

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ШИРИНЫ СКАНИРУЮЩЕЙ ЩЕЛИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ УЗКОПОЛОСНЫХ ФИЛЬТРОВ

© 2011 г. М. Х. Азаматов, канд. техн. наук; Ш. Ш. Валеев; К. Н. Гайнутдинов; И. Х. Нагимов

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

E-mail: azm@rambler.ru

В статье дается оценка зависимости значений максимального пропускания и относительной полуширины линейных перестраиваемых узкополосных фильтров от размеров сканирующей щели и приведена математическая модель этой зависимости для фильтров, конструкции которых соответствуют фильтру Фабри–Перо.

Ключевые слова: перестраиваемый узкополосный фильтр, сканирующая щель.

Коды OCIS: 310.6860.

Поступила в редакцию 01.09.2010.

Линейный перестраиваемый узкополосный фильтр (ЛПУФ) представляет собой плоскопараллельную прямоугольную пластину с нанесенными на нее многослойными интерференционными фильтрующими покрытиями, толщины слоев которых линейно изменяются по длине подложки и остаются постоянными по ее ширине. Так как профиль толщины ЛПУФ по длине подложки имеет форму клина, такие фильтры называются также клиновыми.

Использование ЛПУФ в качестве монохроматизирующего элемента оптико-электронных приборов позволяет значительно снизить их массу и габариты, упростить конструкцию, повысить светосилу. В последние годы за рубежом наблюдается тенденция к миниатюризации размеров ЛПУФ. В приборах для спектрального анализа используются фильтры длиной 12–15 мм [1, 2]. Вопросы конструирования и разработки технологии изготовления таких перестраиваемых фильтров актуальны и для отечественных разработчиков.

Разрабатываемые ЛПУФ могут использоваться в оптико-электронной аппаратуре высокого разрешения, позволяющей оперативно решать задачи обнаружения, распознавания и анализа сложных сигналов в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах спектра.

В данной статье рассматриваются ЛПУФ, изготовленные методом физического осаждения в вакууме с использованием экранирующих масок для ИК области спектра от 3 до 5 мкм. Узкополосные фильтры представляют

собой два диэлектрических зеркала, разделенные слоем резонатора (по принципу фильтра Фабри–Перо). Оптические толщины слоев зеркал составляют четверть длины волны λ_0 , соответствующей максимальному пропусканию фильтра; оптическая толщина резонатора составляет половину длины волны λ_0 . Значение длины волны λ_0 изменяется по длине подложки от $\lambda_{\text{нач}}$ до $\lambda_{\text{кон}}$ в соответствии с изменением толщины покрытия.

Конструкция ЛПУФ, на примере которого проводились расчеты, описывается выражением

$$\Pi \text{НВ} \text{Н} 2\text{В} \text{НВ} \text{НВ}, \quad (1)$$

где Π – подложка из германия, Н – слой из оксида кремния, В – слой из сульфида цинка.

Спектральные характеристики ЛПУФ конструкции (1) показаны на рис. 1.

Одним из важных параметров ЛПУФ является его линейная дисперсия (скорость изменения толщины по длине подложки), которая определяется выражением

$$\delta = \frac{\lambda_{\text{кон}} - \lambda_{\text{нач}}}{l}, \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{нач}}$ и $\lambda_{\text{кон}}$ – длины волн, определяющие соответственно коротковолновую и длинноволновую границы рабочего спектрального диапазона ЛПУФ; l – длина ЛПУФ.

Дисперсия ЛПУФ характеризует неравнотолщинность покрытия и позволяет определить оптические толщины слоев узкополосных

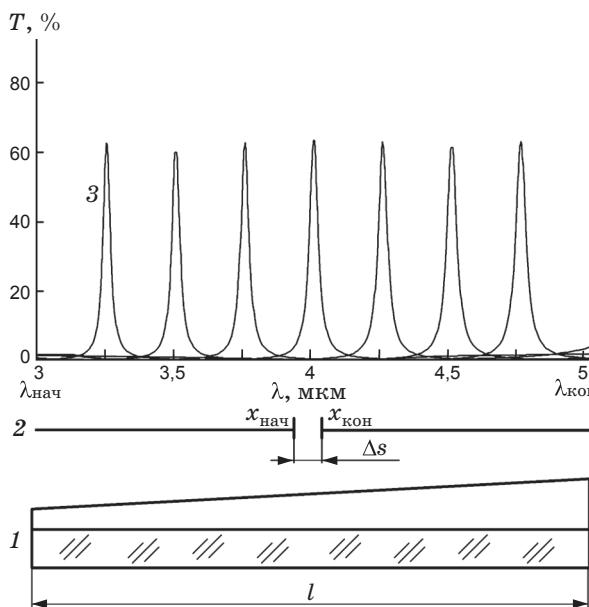


Рис. 1. Схематичное изображение ЛПУФ и его спектральные характеристики. 1 – профиль толщины ЛПУФ по длине подложки l , 2 – сканирующая щель шириной Δs , 3 – спектральные характеристики пропускания ЛПУФ конструкции (1), выделяемые щелью при сканировании по длине подложки.

фильтров (следовательно, и их рабочие длины волн λ_0) в каждой его точке как

$$h_x = h_{\text{нач}} + \delta x, \quad (3)$$

где h_x – толщина покрытия на расстоянии x от границы подложки, имеющей минимальную толщину покрытия, $h_{\text{нач}}$ – минимальная толщина покрытия, δ – линейная дисперсия ЛПУФ, x – расстояние от границы подложки, имеющей минимальную толщину покрытия, до точки с толщиной h_x .

При измерении спектральных характеристик перестраиваемых фильтров необходимо учитывать, что эти характеристики определяются не только конструкцией интерференционных систем и оптическими постоянными пленкообразующих материалов и подложки, но и (вследствие неравнотолщинности ЛПУФ по длине) размером диафрагмы (щели) спектрометра. Это наглядно проявляется при измерении спектральных характеристик ЛПУФ на приборах с переменным регулируемым размером входной щели. В работе [3] было отмечено, что с увеличением угловой ширины входной щели пропускание кольцевого перестраиваемого узкополосного фильтра падает, а его по-

луширина растет. Этот вывод справедлив и для линейных перестраиваемых фильтров.

При разработке ЛПУФ малых геометрических размеров необходимо учитывать влияние размера щели, ограничивающей световой поток, на оптические параметры фильтров, такие как максимальное пропускание T_{\max} и полуширина $\Delta_{0,5}$. Очевидно, что чем меньше размеры ЛПУФ, тем меньшим должен быть размер светового пятна, сканирующего по поверхности фильтра, для сохранения требуемой “монохроматизации” излучения. В данной статье предлагается математическое описание зависимости оптических параметров ЛПУФ от ширины щели прямоугольной формы. Предлагаемая математическая модель позволяет на основании результатов измерения спектральных характеристик ЛПУФ при каком-либо одном значении ширины щели рассчитывать оптические параметры при других размерах щели.

Рассмотрим падение равномерного коллимированного светового потока на поверхность ЛПУФ, ограниченную прямоугольной щелью шириной Δs , линейные координаты границ которой $x_{\text{нач}}$ и $x_{\text{кон}}$ (см. рис. 1). В этом случае спектральное пропускание освещенного участка ЛПУФ можно описать выражением

$$T(\lambda, x) = \frac{1}{\Delta s} \int_{x_{\text{нач}}}^{x_{\text{кон}}} T(\lambda, h_x) dx. \quad (4)$$

Для описания зависимости оптических параметров ЛПУФ от ширины щели с учетом линейной дисперсии введем понятие относительной ширины щели $\Delta s/l$, где Δs – абсолютная ширина щели.

На рис. 2 приведены расчетные спектральные характеристики пропускания ЛПУФ в зависимости от относительной ширины сканирующей щели.

Спектральное пропускание узкополосного фильтра Фабри–Перо хорошо подчиняется распределению Лоренца [4, 5], которое описывается выражением

$$T(\lambda) = T_{\text{фон}} + \frac{2T_{\text{инт}}}{\pi} \frac{\Delta_{0,5}}{4(\lambda - \lambda_0)^2 + \Delta_{0,5}^2}, \quad (5)$$

где $T_{\text{фон}}$ – пропускание фильтра в области фона, $T_{\text{инт}}$ – интегральное пропускание в заданном спектральном интервале, $\Delta_{0,5}$ – полуширина фильтра, λ_0 – длина волны, соответствующая максимальному пропусканию фильтра.

Кривая 5 на рис. 2 соответствует функции, описываемой выражением (5), при относи-

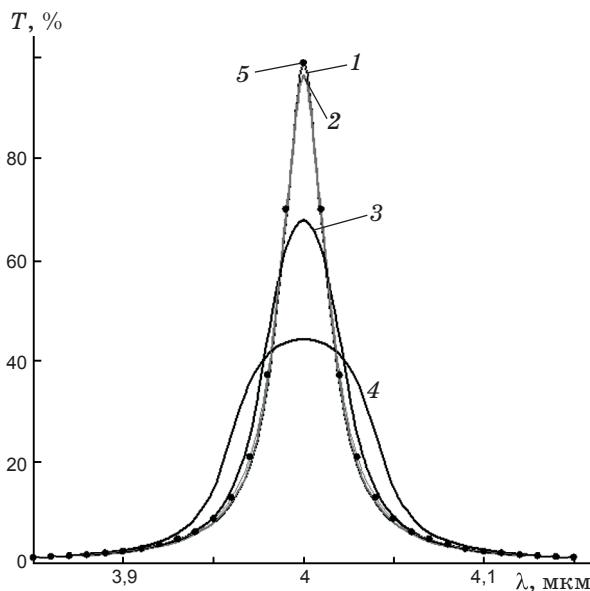


Рис. 2. Спектральное пропускание ЛПУФ конструкции (1) при различных значениях относительной ширины щели. 1 – $\Delta s/l = 0,0002$, 2 – 0,002, 3 – 0,01, 4 – 0,02, 5 – аппроксимация кривой 1, соответствующая распределению Лоренца.

тельной ширине щели 0,0002. Достоверность аппроксимации R^2 функцией распределения Лоренца составляет более 0,999 при значениях $\Delta s/l$, не превышающих 0,01. Это говорит о хорошем соответствии выбранной модели исходным данным.

Рассматривая различные математические модели для описания зависимости оптических параметров ЛПУФ от ширины сканирующей щели, мы учитывали, что практический смысл имеет рассмотрение только таких значений $\Delta s/l$, при которых не происходит значительного изменения формы кривой спектрального пропускания фильтров (прежде всего это касается полуширины ЛПУФ). Таким образом, для математического описания влияния ширины щели на значения максимального пропускания T_{\max} и относительной полуширины $\Delta_{0,5}/\lambda_0$ достаточно рассматривать изменение относительной ширины щели в диапазоне от 0 до 0,01.

Известно, что значение пропускания ЛПУФ на длине волны λ_0 с увеличением ширины щели уменьшается. Мы рассчитали значения пропускания T_{\max} для различных значений $\Delta s/l$. Аппроксимация рассчитанных значений, проведенная с помощью компьютерной программы математической обработки данных Origin, позволила описать указанную зависимость

функцией, подчиняющейся распределению Лоренца, с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,99988$ в диапазоне изменения относительной щели от 0 до 0,025. Выражение (5) в этом случае принимает вид

$$T_{\max}(\Delta s/l) = T_0 + \frac{2A}{\pi} \frac{w}{4(\Delta s/l)^2 + w^2}. \quad (6)$$

Здесь T_0 – значение максимального пропускания при $\Delta s/l \rightarrow 1$, A – площадь под кривой, описываемой выражением (6); w – ширина кривой, описываемой выражением (6), при которой $T_{\max} = (T_{\max}(\Delta s/l \rightarrow 0) + T_{\max}(\Delta s/l \rightarrow 1))/2$.

Изменение максимального пропускания T_{\max} узкополосного фильтра в зависимости от относительной ширины щели показано на рис. 3.

При описании зависимости изменения относительной полуширины ЛПУФ от относительной ширины щели высокую точность аппроксимации ($R^2 = 0,99931$ для щелей, относительная ширина которых не превышает 0,025) дает использование функции распределения Гаусса, определяемой выражением

$$\frac{\Delta_{0,5}}{\lambda_0}(\Delta s/l) = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{\pi/2}} \exp\left(-2\frac{(\Delta s/l)^2}{w^2}\right), \quad (7)$$

где y_0 – относительная полуширина ЛПУФ при наименьшей ширине щели ($\Delta s/l \rightarrow 0$), A – площадь под кривой, описываемой выра-

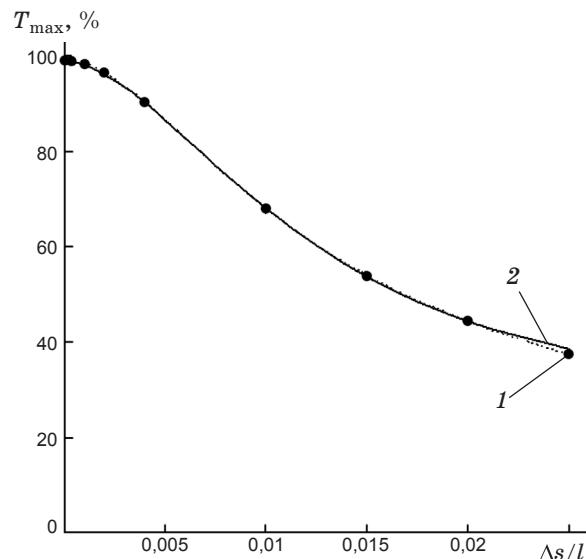


Рис. 3. Зависимость максимального пропускания ЛПУФ от относительной ширины щели. 1 – расчетные данные, 2 – аппроксимация расчетных данных с помощью распределения Лоренца.

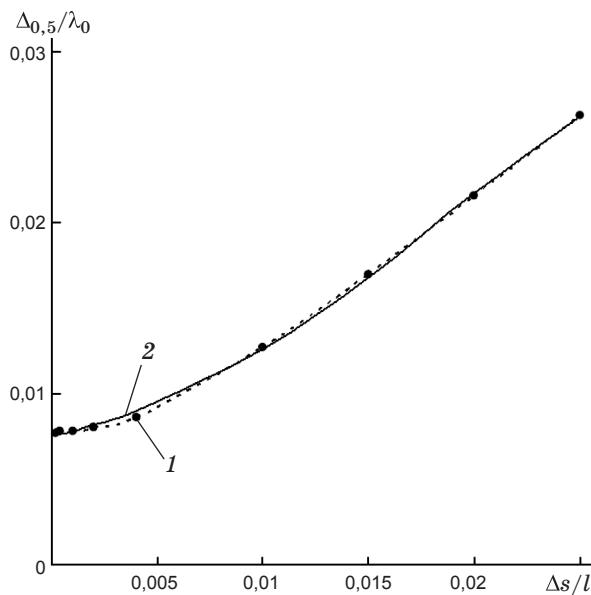


Рис. 4. Зависимость относительной полуширины ЛПУФ от относительной ширины щели.
1 – расчетные данные, 2 – аппроксимация с помощью распределения Гаусса.

жением (7); w – ширина кривой, описываемой выражением (7), при которой $\Delta_{0,5}/\lambda_0 = (\Delta_{0,5}/\lambda_0(\Delta s/l \rightarrow 0) + \Delta_{0,5}/\lambda_0(\Delta s/l \rightarrow 1))/2$.

Изменение относительной полуширины $\Delta_{0,5}/\lambda_0$ узкополосного фильтра в зависимости от относительной ширины щели показано на рис. 4.

Таким образом, можно сделать вывод, что распределение Лоренца позволяет с высокой точностью описать зависимость максимального пропускания ЛПУФ от ширины сканирующей щели при значениях относительной ширины щели не более 0,025. Точное описание зависимости относительной полуширины ЛПУФ от изменения относительной ширины сканирующей щели в диапазоне от 0 до 0,025 позволяет

получить использование функции распределения Гаусса при аппроксимации. Корреляция функций распределения Лоренца и Гаусса с оптическими параметрами ЛПУФ дает возможность по известным значениям T_{max} и $\Delta_{0,5}$ при одном значении Δs рассчитать значения максимального пропускания и полуширины фильтра для других значений ширины щели.

Проведенные расчеты хорошо согласуются с результатами измерений спектральных характеристик изготовленных линейных перестраиваемых узкополосных фильтров конструкции (1), выполненных при различных значениях входной щели на фурье-спектрометре Equinox-55. Необходимо отметить, что приведенная в статье математическая модель справедлива лишь для ЛПУФ, конструкции которых соответствуют фильтрам Фабри–Перо.

Проведенные расчеты были использованы при обработке результатов исследования изготовленных в НПО ГИПО линейных перестраиваемых узкополосных фильтров (длиной от 15 до 30 мм) для инфракрасной области спектра.

ЛИТЕРАТУРА

1. www.jdsu.com
2. www.ir-microsystems.com
3. Марциновский В.А., Несмелов Е.А. Исследование зависимости спектральных характеристик колышевых перестраиваемых фильтров от ширины входной щели монохроматора // ЖПС. 1984. Т. 40. № 2. С. 250–254.
4. Крылов А.С., Втюрин А.Н., Герасимова Ю.В. Обработка данных Фурье-спектроскопии. Красноярск: Институт физики СО РАН, 2005.
5. Александров С.Е., Гаврилов Г.А., Капралов А.А., Матвеев Б.А., Сотникова Г.Ю., Ременный М.А. Моделирование характеристик оптических газовых сенсоров на основе диодных оптопар среднего ИК-диапазона спектра // ЖТФ. 2009. Т. 79. № 6. С. 112–118.