

ЭЛЕКТРОУПРАВЛЯЕМЫЕ ДИСПЕРСИОННЫЕ ФИЛЬТРЫ ВИДИМОГО И СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНОВ СПЕКТРА

© 2012 г. В. П. Дик, канд. физ.-мат. наук; В. А. Лойко, доктор физ.-мат. наук

Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

E-mail: loiko@dragon.bas-net.by

Рассмотрены электроуправляемые дисперсионные фильтры оптического излучения на основе системы малые частицы–жидкий кристалл. Проанализированы спектры пропускания перестраиваемых дисперсионных фильтров на примере системы жидкий кристалл ЖКМ-1289–микрочастицы SiO_2 . Показано, что такая система может быть использована для фильтрации излучения в ближней ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра. Положение максимумов полос пропускания зависит от управляющего напряжения и может плавно перестраиваться в интервалах длин волн 0,33–0,55 мкм и 1,8–3,2 мкм.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, рассеяние света, дисперсионные фильтры.

Коды OCIS:230.3720, 160.3710

Поступила в редакцию 12.01.2012

Введение

Использование электроуправляемых спектральных фильтров существенно упрощает конструкцию электрооптических приборов. На их основе можно создавать компактные устройства с новыми эксплуатационными свойствами. Такие фильтры необходимы при решении задач мониторинга окружающей среды, лазерной диодной спектроскопии, при создании устройств генерации и приема электромагнитного излучения видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов спектра, быстродействующих волоконно-оптических линий связи, тепловизоров, спектрофотометров и др. [1–4].

Одним из перспективных типов устройств для управления спектром прошедшего электромагнитного излучения являются дисперсионные фильтры на основе системы малые частицы–жидкий кристалл (будем называть их жидкокристаллическими дисперсионными фильтрами). Такие фильтры основаны на управлении ориентацией молекул жидкого кристалла (ЖК) в электрическом поле [5, 6]. Сравнительно небольшое управляющее напряжение (в диапазоне от нескольких вольт до нескольких десятков вольт) позволяет изменять оптические параметры ЖК и, соответственно, спектральные свойства системы малые частицы–жидкий кристалл.

Дисперсионный фильтр, построенный на базе ЖК МББА и частиц Al_2O_3 , описан в работе [7]. Он является перестраиваемым полосовым фильтром среднего ИК диапазона. Положение полосы пропускания управляется слабым электрическим полем и изменяется в пределах 4,3–5,5 мкм.

В данной работе приведена методика расчета перестраиваемых дисперсионных фильтров, создаваемых на основе ЖК, и показана возможность создания таких фильтров для ИК и видимого диапазонов длин волн на примере системы ЖК марки ЖКМ-1289 и частиц кристаллического кварца SiO_2 .

Структура перестраиваемого дисперсионного фильтра

Схематическое представление перестраиваемого дисперсионного фильтра приведено на рис. 1. Он представляет собой две плоскопараллельные пластинки с прозрачными электродами, между которыми расположен ЖК с введенными в него частицами. В оптических системах такой фильтр располагается, как правило, перпендикулярно падающему на него излучению. Поэтому будет рассмотрено только нормальное падение света. В этом случае вектор напряженности управляющего электрического поля параллелен направлению

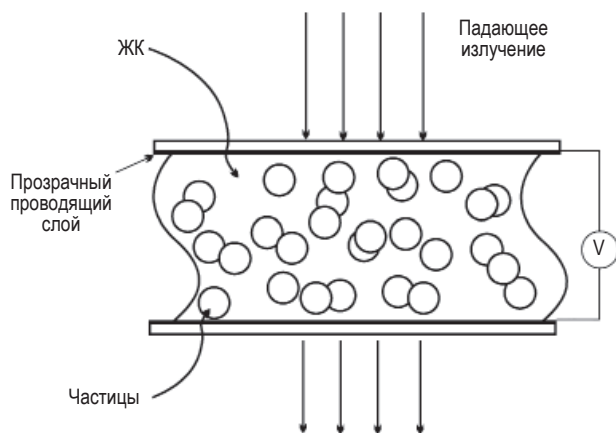


Рис. 1. Схематическое представление переключаемого дисперсионного фильтра.

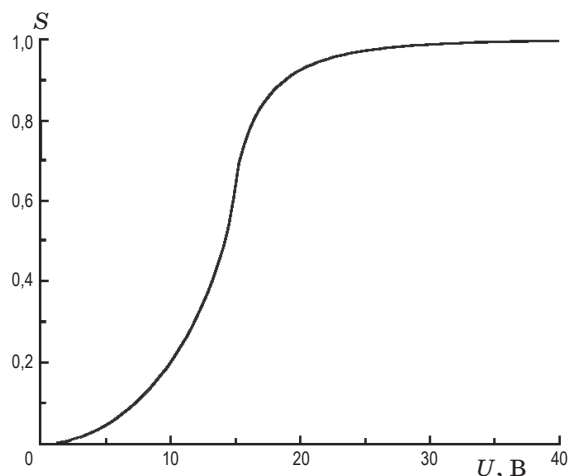


Рис. 2. Типичный вид зависимости параметра порядка S от управляющего напряжения.

распространения оптического излучения. Соответственно, оптические свойства фильтра не зависят от состояния поляризации подающего излучения и при анализе спектральных свойств фильтра жидкий кристалл можно характеризовать средним показателем преломления. Для нематического ЖК с положительной анизотропией такой показатель преломления описывается соотношением [8]

$$n_{LC} = n_o + (n_e - n_o)(1 - S)/3. \quad (1)$$

Здесь n_o , n_e – соответственно показатели преломления ЖК для обыкновенного и необыкновенного лучей, S – параметр порядка [9]. Параметр порядка S характеризует степень ориентации молекул ЖК в слое. Его величина определяется поверхностным сцеплением на границах ЖК и зависит от напряженности внешнего электрического поля. При отсутствии внешнего поля, когда молекулы ЖК распределены хаотически, $S = 0$ (заметим, что если система обладает некоторой упорядоченностью молекул в отсутствие поля, то эта величина может быть больше нуля). С ростом напряженности поля параметр порядка растет [9–15] и в сильном внешнем поле, когда все молекулы ориентированы вдоль поля (при положительной диэлектрической анизотропии), параметр $S = 1$. Соответственно, средний показатель преломления жидкого кристалла n_{LC} изменяется в пределах от $n_{LC} = (2n_o + n_e)/3$ при $S = 0$ до $n_{LC} = n_o$ при $S = 1$. Типичный вид зависимости параметра порядка от приложенного напряжения представлен на рис. 2 [9].

Для осуществления эффекта Христиансена, на котором основан принцип работы дисперсионных фильтров, необходимо чтобы образующие его компоненты (в нашем случае это ЖК и частицы) имели близкие показатели преломления n , но разные значения дисперсии $dn/d\lambda$ [6]. Для эффективной селекции оптического излучения необходимо выбрать материалы микрочастиц (МЧ) и ЖК такие, чтобы обеспечить большой угол пересечения дисперсионных кривых коэффициентов преломления МЧ и ЖК.

В качестве компонентов, на основе которых можно построить электроуправляемый дисперсионный фильтр, в данной работе рассмотрен ЖК марки ЖКМ-1289 и МЧ кристаллического кварца SiO_2 . Спектральные зависимости показателей преломления кристаллического кварца и ЖК ЖКМ-1289 представлены на рис. 3. Показатель преломления МЧ кристаллического кварца SiO_2 рассчитывался по формуле

$$n_{\text{SiO}_2} = n_e^{\text{SiO}_2}/3 + 2n_o^{\text{SiO}_2}/3. \quad (2)$$

Здесь $n_o^{\text{SiO}_2}$, $n_e^{\text{SiO}_2}$ – соответственно показатели преломления кристаллического кварца для обыкновенного и необыкновенных лучей [16], которые определялись из соотношений [17]

$$(n_o^{\text{SiO}_2})^2 = 1,286 - 1,07044\lambda^2/(\lambda^2 - 0,0100506) + 1,102\lambda^2/(\lambda^2 - 100), \quad (3)$$

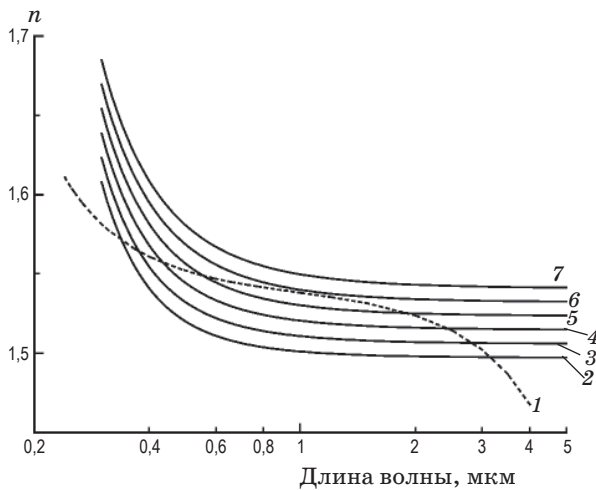


Рис. 3. Спектральные зависимости усредненных показателей преломления кристаллического кварца SiO_2 (1) и жидкого кристалла ЖКМ-1289 (2–7). Значения показателя преломления жидкого кристалла приведены для разных параметров порядка S ($2 - S = 1, 3 - 0,8, 4 - 0,6, 5 - 0,4, 6 - 0,2, 7 - 0$).

$$(n_e^{\text{SiO}_2})^2 = 1,2885 - 1,0951\lambda^2 / (\lambda^2 - 0,0102102) + 1,1566\lambda^2 / (\lambda^2 - 100), \quad (4)$$

где длина волны λ выражена в мкм.

Показатель преломления ЖКМ-1289 рассчитывался по формуле (1). Входящие в (1) показатели преломления n_o, n_e находились из соотношений

$$n_o = 1,629 + 0,0179/\lambda^2 + 0,00009/\lambda^4, \quad (5)$$

$$n_e = 1,497 + 0,0033/\lambda^2 + 0,0006/\lambda^4, \quad (6)$$

полученных аппроксимацией экспериментальных данных [18]. Длина волны выражена в мкм.

Из рис. 3 можно видеть, что в диапазоне длин волн 0,35–3,5 мкм МЧ кристаллического кварца и ЖКМ-1289 имеют близкие показатели преломления. В то же время различия в значениях дисперсии $dn/d\lambda$, необходимые для получения эффекта Христиансена, наблюдаются не во всем указанном диапазоне, а лишь в интервалах 0,35–0,8 и 1,5–3,5 мкм. Поэтому в этих двух спектральных интервалах и следует ожидать проявление селективных свойств дисперсии ЖКМ-1289– SiO_2 .

Методика расчета спектров пропускания

Для описания спектров пропускания в общем случае необходимо учитывать оптические характеристики частиц, их размер, форму и концентрацию. В рамках данной работы авторы ограничиваются рассмотрением слоев с малой концентрацией монодисперсных сферических частиц. В этом случае не нужно учитывать кооперативные эффекты в рассеянии света в слое [19].

В работе рассчитаны спектры пропускания дисперсионных фильтров для диапазона длин волн 0,25–4,0 мкм, который охватывает области пересечения дисперсионных кривых кристаллического кварца и ЖКМ-1289 при изменении параметра порядка от нуля до единицы.

Коэффициент направленного (когерентного) пропускания слоя определялся соотношением

$$T = t_{LC} \exp(-3Q_{\text{ext}}c_v h/2d). \quad (7)$$

Здесь h – толщина фильтра, d, c_v и Q_{ext} – соответственно диаметр, объемная концентрация и фактор эффективности ослабления частицы SiO_2 , t_{LC} – пропускание слоя ЖК, обусловленное поглощением в нем излучения. Значение Q_{ext} рассчитывалось по формулам Ми для сферических частиц [20–21] с показателем преломления

$$n = n_{\text{SiO}_2}/n_{LC} + i0 \quad (8)$$

и параметром дифракции

$$x = \pi d n_{LC} / \lambda. \quad (9)$$

Пропускание t_{LC} определялось из соотношения

$$t_{LC} = \exp[-\alpha h(1 - c_v)]. \quad (10)$$

Показатель поглощения ЖК α , мкм^{-1} [22]

$$\alpha = (2,26 \times 10^{-4} \lambda^2) / (16\lambda^2 - 1)^2, \quad (11)$$

где длина волны выражена в мкм.

Результаты и обсуждение

Спектры направленного пропускания дисперсий ЖКМ-1289– SiO_2 , рассчитанные по формуле (5) для слоев толщиной $h = 200$ мкм и объемной концентрации частиц $c_v = 0,3$ при разных размерах МЧ, представлены на рис. 4.

Приведенные данные показывают, что рассматриваемая система может использоваться для фильтрации излучения в видимой и ИК

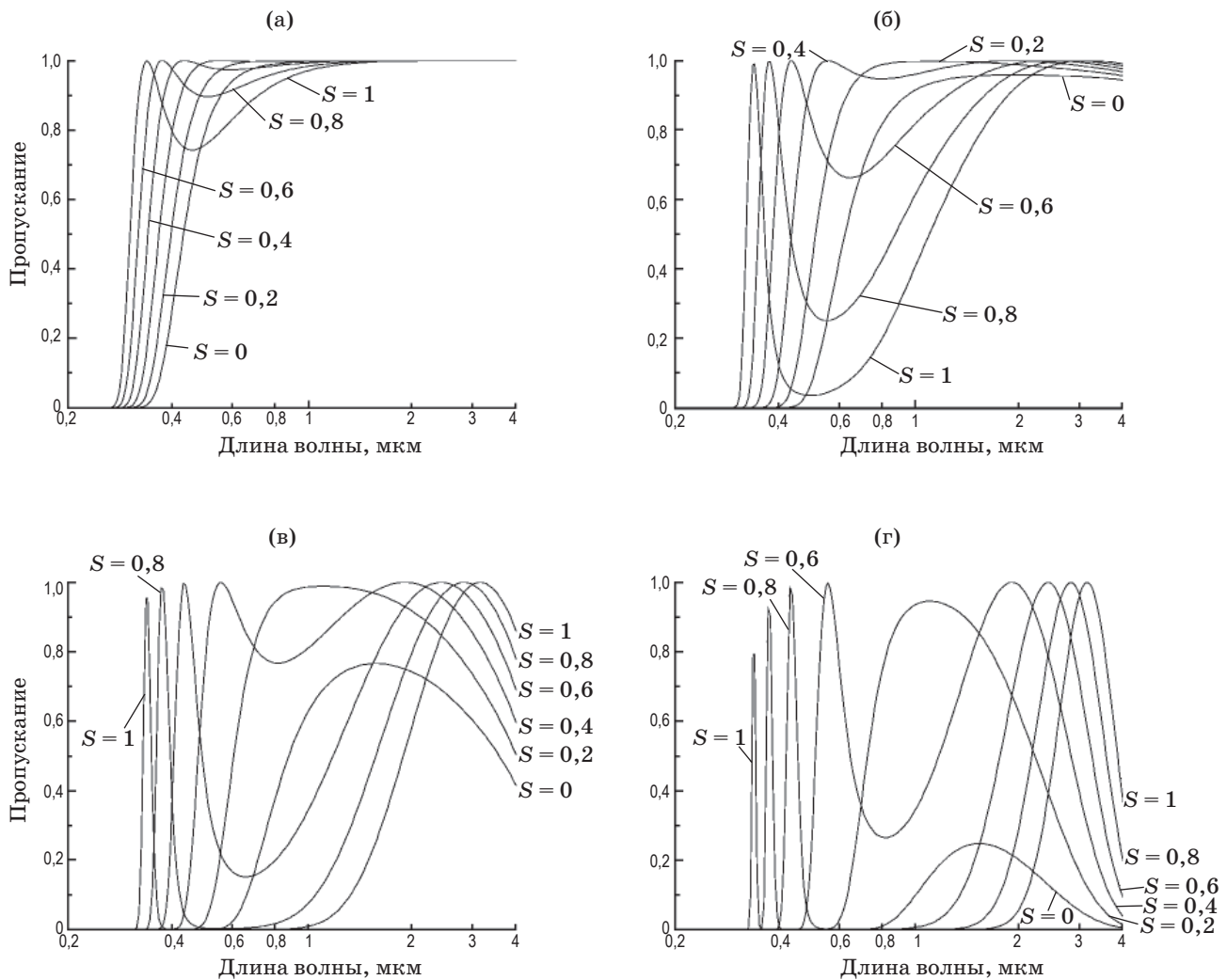


Рис. 4. Спектры пропускания дисперсного слоя жидкого кристалла ЖКМ-1289 толщиной 200 мкм при разных параметрах порядка S и объемной концентрации микрочастиц SiO_2 , равной 0,3, диаметром 0,1 (а), 0,5 (б), 2,0 (б), 2,0 (в), 10,0 (г).

областях спектра. В частности, в случае мелких МЧ диаметром $d = 0,1$ мкм анализируемая система представляет собой отрезающий фильтр. Изменением напряжения можно управлять положением границы пропускания $\lambda_{\text{тр}}$ (длина волны, при которой $T = 0,5$) от 0,3 до 0,5 мкм.

При диаметре МЧ 0,5 мкм и параметрах порядка $S \geq 0,6$, как можно видеть из рис. 4а, дисперсия ЖКМ-1289– SiO_2 является полосовым фильтром для видимой области длин волн и отрезающим для ИК излучения. Изменение управляющего напряжения позволяет изменять положение максимума полосы пропускания в пределах от 0,34 до 0,44 мкм и граничной длины волны от 0,6 до 1,6 мкм. При $S < 0,6$ дисперсия проявляет свойства

отрезающего фильтра с граничной длиной волны 0,7 мкм при $S = 0$ и $\lambda_{\text{тр}} = 0,45$ мкм при $S = 0,4$.

В области сравнительно крупных МЧ закономерности ослабления излучения, как показывает расчет, качественно подобны. В частности, при диаметре МЧ 2 мкм и параметрах порядка $S \geq 0,4$, как можно видеть из рис. 4б, дисперсия ЖКМ-1289– SiO_2 является полосовым фильтром для видимой и ИК областей длин волн. Изменение управляющего напряжения (определяющего значение параметра порядка S) позволяет изменять положение максимума полосы пропускания в пределах от 0,33 до 0,55 мкм в видимой области и с 1,8 до 3,2 мкм в ИК. При $S < 0,4$ слой является осла-

бителем оптического излучения в спектральном диапазоне 0,6–2,5 мкм. Увеличение размера МЧ приводит преимущественно к сужению полос пропускания фильтра.

Заключение

Приведена методика расчета перестраиваемых дисперсионных фильтров, создаваемых на основе ЖК. Показано, что дисперсная система, образованная из жидкого кристалла ЖКМ-1289 и микрочастиц SiO₂, может быть использована для фильтрации излучения в ближней ультрафиолетовой, видимой и ИК об-

ластях спектра. Ширина полос пропускания такого фильтра зависит от размера и количества дисперсных частиц SiO₂. Положение максимума полос пропускания фильтра определяется только степенью ориентации молекул ЖК и может плавно перестраиваться с помощью управляющего напряжения в двух интервалах длин волн: 0,33–0,55 мкм в видимой области и 1,8–3,2 мкм в ИК. Увеличение размера частиц приводит преимущественно к сужению полос пропускания фильтра.

Работа частично поддержана фондом фундаментальных исследований Беларуси, проект Ф10А3-004.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов В.С., Беков Г.И., Большой М.А., Жаров В.П., Летохов В.С., Курицын Ю.А., Персонов Р.И., Шибанов А.Н. Лазерная аналитическая спектроскопия. М.: Наука, 1986. 318 с.
2. Данилова А.П., Именков А.Н., Колчанова Н.М., Цивилиш С., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П. Дiodно-лазерная спектроскопия в двух модах на основе лазера InAsSb/InAsSb вблизи длины волны 3,6 мкм // Физ. и техн. полупровод. 1999. Т. 33. № 12. С. 1469–1474.
3. Астахова А.П., Данилова Т.Н., Именков А.Н., Колчанова Н.М., Яковлев Ю.П. Одномодовые быстропереключаемые лазеры для диодно-лазерной спектроскопии // Физ. и техн. полупровод. 2003. Т. 37. № 8. С. 985–995.
4. Ллойд Дж. Системы тепловидения. М.: Мир, 1978. 414 с.
5. Блинов Л.М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М.: Наука, 1978. 384 с.
6. Борисевич Н.А., Верещагин В.Г., Валидов М.А. Инфракрасные фильтры. Минск: Наука и техника, 1971. 228 с.
7. Ибрагимов Т.Д. Эффект Христиансена в системе малые частицы–жидкий кристалл // ЖПС. 2009. Т. 76. № 5. С. 793–798.
8. Dick V.P., Loiko V.A. Optical phase shift by polymer dispersed liquid crystal films with fine droplets // J. of Physics D: Appl. Phys. 2004. V. 37. № 13. P. 1834–1840.
9. Simoni F. Nonlinear optical properties of liquid crystals and polymer dispersed liquid crystals. Singapore: World Scientific, 1997. 259 p.
10. Hegmann T., Qi H., Marx V.M. Nanoparticles in liquid crystals: synthesis, self-assembly, defect formation and potential applications // J. of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials. 2007. V. 17. № 3. P. 483–508.
11. Yaroshchuk O.V., Dolgov L.O. Electro-optics and structure of polymer dispersed liquid crystals doped with nanoparticles of inorganic materials // Opt. Mat. 2007. V. 29. P. 1097–1102.
12. Yaroshchuk O.V., Kiselev A.D., Dolgov L.O. Electro-optics and structural peculiarities of liquid crystal-nanoparticle-polymer composites // Phys. Rev. E. 2005. V. 72. P. 051715(1)–051715 (11).
13. Hall J.E., Higgins D.A. Exploring the photorefractive effect in polymer-dispersed liquid crystals using near-field scanning optical microscopy // J. Phys. Chem. B. 2003. V. 107. P. 14211–14218.
14. Higgins D.A. Probing the mesoscopic chemical and physical properties of polymer-dispersed liquid crystals // Adv. Mater. 2000. V. 12. № 4. P. 251–264.
15. Loiko V.A., Konkolovich A.V., Miskevich A.A. Order parameter of elongated liquid crystal droplets: The method of retrieval by the coherent transmittance data // Phys. Rev. E. 2006. V. 74. P. 031704(1)–031704(7).
16. Palik E. D. Handbook of optical constants of solids. N.Y.: Academic Press, 1997. 785 p.

17. Refractive index database. Optical constants of SiO₂. [http://refractiveindex.info/?group=CRYSTALS&material=SiO₂](http://refractiveindex.info/?group=CRYSTALS&material=SiO2).
 18. *Лопаник В.И.* Частное сообщение.
 19. *Иванов А.П., Лойко В.А., Дик В.П.* Распространение света в плотноупакованных дисперсных средах. Минск: Наука и техника, 1988. 191 с.
 20. *Хюлт Г.* Рассеяние света малыми частицами. М.: ИИЛ, 1961. 534 с.
 21. *Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 660 с.
 22. *Wu S.T., Lim K.C.* Absorption and scattering measurements of nematic liquid crystals // Appl. Opt. 1987. V. 26. № 9. P. 1722–1727.
-