

06.3;07

## Связанные вертикальные микрорезонаторы

© М.А. Калитеевский

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

Поступило в Редакцию 18 ноября 1996 г.

В работе предложена конструкция прибора, состоящая из двух оптически связанных вертикальных микрорезонаторов. Показано, что взаимодействие двух локализованных оптических мод в связанных микрорезонаторах приводит к расщеплению мод. Проанализирована возможность использования описанной конструкции для создания оптоэлектронных приборов.

Широко известно, что если два осциллятора произвольной природы, с одинаковыми резонансными частотами связать каким-либо взаимодействием, то получившаяся система будет обладать двумя резонансными частотами, расположенными симметрично относительно резонансной частоты несвязанных осцилляторов, причем расщепление резонансных частот будет возрастать с увеличением силы связывающего взаимодействия.

Одно из проявлений этого эффекта, известное под названием расщепления Раби и осцилляций 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 [1–3], что повлекло за собой появление большого количества теоретических и экспериментальных работ по этой теме. Другая причина внимания к полупроводниковым резонаторам заключается в том, что они используются для создания лазеров с вертикальной эмиссией излучения [7].

Типичный микрорезонатор состоит из полости, ограниченной двумя брэгговскими отражателями. В спектрах отражения (пропускания) света от таких структур имеются особенности  $d$  в виде узких глубоких провалов (пиков), спектральное положение которых

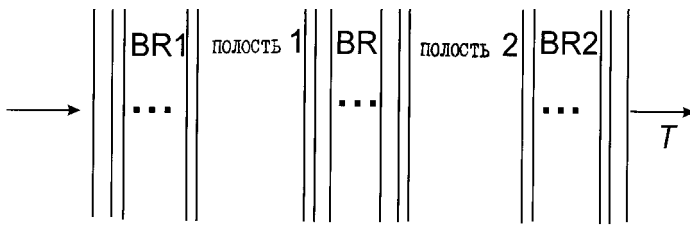


Рис. 1. Схема структуры.

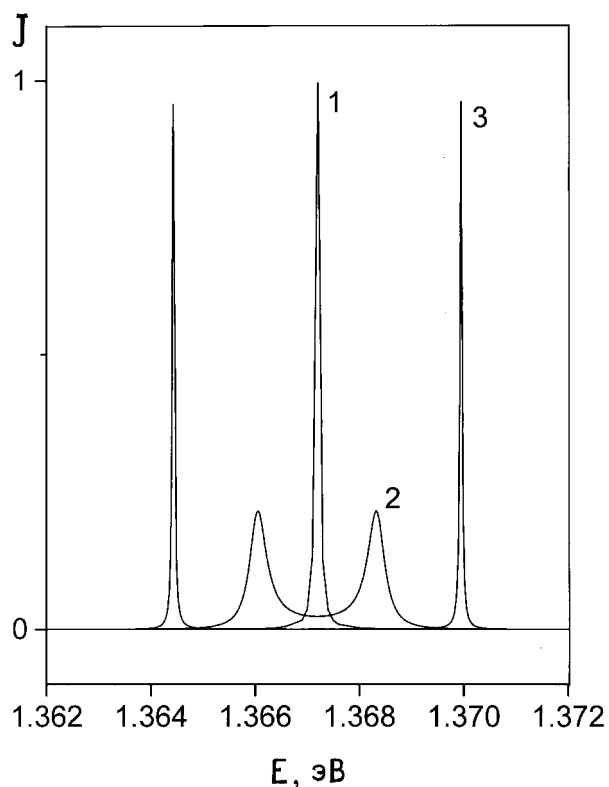
совпадает с положением локализованных оптических мод микрорезонатора.

Несмотря на большое внимание, уделяемое в мире исследованию микрорезонаторов, и их перспективностью для создания различных оптоэлектронных приборов, использующих эффекты расщепления Раби и осцилляций Раби, сообщения о создании или разработке таких приборов отсутствуют. Главным образом это объясняется весьма специфическими условиями, необходимыми для эффективного проявления экситонных эффектов (т.е. необходимостью поддержания низких температур), а также невозможностью менять требуемые параметры экситона (например, силу осциллятора) в широких пределах.

Все эти трудности можно преодолеть, если создать приборную структуру, в которой локализованная оптическая мода взаимодействует не с экситоном, а с другой локализованной оптической модой. Конструкция прибора, с помощью которой можно реализовать данную идею, показана на рис. 1. Она представляет собой два микрорезонатора, имеющих одно общее центральное зеркало (BR). По обе стороны от центрального зеркала располагаются полости резонаторов 1 и 2. С внешних сторон структура ограничена зеркалами BR1 и BR2.

Наиболее эффективная связь между первым и вторым резонаторами будет иметь место, если их собственные частоты будут совпадать.

Проанализируем оптические свойства такой структуры. На рис. 2 кривой 1 показан рассчитанный методом матриц переноса [8] спектр пропускания света одиночным свободным микрорезонато-



**Рис. 2.** Рассчитанные спектры пропускания света: 1 — свободным одиночным резонатором; 2 — связанными микрорезонаторами, у которых общее зеркало имеет коэффициент отражения 0.9993; 3 — связанными микрорезонаторами, у которых общее зеркало имеет коэффициент отражения 0.996.

ром, зеркала которого состоят из 12 пар четвертьволновых слоев, показатели преломления которых 3.0 и 4.0 соответственно (коэффициент отражения зеркала 0.99), а полость микрорезонатора имеет показатель преломления 4.0 и толщину, соответствующую длине волны света в материале (так называемый  $\lambda$ -резонатор). Среды, ограничивающие микрорезонатор, имели показатели преломления,

равные единице. Параметры резонатора выбирались таким образом, чтобы быть похожими на экспериментально исследуемые структуры. Можно видеть, что в спектре пропускания света имеется одна особенность.

Кривыми 2 и 3 показаны спектры пропускания света связанными микрорезонаторами. Для обоих случаев внешние зеркала состояли из 12 пар слоев (коэффициент отражения 0.999), для случая 2 общее зеркало состояло из 15 пар слоев (коэффициент отражения 0.9993), для случая 3 — из 12 пар слоев (коэффициент отражения 0.996). Параметры полостей в системах связанных микрорезонаторов были такими же, как и для свободного микрорезонатора. Среды, ограничивающие структуры, имели показатели преломления, равные единице.

Можно видеть, что в спектрах пропускания света системой связанных микрорезонаторов имеется по две особенности, расположенные симметрично относительно собственной моды свободного микрорезонатора, причем расщепление мод зависит от коэффициента отражения общего зеркала, уменьшаясь при увеличении коэффициента отражения общего зеркала. Меняя параметры общего зеркала, можно изменять величину расщепления мод в широких пределах.

Расщепление мод может приводить к биениям излучаемого системой связанных микрорезонаторов светового сигнала с частотой, совпадающей с величиной расщепления мод. Для случая 2 величина расщепления 3 мэВ, что соответствует частоте биений 0.6 ТГц, для случая 3–5 мэВ, что соответствует частоте биений 1 ТГц. Если в одну из полостей резонатора поместить активную среду, то такая конструкция будет работать как лазер, излучение которого промодулировано с частотой биений, что может дать возможность использовать данную конструкцию для генерации электромагнитного излучения в терагерцовом диапазоне.

Кроме того, конструкция системы связанных микрорезонаторов позволяет осуществлять отдельное электрическое управление каждой из полостей резонатора, что расширяет возможности использования предлагаемой структуры для решения различных задач оптоэлектроники.

Автор выражает благодарность Е.Л. Портному за полезные обсуждения.

**Список литературы**

- [1] *Weisbouch C., Nishioka M., Ishikawa A., Arakawa Y.* // Phys. Rev. Lett. 1992. V. 69. P. 3314–3317.
- [2] *Houdre R., Stanley R.P., Oesterle U., Ilgems M., Weisbouch C.* // Phys. Rev. B. 1994. V. 49. P. 16761–16763.
- [3] *Tignon J., Voisin P., Delande C., Voos M., Houdre R., Oesterle U., Stanley R.P.* // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 74. P. 3967–3970.
- [4] *Kavokin A.V., Kaliteevski M.A.* // Solid State Commun. 1995. V. 95. N 12. P. 859–862.
- [5] *Ivchenko E.L., Kaliteevski M.A., Kavokin A.V., Nesvikhzskii N.A.* // Journal of Optical Society of America. 1996. V. 13. N 5. P. 327–335.
- [6] *Savona V., Andreani L.C., Schwendimann P., Quatropani A.* // Solid State Commun. 1995. V. 93. N 12. P. 733–739.
- [7] *Jewell J.L., Haribson J.P., Scherer A., Lee Y.H., Florez L.T.* // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1991. V. 27. N 6. P. 1332–1346.
- [8] *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1970. С. 77.