

А. Вальчак, Э. Новиновски-Крушельницки, Л. Р. Ярошевич,
П. Марциняк

(Варшава, Польша)

ФИЛЬТР ФАБРИ – ПЕРО С ПЕРЕСТРАИВАЕМЫМ ПРОПУСКАНИЕМ*

Представлен способ создания перестраиваемого фильтра Фабри – Перо, служащего для фильтрации монохроматического излучения. Для управления изменением направления оптической оси фильтр заполняется жидким кристаллом. Детально рассмотрена зависимость спектральных характеристик фильтра от дисперсии показателя преломления жидкого кристалла. Экспериментально определены скачки фазы в отражающих слоях зеркал. Описан способ определения затухания света в прозрачном рассеивающем слое жидкого кристалла.

Введение. Нынешнее состояние анализа фильтров Фабри – Перо представляется абсолютно ясным и законченным. Существуют хорошо разработанные методы расчета пропускания электромагнитных волн через многослойную прозрачную систему [1]. Однако если наполнителем фильтра является жидкий кристалл, то для расчета пропускания света необходимо определить смещение оптической оси и некоторые особенности оптической анизотропии в жидком кристалле. Оптическая анизотропия обуславливает различие фаз отраженной волны для обыкновенной и необыкновенной составляющих излучения. Поэтому анализ таких фильтров оказывается более сложным, чем в других случаях. Кроме того, насколько известно авторам, оптическая дисперсия показателей преломления компонентов фильтра Фабри – Перо, как правило, ранее вообще не учитывалась.

Показано, что роль дисперсии показателя преломления оказывается весьма важной для правильного конструирования фильтра Фабри – Перо. Представленный анализ дан для видимого диапазона спектра с возможностью перестройки узкого спектрального пропускания в видимой области спектра.

Результаты и метод определения дисперсии показателя преломления в жидких кристаллах были опубликованы в работе [2]. В конечном счете дисперсия может быть определена из выражения

$$n_{o,e} = A_{o,e} + \frac{B_{o,e}}{\lambda^2} + \frac{C_{o,e}}{\lambda^4}. \quad (1)$$

Работа выполнена при поддержке Польского министерства научных исследований и информационных технологий (MUT) (грант № PBS-636).

Индексы o, e служат для обозначения дисперсии показателя преломления обыкновенной и необыкновенной составляющих соответственно; λ – длина волны; A, B и C – постоянные коэффициенты. Метод измерения фазы отраженной волны представлен далее.

Борн в работе [3] и Атертон в работе [4] для учета изменения фазы при отражении предложили ввести коррекционный член ε в условие существования пика пропускания:

$$\left(m_t + \frac{\varepsilon}{\pi}\right)\lambda = 2\pi nd, \quad (2)$$

где n – показатель преломления; d – расстояние между пластинками; m_t – действительный номер порядка, связанного с коррекцией фазы.

Изменение фазы внутри фильтра Фабри – Перо определяется как

$$\delta_{o, e} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{o, e} d - \varepsilon_{o, e}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{o, e} = \varepsilon_{o, e}(\lambda)$ – неизвестное изменение фазы при отражении на каждом зеркале для обыкновенной и необыкновенной составляющих соответственно; $n_{o, e}$ – показатель преломления для обыкновенной и необыкновенной составляющих.

Тем не менее в литературе трудно найти информацию экспериментального характера о скачке фазы при отражении [4]. В данной работе предложен эффективный способ определения скачка фазы $\varepsilon(\lambda)$. Точное значение $\varepsilon(\lambda)$ зависит от числа отражений в рассматриваемом фильтре.

Для обычной и необычной поляризации излучения получено по две различные кривые изменения пропускания фильтра и фазы отражения $\varepsilon(\lambda)$. Положение пиков пропускания обыкновенной и необыкновенной волн используется для нахождения вектора $E^{o, e}(\lambda_k)$. Каждая λ_k обозначает длину волны для измеренного положения пика. Для нахождения параметра $\varepsilon(\lambda)$ необходимо было найти решение уравнения (4) из [2]:

$$\|T^{o, e}(\lambda) - E^{o, e}(\lambda_k)\| = 0, \quad (4)$$

где $T^{o, e}(\lambda)$ – теоретическое пропускание света для волн с фазами, соответствующими (3). Верхние индексы o, e обозначают пропускание для обыкновенной и необыкновенной волн. Решение было получено в численном виде посредством нелинейной оптимизации. Пропускание $T^{o, e}(\lambda)$ моделировалось функциями Эйри [3], вычисленными отдельно для обыкновенной и необыкновенной составляющих излучения, а фаза и коэффициенты отражения соответствовали уравнениям (3) и (1).

Расчет и устройство перестраиваемого фильтра. Перестраиваемый фильтр состоит из пары выпускаемых промышленностью стеклянных пластинок толщиной 8 мм, покрытых прозрачным проводящим слоем оксидов индия и олова (плоскостность пластинок равна $\lambda/20$ для длины волны 632,8 нм). Квадратные образцы с линейной апертурой 20×20 мм были разделены с помощью стеклянных прокладок диаметром от 6 до 15 мкм. На внутренние поверхности наносились многослойные диэлектрические зеркала с

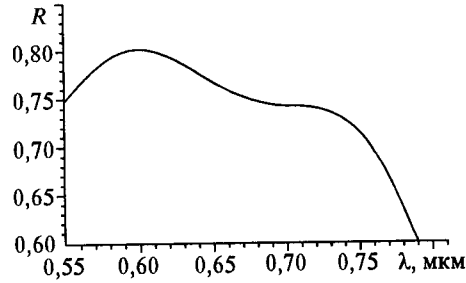


Рис. 1. Спектр коэффициента отражения для композитного слоя из полиимид–зеркала–пленки оксидов индия и олова–плоского стекла, называемого оптическим буфером

отражением от 75 до 80 % (для средней части видимого диапазона) и дополнительно полиимидный слой толщиной ~20 нм. Затем этот слой был отполирован. После этого пластинки разделялись между собой стеклянными прокладками и пакетировались с помощью специального монтажного устройства, образуя фильтр Фабри – Перо. Промежуток между зеркалами заполнялся жидким кристаллом за счет капиллярного эффекта, создающего наклонную планарную ориентацию жидкокристаллического слоя, которая эквивалентна по своему действию пластинке с оптической осью, практически параллельной поверхности зеркала. Хотя конструкция крепления обеих пластинок была выбрана с расчетом на ее термостабильность (посредством соответствующего выбора материалов), однако из-за температурных свойств жидкого кристалла для получения наилучших характеристик системы оказалось необходимым применение терморегулирования, поддерживающего температуру фильтра с точностью до 0,5°.

Экспериментальные данные отражения комбинации полиимид–зеркало–пленка оксидов индия и олова–стекло приведены на рис. 1. Для определения дисперсий $n(\lambda)$ и $\epsilon(\lambda)$ был выбран диапазон 590–710 нм из-за однородности дисперсии отражения в указанном интервале.

Модель для отражения волны в фильтре Фабри – Перо. Поскольку используется традиционное описание, то коэффициенты отражения выражены через показатели преломления для всех элементов оптического буфера системы Фабри – Перо. Для расчета пропускания фильтра необходимо знать значения показателей преломления, толщину всех компонентов оптического буфера и их дисперсию. Показатель преломления тонкого слоя всегда отличается от показателя преломления массива того же материала, а его зависимость от длины волны, называемая оптической дисперсией, определяется толщиной слоя. Из-за сильной зависимости показателя преломления от толщины слоя соответствующие его значения обычно неизвестны или могут быть получены методами эллипсометрии. Именно по этой причине нами предложен иной способ построения и анализа фильтра Фабри – Перо.

Коэффициент отражения для слоя между оптическим буфером в виде полиимид–зеркала–пленки оксидов индия и олова–плоского стекла и жидкокристаллической средой определяется выражением

$$R(\lambda) = \left(\frac{n_e^{\text{eff}}(\lambda) - n_m(\lambda)}{n_e^{\text{eff}}(\lambda) + n_m(\lambda)} \right)^2, \quad (5)$$

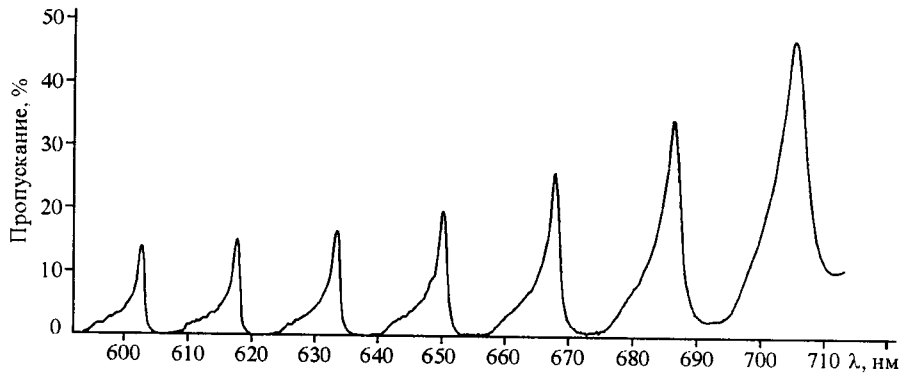


Рис. 2. Экспериментальные результаты по определению пропускания необыкновенного луча при расстоянии между зеркалами $d = 6$ мкм

где

$$n_e^{\text{eff}}(\lambda) = \frac{n_o(\lambda)n_e(\lambda)}{\sqrt{n_e^2(\lambda)\sin^2\varphi + n_o^2(\lambda)\cos^2\varphi}}; \quad (6)$$

$n_m(\lambda)$ – показатель преломления оптического буфера; $n_o(\lambda)$ и $n_e(\lambda)$ – показатели преломления обыкновенной и необыкновенной составляющих излучения. Угол φ введен для перестраиваемого наклона оптической оси в жидкокристаллическом слое.

Показатель преломления определен на основе экспериментального измерения пропускания оптического буфера по формуле

$$R(\lambda) = \left(\frac{1 - n_m(\lambda)}{1 + n_m(\lambda)} \right)^2. \quad (7)$$

Коэффициент отражения рассматриваемого оптического буфера показан на рис. 1. Таким образом, оптический буфер анализируется как целое.

Фаза отражения. На рис. 2 представлено полученное экспериментально пропускание фильтра Фабри – Перо, заполненного жидкокристаллической смесью W602 (обозначение принято Институтом химии МУТ).

Теоретическое пропускание такого фильтра можно определить из соотношения

$$T_{th}^{o,e}(\lambda) = T_{gl}(\lambda) \frac{(1 - R^{o,e}(\lambda))^2}{(1 - R^{o,e}(\lambda))^2 + 4R^{o,e}(\lambda)\sin^2(\delta_{lc}(\lambda)/2)} T_{gl}(\lambda), \quad (8)$$

$$R^{o,e}(\lambda) = \left(\frac{n^{o,e}(\lambda) - n_m(\lambda)}{n_m(\lambda) + n^{o,e}(\lambda)} \right)^2, \quad \delta_{o,e}(\lambda) = \frac{4\pi}{\lambda} n_{lc}(\lambda) d_{lc} + \varepsilon_{o,e}(\lambda).$$

Здесь T_{gl} – пропускание через оптический буфер в виде комбинации стекло-полиимид-зеркало; $R^{o,e}$ – коэффициент отражения для обыкновенной и не-

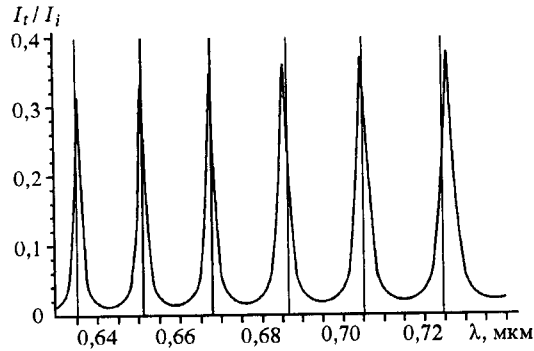


Рис. 3. Пропускание для необыкновенной волны в фильтре Фабри – Перо, наполненном жидкокристаллической смесью после процедуры сборки (параллельные вертикальные линии проходят через экспериментально измеренные пики пропускания) (I_t – пропущенная интенсивность, I_i – излучаемая интенсивность)

обыкновенной волн соответственно; $\delta_{o,e}$ – фаза отражения для обыкновенной и необыкновенной волн; n_m – эффективный коэффициент отражения оптического буфера. Пример процедуры оптимизации представлен на рис. 3. Фаза отражения получена из формулы

$$\varepsilon(\lambda) = 1,4 + 0,2 \frac{1}{\lambda} + 0,02 \frac{1}{\lambda^3} + 3,4 \frac{1}{\lambda^4}. \quad (9)$$

Перестраиваемый спектр фильтра Фабри – Перо. Особым свойством жидкокристаллического слоя является изменение оптической оси в зависимости от приложенного напряжения. Поведение оптической оси в зависимости от возбуждающего поля можно определить из уравнения Эриксона – Лесли (с одной аппроксимацией постоянной Франка K_F), которое аналогично следующему уравнению и уравнению синусов Гордона:

$$\varphi_{zz} = - \frac{\varepsilon_0 \Delta \varepsilon E^2}{2K_F} \sin 2\varphi(z). \quad (10)$$

Символ E обозначает среднеквадратичное значение амплитуды возбуждающего поля в слое жидкого кристалла; $\Delta \varepsilon$ – диэлектрическая анизотропия; ε_0 – диэлектрическая постоянная. Граничные условия могут быть описаны через фиксирующие углы

$$\varphi(z = \pm d/2) = \varphi_a, \quad (11)$$

где φ_a – усредненный угол фиксации молекул жидкого кристалла в ближайшей окрестности границы жидкий кристалл–подложка. Численное решение уравнения (10) приведено на рис. 4 для случая $\varphi_a = 0$. Наклон оптической оси измеряется от нормали к жидкокристаллической пластинке. Это уравнение описывает распределение расположения оптической оси поперек жидкокристаллического слоя, возбуждаемого различным напряжением [5].

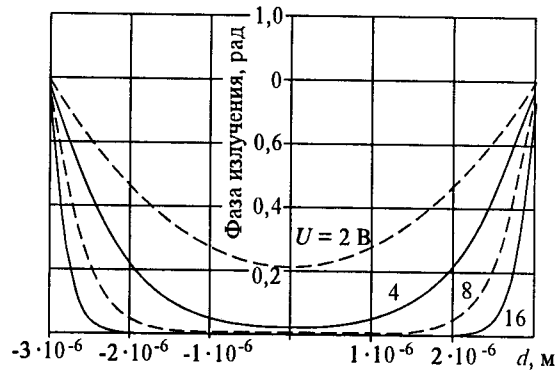


Рис. 4. Наклон оптической оси $\varphi(z)$ в эффективном сечении слоя жидкого кристалла (типа W602) толщиной 6 мкм в зависимости от величины приложенного напряжения

Зная распределение $\varphi(z)$, фазу отражения $\epsilon(\lambda)$ и дисперсию показателя преломления $n_{o,e}(\lambda)$, а также его мнимую часть, равную затуханию, можно выполнить соответствующее моделирование пропускания перестраиваемого фильтра Фабри – Перо.

Спектр пропускания в случае оптической анизотропии жидкого кристалла показан на рис. 5. На основании этого рисунка можно сделать заключение,

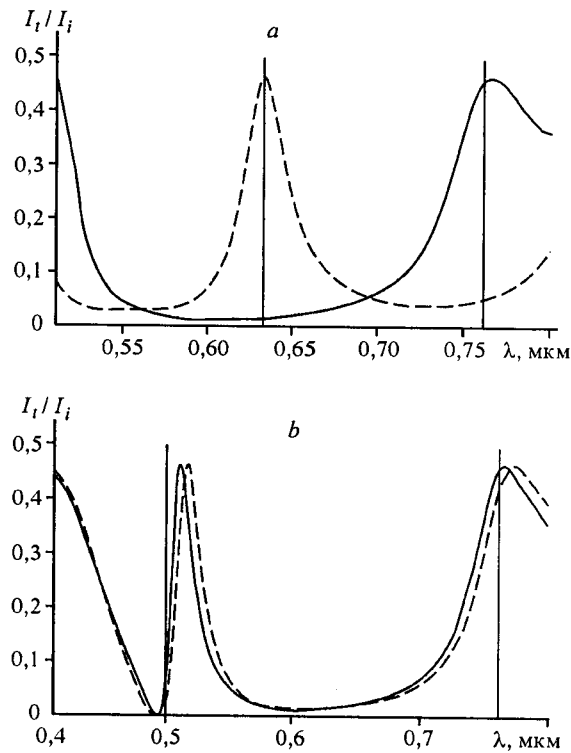


Рис. 5. Изменение пропускания жидкокристаллического слоя с относительно высоким уровнем анизотропии Δn и относительно небольшой дисперсией показателя преломления n_o ($n_e = 1,8914$, $n_o = 1,5338$, $C_e = 0,0013$, $C_o = 0,00010$) в зависимости от приложенного напряжения (0 В (a), 7 В (b))

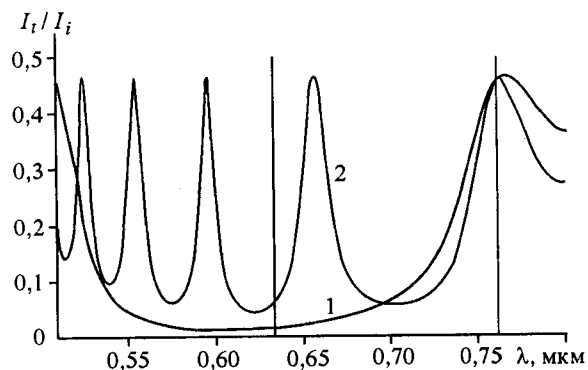


Рис. 6. Влияние дисперсии показателя преломления на спектр пропускания фильтра Фабри – Перо: кривая 1 – спектр пропускания для обыкновенной, кривая 2 – спектр пропускания для необыкновенной частей излучения ($n_e = 1,8914$, $n_o = 1,5338$, $C_e = 0,13$, $C_o = 0,00010$)

что уровень анизотропии $\Delta n = n_e - n_o$ обеспечивает необходимый свободный спектральный диапазон и тем самым возможность перестройки пропускания необыкновенного пучка. Влияние дисперсии показателя преломления n_e на спектральный диапазон и диапазон перестройки приведено на рис. 6. В случае сильной дисперсии показателя преломления (высокого значения коэффициента C_e в формуле (1)) имеет место несколько пиков перестраиваемого пропускания для необыкновенного пучка в пределах спектрального диапазона, ограниченного двумя пиками пропускания обыкновенного луча. Противоположная ситуация возникает при малой дисперсии показателя преломления (малой величине коэффициента C_e), приводящая к существованию одной полосы пропускания. При увеличении напряжения полоса пропускания смещается в сторону более длинных волн.

Заключение. Представлен способ построения фильтра Фабри – Перо для монохроматической фильтрации оптических сигналов. Он сводится к тому, что для получения должного пропускания фильтра необходимо определить фазу отражения. Описан метод определения фазы отражения. Она была измерена для полихроматического фильтра Фабри – Перо. Таким образом, первый шаг заключался в измерении полихроматического пропускания фильтра. Для получения максимального рабочего спектрального диапазона необходимо использовать жидкий кристалл с высокой оптической анизотропией, при этом показатель преломления n_o должен быть как можно меньше.

Показано влияние дисперсии показателя преломления слоя жидкого кристалла на свойства фильтра Фабри – Перо. Это приводит к тому, что она определяет диапазон перестройки фильтра так же, как и свободный спектральный диапазон. Посредством моделирования установлено, что может быть получен свободный спектральный диапазон 250 нм и диапазон перестройки 150 нм. Для этого оптическая анизотропия жидкого кристалла должна быть $\geq 0,4$, а толщина жидкокристаллического слоя $\sim 0,6$ мкм.

Разработана методика конструирования фильтра Фабри – Перо, предназначенного для монохроматической фильтрации, и определены ограничения, связанные с использованием жидкокристаллического материала. Показано, что для корректного определения положения резонансных пиков перестройки и ширины полосы фильтрации необходимо измерить дисперсию показателей преломления и фазу отраженной волны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Wöhler H., Becker M. E.** The Optics of Liquid Crystals // The 13th Intern. Display Research Conf. Strasbourg, France, 1993. P. A1-45.
2. **Nowinowski-Kruszelnicki E., Walczak A., Marciniak P.** Research of chromatic dispersion by means of Fabry – Perot filter // Opt. Appl. 2001. XXXI, N 4. P. 751.
3. **Born M., Wolf E.** Principles of Optics. N. Y.: Pergamon Press, 1964.
4. **Atherton P. D., Reay N. K., Ring J., Hicks T. R.** Tunable Fabry – Perot filters // Opt. Eng. 1981. 20, N 6. P. 806.
5. **Walczak A.** Soliton like solutions and subsurface behavior of the nematic layer // Opto-Electronics Rev. 2002. 10. P. 43.

*Институт прикладной физики МУТ,
E-mail: awalc@iar.wat.waw.pl*

*Поступила в редакцию
17 июня 2003 г.*

Подписка на наш журнал – залог Вашего успеха!