

06.2;06.3;07;12

©1995

ВЛИЯНИЕ ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА ОТ ОБРАТНОЙ СТОРОНЫ ПОДЛОЖКИ НА ФОРМУ СПЕКТРА ОТРАЖЕНИЯ ОТ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО МИКРОРЕЗОНАТОРА

М.А.Калитеевский, П.С.Копьев

Полупроводниковые микрорезонаторы (МР) в последнее время весьма интенсивно исследуются как экспериментально [1-3], так и теоретически [4-6]. Типичный МР состоит из центрального слоя полупроводника или диэлектрика ("полость" МР), ограниченного двумя многослойными брэгговскими отражателями (БО); вся структура выращивается на подложке из полупроводникового материала. В такой структуре могут возбуждаться световые моды, локализованные в центральном слое. Спектр этих мод дискретен и определяется соотношением

$$2\text{Re}(\Phi) + f_1 + f_2 = 2\pi N, \quad (1)$$

где оптическая длина центрального слоя $\Phi = q_c L / \cos(\varphi_c)$, q_c — модуль волнового вектора света в "полости", φ_c — угол распространения световой волны в "полости" по отношению к нормали, $f_{1(2)}$ — фаза амплитудного коэффициента отражения света от первого (второго) БО, N — целое. В спектрах отражения света от таких структур имеются особенности, имеющие вид узких глубоких провалов, спектральное положение которых совпадает с положением локализованных оптических мод МР.

Учитывая многократное переотражение света от МР [7], можно представить коэффициент отражения света от МР следующим образом:

$$R = \left| \frac{r_1 + (t_1 t'_1 - r_1 r'_1) r_2 \exp(2i\Phi)}{1 - r'_1 r_2 \exp(2i\Phi)} \right|^2, \quad (2)$$

где r_2 — амплитудный коэффициент отражения от второго БО (задней стенки МР); r_1, t_1 — амплитудные коэффициенты отражения и пропускания для света, падающего из вакуума на первый БО; r'_1, t'_1 — то же для света, падающего на первый БО со стороны "полости". На частоте

брэгговской интерференции разность $t_1 t_1' - r_1 r_1'$ равна единице (при отсутствии поглощения) и не сильно отличается от нее во всей области полосы отражения БО. Исследуемые экспериментально МР изготавливаются обычно такими, чтобы r_1 и r_2 были одинаковы по модулю. При этом коэффициент отражения света на частоте собственной моды равен нулю, достигается максимальная глубина модуляции спектра. Отражением света от обратной стороны подложки обычно пренебрегается, что допустимо, когда спектральное положение собственной моды превосходит по энергии край полосы поглощения подложки. Целью данной работы было изучение влияния отражения света от обратной стороны подложки на спектры отражения света от МР.

Рассмотрим полупроводниковый микрорезонатор, состоящий из двух GaAs/AlAs брэгговских отражателей (БО) и заключенной между ними GaAs полости. МР предполагается выращенным на GaAs подложке. Толщины GaAs и AlAs в БО 57 и 70 нм соответственно. Толщина полости 215 нм (так называемая λ -полость). Первый БО состоит из 10 пар слоев, второй — из 13 пар.

Рассчитаем спектры отражения от описанного выше объекта с использованием метода матриц переноса [8]. Матрица переноса T через слой с толщиной d и показателем преломления n при угле распространения света относительно оси структуры φ в случае z -поляризации имеет вид:

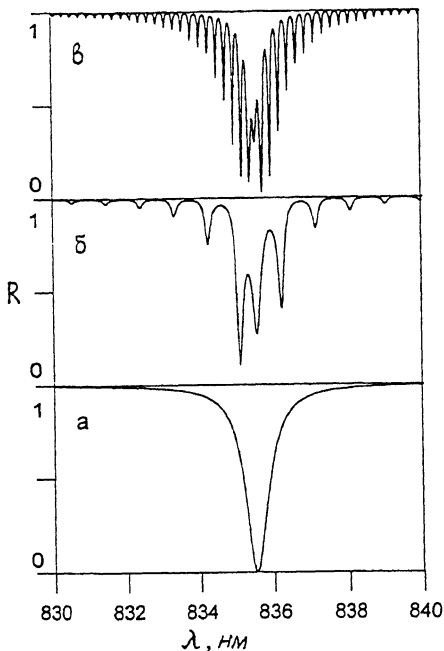
$$T = \begin{pmatrix} \cos(k_0 n d \cos \varphi) & -\frac{i}{n \cos \varphi} \sin(k_0 n d \cos \varphi) \\ -i n \cos \varphi \sin(k_0 n d \cos \varphi) & \cos(k_0 n d \cos \varphi) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где k_0 — волновой вектор света в вакууме.

Перемножая матрицы переноса всех слоев (включая КЯ), можно получить характеристическую матрицу всей среды \hat{M} , после чего коэффициент отражения R находится как

$$R = \left| \frac{(M_{11} + M_{12} n_l \cos \varphi_l) n_0 \cos \varphi_0 - (M_{21} + M_{22} n_l \cos \varphi)}{(M_{11} + M_{12} n_l \cos \varphi_l) n_0 \cos \varphi_0 + (M_{21} + M_{22} n_l \cos \varphi)} \right|^2, \quad (4)$$

где n_0 и n_l — показатели преломления первой и последней полубесконечных сред, ограничивающих слоистую структуру; φ_0 и φ_l — углы распространения света в этих средах по отношению к оси слоистой структуры; M_{ij} — элементы матрицы \hat{M} . Будем полагать значение показателя преломления AlAs постоянным и равным 3.0, а показатель преломления GaAs возьмем равным 3.7. Все слои будем считать непоглощающими свет.



На рисунке показаны спектры отражения света от поглощающего микрорезонатора как без учета отражения от обратной стороны подложки (а), так и при учете этого. Толщины подложки, использованные в расчетах: 0.1 мм (б) и 0.4 мм (в). Можно видеть, что в случае, когда отражение от обратной стороны подложки отсутствует, спектр отражения в области собственной моды имеет вид лоренцевского контура. Учет отражения от обратной стороны подложки приводит к тому, что этот контур оказывается промодулированным узкими особенностями различной амплитуды, расстояние между которыми уменьшается с увеличением толщины подложки. Причина появления этих узких особенностей — возбуждение локализованных оптических мод в резонаторе, образованном обратной стороной подложки и ближайшим к ней БО.

Следует отметить, что реальные МР, полученные методом молекулярно-пучковой или газофазной эпитаксии не имеют, как правило, оптически гладкой поверхности на обратной стороне, что при экспериментальном измерении спектров отражения может приводить к смазыванию тонкой структуры. Спектр отражения вблизи собственной моды в этом случае может иметь вид лоренцевского контура, одна-

ко глубина модуляции и ширина линии будут отличаться от рассчитанной при пренебрежении отражением от обратной стороны подложки.

Таким образом, показано, что учет отражения света от обратной стороны подложки может существенно изменить наблюдаемую в эксперименте форму контура отражения.

Авторы выражают глубокую благодарность А.В. Кавокину и Е.Л. Ивченко за полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] *Weisbouch C., Nishioka M., Ishikawa A., Arakawa Y.* // Phys. Rev. Lett. 1992. V. 69. P. 3314.
- [2] *Houdre R., Stanley R.P., Oesterle U., Pigeons M., Weisbouch C.* // Phys. Rev. B. 1994. V. 49. P. 16761.
- [3] *Tignon J., Voisin P., Delande C., Voos M., Houdre R., Oesterle U., Stanley R.P.* // Phys. Rev. Lett. 1994. V. 74. P. 3967.
- [4] *Kavokin A.V., Kaliteevski M.A.* // Solid State Commun. 1995. V. 95. P. 859.
- [5] *Ivchenko E.L., Kaliteevski M.A., Kavokin A.V., Nesvichskii N.A.* // J. of Am. Opt. Soc. The Features Issue / Ed. by L.S. Citrin and J. Kuhl. 1995 (in press).
- [6] *Savona V., Andreani L.C., Schwendimann P., Quatropani A.* // Solid State Commun. 1995. V. 93. N 12. P. 733-739.
- [7] *Калитеевский М.А., Кавокин А.В.* // ФТТ. 1995. Т. 37. В. 10.
- [8] *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1970. С. 77.

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

Поступило в Редакцию
25 октября 1995 г.