

УДК 548.0:532.783

Г. А. ВАРДАНЯН, А. А. ГЕВОРГЯН

ЭФФЕКТ УМЕНЬШЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В ХОЛЕСТЕРИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ

Рассматривается прохождение и отражение света при нормальном его падении на планарный слой холестерического жидкого кристалла. Приведены точные аналитические формулы для амплитуд полей и для коэффициентов отражения и прохождения. Изучены особенности оптических свойств таких сред при наличии сильного поглощения. Выявлен эффект уменьшения доли энергии света, поглощенной в образце при увеличении толщины образца.

1. Введение. При взаимодействии электромагнитной волны с поглощающими периодическими средами существенную роль играют в основном два механизма: поглощение излучения и дифракция. Возможны самые разнообразные проявления конкуренции этих двух механизмов во влиянии на отражение и пропускание. Известен эффект Бормана [1-3], а также эффект аномально сильного поглощения излучения в периодических средах вблизи границ, запрещенных для распространения зон [4].

В данной работе обращается внимание на то, что при взаимодействии излучения с поглощающими периодическими средами различной толщины возможны самые различные проявления конкуренции этих двух механизмов. В частности, в данной работе обращено внимание на то, что толщины слоев, соответствующие насыщению (т. е. когда характеристики среды не изменяются при дальнейшем увеличении толщины) поглощения и дифракции, вообще говоря, не равны друг другу. Это естественно, так как поглощение и дифракция - разные явления. Если при увеличении толщины слоя поглощение излучения идет на насыщение быстрее, чем дифракционное отражение, то возможно наблюдение эффекта уменьшения поглощения излучения с увеличением толщины слоя. Наши расчеты показывают, что при определенных условиях возможно наблюдение указанного эффекта. Для определенности описание этого эффекта приведено ниже на примере оптических свойств холестерического жидкого кристалла (ХЖК), хотя совершенно аналогичные проявления эффекта характерны также и в отношении других пространственно периодических сред. Приведены также результаты точного аналитического решения задачи прохождения света через слой среды со спиральной структурой при нормальном его падении.

2 Поглощение вблизи границ области дифракционного отражения в среде со спиральной структурой. Рассмотрим прохождение и отражение света при нормальном его падении на слой среды со спиральной структурой, ось которой перпендикулярна граничным поверхностям (напр., на планарный слой холестерика). Известно точное аналитическое решение уравнений Максвелла для таких сред (см., напр., [3,4]). С учетом граничных условий задача приводится к системе из восьми линейных уравнений с восьмью неизвестными. Эта система решена численно или аналитически, но приближенно [3,4]. Считая, что на образец падает свет круговой поляризации, дифрагирующий в холестерике (взаимодействие со средой света противоположной круговой поляризации особенностей поглощения не проявляет), для компонентов амплитуд отраженного и прошедшего полей, получаем следующие аналитические

кие выражения, полученные посредством решения указанной системы:

$$\begin{aligned}
 E_{rx} &= uh \left\{ 2ugs_1s_2(2f-h) + i \left[(q_1-h)s_2c_1 + (q_2+h)s_1c_2 \right] \right\} / \Delta, \\
 E_{ry} &= uh \left\{ 2iugs_1s_2(2f+h) - \left[(q_1+h)s_2c_1 + (q_2-h)s_1c_2 \right] \right\} / \Delta, \\
 E_{ix} &= A \cos(ad) + B \sin(ad), \quad E_{iy} = -B \cos(ad) + A \sin(ad), \\
 A &= \left[(q_1-h)(c_1 - iul_1s_1) + (q_2+h)(c_2 + iul_2s_2) \right] / \Delta, \\
 B &= \left[(q_1+h)(c_1 - iul_1s_1) + (q_2-h)(c_2 + iul_2s_2) \right] / \Delta,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где

$$\begin{aligned}
 \Delta &= 2g \left[c_1c_2 + u^2l_1l_2s_1s_2 - iu(l_1s_1c_2 - l_2s_2c_1) \right], \\
 g &= (h^2 + 4b^2)^{0.5}, \quad u = \pi d \sqrt{\epsilon_m} / \lambda, \quad b = \lambda / (p\epsilon_m), \quad q_{1,2} = g \pm 2b, \\
 f &= 1 + b, \quad s_{1,2} = \sin(k_{1,2}d) / (k_{1,2}d), \quad c_{1,2} = \cos(k_{1,2}d), \\
 k_{1,2} &= 2u(1 + b^2 \pm g)^{0.5} / d, \quad a = 2\pi / p, \quad l_{1,2} = g \pm 2, \quad h = \epsilon_\alpha / \epsilon_m,
 \end{aligned}$$

$\epsilon_m = (\epsilon_{||} + \epsilon_{\perp}) / 2$ - средняя диэлектрическая проницаемость; $\epsilon_\alpha = (\epsilon_{||} - \epsilon_{\perp}) / 2$ - диэлектрическая анизотропия; $\epsilon_{||}, \epsilon_{\perp}$ - главные значения тензора диэлектрической проницаемости в плоскости, перпендикулярной оси среды, причем $\epsilon_{||}$ - диэлектрическая проницаемость вдоль направления директора, $a = 2\pi / p$, p - шаг спирали холестерика, λ - длина волны в вакууме, d - толщина слоя. Ось x совпадает с направлением директора на входной поверхности среды. При выводе формул (1) предполагалось, что диэлектрическая проницаемость среды, граничащей с обеих сторон со слоем холестерика, равна средней диэлектрической проницаемости холестерика ϵ_m , т. е. рассматривается случай минимального влияния диэлектрических границ, когда основную роль играют дифракция и поглощение в объеме.

При условии $ad = 2\pi n, n = 0, 1, 2 \dots$ (это условие, как видно из (1), значительно упрощает формулы для компонентов поля волны, прошедшей через слой, при этом в случае рассмотрения зависимостей оптических характеристик от толщины слоя предполагается, что толщина слоя меняется целыми витками) из (1) для коэффициентов прохождения и отражения получаем

$$\begin{aligned}
 T &= \left\{ |c_1 - iul_1s_1|^2 (|q_1|^2 + |h|^2) + |c_2 - iul_2s_2|^2 (|q_2|^2 + |h|^2) + \right. \\
 &\quad \left. + 2 \operatorname{Re} \left\{ (c_1 - iul_1s_1)(c_2 - iul_2s_2)^* (2q_1q_2^* - |h|^2) \right\} \right\} / |\Delta|^2, \\
 R &= |uh|^2 \left\{ 4ugs_1s_2 (|f|^2 + |h|^2) + |s_2c_1|^2 (|q_1|^2 + |h|^2) + \right. \\
 &\quad \left. + |s_1c_2|^2 (|q_2|^2 + |h|^2) + 2 \operatorname{Re} \left[s_2 \left[-2igs_1 \left[s_2^*c_1^* (-|h|^2 + \right. \right. \right. \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \left. \left. + 2fq_1^* \right) + s_1^*c_2^* (-|h|^2 + 2fq_2^*) + c_1s_1^*c_2^* (-|h|^2 + q_1q_2^*) \right] \right] \right\} / |\Delta|^2,
 \end{aligned} \tag{2}$$

где

$$|\Delta|^2 = 2|g|^2 \left\{ |c_1 c_2|^2 + |u^2 l_1 l_2 s_1 s_2|^2 + |u(l_1 s_1 c_2 - l_2 s_2 c_1)|^2 + 2 \operatorname{Re} \left[\left[(u^2 l_1 l_2 s_1 s_2)^* c_1 c_2 \right] + i [u(l_1 s_1 c_2 - l_2 s_2 c_1)]^* \times (c_1 c_2 + u^2 l_1 l_2 s_1 s_2) \right] \right\}.$$

Звездочками обозначены комплексно-сопряженные соответствующих величин. Несмотря на наличие аналитических формул (1), (2) из-за их громоздкости, анализ отражения и пропускания света целесообразно проводить, используя численные расчеты.

3. Результаты численных расчетов. На рис. 1 представлена зависимость величины $Q = 1 - (R + T)$, характеризующей долю энергии света, поглощенную в образце, от толщины слоя (числа витков спирали $j = d/p$) холестерика для различных длин волн падающего света. Расчеты были выполнены для холестерика с параметрами $\epsilon_{\parallel} = 2,29 + i10^{-1}$, $\epsilon_{\perp} = 2,143$, $p = 0,42$ мкм. Для лучшего понимания графиков укажем, что при отсутствии поглощения границы ОСО находятся на длинах волн $\lambda_1 = 0,6148$ мкм, $\lambda_2 = 0,6356$ мкм.

Рис.1 демонстрирует резкую зависимость величины поглощения Q в слое от числа витков спирали холестерика (особенно в интервале 0+20). Из рисунка видно также, что на различных длинах волн эта зависимость имеет разный характер.

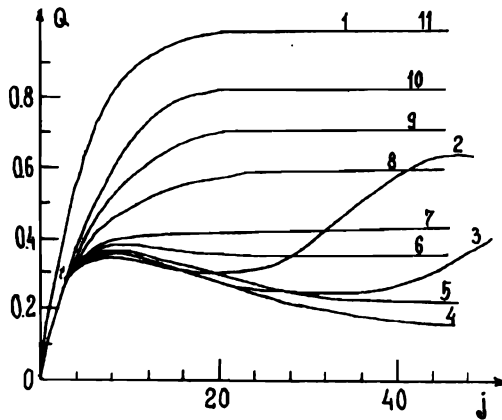


Рис.1. Зависимость интегрального поглощения Q от j для различных длин волн падающего света: 1. - 0.4 мкм, 2. - 0.6130 мкм, 3. - 0.6139 мкм, 4. - 0.6148 мкм, 5. - 0.6160 мкм, 6. - 0.6180 мкм, 7. - 6200 мкм, 8. - 0.6250 мкм, 9. - 0.6300 мкм, 10. - 0.6365 мкм, 11. - 0.9 мкм.

Интересна зависимость Q от j вблизи коротковолновой границы ОСО. На длинах волн 0,6148 мкм, 0,6160 мкм и 0,6180 мкм (внутри ОСО, коротковолновая область) с увеличением j величина Q сначала, как обычно, быстро увеличивается, однако потом, проходя через пик, начинает уменьшаться, и только после этого происходит насыщение. Таким образом, тут наблюдается интересный эффект.

На длинах же волн 0,6130 мкм и 0,6139 мкм (вне ОСО, вблизи ее коротковолновой границы) сначала происходит быстрое увеличение Q , а потом эта величина, осциллируя, идет на насыщение, причем, как показывают расчеты, амплитуды первых двух осцилляций намного превышают амплитуду остальных. Такой характер имеет также зависимость Q от j на других частотах вблизи коротковолновой границы ОСО.

Рис.1 показывает, что эффект уменьшения поглощения излучения при увеличении толщины слоя носит остро избирательный характер по частоте излучения. Этот эффект наблюдается вблизи коротковолновой границы ОСО, если $\epsilon''_{\alpha} > 0$, и вблизи длинноволновой границы, если $\epsilon''_{\alpha} < 0$.

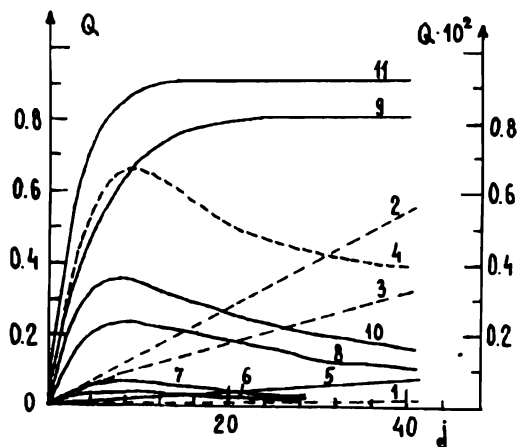


Рис.2. Зависимость величины Q от j на длине волны $\lambda = 0,6148 \text{ мкм}$ при различных значениях ϵ''_m и ϵ''_{α} . Сплошные кривые соответствуют левой шкале, штриховые - правой.
 1. - $\epsilon''_m = 0,000005$, $\epsilon''_{\alpha} = 0$; $\epsilon''_m = 0,000005$, $\epsilon''_{\alpha} = 0,000005$. 2. - $\epsilon''_m = 0,00005$, $\epsilon''_{\alpha} = 0$. 3. - $\epsilon''_m = 0,00005$, $\epsilon''_{\alpha} = 0,00005$. 4. - $\epsilon''_m = 0,0005$, $\epsilon''_{\alpha} = 0,0005$. 5. - $\epsilon''_m = 0,001$, $\epsilon''_{\alpha} = 0$. 6. $\epsilon''_m = 0,0025$, $\epsilon''_{\alpha} = 0,0025$. 7. - $\epsilon''_m = 0,005$, $\epsilon''_{\alpha} = 0,005$. 8. - $\epsilon''_m = 0,025$, $\epsilon''_{\alpha} = 0,025$. 9. - $\epsilon''_m = 0,05$, $\epsilon''_{\alpha} = 0$. 10. - $\epsilon''_m = 0,05$, $\epsilon''_{\alpha} = 0,05$. 11. - $\epsilon''_m = 0,1$, $\epsilon''_{\alpha} = 0$.

На рис.2 представлена зависимость Q от j при различных значениях ϵ''_m и ϵ''_{α} на длине волны $\lambda = 0,6148 \text{ мкм}$. Как видно из рисунка, выявленный эффект имеет место только при анизотропном поглощении. Кроме того, рисунок демонстрирует сильную зависимость эффекта от значения величины ϵ''_{α} . Величина выявленного эффекта быстро уменьшается с уменьшением ϵ''_{α} , при этом пик сильного поглощения смещается в сторону больших значений j.

4. Обсуждение. Выводы. Анализ приведенных результатов численных расчетов выявляет условия наблюдения уменьшения поглощения света при увеличении j. Для заданного значения ϵ''_{α} существует оптимальное значение толщины d, для которого реализуется наибольшее значение поглощения Q в слое; при дальнейшем увеличении толщины d величина Q уменьшается, а затем происходит насыщение.

Как показывают представленные результаты, а также детальный численный анализ, выявленный эффект обусловлен существованием второго механизма дифракции, возникающего из-за анизотропии поглощения, т. е. отличия от нуля величины ϵ''_{α} . Действительно, как показывают численные расчеты, в предельном случае $\epsilon''_{\alpha} \rightarrow 0$ при условии $\epsilon''_m \neq 0$ тоже имеет место дифракционное взаимодействие света со средой, причем в этом случае также наблюдается эффект уменьшения поглощения излучения с увеличением толщины слоя. Детальный анализ в этом предельном случае позволяет понять физику явления. Как уже отмечено во введении, нужно также иметь в виду, что толщины, соответствующие насыщению поглощения и дифракции, вообще говоря, не равны друг другу. Увеличение толщины означает, с

одной стороны, увеличение поглощения Q в слое, а с другой - увеличение параметра $L \cdot \epsilon''_{\alpha} / p$, характеризующего в данном случае "силу дифракции". Естественно, если толщина слоя уже такая, что проникающее в глубь образца излучение полностью поглощается ($T=0$), то при дальнейшем увеличении толщины d величина Q не может увеличиваться. С другой стороны, если при дальнейшем увеличении толщины увеличивается дифракционное отражение, то это приводит к уменьшению поглощения Q в слое, так как при этом $Q = 1 - (R + T) = 1 - R$. Именно такая ситуация и реализуется, т. е. в данном случае толщина насыщения дифракции больше толщины насыщения поглощения.

Что же касается вопроса о том, почему при дальнейшем увеличении толщины слоя (после прохождения величины Q через пик) дифракционное отражение увеличивается, а поглощение излучения практически не меняется, то, как нам кажется, это является одним из проявлений когерентности падающего на слой среды света.

В случае обычных сред со спиральной структурой появляются дополнительные особенности и закономерности, обусловленные наличием двух механизмов дифракции (первый механизм дифракции обусловлен анизотропией преломления, т. е. отличием от нуля величины ϵ'_{α}). Естественно, при изотропном поглощении эффект не наблюдается (отсутствует второй механизм дифракции).

При $\epsilon''_{\alpha} > 0$ вблизи длинноволновой границы ОСО эффект тоже не наблюдается - из-за аномально сильного поглощения излучения (эффект Бормана), перекрывающего данный эффект.

Эффект наблюдается только вблизи коротковолновой границы ОСО, причем тут уже эффект Бормана (имеем в виду механизм подавления поглощения) способствует проявлению выявленного эффекта: чем сильнее подавляется поглощение, тем более ярко проявляется выявленный эффект.

Вдали от ОСО эффект не наблюдается из-за слабости дифракционного характера взаимодействия света со средой.

И наконец, обсудим зависимость величины Q от j на длинах волн вблизи коротковолновой границы ОСО. Из-за слишком большой амплитуды осцилляции величины R в зависимости от j вблизи этой границы они проявляются также в зависимости величины Q от j . В этой области длин волн зависимость величины Q от j тоже приобретает осцилляционный характер, но если механизм первого пика в зависимости от j один и тот же, что и на длине волны 0,6148 мкм, то остальные пики есть проявления больших осцилляций в зависимости величины R от j . Сравнение зависимостей величин R и Q от j показывает, что пики величины Q получаются на минимумах коэффициента отражения. То, что максимальное поглощение проявляется при толщине, соответствующей минимуму дифракционного отражения, также находит естественное объяснение. Действительно, при этой толщине излучение проникает в образец максимально глубоко (в отсутствие поглощения излучение распространяется в нем, вообще не поглощаясь), и поэтому поглощение в слое Q (возрастающее с увеличением глубины проникновения излучения) именно при этой толщине оказывается максимальным.

Отметим также, что если при отсутствии поглощения величины R и T связаны соотношением $R+T=1$ (среда имеет только одну энергетическую характеристику), то при наличии поглощения часть энергии поглощается в среде и $R+T < 1$. При этом величины R и T становятся независимыми характеристиками среды и содержат в себе независимую информацию о среде, и законы их изменения тоже становятся независимыми. Это естественно, так как если природа увеличивает число параметров среды, то должно увеличиваться также число независимых измерений (число независимых уравнений) для возможного определения этих новых параметров среды.

В заключение отметим еще раз, что проанализированный на примере ХЖК эффект уменьшения поглощения излучения на границе ОСО при увеличении толщины образца носит весьма общий характер и может проявляться во взаимодействии излучения с различными периодическими средами. Физическая причина его существо-

вания связана с различными характерами влияния поглощения и дифракции на отражение и пропускание при изменении толщины образца.

Отметим также, что учет этого эффекта может оказаться существенным в оптических и рентгеновских системах, функционирующих в условиях брегговской дифракции излучения.

Кафедра общей физики

Поступила 23.03.1995

ЛИТЕРАТУРА

1. Воггмау J.Z. Phys., 1941, v.42, p.157.
2. Афанасьев А.М., Каган Ю.М. ЖЭТФ, 1965, т. 48, с. 327; ЖЭТФ, 1965, т. 49, с. 1504.
3. Беляков В.А., Сонин А.С. Оптика холестерических жидких кристаллов, 1982, М.: Наука.
4. Беляков В.А., Геворгиян А.А., Ерицян О.С., Шипов Н.В. ЖТФ, 1987, т. 57, с. 1418; Кристаллография, 1988, т. 33, с. 574.

Գ.Ա. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ Ա.Հ. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ

ԽՈՒՆԵՍՏԵՐԻՆԱՑԻՆ ՀԵՂՈՒԿ ԲՅՈՒՐԵՂՆԵՐՈՒՄ ԵՆԻՏԻ ՀԱՍՏՈՒԹՅԱՆ ՄԵԾԱՑՈՒՄԻՑ ԿԱԽՎԱԾ ԾԱՌԱԳԱՑԹՄԱՆ ԿԼԱՆՄԱՆ ՆՎԱԶՄԱՆ ԵՐԵՎՈՒԹԹԻ ՄԱՍԻՆ

Ա մ փ ո փ ո մ

Դիտարկված է լույսի անցումը և անդրադարձումը երբ այն նորմալով ընկնում է խոլեստերինային հեղուկ բյուրեղի պլանար շերտի վրա: Բերված են ճշգրիտ անալիտիկ բանաձևեր դաշտերի լայնույթների և անցման ու անդրադարձման գործակիցների համար: Ուսումնասիրված են այդպիսի միջավայրերի օպտիկական հատկությունների առանձնահատկությունները ուժեղ կլանման առկայության դեպքում: Ի հայտ է բերված նմուշի հաստության մեծացման դեպքում նրանում կլանված լույսի էներգիայի նվազման երևույթը: