

К ВОПРОСУ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В ОДНОМЕРНОЙ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

В.Д.БАДАЛЯН

Поступила 31 мая 2006

Принята к печати 20 сентября 2006

Исследована угловая зависимость коэффициента отражения электромагнитной волны при ее прохождении через одномерный квазипериодический слой диэлектрика. Обнаружено, что при определенном характере квазипериодичности системы возможен эффект всенаправленного отражения электромагнитной волны.

1. Введение. В последнее время вопросы распространения излучения в среде при наличии процессов рассеяния, испускания и поглощения привлекают к себе все более пристальное внимание как физиков и астрофизиков, так и представителей смежных наук. В ряде случаев практический интерес связан не с полем излучения, а с отражательными свойствами или с пропусканием диэлектрического слоя с заданной функцией диэлектрической проницаемости. В.А.Амбарцумян сформулировал принцип инвариантности, который послужил основой эффективного метода решения подобных задач [1,2]. В работах [3-6] с применением принципа инвариантности получены дифференциальные соотношения, позволяющие точно описать рассеяние плоской произвольно поляризованной электромагнитной волны в одномерной диэлектрической среде с произвольным показателем преломления. Недавно [7] этот метод применен к квазипериодической среде. Исследованы спектральные характеристики системы при наличии амплитудной и фазовой модуляции статической волны, описывающей диэлектрическую среду.

В настоящей работе представлены результаты дальнейшего исследования одномерных квазипериодических сред. Получена зависимость энергетического коэффициента отражения от угла падения электромагнитной волны.

2. Основные формулы. Смоделируем квазипериодическую среду статической волной диэлектрической проницаемости .

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_0 \left(1 + a(x) \sin^2 \left(\frac{2\pi}{\sigma(x)} x \right) \right), \quad (1)$$

где $a(x)$, $\sigma(x)$ - некоторые непрерывные функции (параметры модуляции); $\varepsilon_0 = \varepsilon(0)$.

Рассеяние энергии электромагнитной волны в диэлектрическом слое конечной толщины опишем с помощью коэффициентов отражения $R^{s,p}$ и прохождения $T^{s,p}$, которые выражаются через амплитуды прохождения ($t^{s,p}$) и отражения ($r^{s,p}$) s и p -поляризованных волн: $R^{s,p} = |r^{s,p}|^2$, $T^{s,p} = |t^{s,p}|^2$. Сами $t^{s,p}$ и $r^{s,p}$ являются решениями некоторой системы линейных дифференциальных уравнений и зависят, в частности, от угла падения α электромагнитной волны [4]. Для исследования угловых зависимостей амплитудных характеристик воспользуемся схемой расчета, описанной в [7]. Мы рассмотрим случай немагнитных сред, т.е. положим в основных формулах $\mu = 1$. Будем также пренебрегать поглощением энергии волны ($T^{s,p} + R^{s,p} = 1$).

3. Результаты и обсуждение. Сначала рассмотрим линейный профиль изменения параметров $a(x)$ и $\sigma(x)$:

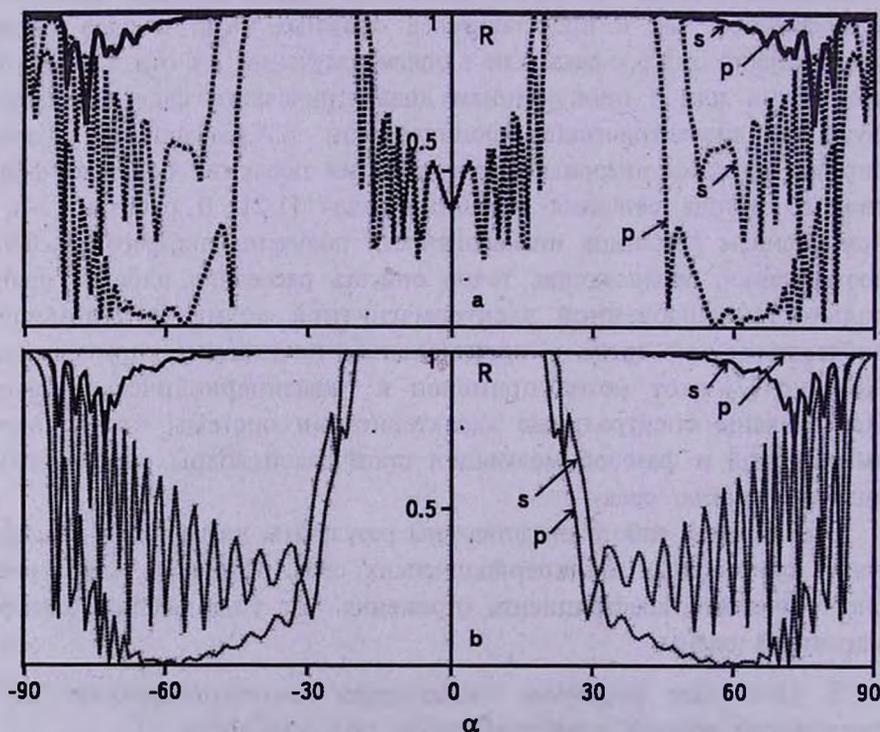


Рис.1. Функция $R = R(\alpha)$. Штриховые кривые: $a = 0.5$, $\sigma(x) = 0.42 \mu\text{m}$, сплошные кривые: $a = 0.5$, $\sigma_{\text{min}} = 0.38 \mu\text{m}$, $\sigma_{\text{max}} = 0.46 \mu\text{m}$, $d = 44 \mu\text{m}$, $\varepsilon_0 = 2.25$.

$$a(x) = \left(\frac{a_{max} - a_{min}}{d} \right) x + a_{min}; \quad \sigma(x) = \left(\frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{d} \right) x + \sigma_{min}, \quad (2)$$

где d - толщина слоя; a_m , σ_m - константы. Прежде всего исследуем случай, когда статическая волна обладает постоянной амплитудой периодичности ($a(x) = \text{const}$), но линейным характером изменения периода идентичности $\sigma(x)$.

На рис.1 представлена зависимость коэффициента отражения R от угла падения α . Штриховые кривые соответствуют случаю $a(x) = \text{const}$, $\sigma(x) = \text{const}$, т.е. идеально-периодической среде, а сплошные кривые - линейному профилю изменения $\sigma(x)$. Стрелками показаны кривые, отвечающие p - и s -поляризациям. Из рисунка видно, что как для идеально-периодической, так и квазипериодической среды существует ограниченная область угла падения падающего света, где коэффициент отражения максимален: $R \approx 1$. Это - угловая область дифракционного отражения. Рис.1 показывает, что наличие градиента периода идентичности приводит к существенному уширению этой области. Рис.1а соответствует длине волны нормально падающего света ($\lambda_1 = 0.65 \mu\text{m}$), находящегося вне запрещенной зоны идеально-

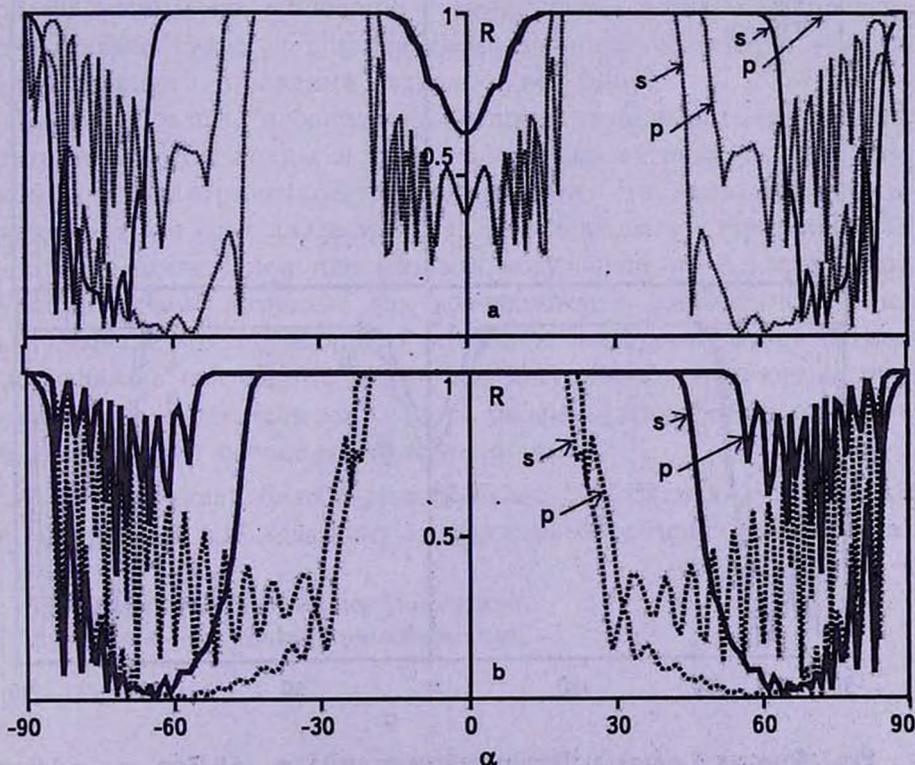


Рис.2. Функция $R = R(\alpha)$. Штриховые кривые: $a = 0.5$, $\sigma(x) = 0.42 \mu\text{m}$, сплошные кривые: $\sigma(x) = 0.42 \mu\text{m}$, $a_{min} = 0.25$, $a_{max} = 0.75$, $d = 44 \mu\text{m}$, $\epsilon_0 = 2.25$.

периодической среды. На рис.1b представлена та же зависимость для длины волны падающего света, находящегося в запрещенной зоне при нормальном падении ($\lambda_2 = 0.704\mu\text{m}$) [7]. Таким образом, согласно рис.1a, b, наличие градиента параметра $\sigma(x)$ приводит к практически важному эффекту: сильному отражению света с любой поляризацией и произвольным углом падения (этот эффект в английской литературе известен как "Omnidirectional reflection").

Рассмотрим теперь случай, когда $\sigma(x) = \text{const}$, а функция $a(x)$ изменяется по линейному закону. На рис.2a и b приведены кривые зависимости коэффициента отражения R от угла падения для длин волн $\lambda = 0.65\mu\text{m}$ (2a) и $\lambda = 0.704\mu\text{m}$ (2b). Сплошные кривые соответствуют линейному профилю амплитуды периодичности $a(x)$ (штриховые кривые, как и на рис.1, отвечают случаю $a(x) = \text{const}$, $\sigma(x) = \text{const}$). Из этих рисунков видно, что при больших углах падения отражение света с s -поляризацией, в отличие от предыдущего случая, значительно уменьшается, т.е. эффект "всенаправленного отражения" для s -волн отсутствует.

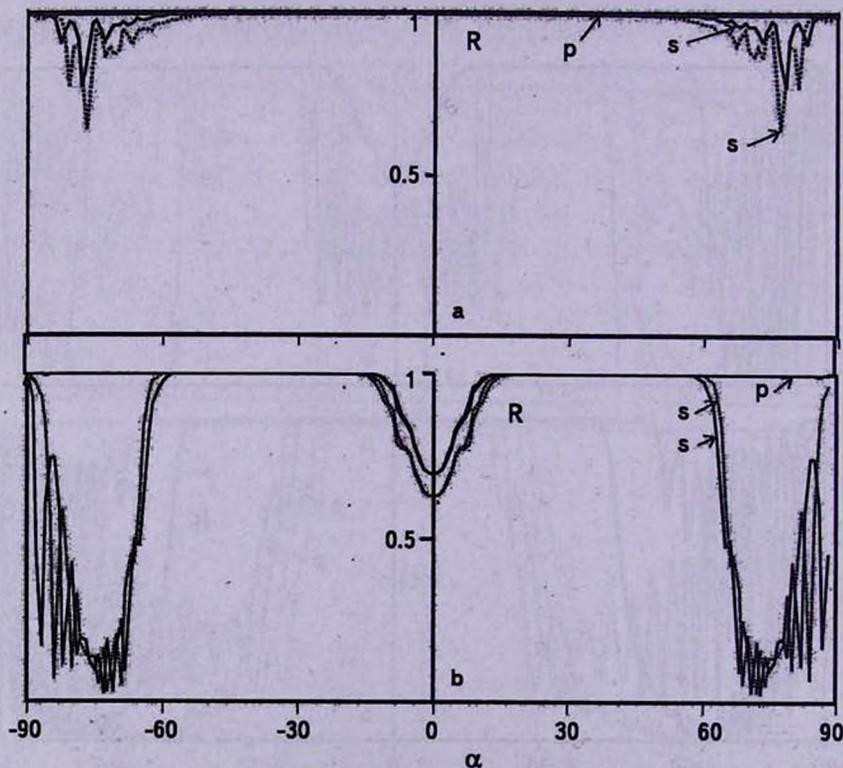


Рис.3. Функция $R = R(\alpha)$. а) Штриховые кривые: $a = 0.5$, $\sigma_{\text{max}} = 0.38\mu\text{m}$, $\sigma_{\text{min}} = 0.46\mu\text{m}$; сплошные кривые: $\gamma = 0.38$, $\beta = 0.00434\mu\text{m}^{-1}$. б) Штриховые кривые: $\sigma(x) = 0.42\mu\text{m}$, $a_{\text{max}} = 0.25$, $a_{\text{min}} = 0.75$; сплошные кривые: $\chi = 0.25$, $\nu = 0.02497\mu\text{m}^{-1}$; $d = 44\mu\text{m}$, $\epsilon_0 = 2.25$.

В качестве другой модели квазипериодичности рассмотрим системы с экспоненциальным профилем изменения параметров модуляции:

$$a(x) = \chi e^{\nu x}, \quad \sigma(x) = \gamma e^{\beta x}, \quad (3)$$

где постоянные χ , ν и β , γ подбираются таким образом, чтобы функции $a(x)$, $\sigma(x)$ изменялись в тех же пределах, что и в линейном случае (2).

На рис.3а представлена зависимость R от α в случае, когда $a(x) = \text{const}$, $\sigma(x) = \gamma e^{\beta x}$ (сплошные кривые). На этом же рисунке, для сравнения, приведена аналогичная зависимость при линейном профиле изменения $\sigma(x)$ (штриховые кривые). Видно, что экспоненциальный характер изменения $\sigma(x)$ приводит к незначительному уширению области дифракционного отражения. Из графиков также следует, что при замене линейной функции $\sigma(x)$ экспоненциальной эффект всенаправленного отражения света несколько усиливается.

Наконец, приведем зависимость $R = R(\alpha)$ при $a(x) = \chi e^{\nu x}$, $\sigma(x) = \text{const}$. Результаты расчетов представлены графиками на рис.3б. Сравнение 3а и 3б показывает, что экспоненциальное изменение амплитуды периодичности не приводит к улучшению отражательных свойств системы по сравнению с предыдущим случаем. Напротив, незначительно сужается ширина дифракционной области, а эффект всенаправленного отражения несколько ослабевает.

Таким образом, исследована угловая зависимость рассеяния электромагнитной волны в одномерном диэлектрике с заданным законом диэлектрической проницаемости. Численные расчеты показывают, что если диэлектрическая проницаемость - гармоническая функция с амплитудной или фазовой модуляцией, то в квазипериодической системе возможно как возникновение запрещенной зоны, так и эффекта всенаправленного отражения электромагнитной волны. В астрофизике полученные результаты могут быть использованы при исследовании отражательных свойств звездных атмосфер, в оптике - для исследования слоистых структур [8] и т.д.

Автор выражает благодарность академ. Д.М.Седракяну, а также А.А.Геворгяну и А.Ж.Хачатряну за полезные обсуждения и замечания.

ON THE SPREAD OF ELECTROMAGNETIC WAVE IN ONE-DIMENSIONAL QUASI-PERIODIC MEDIUM

V.D.BADALYAN

The angular dependence of the coefficient of the reflection of electromagnetic wave passing through one-dimensional layer of dielectric is investigated. It is revealed that under definite character of the system quasiperiodicity the effect of omnidirectional reflection of electromagnetic wave is possible.

Key words: *Electromagnetic wave: quasiperiodic medium*

ЛИТЕРАТУРА

1. В.А.Амбарцумян, Научные труды (под ред. В.В.Соболева), т.1, с.263-268, Изд. АН АрмССР, Ереван, 1960.
2. С.Чандрасекар, Перенос лучистой энергии, пер. с англ., М., 1953.
3. Д.М.Седракян, А.Ж.Хачатрян, Астрофизика, 42, 419, 1999.
4. Д.М.Седракян, А.А.Геворгян, А.Ж.Хачатрян, Астрофизика, 43, 269, 2000.
5. D.M.Sedrakian, A.H.Gevorgyan, A.Zh.Khachatryan, Opt. Commun., 192, 135, 2001.
6. D.M.Sedrakian, A.Zh.Khachatryan, Ann. Phys. (Leipzig), 11, 3, 2002.
7. Д.М.Седракян, А.А.Геворгян, А.Ж.Хачатрян, В.Д.Бадалян, Астрофизика, (в печати).
8. J.D.Joannopoulos, R.D.Meade, J.N.Winn, Photonic Crystals. U. Princeton Press, Princeton, N. J., 1995.