

Поверхностные плазмон–поляритоны в гибридных структурах, содержащих топологические изоляторы с аксионным эффектом

Д. О. Игнатьева^{1,2,*}, А. Н. Калиш^{1,2}, А. К. Звездин³, В. И. Белотелов^{1,2}

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

²Российский квантовый центр, Россия, 143025, Москва, д. Сколково, ул. Новая, 100А

³Институт общей физики РАН имени А. Н. Прохорова, Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38

Исследованы свойства поверхностных плазмон–поляритонов, возбуждаемых в двух- и трехслойных структурах, содержащих топологические изоляторы с аксионным эффектом. Обнаружено изменение поляризации плазмонов в таких структурах и выявлены условия усиления поляризационных эффектов.

PACS: 42.25.Ja

УДК: 535.016.

Ключевые слова: плазмон–поляритон, топологический изолятор, аксионный эффект, поляризация.

Поверхностные плазмон–поляритоны представляют собой электромагнитные волны, распространяющиеся вдоль границы раздела металлов и диэлектриков [1]. Они обладают высокой чувствительностью к оптическим свойствам сред, в которых распространяются, за счет чего достигается усиление ряда оптических эффектов, связанных с влиянием на тензор диэлектрической проницаемости магнитооптических [2, 3], оптически активных [4, 5], хиральных [6] и других свойств веществ. В данной работе исследуется влияние аксионного эффекта в топологических изоляторах (ТИ) на свойства поверхностных плазмон–поляритонных мод.

Топологические изоляторы представляют собой зонные изоляторы (диэлектрики), обладающие поверхностными проводящими состояниями [7, 8]. Данными свойствами характеризуются, в частности, такие вещества, как $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$, $\alpha\text{-Sn}$, Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 и другие. При этом возмущение временной инверсии (например, при внесении образца в магнитное поле или внедрении примесей в него) в топологических изоляторах вызывает возникновение магнитоэлектрического аксионного эффекта. Аксионный эффект проявляется в связи электрических и магнитных компонент электромагнитного поля волны и описывается лагранжианом $L = \frac{\alpha\Theta}{4\pi^2}(\mathbf{E} \cdot \mathbf{B})$, где α – постоянная тонкой структуры, – т. н. квантованный аксионный угол, величина которого кратна нечетному числу π . Материальные уравнения для топологического изолятора с аксионным эффектом могут быть записаны в следующем виде:

$$\mathbf{D} = \epsilon\mathbf{E} + \bar{\alpha}\mathbf{B} \quad (1)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{B} - \bar{\alpha}\mathbf{E} \quad (2)$$

где $\bar{\alpha} = \alpha \frac{\Theta}{\pi}$.

Можно показать, что волновое уравнение для распространения электромагнитной волны внутри тополо-

гического изолятора с аксионным эффектом не содержит каких-либо членов, связанных с аксионным эффектом, и, следовательно, аксионный эффект не влияет на электродинамику в объеме среды (поляризацию и постоянную распространения волны) при любых направлениях распространения и поляризациях излучения. В то же время на поверхности топологического изолятора за счет аксионного эффекта возникают эффективные плотности зарядов и токов. Таким образом, аксионный эффект может проявляться на границе со средой, не обладающей аксионными свойствами, например, при отражении или преломлении [9–11]. Особый интерес представляет случай, когда электромагнитная волна взаимодействует с аксионным изолятором не однократно, а постоянно, распространяясь вдоль его поверхности. Именно этот случай рассматривается в данной работе, посвященной изучению свойств поверхностных плазмон–поляритонов, распространяющихся вдоль границы топологического изолятора с аксионным эффектом и металла.

Дисперсионные, поляризационные и локализационные свойства собственных мод плазмонной структуры «топологический изолятор/металл» могут быть получены при решении уравнений Максвелла с соответствующими граничными условиями. Для простоты аналитическое описание выполнено в линейном приближении по малому параметру, в качестве которого выступает постоянная тонкой структуры $\alpha = 1/137 \ll 1$. Можно показать, что дисперсионное соотношение при этом не содержит членов, линейных по α , поэтому аксионный эффект практически не оказывает влияния на постоянную распространения плазмон–поляритонов β .

Решение задачи на собственные значения показывает, что за счет наличия аксионного эффекта происходит изменение поляризации плазмонных мод такой структуры, и TM -мода приобретает небольшие по величине TE -добавки. Это означает, что поляризованная эллиптически в отсутствие аксионного эффекта плазмон–поляритонная TM -волна (сдвиг фаз между компонентами электрического поля в обычном случае равен $\pi/2$) испытывает наклон эллипса поляризации

*E-mail: ignatyeva@physics.msu.ru

за счет аксионного эффекта на угол

$$\varphi \approx \bar{\alpha} \frac{\varepsilon_{TI}}{\beta(\varepsilon_{TI} - \varepsilon_m)} \quad (3)$$

вокруг оси, направленной вдоль направления распространения волны, где β — безразмерная постоянная распространения, а соответствующие отношение TE и TM компонент при этом равно:

$$\nu = \frac{E_{TE}}{H_{TM}} = \frac{\bar{\alpha}}{\varepsilon_{TI} - \varepsilon_m}, \quad (4)$$

Численные оценки показывают, что величина ν невелика и имеет порядок 10^{-4} , так как абсолютные значения диэлектрических проницаемостей топологического изолятора и металла порядка нескольких десятков. Поэтому для экспериментального наблюдения изменения поляризации плазмон–поляритонов за счет аксионного эффекта важно найти условия усиления этого эффекта.

Для этого могут быть использованы трехслойные структуры типа ТИ–металл–диэлектрик. В подобных трехслойных структурах возможно возбуждение двух типов мод, соответствующих двум решениям дисперсионного уравнения для поверхностных плазмон–поляритонов: мода, имеющая меньшее значение постоянной распространения — т. н. быстрая мода (в случае симметричных структур она имеет антисимметричный профиль), и мода с большим значением постоянной распространения — т. н. медленная мода (в случае симметричных структур характеризуется симметричным профилем). В несимметричных структурах быстрая мода имеет отсечку и не может возбуждаться для толщин металла, меньших некоторого порогового значения, а в случае значительной разницы диэлектрических проницаемостей сред, окружающих металл, не существует вообще. В то же время для любых комбинаций диэлектрических проницаемостей и толщин металлической пленки может быть возбуждена т. н. медленная мода, соответствующая верхней ветви решения дисперсионного уравнения.

Расчеты показывают, что в симметричных плазмонных структурах, в которых металл окружен двумя одинаковыми топологическими изоляторами с одинаковым аксионным углом, поляризационные эффекты сильнее проявляются для медленных мод. Это означает, что и в несимметричных трехслойных плазмонных структурах аксионные эффекты также могут проявляться достаточно сильно. На рис. 1 изображены результаты расчета зависимости отношения TE/TM компонент

на границе ТИ для следующих типов структур: воздух/золото/ТИ (диэлектрическая проницаемость топологического изолятора $\varepsilon_{TI} = 25$) — зеленая кривая; диэлектрик ($\varepsilon_d = 25$)/золото/ТИ — красная кривая; диэлектрик ($\varepsilon_d = 27$)/золото/ТИ — синяя кривая. Численное моделирование выполнено для длины волны 1 мкм. На основе результатов расчетов можно сделать вывод о том, что поляризационные эффекты усиливаются в несимметричной структуре с диэлектриком с меньшим показателем преломления.

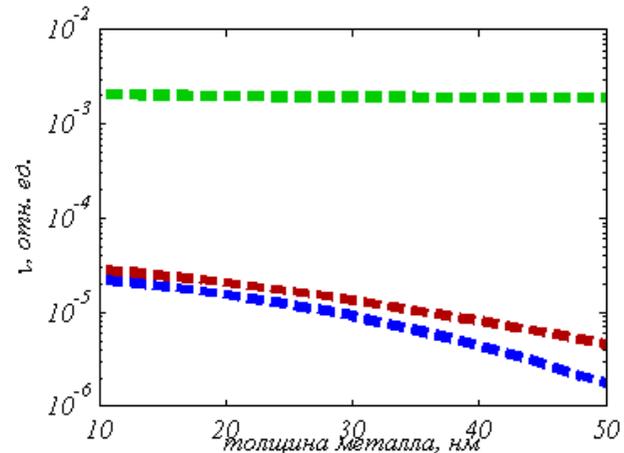


Рис. 1: Зависимость отношения TE/TM компонент на границе ТИ в разных типах несимметричных структур ТИ–металл–диэлектрик: в структуре с диэлектриком меньшим (зеленая кривая), с одинаковым (красная кривая) и большим (синяя кривая), чем у ТИ, показателем преломления

Таким образом, в двух- и трехслойных плазмонных структурах, содержащих топологические изоляторы, за счет аксионного эффекта изменяется поляризация поверхностных плазмон–поляритонных мод, в то время как их дисперсия и локализация остаются практически неизменными. При этом в существенно несимметричной структуре топологический изолятор–золото–воздух соотношение TE/TM компонент увеличивается на два порядка по сравнению с симметричной структурой. Кроме того, такая структура оказывается проще для возможной экспериментальной реализации и позволит наблюдать аксионный эффект оптическими методами.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 14-32-00010).

- [1] Maier S. A. Plasmonics: Fundamentals and Applications. Springer Science, 2007.
 [2] Belotelov V. I. et al. JETP. **137**. P. 932. (2010).
 [3] Kalish A. et al. Laser Physics. **24**. P. 094006. (2014).
 [4] Sukhorukov A. P., Ignatyeva D. O., Kalish A. N. J.

- Infrared Millim. Terahertz Waves. **32**. P. 1223. (2011).
 [5] Ignatyeva D. O. et al. Phys. Rev. B. **85**. P. 043804. (2012).
 [6] Mi G., Van V. Optics Letters. **39**. P. 2028. (2014).
 [7] Hasan M. Z., Kane C. L. Reviews of Modern Physics.

82. P. 3045. (2010).
 [8] Moore J. Nature Physics. **5**, N 6. P. 378. (2009).
 [9] Tse W.-K., MacDonald A. Physical Review Letters. **105**. P. 057401. (2010).
 [10] Chang. M.-C., Yang M.-F. Physical Review B. **80**. P. 113304. (2009).
 [11] Liu F., Xu J., Yang Y. JOSA B. **31**. P. 735. (2014).

Surface plasmon–polaritons in hybrid structures containing topological insulators with axion effect

D. O. Ignatyeva^{1,2,a}, A. N. Kalish^{1,2}, A. K. Zvezdin³, V. I. Belotelov^{1,2}

¹*Department of photonics and microwave physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
 Moscow 119991, Russia*

²*Russian Quantum Center, 143025, Russia, Moscow, Skolkovo, Novaya str. 100A*

³*Prokhorov General Physics Institute RAS, Russia, 119991, Moscow, Vavilova, 38
 E-mail: ^aignatyeva@physics.msu.ru*

Properties of surface plasmon–polaritons excited in two and three-layered structures containing topological insulators with axion effect were investigated. The plasmon polarization rotation was revealed and the conditions for the polarization effects enhancement were found.

PACS: 42.25.Ja

Keywords: surface plasmon-polariton, topological insulator, axion effect, polarization.

Сведения об авторах

1. Игнатъева Дарья Олеговна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495)939-33-17, e-mail: ignatyeva@physics.msu.ru.
2. Калиш Андрей Николаевич — канд. физ.-мат. наук, т. науч. сотрудник; тел.: (495)939-33-17, e-mail: kalish@physics.msu.ru.
3. Звездин Анатолий Константинович — доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (499) 135-41-48.
4. Белотелов Владимир Игоревич — доктор физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495)939-33-17.