

Демонстрация резонансных эффектов типа расщепления Аутлера–Таунса, электромагнитно-индуцированной прозрачности и резонансов Фано в деформированном волноводном резонаторе

А.В. Дышлюк^{1,2,3}

¹Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия,

²Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия,

³Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, Владивосток, Россия

Аннотация

Резонансные эффекты, аналогичные расщеплению Аутлера–Таунса, электромагнитно-индуцированной прозрачности и резонансам Фано, продемонстрированы в волноводном резонаторе Фабри–Перо, образованном изогнутым одномодовым световодом с металлизированными торцами. Показано, что данные эффекты возникают вследствие сильной связи между фундаментальной модой сердцевины и оболочечной модой шепчущей галереи. Полученные результаты открывают новые возможности в области построения функциональных элементов фотоники, использующих оболочечные моды изогнутых световодов, в частности, волоконно-оптических рефрактометров для био- и хемосенсорных применений.

Ключевые слова: расщепление Аутлера–Таунса, электромагнитно-индуцированная прозрачность, резонансы Фано, моды шепчущей галереи, изгиб одномодового световода, биосенсорика, хемосенсорика.

Цитирование: Дышлюк, А.В. Демонстрация резонансных эффектов типа расщепления Аутлера–Таунса, электромагнитно-индуцированной прозрачности и резонансов Фано в деформированном волноводном резонаторе / А.В. Дышлюк // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 1. – С. 35–41. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-1-35-41.

Введение

Рефрактометры на основе изогнутых одномодовых световодов – как с использованием явления поверхностного плазмонного резонанса [1–3], так и без его использования [4–7] – представляют значительный интерес для био- и хемосенсорных применений. Такие устройства используют связь между фундаментальной модой (ФМ) сердцевины и оболочечными модами шепчущей галереи (МШГ), возникающую вследствие изгиба световода. Помимо общих преимуществ волоконно-оптических датчиков (простота изготовления и интеграции с оптическими коммуникационными элементами, варьируемая длина измерительной базы, минимальные массогабаритные показатели, возможность проведения удалённых измерений, отсутствие подвижных элементов и, соответственно, необходимости их юстировки, низкая стоимость и пр. [8–10]), указанные измерительные устройства обладают также предельно простой оптической схемой и не требуют механической или химической обработки световода. С точки зрения метрологических характеристик они, однако, уступают объёмным плазмон-поляритонным рефрактометрическим системам, например, на основе схемы Кречмана [11, 12].

В последнее время значительное внимание исследователей в области оптики и фотоники направлено на эффекты, подобные резонансам Фано, которые наблюдаются в оптических [13–15] и плазмонных [16–18] системах, метаматериалах, метаповерхностях и др. [13, 16, 19, 20]. Интерес к таким резонансным явлениям обусловлен тем, что они приводят к резким изменениям в спектрах пропускания, отражения и рассеяния, что является весьма привлекательным с точки зрения создания сенсорных и коммутационных

оптических устройств. В настоящей работе впервые демонстрируются эффекты указанного типа, возникающие в волноводном резонаторе Фабри–Перо, образованном изогнутым одномодовым световодом с металлизированными торцами. По нашему мнению, данные эффекты открывают новые возможности в области построения волоконных рефрактометров на основе изогнутых световодов, что может привести к существенному улучшению их метрологических характеристик.

Численные результаты и их обсуждение

Для наиболее наглядной демонстрации и минимизации требующихся вычислительных ресурсов выберем в качестве простой модели планарный изогнутый световод (радиус изгиба R) с параметрами, близкими к параметрам стандартного одномодового волоконного световода $n_1 = 1,4504$, $d_1 = 4$ мкм, $n_2 = 1,4447$, $d_2 = 125$ мкм (рис. 1а). Поскольку такой световод является макроскопическим объектом с вполне определённым преимущественным направлением распространения света, для его моделирования удобно воспользоваться методом разложения по собственным модам. Данный метод реализован, например, в программном пакете Lumerical MODE SolutionsTM, которым мы и воспользовались при выполнении настоящей работы.

На рис. 1б приведены спектральные зависимости эффективного показателя преломления (ЭПП) четырёх мод рассматриваемого световода, рассчитанные при $R = 7,5$ мм. Как видно, для двух зависимостей наблюдается характерное антипересечение, которое является известным признаком сильной связи мод [21]. Наличие такой связи подтверждается также результа-

тами расчёта профилей соответствующих мод на длине волны $\lambda = 1,58$ мкм (вставки 2 и 3 на рис. 1б). Данные моды, очевидно, представляют результат гибридизации рассматриваемых по отдельности фундаментальной моды (ФМ) и оболочечной моды шепчущей галереи (МШГ), то есть возникают в результате связи между последними. Эта связь приводит к периодическому обмену мощностью между ФМ и МШГ, что иллюстрируется распределением амплитуды поля направляемого излучения в изогнутом световоде, приведённом на рис. 1в. В терминах гибридных мод, представленных на вставках 2 и 3 (рис. 1б), данный обмен соответствует их интерференционным биениям с периодом $\lambda/\Delta n$, где Δn – разность их ЭПП.

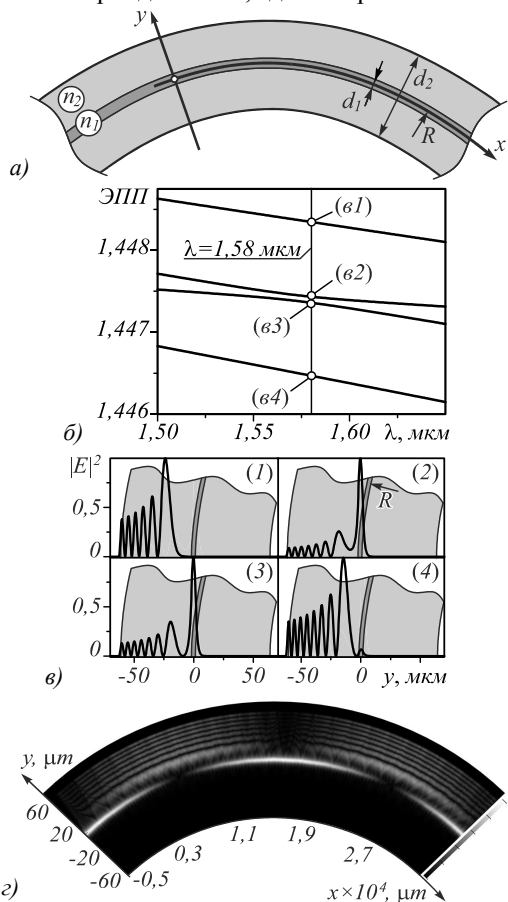


Рис. 1. Изогнутый одномодовый планарный световод: схематическое изображение (а); дисперсионные зависимости четырёх мод изогнутого ($R = 7,5$ мм) световода с эффективными показателями преломления, наиболее близкими к ЭПП фундаментальной моды аналогичного прямого световода (б); профили данных мод на длине волны $\lambda = 1,58$ мкм (в); распределение амплитуды электрического поля направляемого излучения в изогнутом световоде, рассчитанное при $\lambda = 1,58$ мкм, $R = 7,5$ мм (г)

На рис. 2б схематически изображена система двух связанных маятников, свободные колебания которых (при условии, что изначально первый из них колебался, а второй покоился) аналогичны периодическому обмену мощностью между связанными фундаментальной модой и оболочечной модой шепчущей галереи. Эффекты, подобные резонансам Фано, однако,

наблюдаются в механических системах в режиме вынужденных колебаний, когда вынуждающая сила приложена к одному из связанных осцилляторов [13, 22]. Для реализации аналогичного режима в изогнутом световоде сформируем продольный резонатор типа Фабри–Перо, нанеся плёнки из золота ([23]) толщиной h на оба конца участка изогнутого световода длиной L , как показано на рис. 2а.

Резонатор возбуждается прямым участком такого же световода, а прошедшее через него излучение вводится в выходной участок, также представляющий аналогичный прямой световод. Таким образом, исследуемей резонатор можно рассматривать как два связанных внутренних резонатора, один из которых возбуждается приложенной вынуждающей силой, что полностью соответствует представленной на рис. 2б механической аналогии.

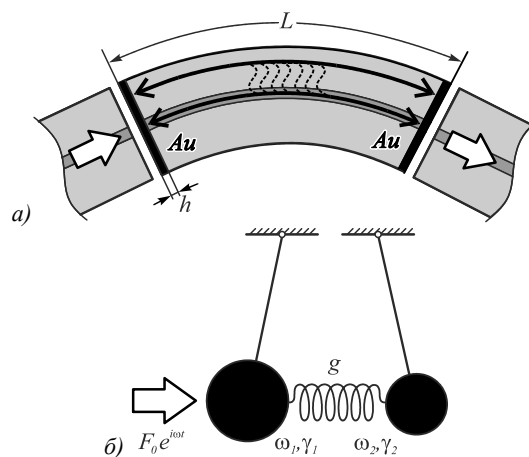


Рис. 2. Схематическое изображение резонатора Фабри–Перо на основе изогнутого одномодового световода (а) и его механическая аналогия (б)

На рис. 3 приведены спектры отражения и пропускания исследуемого резонатора, рассчитанные при $R = 7,3 \div 7,7$ мм, $L = 1$ мм, $h = 10$ нм. Как видно из рисунка, вблизи пиков пропускания резонатора наблюдаются либо вторичные пики с характерной для резонансов Фано асимметричной формой ($R = 7,4$ мм, $7,6$ мм), либо расщепление резонансов в виде резкого уменьшения пропускания и увеличения отражения на резонансной длине волны ($R = 7,5$ мм), что аналогично эффекту электромагнитно-индуцированной прозрачности (ЭИП), наблюдаемому в квантовых системах [13, 22]. На вставках (а)–(д) к рис. 3 приведены АЧХ маятника, к которому приложена вынуждающая сила (рис. 2б), для различных резонансных частот связанного маятника. Аналогия между оптической и механической системой очевидна.

Резкое демпфирование колебаний возбуждаемого осциллятора на резонансной частоте возникает вследствие деструктивной интерференции эффектов от вынуждающей силы и колебаний второго осциллятора [22]. Для иллюстрации этого механизма на вставках к рис. 3 приведены распределения амплитуды поля направляемого излучения в участке исследуемого резонатора длиной 4 мкм, рассчитанные на длине волны

максимального ($\lambda = 1,55194$ мкм, вставка 1) и минимального ($\lambda = 1,5519$ мкм, вставка 2) пропускания. Как видно из вставки 2, уменьшение амплитуды колебаний поля ФМ-резонатора сопровождается увеличением амплитуды колебания МШГ-резонатора, что полностью согласуется с механической аналогией.

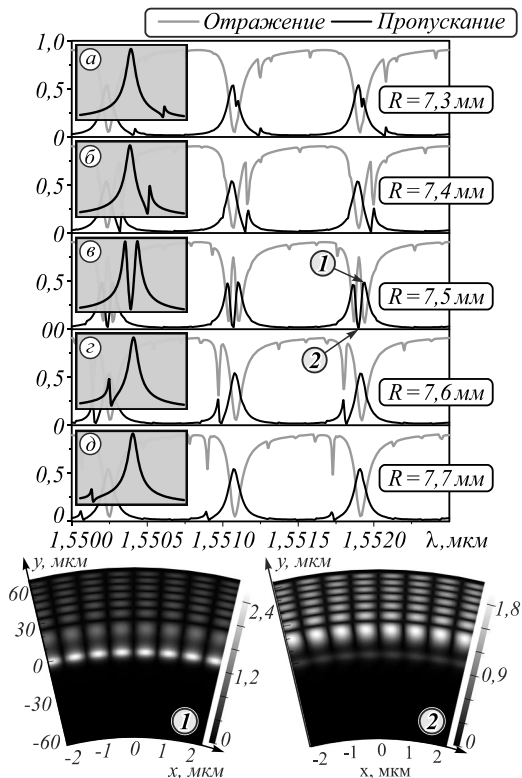


Рис. 3. Спектры отражения и пропускания исследуемого резонатора, рассчитанные при $R = 7,3; 7,4; 7,5; 7,6$ и $7,7$ мм, $L = 1$ мм, $h = 10$ нм, а также АЧХ маятника, к которому приложена вынуждающая сила (рис. 2б), рассчитанные $\omega_1 = 1, \gamma_1 = 0,035, \omega_2 = 1,12, \gamma_2 = 0,005, g = 0,045$ (а); $\omega_1 = 1, \gamma_1 = 0,035, \omega_2 = 1,06, \gamma_2 = 0,005, g = 0,045$ (б); $\omega_1 = 1, \gamma_1 = 0,035, \omega_2 = 0,995, \gamma_2 = 0,005, g = 0,045$ (в); $\omega_1 = 1, \gamma_1 = 0,035, \omega_2 = 0,92, \gamma_2 = 0,005, g = 0,045$ (г); $\omega_1 = 1, \gamma_1 = 0,035, \omega_2 = 0,85, \gamma_2 = 0,005, g = 0,045$ (д). На вставках снизу показано распределение амплитуды электрического поля направляемого излучения в участке резонатора длиной 4 мкм, рассчитанное на длине волны максимального (1) и минимального (2) пропускания ($R = 7,5$ мм)

Наблюдаемая перестройка резонансов возникает вследствие зависимости постоянных распространения МШГ и, следовательно, резонансных длин волн МШГ-резонатора от радиуса изгиба световода. Дисперсионные зависимости мод шепчущей галереи сдвигаются вниз (см. рис. 1б) при увеличении радиуса изгиба, что, помимо перестройки резонансов, приводит к двум дополнительным эффектам.

Во-первых, коэффициент связи между ФМ и МШГ в фиксированном спектральном диапазоне изменяется с изменением радиуса изгиба. Это приводит к тому, что резонансные эффекты типа Фано становятся более или менее выраженными при изменении R , как это видно из рис. 3. Во-вторых, поскольку обо-

лочка изогнутого световода поддерживает большое количество МШГ различного порядка (см. рис. 1б), такие эффекты возникают периодически – при тех значениях R , когда фундаментальная мода связывается с различными МШГ в выбранном спектральном диапазоне. Для иллюстрации последней особенности на рис. 4 приведены спектры отражения и пропускания исследуемого резонатора, рассчитанные при $R = 5,5; 6,4; 7,5$ и $8,8$ мм. Как следует из рисунка, расщепление резонансов происходит схожим образом при выбранных значениях R , однако сила связи между ФМ- и МШГ-резонаторами увеличивается, как это видно из усиления расщепления с уменьшением R .

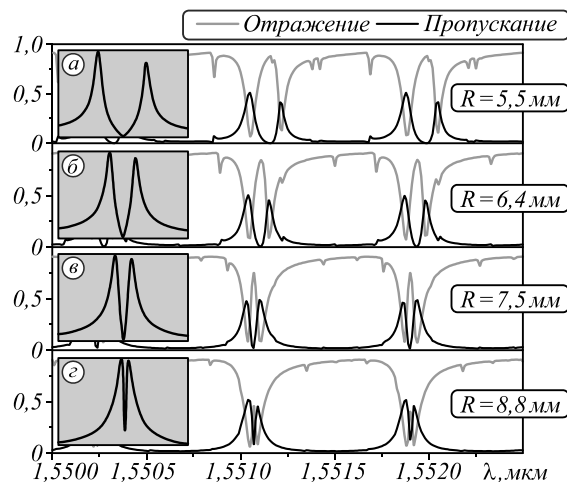


Рис. 4. Спектры отражения и пропускания исследуемого резонатора, рассчитанные при $R = 5,5; 6,4; 7,5$ и $8,8$ мм, $L = 1$ мм, $h = 10$ нм, а также АЧХ маятника, к которому приложена вынуждающая сила (рис. 2б), рассчитанные $\omega_1 = 1, \gamma_1 = 0,04, \omega_2 = 1, \gamma_2 = 0,003, g = 0,15$ (а); $\omega_1 = 1, \gamma_1 = 0,04, \omega_2 = 1, \gamma_2 = 0,003, g = 0,08$ (б); $\omega_1 = 1, \gamma_1 = 0,04, \omega_2 = 1, \gamma_2 = 0,003, g = 0,05$ (в); $\omega_1 = 1, \gamma_1 = 0,04, \omega_2 = 1, \gamma_2 = 0,003, g = 0,02$ (г)

При $R = 8,8; 7,5$ мм наблюдаемая в спектрах отражения и пропускания картина аналогична электромагнитно-индуцированной прозрачности, возникающей в режиме слабой связи [13, 22, 24]. Однако при $R = 6,4; 5,5$ мм вследствие более эффективного перекрытия профилей фундаментальной моды и МШГ, связь между ними и, следовательно, между ФМ- и МШГ-резонаторами становится более сильной. Наблюдаемая картина при этом приобретает вид, характерный для расщепления Аутлера–Таунса (Раби) [13, 24].

Для иллюстрации влияния толщины зеркал на рис. 5 показаны спектры отражения и пропускания исследуемого резонатора, полученные при $h = 2; 5; 10; 15$ и 20 нм, $R = 7,5$ мм, $L = 1$ мм.

Как видно из рис. 5, помимо ожидаемого уширения основных резонансных линий, возникающего вследствие уменьшения добротности резонатора, в спектрах наблюдаются также дополнительные узкие линии, количество и контрастность которых увеличиваются с уменьшением h . Эти линии возникают в результате слабой нерезонансной связи фундаментальной моды с МШГ различных порядков, постоянные

распространения которых отличаются от постоянной распространения ФМ.

Для иллюстрации такой связи на вставке 4 к рис. 1б приведён профиль гибридной моды изогнутого световода, который хоть и близок к профилю МШГ, рассматриваемой по отдельности, но, тем не менее, имеет слабовыраженный локальный максимум в области сердцевины световода. Это указывает на слабую степень гибридизации или слабую связь между фундаментальной модой и соответствующей МШГ.

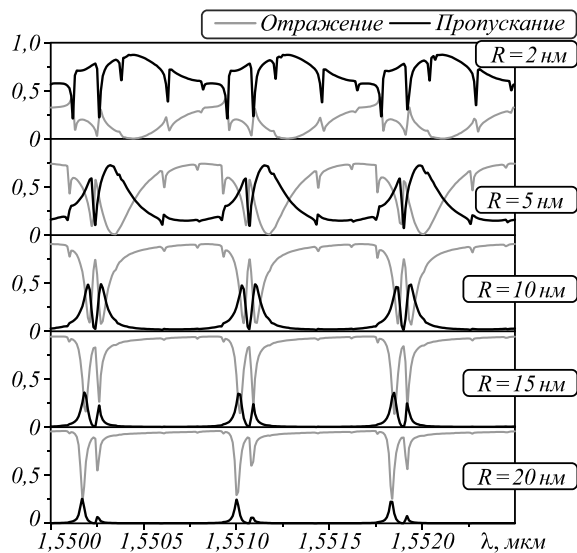


Рис. 5. Спектры отражения и пропускания исследуемого резонатора, рассчитанные при $h = 2; 5; 10; 15$ и 20 нм, $R = 7,5$ мм, $L = 1$ мм

Причина, по которой слабосвязанные МШГ-резонаторы оказывают более заметное влияние при уменьшении h , состоит в том, что в низкодобротном резонаторе сильно связанные внутренние ФМ- и МШГ-резонаторы не доминируют по интенсивности над слабосвязанными в такой степени, как это имеет место в высокодобротном резонаторе. По-видимому, это связано с тем, что, хотя сильно связанные моды и обмениваются мощностью полностью, этот обмен протекает достаточно медленно. Как видно из рис. 1в, для полной передачи мощности фундаментальной моды моде шепчущей галереи требуется расстояние около 10 мм. В низкодобротном резонаторе с небольшим количеством многократных отражений суммарная длина взаимодействия связанных мод может быть недостаточной для того, чтобы сильно связанная МШГ получила существенно больше энергии от фундаментальной моды, чем слабосвязанные МШГ. Последние моды обмениваются мощностью с ФМ в значительно меньшей степени, но гораздо быстрее [25], поэтому могут давать более заметный эффект в низкодобротном резонаторе. Другими словами, эффективность связи внутренних ФМ- и МШГ-резонаторов зависит от суммарной длины взаимодействия соответствующих мод, которая увеличивается с повышением коэффициента отражения зеркал. В частности, эффективность связи ФМ-резонатора с резонатором, образованным модой шепчущей галереи,

сильно связанной с фундаментальной модой, заметно увеличивается, как видно из усиления расщепления резонансов, с ростом h (рис. 5).

Длина взаимодействия связанных мод также зависит, конечно, и от длины резонатора, поэтому следует ожидать усиления связи внутренних ФМ- и МШГ-резонаторов с ростом L . Это действительно имеет место, что иллюстрируется рис. 6.

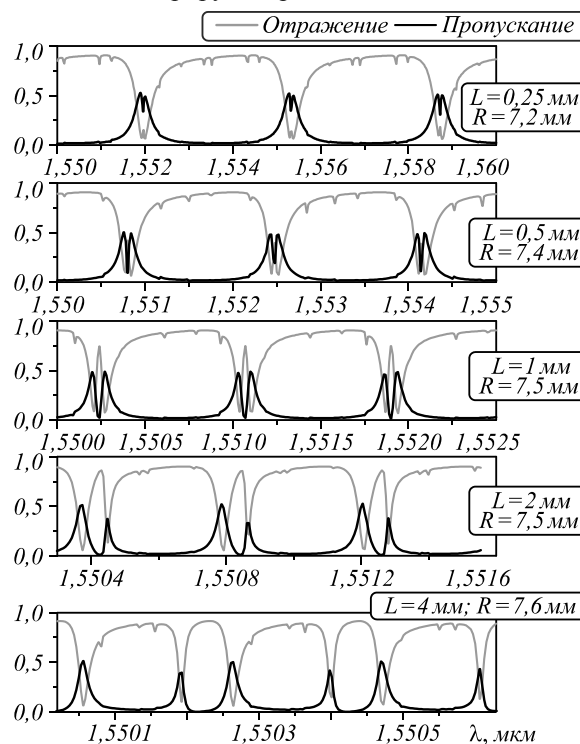


Рис. 6. Спектры отражения и пропускания исследуемого резонатора, рассчитанные при $L = 0,25; 0,5; 1; 2$ и 4 мм, $h = 10$ мм

Как следует из рис. 6, помимо изменения периода резонансов, длина резонатора также существенно влияет на эффективность связи ФМ- и МШГ-резонаторов: с ростом L наблюдается отчётливый переход от режима, аналогичного электромагнитно-индуцированной прозрачности, к расщеплению Аутлера–Таунса.

Заключение

Таким образом, в работе продемонстрированы резонансные эффекты, аналогичные расщеплению Аутлера–Таунса, электромагнитно-индуцированной прозрачности и резонансам Фано, возникающие в резонаторе Фабри–Перо, образованном изогнутым одномодовым световодом с металлизированными торцами. Показано, что данные эффекты возникают в результате связи между фундаментальной модой сердцевины и модами шепчущей галереи, существующими в оболочке изогнутого одномодового световода. Полученные результаты указывают на близкую аналогию между изогнутым волноводным резонатором Фабри–Перо и механической системой двух связанных маятников. Продемонстрирована перестройка резонансов за счёт изменения радиуса изгиба световода,

что позволяет получить как характерную для резонансов Фано асимметричную форму пиков в спектре пропускания, так и эффекты, аналогичные электромагнитно-индуцированной прозрачности и расщеплению Аутлера–Таунса. Эффективность связи внутренних ФМ- и МШГ-резонаторов варьируется за счёт выбора радиуса изгиба световода, изменения толщины (следовательно, коэффициента отражения) зеркал и длины резонатора, что позволяет продемонстрировать переход от режима, аналогичного ЭИП, к расщеплению Аутлера–Таунса.

Представленные в работе результаты открывают новые возможности в области построения функциональных элементов фотоники на основе изогнутых световодов и, в частности, могут привести к значительному улучшению метрологических характеристик волноводных рефрактометров для био- и хемосенсорных применений.

Благодарности

Работа поддержана грантом №18-3-001 комплексной программы Дальневосточного отделения РАН «Дальний Восток».

Литература

- Kulchin, Yu.N.** Analysis of surface plasmon resonance in bent single-mode waveguides with metal-coated cladding by eigenmode expansion method / Yu.N. Kulchin, O.B. Vitrik, A.V. Dyshlyuk // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22, Issue 18. – P. 22196-22201. – DOI: 10.1364/OE.22.022196.
- Dyshlyuk, A.V.** Modeling of surface plasmon resonance in metalized optical waveguides with low V number by eigenmode expansion method / A.V. Dyshlyuk, O.B. Vitrik, Yu.N. Kulchin // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23, Issue 4. – P. 3996-4001. – DOI: 10.1364/OE.23.003996.
- Dyshlyuk, A.V.** Numerical and experimental investigation of surface plasmon resonance excitation using whispering gallery modes in bent metal-clad single-mode optical fiber / A.V. Dyshlyuk, O.B. Vitrik, Yu.N. Kulchin, E.V. Mitsai, A.B. Cherepakhin, C. Branger, H. Brisset, T.V. Iordache, A. Sarbu // *Journal of Lightwave Technology*. – 2017. – Vol. 35, Issue 24. – P. 5425-5431. – DOI: 10.1109/JLT.2017.2772299.
- Wang, P.** Macrobending single-mode fiber-based refractometer / P. Wang, Yu. Semenova, Q. Wu, G. Farrell, Y. Ti, J. Zheng // *Applied Optics*. – 2009. – Vol. 48, Issue 31. – P. 6044-6049. – DOI: 10.1364/AO.48.006044.
- Kulchin, Yu.N.** Effect of small variations in the refractive index of the ambient medium on the spectrum of a bent fibre-optic Fabry–Perot interferometer / Yu.N. Kulchin, O.B. Vitrik, S.O. Gurbatov // *Quantum Electronics*. – 2011. – Vol. 41, Number 9. – P. 821. – DOI: 10.1070/QE2011v041n09ABEH014677.
- Wang, P.** A macrobending singlemode fiber refractive index sensor for low refractive index liquids / P. Wang, Yu. Semenova, Y. Li, Q. Wu, G. Farrell // *Photonics Letters of Poland*. – 2010. – Vol. 2, No. 2. – P. 67-69. – DOI: 10.4302/plp.2010.2.05.
- Chiang, Ch.-Ch.** Whispering gallery mode based optical fiber sensor for measuring concentration of salt solution / Ch.-Ch. Chiang, J.-C. Chao // *Journal of Nanomaterials*. – 2013. – Vol. 2013. – P. 4. – DOI: 10.1155/2013/372625.
- Optical guided-wave chemical and biosensors II** / ed. by M. Zourab, L. Akhlesh. – Berlin, Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2010. – 301 p. – ISBN: 978-3-642-02826-7.
- Klantsataya, E.** Plasmonic fiber optic refractometric sensors: from conventional architectures to recent design trends / E. Klantsataya, P. Jia, H. Ebendorff-Heidepriem, T.M. Monro, A. François // *Sensors*. – 2016. – Vol. 17, Issue 1. – P. 1–12. – DOI: 10.3390/s17010012.
- Wang, X.** Fiber-optic chemical sensors and biosensors (2013–2015) / X. Wang, O.S. Wolfbeis // *Analytical Chemistry*. – 2015. – Vol. 88, Issue 1. – P. 203-227. – DOI: 10.1021/acs.analchem.5b04298.
- Homola, J.** Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species / J. Homola // *Chemical Reviews*. – 2008. – Vol. 108, Issue 2. – P. 462-493. – DOI: 10.1021/cr068107d.
- Guo, X.** Surface plasmon resonance based biosensor technique: a review / X. Guo // *Journal of Biophotonics*. – 2012. – Vol. 5, Issue 7. – P. 483-501. – DOI: 10.1002/jbio.201200015.
- Limonov, M.F.** Fano resonances in photonics / M.F. Limonov, M.V. Rybin, A.N. Poddubny, Y.S. Kivshar // *Nature Photonics*. – 2017. – Vol. 11, Issue 9. – P. 543-554. – DOI: 10.1038/nphoton.2017.142.
- Miroshnichenko, A.E.** Fano resonances in nanoscale structures / A.E. Miroshnichenko, S. Flach, Y.S. Kivshar // *Reviews of Modern Physics*. – 2010. – Vol. 82, Issue 3. – P. 2257-2298. – DOI: 10.1103/RevModPhys.82.2257.
- Rybin, M.V.** Bragg scattering induces Fano resonance in photonic crystals / M.V. Rybin, A.B. Khanikaev, M. Inoue, A.K. Samusev, M.J. Steel, G. Yushin, M.F. Limonov // *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*. – 2010. – Vol. 8, Issue 2. – P. 86-93. – DOI: 10.1016/j.photonics.2009.07.003.
- Luk'yanchuk, B.** The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials / B. Luk'yanchuk, N.I. Zheludev, S.A. Maier, N.J. Halas, P. Nordlander, H. Giessen, Ch.T. Chong // *Nature Materials*. – 2010. – Vol. 9. – P. 707-715. – DOI: 10.1038/nmat2810.
- Rahmani, M.** Fano resonance in novel plasmonic nanostructures / M. Rahmani, B. Luk'yanchuk, M. Hong // *Laser Photon. Rev.* – 2013. – Vol. 7, Issue 3. – P. 329-349. – DOI: 10.1002/lpor.201200021.
- Kraft, M.** Designing plasmonic gratings with transformation optics / M. Kraft, Y. Luo, S.A. Maier, J.B. Pendry // *Physical Review X*. – 2015. – Vol. 5, Issue 3. – P. 031029. – DOI: 10.1103/PhysRevX.5.031029.
- Wu, Ch.** Fano-resonant asymmetric metamaterials for ultrasensitive spectroscopy and identification of molecular monolayers / Ch. Wu, A.B. Khanikaev, R. Adato, N. Arju, A.A. Yanik, H. Altug, G. Shvets // *Nature Materials*. – 2012. – Vol. 11, Issue 1. – P. 69-75. – DOI: 10.1038/nmat3161.
- Zhu, H.** Plasmonic metamaterial absorber for broadband manipulation of mechanical resonances / H. Zhu, F. Yi, E. Cubukcu // *Nature Photonics*. – 2016. – Vol. 10. – P. 709-714. – DOI: 10.1038/nphoton.2016.183.
- Novotny, L.** Strong coupling, energy splitting, and level crossings: A classical perspective / L. Novotny // *American Journal of Physics*. – 2010. – Vol. 78, Issue 11. – P. 1199-1202. – DOI: 10.1119/1.3471177.
- Garrido Alzar, C.L.** Classical analog of electromagnetically induced transparency / C.L. Garrido Alzar, M.A.G. Martinez, P. Nussenzweig // *American Journal of Physics*. – 2002. – Vol. 70, Issue 1. – P. 37-41. – DOI: 10.1119/1.1412644.

23. **Johnson, P.B.** Optical constants of the noble metals / P.B. Johnson, R.W. Christy // *Physical Review B*. – 1972. – Vol. 6, Issue 12. – 4370. – DOI: 10.1103/PhysRevB.6.4370.
24. **Peng, B.** What is and what is not electromagnetically induced transparency in whispering-gallery microcavities / B. Peng, Ş.K. Özdemir, W. Chen, F. Nori, L. Yang // *Nature Communications*. – 2014. – Vol. 5. – 5082. – DOI: 10.1038/ncomms6082.
25. **Snyder, A.W.** Optical waveguide theory / A.W. Snyder, J. Love. – Springer Science & Business Media, 2012. – 738 p. – ISBN: 978-0-412-09950-2.

Сведения об авторе

Дышлюк Антон Владимирович, к.ф.-м.н., 1981 года рождения, в 2003 году окончил Дальневосточный государственный технический университет по специальности «Радиосвязь, радиовещание и телевидение», работает доцентом в Дальневосточном федеральном университете и Владивостокском государственном университете экономики и сервиса, а также старшим научным сотрудником в ИАПУ ДВО РАН. Область научных интересов: волоконная оптика, квантовая электроника, волоконно-оптические датчики и измерительные системы на их основе, биосенсорика, плазмоника, нанофотоника. E-mail: anton_dys@mail.ru.

ГРНТИ: 29.31.15, 29.31.29

Поступила в редакцию 12 сентября 2018 г. Окончательный вариант – 10 декабря 2018 г.

Demonstration of resonant phenomena analogous to Autler–Townes splitting, electromagnetically induced transparency and Fano resonances in a deformed waveguide resonator

A.V. Dyshlyuk^{1,2,3}

¹ *Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, Russia,*

² *Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia,*

³ *Vladivostok State University of Economics and Services, Vladivostok, Russia*

Abstract

In this paper, we demonstrate resonant phenomena analogous to Autler–Townes splitting, electromagnetically induced transparency and Fano resonances in a resonator based on a single-mode optical waveguide with metallized end-faces. The phenomena are shown to result from strong coupling between the fundamental mode of the waveguide core and the cladding whispering gallery mode. The results obtained open new possibilities in the field of building functional photonic elements using cladding modes of bent waveguides and, in particular, fiber optic refractometers for bio- and chemosensing applications.

Keywords: Autler–Townes splitting, electromagnetically induced transparency, Fano resonances, whispering gallery modes, bent single-mode optical, biosensing, chemosensing.

Citation: Dyshlyuk AV. Demonstration of resonant phenomena analogous to Autler–Townes splitting, electromagnetically induced transparency and Fano resonances in a deformed waveguide resonator. *Computer Optics* 2019; 43(1): 35–41. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-1-35-41.

Acknowledgements: The work was partly funded within the complex program “Far East” of the Far East Division of the RAS under grant # 18-3-001.

References

- [1] Kulchin YuN, Vitrik OB, Dyshlyuk AV. Analysis of surface plasmon resonance in bent single-mode waveguides with metal-coated cladding by eigenmode expansion method. *Opt Express* 2014; 22(18): 22196–22201. DOI: 10.1364/OE.22.022196.
- [2] Dyshlyuk AV, Vitrik OB, Kulchin YuN. Modeling of surface plasmon resonance in metalized optical waveguides with low V number by eigenmode expansion method. *Opt Express* 2015; 23(4): 3996–4001. DOI: 10.1364/OE.23.003996.
- [3] Dyshlyuk AV, Vitrik OB, Kulchin YuN, Mitsai EV, Cherepakhin AB, Branger C, Brisset H, Iordache TV, Sarbu A. Numerical and experimental investigation of surface plasmon resonance excitation using whispering gallery modes in bent metal-clad single-mode optical fiber. *J Lightw Technol* 2017; 35(24): 5425–5431. DOI: 10.1109/JLT.2017.2772299.
- [4] Wang P, Semenova Yu, Wu Q, Farrell G, Ti Y, Zheng J. Macrobending single-mode fiber-based refractometer. *Appl Opt* 2009; 48(31): 6044–6049. DOI: 10.1364/AO.48.006044.
- [5] Kulchin YuN, Vitrik OB, Gurbatov SO. Effect of small variations in the refractive index of the ambient medium on the spectrum of a bent fibre-optic Fabry–Perot interferometer. *Quantum Electronics* 2011; 41(9): 821. DOI: 10.1070/QE2011v041n09ABEH014677.
- [6] Wang P, Semenova Yu, Li Y, Wu Q, Farrell G. A macrobending singlemode fiber refractive index sensor for low refractive index liquids. *Photonics Letters of Poland* 2010; 2(2): 67–69. DOI: 10.4302/plp.2010.2.05.
- [7] Chiang Ch-Ch, Chao J-C. Whispering gallery mode based optical fiber sensor for measuring concentration of salt solution. *Journal of Nanomaterials* 2013; 2013: 4. DOI: 10.1155/2013/372625.

- [8] Zourob M, Akhlesh L, eds. Optical guided-wave chemical and biosensors II. Berlin, Heidelberg: Springer Science & Business Media; 2010. ISBN: 978-3-642-02826-7.
- [9] Klantsataya E, Jia P, Ebendorff-Heidepriem H, Monro TM, François A. Plasmonic fiber optic refractometric sensors: from conventional architectures to recent design trends. *Sensors* 2016; 17(1): 12. DOI: 10.3390/s17010012.
- [10] Wang X, Wolfbeis OS. Fiber-optic chemical sensors and biosensors (2013–2015). *Analytical Chemistry* 2015; 88(1): 203-227. DOI: 10.1021/acs.analchem.5b04298.
- [11] Homola J. Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species. *Chem Rev* 2008; 108(2): 462-493. DOI: 10.1021/cr068107d.
- [12] Guo X. Surface plasmon resonance based biosensor technique: a review. *J Biophotonics* 2012; 5(7): 483-501. DOI: 10.1002/jbio.201200015.
- [13] Limonov MF, Rybin MV, Poddubny AN, Kivshar YS. Fano resonances in photonics. *Nature Photonics* 2017; 11(9): 543-554. DOI: 10.1038/nphoton.2017.142.
- [14] Miroshnichenko AE, Flach S, Kivshar YS. Fano resonances in nanoscale structures. *Rev Mod Phys* 2010; 82(3): 2257-2298. DOI: 10.1103/RevModPhys.82.2257.
- [15] Rybin MV, Khanikaev AB, Inoue M, Samusev AK, Steel MJ, Yushin G, Limonov MF. Bragg scattering induces Fano resonance in photonic crystals. *Photon Nanostruct Fundam Appl* 2010; 8(2): 86-93. DOI: 10.1016/j.photonics.2009.07.003.
- [16] Luk'yanchuk B, Zheludev NI, Maier SA, Halas NJ, Nordlander P, Giessen H, Chong ChT. The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials. *Nat Mater* 2010; 9: 707-715. DOI: 10.1038/nmat2810.
- [17] Rahmani M, Luk'yanchuk B, Hong M. Fano resonance in novel plasmonic nanostructures. *Laser Photon Rev* 2013; 7(3): 329-349. DOI: 10.1002/lpor.201200021.
- [18] Kraft M, Luo Y, Maier SA, Pendry JB. Designing plasmonic gratings with transformation optics. *Phys Rev X* 2015; 5(3): 031029. DOI: 10.1103/PhysRevX.5.031029.
- [19] Wu Ch, Khanikaev AB, Adato R, Arju N, Yanik AA, Altug H, Shvets G. Fano-resonant asymmetric metamaterials for ultrasensitive spectroscopy and identification of molecular monolayers. *Nature materials* 2012; 11(1): 69-75. DOI: 10.1038/nmat3161.
- [20] Zhu H, Yi F, Cubukcu E. Plasmonic metamaterial absorber for broadband manipulation of mechanical resonances. *Nat Photon* 2016; 10: 709-714. DOI: 10.1038/nphoton.2016.183.
- [21] Novotny L. Strong coupling, energy splitting, and level crossings: A classical perspective. *American Journal of Physics* 2010; 78(11): 1199-1202. DOI: 10.1119/1.3471177.
- [22] Garrido Alzar CL, Martinez MAG, Nussenzveig P. Classical analog of electromagnetically induced transparency. *American Journal of Physics* 2002; 70(1): 37-41. DOI: 10.1119/1.1412644.
- [23] Johnson PB, Christy RW. Optical constants of the noble metals. *Physical review B* 1972; 6(12): 4370. DOI: 10.1103/PhysRevB.6.4370.
- [24] Peng B, Özdemir ŞK, Chen W, Nori F, Yang L. What is and what is not electromagnetically induced transparency in whispering-gallery microcavities. *Nature Communications* 2014; 5: 5082. DOI: 10.1038/ncomms6082.
- [25] Snyder AW, Love J. *Optical waveguide theory*. Springer Science & Business Media; 2012. ISBN: 978-0-412-09950-2.

Author's information

Anton Vladimirovich Dyshlyuk (b. 1981), Ph.D., graduated from Far Eastern State Technical University in 2003, majoring in Radio Communications, Radio Broadcasting and Television. Currently he works as an associate professor in Far Eastern Federal University and Vladivostok State University of Economics and Services, as well as senior researcher at the Institute of Automation and Control Processes of FEB RAS. Research interests include fiber optics, quantum electronics, fiber optic sensors and measuring systems, biosensing, plasmonics, nanophotonics. E-mail: anton_dys@mail.ru.

Received September 12, 2018. The final version – December 10, 2018.