

# Узкополосный оптический фильтр на основе интерферометра Фабри – Перо с одним волноводно-решеточным зеркалом

Б.А.Усиевич, В.А.Сычугов, О.Парье, Д.Х.Нурлигареев

*Рассмотрена многослойная планарная структура, содержащая гофрированный волновод и высокоотражающее зеркало. Структура использована в качестве узкополосного оптического фильтра, работающего в двух различных режимах. Экспериментально в лазерном режиме продемонстрирована работоспособность предложенных фильтров.*

**Ключевые слова:** интерферометр Фабри – Перо, волноводно-решетчатое зеркало, оптический фильтр.

## 1. Введение

Принцип построения и результаты исследований узкополосных оптических фильтров, которые до сих пор остаются предметом разработок и научных исследований [1, 2], представлены в [3, 4]. Действие таких фильтров сопровождается возбуждением волноводных мод в гофрированных многослойных диэлектрических покрытиях, и они обладают на два порядка более узкой линией пропускания света, чем стандартный интерференционный фильтр. Однако при этом подобные фильтры имеют один существенный недостаток, обусловленный многомодовостью волновода, образованного многослойным интерференционным покрытием. В то же время именно гофрированный волновод в структуре фильтра обеспечивает его узкополосность, а многослойность покрытия оптического фильтра [3, 4] позволяет достичь высокого контраста между прошедшим полезным сигналом и паразитным фоном, сопровождающим этот сигнал.

Чтобы сохранить узкую полосу пропускания и высокий контраст, но при этом получить только один пик пропускания, в структуре необходимо использовать одномодовый гофрированный волновод и многослойное отражающее покрытие, обеспечив при этом их оптическую изоляцию друг от друга. Такая структура фильтра приводит нас к традиционной схеме, в основе которой лежит интерферометр Фабри – Перо; одним из зеркал интерферометра является волноводно-решеточное зеркало (ВРЗ).

## 2. Анализ работы фильтра на основе интерферометра Фабри – Перо

Традиционный фильтр обычно представляет собой слой диэлектрика (буферный слой) с нанесенными на него с двух сторон многослойными диэлектрическими зеркалами. Отметим, что буферным слоем в стандартном фильтре служит волновод с модами утечки. Дисперсион-

ное соотношение, определяющее константы распространения света в таком волноводе, имеет следующий вид:

$$2kh(n_b^2 - n^{*2})^{1/2} = 2\pi m - \varphi_1 - \varphi_2, \quad (1)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – набег фазы волны при отражении света от границ буферного слоя толщиной  $h$ ;  $n^*$  – эффективный показатель преломления моды волновода;  $m$  – номер моды. На рис. 1 представлена зависимость  $n^*$  от  $h$  для буферного слоя  $\text{SiO}_2$  ( $n_b = 1.46$ ) в традиционном фильтре с многослойными диэлектрическими зеркалами ( $\text{TiO}_2 - \text{SiO}_2$ ).

Напомним, что параметр  $n^* = n_b \sin \theta$ , где  $\theta$  – угол, под которым свет в буферном слое падает на его границы. Если  $\theta = 0$  и  $\varphi_1 = \varphi_2 = \pi$ , то из соотношения (1) следует, что толщина буферного слоя для основной моды ( $m = 0$ )

$$h = \frac{\lambda}{2n_b}. \quad (2)$$

Максимум интенсивности света, прошедшего через интерферометр, связан с интенсивностью падающего излучения  $I_{\text{in}}$  соотношением

$$I_{\text{max}} = \left[ 1 - \left( \frac{r_1 - r_2}{1 - r_1 r_2} \right)^2 \right] I_{\text{in}},$$

где  $r_1$  и  $r_2$  – амплитудные коэффициенты отражения света на плоских зеркалах. Если  $r_1 = r_2 = \sqrt{R}$ , то пропускание

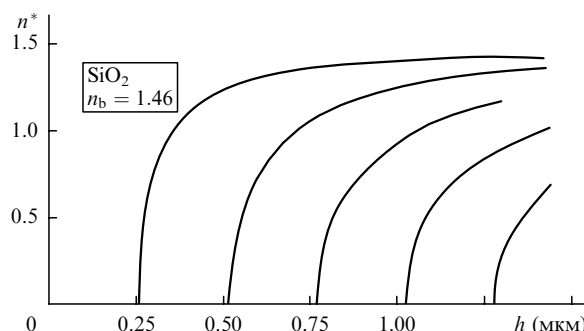


Рис. 1. Дисперсионные кривые диэлектрического слоя, разделяющего зеркала в интерферометре Фабри – Перо ( $\lambda = 750$  нм).

Б.А.Усиевич, В.А.Сычугов, Д.Х.Нурлигареев. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38  
O.Parriaux. Université Jean Monnet, 23, rue du dr. Paul Michelon, 42023 St-Etienne, Cedex 2, France

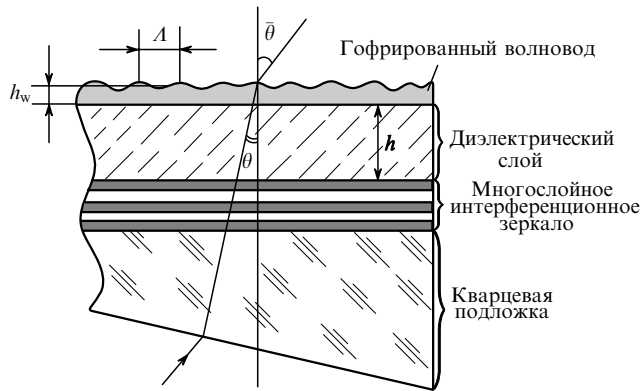


Рис.2. Схема предлагаемого оптического фильтра на основе интерферометра Фабри – Перо с волноводно-решеточным зеркалом.

фильтра достигает 100 %, и при этом спектральная ширина полосы пропускания

$$|\Delta\lambda| = \frac{\lambda^2}{F(\lambda^2 |d\varphi/d\lambda| + 2\pi n_b h \cos \theta)}, \quad (4)$$

где  $F = \sqrt{R}/(1 - R)$  – резкость интерферометра. Обычно величиной  $\lambda^2 |d\varphi/d\lambda|$  пренебрегают по сравнению со вторым слагаемым [5].

В предлагаемом фильтре мы заменяем одно многослойное зеркало гофрированным волноводом, который, как известно [6], является зеркалом, резонансно отражающим свет в узком спектральном и угловом диапазонах. На рис.2 показана схема данного фильтра, который представляет собой многослойную структуру, нанесенную на кварцевую подложку. Верхний слой диэлектрика с показателем преломления  $n_w > n_b$  является волноводом. Его поверхность, граничащая с воздухом, гофрирована и представляет собой дифракционную решетку. Гофрированный волновод обычно характеризуется коэффициентом излучательных потерь  $\alpha_{rad}$ , и если эти потери много больше паразитных потерь  $\alpha_{dis}$  в волноводе, то коэффициент отражения  $R_w$  волноводно-решеточного зеркала (ВРЗ) в максимуме линии отражения может достигать почти 100 %. Положение максимума  $R_w$  определяется соотношением

$$n_w^* - \frac{\lambda}{A} = \sin \bar{\theta}, \quad (5)$$

где  $\bar{\theta}$  – угол падения света на волновод.

На рис.3,а приведена типичная спектральная зависимость коэффициента отражения света от поверхности гофрированного волновода. Свет падает на волновод из буферного слоя под углом  $\theta \approx 2^\circ$ . Волновод представляет собой слой  $Ta_2O_5$  ( $h_w = 210$  нм,  $n_w = 2.02$ , амплитуда  $2\sigma = 80$  нм, период гофра  $A = 457$  нм), нанесенный на буферный слой. Спектральная зависимость  $R_w(\lambda)$  имеет два пика отражения: один – вблизи  $\lambda = 712$  нм (он соответствует возбуждению волновода в +1-м порядке света) и другой – вблизи  $\lambda = 750$  нм (он соответствует возбуждению волновода в -1-м порядке). Интерес представляет второй пик отражения, т. к. в нем коэффициент отражения света может достигать 100 %.

На рис.3,б показаны спектральные зависимости фазы  $\varphi_w$  волны, отраженной от волноводно-решеточного зеркала. При изменении коэффициента отражения света от  $R_w \approx R_F$  до  $R_w = 1$  и снова до  $R_w \approx R_F$  фаза отраженной

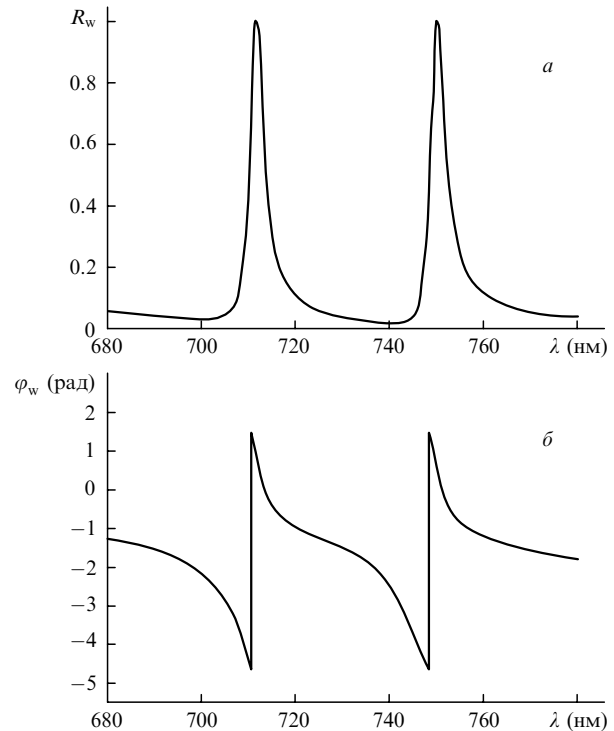


Рис.3. Спектральные зависимости коэффициента отражения света  $R_w(\lambda)$  (а) и фазы отраженной волны  $\varphi_w(\lambda)$  (б) от поверхности гофрированного волновода ( $h_w = 210$  нм,  $n_w = 2.02$ ,  $2\sigma = 80$  нм,  $A = 457$  нм) при угле падения  $\theta = 2^\circ$  и ТМ-поляризации света.

волны  $\varphi_w$  изменяется монотонно и величина  $\Delta\varphi_w = 2\pi$  (здесь  $R_F$  – френелевский коэффициент отражения света).

Если коэффициент отражения  $R_{mm}$  плоского многослойного диэлектрического зеркала интерферометра заметно меньше  $R_w$ , то равенство  $R_{mm} = R_w$  будет достигаться при двух различных значениях фазы  $\varphi_w$ , которым соответствуют разные толщины буферного слоя интерферометра. Эти толщины могут быть определены из уравнений (1), (5) и спектральной зависимости фазы  $\varphi_1 = \varphi_w$  волны, отраженной от гофрированного волновода. В рассматриваемом интерферометре при расчетах толщины буферного слоя в уравнении (1) полагалось, что  $m = 3$ . Полученная в этих расчетах толщина буферного слоя ( $h \sim 1$  мкм) обеспечивала оптическую изоляцию волноводного слоя ( $Ta_2O_5$ ) от многослойного диэлектрического зеркала. Степень оптической изоляции оценивалась по величине интеграла перекрытия полей мод многослойного волновода, которым является плоское зеркало, и однослойного волновода  $Ta_2O_5$  на поверхности буферного слоя.

Для расчета спектральной зависимости пропускания фильтра использовалась РС-программа, позволяющая рассчитать коэффициент резонансного (аномального) отражения света от гофрированной поверхности многослойной волноводной структуры, каковой является предлагаемый оптический фильтр. На рис.4 показаны спектральные зависимости пропускания нашего фильтра (с толщиной буферного слоя  $h = 1$  мкм) и традиционного фильтра. Видно, что ширина полосы пропускания традиционного фильтра много больше ширины полосы предлагаемого фильтра. Такое различие бесспорно обусловлено сильной спектральной зависимостью фазы  $\varphi_w$  отраженной волны в нашем случае. При малой толщине бу-

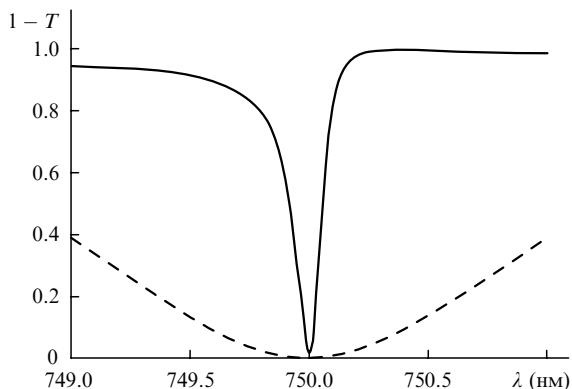


Рис.4. Спектральные зависимости приведенного коэффициента пропускания  $1 - T$  предлагаемого фильтра (сплошная кривая) и традиционного фильтра (штриховая кривая) при толщине буферного слоя  $h = 1000$  нм, угле падения  $\bar{\theta} = 3^\circ$  и ТМ-поляризации света.

ферного слоя ( $h \simeq \lambda$ ) величина  $|d\varphi/d\lambda|$  оказывает решающее влияние на ширину полосы пропускания фильтра.

Весьма интересен вопрос об угловой перестройке длины волны пика пропускания предлагаемого устройства. Расчет спектральных зависимостей пропускания фильтра при разных углах  $\bar{\theta}$  падения света на его поверхность показал, что угловая перестройка полосы пропускания фильтра возможна, и при глубине гофра  $2\sigma = 80$  нм и изменении угла  $\Delta\bar{\theta} = 1.5^\circ$  для света ТМ-поляризации она по уровню 0.5 составляет  $\sim 9$  нм. Увеличение глубины гофра волноводно-решеточного зеркала, естественно, расширит диапазон перестройки  $\Delta\lambda$ , однако при этом увеличится и ширина полосы пропускания фильтра. Более радикальным и при этом самым предпочтительным методом расширения диапазона перестройки длины волны пика пропускания фильтра является электрооптическое изменение толщины буферного слоя, но это уже задача будущего усовершенствования предлагаемого нами фильтра.

Следует также отметить, что рассмотренная выше структура может работать как волноводный оптический фильтр, если оптический широкополосный сигнал введен в волновод до гофрированного участка волновода и регистрируется на выходе после этого участка (см. рис.2). Такая возможность обусловлена резонансным характером полного (или почти полного) отражения света от поверхности гофрированного волновода, а также многолучевой интерференцией света [7]. Механизм действия волноводного фильтра, вопрос о коэффициенте его пропускания и ширине полосы пропускания подробно рассмотрены в работе [7], здесь же следует подчеркнуть, что необходимым условием работы и волноводного и объемного фильтров является выполнение соотношения

$$L \gg \alpha_{\text{rad}}^{-1}, \quad (6)$$

где  $L$  – длина гофрированного участка волновода.

### 3. Экспериментальная часть

Узкополосный фильтр на базе интерферометра Фабри–Перо с диэлектрическими зеркалами обладает общеизвестным свойством, которое состоит в том, что при накачке активной среды, заключенной между зеркалами резонатора, генерируется свет с длиной волны, равной длине волны пика пропускания фильтра. Этим свойст-

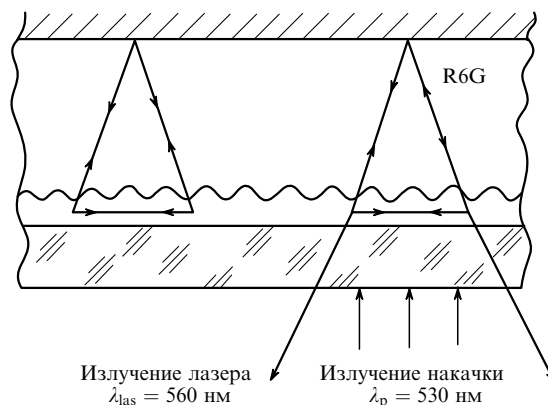


Рис.5. Схема двумерных типов колебаний, реализующихся в лазере с волноводно-решеточным зеркалом.

вом обладает и наш фильтр, однако в отличие от традиционного фильтра генерация в нем может быть получена для волн, распространяющихся под углом к нормали к поверхности фильтра. Такая возможность появляется при использовании в работе фильтра дифракционных волн –1-го порядка. В этом случае при распространении волн от одного зеркала к другому и обратно мы можем получить двумерную замкнутую траекторию движения светового пучка. Схема таких траекторий представлена на рис.5.

Как и в случае традиционного фильтра, длина волны генерируемого света будет совпадать с длиной волны пика пропускания рассмотренного фильтра и, более того, достижение генерации в предлагаемом устройстве станет свидетельством его работоспособности. Нами был проведен эксперимент с резонатором, толщина  $h$  активного промежуточного слоя которого составляла 100 мкм. Одно из зеркал резонатора было алюминиевым, другое – волноводно-решеточным. Оно представляло собой гофрированный слой ( $A = 330$  нм,  $2\sigma = 30$  нм)  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  ( $n_w = 2.02$ ,  $h_w = 270$  нм), нанесенный на стеклянную подложку. Промежуток между зеркалами был заполнен этилен-гликолем, активированным красителем R6G (молярная концентрация  $\sim 10^{-3}$  %). При накачке красителя излучением с  $\lambda = 530$  нм была получена генерация на  $\lambda = 560$  нм, выход излучения наблюдался под углом  $6.5^\circ$  к нормали (рис.5). Спектр излучения представляет собой серию линий, спектральное расстояние  $\Delta\lambda$  между которыми определяется толщиной буферного слоя  $h$ :

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2h[n_g^2 - (n_w^* - \lambda/A)^2]^{1/2}}; \quad (7)$$

в нашем случае  $\Delta\lambda = 1.1$  нм. С учетом того, что в волноводе при генерации света возбуждалась ТЕ-мода с  $n_w^* = 1.583$ , оценка  $\Delta\lambda$  по формуле (7) дает значение спектрального промежутка, совпадающее с экспериментально измеренным.

Число линий в спектре излучения лазера зависит от толщины буферного слоя, и с уменьшением  $h$  оно уменьшается вплоть до одной при коэффициенте  $R_{\text{mm}}$  отражающего плоского зеркала, превышающем коэффициент отражения волноводно-решеточного зеркала или равном ему.

Здесь следует отметить, что спектральная и угловая ширины спектра генерации в рассматриваемом лазере

сразу дают информацию о спектральной перестройке длины волны пропускания оптического фильтра и о диапазоне изменения угла, в пределах которого эта перестройка достигается.

#### 4. Выводы

Таким образом, исследования оптических свойств интерферометра Фабри–Перо с одним волноводно-решеточным зеркалом и другим обычным зеркалом показывают, что предложенная структура может успешно служить узкополосным ( $\delta\lambda \simeq 1 \text{ \AA}$ ) объемным фильтром, волноводным фильтром, а также лазерным резонатором, в котором реализуется генерация новых двумерных типов колебаний.

Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку настоящей работы РФФИ (грант № 00-02-17442) и программе «Интеграция» (контракт НБ-0094).

1. Канев И.Ф., Малиновский В.К., Суровцев Н.В. *ФТТ*, **42**, 2079 (2000).
2. Tibuleac S., Magnusson R. *Opt. Lett.*, **26**, 584 (2001).
3. Usievich V.A., Prokhorov A.M., Sychugov V.A. *Laser Phys.*, **12**, 898 (2002).
4. Усиевич Б.А., Сычугов В.А. *Квантовая электроника*, **32**, 531 (2002).
5. Haus H.A. *Waves and Fields in Optoelectronics* (New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1984).
6. Голубенко Г.А., Свахин А.С., Сычугов В.А., Тищенко А.В. *Квантовая электроника*, **12**, 1334 (1985).
7. Локтев С.М., Парье О., Сычугов В.А., Усиевич Б.А. *Квантовая электроника*, **24**, 377 (1997).



Справа налево: А.М.Прохоров и И.А.Щербаков обсуждают проблемы фемтосекундной электронно-оптической диагностики с заведующим отделом фотоэлектроники М.Я.Щелевым, 2000 г.