

01;06;07

## Оптические свойства системы двух связанных вертикальных микрорезонаторов

© М.А. Калитеевский

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 25 февраля 1997 г.)

Рассмотрено взаимодействие двух локализованных оптических состояний в структуре, представляющей собой систему двух связанных вертикальных микрорезонаторов. Показано, что взаимодействие двух локализованных оптических мод в связанных микрорезонаторах приводит к расщеплению мод. Проанализированы оптические свойства системы связанных микрорезонаторов, дисперсионные уравнения для собственных оптических мод системы.

### Введение

Известно, что если два осциллятора произвольной природы, имеющие в свободном состоянии одинаковые резонансные частоты, достаточно сильно связаны между собой, то такая система связанных осцилляторов будет обладать двумя собственными частотами, причем расщепление между ними будет возрастать с увеличением силы связывающего взаимодействия.

Одно из проявлений этого эффекта, известное под названием расщепления Раби, было обнаружено в полупроводниковых системах при изучении взаимодействия локализованных оптических мод с экситонами в полупроводниковых микрорезонаторах с квантовыми ямами в начале 90-х годов [1], что повлекло за собой появление большого количества как экспериментальных [2,3], так и теоретических [4–6] работ по этой теме.

Естественным шагом в развитии исследований взаимодействия осцилляторов различной природы представляется рассмотрение взаимодействия двух локализованных фотонных состояний [7], которое может иметь место в связанных вертикальных микрорезонаторах.

Целью данной работы является теоретическое исследование оптических свойств системы связанных микрорезонаторов, а также дисперсионных зависимостей для собственных оптических мод таких систем при нормальном падении света.

### Дисперсионные уравнения

Схема структуры, в которой может осуществляться взаимодействие локализованных фотонных состояний, показана на рис. 1. Она представляет собой два микрорезонатора, имеющих одно общее центральное брэгговское зеркало (BR). По обе стороны от общего зеркала располагаются полости резонаторов 1 и 2. С внешних сторон структура ограничена брэгговскими зеркалами BR1 и BR2. Локализованные в полостях 1 и 2 фотонные моды могут взаимодействовать, туннелируя через общее зеркало.

Взаимодействие будет наиболее эффективным в случае совпадения собственных частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$  резонаторов 1 и 2 в свободном состоянии, определяемыми при нормальном падении света уравнениями

$$\text{Arg}(R_1) + \text{Arg}(r) + 2\Phi_1 = 2\pi N, \quad (1a)$$

$$\text{Arg}(R_2) + \text{Arg}(r) + 2\Phi_2 = 2\pi M, \quad (1b)$$

где  $N, M$  — целое;  $r$  — амплитудный коэффициент отражения света от общего зеркала;  $R_{1(2)}$  — амплитудный коэффициент отражения света от внешнего зеркала первого (второго) резонатора;  $\Phi_{1(2)}$  — фазы, набираемые светом при прохождении полости первого (второго) резонатора, которые определяются выражением

$$\Phi_{1(2)} = n_{c1(2)} L_{1(2)} \omega_{1(2)} / c, \quad (1c)$$

где  $n_{c1(2)}$  — показатели преломления полостей,  $L_{1(2)}$  — толщины полостей,  $\omega_{1(2)}$  — собственные частоты первого (второго) резонатора соответственно,  $c$  — скорость света в вакууме.

В соответствии с подходом, изложенным в [5], дисперсионное уравнение для собственных мод структуры,

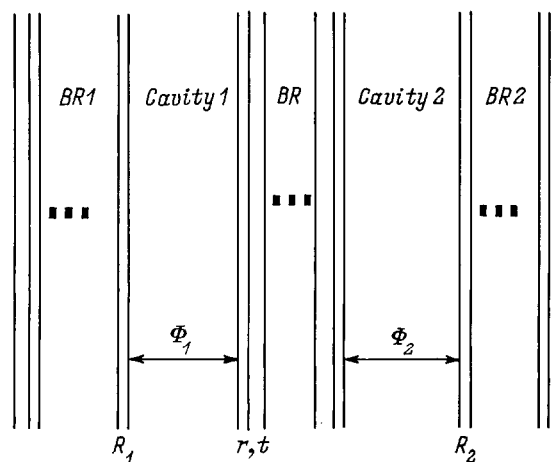


Рис. 1. Схема структуры.

представленной на рис. 1, можно написать в виде

$$(t^2 - r^2)R_1R_2 \exp(i(\Phi_1 + \Phi_2)) - \exp(-i(\Phi_1 + \Phi_2)) + r(R_1 \exp(i(\Phi_1 - \Phi_2)) + R_2 \exp(i(\Phi_2 - \Phi_1))) = 0. \quad (2)$$

Для симметричной структуры, для которой  $R_1 = R_2 = R$ ,  $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi$ ,  $L_1 = L_2 = L$ , уравнение (2) можно переписать в виде

$$R^2(t^2 - r^2) \exp(2i\Phi) + 2Rt \exp(i\Phi) - 1 = 0, \quad (3)$$

которое может быть представлено в виде произведения двух сомножителей, соответствующих двум собственным модам системы связанных резонаторов,

$$[R(r + t) \exp(i(\Phi + \varphi)) - 1] \times [R(r - t) \exp(i(\Phi + \varphi)) - 1] = 0, \quad (4)$$

где  $\varphi$  — фаза коэффициента отражения от внешних зеркал [6], для которого справедливо выражение

$$\varphi \approx \frac{\pi n_1 n_2}{(n_2 - n_1) n_c} \frac{\omega - \tilde{\omega}}{\tilde{\omega}}, \quad (5)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  — показатели преломления слоев, образующих резонатор;  $\tilde{\omega}$  — частота брэгговской интерференции отражателя.

Следует также принять во внимание [8], что вблизи частоты брэгговской интерференции отражателя фазы амплитудных коэффициентов отражения и пропускания света отличаются на  $\pi/2$  в случае, если отражатель содержит нечетное число слоев, т. е. в случае симметричной структуры

$$\text{Arg} \left( \frac{t}{r} \right) \approx \frac{\pi}{2}, \quad (6)$$

приближенное равенство становится точным на частоте брэгговской интерференции.

Будем полагать, что  $t/r \ll 1$ , т. е. коэффициент отражения общего зеркала достаточно велик. Подставляя (5), (6) в (4), можно получить уравнение для расщепления мод  $\Delta\omega$

$$\Delta\omega \left( \frac{n_c L}{c} + \frac{2\pi n_1 n_2}{\tilde{\omega}(n_2 - n_1)n_c} \right) \approx 2 \frac{t}{r}. \quad (7)$$

Если частота брэгговской интерференции отражателя  $\tilde{\omega}$  совпадает с определяемой уравнениями (1) частотой собственной моды одиночного микрорезонатора  $\omega_0$ , то уравнение (7) можно переписать в виде

$$\Delta\omega \approx \frac{\omega_0 |t|}{\pi \left( \frac{n_c L}{\lambda_0} + \frac{n_1 n_2}{(n_2 - n_1)n_c} \right)}, \quad (8)$$

где  $\lambda_0 = 2\pi c/\omega_0$  — длина волны света в вакууме, соответствующая собственной частоте микрорезонатора.

## Оптические свойства

Рассмотрим симметричную систему из двух связанных микрорезонаторов со следующим набором параметров: пусть показатели преломления обеих полостей  $n_c = 4$ , толщины полостей резонаторов 1 и 2 равны 225 nm, показатели преломления слоев, образующих зеркала  $n_1 = 3$  и  $n_2 = 4$ , толщины слоев в зеркалах 75 и 56.25 nm. Для такой системы длина излучения, соответствующая собственным модам резонаторов 1 и 2  $\lambda_0 = 900$  nm и  $\tilde{\omega} = \omega_0$ . Пусть боковые зеркала состоят из  $Q$  пар слоев, а общее зеркало содержит  $P$  слоев с показателем преломления, равным 3, разделенные  $P-1$  слоем с показателем преломления, равным 4.

Рис. 2 показывает рассчитанные с помощью метода матриц переноса [9] спектры пропускания света при различных значениях коэффициентов отражения общего зеркала и боковых зеркал. Можно видеть, что увеличение коэффициента отражения общего зеркала приводит к уменьшению расщепления пиков в спектре, причем для структуры, обладающей большим затуханием (меньшим коэффициентом отражения боковых зеркал), увеличение коэффициента отражения общего зеркала может приво-

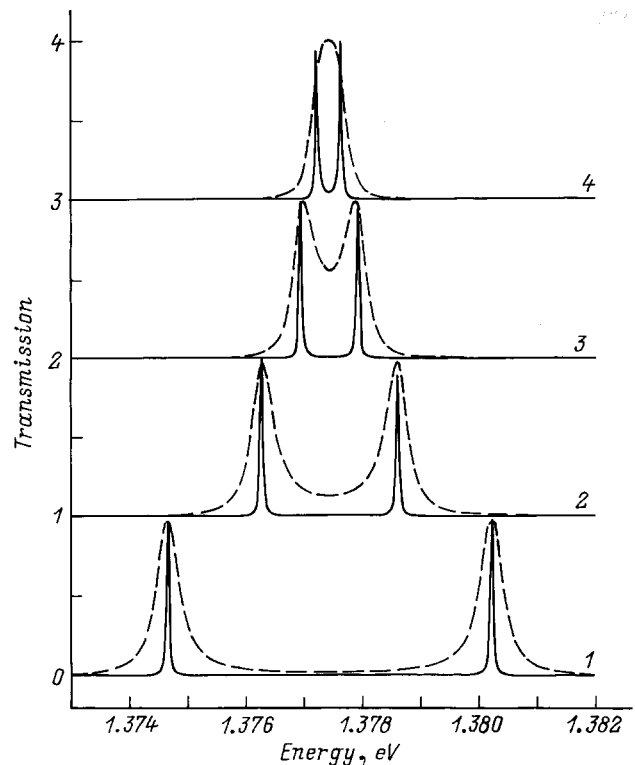
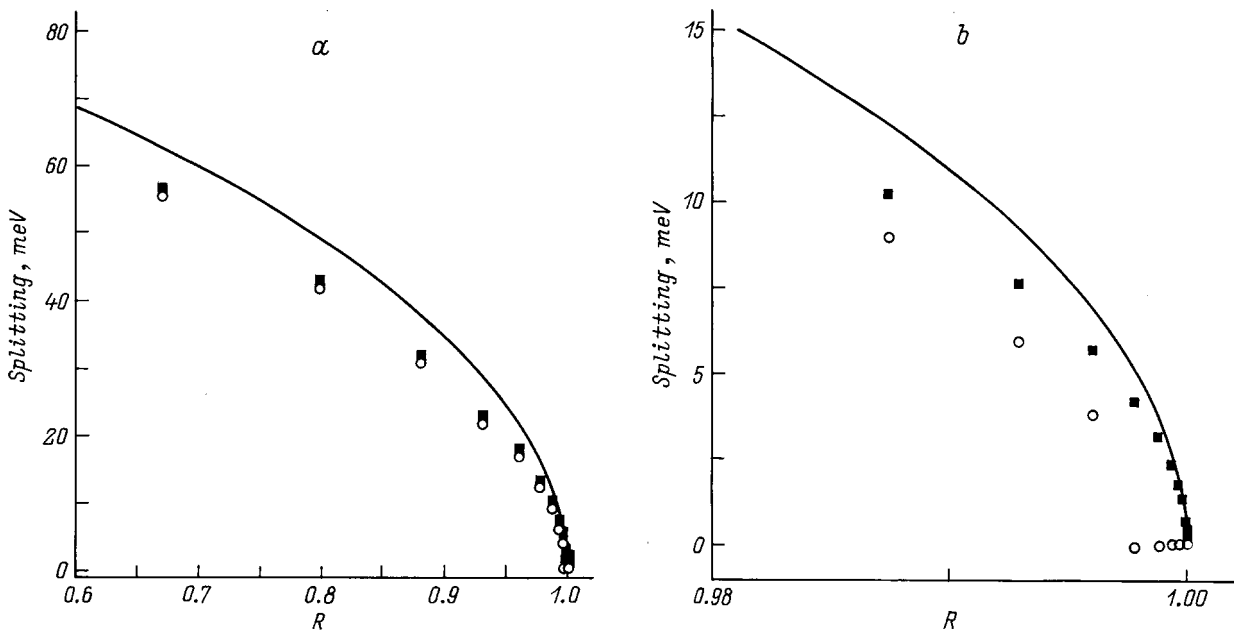


Рис. 2. Рассчитанные спектры пропускания света связанными микрорезонаторами при различных значениях коэффициента отражения общего зеркала. 1 —  $R = 0.996$  ( $P = 12$ ), 2 —  $R = 0.999$  ( $P = 15$ ), 3 —  $R = 0.9995$  ( $P = 18$ ), 4 —  $R = 0.9999$  ( $P = 21$ ). Сплошные кривые — структура, у которой боковые зеркала имеют коэффициент отражения, равный 0.999; штриховые — структура с коэффициентами отражения боковых зеркал, равными 0.95. Кривые смещены одна от другой на единицу.



**Рис. 3.** Величина расщепления мод в спектре как функция коэффициента отражения общего зеркала при коэффициентах отражения боковых зеркал, равных 0.999 (квадраты) и 0.95 (кружки). Сплошной линией показана зависимость, рассчитанная по формуле (8).

дить к слиянию двух пиков в один, что соответствует переходу от "режима сильной связи" к "режиму слабой связи".

Рис. 3, *a* показывает зависимость расщепления особенностей в спектре как функцию коэффициента отражения общего зеркала. Для сравнения сплошной линией показана зависимость, определяемая формулой (8). Рис. 3, *b* показывает такие же зависимости в масштабе, позволяющем видеть переход режим сильной связи–режим слабой связи. Во всех случаях можно видеть характерную корневую зависимость от параметра связи, в роли которого в данном случае выступает коэффициент пропускания общего зеркала.

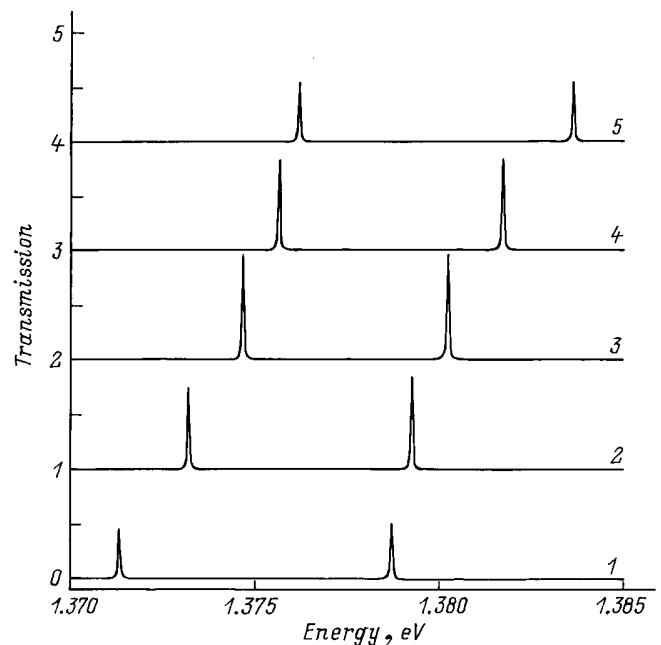
Обратимся к изучению антипересечения мод в рассматриваемой системе. На рис. 4 представлено семейство спектров пропускания света связанными микрорезонаторами, толщины полостей которых (и соответственно собственные частоты) несколько различаются. Можно видеть, что изменение спектрального положения одной из мод системы приводит к изменению положения и другой моды, т.е. моды связаны. Анализируя положения особенностей в спектрах, можно видеть, что они демонстрируют антипересечение. Можно также видеть, что при увеличении расстройки резонаторов уменьшаются амплитуды пиков в спектрах пропускания света.

Рис. 5 показывает положения собственных мод системы, определяемой уравнением (2), как функции относительной расстройки резонаторов  $D$

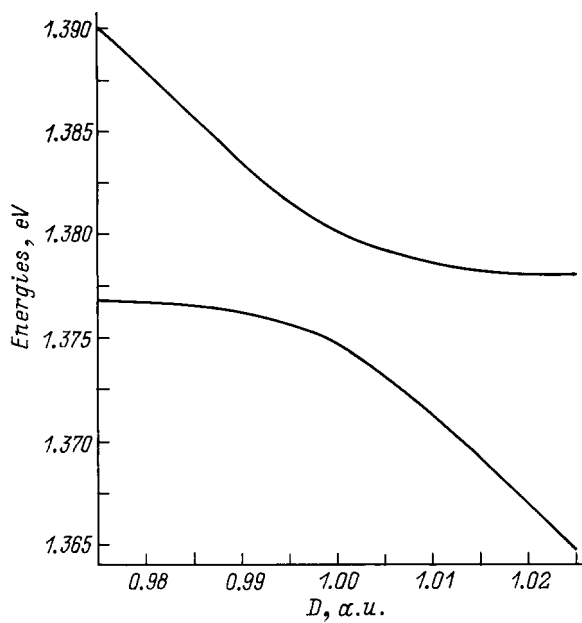
$$D = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}. \quad (9)$$

Представленная зависимость имеет хорошо известный для дисперсионных зависимостей связанных осцил-

ляторов различной природы вид — антипересечение мод. Положения резонансных особенностей в спектрах практически совпадают в данном случае с решениями уравнения (2).



**Рис. 4.** Рассчитанные спектры пропускания света связанными микрорезонаторами при фиксированной толщине резонатора 1, равной 225 нм, и различных значениях толщины резонатора 2. 1 — 227, 2 — 226, 3 — 225, 4 — 224, 5 — 223 нм; толщины слоев во всех трех зеркалах одинаковы. Кривые смещены одна от другой на единицу.



[7] Stanley R.P., Houdre R., Oesterle U. et al. // Appl. Phys. Lett. 1994. Vol. 65. N 16. P. 2093–2097.  
 [8] Калитеевский М.А., Кавокин А.В. // ФТТ. 1995. Т. 37. Вып. 10. С. 2721–2728.  
 [9] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. С. 77.

**Рис. 5.** Зависимость положения собственных оптических мод системы двух связанных микрорезонаторов относительной расстройки резонаторов 1 и 2, определенная с помощью уравнения (2).

Основные результаты работы состоят в следующем. Рассмотрено взаимодействие локализованных фотонных состояний в структуре, представляющей собой систему двух связанных микрорезонаторов, приводящее к расщеплению оптических мод системы. Получено аналитическое выражение для величины расщепления. Проанализированы оптические свойства системы при нормальном падении света.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 96-02-17836) и МНТП "Физика твердотельных наноструктур".

Автор выражает благодарность А.В. Кавокину и Е.Л. Портному за полезные обсуждения.

### Список литературы

[1] Weisbouch C., Nishioka M., Ishikawa A., Arakawa Y. // Phys. Rev. Lett. 1992. Vol. 69. N 23. P. 3314–3317.  
 [2] Houdre R., Stanley R.P., Oesterle U. et al. // Phys. Rev. B. 1994. Vol. 49. N 23. P. 16761–16769.  
 [3] Tignon J., Voisin P., Delande C. et al. // Phys. Rev. Lett. 1995. Vol. 74. N 20. P. 3967–3970.  
 [4] Kavokin A.V., Kaliteevski M.A. // Sol. St. Commun. 1995. Vol. 95. N 12. P. 859–863.  
 [5] Ivchenko E.L., Kaliteevski M.A., Kavokin A.V., Nesvizhskii N.A. // J. Opt. Soc. Am. B. 1996. Vol. 13. N 5. P. 1061–1069.  
 [6] Savona V., Andereani L.C., Schwendimann P., Quattropani A. // Sol. St. Commun. 1995. Vol. 93. N 10. P. 733–737.