



УДК 535.3, 535-7

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА В ПЛОСКОМ ВОЛНОВОДЕ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ С КВАНТОВОЙ ЯМОЙ

А.А. Первишко

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
Адрес для переписки: aapervishko@corp.ifmo.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 28.01.19, принята к печати 01.03.19
doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-196-201
Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Первишко А.А. Распространение света в плоском волноводе полного внутреннего отражения с квантовой ямой // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 2. С. 196–201. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-196-201

Аннотация

Исследован процесс распространения электромагнитной волны в волноводе полного внутреннего отражения с квантовой ямой, помещенной в его центр. Использован метод матриц переноса, позволяющий описать распространение света в слоистых структурах и рассчитать спектр отражения, связав его с собственными модами системы. Предсказано взаимодействие экситонов квантовой ямы и электромагнитной волны в виде антипересечения в спектре отражения рассматриваемой структуры, что является характерной особенностью для таких квазичастиц, как экситон-поляритоны. Полученная величина расщепления Раби составляет несколько миллиэлектронвольт для экситон-поляритонов в волноводе полного внутреннего отражения с GaAs квантовой ямой. Показано, что взаимодействие между экситонами квантовой ямы и электромагнитными волнами ТЕ- и ТМ-поляризаций различно, это можно наблюдать в спектре отражения исследуемой структуры. Такое различие соответствует оптическим правилам отбора. Предложенная альтернативная микрорезонаторная система, в которой могут наблюдаться экситон-поляритоны, может быть использована в полупроводниковой индустрии для передачи информации.

Ключевые слова

плоский волновод полного внутреннего отражения, эффект антипересечения, экситон-поляритон, расщепление Раби

Благодарности

Работа выполнена в Университете ИТМО в рамках софинансирования проекта 418231 из централизованных средств Университета ИТМО.

LIGHT PROPAGATION IN PLANAR TOTAL INTERNAL REFLECTION WAVEGUIDE WITH QUANTUM WELL

A.A. Pervishko

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
Corresponding author: aapervishko@corp.ifmo.ru

Article info

Received 28.01.19, accepted 01.03.19
doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-196-201
Article in Russian

For citation: Pervishko A.A. Light propagation in planar total internal reflection waveguide with quantum well. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 196–201 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-196-201

Abstract

The paper presents theoretical study of an electromagnetic wave propagation in a planar total internal reflection waveguide with a centrally located quantum well. The calculation is based on transfer matrix method application that gives the possibility to describe the propagation of light in layered structures and calculate the reflection spectrum having related it with the eigenmodes of the system. The prediction is made that the interaction appears between the excitons of the quantum well and the electromagnetic wave in the form of the anticrossing in the reflection spectrum. This behavior is a characteristic feature of such quasiparticles as exciton-polaritons. It is predicted that the value of the Rabi splitting is about several millielectronvolts for exciton-polaritons in the total internal reflection waveguide with a GaAs quantum well. It is also shown that the interaction between the excitons of the quantum well and TE and TM polarized electromagnetic waves is different

that can be seen in the reflection spectrum of the structure and agrees with the optical selection rules. As a result, the alternative exciton-polariton system is proposed, which in return can be used in the modern semiconductor industry as a system for information transfer.

Keywords

planar total internal reflection waveguide, anti-crossing effect, exciton-polariton, Rabi splitting

Acknowledgements

The project has been performed at ITMO University as a co-financing of the project 418231 from the centralized funds of ITMO University.

Введение

Тенденции к миниатюризации и повышению быстродействия существующих электронных систем хранения и передачи данных определяют стремительное развитие полупроводниковой индустрии, а также стимулируют поиск альтернативных систем для современной промышленности [1–4]. В настоящий момент особый интерес уделяется исследованиям многослойных структур, таких как волноводы и микрорезонаторы, широко используемых в современной полупроводниковой индустрии в качестве систем передачи информации [5–7], детекторов [8–10], вертикально излучающих лазеров [11] и др. Процессы взаимодействия в микрорезонаторе с квантовой ямой, помещенной в его центр, между экситонами квантовой ямы и собственными модами резонатора, приводят к модификации последних [12, 13]. Такие смешанные состояния, характеризующиеся величиной расщепления Раби, называются экситон-поляритонами, они могут быть экспериментально обнаружены по спектрам отражения многослойной структуры [14, 15]. На данный момент поляритонные системы (лазеры [16–18], диоды [19], транзисторы [20, 21]) предлагаются в качестве альтернативы существующим устройствам. Компактный размер таких многослойных структур наряду с уникальными свойствами экситон-поляритонов объясняет повышенный интерес международных исследовательских коллективов. Однако предложенные модели не лишены ряда недостатков, которые исследователям еще предстоит преодолеть. В частности, необходимо преодолеть сложности выращивания брэгговских микрорезонаторов высокого качества и возникающие вследствие этого потери света.

В последние годы также обсуждается возможность создания экситон-поляритонов в плоских волноводах полного внутреннего отражения (ПВО) [12, 22]. По сравнению с брэгговским микрорезонатором такая структура относительно компактна, она обладает меньшими потерями света в волноводе из-за эффекта полного внутреннего отражения. Предложенная система может быть использована при создании сверхбыстрых устройств для обработки оптических сигналов. Следует отметить, что создание и экспериментальное исследование свойств волноводов является достаточно трудоемкой задачей, вследствие чего моделирование многослойных систем дает возможность с меньшими затратами предсказать процесс распространения света в структурах с фиксированными параметрами, а также возможность появления ряда оптических эффектов.

В настоящей работе предложена система плоского волновода ПВО с квантовой ямой в волноводном слое и теоретически исследован процесс распространения света в ней методом матриц переноса. Рассмотрены теоретический спектр отражения и эффект антипересечения в спектре вследствие взаимодействия моды волновода с экситонами квантовой ямы, расположенной в волноводном слое.

Теоретическая модель

Рассмотрим асимметричный волновод ПВО конечной длины. Волноводный слой толщиной L образован материалом с показателем преломления n_1 и квантовой ямой по центру, обкладками волновода будем считать вакуум с одной стороны и материал с показателем преломления n_2 – с другой. В соответствии с законом Снеллиуса прямое возбуждение мод волновода полного внутреннего отражения как сверху, так и снизу невозможно, поэтому ввести свет в волновод можно либо при падении света на торец слоистой структуры, что с технологической точки зрения достаточно трудоемкая задача, обусловленная характерными размерами волновода, либо при падении света из верхнего полупространства предварительно поместив дифракционную решетку на поверхности исследуемой системы, что позволяет контролировать угол распространения света в волноводе [23]. В дальнейшем рассмотрении ограничимся вторым способом введения света в волновод, положив период дифракционной решетки равным Λ (рисунок, a), что при теоретическом описании распространения света через дифракционную решетку будем учитывать в волновом векторе электромагнитной волны как $\mathbf{k} \rightarrow \mathbf{k} - \frac{2\pi}{\Lambda}q$, где q – порядок дифракции [24]. Таким образом, будем считать, что ТЕ- или ТМ-поляризованный свет вводится в систему под углом θ_0 посредством дифракционной решетки с периодом Λ , расположенной на поверхности волновода с показателем преломления n_1 .

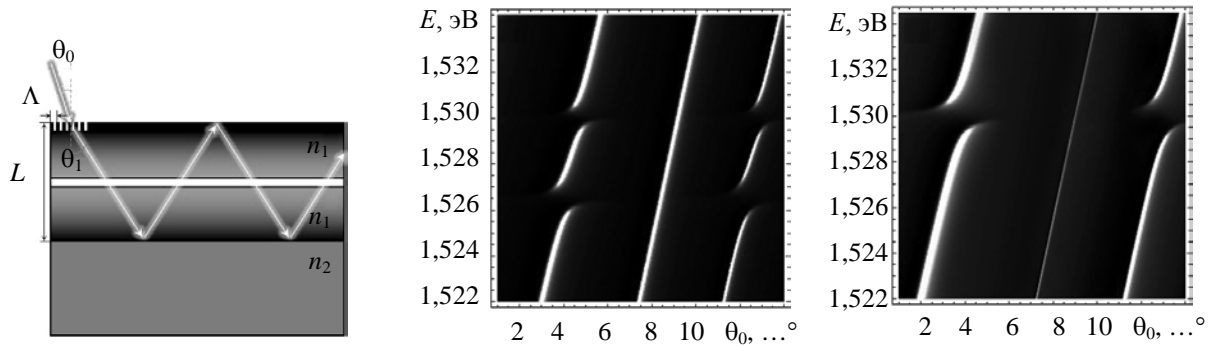


Рисунок. а – схема волновода полного внутреннего отражения с квантовой ямой по центру; б и в – зависимость положения пиков в спектре отражения структуры (показаны белым) при падении на нее электромагнитных волн ТЕ- и ТМ-поляризации с энергией E от угла падения θ_0

При расчете спектра отражения плоского волновода ПВО конечной длины с квантовой ямой в центре воспользуемся методом матриц переноса, который позволяет достаточно легко получить решение волнового уравнения для света, распространяющегося через многослойную среду [25–29].

Запишем матрицу переноса через однородный слой толщины l_i с показателем преломления n_i для ТЕ- и ТМ-поляризаций света, падающего на слой под углом θ_0 :

$$\mathbf{M}_i = \begin{pmatrix} \cos(kn_i l_i \cos \theta_i) & -i \sin(kn_i l_i \cos \theta_i) / (N \cos \theta_i) \\ -iN \cos \theta_i \sin(kn_i l_i \cos \theta_i) & \cos(kn_i l_i \cos \theta_i) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где k – длина волнового вектора падающей волны, θ_i – угол распространения света в слое i , связанный с углом падения θ_0 по закону Снеллиуса, для ТЕ-поляризации коэффициент $N = n_i$, для ТМ- – $N = 1/n_i$.

Описание квантовой ямы выражением (1) в терминах толщины и показателя преломления некорректно; следует записать матрицу переноса через амплитудный коэффициент отражения r , учитывающий наличие экситона с энергией E_0 и радиационным Γ_0 и нерадикационным Γ затуханием в квантовой яме для выбранной поляризации света [26]:

$$\mathbf{M}_{QW} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2 \cos \theta N r / (r+1) & 1 \end{pmatrix}, \quad r_{TE} = \frac{i\hbar\Gamma_0 / \cos \theta}{E_0 - E - i(\hbar\Gamma_0 / \cos \theta + \hbar\Gamma)},$$

$$r_{TM} = \frac{i\hbar\Gamma_0 \cos \theta}{E_0 - E - i(\hbar\Gamma_0 \cos \theta + \hbar\Gamma)} - \frac{i\hbar\Gamma_0 \sin^2 \theta / \cos \theta}{E_0 - E - i(\hbar\Gamma_0 \sin^2 \theta / \cos \theta + \hbar\Gamma)},$$

где θ и E – угол и энергия электромагнитной волны, падающей на квантовую яму, \hbar – постоянная Планка.

Вследствие того что матрица переноса через границу двух слоев – единичная, матрица переноса для рассматриваемой многослойной структуры (рисунок, а) является произведением матриц переноса для отдельных слоев, $\mathbf{T} = \prod_i \mathbf{M}_i$. Таким образом, полученная матрица описывает распространение электромагнитной волны через все слои, с ее помощью можно рассчитать коэффициент отражения рассматриваемой структуры, связанный с элементами матрицы переноса через всю систему выражением

$$R = \frac{\left| (\mathbf{T}_{11} + \mathbf{T}_{12} N_2 \cos \theta_2) \cos \theta_0 - (\mathbf{T}_{21} + \mathbf{T}_{22} N_2 \cos \theta_2) \right|^2}{\left| (\mathbf{T}_{11} + \mathbf{T}_{12} N_2 \cos \theta_2) \cos \theta_0 + (\mathbf{T}_{21} + \mathbf{T}_{22} N_2 \cos \theta_2) \right|^2}. \quad (2)$$

Полусы коэффициента отражения, а именно решения уравнения

$$(\mathbf{T}_{11} + \mathbf{T}_{12} N_2 \cos \theta_2) \cos \theta_0 + (\mathbf{T}_{21} + \mathbf{T}_{22} N_2 \cos \theta_2) = 0,$$

являющиеся функцией энергии и угла падения электромагнитной волны, описывают собственные моды рассматриваемой структуры [13, 27]. Несмотря на простоту задача нахождения собственных мод предложенной многослойной структуры с квантовой ямой не имеет точного аналитического решения и требует численного расчета.

Численные результаты

Рассмотрим частный случай системы, образованной волноводным слоем $\text{Al}_{0,03}\text{Ga}_{0,97}\text{As}$ толщины $L = 1000$ нм с показателем преломления $n_1 = 3,52$ [30], на поверхность которого нанесена дифракционная решетка с периодом $\Lambda = 250$ нм. Будем считать, что волноводный слой выращен на подложке

$\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ ($n_2 = 3,39$) и помещен в вакуум. Условимся, что квантовая яма GaAs находится в центре волноводного слоя, и учтем два экситонных резонанса: экситон легких дырок с энергией $\hbar\omega_{\text{олд}} = 1,530$ эВ и экситон тяжелых дырок с энергией $\hbar\omega_{\text{отд}} = 1,526$ эВ, где $\hbar\Gamma_0 = 25$, $\hbar\Gamma = 150$ мкэВ [22, 31].

В результате расчета спектра отражения многослойной структуры получены особенности (см. выражение (2)) спектра отражения, зависящие от угла падения поляризованного света. Такие особенности также называются собственными модами системы (рисунок, б, в). Как можно видеть из графиков, первая и третья собственные моды волновода имеют нехарактерный для фотонных мод (нелинейный) вид при энергиях, соответствующих энергиям экситонов тяжелых и легких дырок. При описании микрорезонаторов такое поведение собственных мод структуры в спектре отражения называется эффектом антипересечения. Экспериментально показанный в 1992 г. эффект объясняется процессом взаимодействия света с веществом и формированием квазичастиц – экситон-поляритонов в микрорезонаторе [13, 14]. Величина расщепления собственной моды микрорезонатора вследствие взаимодействия света с веществом (величина расщепления Раби) является характеристикой экситон-поляритонов в системе. Таким образом, из рисунка, б, в, можно заключить, что в волноводе ПВО также возможно появление эффекта антипересечения и, следовательно, экситон-поляритонов. Так, для ТЕ-поляризованной волны величина расщепления Раби $\Omega_{\text{лд1}}^{\text{TE}} = 1,3$, $\Omega_{\text{тд1}}^{\text{TE}} = 1,5$, $\Omega_{\text{лд3}}^{\text{TE}} = 1,7$, $\Omega_{\text{тд3}}^{\text{TE}} = 2$ мэВ. Следует также отметить, что, согласно оптическим правилам отбора, для ТМ-поляризованной волны взаимодействие света с экситонами тяжелых дырок невозможно, поэтому на полученном спектре отражения (рисунок, в) эффект антипересечения возникает только при взаимодействии света с экситонами легких дырок с величиной расщепления Раби $\Omega_{\text{лд1}}^{\text{TM}} = 2,3$, $\Omega_{\text{лд3}}^{\text{TM}} = 2,5$ мэВ. Для второй моды эффект антипересечения не наблюдается ни для ТЕ-, ни для ТМ-поляризации по причине того, что квантовая яма расположена в узле распространяющейся электромагнитной волны. Величина расщепления Раби в GaAs-микрорезонаторах с квантовой ямой также порядка нескольких миллиэлектронвольт в зависимости от параметров микрорезонатора [28, 32], что соответствует полученным результатам для экситон-поляритонов в волноводе ПВО с квантовой ямой.

Заключение

В данной работе с учетом поляризации падающей электромагнитной волны методом матриц переноса проведено моделирование процесса распространения электромагнитной волны в волноводе полного внутреннего отражения с квантовой ямой, расположенной в центре волноводного слоя. Рассчитан спектр отражения волновода полного внутреннего отражения с квантовой ямой и предсказано появление эффекта антипересечения в спектре отражения, свидетельствующего о появлении экситон-поляритонов в волноводе полного внутреннего отражения с характерным расщеплением Раби. Высказано предположение о возможности создания экситон-поляритонов в волноводах полного внутреннего отражения с квантовой ямой, что может быть использовано для создания новых оптических приборов.

Литература

1. Thompson S.E., Parthasarathy S. Moore's law: the future of Si microelectronics // *Materials Today*. 2006. V. 9. N 6. P. 20–25. doi: 10.1016/S1369-7021(06)71539-5
2. Luryi S., Xu J., Zaslavsky A. *Future Trends in Microelectronics: Reflections on the Road to Nanotechnology*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1996. 420 p. doi: 10.1007/978-94-009-1746-0
3. Cabrera J.M., Agullo-Rueda F. *Electrooptics: Phenomena, Materials and Applications*. London, Academic Press, 2012. 345 p. doi: 10.1016/C2009-0-21166-4
4. Lambrechts W., Sinha S., Abdallah J., Prinsloo J. *Extending Moore's law through advanced semiconductor design and processing techniques*. Boca Raton, CRC Press, 2018. 366 p. doi: 10.1201/9781351248679
5. Mahmoud S.F. *Electromagnetic Waveguides: Theory and Applications*. London, Peter Peregrinus, 1991. 240 p.
6. Suhara T., Fujimura M. *Waveguide Nonlinear-Optic Devices*. Berlin, Springer, 2003. 321 p. doi: 10.1007/978-3-662-10872-7
7. Dutta A., Deka B., Sahu P.P. *Planar Waveguide Optical Sensors: From Theory to Applications*. Basel, Springer, 2016. 179 p. doi: 10.1007/978-3-319-35140-7
8. Rarity J.G., Weisbuch C. *Microcavities and Photonic Bandgaps: Physics and Applications*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1996. 601 p. doi: 10.1007/978-94-009-0313-5
9. Yokoyama H. Physics and device applications of optical microcavities // *Science*. 1992. V. 256. N 5053. P. 66–70. doi:

References

1. Thompson S.E., Parthasarathy S. Moore's law: the future of Si microelectronics. *Materials Today*, 2006, vol. 9, no. 6, pp. 20–25. doi: 10.1016/S1369-7021(06)71539-5
2. Luryi S., Xu J., Zaslavsky A. *Future Trends in Microelectronics: Reflections on the Road to Nanotechnology*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1996, 420 p. doi: 10.1007/978-94-009-1746-0
3. Cabrera J.M., Agullo-Rueda F. *Electrooptics: Phenomena, Materials and Applications*. London, Academic Press, 2012, 345 p. doi: 10.1016/C2009-0-21166-4
4. Lambrechts W., Sinha S., Abdallah J., Prinsloo J. *Extending Moore's law through advanced semiconductor design and processing techniques*. Boca Raton, CRC Press, 2018, 366 p. doi: 10.1201/9781351248679
5. Mahmoud S.F. *Electromagnetic Waveguides: Theory and Applications*. London, Peter Peregrinus, 1991, 240 p.
6. Suhara T., Fujimura M. *Waveguide Nonlinear-Optic Devices*. Berlin, Springer, 2003, 321 p. doi: 10.1007/978-3-662-10872-7
7. Dutta A., Deka B., Sahu P.P. *Planar Waveguide Optical Sensors: From Theory to Applications*. Basel, Springer, 2016, 179 p. doi: 10.1007/978-3-319-35140-7
8. Rarity J.G., Weisbuch C. *Microcavities and Photonic Bandgaps: Physics and Applications*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1996, 601 p. doi: 10.1007/978-94-009-0313-5
9. Yokoyama H. Physics and device applications of optical microcavities. *Science*, 1992, vol. 256, no. 5053, pp. 66–70. doi:

- 10.1126/science.256.5053.66
10. Wade J.H., Bailey R.C. Applications of optical microcavity resonators in analytical chemistry // *Annual Review of Analytical Chemistry*. 2016. V. 9. P. 1–25. doi: 10.1146/annurev-anchem-071015-041742
 11. Michalzik R. *VCSELs: Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface Emitting Lasers*. Berlin, Springer, 2013. 560 p. doi: 10.1007/978-3-642-24986-0
 12. Walker P.M., Tinkler L., Durska M., Whittaker D.M., Luxmoore I.J., Royall B., Krizhanovskii D.N., Skolnick M.S., Farrer I. and Ritchie D.A. Exciton polaritons in semiconductor waveguides // *Applied Physics Letters*. 2013. V. 102. N 1. Art. 012109. doi: 10.1063/1.4773590
 13. Kavokin A.V., Baumberg J.J., Malpuech G., Laussy F.P. *Microcavities*. New York, Oxford University Press, 2011. 440 p. doi: 10.1093/oso/9780198782995.001.0001
 14. Weisbuch C., Nishioka M., Ishikawa A., Arakawa Y. Observation of the coupled exciton-polariton mode splitting in a semiconductor quantum microcavity // *Physical Review Letters*. 1992. V. 69. N 23. P. 3314–3317. doi: 10.1103/PhysRevLett.69.3314
 15. Kavokin A. Exciton-polaritons in microcavities: present and future // *Applied Physics A*. 2007. V. 89. N 2. P. 241–246. doi: 10.1007/s00339-007-4145-z
 16. Deng H., Weihs G., Snoke D., Bloch J., Yamamoto Y. Polariton lasing vs. photon lasing in a semiconductor microcavity // *Proc. National Academy of Science USA*. 2003. V. 100. N 26. P. 15318–15323. doi: 10.1073/pnas.2634328100
 17. Schneider C., Rahimi-Iman A., Kim N.Y., Fischer J., Savenko I.G., Amthor M., Lerner M., Wolf A., Worschech L., Kulakovskii V.D., Shelykh I.A., Kamp M., Reitzenstein S., Forchel A., Yamamoto Y., Höfling S. An electrically pumped polariton laser // *Nature*. 2013. V. 497. P. 348–352. doi: 10.1038/nature12036
 18. Christopoulos S., von Hagersthal G.B., Grundy A.J., Lagoudakis P.G., Kavokin A.V., Baumberg, J.J., Christmann G., Butte R., Feltn E., Carlin J.-F., Grandjean N. Room-temperature polariton lasing in semiconductor microcavities // *Physical Review Letters*. 2007. V. 98. N 12. Art. 126405. doi: 10.1103/PhysRevLett.98.126405
 19. Kavokin A. Polariton diode microcavities // *Nature Photonics*. 2009. V. 3. N 3. P. 135–136. doi: 10.1038/nphoton.2009.17
 20. Gao T., Eldridge P.S., Liew T.C.H., Tsintzos S.I., Stavrinidis G., Deligeorgis G., Hatzopoulos Z., Savvidis P.G. Polariton condensate transistor switch // *Physical Review B*. 2012. V. 85. N 23. Art. 235102. doi: 10.1103/PhysRevB.85.235102
 21. Ballarini D., De Giorgi M., Cancellieri E., Houdré R., Giacobino E., Cingolani R., Bramati A., Gigli G., Sanvitto D. All-optical polariton transistor // *Nature Communications*. 2013. V. 4. Art. 1778. doi: 10.1038/ncomms2734
 22. Shapochkin P.Yu., Lozhkin M.S., Solovov I.A., Lozhkina O.A., Efimov Yu.P., Eliseev S.A., Lovcjus V.A., Kozlov G.G., Pervishko A.A., Krizhanovskii D.N., Walker P.M., Shelykh I.A., Skolnick M.S., Kapitonov Yu.V. Polarization-resolved strong light-matter coupling in planar GaAs/AlGaAs waveguides // *Optics Letters*. 2018. V. 43. N 18. P. 4526–4529. doi: 10.1364/OL.43.004526
 23. Lowen E.G., Popov E. *Diffraction Gratings and Applications*. New York, Marcel Dekker, 1997. 601 p.
 24. Wang S.S., Magnusson R. Multilayer waveguide-grating filters // *Applied Optics*. 1995. V. 34. N 14. P. 2414–2420. doi: 10.1364/AO.34.002414
 25. Born M., Wolf E. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. Oxford, Pergamon Press, 1964. 952 p.
 26. Ивченко Е.Л., Кавокин А.В. Отражение света от структур с квантовыми ямами, квантовыми проводами и квантовыми точками // *Физика твердого тела*. 1992. Т. 34. № 6. С. 1815–1822.
 27. Andreani L.C. Exciton-polaritons in superlattices // *Physics Letters A*. 1994. V. 192. N 1. P. 99–109. doi: 10.1016/0375-9601(94)91023-5
 28. Savona V., Andreani L.C., Schwendimann P., Quattopani A. Quantum well excitons in semiconductor microcavities: unified treatment of weak and strong coupling regimes. *Solid State Communications*, 1995, vol. 93, no. 9, pp. 733–739. doi: 10.1016/0038-1098(94)00865-5
 29. Ivchenko E.L. *Optical Spectroscopy of Semiconductor Nanostructures*. Harrow, Alpha Science, 1995. 421 p.
 - 10.1126/science.256.5053.66
 10. Wade J.H., Bailey R.C. Applications of optical microcavity resonators in analytical chemistry. *Annual Review of Analytical Chemistry*, 2016, vol. 9, pp. 1–25. doi: 10.1146/annurev-anchem-071015-041742
 11. Michalzik R. *VCSELs: Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface Emitting Lasers*. Berlin, Springer, 2013, 560 p. doi: 10.1007/978-3-642-24986-0
 12. Walker P.M., Tinkler L., Durska M., Whittaker D.M., Luxmoore I.J., Royall B., Krizhanovskii D.N., Skolnick M.S., Farrer I. and Ritchie D.A. Exciton polaritons in semiconductor waveguides. *Applied Physics Letters*, 2013, vol. 102, no. 1, art. 012109. doi: 10.1063/1.4773590
 13. Kavokin A.V., Baumberg J.J., Malpuech G., Laussy F.P. *Microcavities*. New York, Oxford University Press, 2011, 440 p. doi: 10.1093/oso/9780198782995.001.0001
 14. Weisbuch C., Nishioka M., Ishikawa A., Arakawa Y. Observation of the coupled exciton-polariton mode splitting in a semiconductor quantum microcavity. *Physical Review Letters*, 1992, vol. 69, no. 23, pp. 3314–3317. doi: 10.1103/PhysRevLett.69.3314
 15. Kavokin A. Exciton-polaritons in microcavities: present and future. *Applied Physics A*, 2007, vol. 89, no. 2, pp. 241–246. doi: 10.1007/s00339-007-4145-z
 16. Deng H., Weihs G., Snoke D., Bloch J., Yamamoto Y. Polariton lasing vs. photon lasing in a semiconductor microcavity. *Proc. National Academy of Science USA*, 2003, vol. 100, no. 26, pp. 15318–15323. doi: 10.1073/pnas.2634328100
 17. Schneider C., Rahimi-Iman A., Kim N.Y., Fischer J., Savenko I.G., Amthor M., Lerner M., Wolf A., Worschech L., Kulakovskii V.D., Shelykh I.A., Kamp M., Reitzenstein S., Forchel A., Yamamoto Y., Höfling S. An electrically pumped polariton laser. *Nature*, 2013, vol. 497, pp. 348–352. doi: 10.1038/nature12036
 18. Christopoulos S., von Hagersthal G.B., Grundy A.J., Lagoudakis P.G., Kavokin A.V., Baumberg, J.J., Christmann G., Butte R., Feltn E., Carlin J.-F., Grandjean N. Room-temperature polariton lasing in semiconductor microcavities. *Physical Review Letters*, 2007, vol. 98, no. 12, art. 126405. doi: 10.1103/PhysRevLett.98.126405
 19. Kavokin A. Polariton diode microcavities. *Nature Photonics*, 2009, vol. 3, no. 3, pp. 135–136. doi: 10.1038/nphoton.2009.17
 20. Gao T., Eldridge P.S., Liew T.C.H., Tsintzos S.I., Stavrinidis G., Deligeorgis G., Hatzopoulos Z., Savvidis P.G. Polariton condensate transistor switch. *Physical Review B*, 2012, vol. 85, no. 23, art. 235102. doi: 10.1103/PhysRevB.85.235102
 21. Ballarini D., De Giorgi M., Cancellieri E., Houdré R., Giacobino E., Cingolani R., Bramati A., Gigli G., Sanvitto D. All-optical polariton transistor. *Nature Communications*, 2013, vol. 4, art. 1778. doi: 10.1038/ncomms2734
 22. Shapochkin P.Yu., Lozhkin M.S., Solovov I.A., Lozhkina O.A., Efimov Yu.P., Eliseev S.A., Lovcjus V.A., Kozlov G.G., Pervishko A.A., Krizhanovskii D.N., Walker P.M., Shelykh I.A., Skolnick M.S., Kapitonov Yu.V. Polarization-resolved strong light-matter coupling in planar GaAs/AlGaAs waveguides. *Optics Letters*, 2018, vol. 43, no. 18, pp. 4526–4529. doi: 10.1364/OL.43.004526
 23. Lowen E.G., Popov E. *Diffraction Gratings and Applications*. New York, Marcel Dekker, 1997, 601 p.
 24. Wang S.S., Magnusson R. Multilayer waveguide-grating filters. *Applied Optics*, 1995, vol. 34, no. 14, pp. 2414–2420. doi: 10.1364/AO.34.002414
 25. Born M., Wolf E. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. Oxford, Pergamon Press, 1964, 952 p.
 26. Ivchenko E.L., Kavokin A.V. Reflection of light from structures with quantum wells, quantum wires, and quantum dots. *Solid State Physics*, 1992, vol. 34, no. 6, p. 968.
 27. Andreani L.C. Exciton-polaritons in superlattices. *Physics Letters A*, 1994, vol. 192, no. 1, pp. 99–109. doi: 10.1016/0375-9601(94)91023-5
 28. Savona V., Andreani L.C., Schwendimann P., Quattopani A. Quantum well excitons in semiconductor microcavities: unified treatment of weak and strong coupling regimes. *Solid State Communications*, 1995, vol. 93, no. 9, pp. 733–739. doi: 10.1016/0038-1098(94)00865-5
 29. Ivchenko E.L. *Optical Spectroscopy of Semiconductor Nanostructures*. Harrow, Alpha Science, 1995, 421 p.

- unified treatment of weak and strong coupling regimes // Solid State Communications. 1995. V. 93. N 9. P. 733–739. doi: 10.1016/0038-1098(94)00865-5
29. Ivchenko E.L. Optical Spectroscopy of Semiconductor Nanostructures. Harrow, Alpha Science, 1995. 421 p.
30. Numai T. *Fundamentals of Semiconductor Lasers*. Tokyo, Springer, 2014. 268 p. doi: 10.1007/b97531
31. Lockwood D.J., Pinczuk A. *Optical Phenomena in Semiconductor Structures of Reduced Dimensions*. Dordrecht, Springer, 2014. 454 p. doi: 10.1007/978-94-011-1912-2
32. Vladimirova M.R., Kavokin A.V., Kaliteevski M.A. Dispersion of bulk exciton polaritons in a semiconductor microcavity // Physical Review B. 1996. V. 54. N 20. P. 14566–14571 doi: 10.1103/PhysRevB.54.14566
30. Numai T. *Fundamentals of Semiconductor Lasers*. Tokyo, Springer, 2014, 268 p. doi: 10.1007/b97531
31. Lockwood D.J., Pinczuk A. *Optical Phenomena in Semiconductor Structures of Reduced Dimensions*. Dordrecht, Springer, 2014, 454 p. doi: 10.1007/978-94-011-1912-2
32. Vladimirova M.R., Kavokin A.V., Kaliteevski M.A. Dispersion of bulk exciton polaritons in a semiconductor microcavity. *Physical Review B*, 1996, vol. 54, no. 20, pp. 14566–14571 doi: 10.1103/PhysRevB.54.14566

Автор

Первишко Анастасия Александровна – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 56024077100, ORCID ID: 0000-0003-3909-2478, aapervishko@corp.ifmo.ru

Author

Anastasiya A. Pervishko – PhD, Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 56024077100, ORCID ID: 0000-0003-3909-2478, aapervishko@corp.ifmo.ru