

УДК 548.0

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ СЛОЯ СПИРАЛЬНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА ЭФФЕКТЫ АНОМАЛИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ

Г.А. ВАРДАНЯН, А.А. ГЕВОРГЯН

Московский государственный университет

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 16 января 1998г.)

Рассматривается прохождение и отражение света при нормальном его падении на слой среды со спиральной периодической структурой, ось которой перпендикулярна к граничным поверхностям. Изучены влияния изменения различных параметров среды (толщины слоя, реальной и мнимой частей среднего значения диэлектрической проницаемости и диэлектрической анизотропии) на эффекты уменьшения поглощения излучения в среде как при увеличении толщины слоя, так и при увеличении анизотропии поглощения. Обсуждены физические механизмы полученных закономерностей.

Введение

В работах [1,2] изучены особенности поглощения излучения в спиральных периодических средах (СПС) и выявлены эффекты уменьшения поглощения излучения как при увеличении толщины слоя, так и при увеличении анизотропии поглощения. Изучен также ряд особенностей проявления этих эффектов в указанных средах. В работе [3] исследованы особенности выявленных эффектов в спиральных дихроичных средах. В [1-3] показано, что выявленные эффекты являются проявлением когерентности излучения. Они носят общий характер в том смысле, что могут проявляться при взаимодействии когерентного излучения (оно может быть когерентной электромагнитной волной, рентгеновским излучением, пучком частиц – электронов, нейтронов или протонов, описываемым когерентной волновой функцией и т. д.) с поглощающей периодической системой (она может быть жидким или твердым кристаллом, периодической слоистой средой, средой, находящейся в периодически меняющемся в пространстве ультразвуковом или мощном лазерном поле, одномерной, двумерной или трехмерной периодической системой атомов и т. д.). В [4] изучено взаимодействие квазимонохроматического, частично-поляризованного света со СПС и рассмотрено влияние квазимонохроматичности и степени поляризации света на указанные эффекты. Предложен также интерференционный меха-

низм поглощения, на основе которого легко объясняются как вышеуказанные аномалии поглощения, так и другие особенности поглощения когерентного излучения в периодических системах. Исследование взаимодействия пучков электронов с одномерной периодической системой атомов показывает, что аналоги вышеуказанных эффектов наблюдаются и в этом случае. Выясняется, что поглощение электронов при их неупругом взаимодействии с одномерной атомной системой уменьшается (после прохождения через пик) с увеличением числа атомов. Кроме того, при данном значении числа атомов в системе поглощение электронов опять уменьшается (после прохождения через пик) при увеличении параметра, характеризующего неупругость их взаимодействия с атомной системой.

Ниже приведены результаты по изучению влияния изменения различных параметров СПС (реальной и мнимой частей среднего значения диэлектрической проницаемости, реальной и мнимой частей анизотропии диэлектрической проницаемости и толщины слоя) на вышеуказанные эффекты. Большой интерес к особенностям проявления указанных эффектов в СПС обусловлен следующим фактом. Данные среды в оптическом отношении – одни из самых сложных. При взаимодействии света со слоями СПС конечной толщины действуют три механизма дифракции и, как показано ниже, соответственно три механизма поглощения.

Результаты расчетов

Рассмотрим прохождение и отражение света при нормальном его падении на слой СПС, ось которой перпендикулярна к граничным поверхностям. Точное аналитическое решение этой граничной задачи представлено в работе [3]. В [1,3] изучена зависимость величины $Q = 1 - (R + T)$, характеризующей долю энергии света, поглощенного в образце, от толщины слоя при анизотропном поглощении в случае $\text{Im}\epsilon_a > 0$ ($\epsilon_a = (\epsilon_1 - \epsilon_2)/2$, где ϵ_1, ϵ_2 – главные значения тензора диэлектрической проницаемости в плоскости, перпендикулярной к оси среды) и показано, что на длинах волн вблизи коротковолновой границы области селективного отражения (ОСО) величина Q уменьшается после прохождения через пик (R, T – коэффициенты отражения и прохождения). Показано также, что эффект наблюдается только при анизотропном поглощении и только начиная с некоторого значения анизотропии поглощения. На различных длинах волн падающего света эффект проявляется по-разному. В [5] показано, что аналогичный эффект наблюдается вблизи длинноволновой границы ОСО, но при таких значениях анизотропии поглощения, при которых существенным становится механизм дифракции, обусловленный анизотропией поглощения.

Ниже приведены результаты по изучению влияния изменения различных параметров среды на этот эффект. Вычисления были сделаны согласно формулам работы [3]. Результаты представлены в виде графиков.

На рис.1 представлена зависимость поглощения излучения Q в слое от толщины слоя (точнее, от числа витков спирали d/σ , σ – шаг спирали, d – толщина слоя) на длине волны вблизи длинноволновой

границы ОСО при: 1) различных значениях анизотропии поглощения (а), 2) различных значениях среднего поглощения $\text{Im}\epsilon_m$ ($\epsilon_m = (\epsilon_1 + \epsilon_2)/2$) (б), 3) различных значениях реальной части среднего значения диэлектрической проницаемости $\text{Re}\epsilon_m$ (в), 4) различных значениях анизотропии преломления $\text{Re}\epsilon_a$ (г).

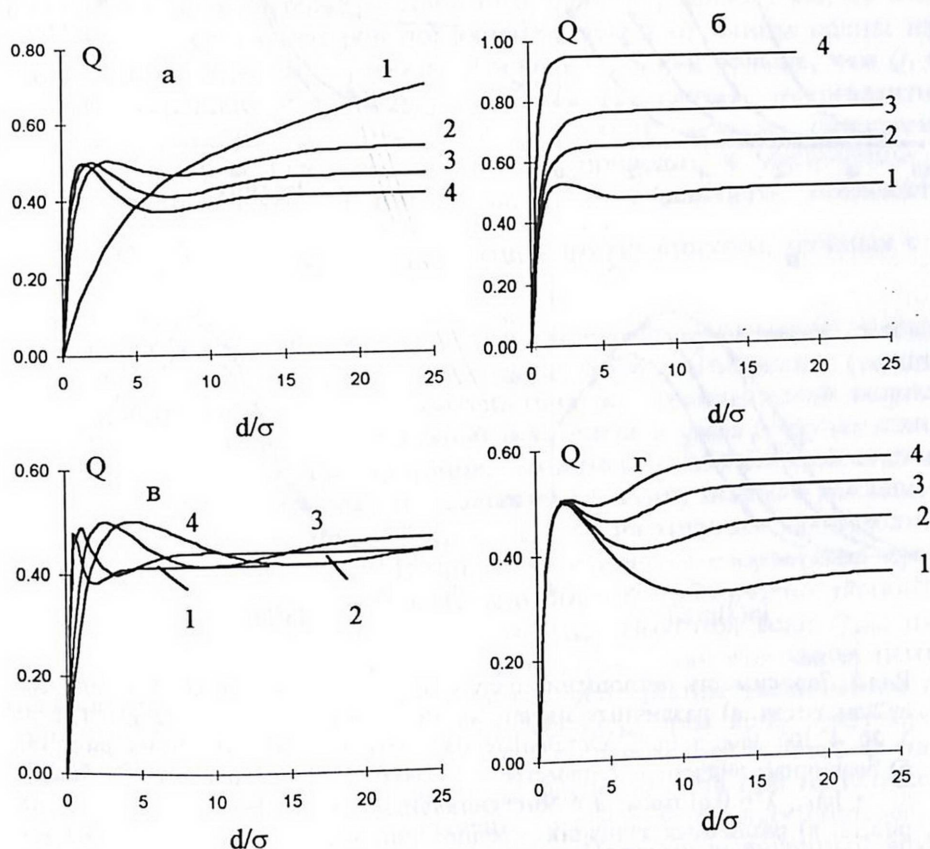


Рис.1. Зависимость поглощения излучения Q от числа витков спирали d/σ при: а) различных значениях анизотропии поглощения $\text{Im}\epsilon_a$: 1. 0.05, 2. 0.25, 3. 0.375, 4. 0.5. Остальные параметры таковы: $\text{Re}\epsilon_1 = 2.29$, $\text{Re}\epsilon_2 = 2.25$, $\sigma = 0.42$ мкм, $\lambda = \sigma\sqrt{\epsilon_1}$, $\text{Im}\epsilon_a = \text{Im}\epsilon_m$, б) различных значениях среднего поглощения $\text{Im}\epsilon_m$: 1. 0.385, 2. 0.425, 3. 0.475, 4. 0.875. $\text{Im}\epsilon_a = 0.05$. Остальные параметры те же, что и на рис.1а, в) различных значениях среднего значения диэлектрической проницаемости $\text{Re}\epsilon_m$: 1. 0.52, 2. 1.02, 3. 3.02, 4. 5.02. $\text{Re}\epsilon_a = 0.02$, $\text{Im}\epsilon_a = \text{Im}\epsilon_m = 0.375$. Остальные параметры те же, что и на рис.1а, г) различных значениях анизотропии преломления $\text{Re}\epsilon_a$: 1. 0.01, 2. 0.02, 3. 0.03, 4. 0.04. $\text{Re}\epsilon_1 = 2.25$, $\text{Im}\epsilon_a = \text{Im}\epsilon_m = 0.375$. Остальные параметры те же, что и на рис.1а.

В [2,3] изучена зависимость величины Q от анизотропии поглощения (от параметра $\ln(\text{Im}\epsilon_m)$) и показано, что на длинах волн вблизи ОСО величина Q уменьшается после прохождения через пик. Исследовано влияние различных механизмов дифракции на выявленный эффект и особенности проявления этого эффекта на различных длинах волн.

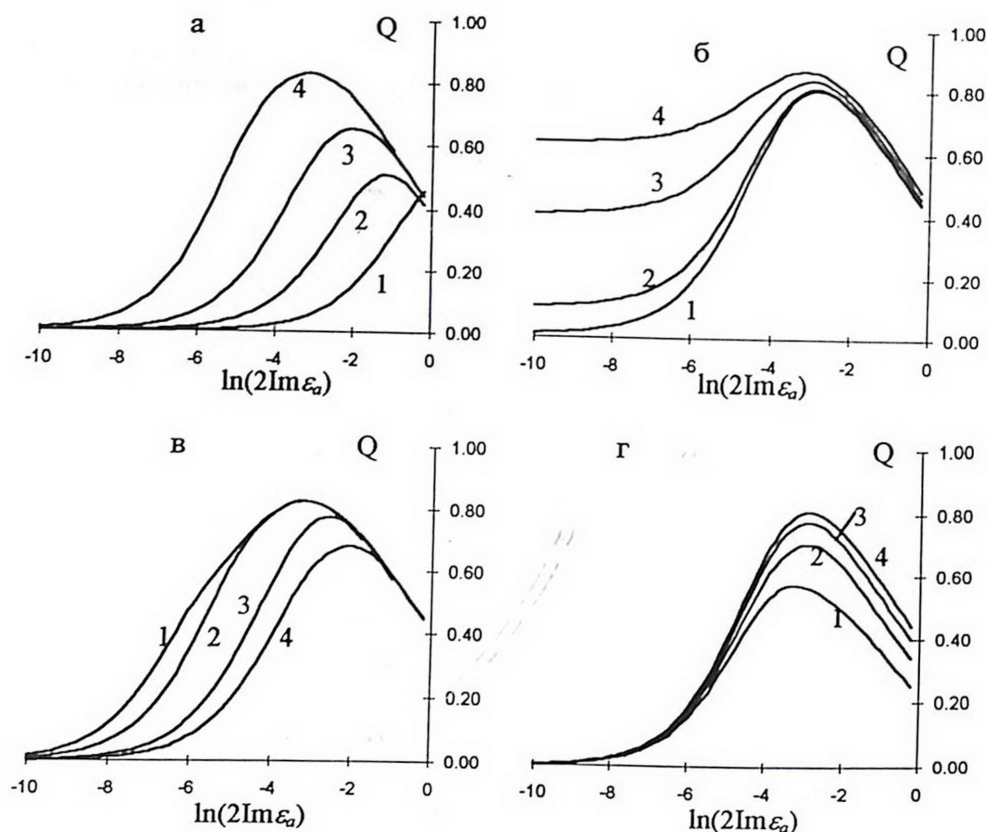


Рис.2. Зависимость поглощения излучения Q от анизотропии поглощения $\ln(2\text{Im}\epsilon_a)$ при: а) различных значениях числа витков спирали d/σ : 1. 1, 2. 5, 3. 20, 4. 100. $\text{Im}\epsilon_a = \text{Im}\epsilon_m$. Остальные параметры те же, что и на рис. 1а, б) различных значениях параметра x : 1. 0.0001, 2. 0.001; 3. 0.005, 4. 0.01. $\text{Im}\epsilon_m = x + \text{Im}\epsilon_a$, $\lambda = 0.615\text{мкм}$. $d = 50\sigma$. Остальные параметры те же, что и на рис.1а, в) различных значениях среднего значения диэлектрической проницаемости $\text{Re}\epsilon_m$: 1. 0.52, 2. 1.02, 3. 3.02, 4. 5.02. $\text{Re}\epsilon_a = 0.02$, $d = 50\sigma$. Остальные параметры те же, что и на рис.1а, г) различных значениях анизотропии преломления $\text{Re}\epsilon_a$: 1. 0.01, 2. 0.02, 3. 0.03, 4. 0.04. $\text{Re}\epsilon_1 = 2.25$, $d = 50\sigma$, $\text{Im}\epsilon_a = \text{Im}\epsilon_m$. Остальные параметры те же, что и на рис.1а.

На рис.2 представлены зависимости поглощения излучения Q от параметра $\ln(2\text{Im}\epsilon_a)$ на длине волны вблизи длинноволновой границы ОСО при: 1) различных толщинах слоя (а), 2) различных значениях среднего поглощения $\text{Im}\epsilon_m$ (б), 3) различных значениях реальной части среднего значения диэлектрической проницаемости $\text{Re}\epsilon_m$ (в), 4) различных значениях анизотропии преломления $\text{Re}\epsilon_a$ (г).

Обсуждение. Выводы

Для понимания механизмов представленных закономерностей будем исходить из физического механизма поглощения излучения, предложенного в работе [4].

Если имеются два поглощающих центра, характеризующиеся по отдельности поглощениями Q_1 и Q_2 , то при взаимодействии когерентного излучения с системой, состоящей из этих двух центров, полное поглощение излучения системой уже не будет равно простой алгебраической сумме $Q_1 + Q_2$ и будет характеризоваться функцией $Q = Q_1 + Q_2 + Q_{12}$. Величина и знак интерференционного члена Q_{12} зависят как от взаимного расположения центров поглощения, так и от длины волны излучения. Таким образом, величина Q может быть как больше, чем $Q_1 + Q_2$ (характеризующей поглощение системы в случае некогерентного взаимодействия излучения с системой), так и меньше. Естественно, увеличение числа центров поглощения приводит к увеличению (по модулю) как некогерентного, так и когерентного поглощения:

$$Q = \sum_i Q_i + \frac{1}{2} \sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}} Q_{ij} = Q_{\text{incoher}} + Q_{\text{coher}}. \text{ Но с другой стороны, начиная с не-}$$

которого значения числа центров поглощения происходит "насыщение": дальнейшее увеличение числа центров поглощения (толщины слоя, например, в случае взаимодействия электромагнитной волны со средой с периодической структурой, или числа атомов в случае взаимодействия электронов или протонов, например, с одномерной системой атомов, и т. д.) практически не влияет на величину полного поглощения Q . Однако переход величин Q_{coher} и Q_{incoher} к насыщению происходит по различным законам и, естественно, с различными скоростями, причем Q_{incoher} идет к насыщению значительно быстрее (обычно по экспоненциальному закону – закон Бугера), чем Q_{coher} . Поэтому, если Q_{coher} имеет отрицательный знак, то начиная с некоторого значения числа центров поглощения Q начинает уменьшаться с дальнейшим увеличением последних. Естественно, чем больше вклад Q_{coher} , тем ярче будут проявляться указанные эффекты, т.е. тем большим будет спад Q после прохождения через пик. А вклад Q_{coher} увеличивается при приближении длины волны когерентного излучения в среде к периоду системы, т.е. при приближении к режиму дифракции. Поэтому выявленный эффект можно интерпретировать также как результат конкуренции поглощения и дифракции [1-3]. При этом нужно иметь в виду, что в этих средах действуют три механизма дифракции (три типа взаимодействия): дифракция света на периодической спиральности, обусловленная анизотропией преломления, дифракция света на периодической спиральности, обусловленная анизотропией поглощения, и дифракция света в ограниченном объеме, обусловленная конечностью толщины слоя. Каждый из этих механизмов характеризуется определенным параметром: первый механизм – параметром $d\text{Re}\delta/\sigma$ ($\delta = \epsilon/\epsilon_m$), второй – параметром $d\text{Im}\delta/\sigma$, а третий – некоторой комбинацией указанных двух параметров, включающей толщину слоя. При этом каждый из этих механизмов дифракции создает свой механизм когерентного и некогерентного поглощения. В зависимости от значения длины волны увеличивается вклад то одного, то другого механизма дифракции и поглощения. Согласно вышеизложенному, теперь уже легко можно объяснить уменьшение поглощения излучения Q в зависимости от толщины слоя или от параметра $\text{Im}2\epsilon_a$. В частности, обнаруженный в [5] эффект уменьшения поглощения излучения с увеличением толщины слоя при $\text{Im}\epsilon_a > 0$ вблизи

длинноволновой границы в случае только громадных значений анизотропии поглощения находит свое естественное объяснение. Действительно, внутри ОСО вблизи длинноволновой границы действуют только первые два механизма дифракции и поглощения. Причем Q_{coher} первого механизма имеет положительный знак, а второго – отрицательный знак. С увеличением величины $\text{Im}\epsilon_a$ увеличиваются вклады Q_{coher} и Q_{incoher} как первого, так и второго механизма. Но при данной толщине слоя d значения величины $\text{Im}\epsilon_a$, при котором данный механизм поглощения насыщается, для указанных двух механизмов разные. Поглощение (и Q_{coher} , и Q_{incoher}) первого механизма взаимодействия насыщается при более малом значении параметра $\text{Im}\epsilon_a$, чем второго механизма. Поэтому при дальнейшем увеличении $\text{Im}\epsilon_a$ вклад поглощения второго механизма дифракции в общее поглощение продолжает увеличиваться. Следовательно, начиная с некоторого значения параметра $\text{Im}\epsilon_a$ будет наблюдаться эффект уменьшения поглощения излучения с увеличением толщины слоя. На основе такого представления о механизмах поглощения и дифракции можно объяснить также представленные в данной работе закономерности. Рассмотрим, например, зависимость Q от числа витков спирали d/σ при различных значениях среднего поглощения. Как уже отмечалось, внутри ОСО действуют два механизма поглощения и дифракции: первый и второй. При $\text{Im}\epsilon_m = \text{Im}\epsilon_a$ вблизи коротковолновой границы ОСО имеет место эффект Бормана [6,7]: первый механизм дифракции практически полностью подавляет поглощение, и поэтому работает только второй механизм поглощения и дифракции, вследствие чего и наблюдается эффект уменьшения поглощения излучения при увеличении числа витков спирали. При увеличении среднего поглощения, при данном значении анизотропии поглощения, вблизи ОСО происходит аномально сильное поглощение из-за первого механизма дифракции и поглощения, вследствие чего и начиная с некоторого значения $\text{Im}\epsilon_m$ этот механизм поглощения перекрывает второй механизм поглощения. Поэтому этот эффект перестает наблюдаться, начиная с некоторого значения $\text{Im}\epsilon_a$.

Для понимания других закономерностей, представленных на рисунках, нужно иметь в виду также следующие факты.

1. При увеличении анизотропии поглощения $\text{Re}\epsilon_a$ становятся значительными также изменения собственных поляризаций. Так, при $\text{Re}\delta \ll 1$ собственные поляризации представляют собой две практически ортогональные круговые поляризации, а при $\text{Re}\delta \gg 1$ они также ортогональны, но уже поляризованы линейно [8]. Спиральные периодические среды отличаются также той особенностью, что при падении на слой такой среды свет с одной собственной поляризацией претерпевает дифракционное отражение на его структуре, а свет с другой собственной поляризацией вообще не испытывает дифракционного отражения. Так что при значительных величинах $\text{Re}\epsilon_a$ собственные поляризации начинают значительно отличаться от круговой и, следовательно, значительно уменьшается вклад Q_{coher} в общее поглощение из-за уменьшения “интенсивности” дифракции.

Отметим, что аналогичная ситуация имеет место в оптике спиральных периодических сред с громадной анизотропией [8,9]. Подобная

ситуация наблюдается также при наклонном падении света на планарный слой СПС. Так, в [10] экспериментально изучено аномальное прохождение (эффект Бормана) при наклонном падении света на планарный слой холестерического жидкого кристалла и показано, что эффект не наблюдается при углах падения больших 19° . В [11] показано, что это связано с изменением собственных поляризаций с углом падения (собственные поляризации изменяются с ортогональных, практически круговых поляризаций при нормальном падении до ортогональных линейных поляризаций при углах падения близких к 90°).

2. Уменьшение $\text{Re}\varepsilon_m$ увеличивает δ и, следовательно, также параметры соответствующих механизмов дифракции и поглощения.

Что касается вопроса о возможности экспериментального исследования эффектов аномалий поглощения, то как уже отмечено выше, они могут наблюдаться также, например, при взаимодействии СВЧ излучения с периодическими поглощающими средами. А проведение таких экспериментов вполне реально.

Работа выполнена в рамках темы 96-895, финансируемой из государственных централизованных источников РА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.А.Варданян, А.А.Геворгян. Кристаллография, **42**, 316 (1997).
2. Г.А.Варданян, А.А.Геворгян. Изв. НАН Армении, Физика, **32**, 252 (1997).
3. Г.А.Варданян, А.А.Геворгян. Кристаллография, **42**, 723 (1997).
4. А.А.Геворгян. Опт. и спектр., **87** (1999).
5. А.А.Геворгян. ЖТФ, **69** (1999).
6. В.А.Беляков. Дифракционная оптика периодических сред сложной структуры. М., Наука, 1988.
7. С.Чандрасекар. Жидкие кристаллы. М., Мир, 1980.
8. Г.А.Варданян, А.А.Геворгян, О.С.Ерицян. Опт. и спектр., **85**, 640 (1998).
9. Г.А.Варданян, А.А.Геворгян, О.С.Ерицян и др. Кристаллография, **43**, 793 (1998).
10. S.Endo, T.Kuribara, and T.Akahane. Jpn. J. Appl. Phys., **22**, L499 (1983).
11. Y.Sah and K.A.Suresh. J. Opt. Soc. Am. A, **11**, 740 (1994).

INFLUENCE OF CHANGES OF THE LAYER PARAMETERS OF THE HELICAL PERIODICAL MEDIUM ON EFFECTS OF ABSORPTION ANOMALIES

G. A. VARDANIAN, A. H. GEVORGIAN

The problem of light transmission and reflection in the case of its normal incidence onto the layer of periodical helical medium with the axis perpendicular to the interfaces is considered. The influences of the changes of the different parameters (layer thickness, real and imaginary parts of the mean dielectric constant and dielectric anisotropy) on the effects of decrease of radiation absorption in medium both with an increase of the layer thickness and with an increase of absorption anisotropy are studied. The physical mechanisms of obtained dependences are discussed.