

## Одностороннее прохождение при распространении волны вдоль границы раздела анизотропных сред

А.Д. Архипов\*, К.А. Вытовтов

Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара,  
пр. Гагарина, 72, 49050 Днепропетровск, Украина

(Получено 24.01.2012, опубликовано online 04.06.2012)

В работе исследуется прохождение волны вдоль границы раздела анизотропной и изотропной сред. Показано, что возможны условия, при которых волна с минимальными отражениями проходит в одном направлении и не проходит в противоположном. При этом можно добиться отсутствия преобразования поляризации проходящего излучения.

Ключевые слова: Слоистые среды, невзаимное прохождение, анизотропия, матрица преобразования.

PACS numbers: 42.25.Gy, 42.70.Qs

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Задача одностороннего прохождения сигнала является актуальной в радиофизике уже более ста лет [1]. Одним из первых устройств в радиодиапазоне был Эдиссоновский детектор [1]. Позднее появились вентили высокочастотного диапазона: резонансные, со смещением поля, Фарадеевы вентили [2]. Эти вентили и сегодня используются в современных СВЧ-устройствах.

В оптическом диапазоне используются вентили как на изотропных, так и на анизотропных материалах. Изотропные вентили [3] широко распространены в оптоэлектронике, однако для получения необходимых характеристик требуются структуры с большим (более 100) количеством слоёв. Среди анизотропных распространены вентили на основе эффекта Фарадея [2] и на основе эффектов Погкельса и Керра [4]. Основным недостатком таких вентилях является необходимость внешнего поля или генератора мощных световых импульсов (как затвора Дюге и Хансена). Одним из направлений исследования таких структур являются невзаимные эффекты в слоистых анизотропных средах [5]. Однако свойства слоистых анизотропных сред подробно описаны только для нормального падения волны [6-8]. Случай распространения плоской волны параллельно плоской анизотропной структуре изучался в работах [9, 10], в частности, были рассмотрены задачи отражения и прохождения, а также описан так называемый эффект втягивания. Показано, что для данного случая распространения волны в анизотропной среде существуют как нормальные, так и тангенциальные компоненты волнового вектора, следовательно, поверхностная волна будет возбуждать в структуре объёмную волну в анизотропной структуре.

В данной работе исследуются невзаимные свойства плоской слоистой анизотропной структуры с произвольным направлением оси анизотропии при тангенциальном распространении плоской гармонической волны. Рассмотрены четыре возможные направления падения волны, для них исследованы коэффициенты отражения. Отметим, что невзаимные свойства в данном случае обусловлены не эффектом Фарадея, а зависимостью коэффициента отражения от

угла между осью анизотропии и волновым вектором. Полученные результаты предложено использовать для построения вентиля ближнего ИК диапазона.

### 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе исследуется распространение плоской гармонической волны параллельно границе раздела анизотропной слоистой среды с произвольным направлением оси анизотропии (рис. 1).

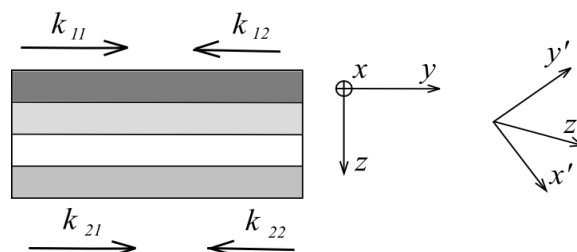


Рис. 1 – К постановке задачи

На рисунке ось анизотропии в анизотропном материале направлена вдоль оси  $Oz'$  системы координат  $x'y'z'$ , ось  $Oz'$  системы координат  $xuz$  нормальна к плоскости пластины. Возможные направления векторов падающих волн обозначим как  $k_{11}$ ,  $k_{12}$ ,  $k_{21}$ ,  $k_{22}$ . Угол наклона оси анизотропии относительно нормали к поверхности структуры обозначим как  $\theta$ , угол между плоскостью падения и плоскостью, содержащей ось анизотропии — как  $\psi$ .

Слои структуры, описываются тензорами диэлектрической и магнитной проницаемости в гиротропной форме, и в системе координат  $x'y'z'$  имеют вид

$$\varepsilon = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & j\varepsilon_{xy} & 0 \\ -j\varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{vmatrix} \quad (1)$$

$$\mu = \begin{vmatrix} \mu_{xx} & j\mu_{xy} & 0 \\ -j\mu_{xy} & \mu_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{zz} \end{vmatrix}$$

\* vytovtov@hotmail.ru

В работе исследуется прохождение и отражение излучения в анизотропных слоистых средах при распространении излучения параллельно границе раздела сред. Для расчётов использованы методы  $4 \times 4$  матрицы преобразования и  $2 \times 2$  матрицы прохождения и отражения, описанные в работах [11, 12]. При расчётах отражения и прохождения также учитывалась частотная дисперсия и потери в материалах.

### 3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ОПИСАНИЕ И АНАЛИЗ

В ходе работы была изучена зависимость коэффициентов отражения электромагнитной волны от угла наклона оси анизотропии, угла между плоскостью падения и плоскостью, содержащей ось анизотропии и частоты, как для однородной пластины, так и для многослойной.

В результате исследования коэффициентов отражения от частоты для однородных структур получено множество характеристик, одна из которых представлена на рис. 2 для пластины с параметрами  $\epsilon_{xx} = 5$ ,  $\epsilon_{xy} = 1,3$ ,  $\epsilon_{zz} = 0,99$ ,  $\mu_{xx} = 2$ ,  $\mu_{xy} = 1,1$ ,  $\mu_{zz} = 0,99$ ,  $\Theta = 45^\circ$ ,  $\Psi = 15^\circ$  для различных направлений падения волны. Данная зависимость иллюстрирует невзаимные свойства среды.

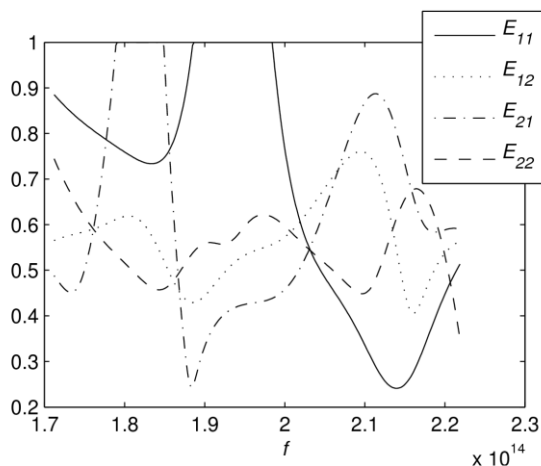


Рис. 2 – Коэффициент отражения излучения от пластины анизотропного материала при различных направлениях прохождения

Так, на частотах от 190 до 200 ТГц наблюдается эффект полного внутреннего отражения волны  $k_{11}$ , волны  $k_{12}$  и  $k_{22}$  имеют коэффициент отражения, равный 0.5, и волна  $k_{21}$  – 0.8. Невзаимные свойства распространения излучения в анизотропной среде обусловлены зависимостью свойств среды от направления распространения волны.

Также в работе исследовались зависимости коэффициентов отражения от частоты для различных направлений распространения излучения для многослойных анизотропных пластин. На рис. 3 показана одна из характеристик для структуры (2) Описываемая слоистая среда состоит из трёх типов слоёв. Один обозначим как  $L1$ , он имеет следующие компоненты тензоров:  $\epsilon_{xx} = 5$ ,  $\epsilon_{xy} = 1,3$ ,  $\epsilon_{zz} = 0,99$ ,  $\mu_{xx} = 2$ ,  $\mu_{xy} = 1,1$ ,  $\mu_{zz} = 0,99$ , второй как  $L2$  с компонентами

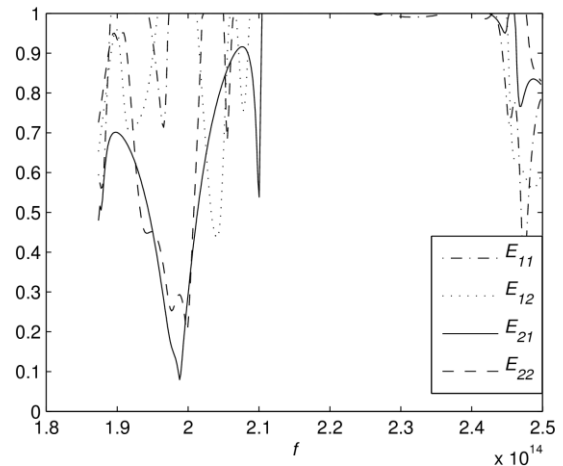


Рис. 2 – Коэффициент отражения излучения от слоистой анизотропной структуры (3) при различных направлениях прохождения

тензора:  $\epsilon_{xx} = 5$ ,  $\epsilon_{xy} = 1,3$ ,  $\epsilon_{zz} = 0,99$ ,  $\mu_{xx} = 2$ ,  $\mu_{xy} = 1,1$ ,  $\mu_{zz} = 0,99$ , и третий —  $L3$ , его компоненты:  $\epsilon_{xx} = 5$ ,  $\epsilon_{xy} = 1,3$ ,  $\epsilon_{zz} = 0,99$ ,  $\mu_{xx} = 2$ ,  $\mu_{xy} = 1,1$ ,  $\mu_{zz} = 0,99$ . Ось анизотропии ориентирована к нормали структуры под углом  $\Theta = 45^\circ$ , угол к плоскости падения  $\Psi = 15^\circ$  для всех пластин. Толщины слоёв равны 24,5, 19,5 и 26,5 мкм для  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$  соответственно. Полученная 24-х слойная структура формально записывается как

$$(L1 + L2 + L2) \times 6 + L1 + L2 + L4 + L3 + L4 + L3 \quad (2)$$

где  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$  – слои, состоящие из материала  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$  с указанной выше толщиной,  $L4$  – слой материала  $L3$  с толщиной 31,8 мкм.

Как видно из характеристики, представленной на рис. 3, на частотах 170 – 195 ТГц коэффициент отражения волны  $k_{21}$  равен 0.9, волны  $k_{22}$ , – 0.7. Волны  $k_{11}$  и  $k_{12}$  полностью отражаются. Полученные АЧХ для волн  $k_{21}$  и  $k_{22}$  имеют коэффициент неравномерности 0.3 и 0.15 соответственно, коэффициент прямоугольности по уровню 0.7-0.35 и 0,2. Полученные характеристики могут быть улучшены путём оптимизации параметров структуры.

Кроме того, возможно узкополосное пропускание. Для этого можно взять 8-ми слойную структуру(3),

$$(L1 + L2 + L2) \times 4 \quad (3)$$

в которой толщины слоёв  $L1$  и  $L2$  равны 97,9 и 77,8 мкм соответственно. Отражение от такой структуры показано на рис. 4. На частотах 205-207 ТГц коэффициент отражения волны  $k_{11}$  равен 0,15. Волны  $k_{21}$   $k_{22}$  и  $k_{12}$  полностью отражаются. АЧХ для волн  $k_{11}$  имеет коэффициент неравномерности 0.1, коэффициент прямоугольности по уровню 0.7-0,1.

На основании результатов работы сделан вывод, что анизотропные структуры могут обеспечивать различное прохождение излучения с одной стороны среды на другую для разных направлений излучения и полное задержание при обратном прохождении. Полученные невзаимные свойства обусловлены особенностями прохождения излучения через анизотропные слои. Многократные переотражения и наложения волн в слоистой среде позволяют формировать требуемые в конкретных задачах АЧХ.

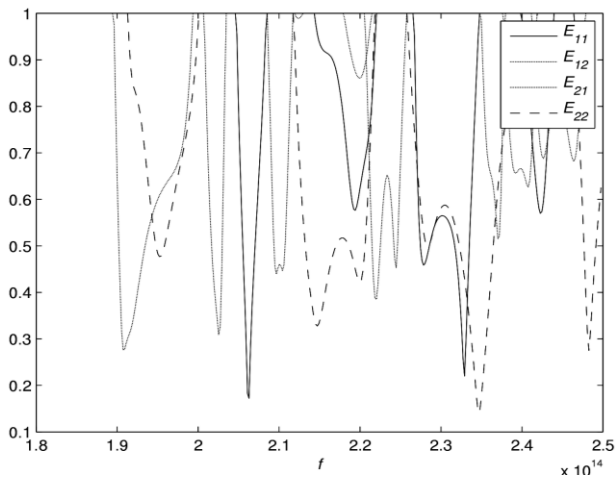


Рис. 3 – Коэффициент отражения излучения от слоистой анизотропной структуры (3) при различных направлениях прохождения

#### 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

В результате численных расчётов исследованы невзаимные структуры, которые при продольном распространении излучения хорошо пропускают его с одной стороны пластины и полностью запирает в обратном направлении. Такие структуры могут использоваться как вентили в линиях передачи для поглощения отражённых волн, для согласования передатчиков и приёмников с линией и пр. Для использования структуры (2) в качестве вентиля следует пропускать излучение в направлении  $k_{21}$ , при этом благодаря полному отражению волн  $k_{11}$  и  $k_{12}$  обеспечивается отсутствие обратной связи. Для использования структуры (3) следует пропускать излучение в направлении  $k_{11}$ , при этом всё остальное излучение не

пропускается. Полученные вентили имеют большое отражение падающей волны в прямом направлении, но его можно уменьшить путём оптимизации параметров структуры. В отличие от распространённых на данный момент ферритовых вентиляей [3] предложенная структура полностью отсекает обратную волну. Это свойство обусловлено использованием невзаимных свойств анизотропных сред.

Также достоинством предложенного вентиля является использование втягивания в слоистую структуру тангенциальных волн, благодаря чему вентиль расположен параллельно направлению распространения излучения. Это значительно упрощает интеграцию прибора. Предложенная структура может быть использована в мультиплексорах оптических систем связи с уплотнением по длине волны стандартов CWDM и DWDM [14,15]. Предложенный вентиль соответствует требованиям действующих стандартов [16] и может быть использован для оптической развязки сигнала от нескольких источников.

#### 5. ВЫВОДЫ

В работе проведён численный эксперимент, в результате которого получены зависимости коэффициентов отражения от угла наклона оси анизотропии, угла между плоскостью падения волны и плоскостью, содержащей ось анизотропии и частоты для однослойных и многослойных структур. Приведены и описаны графики зависимости коэффициента отражения от частоты для однослойной и многослойных структур. Предложено использование многослойных структур в качестве вентиляей с полной отсечкой обратной волны.

### One-way Penetration of the Boundary Wave in Anisotropic Structures

A.D. Arkhipov, K.A. Vytovtov

*Dnepropetrovsk National University, 72, Gagarina ave., 49050 Dnepropetrovsk, Ukraine*

One-way penetration of the boundary wave in single-layer and multilayer anisotropic structures is investigated. We show that the conditions for minimal wave reflection from one side and full wave reflection from another side of the structure are possible. No conversion of polarization can be obtained for the considered effect.

**Keywords:** Layered structures, Nonreciprocal transmission, Anisotropy, Translation matrix.

### Односторонне проходження при розповсюдженні хвилі уздовж границі розділу анізотропних середовищ

А.Д. Архіпов, К.А. Витовтов

*Дніпропетровський національний університет, пр. Гагаріна, 72, 49050, Дніпропетровськ, Україна*

У роботі описується проходження хвилі вздовж границі розділу анізотропної та ізотропної серед. Показано, що можливі умови, при яких хвиля з мінімальним відбиттям проходить в одному напрямі та не проходить у іншому. При цьому можна створити умови, у яких відсутнє перетворення поляризації вхідного випромінювання.

**Ключові слова:** Шарові середовища, невзаємне проходження, анізотропія, матриця перетворення.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Т.А. Edison. Pat № 307031, publ. 15.11.1883.
2. A. Goldman, *Modern Ferrite Technology* (Springer: 2nd ed.: 2005).
3. M.A. Unger, Hou-Pu Chou, T. Thorsen, *Science* **288**, 113 (2000).
4. А.С. Сонин, А.С. Василевская, *Электрооптические кристаллы* (Москв: Атомиздат: 1971).
5. А.А. Геворгян, *ЖТФ* **75** No 5, 96 (2005) (A.A. Gevorgyan, *Tech. Phys.* **50**, 625 (2005)).
6. A.A. Chabanov, *Frontiers in Optics*, OSA Technical Digest (CD), paper FTThI4 (Optical Society of America, 2007).
7. E. Cojocaru, *Appl. Opt.* **39**, 4641 (2000).
8. Z. Hu, d. Liu, a. Yan, *Photorefractive Effects, Materials, and Devices*, G. Zhang, D. Kip, D. Nolte, and J. Xu, eds., Vol. 99 of OSA Trends in Optics and Photonics, paper 475 (Optical Society of America, 2005).
9. K.A. Vytovtov, S.A. Volkova, Y.S. Tarasenko, *ММЕТ*, 1 (Odesa: 2010).
10. K.A. Vytovtov, A.D. Arkhipov *J. Nano- Electron. Phys.* **1** No4, 81 (2009).
11. D.W. Berreman, *J. Opt. Soc. Am.* **62**, 502 (1972).
12. S. Teitler, B.W. Hennis, *J. Opt. Soc. Am.* **60**, 830 (1970).
13. J.D. Joannopoulos, S.G. Johnson, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* (Princeton NJ: Princeton University Press: 2008).
14. ITU-T Rec G.694.2.
15. ITU-T Rec G.694.1.
16. ITU-T Rec G.671.