УДК 548.0

ОТРАЖЕНИЕ И ФОКУСИРОВКА СВЕТА ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ПЛАСТИНОЙ ОДНООСНОГО КРИСТАЛЛА С ОТКРЫТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ВОЛНОВЫХ ВЕКТОРОВ

О.С. ЕРИЦЯН, А.А. ПАПОЯН, А.А.ЛАЛАЯН, О.М.АРАКЕЛЯН

Ереванский государственный университет

Р.Б. КОСТАНЯН

Институт физических исследований НАН Армении

(Поступила в редакцию 29 апреля 2005 г.)

Приведены оптические спектры отражения от поверхности кристалла MgF₂ в области частот 200(800 см⁻¹. Результаты измерений совпадают с расчетными при открытом характере поверхности волновых векторов кристалла в областях частот, в которых действительная часть у одной из компонент диэлектрического тензора отрицательна. Рассчитана задача фокусировки оптического излучения плоскопараллельной пластиной кристалла MgF₂ для частоты излучения (= 450 см⁻¹.

1. Введение

В последнее время повышенный интерес вызывают среды с одновременно отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями ε и μ [1-3]. Такой интерес, кроме чисто фундаментального, обусловлен тем, что подобные среды обладают необычными оптическими свойствами, которые с успехом могут быть использованы в прикладной оптике, в частности, для реализации фокусировки пучка при его преломлении на плоской границе сред [4,5]. Возможность реализации такого метода фокусировки оптического пучка обусловлена антипараллельностью вектора Пойнтинга **S** и волнового вектора **k** при $\varepsilon < 0$, $\mu < 0$ одновременно [6]. Отметим, что материалов, имеющих подобные электромагнитные свойства, по настоящее время в природе не обнаружено, однако такие среды, или так называемые метаматериалы, можно создать искусственно при помощи использования периодически расположенных рамок и колец из проводящего материала [2,7].

Если рассмотреть неизотропные кристаллы, например, одноосные, в которых тензор диэлектрической проницаемости имеет компоненты различных знаков, то обнаруживается, что многие свойства природных кристаллов могут быть сходными со свойствами метаматериалов с отрицательным значением коэффициента преломления.

В работе [8] показано, что для одноосных кристаллов, у которых одна из компонент

диэлектрического тензора \mathcal{E}_{ii} отрицательна, поверхность волновых векторов (ПВВ) для необыкновенной волны не является замкнутой поверхностью, как обычно, а является открытой, а именно, представляет собой гиперболоид вращения. Открытый характер ПВВ обусловливает ряд особенностей оптических свойств такой среды, одна из которых заключается в следующем. Пусть компонента \mathcal{E}_{ii} отрицательна в направлениях, перпендикулярных оптической оси, а поверхность кристалла перпендикулярна этой оси. Тогда, как показано в [8], при падении волны на кристалл, векторы S и k для необыкновенной волны лежат по разные стороны от нормали к поверхности. Такое расположение вектора Пойнтинга принципиальную S волнового вектора k дает возможность фокусировки И электромагнитного пучка при преломлении на плоской границе кристалла [9]. В связи с этим несомненный интерес вызывает экспериментальное исследование оптических свойств тех природных кристаллов, диэлектрическая постоянная которых обладает вышеуказанным свойством. Такими являются кристаллы MgF2 и TiO2 в оптической области частот [10].

В настоящей работе исследованы свойства отражения и фокусировки света плоскопараллельной пластиной кристалла MgF₂.

Фторид магния является хорошо изученным одноосным, положительно двулучепреломляющим кристаллом, оптически прозрачным в весьма широкой (0,11–7,5 мкм) спектральной области, и особенно востребован в ультрафиолетовой и вакуумноультрафиолетовой областях спектра в качестве окон, линз и поляризаторов. Отметим здесь, что вне области прозрачности данный кристалл считается полностью поглощающим и, видимо, поэтому в литературе нет данных о его оптических спектрах отражения.

Экспериментальная часть настоящей работы посвящена исследованию оптических спектров отражения от поверхности кристалла MgF₂ в инфракрасной области длин волн. Результаты измерений сравнены с расчетными результатами. При этом значения компонент тензора диэлектрической проницаемости при расчетах коэффициентов отражения нами были определены с использованием данных, приведенных в [10]. Сопоставление полученных кривых свидетельствует о наличии областей спектра, где компоненты тензора диэлектрической проницаемости имеют различные знаки и, следовательно, об открытом характере ПВВ у кристалла MgF₂.

Отметим, что кристаллы MgF₂ в исследуемой частотной области обладают поглощающей способностью. Наличие поглощения приводит к "замыканию" открытой в отсутствие поглощения ПВВ, однако вогнутый характер ПВВ, присущий открытым поверхностям вращения, сохраняется. Это и обеспечивает сохранение специфических оптических свойств, присущих данной среде, когда не учитывается поглощение. Подобную среду мы назовем средой с открытой ПВВ также при наличии поглощения, если только ПВВ имеет вогнутые области.

2. Измерения. Обсуждение

Измерения коэффициента отражения проводились на спектрофотометре "Specord" М-80 в спектральной области (200÷800) см⁻¹. Ориентированные образцы кристалла MgF₂ вырезались в форме плоскопараллельных пластин толщиной 1 мм. На рис.1 приведен частотный спектр коэффициента отражения в области от 200 до 800 см⁻¹ в случае, когда оптическая ось перпендикулярна поверхности кристалла и угол падения ϑ =20°. Штриховкой над осью частот показаны области, в которых $\varepsilon'_{\perp} < 0$, а под осью частот – области, в которых $\varepsilon'_{\parallel} < 0$ (ε_{\parallel} , ε_{\perp} – компоненты диэлектрического тензора вдоль оптической оси и в перпендикулярном направлении, соответственно).



Рис.1. Частотная зависимость коэффициента отражения для кристалла при угле падения ϑ =20°. Точками указаны экспериментальные значения, сплошная линия - расчетная кривая. Оптическая ось кристалла перпендикулярна его поверхности.

Рис.2. Частотная зависимость коэффициента отражения для кристалла при угле падения ϑ =70°. Точками указаны экспериментальные значения, сплошная линия -расчетная кривая. Оптическая ось кристалла перпендикулярна его поверхности.

На рис.2а,б представлены результаты, аналогичные рис.1, при угле падения 7°. В обоих случаях имеется удовлетворительное согласие между измеренными и расчетными значениями коэффициента отражения кристаллов MgF2. Рис.3 соответствует случаю, когда ϑ = 20°, а оптическая ось лежит в плоскости поверхности кристалла. При этом частота фиксирована, а угол ψ между оптической осью и линией пересечения поверхности кристалла с плоскостью падения меняется в пределах от 0 до $\pi/2$. Как видно из рис.3, экспериментальные и расчетные результаты не отличаются резко друг от друга. При этом, с увеличением ψ коэффициент отражения, в отличие от обычных сред с положительным ε' , убывает.



Рис.3. Зависимость коэффициента отражения *R* от угла ψ между оптической осью кристалла (лежащей в плоскости ее границы) и линией пересечения плоскости падения с поверхностью кристалла. Точками указаны экспериментальные значения, сплошная линия – расчетная кривая. Частота падающей волны $\omega = 500$ см⁻¹, $\varepsilon'_{\perp} = -3,7228$, $\varepsilon''_{\perp} = 1,28$, $\varepsilon'_{\parallel} = -2,7819$, $\varepsilon''_{\parallel} = 0,4937$.

На рис.4а приведена зависимость действительной части k'_e волнового вектора необыкновенной волны от направления распространения (оптическая ось кристалла параллельна оси *z*) [11], а на рис.4б показана та же зависимость для мнимой части (k''_e) . Параметры кристалла на частоте падающей волны $\omega = 270 \text{ см}^{-1}$ следующие: $\varepsilon'_{\perp} = -7,309$, $\varepsilon''_{\perp} = 0,998277$, $\varepsilon'_{\parallel} = 6,862$, $\varepsilon''_{\parallel} = 0,297$. Как видно из рисунков, поглощение действительно замыкает ПВВ, но остаются области с вогнутыми поверхностями, характерные для гиперболоида вращения.



Рис.4. Сечение поверхности волновых векторов однородных необыкновенных волн в кристалле плоскостью, проходящей через оптическую ось. Частота падающей волны $\omega = 270 \text{ см}^{-1}$, $\varepsilon'_{\perp} = -7,309$, $\varepsilon''_{\perp} = 0,998277$, $\varepsilon'_{\parallel} = 6,862$, $\varepsilon''_{\parallel} = 0,297$. k'_{ex} , k''_{ex} – действительная и мнимая части волнового вектора.

Нами была рассчитана задача фокусировки оптического излучения плоскопараллельной пластиной кристалла MgF₂ для частоты излучения $\omega = 450 \text{ см}^{-1}$, на которой $\varepsilon'_{\perp} < 0$, $\varepsilon'_{\parallel} > 0$. Расчет фокусировки основан на определении направления потока энергии в преломленной волне в зависимости от направления распространения падающей волны [10]. Пусть источник излучения находится на расстоянии h от поверхности кристалла, которая перпендикулярна оптической оси последнего. Из-за различия знаков ε'_{\perp} и ε'_{\parallel} луч, падающий на границу кристалла под углом α к нормали поверхности, преломляясь, идет в направлении к нормали [11] и пересекается с ней на расстоянии h от поверхности (рис.5). Отношение h/h определяется выражением

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{\cos\alpha} \cdot \frac{\left|\boldsymbol{\mathcal{E}}_{\scriptscriptstyle \rm I}\right|^2}{\left|\boldsymbol{\mathcal{E}}_{\scriptscriptstyle \perp}\right|^2} \cdot \left|\frac{\boldsymbol{\mathcal{E}}_{\scriptscriptstyle \perp}' \boldsymbol{m}_z' + \boldsymbol{\mathcal{E}}_{\scriptscriptstyle \perp}'' \boldsymbol{m}_z''}{\boldsymbol{\mathcal{E}}_{\scriptscriptstyle \rm I}'}\right|, \qquad m_z = \sqrt{\left(1 - \frac{\sin^2\alpha}{\boldsymbol{\mathcal{E}}_{\scriptscriptstyle \rm I}}\right) \cdot \boldsymbol{\mathcal{E}}_{\scriptscriptstyle \perp}},$$

где $h_{\rm L}$ фактически является фокусным расстоянием данной плоской линзы. На рис.6 приведена расчетная зависимость отношения $h_{\rm L}/h_{\rm L}$ от величины угла (при следующих значениях величин: $\omega = 450$ см⁻¹, $\varepsilon'_{\perp} = 0,042624$, $\varepsilon''_{\perp} = 19,825$, $\varepsilon'_{\rm II} = -7,649$, $\varepsilon''_{\rm II} = 1,90067$. Как видно из рисунка, в угловом интервале от нуля до 0,1 радиан изменение величины $h_{\rm L}$ составляет порядка 10⁻³, что указывает на достаточно высокое качество фокусировки.



Рис.5. Фокусировка пучка, падающего из точечного источника на плоскую границу кристалла. \mathbf{k} и \mathbf{S} – соответственно, направления фазовой скорости и распространения энергии в кристалле.

Рис.6. Зависимость h/h от угла падения. Параметры кристалла: $\mathcal{E}'_{\perp} = 0,042624, \mathcal{E}''_{\perp} = 19,825, \mathcal{E}'_{\parallel} = -7,649, \mathcal{E}''_{\parallel} = 1,90067,$ частота падающей волны $\omega = 450$ см⁻¹.

Таким образом, полученные в настоящей работе экспериментальные данные подтверждают присутствие отрицательной компоненты у кристалла MgF₂ и, следовательно, открытый характер его ПВВ для необыкновенной волны. При этом, зарегистрированная величина коэффициента отражения в ИК полосах поглощения кристалла может достигнуть

достаточно высоких значений, порядка R = 0,9. Имеет место также фокусировка расходящегося из точечного источника пучка при его преломлении на плоской границе кристалла MgF₂.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. J.B.Pendry, A.J.Holden, W.J.Stewart, J.Youngs. Phys. Rev. Lett., 76, 4773 (1996).
- 2. D.R.Smith, W.J.Padilla, D.C.Vier, S.C.Nemat-Nasser, S.Schultz. Phys. Rev. Lett., 84, 4184 (2000)
- 3. В.Г.Веселаго. УФН, 172, 1215 (2002).
- 4. J.B.Pendry. Phys. Rev. Lett., 85, 3966 (2000).
- 5. J.B.Brock, A.A.Houck, I.L.Chuang. Appl. Phys. Lett., 85, 2472 (2004).
- 6. **В.Г.Веселаго**. УФН, **87**, 517 (1967).
- 7. G.Parazzoli, R.B.Greegor, K.Li, B.E.C.Koltenbah, and M.Tanielian. Phys. Rev. Lett., 90, 107401 (2003).
- 8. О.С.Ерицян. Кристаллография, 23, 461 (1978).
- 9. О.С.Ерицян. Изв. НАН Армении, Физика, **39**, 107 (2004).
- 10. В.В.Брыксин, Д.Н.Мирлин, И.И.Решина. ФТТ, 15, 1118 (1973).
- 11. О.С.Ерицян, О.М.Аракелян. Изв. НАН Армении, Физика, **38**, 312 (2003).

ԼՈՒՅՍԻ ԱՆԴՐԱԴԱՐՁՈՒՄԸ ԵՎ ՖՈԿՈՒՍԱՑՈՒՄԸ ԲԱՑ ԱԼԻՔԱՅԻՆ ՎԵԿՏՈՐՆԵՐԻ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹՈՎ ՄԻԱՌԱՆՑՔ ԲՅՈՒՐԵՂՒ ՀԱՐԹ ԶՈՒԳԱՀԵՌ ԹԻԹԵՂՈՎ

Հ.Ս. ԵՐԻՑՅԱՆ, Ա.Ա. ՊԱՊՈՅԱՆ, Ա.Ա. ԼԱԼԱՅԱՆ, Հ.Մ. ԱՌԱՔԵԼՅԱՆ, Ռ.Բ. ԿՈՍՏԱՆՅԱՆ

Բերված է անդրադարձման օպտիկական սպեկտրը MgF₂ բյուրեղի մակերևույթից համախությունների 200-800 սմ⁻¹ տիրույոում։ Բյուրեղի ալիքային վեկտորների մակերևույթի բաց բնույթի դեպքում չափման արդյունքները համնկնում են հաշվման արդյունքներին, համախությունների այն տիրույթում, որտեղ դիէլեկտրական թափանցելիության թենզորի կոմպոնենտներից մեկի իրական մասը բացասական է։ Հաշվված է օպտիկական մառագայթման ֆոկուսացման խնդիրը MgF₂ բյուրեղի թիթեղով, ω = 450 սմ⁻¹ համախության դեպքում։

LIGHT REFLECTION AND FOCUSING BY A PLANE-PARALLEL PLATE OF A UNIAXIAL CRYSTAL WITH OPEN SURFACE OF WAVE VECTORS

H.S. ERITSYAN, A.A. PAPOYAN, A.A. LALAYAN, H.M. ARAKELYAN, R.B. KOSTANYAN

The light reflection spectra from the surface of a MgF₂ crystal within the 200–800 cm⁻¹ frequency range are presented. The measured results agree with theoretical calculations for crystals with open surface of wave vectors within a range of frequencies where the real part of one of the components of the dielectric tensor is negative. The problem of optical radiation focusing by a plane-parallel plate of a MgF₂ crystal at the frequency $\omega = 450$ cm⁻¹ is calculated.