}^+$ приводит к уменьшению поглощения в диапазоне 15—20 мкм по сравнению с $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/\text{Si}^+$ независимо от уровня легирования подложки. В диапазонах 3—15 и 20—25 мкм зависимости поглощения от уровня легирования подложки для структур $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}^+$ и $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/\text{Si}^+$ схожи. Установлено, что поглощение в диапазоне 4—6 мкм не зависит от состава диэлектрического слоя, но зависит от уровня легирования подложки.

Получены дисперсионные соотношения колебаний в структуре $\text{Si}^+/\text{SiO}_2/\text{Si}^+$ с неструктурированным поверхностным слоем и уровнем легирования подложки $5 \cdot 10^{19}$ см⁻³. Показано, что анализ дисперсионных соотношений позволяет обнаружить в системе плазмонные колебания. Установлено, что нарушение фазового синхронизма мод на двух границах раздела при увеличении разницы между уровнями легирования подложки и поверхностного слоя может влиять на уменьшение поглощения.

Работа проведена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Т18Р-190) и Министерства образования РБ (грант № 20211829).

- [1] K. Gorgulu, A. Gok, M. Yilmaz, K. Topalli, N. Biyikli, A. K. Okyay. *Sci. Rep.*, **6** (2016) 38589
- [2] T. Taliercio, P. Biagioni. *Nanophotonics*, **8**, N 6 (2019) 949—990
- [3] M. Desouky, A. M. Mahmoud, M. A. Swillam. *Sci. Rep.*, **8** (2018) 2036
- [4] A. I. Mukhammad, K. V. Chizh, V. G. Plotnichenko, V. A. Yuryev, P. I. Gaiduk. *Semiconductors*, **54**, N 14 (2020) 1889—1892
- [5] G. V. Naik, V. M. Shalaev, A. Boltasseva. *Adv. Mat.*, **25**, N 24 (2013) 3264—3294
- [6] J. Poumirol, C. Majorel, N. Chery, C. Girard, P. R. Wiecha, N. Mallet, R. Monflier, G. Larrieu, F. Cristiano, A. Royet, P. A. Alba, S. Kerdiles, V. Paillard, C. Bonafos. *ACS Photonics*, **8**, N 5 (2021) 1393—1399
- [7] A. Das, J. J. Talghader. *J. Opt. Soc. Am. B*, **38**, N 1 (2021) 183—192
- [8] B. Gallinet, J. Butet, O. J. F. Martin. *Laser Photon. Rev.*, **9**, N 6 (2015) 577—603
- [9] Nanophotonic FDTD Simulation Software [Electronic resource], Lumerical FDTD – Mode of access, <https://www.lumerical.com/products/fdtd>, Date of access: 01.2020
- [10] E. D. Palik. *Handbook of Optical Constants of Solids*, 2, Academic Press (1985)
- [11] K. Luke, Y. Okawachi, M. R. E. Lamont, A. L. Gaeta, M. Lipson. *Opt. Lett.*, **40**, N 21 (2015) 4823—4826
- [12] С. А. Майер. Плазмоника: теория и приложения, Ижевск, НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика” (2011)
- [13] R. Kitamura, L. Pilon, M. Jonasz. *Appl. Opt.*, **46**, N 33 (2007) 8118—8133