ПЛАЗМОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ИК ИЗЛУЧЕНИЯ В СТРУКТУРАХ С ОСТРОВКОВЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ СЛОЕМ

А.И. Мухаммад, П.И. Гайдук
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, rct.muhammadAI1@bsu.by, gaiduk@bsu.by

Плазмонные поглотители инфракрасного излучения с островковым поверхностным слоем могут обеспечить практически идеальное поглощение в необходимом спектральном диапазоне. В работе приведен обзор плазмонных поглотителей с простыми геометриями островковых поверхностных слоев, которые позволяют улучшить характеристики и упростить изготовление ИК фотоприемников. Рассмотрен процесс возникновения плазмонных колебаний в структурах металл-диэлектрик-металл (МДМ). Проведен анализ теоретического спектра поглощения структуры $Ti/SiO_2/Si_3N_4/Si$ с островковым поверхностным слоем. Показано, что пик поглощения на длине волны 6 мкм с интенсивностью более 99% связан, вероятнее всего, с плазмонным поглощением. При этом уровень поглощения этой структуры в диапазоне 2-10 мкм не опускается ниже 40%.

Ключевые слова: метаматериалы; многослойные поглотители; ИК-излучение; спектры поглощение; плазмонный резонанс

PLASMON ABSORPTION OF IR RADIATION IN STRUCTURES WITH AN ISLAND SURFACE LAYER

A. Mukhammad, P. Gaiduk
Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., Minsk 220030, Belarus
rct.muhammadAI1@bsu.by, gaiduk@bsu.by

Plasmonic absorbers of infrared radiation with an island surface layer can provide almost perfect absorption in the required spectral range. The paper presents a review of plasmonic absorbers with simple geometries of island surface layers, which improve the characteristics and simplify the manufacture of IR photodetectors. The process of occurrence of plasmon oscillations in metal-dielectric-metal (MIM) structures is considered. The theoretical absorption spectrum of the $Ti/SiO_2/Si_3N_4/Si$ structure with an island surface layer is analyzed. It is shown that the absorption peak at a wavelength of 6 μm with an intensity of more than 99% is most likely associated with plasmon absorption. In this case, the absorption level of this structure in the range of 2-10 μm does not fall below 40%.

Keywords: metamaterials; multilayer absorbers; IR radiation; absorption spectra; plasmon resonance.

Введение

Многослойные поглотители инфракрасного излучения со структурированным поверхностным слоем вызывают большой интерес из-за резонансных характеристик, сверхтонкой толщины, небольшого веса, а также высокой поглощающей способности [1]. Эффективные поглотители среднего инфракрасного диапазона играют важную роль в военной разведке, мониторинге окружающей среды, контроле пожарной безопасности, ночном видении, медицине. Поэтому разработка идеальных поглотителей инфракрасного диапазона с небольшой толщиной и простой геометрией поверхностного слоя является важной и актуальной областью исследований [2].

В настоящей работе после краткого обзора существующих конструкций ИК поглотителей приведены результаты исследований поглощающей способности структуры $Ti/SiO_2/Si_3N_4/Si$ с островковым поверхностным слоем.

На рисунке 1 приведены примеры поглотителей ИК-излучения с островковым поверхностным слоем [1-5]. Разными авторскими группами были предложены и исследованы многослойные структуры со структурированным поверхностным слоем с целью создания близкого к идеальному поглотителя ИК-излучения. Большая часть структур состоит из трех слоев: металл-диэлектрик-металл (МДМ).

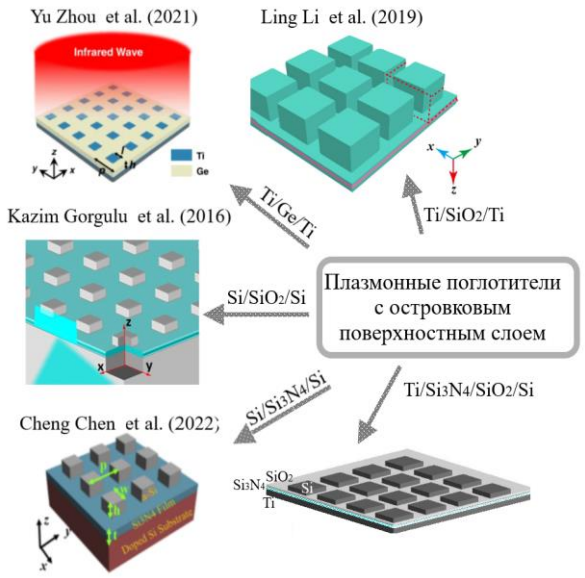

Рис. 1. Примеры островковых структур, предложенные в работах [1–5], которые могут использоваться в качестве плазмонных поглотителей в ИК-диапазоне

На длинах волн ближнего инфракрасного диапазона почти полное поглощение излучения может быть достигнуто путем взаимодействия поверхностных плазмонов с периодически расположенными островками поверхностного слоя [2]. Такое поглощение может наблюдаться даже на частотах, далеких от частот плазмонных резонансов. В этом случае энергия концентрируется главным образом в боковых зазорах между металлическими островками. Некоторые авторы [1-2, 5] рассматривают верхний островковый слой как решетку, с помощью которой волновой вектор дифракции согласовывается с волновым вектором поверхностных плазмонов. Поверхностные плазмоны представляют собой затухающие волны, распространяющиеся вдоль границы раздела между нижним металлическим и средним диэлектрическим слоем.

Первоначально в качестве металлических слоев в МДМ-структурах использовались благородные металлы (Au, Ag). Однако было обнаружено, что некоторые тугоплавкие металлы (Mo, W, Ti) могут возбуждать широкополосные плазмонные резонансы из-за большого значение мнимой части их показателя преломления [2]. Также в качестве металлоподобных слоев могут быть использованы некоторые соединения металлов, включая олово, или сильнолегированные полупроводники. При использовании сильнолегированных полупроводников в составе МДМ структур плазмонное поглощение может наблюдаться в среднем и даже дальнем ИК-диапазоне [3-4].

Толщина диэлектрического слоя в МДМ структуре должна быть меньше длины волны излучения, чтобы обеспечить возможность взаимодействия поверхностных плазмонов [2]. При этом слишком малая толщина диэлектрического слоя может привести к увеличению интенсивности отражения. Нижний металлический слой действует как зеркало, которое отражает поверхностный плазмон, возбужденный на нижней границе раздела металл-диэлектрик. Если толщина нижнего металлического слоя превышает глубину проникновения падающей волны нужного диапазона, количество пропущенного излучения падает практически до нуля [1].

Результаты и их обсуждение

С учетом проведенного обзора существующих конструкций плазмонных поглотителей с островковым поверхностным слоем в настоящей работе предложен вариант поглотителя ИК излучения, состоящего из слоев $Ti/SiO_2/Si_3N_4/Si$.

Методом конечных разностей во временной области был получен спектр поглощения структуры $Ti/SiO_2/Si_3N_4/n^+$-Si. Поверхностный слой структуры представлял собой массив квадратных кремниевых ($n = 5\cdot10^{19}$ см$^{-3}$) островков размером 3 мкм, высотой 800 нм, расположенных с периодом 6 мкм (рис. 2). Толщина слоя Ti составляла 200 нм. Между слоем титана и островковым слоем располагался диэлектрический слой, состоящий из слоев Si_3N_4 и SiO_2 с толщинами 150 нм и 160 нм соответственно.

На рисунке 2 приведен теоретически рассчитанный спектр поглощения структуры $Ti/SiO_2/Si_3N_4/n^+$-Si. В диапазоне 2-

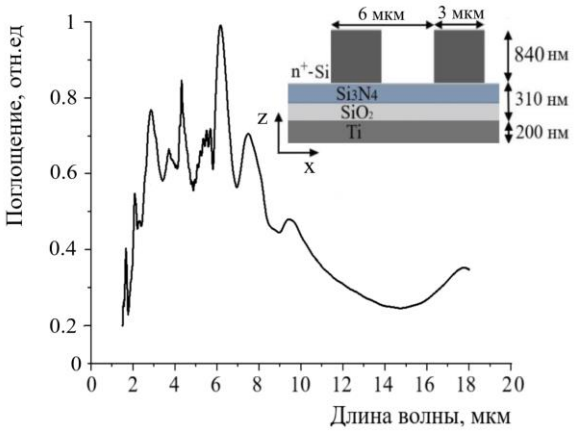

Рис. 2. Спектр поглощения структуры $Ti/SiO_2/Si_3N_4/Si$, представленной на выносном рисунке

10 мкм в спектре поглощения наблюдаются 6 пиков разной интенсивности, при этом интенсивность поглощения не падает менее 40%. На длине волны около 6 мкм наблюдается пик с интенсивностью более 99%, который вероятнее всего связан с возбуждением плазмонных колебаний. Пик поглощения на длине волны 4.3 мкм с интенсивностью 75% вероятнее всего связан с колебаниями в слое диоксида кремния, как и пик на длине волны 9.5 мкм [3].

Заключение

Таким образом в работе был проведен краткий обзор существующих конструкций плазмонных поглотителей ИК излучения с островковым поверхностным слоем. Установлено, что наибольшим образом на характеристики поглощения влияют две моды: резонансы распространяющихся поверхностных плазмонов и резонансы локализованных поверхностных плазмонов. Также методами теоретического моделирования были получены спектры поглощения структуры $Ti/SiO_2/Si_3N_4/Si$ с островковым поверхностным слоем. Установлено, что в диапазоне 2-10 мкм наблюдается 6 узких пиков поглощения разной интенсивности и разной природы. Пик поглощения с наибольшей интенсивностью вероятнее всего связан с эффектами плазмонного поглощения.

Благодарности

Исследования проводились при финансовой поддержке БРФФИ в рамках проекта № Т22-030.

Библиографические ссылки

1. Zhou, Y., Qin, Z., Liang, Z., Meng D., Haiyang Xu, Smith D.R. et al. Ultra-broadband metamaterial absorbers from long to very long infrared regime. *Light Sci Appl* 2021; 10: 138.
2. Kim W., Simpkins B.S., Long J.P., Zhang B., Hendrickson J., Guo J. Localized and nonlocalized plasmon resonance enhanced light absorption in metal-insulator-metal nanostructures. *J. Opt. Soc. Am. B* 2015; 32(8): 1686-1692.
3. 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.
4. Cheng C., Liu Y., Jiang Z., Shen C., Zhang Y., Zhong F. et al. Large-area long-wave infrared broadband all-dielectric metasurface absorber based on maskless laser direct writing lithography. *Opt. Express* 2022; 30(8): 13391-13403.
5. Li L, Hongjie Chen H., Xie Z., Chen W., Zhang W., Liu W. Ultra-broadband metamaterial absorber for infrared transparency window of the atmosphere *Physics Letters A* 2019; 383(6): 126025.