

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

А.В. Дышлюк<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> ИАПУ ДВО РАН, 690041, Россия, г. Владивосток, ул. Радио, д. 5,

<sup>2</sup> Дальневосточный федеральный университет, 690091, Россия, г. Владивосток, ул. Суханова, д. 8,

<sup>3</sup> Владивостокский государственный университет экономики и сервиса,  
690014, Россия, г. Владивосток, ул. Гоголя, д. 41

### Аннотация

В настоящем дополнении к оригинальной статье [1] исправляется ошибка, допущенная при расчетах спектров отражения и пропускания изогнутого волноводного резонатора Фабри–Перо. Ошибка возникла вследствие пренебрежения оболочечными модами в прямых волноводных участках перед и после исследуемого резонатора (рис. 2а в оригинальной статье). Хотя данные моды не вносят непосредственного вклада в вычисляемую прошедшую и отраженную мощность, их учет необходим для корректного расчета спектров отражения и пропускания резонатора, что было обнаружено после опубликования статьи. В данном дополнении приводятся исправленные результаты, а также некоторые корректировки выводов оригинальной статьи.

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

**Цитирование:** Дышлюк, А.В. Erratum: Демонстрация резонансных эффектов типа расщепления Аутлера–Таунса, электромагнитно-индуцированной прозрачности и резонансов Фано в деформированном волноводном резонаторе / А.В. Дышлюк // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 1. – С. 45–47. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-822.

**Citation:** Dyshlyuk AV. Erratum: Demonstration of resonant phenomena analogous to Autler-Townes splitting, electromagnetically induced transparency and Fano resonances in a deformed waveguide resonator. Computer Optics 2021; 45(1): 45-47. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-822.

Для обеспечения достоверности результатов моделирования было проведено исследование количества мод в каждом из 5 участков волноводной структуры, представленной на рис. 2а в оригинальной статье (прямой входной участок, первое зеркало, изогнутый волноводный резонатор, второе зеркало, прямой выходной участок), при котором достигается сходимость численных результатов. В ходе исследования установлено, что при включении в численную модель 60 и более мод в каждом из участков (включая оболочечные моды во входном и выходном участках), результаты моделирования практически перестают зависеть от количества используемых мод. Для обеспечения сходимости с некоторым запасом спектры отражения и пропускания изогнутого резонатора (рис. 3–6 оригинальной статьи) пересчитаны с использованием 70 мод в каждом из участков и приводятся ниже.

На рис. 3 представлены спектры отражения и пропускания, полученные при радиусах изгиба вблизи  $R=7,575$  мм, при которых возникает сильная связь между рассматриваемыми по отдельности фундаментальной модой (ФМ) сердцевинной и оболочечной модой шепчущей галереи (МШГ) изогнутого одномодового световода при  $\lambda \sim 1555$  нм. Коэффициенты отражения и пропускания определены соответственно как отношение мощностей отраженной и прошедшей ФМ

во входном и выходном участках к мощности возбуждающей ФМ во входном участке.

Из сравнения приведенных выше спектров со спектрами из оригинальной статьи видно, что, помимо небольших изменений в параметрах резонатора, основное отличие состоит в более сглаженном характере расщепления резонансных линий (показано двойной серой стрелкой), который в большей степени соответствует расщеплению Аутлера–Таунса, нежели электромагнитно-индуцированной прозрачности или высокочастотному резонансу Фано.

Последнее также относится к спектрам, представленным на рис. 4 ниже, которые получены при радиусах изгиба, на которых ФМ связывается с МШГ различных порядков. Чтобы подчеркнуть последнее обстоятельство, на рис. 4д приведены зависимости эффективного показателя преломления гибридных мод изогнутого световода (рассматриваемого как единое целое) от радиуса изгиба при фиксированной длине волны  $\lambda = 1555$  нм. Пунктирными вертикальными линиями отмечены радиусы изгиба, при которых рассчитаны спектры на рис. 4а–г.

Как видно, более сильное расщепление резонансных линий, возникающее при меньших радиусах изгиба, обусловлено большим промежутком между дисперсионными кривыми в области их антипересе-

чения. В терминах рассматриваемых по отдельности ФМ- и МШГ-резонаторов это соответствует их более сильной связи при меньших радиусах изгиба за счет большего интеграла перекрытия между профилями волноводных ФМ и МШГ, как обсуждается в оригинальной статье.

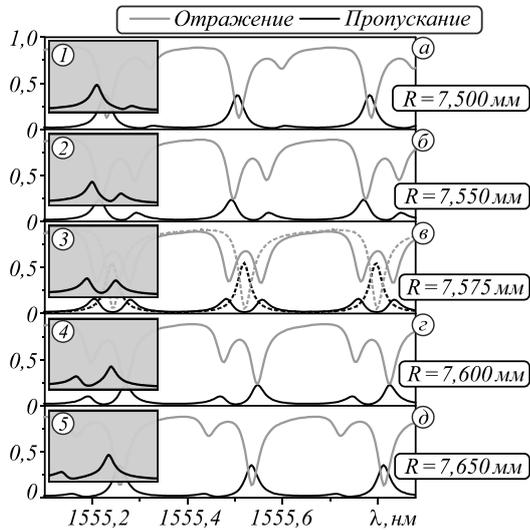


Рис. 3. Спектры отражения и пропускания изогнутого резонатора Фабри – Перо, рассчитанные при  $R = 7,5$  (а);  $7,55$  (б);  $7,575$  (в);  $7,6$  (г) и  $7,65$  мм (д);  $L = 3$  мм;  $h = 10$  нм. Для сравнения на рисунке (в) пунктирными линиями показаны спектры отражения и пропускания прямого резонатора с  $L = 3$  мм  $h = 10$  нм. На вставках слева приведены АЧХ возбуждаемого осциллятора в механической системе связанных маятников, рассчитанные при  $\omega_1 = 1$ ;  $\omega_2 = 1,2$ ;  $\gamma_1 = \gamma_2 = 0,1$ ;  $g = 0,25$  (1);  $\omega_1 = 1$ ;  $\omega_2 = 1,07$ ;  $\gamma_1 = \gamma_2 = 0,1$ ;  $g = 0,25$  (2);  $\omega_1 = 1$ ;  $\omega_2 = 0,98$ ;  $\gamma_1 = \gamma_2 = 0,1$ ;  $g = 0,25$  (3);  $\omega_1 = 1$ ;  $\omega_2 = 0,85$ ;  $\gamma_1 = \gamma_2 = 0,1$ ;  $g = 0,25$  (4);  $\omega_1 = 1$ ;  $\omega_2 = 0,7$ ;  $\gamma_1 = \gamma_2 = 0,1$ ;  $g = 0,25$  (5)

Влияние толщины металлических зеркал на спектры отражения и пропускания изогнутого резонатора иллюстрируется рис. 5. Как видно из сравнения представленного ниже рисунка с соответствующим рисунком в оригинальной статье, основное отличие скорректированных спектров состоит в отсутствии многочисленных узкополосных особенностей, которые наблюдались ранее при малых толщинах зеркал. Данные особенности, таким образом, представляют численные артефакты и физического смысла не имеют.

На заключительном рис. 6 показано влияние длины изогнутого резонатора на расщепление его резонансных линий. Скорректированные спектры близки к спектрам, приведенным в оригинальной статье, однако более сглажены, и узкие провалы в резонансных линиях при малых значениях  $L$  не наблюдаются. Отметим также, что, хотя расщепление и становится более выраженным с ростом длины резонатора, как обсуждается в оригинальной статье, данный эффект можно считать кажущимся и возникающим вследствие различных масштабов по горизонтальной оси на рис. 6а – е. Анализ приведенных спектров показывает, что с ростом длины резонатора происходит

сужение резонансных линий и уменьшение промежутка между ними при фиксированной в абсолютном выражении величине расщепления, что делает последнее более выраженным.

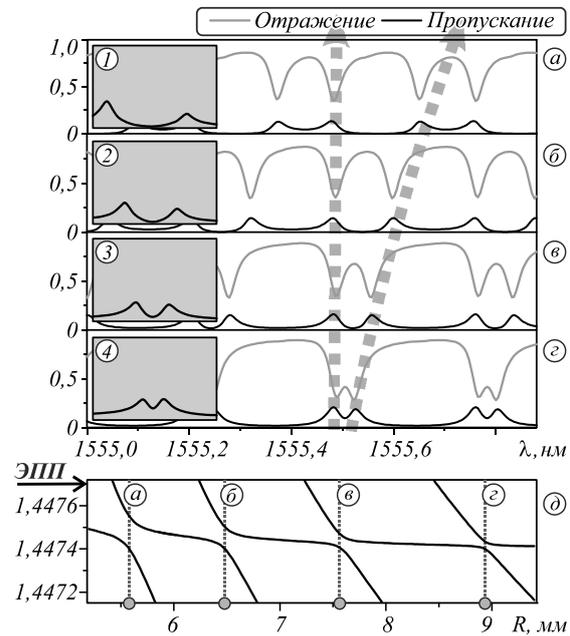


Рис. 4. Спектры отражения и пропускания изогнутого резонатора Фабри – Перо, рассчитанные при  $R = 5,575$  (а);  $6,475$  (б);  $7,575$  (в);  $8,932$  мм (г),  $L = 3$  мм,  $h = 10$  нм, а также соответствующие АЧХ возбуждаемого маятника в механической системе, рассчитанные при  $\omega_1 = 1$ ;  $\omega_2 = 0,98$ ;  $\gamma_1 = \gamma_2 = 0,1$ ;  $g = 0,6$  (1);  $\omega_1 = 1$ ;  $\omega_2 = 0,98$ ;  $\gamma_1 = \gamma_2 = 0,1$ ;  $g = 0,4$  (2);  $\omega_1 = 1$ ;  $\omega_2 = 0,98$ ;  $\gamma_1 = \gamma_2 = 0,1$ ;  $g = 0,25$  (3);  $\omega_1 = 1$ ;  $\omega_2 = 0,98$ ;  $\gamma_1 = \gamma_2 = 0,1$ ;  $g = 0,15$  (4). Вертикальные пунктирные стрелки схематически показывают усиление расщепления резонансных линий с уменьшением радиуса изгиба. На рисунке (д) приведены дисперсионные кривые гибридных мод изогнутого световода в зависимости от радиуса изгиба при фиксированной длине волны  $\lambda = 1555$  нм. Пунктирные вертикальные линии маркируют радиусы изгиба, при которых рассчитаны спектры, приведённые на рисунках (а – г)

Интересная особенность, не упомянутая в оригинальной статье, наблюдается при  $L = 12,1$  мм (рис. 6д) и состоит в полном подавлении резонансного пропускания при перекрытии расщепленных линий от соседних резонансов. Это также сопровождается глубоким минимумом в спектре отражения. Расчет распределения амплитуды поля в резонаторе показывает, что практически вся введенная в него мощность в этом случае перераспределяется в оболочку выходного волноводного участка.

Резюмируя представленные выше скорректированные результаты, следует сделать вывод, что расщепление резонансных линий в изогнутом волноводном резонаторе Фабри – Перо не приводит к узкополосным спектральным особенностям, характерным для электромагнитно-индуцированной прозрачности и высокодобротных резонансов Фано. Вместо этого, как правило, наблюдается расщепление, аналогичное

эффекту Аутлера–Таунса, который обусловлен связью двух резонансных состояний с одинаковым затуханием. Именно такое расщепление следует ожидать в исследуемом случае связи ФМ- и МШГ-резонаторов, поскольку их потери, определяемые главным образом пропусканием входного и выходного зеркал, одинаковы. В механической системе связанных маятников (рис. 2б), как видно из вставок к рис. 3 и 4, такое расщепление наблюдается при  $\gamma_1 = \gamma_2$ .

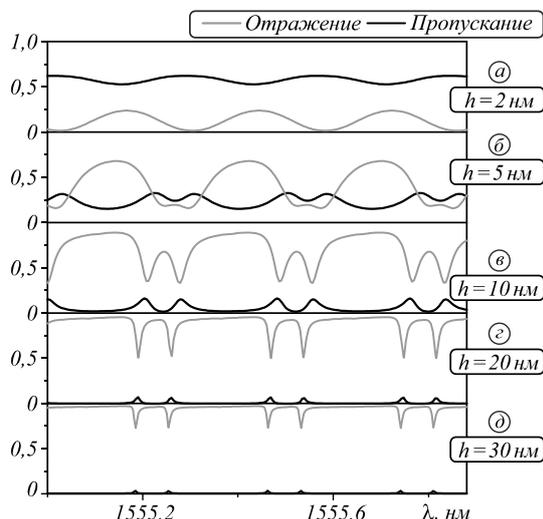


Рис. 5. Спектры отражения и пропускания изогнутого резонатора Фабри–Перо, рассчитанные при  $h = 2$  (а); 5 (б); 10 (в), 20 (г) и 30 нм (д),  $R = 7,575$  мм,  $L = 3$  мм

Острые асимметричные линии резонансов Фано и узкие провалы в широком резонансном контуре, характерные для электромагнитно-индуцированной прозрачности, возникают при интерференции узкой резонансной линии с нерезонансным континуумом или другим широкополосным резонансом. В частности, для демонстрации таких эффектов в механической системе требуется выполнение условия  $\gamma_2 \ll \gamma_1$  [2]. Для реализации аналогичного режима (более перспективного с точки зрения создания сенсорных и коммутационных оптических устройств) в изогнутом волноводном резонаторе требуется применение зеркал с переменным коэффициентом отражения, обеспечивающих высокие потери для ФМ-резонатора, и низкие – для МШГ-резонатора. Простейшим примером такого зеркала является толстый слой металла с отверстием в области сердцевины световода. Результаты дальнейших исследований в этом направлении будут представлены в последующих публикациях.

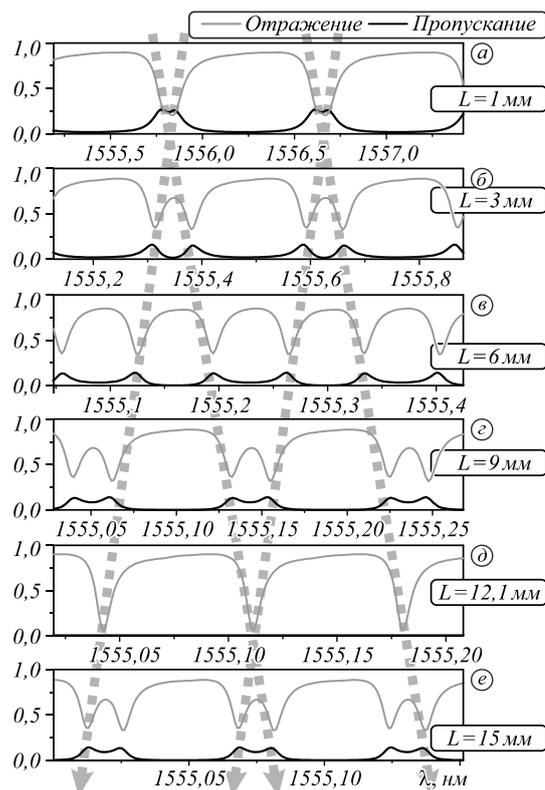


Рис. 6. Спектры отражения и пропускания изогнутого резонатора Фабри–Перо, рассчитанные при  $L = 1, 3, 6, 9, 12,1$  и  $15$  мм,  $R = 7,575$  мм,  $h = 10$  нм. Вертикальными полупрозрачными стрелками схематически обозначено смещение расщеплённых резонансных линий с ростом длины резонатора

### Благодарности

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 20-02-00556 А.

### Литература

1. Дышлок, А.В. Демонстрация резонансных эффектов типа расщепления Аутлера–Таунса, электромагнитно-индуцированной прозрачности и резонансов Фано в деформированном волноводном резонаторе / А.В. Дышлок // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 1. – С. 35–41. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-1-35-41.
2. 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. – Т. 70, № 1. – С. 37–41.

### Сведения об авторе

Сведения об авторе Дышлок Антон Владимирович – см. стр. 45 этого номера.

ГРНТИ: 29.31.15, 29.31.29

Поступила в редакцию 13 октября 2020 г. Окончательный вариант – 17 ноября 2020 г.

---

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

A.V. Dyshlyuk<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, Russia,

<sup>2</sup> Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia,

<sup>3</sup> Vladivostok State University of Economics and Services, Vladivostok, Russia

## Abstract

In this erratum to the original paper [1] we correct an error in the calculation of the reflection and transmission spectra of the bent waveguide-based Fabry-Perot resonator. The error resulted from the neglect of cladding modes in the straight input and output sections before and after the resonator under study (Fig. 2a in the original paper). Although these modes do not contribute directly to the calculated reflected and transmitted power carried by the fundamental modes in the input and output sections, they must be taken into account for the correct computation of the reflection and transmission spectra of the resonator as was found out after the original paper had been published. In this erratum we provide the amended results as well as some corrections to the conclusions of the original paper.

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

**Citation:** Dyshlyuk AV Erratum: Demonstration of resonant phenomena analogous to Autler-Townes splitting, electromagnetically induced transparency and Fano resonances in a deformed waveguide resonator. *Computer Optics* 2021; 45(1): 46–48. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-822.

**Acknowledgements:** This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant #20-02-00556 A.

## References

[1] Dyshlyuk AV. Demonstration of resonant phenomena analogous to Autler–Townes splitting, electromagnetically induced transparency and Fano resonances in a de-

formed waveguide resonator. *Computer Optics* 2019; 43(1): 35–41. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-1-35-41.  
[2] Garrido Alzar CL, Martinez MAG, Nussenzveig P. Classical analog of electromagnetically induced transparency. *Am J Phys* 2002; 70(1): 37–41.

---

## 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](mailto:anton_dys@mail.ru).

---

Received October 13, 2020. The final version – November 17, 2020.

---