

Фарадеевское вращение света в микрорезонаторах

© М.А. Калитеевский, А.В. Кавокин, П.С. Копьев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 11 июля 1996 г. Принята к печати 18 ноября 1996 г.)

Теоретически исследовано фарадеевское вращение света в микрорезонаторах. Рассчитаны спектры отражения и пропускания света. Установлено, что в области спектра, соответствующей собственной моде резонатора, имеет место значительное усиление фарадеевского вращения и существенное изменение поляризации света.

Введение

Полупроводниковые микрорезонаторы (МР) в последнее время весьма интенсивно исследуются как экспериментально [1–3], так и теоретически [4–7]. Это обусловлено, во-первых, тем, что изучение полупроводниковых микрорезонаторов позволило наблюдать ряд новых эффектов, таких как расщепление Раби и осцилляции Раби, а во-вторых, тем, что микрорезонаторы используются для создания лазеров с вертикальной эмиссией излучения. 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 (см. рис. 1). В такой структуре могут возбуждаться световые моды, локализованные в центральном слое. Спектр этих мод дискретен и при нормальном падении света определяется соотношением

$$2nK_0L + f_1 + f_2 = 2\pi N, \quad (1)$$

где K_0 — модуль волнового вектора света в вакууме, n — показатель преломления полости, L — толщина полости, $f_{1(2)}$ — фаза амплитудного коэффициента отражения света от первого (второго) БО, N — целое. В спектрах отражения (пропускания) света от таких структур имеются особенности, в виде узких глубоких провалов (пигов), спектральное положение которых совпадает с положением собственных оптических мод МР.

Цель данной работы — изучение фарадеевского вращения света [8–10] в полупроводниковых микрорезонаторах. Естественно предположить, что из-за множественного переотражения света от зеркал, образующих резонатор, фарадеевское вращение света в полости микрорезонатора на частотах собственных мод будет существенно усилено.

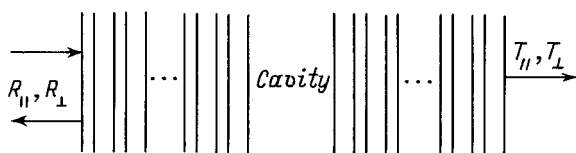


Рис. 1. Схема структуры.

Основные уравнения

Рассмотрим нормальное падение линейно поляризованного вдоль оси x света на МР. Плоская волна единичной амплитуды, распространяющаяся вдоль оси z , может быть представлена в виде

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где компоненты вектор-столбцов соответствуют x - и y -компонентам электрического поля \mathbf{E} световой волны.

Будем считать, что внешнее магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости слоев МР. Для простоты предположим, что вращение плоскости поляризации имеет место только в плоскости, но не в слоях зеркал.

Линейно поляризованная волна в полости разделится на две циркулярно поляризованные E_+ и E_- , которым соответствуют разные показатели преломления n_+ и n_- , [8]

$$n_+ = n + \delta, \quad (3a)$$

$$n_- = n - \delta, \quad (3б)$$

при этом для парамагнитных и диамагнитных материалов значение δ определяется как

$$\delta = VH/K_0, \quad (3в)$$

где V — постоянная Верде, H — напряженность магнитного поля. Ферромагнитные материалы принято характеризовать удельным фарадеевским вращением в состоянии насыщенной намагниченности F [10], для этого случая δ определяется выражением

$$\delta = F/K_0. \quad (3г)$$

Значения V и F весьма сильно различаются для различных веществ, зависят от температуры и спектральной области. Например, для соединения EuS при гелиевых температурах в области длин волн $0.8 \div 0.9$ мкм величина F имеет значение порядка $10^3 \div 10^4$ рад/см, что соответствует $\delta \approx 0.1$. Отметим, что указанный диапазон длин волн соответствует области прозрачности EuS [10].

Отраженный и прошедший свет может обладать эллиптической поляризацией, что можно записать в виде

$$E = \frac{1}{2}A \exp(i\varphi_+) \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} + \frac{1}{2}B \exp(i\varphi_-) \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}, \quad (4)$$

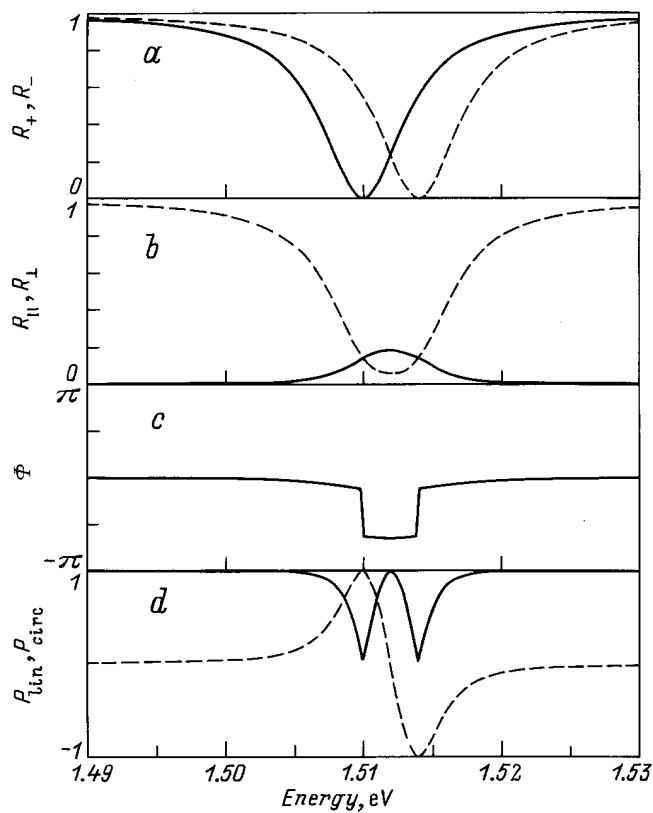


Рис. 2. *a* — спектры отражения света для двух циркулярных поляризаций. *b* — спектры отражения света в линейной поляризации, совпадающей с поляризацией падающего света (штриховая линия), и в поляризации, перпендикулярной поляризации падающего света (сплошная). *c* — спектральная зависимость угла поворота плоскости поляризации. *d* — спектральная зависимость степени линейной (сплошная линия) и циркулярной (штриховая) поляризации отраженного сигнала. Коэффициенты отражения зеркал, образующих резонатор, равны 90%, рассогласование показателей преломления $\delta = 0.03$.

где два множителя при вектор-столбцах соответствуют комплексным амплитудам двух различных циркулярно поляризованных волн. Выражение (4) может быть преобразовано к виду

$$E = \frac{1}{2}(A + B) \exp(i\psi) \begin{pmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{pmatrix} + \frac{i}{2}(B - A) \exp(i\psi) \begin{pmatrix} \sin \phi \\ -\cos \phi \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где два слагаемых соответствуют двум волнам, линейно поляризованным вдоль главных осей эллипса, $\psi = \varphi_+ + \varphi_-$, а угол вращения плоскости поляризации ϕ дается выражением

$$\phi = \varphi_- - \varphi_+. \quad (6)$$

Степень линейной поляризации света определяется выражением

$$P_{\text{lin}} = \frac{2AB}{A^2 + B^2}, \quad (7)$$

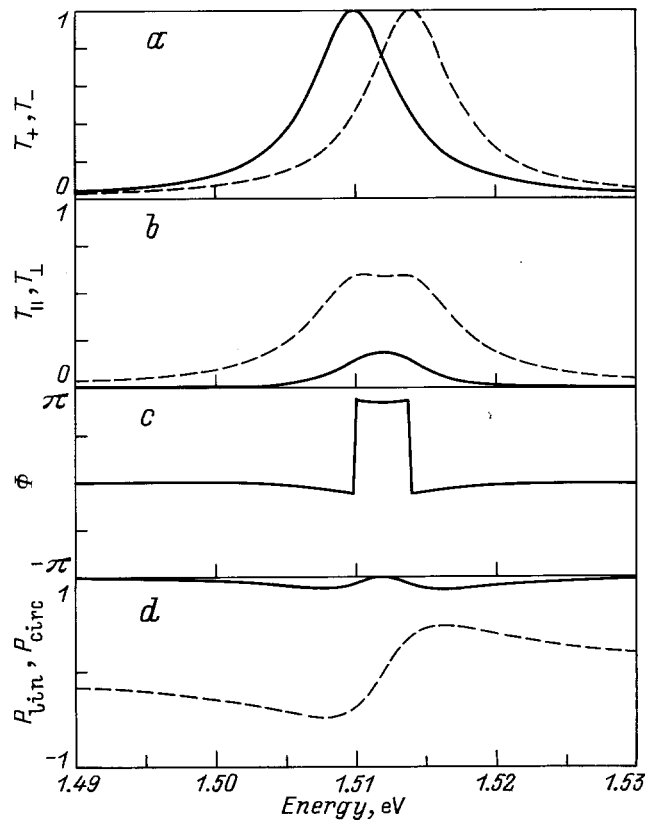


Рис. 3. *a* — спектры пропускания света для двух циркулярных поляризаций. *b* — спектры пропускания света в линейной поляризации, совпадающей с поляризацией падающего света (штриховая линия), и в поляризации, перпендикулярной поляризации падающего света (сплошная). *c* — спектральная зависимость угла поворота плоскости поляризации прошедшего света. *d* — спектральная зависимость степени линейной (сплошная линия) и циркулярной (штриховая) поляризации прошедшего света. Коэффициенты отражения зеркал, образующих резонатор, равны 90%, рассогласование показателей преломления $\delta = 0.03$.

а степень циркулярной поляризации дается формулой

$$P_{\text{cir}} = \frac{A^2 - B^2}{A^2 + B^2}. \quad (8)$$

Амплитудные коэффициенты отражения (r_+ , r_-) и пропускания (t_+ , t_-) света двух разных циркулярных поляризаций могут быть рассчитаны методом матриц переноса [11], и тогда коэффициент отражения света в линейной поляризации, совпадающей с поляризацией падающего света, находится как

$$R_{\parallel} = \frac{1}{4}|r_+ + r_-|^2, \quad (9)$$

а коэффициент отражения света в поляризации, перпендикулярной поляризации падающего света, определяется выражением

$$R_{\perp} = \frac{1}{4}|r_+ - r_-|^2. \quad (10)$$

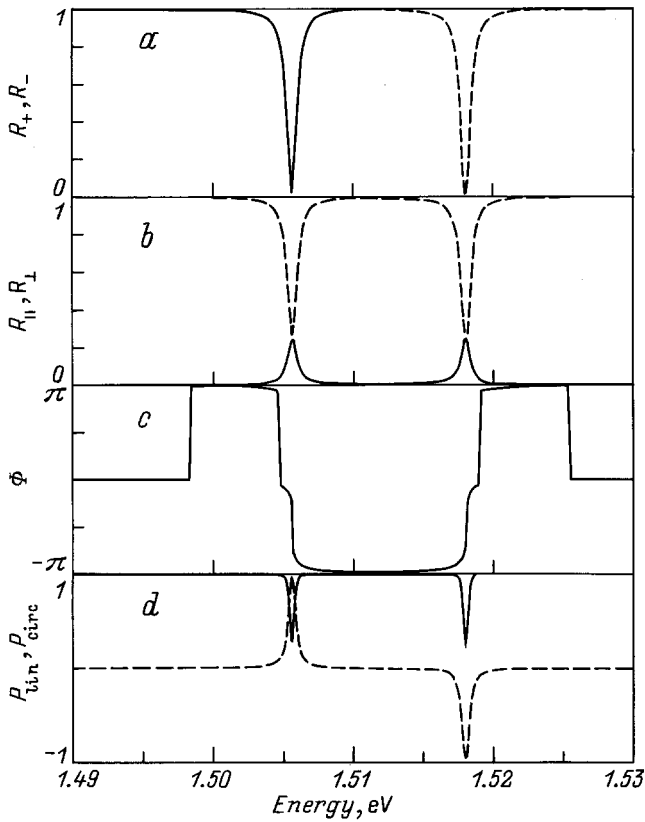


Рис. 4. *a* — спектры отражения света для двух циркулярных поляризаций. *b* — спектры отражения света в линейной поляризации, совпадающей с поляризацией падающего света (штриховая линия), и в поляризации, перпендикулярной поляризации падающего света (сплошная). *c* — спектральная зависимость угла поворота плоскости поляризации. *d* — спектральная зависимость степени линейной (сплошная линия) и циркулярной (штриховая) поляризации отраженного сигнала. Коэффициенты отражения зеркал, образующих резонатор, равны 99%, рассогласование показателей преломления $\delta = 0.1$.

Аналогично могут быть найдены коэффициенты пропускания света для поляризации, совпадающей с поляризацией падающего света,

$$T_{||} = \frac{1}{4} \frac{n_l}{n_0} |t_+ + t_-|^2 \tag{11}$$

и для поляризации, перпендикулярной поляризации падающего света,

$$T_{\perp} = \frac{1}{4} \frac{n_l}{n_0} |t_+ - t_-|^2, \tag{12}$$

где n_0, n_l — показатели преломления первой и последней полубесконечных сред, ограничивающих структуру. Отметим, что для наклонного падения света такая процедура (в части метода матриц переноса) неприменима.

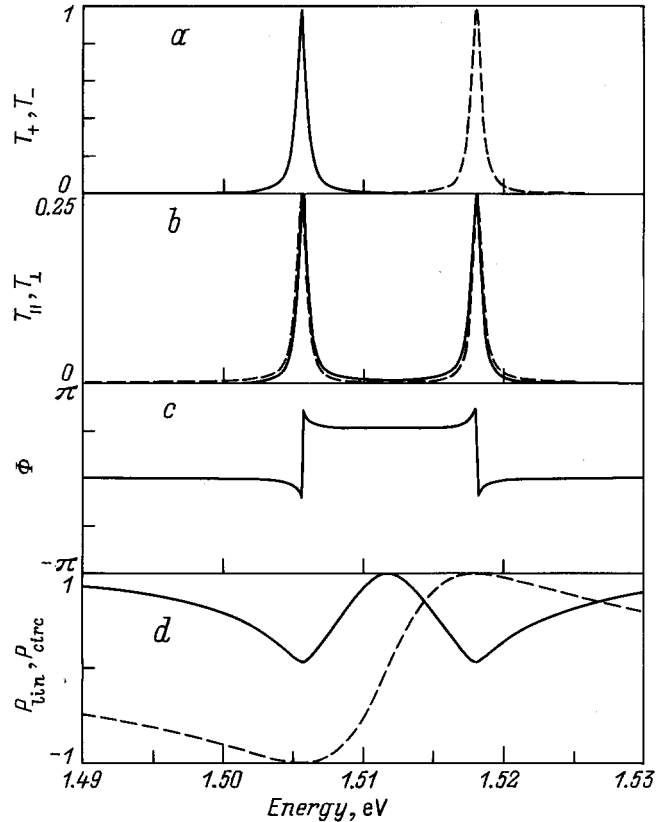


Рис. 5. *a* — спектры пропускания света для двух циркулярных поляризаций. *b* — спектры пропускания света в линейной поляризации, совпадающей с поляризацией падающего света (штриховая линия), и в поляризации, перпендикулярной поляризации падающего света (сплошная). *c* — спектральная зависимость угла поворота плоскости поляризации прошедшего света. *d* — спектральная зависимость степени линейной (сплошная линия) и циркулярной (штриховая) поляризации прошедшего света. Коэффициенты отражения зеркал, образующих резонатор, равны 99%, рассогласование показателей преломления $\delta = 0.1$.

Результаты и обсуждение

Понятно, что оптическое поведение системы будет определяться как фарадеевским вращением света в полости (т.е. параметром δ), так и коэффициентами отражения зеркал, или, точнее, добротностью резонатора.

В данной работе расчеты выполнялись для трех симметричных микрорезонаторов, отличающихся коэффициентами отражения зеркал. Зеркала представляли собой периодические последовательности пар слоев с показателями преломления 3.0 и 3.5 и толщинами 68.3 и 58.6 нм соответственно. Зеркала первого МР состояли из 8 пар слоев (коэффициент отражения зеркал $R_m = 0.9$), второго МР — из 10 пар слоев (коэффициент отражения $R_m = 0.95$), третьего МР — из 15 пар слоев (коэффициент отражения $R_m = 0.99$). У всех трех резонаторов центральный слой (полость) имел $n = 3.5$ и толщину 117.1 нм, что соответствовало половине длины волны

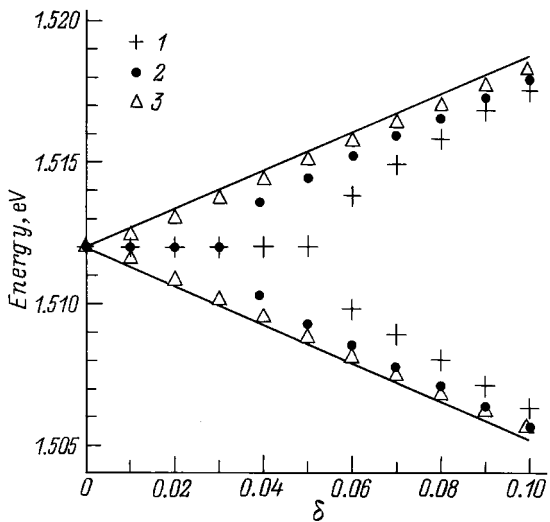


Рис. 6. Зависимость положения пиков в спектрах отражения и пропускания линейно поляризованного света, поляризация которого перпендикулярна поляризации падающего света, от рассогласования показателей преломления δ для трех микрорезонаторов с коэффициентами отражения зеркал 90% (1), 95% (2), 99% (3). Сплошные линии — положения собственных мод резонатора для двух разных циркулярных поляризаций света.

света в полости на частоте собственной моды при $\delta = 0$ (так называемый $(\lambda/2)$ -резонатор). В этом случае угол поворота плоскости поляризации света при прохождении полости связан со значением δ формулой

$$\phi = \pi\delta. \tag{13}$$

Параметры МР выбирались таким образом, чтобы быть похожими на параметры МР, изучаемых экспериментально [1–3].

Разные показатели преломления n_+ и n_- для разных поляризаций обуславливают различное спектральное положение собственных мод и соответствующих особенностей в спектрах отражения и пропускания циркулярно поляризованного света (рис. 2, *a*, 3, *a*, 4, *a*, 5, *a*). Для симметричного микрорезонатора и отсутствия поглощения в структуре положения особенностей в спектрах отражения и пропускания света одной и той же циркулярной поляризации совпадают, а величины коэффициентов отражения и пропускания на частотах собственных мод становятся равными нулю и единице соответственно.

Рассмотрим падение линейно поляризованного света на МР. В случае малого значения коэффициент отражения зеркал резонатора (90%) и малого рассогласования показателей преломления ($\delta = 0.03$) (рис. 2, *b*, 3, *b*) линия, соответствующая собственной моде, имеет меньшую глубину модуляции и большую ширину, появляется сигнал в поляризации, перпендикулярной поляризации падающего света.

На рис. 2, *c* показана спектральная зависимость угла поворота плоскости поляризации отраженного сигнала.

Разрывы в этой зависимости соответствуют точкам, в которых R_{\perp} сравнивается по величине с R_{\parallel} . Отметим, что угол поворота плоскости поляризации при прохождении света через $(\lambda/2)$ -полость при $\delta = 0.03$ равен 0.1 рад, в то время как максимальное значение угла поворота плоскости поляризации отраженного сигнала ϕ в рассматриваемом случае составляет более 2 рад.

На рис. 2, *d* изображены спектральные зависимости степени линейной и циркулярной поляризации отраженного сигнала. Видно, что на частотах, близких к положениям собственных мод циркулярно поляризованного света, имеет место преобразование поляризации падающего света из линейной в циркулярную.

На рис. 3, *b–d* показаны аналогичные зависимости для прошедшего света.

Рассмотрим теперь случай больших значений δ коэффициентов отражения зеркал резонатора. На рис. 4 и 5 приведены спектральные зависимости различных характеристик отраженного и прошедшего света для случая $R_m = 0.99$ и $\delta = 0.1$. Можно видеть, что при освещении структуры линейно поляризованным светом спектры отражения и пропускания содержат по две особенности в обеих линейных поляризациях, причем на частотах собственных мод коэффициенты отражения и пропускания равны 25% при любой линейной поляризации, что означает полное преобразование поляризации из линейной в циркулярную.

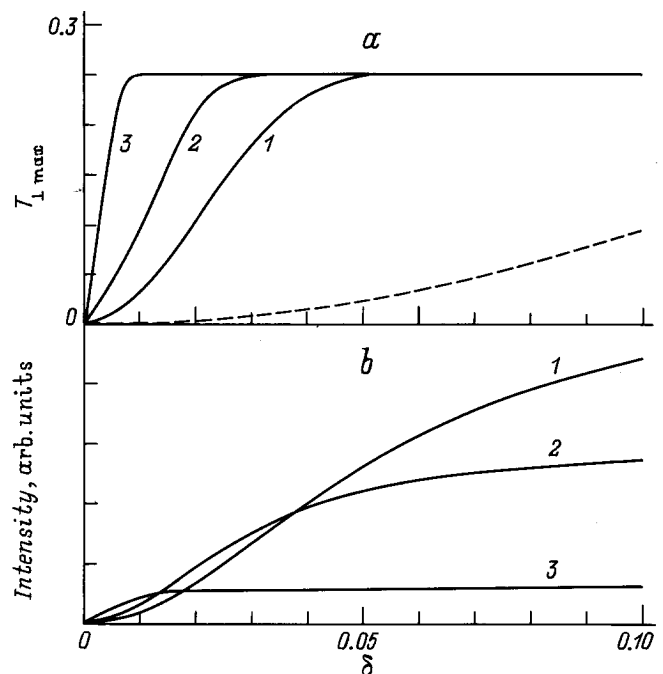


Рис. 7. Зависимость максимальной величины коэффициента пропускания $T_{\perp \max}$ (*a*) и полной интенсивности прошедшего линейно поляризованного света (*b*) при освещении МР "белым" светом от рассогласования показателей преломления δ для трех симметричных микрорезонаторов с коэффициентами отражения зеркал 90% (1), 95% (2) и 99% (3). Штриховая линия — график функции $\sin^2(\pi\delta)$.

Необходимо отметить, что для рассматриваемого здесь случая симметричного МР спектры отражения и пропускания света в поляризации, перпендикулярной поляризации падающего света, практически идентичны.

Рис. 6 показывает зависимость положения особенностей в спектрах пропускания света в линейной поляризации, перпендикулярной поляризации падающего света, от величины δ для трех МР с разными значениями R_m . Видно, что в случае, когда R_m невелико, при малых значениях δ в спектре наблюдается одна особенность. При увеличении δ после перехода некоторого критического значения линия расщепляется на две. При больших значениях R_m в спектре имеются две особенности даже при малых значениях δ , причем положения этих особенностей практически совпадают с положениями собственных мод МР для света двух различных циркулярных поляризаций.

На рис. 7, а приведена зависимость коэффициента пропускания света линейной поляризации, перпендикулярной поляризации падающего света, от величины δ . Это насыщающаяся зависимость: коэффициент пропускания стремится к 0.25, насыщение достигается тем быстрее, чем больше значение R_m . Насыщение соответствует полному преобразованию линейно поляризованного света в циркулярно поляризованный. Для сравнения на этом же рисунке приведен график функции $\sin^2(\pi\delta)$, описывающей величину T_{\perp} в случае, когда нет отражения света от границ полости.

Для возможных приборных приложений важно знать полную мощность сигнала, измеренного в линейной поляризации, перпендикулярной поляризации падающего света, при освещении МР "белым" светом (P_{\perp}):

$$P_{\perp} = \int I_{\perp} d\omega. \quad (14)$$

Зависимости P_{\perp} от δ показаны на рис. 7, б. Видно, что это насыщающиеся зависимости. Понятно, что насыщение достигается на уровне $P_{s\perp}$, определяемом формулой

$$P_{s\perp} = \Delta/2, \quad (15)$$

где Δ — ширина линии собственной моды.

Основные результаты работы состоят в следующем. Рассмотрено фарадеевское вращение света в микрорезонаторах. Установлено, что на частотах собственных мод резонатора фарадеевское вращение света существенно усиливается и имеет место значительное преобразование поляризации света. Этот эффект может быть использован для измерения магнитного поля и модулирования световых сигналов с помощью магнитного поля.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант N 96-02 17836-а) и Министерством науки в рамках программы "Физика твердотельных наноструктур".

Авторы выражают глубокую благодарность Р.П. Сейяну за весьма полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] C. Weisbouch, M. Nishioka, A. Ishikawa, Y. Arakawa. Phys. Rev. Lett., **69**, 3314 (1992).
- [2] R. Houdre, R.P. Stanley, U. Oesterle, M. Ilgems, C. Weisbouch. Phys. Rev. B, **49**, 16 761 (1994).
- [3] J. Tignon, P. Voisin, C. Delande, M. Voos, R. Houdre, U. Oesterle, R.P. Stanley. Phys. Rev. Lett., **74**, 3967 (1994).
- [4] A.V. Kavokin, M.A. Kaliteevski. Sol. St. Commun., **95**, 859 (1995).
- [5] E.L. Ivchenko, M.A. Kaliteevski, A.V. Kavokin et al. J. Amer. Opt. Soc., **13**, N 5 (1996) (in press).
- [6] V. Savona, L.C. Andreani, P. Schwendimann, A. Quattropani. Sol. St. Commun., **93**, 733 (1995).
- [7] М.А. Калитеевский. ФТП, **30**, 516 (1996).
- [8] М.М. Бредов, В.В. Румянцев, И.Н. Топтыгин. *Классическая электродинамика* (М., Наука, 1985) с. 338.
- [9] Н.И. Калитеевский. *Волновая оптика* (М., Высш. шк., 1995) с. 160.
- [10] *Физические величины*, под ред. И.С. Григорьевой, Е.З. Мейлиховой (М., Энергоатомиздат).
- [11] М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики* (М., Наука, 1970) с. 77.

Редактор Л.В. Шаронова

Faraday rotation of light in a microcavity

M.A. Kaliteevski, A.V. Kavokin, P.S. Kop'ev

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia

Abstract Faraday rotation of light in a microcavity has been investigated theoretically. Reflection and transmission spectra are calculated. Strong amplification of Faraday rotation and redistribution of light intensity between different polarizations takes place at the cavity eigen mode frequency.

E-mail: kalit@mocvd.ioffe.rssi.ru