

Пространственный фурье-анализ мод на выходе однородной ограниченной системы связанных волноводов

Д.Х.Нурлигареев, Б.А.Усиевич, К.М.Голант, В.А.Сычугов

Представлены результаты исследований распространения света в ограниченных однородных системах туннельно-связанных волноводов. Выполнен фурье-анализ мод на выходе системы волноводов в зависимости от угла торцевого возбуждения волноводов, позволивший выделить соответствующую возбужденно брэгговских мод область углов возбуждающего пучка. Для большого числа отдельных волноводов системы приведены выражения вектора Блоха, определяющие процесс отражения света в периодически слоистой среде. Показано, что в пленочных лазерах брэгговская дифракция волн света может существенно изменять характеристики их излучения.

Ключевые слова: система связанных волноводов, блоховские волны, брэгговское отражение.

1. Введение

В работах [1, 2] представлены результаты исследования распространения света в ограниченных однородных системах туннельно-связанных волноводов. Было установлено, что брэгговские моды в системах связанных волноводов представляют большой научный и практический интерес, т. к. режим их распространения может существенно повлиять на пространственную расходимость излучения в такой системе волноводов, а также на мощность излучения в случае использования активных волноводов [3]. В связи с этим мы провели детальный фурье-анализ мод на выходе системы связанных волноводов и рассмотрели перспективы использования брэгговских мод в одночастотных лазерных схемах.

2. Изготовление структуры и результаты экспериментальных исследований

Система туннельно-связанных волноводов была изготовлена методом SPCVD на кварцевой подложке путем напыления 50 пар чередующихся слоев SiO_2 и SiON с разностью показателей преломления $\Delta n = 5 \times 10^{-3}$ [1]. Поверх структуры был напылен слой SiO_2 толщиной ~ 100 мкм для обеспечения качественной полировки торцов системы. Толщина волноводного слоя h составляла 1.1 мкм, а промежуток s между слоями достигал 1.3 мкм, так что период структуры Λ был равен 2.4 мкм.

По нашим расчетам, в полученной системе волноводов возникают 34 направляемые моды, а остальные моды являются модами утечки. Брэгговские моды системы волноводов располагаются среди мод утечки [2].

С помощью установки, схема которой изображена на рис.1, мы провели пространственный фурье-анализ мод

на выходе системы в зависимости от угла торцевого возбуждения системы волноводов. Основным отличием этой схемы от использованных нами ранее в работах [1, 2] явилось наличие длиннофокусной линзы для наблюдения на удаленном экране фурье-спектров выходного излучения. Методом RPM (метод полюса отражения) [4] мы рассчитали распределение поля на выходе системы волноводов для одной из мод (порядок моды $m = 5$), представленное на рис.2. Фурье-анализ излучения на торце системы выявил ряд точек, соответствующих присутствующим в картине излучения пространственным гармоникам. Типичный вид этих спектров показан на рис.3. Обработка картин рис.3 позволила представить основные результаты наших исследований в виде зависимости, показанной на рис.4.

По горизонтальной оси на рис.4,а отложена величина $k \sin \varphi$, т. е. составляющая вектора падающей волны света, перпендикулярная оси волновода, а по вертикальной оси – модуль вектора K_B блоховской волны* [5] и модули векторов $\pm m2\pi/\Lambda \pm K_B$ ($m = 1, 2$) на выходе волновода. Здесь Λ – период волноводной системы; $2\pi/\Lambda$ – вектор решетки; φ – угол между осью системы и направлением падающего пучка. Характерной особенностью рис.4,а является область пересечения кривых K_B и $2\pi/\Lambda - K_B$,

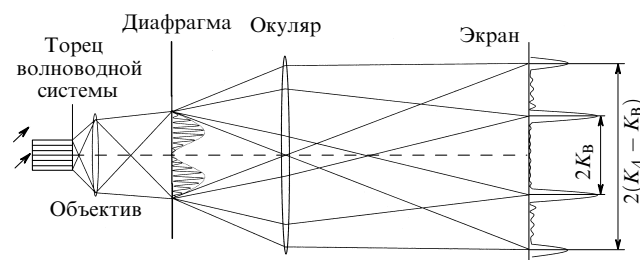


Рис.1. Схема экспериментальной установки для пространственного фурье-анализа выходного излучения.

* Блоховские волны – это собственные решения волнового уравнения в периодической среде вида $\exp(iK_B x)u(x)$, где $u(x)$ – периодическая функция, период которой задан средой.

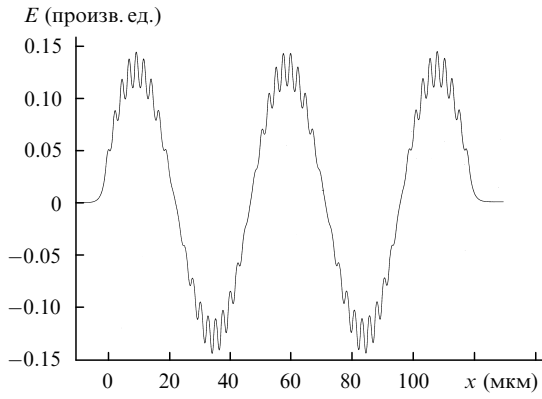


Рис.2. Распределение поля пятой моды системы связанных волноводов на выходном торце волноводной системы.

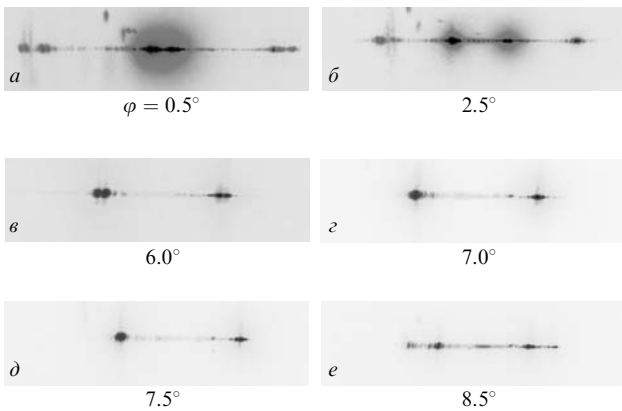


Рис.3. Картины фурье-спектров выходного излучения при разных углах возбуждения волноводной системы.

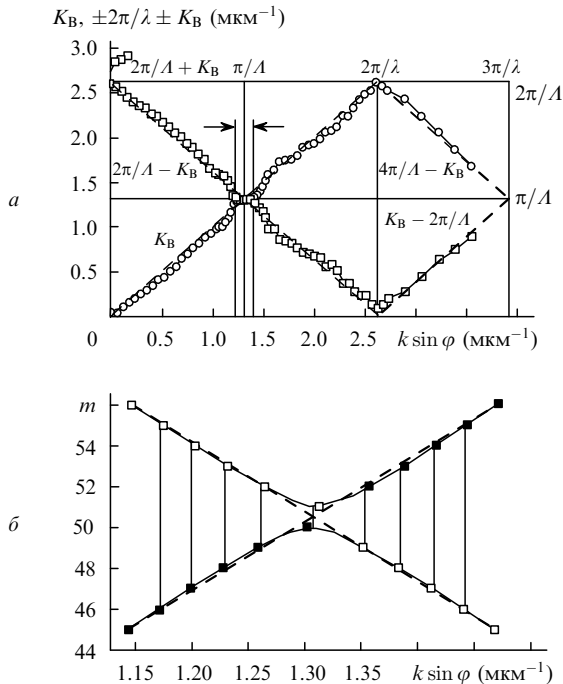


Рис.4. Экспериментальные зависимости фурье-спектров выходного излучения (штриховые линии – расчет) (а) и расчетные зависимости порядка моды (■ – K_B , □ – $2\pi/\Lambda - K_B$) (б) от угла возбуждения волноводной системы при $\lambda=0.63$ мкм, $\Lambda = 2.4$ мкм; точки – эксперимент.

характеризующаяся равенством $\pi/\Lambda = \text{Re}K_B$. В этой области блоховские волны, распространяющиеся навстречу друг другу, связаны между собой с коэффициентом связи $\kappa = \text{Im}K_B$. Пересечение кривых происходит в момент брэгговского отражения света в системе волноводов. График на рис.4,а – наглядный пример проявления брэгговского резонанса в ограниченной системе туннельно-связанных волноводов. Отметим, что в рассмотренной системе волноводов брэгговские моды являются модами утечки.

3. Теоретический анализ модового распределения в ограниченной системе туннельно-связанных волноводов

Методом, изложенным в работе [4], мы рассчитали распределения полей мод системы волноводов и их фурье-представления, а затем сопоставили эти распределения с экспериментальными данными. На рис.4,а точками представлены экспериментально полученные зависимости модуля блоховского вектора K_B и модуля вектора $2\pi/\Lambda - K_B$ от $k \sin \varphi$, а на рис.4,б – расчетная и экспериментальная зависимости порядков мод, близких к брэгговским модам, от той же величины. Очевидно, что полное согласие экспериментальных и расчетных данных свидетельствует о правильном понимании нами происходящего явления, заключающегося в одновременном возбуждении двух мод с одинаковыми амплитудами при брэгговском резонансе. Коэффициент связи блоховских волн может быть определен следующим образом:

$$|\kappa| = \frac{\pi \Delta n^* \bar{n}}{\lambda \sin \varphi}, \tag{1}$$

где \bar{n} – усредненный показатель преломления системы; $\Delta n^* = n_N^* - n_{N+1}^*$ – разность эффективных показателей преломления брэгговских мод; N – число волноводов, образующих систему.

До сих пор мы изучали распространение света в ограниченной системе туннельно-связанных волноводов, причем направление распространения света совпадало с направлением волноводов. Периодичность расположения волноводов позволила показать огромное значение блоховских волн в процессе распространения света. В [5] установлено, что подход с использованием блоховских волн может быть применен и для брэгговского отражения света в неограниченной среде – в случае произвольного распространения света по отношению к слоям периодической системы. Если волновой вектор света направлен относительно нормали к слоям под углом θ , то вектор Блоха записывается в следующем виде:

$$K_B = k\bar{n} \cos \theta \pm i \left[\kappa^* \kappa - \left(\frac{\Delta\beta}{2} \right)^2 \right]^{1/2}, \tag{2}$$

где

$$\kappa = \frac{i(1 - \cos m\pi)}{2m\lambda \cos \theta} \frac{\sqrt{2}(n_2^2 - n_1^2)}{(n_2^2 + n_1^2)^{1/2}} \text{ для ТЕ-волн,}$$

$$\kappa = \frac{i(1 - \cos m\pi)}{2m\lambda \cos \theta} \frac{\sqrt{2}(n_2^2 - n_1^2)}{(n_2^2 + n_1^2)^{1/2}} \cos 2\theta \text{ для ТМ-волн;}$$

$\Delta\beta = 2k\bar{n} \cos \theta - 2m\pi/\Lambda$ – отстройка от резонанса; $k = 2\pi/\lambda$.

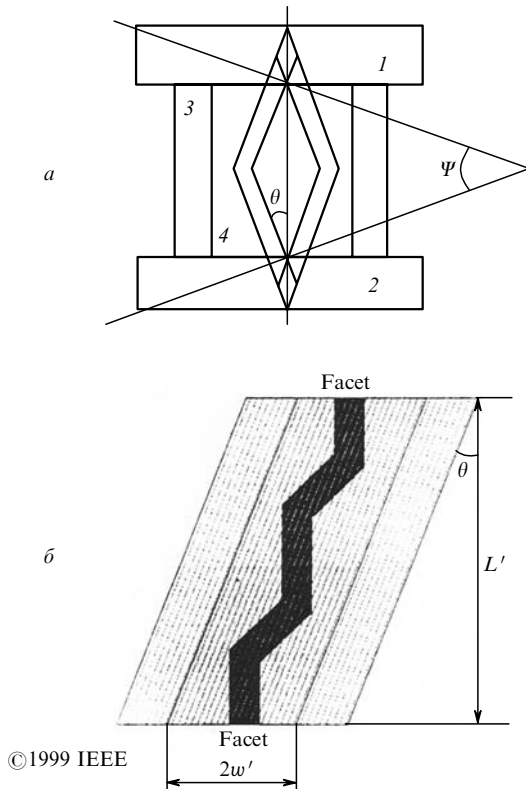


Рис.5. Схемы лазерного резонатора из работы [6] (а) и из работ [7, 8] (б):

1, 2 – решетки обратной связи второго порядка с $\Lambda_0 = 0.4$ мкм; 3 – решетка в активной зоне лазера с $\Lambda_1 = 1.5$ мкм; 4 – активная зона лазера; θ – угол брэгговской дифракции; $\Psi = 2\theta$ – угол разворота зеркал обратной связи при получении одночастотной генерации.

Если центральную частоту зоны отражения, соответствующую равенству $k\bar{n} \cos \theta = m\pi/\Lambda$ (или $\Delta\beta = 0$), обозначить через ω_0 , то выражение (2) приобретет следующий вид:

$$K_B = \frac{m\pi}{\Lambda} \pm i \left[\chi^* \chi - \left(\frac{\bar{n}}{c} \right)^2 (\omega - \omega_0)^2 \cos^2 \theta \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где $\bar{n} = \frac{1}{2}(n_1^2 + n_2^2)^{1/2}$. Формула (3) позволяет полностью описать процесс отражения света в периодически слоистой среде.

Мы рассматриваем здесь систему связанных волноводов, расположенных с периодом $\Lambda = h + s$. По сути такая система волноводов является плоской решеткой с периодически изменяющимся вдоль некоторого направления показателем преломления. Очевидно, что брэгговское взаимодействие света с такой решеткой и с гофрированным волноводом во многом имеет одинаковый характер. Поэтому здесь уместно упомянуть о пленочных лазерах с брэгговскими решетками внутри резонатора. В работе [6] еще в 1979 г. нами был реализован волноводный лазер с брэгговской решеткой в активной зоне; пе-

риод Λ_1 этой решетки составлял 1.5 мкм, для обратной связи использовались две параллельные решетки, отражавшие свет во втором порядке дифракции ($\Lambda_2 = 0.4016$ мкм). Пленка, активированная родамином 6Ж, была одномодовой. На выходе лазера наблюдались две линии генерации: с $\lambda_0 = 0.5969$ мкм, соответствующей волне, которая распространяется вдоль оси промежуточной решетки, и с $\lambda_\theta = 0.5916$ мкм, соответствующей брэгговской волне, которая отражается на промежуточной решетке [6]. Характерной особенностью этих волн была существенно меньшая (в 5–6 раз) расходимость излучения с $\lambda_\theta = 0.5916$ мкм, чем с $\lambda_0 = 0.5969$ мкм.

На наш взгляд, этот факт определяется распределенным отражением света на решетке с $\Lambda = 1.5$ мкм в активной зоне лазера. В целях получения одной линии излучения с $\lambda_\theta = 0.5916$ мкм мы в работе [6] предложили развернуть между собой решетки обратной связи на угол $\Psi = 2\theta$ (рис.5,а). В этом случае генерация, идущая вдоль штрихов решетки в активной зоне, должна была исчезнуть из-за резкого повышения порога генерации. Вместо этого в работах [7, 8] зеркала обратной связи оставались параллельными друг другу, а активная область лазера и штрихи решетки были наклонены под углом θ к зеркалам лазера таким образом, чтобы устранить генерацию по нормали к зеркалам (рис.5,б). Следует отметить, что в работе [7] была достигнута одночастотная генерация полупроводниковых лазеров с мощностью ~ 1 Вт и расходимостью излучения, близкой к дифракционному пределу.

4. Выводы

Исследование распространения света в системе связанных волноводов показало, что в описании этого процесса (особенно вблизи брэгговского резонанса) определяющую роль играют блоховские волны. Показано, что брэгговские моды в системе образованы взаимодействием двух противоположно распространяющихся блоховских волн, причем коэффициент связи $|\kappa| = \pi \Delta n^* \bar{n} \times (\lambda \sin \varphi)^{-1}$. На примере решеточных резонаторов показано, что брэгговское отражение может обеспечить работу лазера с высокой выходной мощностью излучения и малой расходимостью.

1. Усевич Б.А., Нурлигареев Д.Х., Сычугов В.А., Голант К.М. *Квантовая электроника*, **35** (6), 554 (2005).
2. Усевич Б.А., Нурлигареев Д.Х., Сычугов В.А., Голант К.М. *Оптика и спектроскопия*, **99** (в печати).
3. Raab V., Menzel R. *Opt. Lett.*, **27** (3), 167 (2002).
4. Anemogiannis E., Glytsis E.N., Gaylord T.K. *J. Lightwave Techn.*, **17** (5), 929 (1999).
5. Ярив А., Юх П. *Оптические волны в кристаллах* (М.: Мир, 1987, с. 169-232).
6. Сычугов В.А., Хакимов А.А. *Письма в ЖТФ*, **5** (9), 535 (1979).
7. Lang R.J., Dzurko K., Hardy A.A., Demars S., Schoenfelder A., Welch D.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **34** (11), 2196 (1998).
8. Saragan A.M., Wright M.W., Marcianti J.R., Bossert D.J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **35** (8), 1220 (1999).