

# Резонансные одномерные фотонные кристаллы

Е. Л. Ивченко

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия

В настоящее время физика фотонных кристаллов сформировалась в самостоятельную область твердотельной оптической спектроскопии, в которой активно проводятся фундаментальные исследования, а также поиски и разработки будущих технических применений. *Фотонными кристаллами* принято называть среды, у которых диэлектрическая проницаемость периодически меняется в пространстве с периодом, допускающим брэгговскую дифракцию света. Главная цель проводимых исследований — определение фотонной зонной структуры и анализ разрешенных и запрещенных минизон для различных направлений волнового вектора в первой зоне Бриллюэна. Различают трехмерные, двумерные и одномерные фотонные кристаллы, в зависимости от того, в трех, двух или одном измерениях модулирована диэлектрическая проницаемость среды. Простейшей реализацией одномерного фотонного кристалла является периодическая структура  $\dots A/B/A/B\dots$ , состоящая из двух материалов А и В с разными показателями преломления  $n_a$  и  $n_b$ . Оптические свойства фотонных кристаллов сильно зависят от отношения  $n_a^2/n_b^2$ , называемого диэлектрическим контрастом. Если по крайней мере в одном из слоев А или В имеется экситонное возбуждение, диэлектрический контраст в спектральной области вблизи экситонной частоты испытывает аномальную дисперсию. Нормальными световыми волнами в такой среде, которую удобно называть *резонансным одномерным фотонным кристаллом*, являются экситонные поляритоны со своеобразным энергетическим спектром. Эти возбуждения можно рассматривать и как сфазированные экситонные состояния в различных квантовых ямах, связанные между собой через когерентное переизлучение–перепоглощение световой волны. В настоящей лекции рассматриваются оптические свойства периодических структур с полупроводниковыми квантовыми ямами в спектральной области вблизи резонансной частоты квазидвумерного экситона. Особое внимание уделяется резонансным брэгговским структурам, представляющими особый класс резонансных одномерных фотонных кристаллов.

## План лекции

1. Светозэкситоны или экситонные поляритоны в объемных кристаллах. Двух-осцилляционная модель экситонного поляритона.
2. Экситонные поляритоны в периодических структурах с квантовыми ямами.
3. Резонансные брэгговские и квази-брэгговские структуры.
4. Периодические структуры с конечным числом ям. Спектры оптического отражения и пропускания.
5. Фотолюминесценция квази-брэгговских структур. Эксперимент и предварительные теоретические результаты.
6. Нелинейные оптические свойства периодических структур с квантовыми ямами.
7. Заключительные замечания.

## Литература

- [1] Е. Л. Ивченко, *Экситонные поляритоны в периодических структурах с квантовыми ямами*, ФТТ **33**, 2388 (1991).
- [2] Е. Л. Ивченко, А. И. Несвижский, С. Йорда, *Брэгговское отражение света от структур с квантовыми ямами*, ФТТ **36**, 2118 (1994).
- [3] В. А. Кособукин, М. М. Моисеева, *Оптика квазидвумерных экситонов в ограниченных периодических структурах. Поляризационные эффекты*, ФТТ **37**, 3694 (1995).
- [4] T. Stroucken, A. Knorr, P. Thomas, S. W. Koch, *Coherent dynamics of radiatively coupled quantum-well excitons*, Phys. Rev. B **53**, 2026 (1996).
- [5] Y. Merle d'Aubigné, A. Wasiela, H. Mariette, T. Dietl, *Polariton effects in multiple-quantum-well structures of CdTe/Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te*, Phys. Rev. B **54**, 14003 (1996).
- [6] M. Hübner, J. Kuhl, T. Stroucken, A. Knorr, S. W. Koch, R. Hey, K. Ploog, *Collective effects of excitons in multiple-quantum-well Bragg and anti-Bragg structures*, Phys. Rev. Lett. **76**, 4199 (1996).
- [7] Е. Л. Ивченко, В. П. Кочерешко, А. В. Платонов, Д. Р. Яковлев, А. Вааг, В. Оссау, Г. Ландвер, *Резонансная оптическая спектроскопия длиннопериодных структур с квантовыми ямами*, ФТТ **39**, 2072 (1997).
- [8] J. Sadowski, H. Mariette, A. Wasiela, R. André, Y. Merle d'Aubigné, T. Dietl, *Magnetic tuning in excitonic Bragg structures of (Cd,Mn)Te/(Cd,Zn,Mg)Te*, Phys. Rev. B **56**, 1664 (1997).
- [9] C. Ell, J. Prineas, T. R. Nelson, Jr., S. Park, H. M. Gibbs, G. Khitrova, S. W. Koch, R. Houdré, *Influence of structural disorder and light coupling on the excitonic response of semiconductor microcavities*, Phys. Rev. Lett. **80**, 4795 (1998).

- [10] V. A. Kosobukin, *Theory of exciton-polariton absorption in multiple quantum wells*, phys. stat. sol. (b) **208**, 271 (1998).
- [11] М. Р. Владимирова, Е. Л. Ивченко, А. В. Кавокин, *Экситонные поляритоны в длиннопериодных структурах с квантовыми ямами*, ФТП **32**, 101 (1998).
- [12] S. Haas, T. Stroucken, M. Hubner, J. Kuhl, B. Grote, A. Knorr, F. Jahnke, S. W. Koch, R. Hey, K. Ploog, *Intensity dependence of superradiant emission from radiatively coupled excitons in multiple-quantum-well Bragg structures*, Phys. Rev. B **57**, 14860 (1998).
- [13] E. L. Ivchenko, M. Willander, *Exciton polaritons in periodic nanostructures*, phys. stat. sol. (b) **215**, 199 (1999).
- [14] G. R. Hayes, J. L. Staehli, U. Oesterle, B. Deveaud, R. T. Phillips, C. Ciuti, *Suppression of exciton-polariton light absorption in multiple quantum well Bragg structures*, Phys. Rev. Lett. **83**, 2837 (1999).
- [15] M. Hübner, J. Prineas, C. Ell, P. Brick, E. S. Lee, G. Khitrova, H. M. Gibbs, S. W. Koch, *Optical lattices achieved by excitons in periodic quantum well structures*, Phys. Rev. Lett. **83**, 2841 (1999).
- [16] J. P. Prineas, C. Ell, E. S. Lee, G. Khitrova, H. M. Gibbs, S. W. Koch, *Exciton-polariton eigenmodes in light-coupled  $\text{In}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{As}/\text{GaAs}$  semiconductor multiple-quantum-well periodic structures*, Phys. Rev. B **61**, 13863 (2000).
- [17] L. I. Deych, A. A. Lisyansky, *Polariton dispersion law in periodic-Bragg and near-Bragg multiple quantum well structures*, Phys. Rev. B **62**, 4242 (2000).
- [18] J. P. Prineas, J. Shah, E. S. Lee, G. Khitrova, H. M. Gibbs, *Identification of individual normal modes of light-coupled periodic semiconductor quantum wells in linear spectra*, phys. stat. sol. (a) **178**, 555 (2000).
- [19] Ch. Spiegelberg, H. M. Gibbs, J. P. Prineas, C. Ell, P. Brick, E. S. Lee, G. Khitrova, V. S. Zapasski, M. Hübner, S. W. Koch, *Photoluminescence and pump-probe spectroscopy of Bragg and off-Bragg quantum wells*, phys. stat. sol. (b) **221**, 85 (2000).
- [20] G. Malpuech, A. Kavokin, W. Langbein, J. M. Hvam, *Resonant Rayleigh scattering of exciton-polaritons in multiple quantum wells*, Phys. Rev. Lett. **85**, 650 (2000).
- [21] J. P. Prineas, J. Shah, B. Grote, C. Ell, G. Khitrova, H. M. Gibbs, S. W. Koch, *Dominance of radiative coupling over disorder in resonance Rayleigh scattering in semiconductor multiple quantum-well structures*, Phys. Rev. Lett. **85**, 3041 (2000).
- [22] D. Ammerlahn, J. Kuhl, B. Grote, S. W. Koch, G. Khitrova, H. M. Gibbs, *Collective radiative decay of light- and heavy-hole exciton polaritons in multiple-quantum-well structures*, Phys. Rev. B **62**, 7350 (2000).
- [23] L. I. Deych, A. Yamilov, A. A. Lisyansky, *Local polariton modes and resonant tunneling of electromagnetic waves through periodic Bragg multiple quantum well structures*, Phys. Rev. B **64**, 75321 (2001).
- [24] T. Ikawa, K. Cho, *Fate of the superradiant mode in a resonant Bragg reflector*, Phys. Rev. B **66**, 85338 (2002).
- [25] T. Ikawa, K. Cho, *Radiative width of collective modes in a resonant Bragg reflector: the validity limit of superradiant mode*, Physica E **13**, 463 (2002).

- [26] K. Cho, T. Hirai, T. Ikawa, *Propagating mode in the photonic gap of 1D resonant Bragg reflector*, J. Lumin. **100**, 283 (2002).
- [27] L. Pilozzi, A. D'Andrea, K. Cho, *Spatial dispersion effects on the optical properties of a resonant Bragg reflector*, Phys. Rev. B **69**, 205311 (2004).
- [28] L. I. Deych, M. V. Erementchouk, A. A. Lisyansky, *Effects of inhomogeneous broadening on reflection spectra of Bragg multiple quantum well structures with a defect*, Phys. Rev. B **69**, 75308 (2004).
- [29] E. L. Ivchenko, M. M. Voronov, L. I. Deych, M. V. Erementchouk, A. A. Lisyansky, *Multiple-quantum-well-based photonic crystals with simple and compound elementary supercells*, Phys. Rev. B **70**, 195106 (2004).
- [30] М. М. Воронов, Е. Л. Ивченко, *Брэгговские солитоны в структурах с квантовыми ямами*, ФТТ **47** (2005).