

Асимметричные резонансы и усиление поля гибридных плазмон-волноводных мод в CdTe структурах

Р.А. Павелкин¹, Д.В. Нестеренко^{1,2}, Ш. Хаяши^{3,4}, В.А. Сойфер^{1,2}

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

²Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

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

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

Аннотация. Планарные металло-диэлектрические структуры на основе волновода из CdTe, отделенного от металлического слоя слоем диоксида кремния, поддерживают возбуждение распространяющихся гибридных плазмон-волноводных мод. Связанность мод проявляется в появлении асимметричных резонансных форм в спектральных линиях. В данной работе проводится анализ усиления поля гибридных мод МДД структуры в инфракрасной области в рамках точной электромагнитной теории для форм линии спектрального отклика вида плазмонно-индуцированного пропускания и Фано резонанса. Исследование резонансных характеристик в областях локализации гибридных мод структуры продемонстрировало эффекты перераспределения поля между взаимодействующими гибридными модами в широком диапазоне их констант распространения. Полученные результаты могут быть полезны при разработке устройств сенсорики и усиленной инфракрасной спектроскопии.

1. Введение

Планарные структуры металл-диэлектрик-диэлектрик (МДД) поддерживают возбуждение мод поверхностных плазмон-поляритонов (ППП), распространяющихся вдоль границ раздела металл-диэлектрик, и мод планарного волновода (ПВ), распространяющихся в диэлектрическом слое с высоким показателем преломления. Поля мод ППП и ПВ МДД структуры связаны посредством затухающих полей в разделительном слое низкоиндексного диэлектрика, вследствие чего происходит интерференция полей мод и их гибридизация [1]. Интерференция полей широкой моды ППП и узкой моды ПВ приводит к возникновению резонансных линий Фано асимметричной формы в спектральном отклике [2]. Асимметричные линии Фано в отклике резонансных структур изучаются моделированием в рамках точной электромагнитной теории [3], системой связанных классических осцилляторов [4] и теорией связанных мод [5].

Влияние параметров слоев МДД структуры на форму линии спектрального отклика изучалось для длин волн видимого диапазона [2, 6-8]. Форма линии спектрального отклика существенно зависит от взаимного положения и силы связанности гибридных мод ППП и ПВ. В случае сильной связанности вследствие гибридизации мод в спектральном отклике различимы два отдельных резонанса, при уменьшении силы связанности положения

резонансов сближаются. Взаимное положение мод определяется толщиной волноводного слоя и приводит к возникновению асимметричных резонансов Фано и плазмонно-индуцированного пропускания (ПИП). Исследования асимметричных резонансов и резонансных эффектов усиления поля актуальны, например, для разработки высокочувствительных сенсорных структур для детекции веществ по их спектральным «отпечаткам пальцев» в инфракрасном (ИК) диапазоне. Изучение распределения усиления поля по углам падения в областях локализации гибридных мод важно для установления природы возбуждаемых гибридных мод и понимания явления межмодовой связанности, так как резонансное усиление поля ассоциируется с возбуждаемыми в структуре модами.

В данной работе в рамках точной электромагнитной (ЭМ) теории исследуется возбуждение гибридных мод МДД структуры на основе волновода из CdTe в ближнем ИК диапазоне для различной силы связанности и взаимного положения мод ППП и ПВ.

2. Результаты и их обсуждение

В работе рассматривается слоистая МДД структура в конфигурации Кречмана. В состав структуры входят слой высокоиндексного диэлектрика, представляющий собой призму с показателем преломления селенида цинка ZnSe [9], металлический слой с показателем преломления серебра Ag [10], разделительный слой из низкоиндексного диэлектрика с показателем преломления SiO₂ [10], волноводный слой с показателем преломления CdTe [11], показатель преломления внешнего слоя структуры соответствовал комплексному показателю преломления воды [12]. Форма линии пространственного спектра нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) зависит от толщин слоя металла, разделительного слоя и волноводного слоя [6]. Сила связанности гибридных мод рассматриваемой МДД структуры контролируется толщиной разделительного слоя t_{sp} : меньшая толщина соответствует большей силе связанности. На рисунке 1 представлены отклики исследуемых структур на длине волны 1064 нм для фиксированной толщины слоя Ag равной 42 нм и для различных значений толщины разделительного слоя. Толщины волноводного слоя были подобраны таким образом, чтобы вид формы линий пространственного спектра НПВО соответствовал Фано резонансу на угле, меньшем, чем угол ППП (далее обозначается ЛФ), ПИП и Фано резонансу на угле, большем, чем угол ППП (далее обозначается ПФ), и равнялись 107 нм, 110 нм и 113 нм, соответственно.

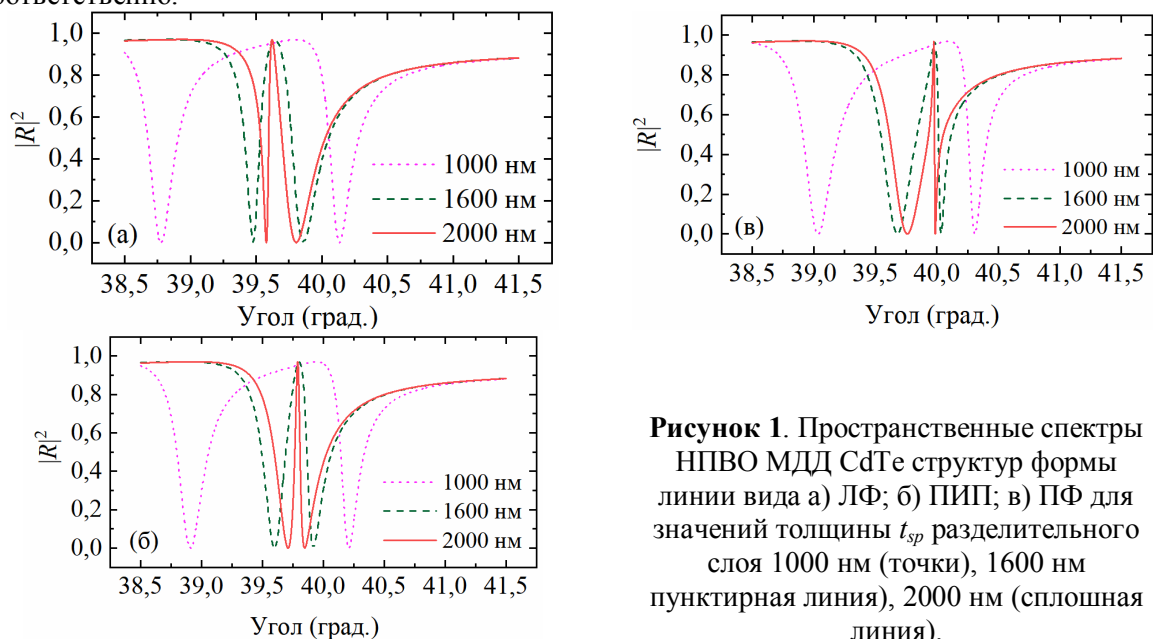


Рисунок 1. Пространственные спектры НПВО МДД CdTe структур формы линии вида а) ЛФ; б) ПИП; в) ПФ для значений толщины t_{sp} разделительного слоя 1000 нм (точки), 1600 нм (пунктирная линия), 2000 нм (сплошная линия).

При $t_{sp} = 1000$ нм, как показано на рисунке 1, в диапазоне углов от 38,5° до 41,5° наблюдаются два резонанса, соответствующие возбуждению гибридных мод МДД структуры. В области угла

39° возбуждается гибридная ППП-ПВ мода с преобладанием моды ПВ, в области угла 40,2° возбуждается гибридная ППП-ПВ мода с преобладанием моды ППП. При увеличении толщины разделительного слоя резонансы гибридных мод сближаются в спектре с образованием асимметричных ППП-ПВ резонансов. Наличие в пространственном спектре двух отдельных резонансов вызвано сильной связанностью гибридных мод при $t_{sp} = 1000$ нм, появление в спектре асимметричного резонанса вида Фано – признак слабой связанности гибридных мод при $t_{sp} = 1600$ нм и 2000 нм [8]. Рассмотрим ниже усиление поля в областях локализации гибридных мод в слоях рассматриваемой МДД структуры в случаях форм линии вида ЛФ, ПИП и ПФ ее отклика.

На рисунках 2 и 3 представлено распределение усиления поля как функция от угла падения на границе раздела Ag/SiO₂ и в центре CdTe волновода.

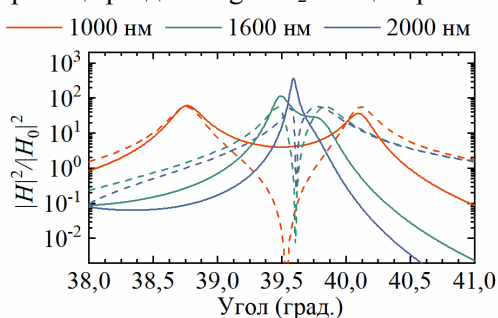


Рисунок 2. Усиление поля как функция угла падения для формы линии ЛФ в волноводном слое (сплошные линии) и на границе раздела Ag/SiO₂ (пунктирные линии) для значений толщины t_{sp} разделительного слоя 1000 нм, 1600 нм, 2000 нм.

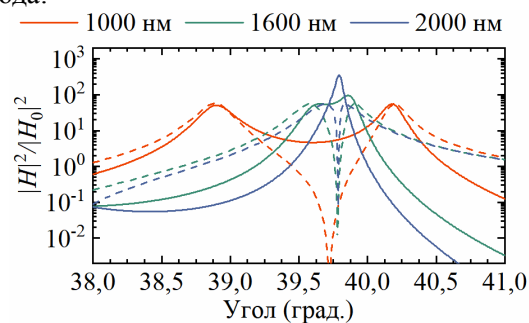


Рисунок 3. Усиление поля как функция угла падения для формы линии ПИП в волноводном слое (сплошные линии) и на границе раздела Ag/SiO₂ (пунктирные линии) для значений толщины t_{sp} разделительного слоя 1000 нм, 1600 нм, 2000 нм.

Видно, что для случая формы линии вида ЛФ при $t_{sp} = 1000$ нм ЭМ поле усиливается в волноводе и на границе раздела Ag/SiO₂ до примерно одной величины порядка 60. При $t_{sp} = 1600$ нм усиление поля в волноводе больше усиления поля на границе раздела Ag/SiO₂ на угле резонанса 39,495° и достигает величины 115. На угле резонанса 39,840° усиление поля на границе раздела достигает величины 57, что больше величины усиления поля в волноводе на данном угле падения. Для случая, когда $t_{sp} = 2000$ нм, форма линии усиления поля на границе раздела становится отчетливо асимметричной. Пиковое значение усиления поля в волноводе равно 367 и соответствует углу 39,590° спада усиления поля на границе раздела Ag/SiO₂, на угле резонанса 39,780° усиление поля на границе раздела достигает величины 57, а усиление поля в волноводе 7,55.

Для случая формы линии вида ПИП при $t_{sp} = 1000$ нм форма линии усиления поля, изображенная на рисунке 3, повторяет особенности формы вида ЛФ, изображенной на рисунке 2: величина усиления поля в волноводе и на границе раздела Ag/SiO₂ достигает примерно одного максимального значения порядка 60 в областях резонансов гибридных мод. При $t_{sp} = 1600$ нм величины усиления поля в волноводе и на границе раздела Ag/SiO₂ также достигают значения около 60 в области углов 39,5° и 40°. В линии усиления поля на границе раздела различимы два пика, разделенных резонансным спадом величины усиления поля. При $t_{sp} = 2000$ нм, пики в линии усиления поля на границе раздела сближаются, форма линии усиления поля в волноводном слое симметрична, и угол 39,795°, соответствующий максимальному значению усиления поля, равен углу, соответствующему минимальному значению усиления поля на границе Ag/SiO₂.

На рисунке 4 показаны зависимости усиления поля от угла падения для формы линии вида ПФ. Как видно из рисунка 4, при $t_{sp} = 1000$ нм максимальные значения усиления поля на границе раздела и в волноводе на углах резонанса немного отличаются: 58 на границе раздела и 41 в волноводе в области угла 39° и 55 на границе раздела и 87 в волноводе в области угла

40,3°. При $t_{sp} = 1600$ нм усиление поля на угле резонанса 39,650° с преобладанием моды ППП равно 57,5 на границе раздела Ag/SiO₂ – это больше усиления поля в волноводе, на угле резонанса 40,015° с преобладанием моды ПВ усиление поля в волноводе больше, чем на границе раздела, и равно 326,5. Пик усиления поля в волноводе, когда $t_{sp} = 2000$ нм, соответствует углу спада усиления поля на границе раздела Ag/SiO₂, а на угле 39,730° усиление поля на границе раздела больше, чем усиление поля в волноводном слое. Формы линии усиления поля на границе раздела Ag/SiO₂ асимметричные.

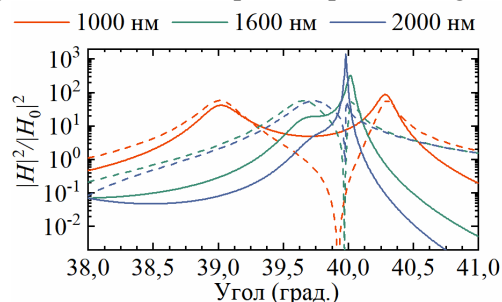


Рисунок 4. Усиление поля как функция угла падения для формы линии ПФ в волноводном слое (сплошные линии) и на границе раздела Ag/SiO₂ (пунктирные линии) для значений толщины t_{sp} разделительного слоя 1000 нм, 1600 нм, 2000 нм.

Отметим, что форма линий усиления поля значительно меняется при изменении t_{sp} . В случае слабой связанности, $t_{sp} = 2000$ нм, в линии усиления поля в волноводе наблюдается единственный резонанс Лоренца, что свидетельствует о возбуждении гибридной моды ПВ в волноводном слое. Форма линии усиления поля на границе раздела Ag/SiO₂ имеет вид асимметричного Фано резонанса. Фано резонансное поведение усиления поля в планарных структурах исследовалось ранее в работах [13, 14], оно вызвано возбуждением широкой гибридной моды ППП.

При $t_{sp} = 1600$ нм в распределении усиления поля по углам в волноводе наблюдается формирование второго пика. Фано резонанс усиления поля на границе раздела уширяется. В случае сильной связанности, $t_{sp} = 1000$ нм, в обоих спектрах усиления поля на границе раздела и волноводном слое наблюдаются два выраженных резонанса Лоренца. Максимальные значения усиления поля в волноводе близки по величине максимальным значениям усиления поля на границе раздела. При этом, резонансы Лоренца на границе раздела и в волноводе возбуждаются при одинаковых углах падающей волны. Это свидетельствует о возбуждении двух различных гибридных мод структуры. Близкие значения максимального усиления поля на границе раздела и в волноводе при резонансных условиях свидетельствуют о гибридном характере сильно связанных мод ППП и ПВ. Они являются переходными модами от гибридных мод ППП и ПВ с малой степенью взаимодействия к моде ППП системы металл/тонкий волновод/вода и моде ПВ с металлической обкладкой.

Следует отметить, что в представленных зависимостях усиления поля на границе раздела Ag/SiO₂ от угла падения для всех рассмотренных величин толщины разделительного слоя наблюдается уменьшение величины усиления поля до близких к нулю значений. Уменьшение значений усиления поля свидетельствует о подавлении гибридной моды ППП. В спектральном отклике это проявляется в уменьшении поглощения и увеличении отражения до максимальных значений.

3. Заключение

В работе было проведено исследование распределения усиления поля по углам в областях локализации гибридных мод МДД структуры на основе волновода из CdTe в ближнем ИК диапазоне в рамках точной ЭМ теории. Были продемонстрированы эффекты перераспределения поля между взаимодействующими гибридными модами для различной силы связанности этих мод в широком диапазоне углов падения. При слабой связанности гибридных мод в угловом распределении усиления поля в середине волноводного слоя наблюдается единственный резонанс Лоренца как результат возбуждения гибридной моды ПВ. Линия усиления поля на границе раздела Ag/SiO₂ принимает форму Фано резонанса, что является проявлением возбуждения гибридной моды ППП. При увеличении силы связанности гибридных мод резонанс Лоренца в линии усиления поля в волноводе расщепляется на два резонанса Лоренца.

Форма линии усиления поля на границе раздела также видоизменяется при увеличении силы связанности и приобретает вид двух резонансов Лоренца, положение которых в пространственном спектре близко к положению резонансов усиления поля в волноводе. Переход гибридных мод ППП и ПВ с малой степенью взаимодействия в моду ППП системы металл/тонкий волновод/вода и моду ПВ с металлической обкладкой при уменьшении толщины разделительного слоя приводит к новым эффектам в спектральном отклике и представляет интерес для дальнейших исследований резонансных характеристик.

4. 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).

5. Литература

- [1] Alam, M.Z. A marriage of convenience: Hybridization of surface plasmon and dielectric waveguide modes / M.Z. Alam, J.S. Aitchison, M. Mojahedi // *Laser & Photonics Reviews*. – 2014. – Vol. 8(3). – P. 394-408. DOI: 10.1002/lpor.201300168.
- [2] Hayashi, S. Waveguide-coupled surface plasmon resonance sensor structures: Fano lineshape engineering for ultrahigh-resolution sensing / S. Hayashi, D.V. Nesterenko, Z. Sekkat // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2015. – Vol. 48(32). – P. 325303. DOI: 10.1088/0022-3727/48/32/325303.
- [3] Kamenetskii, E. *Fano Resonances in Optics and Microwaves* – Cham Springer International Publishing Cham Springer, 2018. – 592 p.
- [4] Joe, Y.S. Classical analogy of Fano resonances / Y.S. Joe, A.M. Satanin, C.S. Kim // *Physica Scripta*. – 2006. – Vol. 74(2). – P. 259-266. DOI: 10.1088/0031-8949/74/2/020.
- [5] Ruan, Z. Temporal coupled-mode theory for Fano resonance in light scattering by a single obstacle / Z. Ruan, S. Fan // *Journal of Physical Chemistry C*. – 2010. – Vol. 114(16). – P. 7324-7329. DOI: 10.1021/jp9089722.
- [6] Hayashi, S. Line shape engineering of sharp Fano resonance in Al-based metal-dielectric multilayer structure / S. Hayashi, Y. Fujiwara, B. Kang, M. Fujii, D.V. Nesterenko, Z. Sekkat // *Journal of Applied Physics*. – 2017. – Vol. 122(16). – P. 163103. DOI: 10.1063/1.5002715.
- [7] Nesterenko, D.V. Extremely narrow resonances, giant sensitivity and field enhancement in low-loss waveguide sensors / D.V. Nesterenko, S. Hayashi, Z. Sekkat // *Journal of Optics*. – 2016. – Vol. 18(6). – P. 065004. DOI: 10.1088/2040-8978/18/6/065004.
- [8] Hayashi, S. Observation of Fano line shapes arising from coupling between surface plasmon polariton and waveguide modes / S. Hayashi, D.V. Nesterenko, A. Rahmouni, Z. Sekkat // *Applied Physics Letters*. – 2016. – Vol. 108(5). – P. 051101. DOI: 10.1063/1.4940984.
- [9] Querry, M.R. *Optical constants of minerals and other materials from the millimeter to the ultraviolet* // Aberdeen Proving Ground, Md.: Chemical Research, Development & Engineering Center, U.S. – Army Armament Munitions Chemical Command, 1987. – 334 p.
- [10] Palik, E.D. *Handbook of optical constants of solids* // Orlando: Academic Press, 1984. – 1000 p.
- [11] Подлипов, В.В. Структурные и оптические характеристики тонких пленок CdTe в видимом и инфракрасном диапазонах / В.В. Подлипов, Д.А. Быков, Д.В. Нестеренко // *Компьютерная оптика*. – 2020. – Т. 44. (в печати).
- [12] Segelstein, D.J. *The complex refractive index of water* – University of Missouri, 1981. – 167 p.
- [13] Kang, B. Fano resonances in near-field absorption in all-dielectric multilayer structures / B. Kang, M. Fujii, D.V. Nesterenko, Z. Sekkat, S. Hayashi // *Journal of Optics*. – 2018. – Vol. 20(12). – P. 125003. DOI: 10.1088/2040-8986/aaea5a.
- [14] Kang, B. Fano resonant behaviour of waveguide mode in all-dielectric multilayer structure directly monitored by fluorescence of embedded dye molecules / B. Kang, K. Motokura, M. Fujii, D.V. Nesterenko, Z. Sekkat, S. Hayashi // *Journal of Optics*. – 2019. – Vol. 21(10). – P. 105006. DOI: 10.1088/2040-8986/ab42cf.

Asymmetric resonances and field enhancement of hybrid plasmon-waveguide modes in CdTe structures

R.A. Pavelkin¹, D.V. Nesterenko^{1,2}, S. Hayashi^{3,4}, V. Soifer^{1,2}

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

²Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

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. The planar metal-dielectric structures based on a CdTe waveguide separated from a metal layer by a layer of silicon dioxide support excitation of propagating hybrid plasmon-waveguide modes. The mode's intercoupling results in the appearance of asymmetric resonance line shapes in spectra. We characterize asymmetric resonances of plasmon-induced transparency-like and Fano line shapes in the attenuated total reflection spectra of the structures within the framework of rigorous electromagnetic theory in the infrared region. The study of characteristic resonance regions demonstrated the effects of field redistribution between the interacting hybrid modes in a wide range of their propagation constants. Obtained results can lead to development of applications in sensing and enhanced infrared spectroscopies.