

09

## **Внутрирезонаторные металлические контакты с уменьшенным поглощением света: конструирование оптических мод лазера на основе таммовских плазмонов**

© М.А. Калитеевский, А.А. Лазаренко

Санкт-Петербургский Академический университет  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: lazarenko@spbau.ru

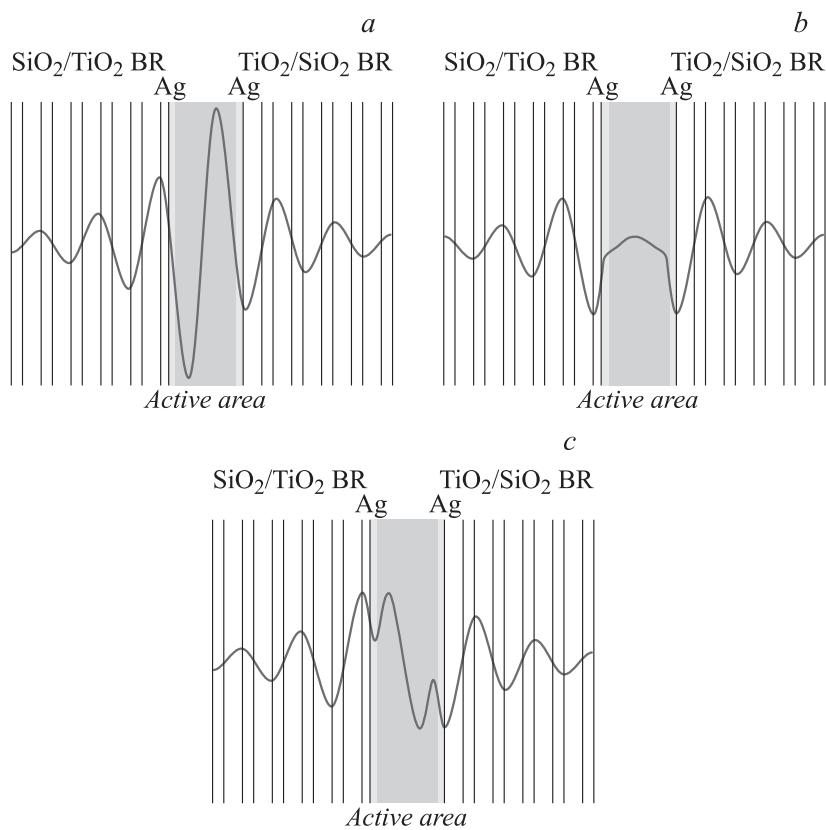
Поступило в Редакцию 29 марта 2013 г.

Считается, что металлические слои как элементы оптоэлектронных приборов препятствуют лазерной генерации вследствие поглощения света в металле. Предложена конструкция микрорезонатора с двумя металлическими слоями внутри резонатора, которые могут использоваться в качестве контактов для электрической накачки лазера. Дизайн оптической моды микрорезонатора, основанный на использовании особенностей таммовских плазмонов, обеспечивает малое поглощение света вследствие расположения металлических слоев в узлах электрического поля оптической моды микрорезонатора. Предложенная конструкция может использоваться для создания вертикально излучающих лазеров с металлическими контактами.

Таммовские плазмоны (ТП) — состояния электромагнитного поля, локализованные на границе металла и брэгговского отражателя, были недавно теоретически предсказаны [1] и экспериментально обнаружены [2]. ТП являются аналогами мод резонатора Фабри–Перо. Структуры для реализации ТП легко изготовить путем нанесения металлического слоя на поверхность брэгговского отражателя. Использование ТП позволяет локализовать свет в микрорезонаторах в латеральном направлении [3] методами обычной литографии и без необходимости травления многослойных структур микронной толщины. Связь экситона в квантовой точке с оптической модой „фотонной точки“ на основе ТП использовалась для создания источников одиночных фотонов [4].

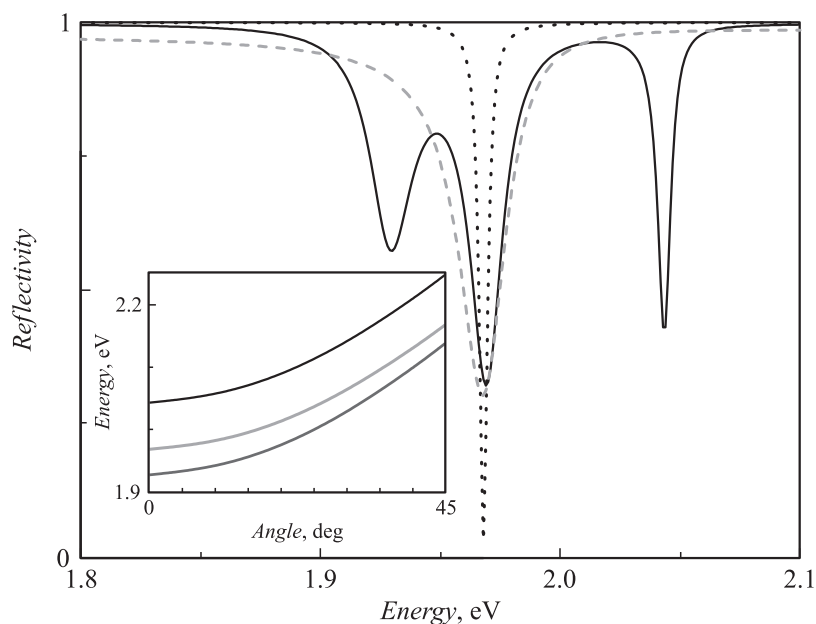
В повседневной жизни металлические зеркала являются наиболее распространенным типом светоотражающего элемента, однако в

оптоэлектронике для создания лазеров металлические компоненты широко не используются. Основное препятствие для использования металлических элементов — это поглощение света в металле и нагрев металла, ведущий к катастрофической деградации зеркал. В то же время применение металлических контактов особенно интересно для создания перспективных лазеров на основе органических материалов, где требуется большая плотность тока накачки. В органических материалах сила осциллятора экситона и его энергия связи существенно больше [5], чем в полупроводниках, что делает экситоны в органических материалах стабильными при комнатной температуре. Поляритонный лазер, работающий при комнатной температуре, был недавно продемонстрирован экспериментально [6]. Органические оптоэлектронные приборы особенно чувствительны к нагреву вследствие высокой химической активности и малой теплопроводности органических материалов. Считалось, что металлические компоненты несовместимы с оптической когерентностью и лазерной генерацией [7]. Несмотря на это, гибридные металлоорганические структуры являются предметом интенсивных исследований. При этом рассматриваются структуры 2 типов: традиционные структуры на основе поверхностных плазмонов [8,9] или структуры на основе таммовских плазмонов. В последнем случае органические и металлические слои находятся в микрорезонаторе и ограничены брэгговскими отражателями (БО) [10]. Недавно был экспериментально продемонстрирован лазер на основе таммовской структуры, включающей в себя слой серебра и брэгговский отражатель GaAlAs, работающий при температуре жидкого азота [11]. Особенностью ТП, локализованного на границе тонкого слоя металла и брэгговского отражателя, является формирование узла электрического поля вблизи слоя металла. Таким образом, поглощение света в такой структуре существенно уменьшается, что делает возможным экспериментальное наблюдение макроскопической оптической когерентности [12] и лазерной генерации [13] в структурах с одиночным металлическим слоем. Для обеспечения электрической накачки лазера необходимо наличие двух металлических слоев в структуре. Целью данной работы является разработка конструкции лазера на основе микрорезонатора с двумя металлическими контактными слоями, расположенными внутри резонатора, которая обеспечивает малое затухание собственной оптической моды микрорезонатора для наблюдения лазерной генерации.



**Рис. 1.** Схема структуры: 2 слоя серебра толщиной 40 nm расположены на границах между брэгговскими отражателями и активной средой. Толщины слоев  $\text{TiO}_2$  (71.6 nm) и  $\text{SiO}_2$  (108.6 nm) соответствуют брэгговской длине волны 30 nm. Толщина активной области из DCM 314 nm. Сплошными линиями показаны профили электрического поля для 3 собственных мод микрорезонатора с собственными энергиями: *a* —  $2043 - i3.252$  meV — мода с минимальным затуханием и максимальным перекрытием с активной областью; *b* —  $1969 - i8.110$  meV; *c* —  $1929 - i10.66$  meV.

Структура, использованная для моделирования, показана на рис. 1. Активная область из оптически активного органического материала DCM + Alq3 заключена между двумя слоями серебра и окружена



**Рис. 2.** Спектры отражения структуры, показанной на рис. 1. Для сравнения пунктирной и штриховой линиями показаны спектры отражения микрорезонатора без металлических слоев и структуры, состоящей из одного металлического слоя, напыленного на брэгговский отражатель. На вставке показаны зависимости энергий 3 собственных мод структуры от угла падения.

$\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  БО. На каждой из границ между металлом и БО формируется ТП. Еще одна мода Фабри–Перо локализована между двумя слоями серебра. Если собственные частоты 3 мод близки, появляются 3 гибридные моды, и расщепление между ними определяется толщиной металлических слоев.

На рис. 2 показаны спектры отражения от структуры, показанной на рис. 1. В спектре видны 3 провала, соответствующие 3 собственным модам; ширины 3 гибридных мод различны. Для сравнения показаны спектры отражения от микрорезонатора без металлических слоев и БО, покрытого слоем металла. Шириной каждой гибридной особенности больше, чем ширина моды микрорезонатора, но меньше, чем ширина

таммовского плазмона. Все три моды характеризуются параболической дисперсией, показанной на вставке к рис. 1.

Распределение поля для 3 мод существенно различается. Собственная мода, которую можно использовать для осуществления лазерной генерации, должна обладать следующими свойствами: во-первых, минимальным перекрытием с металлическими слоями (чтобы уменьшить поглощение) и, во-вторых, максимальным перекрытием с активной областью (для повышения усиления света). Профиль поля собственной моды можно менять путем подгонки фаз, набираемых светом при прохождении разных слоев. Для того чтобы оптимизировать параметры структуры, можно проанализировать комплексные собственные частоты собственных мод. Для нахождения комплексных собственных частот можно воспользоваться методом матриц переноса и граничными условиями, согласно которым свет на структуру не падает [14]:

$$A \begin{pmatrix} 1 \\ -n_f \end{pmatrix} = \hat{M}(w) \begin{pmatrix} n_i \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $\hat{M}$  — матрица переноса через структуру;  $n_i$  и  $n_f$  — показатели преломления сред, ограничивающих структуру;  $A$  — некоторая константа. Оптимизированная мода должна иметь наименьшее значение затухания, определяемое мнимой частью комплексной частоты. На рис. 3 показаны значения действительной и мнимой части комплексной собственной частоты моды, которая локализована в активной области, от расстояния между металлическими слоями. Можно видеть, что существует оптимальная толщина активной области, для которой затухание минимально: для толщины 314 nm комплексная частота моды с минимальным затуханием составляет  $2043 - i3.252$  meV. Профиль электрического поля такой моды изображен на рис. 1, *a*. Эта мода имеет минимальное перекрытие с металлическими слоями и максимальное перекрытие с активной областью. Рис. 1, *b* и *c* показывают профили электрического поля для мод с собственными энергиями  $1969 - i8.110$  и  $1929 - i10.66$  meV соответственно. Можно видеть, что для этих мод перекрытие с активной областью меньше, а с металлическими слоями больше, чем для оптимизированной моды, профиль которой показан на рис. 1, *a*. Таким образом, структура обеспечивает селекцию мод: пороговая накачка для структуры на рис. 1, *a* будет существенно меньше, чем для других мод. Отметим, что для оптимизированной гибридной моды

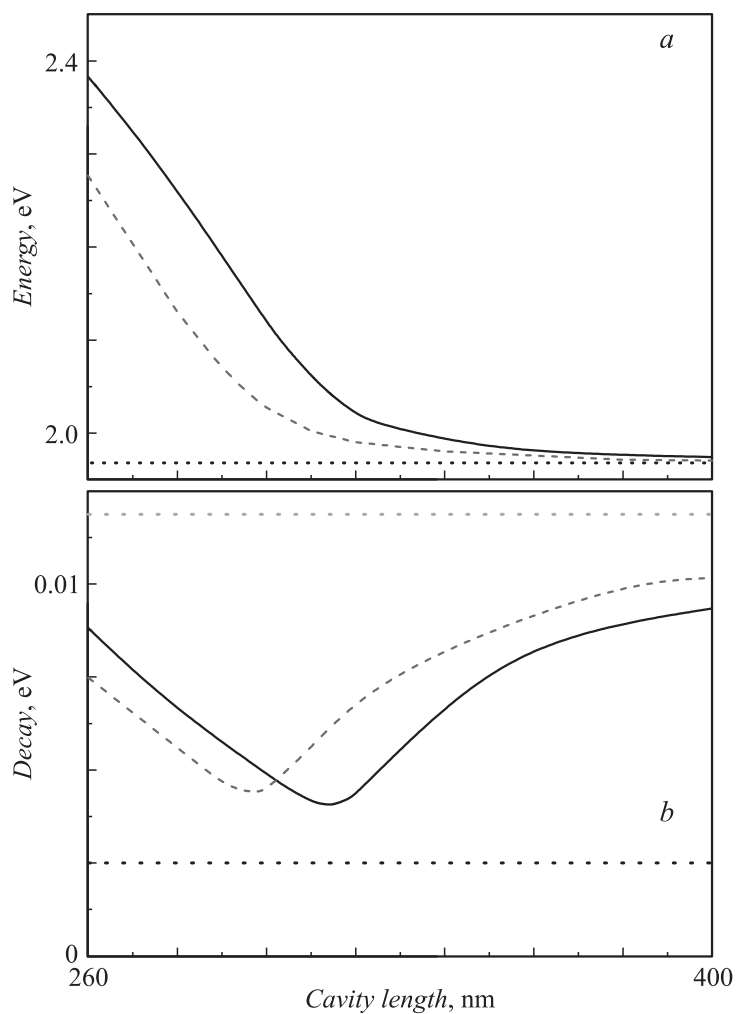
структуры с металлическими слоями, затухание увеличивается только на 50% по сравнению с непоглощающим микрорезонатором.

Расположение металлических слоев в узлах электрического поля собственной моды может быть использовано для создания структур не только с 2, но и с большим количеством контактов в активной области лазера. Штриховая линия на рис. 3 показывает действительную и мнимую части комплексной энергии собственной моды для структуры, показанной на рис. 1, содержащей дополнительный металлический слой толщиной 20 nm, расположенный в центре активной области, где имеет место узел электрического поля. Можно видеть, что для толщины активной области 298 nm затухание имеет минимум и комплексная собственная энергия имеет величину  $2034 - i3.6$  meV, поскольку дополнительный металлический слой расположен в узле электрического поля, его добавление не приводит к существенному увеличению поглощения.

Поскольку контактные металлические слои непосредственно контактируют с активной областью, омическое сопротивление структуры существенно уменьшено, и КПД лазера повышен. Кроме этого, металлические контакты рассмотренного типа обеспечивают равномерное распределение тока накачки в активной области большого латерального размера.

Несмотря на то что предложенная конструкция предназначена для изготовления лазера с электрической накачкой, характеристика структуры может производиться при оптической накачке. Необходимо отметить, что для рассмотренных структур коэффициент отражения света близок к единице для всех частот, кроме частот собственных мод. Для некоторых мод перекрытие оптической моды с активной областью мало. Единственной возможностью осуществить оптическую накачку такой структуры является резонансная накачка оптимизированной моды (показанной на рис. 1, *a*) при наклонном падении, причем частота света и угол падения должны удовлетворять дисперсионным соотношениям, приведенным на вставке к рис. 2.

Таким образом, мы теоретически продемонстрировали возможность лазерной генерации в микрорезонаторе с двумя и более металлическими слоями, помещенными внутрь активной области. Металлические слои могут служить для электрической накачки лазера. В предложенных лазерах может быть достигнута существенно более высокая эффективность и мощность, чем в субволновых лазерах на основе металлических нанорезонаторов [15].



**Рис. 3.** Зависимость резонансной энергии и затухания моды с минимальным затуханием, как функция толщины активной области для структуры с двумя металлическими слоями, показанной на рис. 1 (сплошная линия), и для структуры, в которой дополнительный металлический слой толщиной 20 nm помещен в центр микрорезонатора (штриховая линия). Пунктирными линиями показаны значения затухания для таммовского плазмона и для микрорезонатора без металлических слоев.

Продemonстрировано, что собственные моды структуры могут быть сконструированы таким образом, что поглощение света металлом в таких структурах существенно уменьшено. Предложенный дизайн структуры может быть использован для создания вертикально излучающих лазеров с металлическими контактами внутри активной области.

Работа поддержана РФФИ и FP7 IRSES.

## Список литературы

- [1] *Kaliteevski M., Iorsh I., Brand S. et al. // Phys. Rev. B. 2007. V. 76. P. 165 415.*
- [2] *Sasin M.E., Seisyan R.P., Kaliteevski M. et al. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92(25). P. 251 112.*
- [3] *Gazzano O., de Vasconcellos S. Michaelis, Gauthron K. et al. // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 107. P. 247 402.*
- [4] *Gazzano O., de Vasconcellos S. Michaelis, Gauthron K. et al. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. P. 232 111.*
- [5] *Lizdey D.G., Bradely D.D.C., Scolnik M.S. et al. // Nature. 1998. V. 395. P. 53–55.*
- [6] *Kena-Cohen S., Forrest S.R. // Nature photonics. 2010. V. 42. P. 371–375.*
- [7] *Wouters M. // Nature photonics. 2012. V. 6. P. 271.*
- [8] *Bellessa J., Bonand C., Plenet J.C., Mugnier J. // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. P. 036 404.*
- [9] *Guebrou S. Aberra, Symmonds C., Homeyer E., Plenet J.C., Garstein Yu.N., Agranovich V.M., Bellessa J. // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. P. 066 401.*
- [10] *Brückner R., Sudzius M., Hintischich S.I. et al. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. P. 062 101.*
- [11] *Symonds C., Lemaitre A., Senellart P. et al. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. P. 121 122.*
- [12] *Brückner R., Zakhidov A.A., Scholz R. et al. // Nature photonics. 2012. V. 6(5). P. 322–326.*
- [13] *Bruckner R., Zakhidov A.A., Scholz R., Sudzius M., Hintschich S.I., Frob H., Lyssenko V.G., Kaliteevski M., Leo K. // Nature photonics. (submitted 2013).*
- [14] *Beggs D.M., Kaliteevski N.A., Brand S., Abram R.A., Nikolaev V.V. // Phys. Rev. B. 2006. V. 73(3). P. 033 106.*
- [15] *Ding K., Hill M.T., Liu Z.C., Yin L.J., van Veldhoven P.J., Ning C.Z. // Optics Express. 2013. V. 21(4). P. 4729.*