

предиктивного обслуживания, способные значительно повысить надежность и эффективность промышленного оборудования.

Список использованных источников

1. Петров А.Н., Петрова Е.В. Применение нейронных сетей для диагностики электромеханических систем // Инженерный вестник. – 2020. – № 5. – С. 45–54.

2. Сидоров И.К. Автоматизация распознавания дефектов оборудования электрических сетей с помощью искусственных нейронных сетей // Электротехника. – 2019. – № 12. – С. 28–34.

3. Tamilselvan, P., Wang, P. Failure diagnosis using deep belief learning based health state classification // Reliability Engineering & System Safety. – 2013. – Vol. 115. – P. 124–135.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № T25УЗБ-024).

УДК 53:378.147.091.32

**Соболь¹ В.Р., д.ф.-м.н., профессор, Михалкович¹ О.М., к.ф.-м.н.,
Барайшук² С.М., к.ф.-м.н., доцент**

*¹Белорусский государственный педагогический университет
имени Максима Танка, г. Минск*

*²Белорусский государственный аграрный технический университет,
г. Минск*

МАГНИТОАНИЗОТРОПНЫЕ СРЕДЫ В ЯВЛЕНИИ ДВОЙНОГО ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА

Солнечная энергетика занимает важное место в обеспечении электрической энергией объектов АПК, особенно достаточно уделенных от линий электропередач. Фундаментальная подготовка как самих специалистов энергетиков, так и тех, кто сможет их обучить представляется не менее важным процессом. Традиционное представление раздела общей физики по профилю волновой оптикой включает явление двойного преломления света. Эффекты Фарадея, Коттона-Мутона реализуемые в присутствии внешнего магнитного поля зиждятся на антисимметрии тензора магнитной проницаемости. Непосредственно магнитная проницаемость, как характери-

стика среды, равноправно присутствует в выражении для показателя преломления, что говорит о возможности реализации сред с анизотропией и двойным преломлением линейного поляризованной волны наподобие эффектов в широко известных кристаллическом кварце, исландском шпате, когда при нормальном падении луча лазера на плоскопараллельную пластинку луч вопреки закону Снеллиуса раздваивается. Соответственно, развитие физического материаловедения по синтезу сложных по составу и структуре электромагнито-упорядоченных материалов типа феррита висмута, твердых растворов на его основе, в том числе, способствует постановке вопросов по линейному двупреломлению магнитной природы [1–3]. Проанализирована ситуация распространения плоско-поляризованной волны то есть вид ее закона дисперсии в кристаллической среде, которая анизотропна по магнитной проницаемости (например, гипотетический магнетик низкой симметрии типа триглицин-сульфата, содержащий в кристаллической решетке магнитные ионы из ряда переходных элементов групп железа, лантана). В принятом приближении среда характеризуется шаровым тензором диэлектрической и ортогональным симметричным тензором магнитной проницаемости (1).

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon \end{pmatrix} \quad \hat{\mu} = \begin{pmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} & \mu_{xz} \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} & \mu_{yz} \\ \mu_{zx} & \mu_{zy} & \mu_{zz} \end{pmatrix} \quad (1)$$

При рассмотрении в формате системы единиц СИ применены известные материальные соотношения связи между компонентами векторов электрической и магнитной индукции (\vec{D} и \vec{B}) и напряженности (\vec{E} и \vec{H}) поля волны (2), (3):

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

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

На основе соотношений Максвелла исходное тензорное уравнение для закона дисперсии плоско-поляризованной волны в рассматриваемом случае выглядит (4)

$$-\nabla \times \hat{\mu}^{-1} \nabla \times \vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \mu_0 \vec{D} \quad (4)$$

Конкретнее, в базисе ортов i, j, k выбранной системы координат, отвечающей поверхности кристаллической среды (граница раздела

совпадает с плоскостью xz , плоскость падения xy) при преломлении плоско-поляризованной волны элементы уравнения (4) в самом общем случае ориентации векторов \vec{D} и \vec{k} подчиняются стандартным соотношениям (5), (6), (7), (8).

$$\vec{D} = (D_x i + D_y j + D_z k) e^{i(\omega t - \vec{k}\vec{r})} \quad (5)$$

$$\vec{k}\vec{r} = k_x x + k_y y + k_z z \quad (6)$$

$$\frac{\partial D_x}{\partial x} = -i k_x D_x e^{i(\omega t - \vec{k}\vec{r})} \quad (7)$$

$$\frac{\partial D_x}{\partial y} = -i k_y D_x e^{i(\omega t - \vec{k}\vec{r})} \quad (8)$$

Следуя (5-8) соотношение (4) может быть приведено к виду (9)

$$-\nabla \times (\hat{\mu}^{-1} \nabla \times [i(\varepsilon_{xz}^{-1} D_l) + j(\varepsilon_{yl}^{-1} D_l) + k(\varepsilon_{zl}^{-1} D_l)]) = i^{-1} \varepsilon_0 \mu_0 \ddot{\vec{D}}$$

После раскрытия внутреннего векторного произведения тензорное уравнение (9) записывается в расширенном виде (10)

$$\begin{aligned} \nabla \times \{ & i[\mu_{xx}^{-1}(\varepsilon_{zl}^{-1} D_l k_y - \varepsilon_{yl}^{-1} D_l k_z) + \mu_{xy}^{-1}(\varepsilon_{zl}^{-1} D_l k_z - \\ & \varepsilon_{zl}^{-1} D_l k_x) + \mu_{xz}^{-1}(\varepsilon_{yl}^{-1} D_l k_x - \varepsilon_{xl}^{-1} D_l k_y)] + j[\mu_{yx}^{-1}(\varepsilon_{zl}^{-1} D_l k_y - \\ & \varepsilon_{yl}^{-1} D_l k_x) + \mu_{yy}^{-1}(\varepsilon_{xl}^{-1} D_l k_x - \varepsilon_{xl}^{-1} D_l k_z) + \mu_{yz}^{-1}(\varepsilon_{yl}^{-1} D_l k_x - \\ & \varepsilon_{xl}^{-1} D_l k_y)] + k[\mu_{zx}^{-1}(\varepsilon_{zl}^{-1} D_l k_y - \varepsilon_{yl}^{-1} D_l k_z) + \mu_{zy}^{-1}(\varepsilon_{xl}^{-1} D_l k_x - \\ & \varepsilon_{zl}^{-1} D_l k_x) + \mu_{zz}^{-1}(\varepsilon_{yl}^{-1} D_l k_x - \varepsilon_{xl}^{-1} D_l k_y)] \} = i^{-1} \varepsilon_0 \mu_0 \ddot{\vec{D}} \end{aligned} \quad (10)$$

Соотношение (10) через соответствующую систему уравнений позволяет получить закон дисперсии поперечной электромагнитной волны при двух характерных типах ее линейной поляризации. Для поляризации вектора \vec{D} нормально плоскости падения (xy) закон дисперсии можно представить как (11)

$$k_z^{-2} \varepsilon_0 \mu_0 \omega^2 - \varepsilon_{zz}^{-1} (\mu_{xx}^{-1} \cos^2 \psi + \mu_{yy}^{-1} \sin^2 \psi) + \varepsilon^{-1} (\mu_{xy}^{-1} + \mu_{yx}^{-1}) \sin \psi \cos \psi \quad (11)$$

Для поляризации волны по вектору \vec{D} в плоскости падения (xy) закон дисперсии отвечает выражению (12)

$$k_{xy}^{-2} \varepsilon_0 \mu_0 \omega^2 = \mu_{zz}^{-1} \varepsilon^{-1} \quad (12)$$

Заключение. Таким образом, соотношения (11) и (12) показывают, что магнитная анизотропия свойств в представлении ортогонального симметричного тензора второго ранга может привести к появлению двойного лучепреломления. А именно, волна поляризо-

ванная в плоскости xy имеет волновой вектор не зависящий от угла преломления, что отвечает типу обыкновенной, у которой сечение волновой поверхности сфера. Волна, поляризованная нормально к плоскости падения (xz) имеет волновой вектор, а именно показатель преломления как характеристику, зависящую от угла преломления ψ . При антисимметрии тензора магнитной проницаемости рассматриваемая волна будет также обыкновенной, если диагональные компоненты μ_{ii} равны.

Список использованных источников

1. Кринчик Г.С. Физика магнитных явлений. / Г.С. Кринчик. – М.: Изд-во МГУ. 1985. – 336 с.
2. Hornreich W.F. Possibility of visual observation of antiferromagnetic domains / W.F. Hornreich, S. Shtrikman // Phys. Rev. – 1968. – V. 171, № 3. – P. 1065 – 1074.
3. Смоленский Г.А. Сегнетомагнетики / Г.А. Смоленский, И.Е.Чупис // УФН. 1982. – Т. 137, № 3. – С. 415–448.

УДК 621.793.184

Михалкович¹ О.М., к.ф.-м.н, Куликаускас² В.С., к.ф.-м.н. ВНС,
Барайшук³ С.М., к.ф.-м.н., доцент

¹Белорусский государственный педагогический университет
имени Максима Танка, г. Минск,

²«Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына» Москва,

³Белорусский государственный аграрный технический университет,
г. Минск

ГЛУБИННОЕ ПРОНИКНОВЕНИЕ В ПОДЛОЖКУ Si КОМПОНЕНТОВ МОЛИБДЕНОВОЙ ПЛЕНКИ ПРИ ЕЕ ФОРМИРОВАНИИ КАТОДНЫМ ВАКУУМНЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ С ИОННЫМ АССИСТИРОВАНИЕМ

Катодное вакуумное распыление в сочетании с ассистированием ионами осаждаемого металла является очень эффективным методом получения композиционных покрытий [1]. Известно, что образующиеся при этом силициды переходных металлов, обладая низким электрическим сопротивлением, используются в микро-