

СВЕТОПОГЛОЩЕНИЕ, УСИЛЕННОЕ ПРИ ПОМОЩИ ХОЛЕСТЕРИЧЕСКОГО СЛОЯ

И.В. Тимофеев^{1,2}, В.Г. Архипкин¹, С.Я. Ветров², В.Я. Зырянов^{1,3}, Вей Ли⁴

¹Институт физики имени Л.В. Киренского, Красноярский научный центр, СО РАН.

²Сибирский федеральный университет, Красноярск.

³Сибирский государственный аэрокосмический университет.

⁴Национальный университет Чиао Тунг, Тайвань.

tiv@iph.krasn.ru

Холестерический жидкий кристалл (ХЖК) с брэгговским отражением рассматривается как одномерный самоорганизующийся фотонный кристалл (ФК) [1], поскольку ХЖК формирует идеальную геликоидальную структуру с периодом масштаба оптической длины волны. Важнейшим свойством ФК является стоп-зона – полоса частот, на которых дифракция препятствует распространению световых волн в ФК [2]. На основе фотонных кристаллов и других метаматериалов разрабатывается масса способов и устройств управления светом. Одно из значимых направлений – широкополосные поглотители для солнечных батарей и фотовольтаики [3], источников теплового излучения, болометров, уменьшения перекрестных наводок в оптоэлектронике.

Недавно предложена идея [4] увеличения поглощения при помощи оптического диода на основе двух ХЖК слоев и полуволновой пластинки между ними [5]. Достоинство такого подхода – легкая перестройка частоты шагом спирали ХЖК. В настоящей работе показано, что устройство, предложенное в [4], может быть с успехом заменено одним слоем ХЖК (рис. 1).

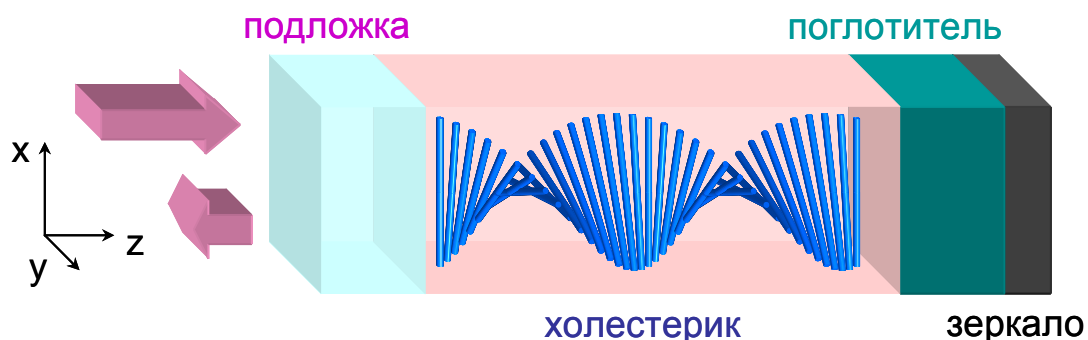


Рис. 1. Схема усиления светопоглощения при помощи холестерического слоя. Толщина поглотителя ограничена, на задней границе – зеркало

Несовершенство сильного поглотителя обусловлено неизбежностью отражения на границе вследствие различия показателей преломления. Суть метода в том, что при помощи холестерического покрытия паразитное отраженное излучение возвращается в поглотитель. В упрощенном рассмот-

рении цикл поглощения происходит не более двух раз. На первом цикле для света с левой круговой поляризацией на границе отражается свет правой поляризации. Это паразитное излучение на частоте стоп-зоны отражается от правозакрученного холестерика и возвращается в поглотитель. Однако на втором цикле паразитное излучение имеет левую поляризацию и покидает поглотитель. Если отражение от границы составляет R , то для двукратного отражения в стоп-зоне R_{PBG} справедлива оценка:

$$R_{\text{PBG}} = R^2, \text{ или } \log R_{\text{PBG}} = 2 \log R. \quad (1)$$

Недостаток слабого поглотителя – большой путь поглощения, что проявляется при миниатюризации. Поэтому для выяснения эффективности ХЖК-покрытия на задней границе поглотителя целесообразно поставить зеркало.

Амплитудный показатель отражения отыскивается в формализме матрицы переноса:

$$r = -\frac{\tilde{n} \cos(\varphi) + i \sin(\varphi)}{\tilde{n} \cos(\varphi) - i \sin(\varphi)}, \quad (2)$$

где фазовый набег $\varphi = 2\pi nL/\lambda$, L – толщина поглощающего слоя, λ – длина волны в вакууме, $n = \text{Re}(n) + i\text{Im}(n)$ – показатель преломления поглотителя, $\tilde{n} = n/n_0$ – отношение показателей преломления поглотителя и подложки. Энергетический показатель отражения $R = |r|^2$ зависит от n сложным образом (рис. 2).

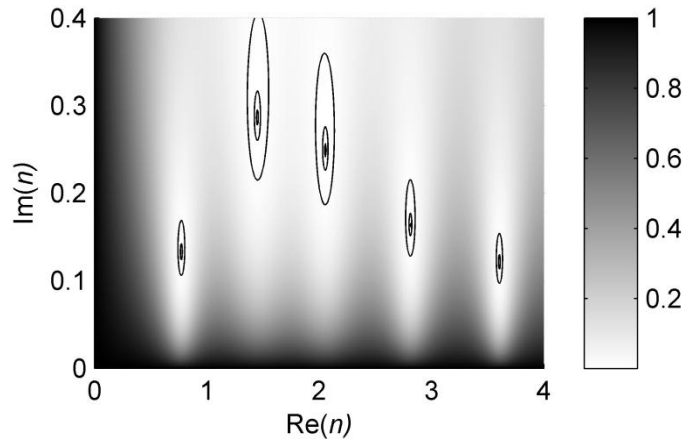


Рис. 2. Отражение от поглотителя с зеркальной задней границей в зависимости от комплексного показателя преломления n поглотителя. $L/\lambda = 1$, $n_0 = 1.6$. Нули отражения окружены овалами, соответствующими отражениям $R = 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}$

На рисунке выделены первые пять нулей отражения, являющиеся решениями трансцендентного уравнения

$$\tilde{n} = -i \tan(\varphi_0 \tilde{n}), \quad (3)$$

где $\varphi_0 = 2\pi n_0 L/\lambda$. Эти нули соответствуют условию оптимальной связи в теории связанных мод резонатора.

Во-вторых, следует найти отражение от поглотителя с ХЖК слоем. Вследствие громоздкости выражений, целесообразнее использовать приближенный метод Берремана, сходимость которого легко контролируется. В расчетах использовались параметры, близкие к экспериментально возможным. Свет нормально падает на поглотитель из подложки с показателем преломления $n_0 = 1.6$. Слой ХЖК имеет длину 3 мкм и шаг спирали $P = 0.3125$ мкм, обыкновенный и необыкновенный показатели преломления $n_o = 1.5$ и $n_e = 1.7$, соответственно. Толщина поглощающего слоя $L = 1$ мкм.

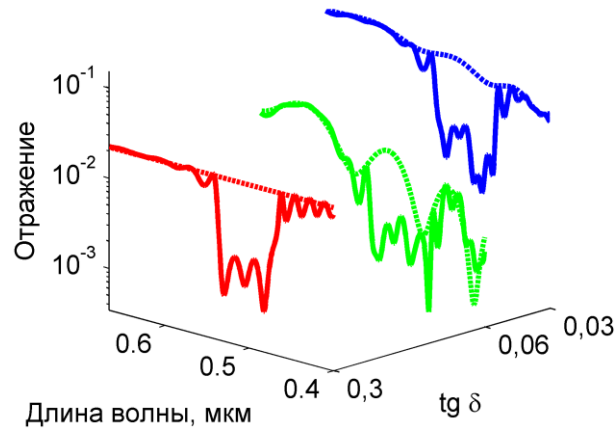


Рис. 3. Расчетный спектр отражения с ХЖК-слоем (сплошные линии) и без него (пунктирные линии) для $tg \delta = 0.03$ (синий), 0.06 (зеленый), 0.3 (красный). Средний спектр (зеленый) близок к условию оптимальной связи

Рис. 3 показывает сравнение спектров отражения для поглотителей различной силы, определяемой через тангенс потерь: $tg \delta = \text{Im}(\tilde{n}) / \text{Re}(\tilde{n})$, $\tilde{n} = |\tilde{n}| \exp(i\delta) = n_0(1 + itg\delta)$. Оценка (1) хорошо работает как при сильном поглотителе ($tg \delta = 0.3$), так и при слабом ($tg \delta = 0.03$). В промежуточном случае ($tg \delta = 0.06$) спектр показывает три провала отражения, что соответствует связи, близкой к оптимальной. Самый коротковолновый провал (справа) при $\lambda = 0.41$ мкм дает $R = 6 \cdot 10^{-4}$. Однако этот провал в несколько раз уже стоп-зоны ХЖК.

Рис. 4 показывает распределение поля при сильном поглотителе ($tg \delta = 0.3$). Картина согласуется с нашим объяснением, схематически представленным стрелками справа. Зеленая стрелка – левая круговая поляризация, беспрепятственно проходящая сквозь ХЖК. Красная стрелка – правая круговая поляризация, отражающаяся от ХЖК. На границе поглотителя формируется скин-слой. Отражение модулирует интенсивность поля по пространству. С введением ХЖК-слоя (сплошная линия) осцилляции интенсивности сохраняются лишь на правом краю ХЖК. Эти осцилляции внешне напоминают поверхностное состояние [6], однако, вряд ли могут расцениваться как таковое, поскольку с удалением от границы интенсивность уменьшается слабо.

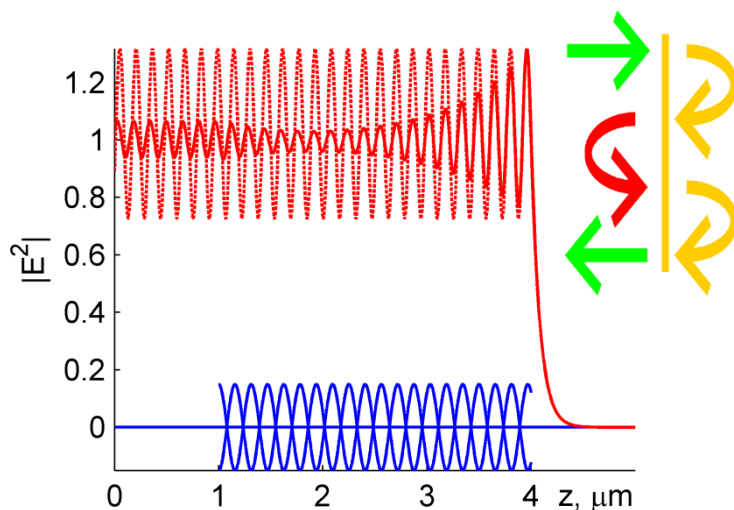


Рис. 4. Расчетный профиль $|E|^2(z)$ (квадрат максимума осциллирующей электрической напряженности) внутри поглотителя с ХЖК-слоем (сплошная линия) и без него (пунктирная линия). Поле нормировано на входное значение $|E_0|^2 = 1$. ХЖК-слой расположен между отметками 1 мкм и 4 мкм. Параметры те же, что и на рис. 3, при сильном поглотителе ($tg\delta = 0.3$). Длина волны соответствует середине стоп-зоны $\lambda_0 = P(n_o + n_e)/2 = 0.5 \mu\text{m}$. Схема справа иллюстрирует удвоение цикла поглощения

Работа выполнена при поддержке грантов г/к 14.В37.21.0730 по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»; №24.29 Президиума СО РАН; Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.0730; ОФН РАН N III.9.5; Президиума РАН N 24.29 и 24.32(1?); СО РАН N 43 и 101, NSC 101-2112-M-009-018-MY3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блинов Л.М. Жидкие кристаллы: Структура и свойства. М: 2013.
2. Шабанов В.Ф., Ветров С.Я., Шабанов А.В. Оптика реальных фотонных кристаллов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005.
3. Atwater Н.А., Polman А. // Nat. Mater. 2010. Vol. 9. P. 205–213.
4. Kallos E., Yannopoulos V., Photinos D.J. // Opt. Mat. Express. 2012. Vol. 2. P. 1449–1461.
5. Hwang J. et al. // Nat. Mater. 2005. Vol. 4, № May. P. 383–387.
6. Виноградов А.П. и др. // Успехи физических наук. 2010. Т. 180. № 3. С. 249–263.