

УДК 53:378.147.091.32

КООРДИНАТНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА НА ГРАНИЦЕ ВАКУУМ-АНИЗОТРОПНАЯ СРЕДА

¹Соболь В.Р., ¹Федорков Ч.М., ²Korzun V.V., ³Мазуренко О.Н., ⁴Нисковских Н.Б.

¹Белорусский государственный педагогический университет имени М. Танка,
г. Минск, Беларусь,

²The City University of New York, Borough of Manhattan Community College,
199 Chambers Str., New York, NY 10007, U.S.A.

³Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований
г. Минск, Беларусь

⁴ГУО «Гимназия №20 г. Минска», Беларусь
vrsobol@mail.ru

Аннотация

Процесс взаимодействия линейно поляризованной в плоскости падения волны с поверхностью оптической анизотропной среды рассмотрен в формализме представления диэлектрической проницаемости в виде тензора второго ранга общего типа в системе координат границы раздела, без приведения к главным осям. Представлен коэффициент в виде отношения амплитуд векторов напряженности электрического поля для отраженной и падающей волны.

Ключевые слова.

Соотношения неразрывности, волновой вектор, закон преломления

Введение. Обоснование проблематики. Отражение света широко используется в приборостроении, оплотехнике, локации, физике и технике оптических квантовых генераторов. Существенным является возможность привлечения данного явления к исследованию состава и структуры вещества, происходящих в нем процессов, в том числе, когда доступны к исследованию и свойства поверхностного слоя вещества, если он отличается по параметрам от ниже располагающихся областей. Действительно, выявляя закономерности отражения света от поверхности исследуемой среды и имея модельные представления о характере воздействия среды на процесс отражения, возможно путем решения обратной задачи на основе установленных экспериментальных данных выявить сами свойства среды, наподобие задачи школьного лабораторного практикума, где по измеренным углам падения и преломления рассчитывается показатель преломления. Подобный тезис можно отнести к более сложным, комплексным средам, которые феноменологически описываются тензорными коэффициентами в материальных соотношениях.

В сообщении представлены результаты исследования закономерностей взаимодействия поляризованной в плоскости падения волны с поверхностью кристаллической среды, отвечающей материальным соотношениям связи в представлении тензорной диэлектрической проницаемости в общем виде, когда две оси тензора лежат в плоскости поверхности, а третья направлена вдоль нормали к поверхности среды. Такой вид представления свойств может отвечать принципу симметрии компонент тензора, если, скажем, внешнего воздействия нет, а может быть частично и антисимметричным, например, за счет приложенного внешнего поля. При антисимметрии тензора его приведение к главным осям, как известно, невозможно и приходится производить дополнительные операции для описания, скажем, фарадеевского вращения плоскости поляризации. В действительности, приведение к главным осям тензора диэлектрических проницаемостей является мощным и результативным, но имеет более высокий смысл при исследовании топологии волновой поверхности внутри кристаллической среды, когда три диагональных компоненты позволяют различать волны в двуосных, одноосных и

обычных оптически изотропных кристаллических средах высокой симметрии. В соотношениях Френеля отражение света в амплитудном и энергетическом представлении описывается в виде зависимости отношения амплитуд от углов падения и преломления, то есть в форме соотношений в формате непрерывного сканирования угла падения между нормалью к поверхности и волновым вектором от нулевого значения до полного скольжения. Угол преломления, который необходим для сшивания компонент электромагнитной волны на границе раздела при приведенном тензоре проницаемости к главным осям необходимо выражать через диагональные компоненты. Данная процедура весьма затруднительная, тем более она сложна для решения, если все диагональные компоненты различны, что характерно для среды с двумя оптическими осями. Если учитывать анизотропию и по магнитному упорядочению, например, для так называемых, би анизотропных сред, когда главные оси для тензоров диэлектрической и магнитной проницаемостей не совпадают, то восстановление закона преломления, угла преломления для волновой нормали, показателя преломления для волны с тем либо иным типом поляризации, требуемого для записи отношения амплитуд отраженной и падающей волн становится более сложной задачей, чем при прямом координатном представлении угла преломления через закон дисперсии при общем описании тензоров материальных констант в осях самой геометрии задачи на отражение.

Процедура решения задачи. Обсуждение. Здесь, на примере взаимодействия линейно поляризованной в плоскости падения волны с поверхностью кристаллической анизотропной среды, характеризуемой тензором диэлектрической проницаемости второго ранга со всеми отличными от нуля компонентами, рассмотрены соотношения Френеля для амплитудного и энергетического коэффициента отражения. Оси тензора проницаемости выбраны в соответствии с геометрией отражения, традиционные соотношения неразрывности на границе раздела применены в обычной манере.

Оптическая среда с анизотропией диэлектрической проницаемости рассмотрена на примере условного кристалла, у которого тензор диэлектрической проницаемости содержит девять отличных от нуля компонент, а магнитная проницаемость является скалярной величиной, равной единице.

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (1)$$

При анализе в рамках системы единиц СИ использованы известные соотношения связи между компонентами векторов электрической и магнитной индукции (\mathbf{D} и \mathbf{B}) и напряженности (\mathbf{E} и \mathbf{H}) поля волны

$$\mathbf{H} = \mu_0^{-1} \mu^{-1} \mathbf{B} \quad (2)$$

$$\mathbf{E} = \epsilon_0^{-1} \epsilon^{-1} \mathbf{D} \quad (3)$$

В приближении взаимодействия электромагнитного поля волны с поверхностью анизотропной среды в соответствии со схемой (Рисунок 1) естественно постулировать, что волновые векторы падающей, отраженной и преломленной волны \mathbf{k} имеют по две не нулевые составляющие. В частности в среде вектор волновой нормали имеет следующие компоненты (Рисунок 1).

$$k_x = k \sin \psi \quad k_y = -k \cos \psi \quad k_z = 0 \quad (4)$$

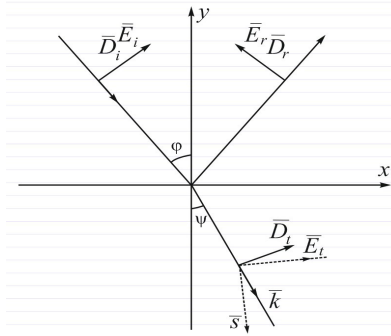


Рисунок 1. Геометрия взаимодействия линейно поляризованной в плоскости падения (xy) волны при ее падении (угол падения φ) и преломлении (угол преломления ψ) на поверхность (плоскость xz) оптической среды, анизотропной по электрическим свойствам, \vec{k} - волновой вектор, \vec{s} - лучевой вектор.

Традиционные условия неразрывности тангенциальных и нормальных составляющих электрического поля волны на границе раздела позволяют выразить отношение между амплитудами напряженности электрического поля для отраженной E_r и падающей E_i волны как функцию угла преломления ψ , т.е. $r(\psi) = \frac{E_r}{E_i}$. В общем виде при произвольном угле падения/преломления амплитудный коэффициент отражения $r(\psi) = \frac{E_r}{E_i}$ может быть представлен как (5)

$$r(\psi) = \frac{\cos(\varphi(\psi)) - \varepsilon_1 \mu_1 \frac{\sin(\varphi(\psi))(\varepsilon_{xy} \sin\psi - \varepsilon_{yy} \cos\psi)}{\sin\psi (\varepsilon_{xy} \varepsilon_{yx} - \varepsilon_{xx} \varepsilon_{yy})}}{\cos(\varphi(\psi)) + \varepsilon_1 \mu_1 \frac{\sin(\varphi(\psi))(\varepsilon_{xy} \sin\psi - \varepsilon_{yy} \cos\psi)}{\sin\psi (\varepsilon_{xy} \varepsilon_{yx} - \varepsilon_{xx} \varepsilon_{yy})}} \quad (5)$$

здесь ε_1 - диэлектрическая проницаемость среды со стороны падения волны.

В выбранной геометрии задачи амплитудный коэффициент отражения (5) содержит только элементы тензора $\hat{\varepsilon}$ в плоскости падения и трансформируется к выражениям Френеля при предельном переходе по недиагональным компонентам $\hat{\varepsilon}$, когда в изотропной среде указанный тензор вырождается скалярную величину.

$$r(\psi) = \frac{\cos\varphi - \frac{\varepsilon_1 \sin\varphi \cos\psi}{\varepsilon_{xx} \sin\psi}}{\cos\varphi + \frac{\varepsilon_1 \sin\varphi \cos\psi}{\varepsilon_{xx} \sin\psi}} \quad (6)$$

В выражении (5) отношение амплитуд представлено в функции только одного угла преломления ψ , который, требуется однозначно выразить через угол падения φ с помощью соответствующего модифицированного соотношения Снеллиуса, содержащего показатель преломления для волны рассматриваемого типа.

Литература

1. Krichevstov B.B. Spontaneous non-reciprocal reflection of light from antiferromagnetic Cr_2O_3 / B.B.Krichevstov [et al.] // Journ. Phys.: Condens. Matter. – 1993. – V. 5, № 4. – P. 8233 – 8240.
2. Pisarev R.V. Nonlinear optical spectroscopy of magnetoelectric and piezomagnetic crystals / R. V. Pisarev, M. Fiebig, D.Frohlich // Ferroelectrics. – 1997. – V. 204. – P. 1 – 21.
3. Fiebig M. Magnetoelectric effects in multiferroic manganites. / M. Fiebig [et al.] // J. Magn. Magn. Mater. – 2005. – V. 290-291. – P. 883 – 890.