

Полное поглощение света в структурах «металл-диэлектрик-металл», интегрированных в плоскопараллельный волновод

Е. А. Безус

*Институт систем обработки
изображений РАН — филиал
федерального государственного
учреждения «Федеральный научно-
исследовательский центр
«Кристаллография и фотоника»
Российской академии наук»
Самара, Россия
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
evgeni.bezus@gmail.com*

Д. А. Быков

*Институт систем обработки
изображений РАН — филиал
федерального государственного
учреждения «Федеральный научно-
исследовательский центр
«Кристаллография и фотоника»
Российской академии наук»
Самара, Россия
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
bykovd@gmail.com*

Е. А. Кадомина

*Институт систем обработки
изображений РАН — филиал
федерального государственного
учреждения «Федеральный научно-
исследовательский центр
«Кристаллография и фотоника»
Российской академии наук»
Самара, Россия
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
kadamina_elen@mail.ru*

Л. Л. Досколович

*Институт систем обработки
изображений РАН — филиал
федерального государственного
учреждения «Федеральный научно-
исследовательский центр
«Кристаллография и фотоника»
Российской академии наук»
Самара, Россия
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
leonid@ipsiras.ru*

Аннотация — Предложены и исследованы интегральные структуры «металл-диэлектрик-металл» (МДМ-структуры), ориентированные на работу с модами плоскопараллельных диэлектрических волноводов. МДМ-структуры состоят из двух металлических «полос», «погруженных» в диэлектрический волноводный слой. Показано, что при правильном выборе геометрии падения волноводной моды, ширины металлических полос и расстояния между ними можно добиться полного поглощения падающей волны. Предлагаемые планарные МДМ-структуры могут найти применение в качестве поглотителей (абсорберов) или фильтров в интегральных оптических схемах.

Ключевые слова — структура «металл-диэлектрик-металл», волноводная мода, полное поглощение, резонанс

1. ВВЕДЕНИЕ

Поглощение электромагнитного излучения относится к числу наиболее фундаментальных эффектов в оптике и нанофотонике. Поглотители (абсорберы) света на основе различных структур фотоники были предложены для применения в различных практических приложениях, в частности, для создания т.н. структурного цвета, химических и биомедицинских датчиков, структур фотовольтаики и аналоговых оптических дифференциаторов [1, 2]. Одной из простейших структур, обеспечивающих полное поглощение света при определенных длинах волн и углах падения, является структура «металл-диэлектрик-металл» (МДМ-структура), состоящая из диэлектрического слоя,

расположенного между двумя металлическими слоями [3–5]. Используя модель многлучевой интерференции, можно показать, что при фиксированных материалах, длине волны и угле падения волны, падающей на структуру, всегда можно добиться нулевого коэффициента отражения (а в случае достаточно толстого нижнего металлического слоя – единичного поглощения) за счет выбора толщин верхнего металлического и диэлектрического слоев МДМ-структуры [6, 7].

В настоящей работе предлагаются и исследуются интегральные МДМ-структуры, предназначенные для работы с модами плоскопараллельного диэлектрического волновода. Эта интегральная платформа привлекла значительное внимание исследователей в последнее десятилетие, в частности, были предложены и исследованы различные элементы нанофотоники для волноводных мод, включая делители пучка, линзы, резонансные фильтры, аналоговые оптические дифференциаторы и интеграторы и др.

2. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МДМ-СТРУКТУРЫ ДЛЯ МОД ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ

Геометрия предлагаемой интегральной МДМ-структуры представлена на врезке на рис. 1. Структура состоит из двух металлических «полос», «погруженных» в одномодовый плоскопараллельный диэлектрический волновод. В настоящей работе рассматривается пример со следующими параметрами: толщина волновода

$h = 100$ нм, показатели преломления волноводного слоя, области над структурой и подложки $n_{wg} = 3,32$ (фосфид галлия), $n_{sup} = 1$ и $n_{sub} = 1,45$ соответственно, материал металлических полос – серебро (диэлектрическая проницаемость $\epsilon_m = -18,125 + 0,509i$), длина волны в свободном пространстве $\lambda = 630$ нм. При указанных параметрах в волноводе существует ТЕ-поляризованная мода с эффективным показателем преломления (константой распространения, нормированной на волновое число) $n_{eff,TE} = 2,756$. Отметим, что приведенные параметры не являются уникальными и результаты, аналогичные приведенным ниже, могут быть получены для различных сочетаний материалов структуры и длин волн падающего излучения.

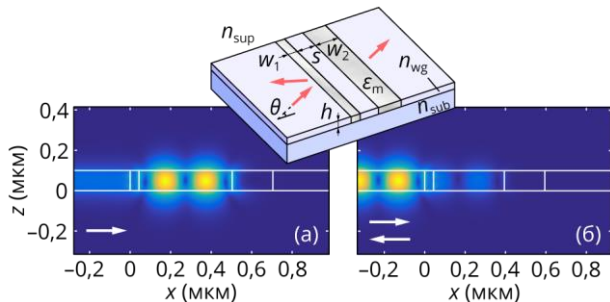


Рис. 1. Распределения магнитного поля в двух интегральных МДМ-структурах: обеспечивающей (а) и не обеспечивающей (б) полное поглощение падающей ТЕ-поляризованной моды. На врезке показана геометрия структуры

Рассмотрим наклонное падение ТЕ-поляризованной моды на структуру при фиксированном угле падения $\theta = 55^\circ$. При указанном угле падения при дифракции моды на структуре отсутствуют рассеяние падающей волны из волновода (в области над и под структурой) и возбуждение ТМ-поляризованных отраженной и прошедшей мод. Теоретический анализ на основе модели связанных волн, аналогичный анализу, проведенному в работе [6], показывает, что при фиксированной ширине правой металлической полосы можно выбрать значения ширин левой металлической полосы и части диэлектрического волновода, разделяющей металлические полосы, обеспечивающие нулевое отражение (и, при достаточно большой ширине w_2 , полное поглощение падающей моды). В частности, на рис. 1(а) показано распределение магнитного поля в структуре с параметрами $w_1 = 44$ нм, $s = 460$ нм, $w_2 = 200$ нм, обеспечивающими полное поглощение (при выбранном значении w_2 пропускание является пренебрежимо малым). Указанное распределение было рассчитано с помощью собственной реализации неперриодического варианта метода фурье-мод [8]. Из рис. 1(а) видно, что, поскольку падающая волна полностью поглощается в структуре, отраженная волна отсутствует, и, как следствие, отсутствует интерференция слева от интегральной МДМ-структуры (при $x < 0$). Для сравнения на рис. 1(б) показано аналогичное распределение поля в МДМ-структуре с другим значением ширины $s = 350$ нм, в которой

полное поглощение не происходит (отражение превышает 94%). В этом случае слева от структуры хорошо видна интерференция между падающей и отраженной волноводными модами.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе были предложены и исследованы структуры «металл-диэлектрик-металл», интегрированные в плоскопараллельный диэлектрический волновод. Было показано, что такие интегральные МДМ-структуры могут демонстрировать резонансное полное поглощение падающей ТЕ-поляризованной моды волновода. Предлагаемые планарные МДМ-резонаторы могут быть использованы в качестве поглотителей (абсорберов) или фильтров в интегральных оптических схемах на платформе диэлектрических плоскопараллельных волноводов. Наличие нулей коэффициента отражения также позволяет использовать такие структуры в качестве интегральных аналоговых оптических дифференциаторов. По мнению авторов, представленные результаты могут быть распространены на другие платформы интегральной нанофотоники, в частности, на платформу блоховских поверхностных волн, поддерживаемых поверхностью фотонных кристаллов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящая работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00514, исследование интегральных МДМ-структур) и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, реализация моделирующего программного обеспечения).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Cui, Y. Plasmonic and metamaterial structures as electromagnetic absorbers / Y.Cui, Y. He, Y. Jin, F. Ding, L. Yang, Y. Ye, S. Zhong, Y. Lin, S. He // *Laser Photonics Rev.* – 2014. – Vol. 8(4). – P. 495–520.
- [2] Ng, C. Plasmonic near-complete optical absorption and its applications / C. Ng, L. Wesemann, E. Panchenko, J. Song, T.J. Davis, A. Roberts, D.E. Gómez // *Adv. Opt. Mater.* – 2019. – Vol. 7(14). – P. 1801660.
- [3] Yan, M. Metal-insulator-metal light absorber: a continuous structure / M. Yan // *J. Opt.* – 2013. – Vol. 15(2). – P. 025006.
- [4] Shu, S. Triple-layer Fabry-Perot absorber with near-perfect absorption in visible and near-infrared regime / S. Shu, Z. Li, Y.Y. Li // *Opt. Express.* – 2013. – Vol. 21(21). – P. 25307–25315.
- [5] Li, Z. Large-area, lithography-free super absorbers and color filters at visible frequencies using ultrathin metallic films / Z. Li, S. Butun, K. Aydin // *ACS Photonics.* – 2015. – Vol. 2(2). – P. 183–188.
- [6] Kashapov, A.I. Spatial differentiation of optical beams using a resonant metal-dielectric-metal structure / A.I. Kashapov, L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, D.A. Bykov, V.A. Soifer // *J. Opt.* – 2021. – Vol. 23(2). – P. 023501.
- [7] Кашапов, А.И. Оптический дифференциатор на основе трехслойной металлодиэлектрической структуры / А.И. Кашапов, Л.Л. Досколович, Д.А. Быков, Е.А. Безус, Д.В. Нестеренко // *Компьютерная оптика.* – 2021. – Т. 45, № 3. – С. 356–363. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-824.
- [8] Silberstein, E. Use of grating theories in integrated optics / E. Silberstein, P. Lalanne, J.-P. Hugonin, Q. Cao // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2001. – Vol. 18(11). – P. 2865–2875.