

Гибридные состояния таммовских и поверхностных плазмон-поляритонов в одномерных фотонных кристаллах

В. О. Бессонов¹, И. В. Соболева^{1,2}, Б. И. Афиногенов²,
Д. Н. Гулькин², Д. А. Шилкин², А. Т. Ле², А. А. Федянин^{2*}

¹Институт физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина Российской академии наук
Россия, 119071, Москва, Ленинский проспект, д. 31, корп. 4

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 18.10.2013; Подписана в печать 24.01.2014)

Экспериментально обнаружено возникновение гибридного состояния таммовского и поверхностного плазмон-поляритонов в системе одномерный фотонный кристалл/полупрозрачная металлическая пленка. Гибридное состояние возбуждается для ТМ-поляризованного излучения при условиях полного внутреннего отражения. Методом частотно-угловой спектроскопии в геометрии Кречманна исследованы спектральные и угловые положения резонансов гибридного состояния. Показано, что взаимодействие таммовского и поверхностного плазмон-поляритона приводит к расталкиванию их дисперсионных кривых, величина которого зависит от толщины металлической пленки. Экспериментальные результаты находятся в полном согласии с результатами численного моделирования.

PACS: 78.67.Pt, 73.20.Mf

УДК: 535.016

Ключевые слова: фотонные кристаллы, поверхностные состояния, нанофотоника.

ВВЕДЕНИЕ

Активно исследуемой областью физики является изучение эффектов, связанных с возбуждением поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ) в фотонных кристаллах (ФК) [1–4]. Данные состояния являются аналогами поверхностных плазмон-поляритонов (ППП), распространяющихся на границе раздела металла и диэлектрика. Электромагнитное поле этих состояний локализовано вблизи границы раздела металла или фотонного кристалла и диэлектрика и экспоненциально спадает по обе стороны от нее. Возбуждение ППП или ПЭВ приводит к возникновению резонанса в спектре коэффициента отражения. Кроме того условия возбуждения ППП и ПЭВ чувствительны к изменению показателя преломления диэлектрика, что обусловило широкое распространение сенсоров, работающих на эффекте возбуждения поверхностных состояний для нужд биологии, химии и медицины. Для возбуждения ППП и ПЭВ необходимо выполнение условий синхронизма для тангенциальной компоненты волнового вектора, поэтому возникает необходимость использования специальных схем возбуждения: призмных или дифракционных.

За последние несколько лет в оптике сформировалось новое направление, посвященное исследованию таммовских плазмон-поляритонов (ТПП) в системах ФК – металл. Данные состояния являются оптическим аналогом эффекта локализации электронной плотности на границе периодического потенциала, впервые рассмотренного И. Е. Таммом [5], и проявляются в виде локализации электромагнитного поля на границе раз-

дела ФК – металл. Экспериментально данный эффект проявляется в виде узкого пика поглощения в спектре коэффициента отражения такой системы [6, 7]. В отличие от ППП и ПЭВ для возбуждения ТПП не требуется выполнение условий синхронизма для тангенциальной компоненты волнового вектора, поэтому они могут быть возбуждены при любом угле падения излучения на структуру. Однако критическим фактором для возбуждения ТПП является выполнение граничных условий для нормальной компоненты волнового вектора. ТПП существуют как для ТЕ, так и для ТМ поляризации, а их спектральное положение зависит от толщины верхнего слоя фотонного кристалла, примыкающего к металлу. Возбуждение ТПП в магнитофотонных кристаллах приводит к усилению магнитооптических эффектов, таких как эффект Фарадея [8]. Благодаря потенциальной возможности применения ТПП в создании новых типов компактных лазерных устройств и сенсоров [9–12], в данный момент активно исследуются структуры, в которых осуществляется одновременное возбуждение ТПП и других оптических возбуждений, таких как экситонные или микрорезонаторные моды [13–16]. Такие гибридные состояния проявляются в виде нескольких резонансных особенностей в спектрах отражения, которые никогда спектрально не пересекаются.

В данной статье сообщается об экспериментальном наблюдении гибридного состояния ТПП и ППП, возбуждаемого в системе одномерный ФК/металлическая пленка в геометрии Кречманна. Показано, что в частотно-угловых спектрах коэффициента отражения таммовская и плазмонная компоненты гибридного состояния проявляются в виде двух расталкивающихся резонансов. Дисперсионная кривая плазмонной компоненты гибридного состояния сдвинута в длинноволновую область спектра по сравнению с дисперсионной

*E-mail: fedyanin@nanolab.phys.msu.ru

кривой поверхностного плазмона, возбуждаемого в отсутствие таммовского. Численно исследована зависимость величины расталкивания дисперсионных кривых компонент гибридного состояния от толщины металлической пленки.

1. ОБРАЗЦЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Образцы одномерных ФК создавались методом послойного термического напыления четвертьволновых диэлектрических слоев ZrO_2/SiO_2 на подложку из плавленого кварца. Показатели преломления слоев составляли $n_1 = 1.95$ и $n_2 = 1.46$ соответственно; средние толщины слоев составляли $d_1 = 110$ нм (ZrO_2) и $d_2 = 145$ нм (SiO_2). В соответствии с расчетом наиболее эффективно таммовский плазмон-поляритон возбуждается на таком образце при толщине верхнего слоя, равной $d_3 = 225$ нм и толщине золотой пленки около 30 нм. Таким образом на образец ФК было допылено 80 нм SiO_2 и на полученную структуру была напылена золотая пленка толщиной 30 нм. Структура образца приведена на рис. 1б. Напыление золотой пленки толщиной 30 нм производилось одномерным на образец ФК и подложку плавленого кварца, для получения образца сравнения. Образец сравнения необходим для получения спектрально-угловых характеристик возбуждения ППП в отсутствие возбуждения в системе ТПП.

Для измерения частотно-угловых спектров коэффициента отражения исследуемой структуры была создана экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 1а.

В качестве источника света использовалась лампа накаливания (1). Свет коллимировался линзой (2), и при помощи диафрагмы (3) выделялся параллельный пучок диаметром 2 мм. Призма Глана (4), установленная во вращающейся с точностью 0.2° подставке, позволяла управлять линейной поляризацией света, падающего на образец. Для возбуждения поверхностного плазмон-поляритона на границе раздела металл-вакуум использовалась схема Кречманна: образцы при помощи иммерсионного масла крепились к стеклянной цилиндрической призме (показатель преломления материала $n = 1.51$). Полученная система устанавливалась на механизированный гониометр $\varphi - 2\varphi$ (5), позволяющий задавать угол поворота образца с точностью 0.005° . Отраженное от образца излучение фокусировалось в оптическое волокно (6), установленное на поворотном держателе гониометра, которое соединялось со спектрометром (7), имеющем спектральное разрешение 1 нм и диапазон измерения длин волн 400 – 1100 нм. Благодаря цилиндрической форме призмы углы падения излучения на образец соответствуют углам падения излучения из материала призмы. В дальнейшем, на всех экспериментальных и расчетных зависимостях угол падения θ соответствует углу падения излучения из призмы.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ СОСТОЯНИЙ ТАММОВСКИХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНОВ МЕТОДОМ ЧАСТОТНО-УГЛОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

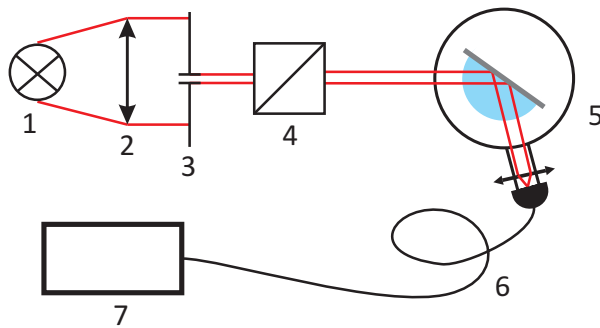
На рис. 2 показан спектр коэффициента отражения образца ФК/металл при угле падения излучения 30° . Отмечена фотонная запрещенная зона фотонного кристалла (Ф33), располагающаяся между 680 и 950 нм. В спектре виден резонанс на длине волны 720 нм, соответствующий возбуждению таммовского плазмон-поляритона. На установке для частотно-угловой спектроскопии была измерена серия спектров коэффициента отражения образца для углов падения света θ от 25° до 60° с шагом 0.1° .

На рис. 4 показан частотно-угловой спектр коэффициента отражения для ТМ поляризации падающего излучения. Величина коэффициента отражения системы показана градациями серого, а по осям отложены угол падения и длина волны излучения.

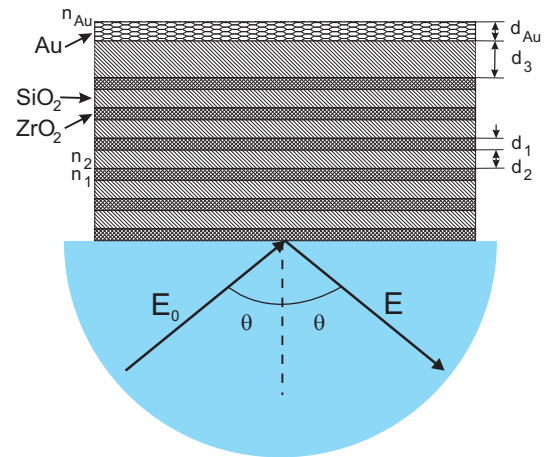
Для углов падения, не превосходящих угол полного внутреннего отражения (около 42° для данной призмы), внутри фотонной запрещенной зоны фотонного кристалла наблюдается узкий резонанс поглощения, соответствующий возбуждению ТПП. На рис. 4а данная особенность проявляется в виде темной полосы, обозначенной стрелкой. При увеличении угла падения излучения на образец увеличивается поперечная компонента волнового вектора, поэтому центр фотонной запрещенной зоны и дисперсионная кривая ТПП сдвигаются в коротковолновую область спектра. При углах, превосходящих угол полного внутреннего отражения, выполняются условия фазового синхронизма для ППП. На длине волны 990 нм при угле падения 43° наблюдается резонанс, соответствующий возбуждению ППП. При увеличении угла падения он смещается в коротковолновую область спектра. Резонанс, соответствующий ТПП, снова появляется при угле падения 43° на длине волны 620 нм. В диапазоне углов $45^\circ - 50^\circ$ дисперсионные кривые ТПП и ППП располагаются практически параллельно друг другу. Спектральное расстояние между резонансами составляет 75 ± 5 нм. При углах, больших 50° в спектре коэффициента отражения нельзя выделить резонансные особенности, связанные с возбуждением какого-либо из поверхностных состояний.

Аналогичные измерения были проведены и для образца сравнения, в котором ППП возбуждается в отсутствие ТПП. На рис. 3 приведен частотно-угловой спектр коэффициента отражения образца сравнения при изменении угла падения от 39° до 60° .

Резонанс, соответствующий возбуждению ППП появляется при угле падения 43° на длине волны 1000 нм. Стоит заметить, что длина волны возбуждения ППП на образце сравнения при угле падения 50° составляет примерно 530 нм, в то время как длина волны возбуждения ППП, возбужденного на образце ФК/металл при том же угле падения составля-



(а)



(б)

Рис. 1: (а) Схема установки для частотно-угловой спектроскопии коэффициента отражения. (1) — лампа накаливания, (2) — коллимирующая линза, (3) — диафрагма, (4) — призма Глана во вращающемся держателе, (5) — механизированный гониометр $\varphi - 2\varphi$ с установленным на нем образцом, (6) — волокно с фокусирующей линзой, установленное на поворотном держателе, (7) — спектральный прибор. (б) Схема образца. Стрелками указаны падающее (E_0) и отраженное (E) излучение. Значения параметров указаны в тексте

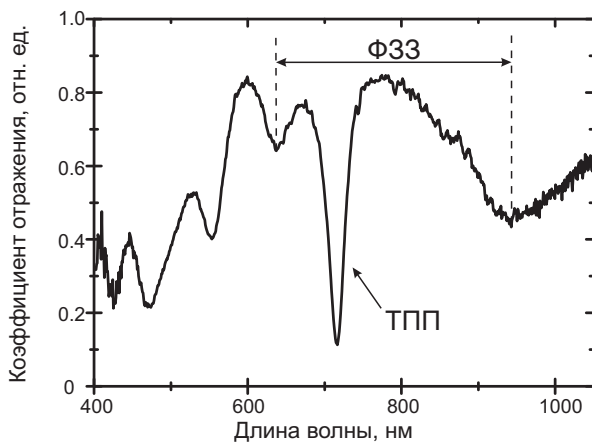


Рис. 2: Срез частотно-углового спектра коэффициента отражения образца ФК/металл для ТМ поляризованного излучения при угле падения 30° . Отмечены резонанс, соответствующий возбуждению таммовского плазмон-поляритона (ТПП), фотонная запрещенная зона (ФЗЗ)

ет 610 нм. Таким образом можно отметить, что компонента гибридного состояния, соответствующая возбуждению поверхностного плазмон-поляритона сдвигается на 80 нм в длинноволновую область по сравнению с дисперсионной кривой ППП, возбуждаемого в образце сравнения (в отсутствии ТПП).

На рис. 5а показан частотно-угловой спектр коэффициента отражения образца ФК/металл для ТЕ поляризованного излучения. Для ТЕ-поляризованного света ППП возбуждаться не может, поэтому структура

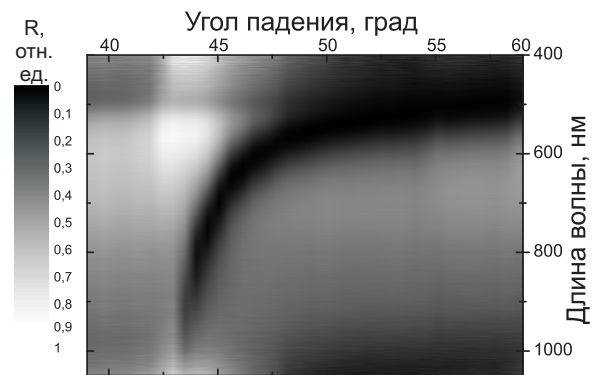


Рис. 3: Частотно-угловой спектр коэффициента отражения образца сравнения для ТМ поляризованного излучения

спектра коэффициента отражения не претерпевает никаких изменений при изменении угла падения света. Видно, что при увеличении угла падения излучения центр фотонной запрещенной зоны фотонного кристалла и дисперсионная кривая ТПП смещаются в коротковолновую область спектра. Стоит заметить, что при этом глубина резонанса, соответствующего ТПП, постепенно уменьшается и в итоге резонанс исчезает. Данное поведение можно объяснить из следующих соображений: при увеличении угла падения, частота возбуждения ТПП смещается в синюю область спектра, приближаясь к плазменной частоте золота, равной $\omega_p = 1.37 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$, что соответствует длине волны $\lambda_p = 140 \text{ нм}$. При приближении частоты падающего излучения к плазменной диэлектрическая проницаемость

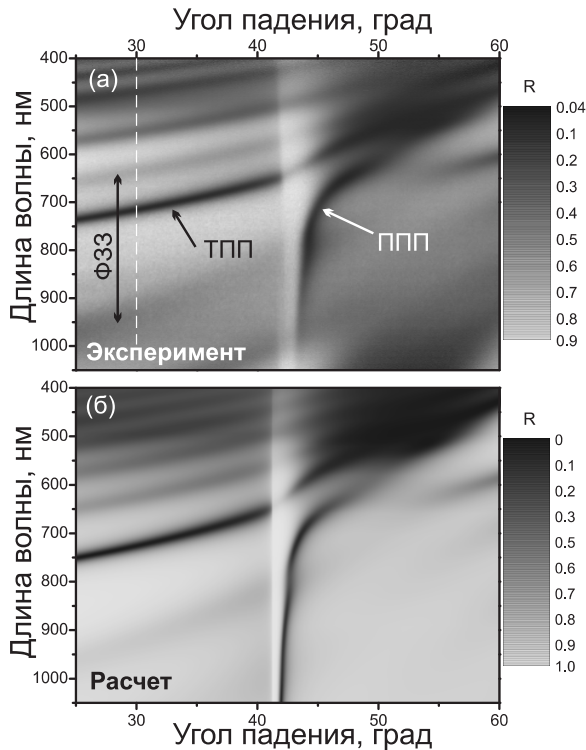


Рис. 4: (а) Частотно-угловой спектр коэффициента отражения образца ФК/металл для ТМ поляризованного излучения. Отмечены дисперсионные кривые таммовского плазмон-поляритона (ТПП), поверхностного плазмон-поляритона (ППП) и фотонная запрещенная зона (ФЗЗ). Пунктирной линией отмечен угол, для которого на рис. 2 приведен срез частотно-углового спектра. (б) Численный расчет частотно-углового спектра коэффициента отражения модельного образца для ТМ поляризованного излучения

золота стремится к нулю. Из-за этого локализация поля на границе раздела фотонный кристалл – металл ухудшается, что и приводит к исчезновению резонанса.

3. ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для интерпретации экспериментальных данных были проведены численные расчеты частотно-угловых спектров коэффициента отражения методом матриц распространения [17]. В качестве модельного образца рассматривался образец, идентичный экспериментальному. При расчетах учитывалась реальная дисперсия диэлектрических постоянных золота, взятая из статьи [18]. Результаты численного расчета частотно-угловых спектров коэффициента отражения для ТМ и ТЕ поляризованного излучения приведены на рисунках 4б и 5б соответственно.

Экспериментальные результаты находятся в хорошем согласии с численными расчетами. Небольшие расхождения можно объяснить угловой расходимостью

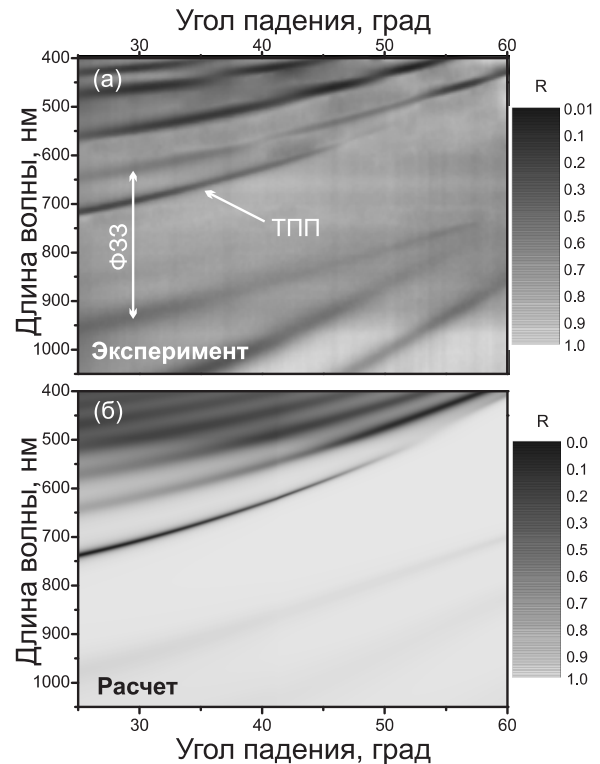


Рис. 5: (а) Частотно-угловой спектр коэффициента отражения образца ФК/металл для ТЕ поляризованного излучения. Отмечены дисперсионные кривые таммовского плазмон-поляритона (ТПП) и фотонная запрещенная зона (ФЗЗ). (б) Численный расчет частотно-углового спектра коэффициента отражения модельного образца для ТЕ поляризованного излучения

пучка и его фокусировкой цилиндрической призмой.

Обратимся теперь к обсуждению полученных результатов. Как уже было указано, дисперсионные кривые ППП, возбуждаемых на образце сравнения и на образце ФК/металл имеют существенные различия. Дисперсионная кривая ППП, возбуждаемого на образце ФК/металл имеет более резкий излом при приближении к коротковолновой части спектра.

Это связано с расталкиванием дисперсионных кривых таммовского и поверхностного плазмон-поляритонов. При рассмотрении распространения излучения в системе фотонный кристалл–металл при условиях полного внутреннего отражения, решение волнового уравнения представляет собой суперпозицию решения, локализованного на границе раздела фотонный кристалл–металл (ТПП) и решения, локализованного на границе раздела металл–вакуум (ППП). В этом случае данные поверхностные состояния нельзя рассматривать по отдельности. Можно сказать, что возникает некое гибридное состояние таммовского и поверхностного плазмон-поляритонов. Стоит подчеркнуть, что речь не идет о взаимодействии ТПП и ППП в терминах переноса энергии, поскольку все эффекты, наблюдаемые в данной работе являются ли-

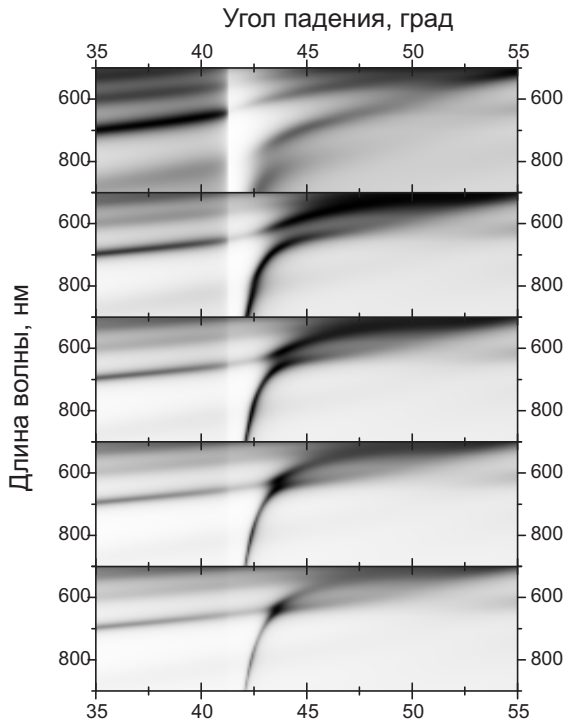


Рис. 6: Численный расчет частотно-угловых спектров коэффициента отражения модельного образца для ТМ поляризованного излучения. Толщины слоя золота составляют (сверху вниз) 20, 40, 50, 60, 70 нм соответственно

нейными.

Степень связи компонент гибридного состояния зависит от толщины металла, поскольку электромагнитные поля обеих компонент экспоненциально затухают в этом слое. Для более детального изучения гибридного поверхностного состояния была проведена серия расчетов частотно-угловых спектров коэффициента отражения в зависимости от толщины слоя золота. На рис. 6 показаны частотно-угловые спектры коэффици-

ента отражения модельного образца, построенные для значений толщины слоя золота 20, 40, 50, 60, 70 нм. Видно, что при увеличении толщины слоя, величина расталкивания дисперсионных кривых ТПП и ППП уменьшается. При слое толще, чем 70 нм, дисперсионные кривые перестают расталкиваться и начинают пересекаться, что свидетельствует о том, что ТПП и ППП перестают «чувствовать» друг друга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружено гибридное состояние таммовского и поверхностного плазмон-поляритонов при углах падения ТМ-поляризованного излучения на границу раздела фотонный кристалл/металл, превышающих угол полного внутреннего отражения. Закон дисперсии гибридного состояния состоит из двух непересекающихся ветвей, которые соответствуют возбуждению поверхностных оптических состояний на границах раздела металл-воздух (плазмонная мода) и металл-диэлектрик (таммовская мода). Показано, что величину расталкивания компонент гибридного состояния можно контролируемо изменять, варьируя толщину металлической пленки. Продемонстрировано, что наличие таммовского плазмон-поляритона в системе приводит к сдвигу закона дисперсии поверхностного плазмон-поляритона, возбуждаемого в золотой пленке, в длинноволновую область спектра. Данный эффект может быть использован для создания нового типа перестраиваемых оптических фильтров и сенсоров.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ и Российского фонда фундаментальных исследований.

- [1] Robertson W. M., May M. S. Appl. Phys. Lett. **74**, 1800. (1999).
- [2] Soboleva I. V., Descrovi E., Summonte C., Fedyanin A. A., Giorgis F. Appl. Phys. Lett. **94**, 231122. (2009).
- [3] Khanikaev A. B., Baryshev A. V., Inoue M., Kivshar Yu. S. Appl. Phys. Lett. **95**, 011101. (2009).
- [4] Soboleva I. V., Moskalenko V. V., Fedyanin A. A. Phys. Rev. Lett. **108**, 123901. (2012).
- [5] Тамм И. Е. ЖЭТФ **3**, 34. (1933).
- [6] Kaliteevski M., Iorsh I., Brand S., Abram R. A., Chamberlain J. M., Kavokin A. V., Shelykh I. A. Phys. Rev. B **76**, 165415. (2007).
- [7] Sasin M. E., Seisyan R. P., Kaliteevski M. A., Brand S., Abram R. A., Chamberlain J. M., Egorov A. Yu., Vasilév A. P., Mikhlin V. S., Kavokin A. V. Appl. Phys. Lett. **92**, 251112. (2008).
- [8] Goto T., Dorofeenko A. V., Merzlikin A. M., Baryshev A. V., Vinogradov A. P., Inoue M., Lisyansky A. A., Granovsky A. B. Phys. Rev. Lett. **101**, 113902. (2008).
- [9] Symonds C., Lheureux G., Hugonin J. P., Greffet J. J., Laverdant J., Brucoli G., Lemaître A., Senellart P., Bellessa J. Nano Lett. **13**, 3179. (2013).
- [10] Brückner R., Zakhidov A. A., Scholz R., Sudzius M., Hintschich S. I., Fröb H., Lyssenko V. G., Leo K. Nat. Photonics **6**, 322. (2012).
- [11] Symonds C., Lemaître A., Senellart P., Jomaa M. H., Guebrou S., Aberra, Homeyer E., Brucoli G., Bellessa J. Appl. Phys. Lett. **100**, 121122. (2012).
- [12] Gazzano O., de Vasconcellos S. Michaelis, Gauthron K., Symonds C., Bloch J., Voisin P., Bellessa J., Lemaître A., Senellart P. Phys. Rev. Lett. **107**, 247402. (2011).
- [13] Symonds C., Lemaître A., Homeyer E., Plenet J. C.,

- Bellessa J.* Appl. Phys. Lett. **95**, 151114. (2009).
- [14] *Brückner R., Sudzius M., Hintschich S.I., Fröb H., Lyssenko V.G., Leo K.* Phys. Rev. B **83**, 033405. (2011).
- [15] *Kaliteevski M., Brand S., Abram R.A., Iorsh I., Kavokin A.V., Shelykh I.A.* Appl. Phys. Lett. **95**, 251108. (2009).
- [16] *Liu H., Sun X., Yao F., Pei Y., Yuan H., Zhao H.* Plasmonics **7**, 749. (2012).
- [17] *Bethune D. J.* Opt. Soc. Am. B **6**, 910. (1989).
- [18] *Johnson P.B., Christy R. W.* Phys. Rev. B **6**, 4370. (1972).

Hybrid state of Tamm and surface plasmon-polaritons in one-dimensional photonic crystals

V. O. Bessonov¹, I. V. Soboleva^{1,2}, B. I. Afinogenov², D. N. Gulkin², D. A. Shilkin², A. T. Le²,
and A. A. Fedyanin^{2a}

¹*Russian academy of sciences A.N. Frumkin Institute of Physical chemistry and Electrochemistry RAS,
Moscow 199071, Russia*

²*Department of physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

^a*e-mail: fedyanin@nanolab.phys.msu.ru*

Hybrid mode of Tamm plasmon-polariton and surface plasmon-polariton in 1D photonic crystal/semitransparent metal film is experimentally observed. The hybrid state is excited under conditions of total internal reflection for TM-polarized light. Spectral and angular dependences of the hybrid mode resonances positions are studied in the Kretschmann geometry by the methods of frequency-angular spectroscopy. Coupling between Tamm and surface plasmon-polaritons leads to repulsion of their dispersion curves controlled by metal film thickness. Experimental results are in a good agreement with the numerical calculations.

PACS:78.67.Pt, 73.20.Mf

Keywords: nanophotonics, photonic crystals, surface states.

Received 18.10.2013

Сведения об авторах

1. Бессонов Владимир Олегович — канд. физ.-мат. наук, н.с.; тел.: (495)955-46-28, (495) 939-39-10, e-mail: vbessonov@inbox.ru, bessonov@nanolab.phys.msu.ru.
2. Соболева Ирина Владимировна — канд. физ.-мат. наук, ассистент; тел.: (495)955-46-28, (495) 939-39-10, e-mail: soboleva@nanolab.phys.msu.ru.
3. Афиногенов Борис Игоревич — аспирант, тел.: (495) 939-39-10, e-mail: afinogenov@nanolab.phys.msu.ru.
4. Гулькин Дмитрий Николаевич — студент тел.: (495) 939-39-10, e-mail: gulkin@nanolab.phys.msu.ru.
5. Шилкин Даниил Александрович — студент тел.: (495) 939-39-10, e-mail: shilkin@nanolab.phys.msu.ru.
6. Ле Антон Тханевич — студент тел.: (495) 939-39-10, e-mail: le@nanolab.phys.msu.ru.
7. Федянин Андрей Анатольевич — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-39-10, e-mail: fedyanin@nanolab.phys.msu.ru.