

Резонансные характеристики мод поверхностных плазмон-поляритонов для Ag, Au, Cu, и Al в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах

Д.В. Нестеренко^{1,2}, Р.А. Павелкин², Ш. Хаяши^{3,4}, В.А. Сойфер^{1,2}

¹Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

²Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

³Optics and Photonics Center, Moroccan Foundation for Science, Innovation and Research (MAScIR), Rabat 10100, Morocco

⁴Graduate School of Engineering, Kobe University, Kobe 657-8501, Japan

Аннотация. Возбуждение мод поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) приводит к появлению резонансов в спектрах нарушенного полного внутреннего отражения слоистых структур. Чувствительность резонансных характеристик распространяющихся мод к изменениям оптических характеристик окружающей среды широко используется в сенсорных устройствах для определения качественных и количественных изменений в окружающей среде, а также адсорбции веществ на поверхности. В настоящей работе проводится анализ резонансных характеристик мод ППП на основе известных оптических свойств ряда материалов. Изученная конфигурация представляет собой структуру типа воздух-металл, вдоль границы раздела сред которой поддерживается распространение моды ППП. Проводятся оценки дисперсии мод ППП, максимального усиления ближнего поля на поверхности в рамках электромагнитной теории на основе аппроксимаций асимметричных форм спектральных резонансных линий формулами Фано в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах света.

1. Введение

В последнее десятилетие большое число работ в области нанофотоники направлено на изучение распространения собственных мод в оптических структурах. Связанные с возбуждением мод резонансные эффекты, такие как усиление поля и узкие резонансные линии в спектрах, представляют большой интерес как для фундаментальных, так и для прикладных исследований. Так, резонансные эффекты наблюдаются в спектрах планарных слоистых металло-диэлектрических структур, поддерживающих распространяющиеся вдоль границ раздела металл-диэлектрик моды поверхностных плазмон-поляритонов [1]. Моды металло-диэлектрических структур в видимом диапазоне характеризуются большими энергетическими потерями, связанными с поглощением в металле. Благодаря их низкой добротности, широкие резонансы были обнаружены в прошлом веке в спектрах нарушенного полного внутреннего

отражения (НПВО) слоистых планарных плазмонных структур в конфигурациях Отто и Кречмана. С ростом потребностей в высокоточных измерениях и в большем усилении электромагнитного поля, основное внимание в исследованиях стало уделяться структурам с высокодобротными резонансами мод с низким поглощением. Исследования по усилению ближнего поля и резонансных явлений, возникающих на границе металл-диэлектрик, важны для различных применений, например, для создания наноразмерных локальных источников света или создания управляемых одиночных плазмонов в интегральных оптических схемах, усиления и затухания флуоресценции одиночных молекул, расположенных вблизи металлической поверхности. Существенный интерес вызывает использование резонансных эффектов плазмонных структур в сенсорике для инфракрасного (ИК) диапазона для возбуждения колебательных мод молекул органических соединений [2].

Расчет и анализ пространственных спектров трехслойных структур в конфигурации Кречмана на основе электромагнитной (ЭМ) теории был проведен для получения зависимости резонансных характеристик мод ППП в ультрафиолетовом (УФ), видимом и ближнем ИК диапазонах [3; 4]. Было показано, что ширина резонансов в спектрах является одним из определяющих факторов разрешающей способности сенсорных структур. Величина усиления ближнего поля моды ППП определяет глубину проникновения затухающей волны в анализируемый раствор, что влияет на чувствительность сенсоров к осаждению тонких плёнок. Однако, этот подход к расчету чувствительности требует последующей затратной численной обработки спектров. В работе [5] на основе ЭМ теории и теории связанных мод было показано, что ассиметричные резонансы ППП в двухслойных и трехслойных структурах плазмоники аппроксимируются формой линии Фано, что позволяет оценить характеристики резонансов через параметры аппроксимации. В данном исследовании проводится анализ резонансных характеристик мод ППП двухслойной структуры воздух-металл на основе резонансных аппроксимаций Фано.

2. Моды ППП в двухслойной структуре

В рамках электромагнитной теории было продемонстрировано, что система из двух полупространств, диэлектрические проницаемости материалов которых удовлетворяют условиям: $\varepsilon_1 \varepsilon_2 < 0$, $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 < 0$, $|\varepsilon_2'| > |\varepsilon_1'|$ поддерживает распространяющиеся моды ППП [1].

Рассматриваемая двухслойная структура диэлектрик-металл изображена на рисунке 1.

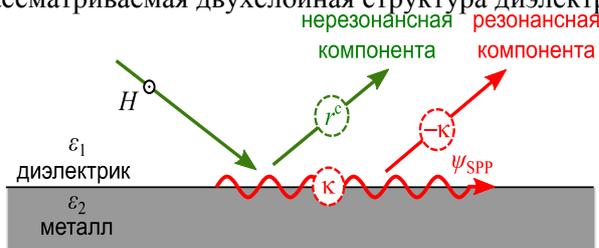


Рисунок 1. Возбуждение мод ППП в двухслойной структуре диэлектрик-металл.

Для комплексных диэлектрических проницаемостей диэлектрика ε_1 и металла ε_2 выражение для комплексной константы распространения $\gamma_{spp} = \gamma'_{spp} + i\gamma''_{spp}$ моды ППП записывается в следующем виде:

$$\gamma_{spp} = \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}} \quad (1)$$

Здесь γ'_{spp} соответствует фазовой скорости моды ППП, γ''_{spp} - коэффициент затухания моды ППП. Дисперсионные соотношения $\gamma_{spp}(\lambda)$ могут быть рассчитаны для экспериментально полученных значений $\varepsilon_1(\lambda)$ и $\varepsilon_2(\lambda)$.

При условиях возбуждения моды ППП часть энергии внешней волны переходит в моду, что приводит к резонансу в спектре усиления ближнего поля. В случае двухслойной металло-диэлектрической структуры вид кривой спектра усиления ближнего поля может быть аппроксимирован формулой Фано для асимметричных резонансов [5]:

$$|\tilde{r}_{ij}|^2 = |r_{ij}^c|^2 \frac{(\alpha - \gamma'_{zero})^2 + \gamma_{zero}''^2}{(\alpha - \gamma'_{pole})^2 + \gamma_{pole}''^2} \tag{2}$$

Это выражение для усиления ближнего поля на границе диэлектрик-металл, где α – константа распространения волн вдоль границы раздела сред, $\gamma_{pole} = \gamma_{spp}$ и $\gamma_{zero} = \gamma_{spp} + 2\gamma_{spp}^3 / [r_{ij}^c(\epsilon_j - \epsilon_i)]$ – полюс и ноль функции (2), соответственно, $r_{ij}^c = (\epsilon_j - \epsilon_i) / (\epsilon_i + \epsilon_j) + (\epsilon_i + \epsilon_j)\gamma_{spp}^2 / [(\epsilon_j - \epsilon_i)\alpha^2]$ – компонента нерезонансного усиления поля. При $\alpha = \gamma'_{spp}$ максимальное усиление ближнего поля может быть оценено как $|r_{ij}^c|^2 = |r_{ij}^c|^2 [(\gamma'_{spp} - \gamma'_{zero})^2 + \gamma_{zero}''^2] / \gamma_{pole}''^2$. Ширина резонанса в угловом спектре определяется как $\Gamma = 2\gamma'_{spp}\gamma_{spp}''$ [5].

3. Результаты численного моделирования и их обсуждение

В данной работе использовались значения показателя преломления серебра (Ag) [6; 7], золота (Au) [7; 8], меди (Cu) [7; 8] и алюминия (Al) [7; 9]. Диэлектрическая постоянная воздуха $\epsilon_1(\lambda)$ принималась постоянной и равной 1 на всём диапазоне длин волн.

Расчитанные по формуле (2) дисперсионные соотношения $\gamma'_{spp}(\lambda)$ приведены на рис. 2. Возбуждение моды ППП падающим светом происходит в тех областях спектра длин волн, в которых выполняются условия возбуждения (см. выше). В этом случае, γ'_{spp} принимает значения больше 1. Возбуждение мод ППП на границах воздух-серебро, воздух-алюминий, воздух-медь, воздух-золото возможно соответственно для длин волн выше 400 нм для границ раздела сред воздух-серебро, выше 300 нм для границ раздела сред воздух-золото и воздух-медь, и выше 150 нм для границ раздела сред воздух-алюминий.

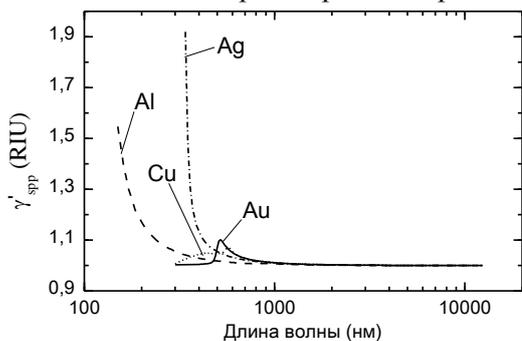


Рисунок 2. Дисперсионные зависимости мод ППП.

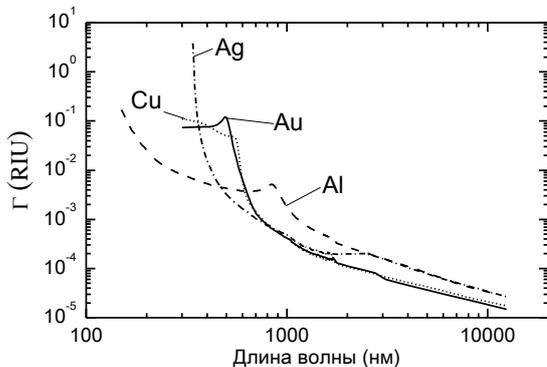


Рисунок 3. Зависимости ширины плазмонного резонанса от длины волны.

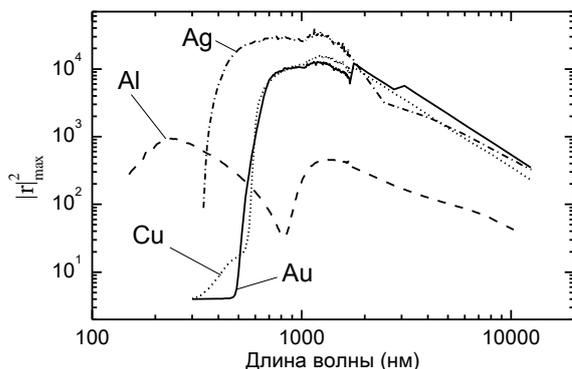


Рисунок 4. Максимальное усиление ближнего поля на границе раздела воздух-металл.

На рисунке 3 представлены зависимости значений ширины ППП резонанса от длины возбуждающей волны. Граница воздух-алюминий характеризуется узким резонансом для длин волн менее 350 нм. Двухслойные системы на основе золота и меди характеризуются близкой шириной резонансов.

Максимальное усиление ближнего поля (рис. 4) для границы воздух-серебро достигает величины $2,9 \cdot 10^4$ в диапазоне длин волн от 400 до 2000 нм. Для границ воздух-золото и воздух-медь усиление ближнего поля достигает порядка 10^4 в диапазоне длин волн от 600 до 2000 нм. Величина усиления ближнего поля для границы воздух-алюминий не превышает 1000 на представленном диапазоне длин волн. Максимальное значение усиления достигается в УФ диапазоне на длине волны около 300 нм. Таким образом, моды ППП для границ раздела воздух-золото, воздух-серебро, воздух-медь, воздух-алюминий могут возбуждаться как излучением оптического диапазона, так и излучением ИК диапазона. При этом, ширина ППП резонанса уменьшается с длиной волны для всех рассматриваемых металлов. Усиление поля достигает своих максимальных значений для серебра, меди и золота при длине волны около 1000 нм, для алюминия - при значениях длин волн 250 и 1050 нм.

4. Заключение

В работе были получены резонансные характеристики мод ППП, поддерживаемых двухслойной структурой воздух-металл для Ag, Cu, Au и Al, на основе аппроксимаций асимметричных резонансов Фано. Рассчитанные зависимости значений усиления ближнего поля на границе воздух-металл и ширины резонансов позволяют предположить эффективность использования металло-диэлектрических структур в ближнем и среднем ИК диапазоне в сенсорике и усиленных спектроскопиях. Методы анализа двухслойных структур, использованные в данной работе, предполагается применить для исследований резонансных характеристик мод ППП многослойных сенсорных структур.

5. Литература

- [1] Agranovich, V.M. Surface polaritons: electromagnetic waves at surfaces and interfaces / V.M. Agranovich, D.L. Mills. – Amsterdam: North-Holland, 1982.
- [2] Adato, R. In-situ ultra-sensitive infrared absorption spectroscopy of biomolecule interactions in real time with plasmonic nanoantennas / R. Adato, H. Altug // Nature Communications. – 2013. – Vol. 4. – P. 2154.
- [3] Nesterenko, D.V. Estimation of the Au, Ag, Cu, and Al Single- and Double-Layer Surface Plasmon Sensors in the Ultraviolet, Visible, and Infrared Regions / D.V. Nesterenko, Z. Sekkat // Plasmonics. – 2013. – Vol. 8(4). – P. 1585-1595.
- [4] Nesterenko, D.V. Surface plasmon sensing with different metals in single and double layer configurations / D.V. Nesterenko, Saif-ur-Rehman, Z. Sekkat // Applied Optics. – 2012. – Vol. 51(27). – P. 6673-6682.
- [5] Nesterenko, D.V. Asymmetric surface plasmon resonances revisited as Fano resonances / D.V. Nesterenko, S. Hayashi, Z. Sekkat // Physical Review B. – 2018. – Vol. 97. – P. 235437.

- [6] Hagemann, H.J. Optical Constants from Far Infrared to X-Ray Region – Mg, Al, Cu, Ag, Au, Bi, C, and Al₂O₃ / H.J. Hagemann, W. Gudat, C. Kunz // *Journal of the Optical Society of America*. – 1975. – Vol. 65(6). – P. 742-744.
- [7] McPeak, K.M. Plasmonic Films Can Easily Be Better: Rules and Recipes / K.M. McPeak [et al.] // *ACS Photonics*. – 2015. – Vol. 2(3). – P. 326-333.
- [8] Babar, S. Optical constants of Cu, Ag, and Au revisited / S. Babar, J.H. Weaver // *Applied Optics*. – 2015. – Vol. 54(3). – P. 477-481.
- [9] Rakic, A.D. Algorithm for the Determination of Intrinsic Optical Constants of Metal Films – Application to Aluminum / A.D. Rakic // *Applied Optics*. – 1995. – Vol. 34(22). – P. 4755-4767.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-29-20006).

Analysis of the resonance characteristics of surface plasmon-polariton modes for Ag, Au, Cu, and Al in the ultraviolet, visible and infrared regions

D.V. Nesterenko^{1,2}, R.A. Pavelkin², S. Hayashi^{3,4}, V.A. Soifer^{1,2}

¹Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

²Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

³Optics and Photonics Center, Moroccan Foundation for Science, Innovation and Research (MAScIR), Rabat 10100, Morocco

⁴Graduate School of Engineering, Kobe University, Kobe 657-8501, Japan

Abstract. Excitation of surface plasmon-polariton (SPP) modes results in the appearance of resonance line shapes observed in the attenuated total reflection spectra of layered structures in the Otto or Kretschman configurations. The sensitivity of the resonance characteristics of the propagating modes to changes in optical characteristics of the environment is widely used in sensor devices to determine qualitative and quantitative changes in the environment, as well as low concentrations of substances adsorbed on the surface. In the present work, we analyze the resonance characteristics of SPP modes based on the optical properties of plasmonic materials. Interfaces of metal-dielectric structures support the propagation of SPP modes. Estimation of the dispersion dependences of the propagation constant of the SPP mode, sensitivity to changes in external conditions, enhancement of the near field on the surface is carried out within the electromagnetic theory based on approximations of asymmetric shapes of spectral resonance lines of SPP by Fano formulas in the ultraviolet, visible and infrared regions.