

**К. А. Вытовтов, А. Д. Архипов**

*Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара*

*72, пр. Гагарина, Днепропетровск, 49010, Украина*

E-mail: [vytovtov\\_konstan@mail.ru](mailto:vytovtov_konstan@mail.ru)

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОГО ПОЛОСОВОГО ФИЛЬТРА ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА С ВЕНТИЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Предложен управляемый полосно-пропускающий фильтр терагерцевого (ТГц) диапазона с вентиляльными свойствами на основе неоднородной анизотропной структуры. С этой целью исследована зависимость отражающих свойств анизотропных слоистых сред в ТГц диапазоне от частоты, величины и направления магнитного поля. На основании полученных результатов предложена слоистая структура с произвольными углом падения и ориентацией оси анизотропии. Для получения наиболее приемлемых параметров устройства здесь также решалась задача оптимизации. Актуальность темы обусловлена прежде всего быстрым развитием систем связи ТГц диапазона. В этой связи немаловажна разработка управляемых устройств и уменьшение их габаритных размеров. Таким образом, полученные результаты представляются интересными для использования в современных системах связи. Методы расчета, используемые в данной работе, являются полностью аналитическими и могут без каких-либо ограничений использоваться в изучаемом диапазоне частот. В задаче оптимизации выбор методов Монте-Карло и Ньютона обусловлен многоэкстремумным характером частотно-угловой зависимости коэффициента отражения анизотропных слоистых структур. Ил. 4. Библиогр.: 15 назв.

**Ключевые слова:** терагерцы, антиферромагнетик, слоистые среды, управляемый фильтр, вентиль.

Терагерцевый (ТГц) диапазон частот является объектом активных исследований в последнее десятилетие [1], хотя отметим, что одни из ранних исследований в этом диапазоне были проведены еще в 1960-х гг. [2] и обусловлены появлением первых приемников и передатчиков специального назначения. На сегодняшний день разработка новых устройств ТГц диапазона является достаточно широким направлением, объединяющим множество разнообразных научно-технических задач, и разработка управляемых частотно-избирательных устройств ТГц диапазона представляет собой одну из важных задач этого направления. Разработке именно такого устройства и посвящена данная работа.

Наиболее распространенными материалами для построения управляемых устройств в ТГц диапазоне, таких как фильтры, вентили, фазовращатели, являются анизотропные материалы [2]. Отметим что, они позволяют создавать также и избирательные по углам падения устройства [3].

В настоящей работе рассчитывается фильтр на основе неоднородного анизотропного материала. Особенностью предлагаемого фильтра, кроме возможности управления магнитным полем, являются его невзаимные свойства, а именно в полосе пропускания для прямого направления прохождения в обратном направлении прохождения отсутствует. Таким образом, мы предлагаем устройство, представляющее собой одновременно и управляемый фильтр, и вентиль.

Оптимизация параметров слоистых структур и устройств на их основе является важной практической задачей [3–5]. Одной из первых работ, посвященных автоматизации синтеза изотропных слоистых сред, в которой процесс синтеза полностью автоматизирован, является статья [6].

Современные работы, например [6–8], предлагают методы синтеза слоистых сред, основанные на преобразовании Фурье [6], комплексные методы, основанные на стохастических и эквивалентных принципах [7], также исследуются методы минимизации дефектов производства на свойства слоистых сред [8]. На сегодняшний день большинство методик оптимизации разработано и протестировано для синтеза изотропных слоистых сред. Вопросы оптимизации анизотропных слоистых сред, хотя и являются актуальными, исследованы не так широко, следовательно, результаты этой части работы также представляют практический интерес.

**1. Постановка задачи.** Нами прежде всего рассмотрено отражение плоской электромагнитной волны от слоистой анизотропной среды с произвольным направлением оси анизотропии антиферромагнетика при произвольном угле падения этой волны. Геометрия рассматриваемой задачи представлена на рис. 1.

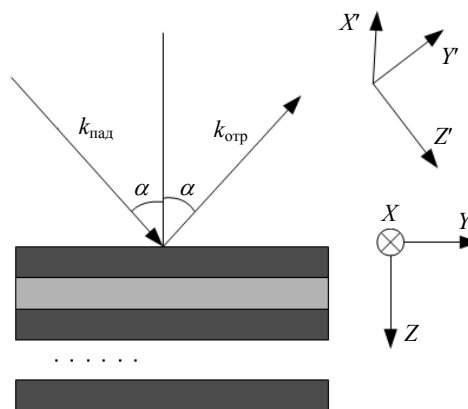


Рис. 1. Геометрия рассматриваемой задачи

Здесь  $k_{\text{пад}}$ ,  $k_{\text{отр}}$  – направление падения и отражения волны соответственно;  $XYZ$  – система координат, связанная с нормалью к границам раздела;  $X'Y'Z'$  – система координат, связанная с осью анизотропии (направлением магнитного поля)  $Z'$ . Другими словами, ось анизотропии  $Z'$  имеет произвольный угол наклона и эта ось не находится в плоскости падения. Исследуемая структура состоит из слоев антиферромагнетика с произвольным направлением оси анизотропии и изотропного диэлектрика. Свойства антиферромагнетика описываются тензором магнитной проницаемости в гиротропной форме [9, 10]

$$\mu = \begin{pmatrix} \mu_{xx} & j\mu_{xy} & 0 \\ -j\mu_{xy} & \mu_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{zz} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

В работе учитывается частотная дисперсия свойств слоев и потери в среде, соответственно, компоненты в тензоре (1) – комплексные величины. Тангенс угла потерь в рабочей области приблизительно равен 0,001. Зависимости компонент тензора от частоты с учетом потерь для  $\text{FeF}_2$  представлены на рис. 2.

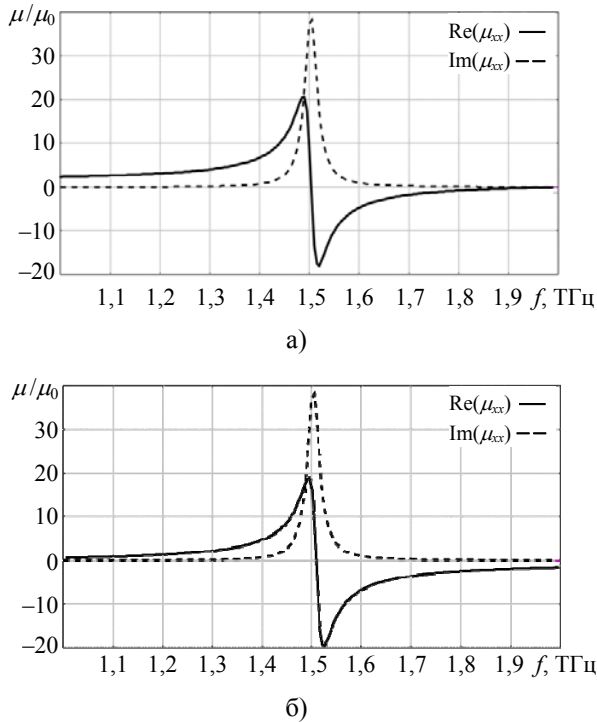


Рис. 2. Зависимость действительной и мнимой частей компонент  $\mu_{xx}$  (а) и  $\mu_{xy}$  (б) тензоров магнитной проницаемости от частоты

Целью работы является разработка управляемого устройства ТГц диапазона, включающего в себя управляемый полосовой фильтр и вентиль на основе одной структуры. Для этого исследуется зависимость коэффициента отраже-

ния слоистой структуры от частоты, а также направления и величины внешнего магнитного поля.

**2. Метод исследования.** Для исследования в работе случае используются аналитические методы:  $4 \times 4$  матрицы преобразования [11] и  $2 \times 2$  матрицы отражения [12]. В соответствии с методом [11] матрица преобразования  $\mathbf{M}$  связывает тангенциальные компоненты полей на обеих границах плоскопараллельной пластины. Этот метод является широко распространенным в электродинамике и в [11] представлен для наиболее общего случая анизотропной среды. Однако он использовался и ранее для изучения свойств более простых случаев изотропных слоистых структур [13].

Важно отметить, что для решения поставленной задачи параметры материалов (1) должны быть приведены в систему координат  $XYZ$  с помощью хорошо известного преобразования Эйлера [14], таким образом, нами рассматривается среда уже со всеми девятью ненулевыми компонентами тензора магнитной проницаемости [11].

$2 \times 2$ -матрицы отражения для  $TE$ - и  $TM$ -волны находится в соответствии с хорошо известным методом исходя из соотношений [12]

$$\begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ -\frac{1}{\rho} T_y \\ \frac{1}{\rho} T_x \end{pmatrix} = \mathbf{M} \times \begin{pmatrix} A_x + R_x \\ A_y + R_y \\ \frac{1}{\rho} (A_y - R_y) \\ \frac{1}{\rho} (A_{xy} - R_x) \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ -\frac{1}{\rho} T_y \\ \frac{1}{\rho} T_x \end{pmatrix} = \mathbf{M} \times \begin{pmatrix} A_x - R_x \\ A_y - R_y \\ \frac{1}{\rho} (A_y + R_y) \\ \frac{1}{\rho} (A_{xy} + R_x) \end{pmatrix}$$

для  $TE$ - и  $TM$ -волны соответственно. Здесь  $A_x$ ,  $A_y$  – нормированные тангенциальные компоненты падающей,  $T_x$ ,  $T_y$  – прошедшей и  $R_x$ ,  $R_y$  – отраженной волн;  $\mathbf{M}$  –  $4 \times 4$  матрица преобразования структуры;  $\rho$  – волновое сопротивление вакуума.

Для выбора требуемых параметров структуры в работе решалась задача оптимизации. Такими являются материальные параметры слоев, толщины слоев, ориентации оси анизотропии и порядка их следования для получения заданного коэффициента отражения. Целевая отражательная характеристика задана функционалом  $T(f)$ , а эффективность каждого шага оптимизационного процесса может быть рассчитана как [7]

$$F = \int_{f_1}^{f_2} (R(f) - T(f))^2 v(f) df, \quad (3)$$

где  $R(f)$  – полученная отражательная характеристика,  $\nu(f)$  – весовая функция, определяющая весимость рассматриваемого частотного диапазона.

При численном расчете частотную зависимость коэффициента отражения  $R(f)$  невозможно вычислить во всех точках заданного частотного диапазона, поэтому рационально выбрать конечное количество частот. В таком случае выражение (2) принимает вид

$$F = \sum_{i=1}^L \nu_i (R(f_i) - T(f_i))^2. \quad (4)$$

Задача поиска оптимальной структуры считается решенной в случае, когда  $F \leq \delta$ , где  $\delta$  – требуемая точность решения.

**3. Полученные результаты и обсуждение.** В ходе численного эксперимента проведены исследования зависимости коэффициента отражения от величины подмагничивающего поля для различных конфигураций анизотропных слоистых сред. Для исследования были выбраны структуры на основе антиферромагнетика  $\text{FeF}_2$  с параметрами, представленными в работе [15] (рис. 2) и изотропного диэлектрика  $\text{SiO}_2$ . Важно отметить, что  $\text{FeF}_2$  имеет частоту антиферромагнитного резонанса именно в исследуемом диапазоне частот, а именно 1,5 ТГц. Рассчитанная на основе этого вещества слоистая среда может эффективно управляться в диапазоне излучения мощных источников ТГц излучения, что позволяет использовать структуру в качестве фильтра в перспективных системах связи ТГц диапазона. Конечно же, материал имеет недостаток – низкую температуру Керра, однако при этом обладает малыми потерями в рассматриваемом диапазоне частот.

На рис. 3 представлены результаты численных расчетов частотной зависимости коэффициента отражения для 16-слойной структуры, составленной из чередующихся слоев  $\text{FeF}_2$  толщиной 0,067...0,15 мм и  $\text{SiO}_2$  толщиной 0,24 мм. Результаты соответствуют внешнему магнитному полю, направленному под углом  $10^\circ$  к поверхности структуры и падению  $TE$ -волны под углом  $45^\circ$ .

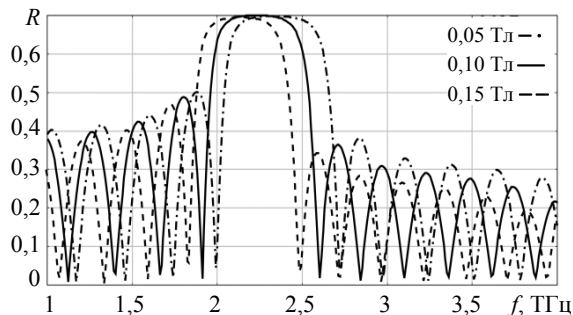


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента отражения для описываемой слоистой структуры и напряженности внешнего поля 0,05...0,15 Тл

Сплошной черной линией представлен график зависимости коэффициента отражения от частоты для магнитного поля 0,1 Тл. Полоса пропускания по уровню 0,5 при этом составляет 0,57 ТГц (1,96...2,53 ТГц). Уровень отсечки побочного излучения при этом 0,01...0,48. При изменении внешнего магнитного поля может осуществляться перестройка данного фильтра. Изменение величины подмагничивающего поля приводит к сдвигу полосы пропускания по частоте. Так, для поля 0,05 Тл это диапазон 2,04...2,65 ТГц, уровень отсечки побочного излучения – 0,45–0,03. Для поля 0,15 Тл это диапазон от 1,88...2,42 ТГц, уровень отсечки побочного излучения – 0,5–0,05. Таким образом, изменение магнитного поля в пределах 0,05...0,15 Тл приводит к изменению средней частоты в пределах 2,13...2,32 ТГц.

Отметим, что данное устройство является невязанным: при падении волны под углом  $-45^\circ$  на данную структуру коэффициент отражения в рабочей полосе частот не превышает 0,02. Это позволяет рассматривать данное устройство не только как управляемый фильтр, но и как вентиль ТГц диапазона. Другими словами, здесь предложено устройство, состоящее из двух элементов на одной анизотропной СВЧ-структуре. Такое решение позволяет проектировать более компактные устройства ТГц диапазона. Физически такое явление объясняется тем, что при падении волны под углом  $\alpha$  и под углом  $-\alpha$  угол между волновым вектором и осью анизотропии оказывается разным. Как следствие, разными будут волновые числа и компоненты полей этих волн. Очевидно, что разными оказываются коэффициенты отражения и прохождения для углов падения  $\alpha$  и  $-\alpha$ . Кроме того, в рассматриваемой структуре присутствует и эффект Фарадея, который также определяет вентильные свойства структуры.

Рассмотрим влияние угла наклона оси анизотропии на амплитудно-частотную характеристику фильтра. Нами были проведены исследования влияния угла наклона оси анизотропии на характеристики фильтра и в качестве примера представлен один из результатов (рис. 4).

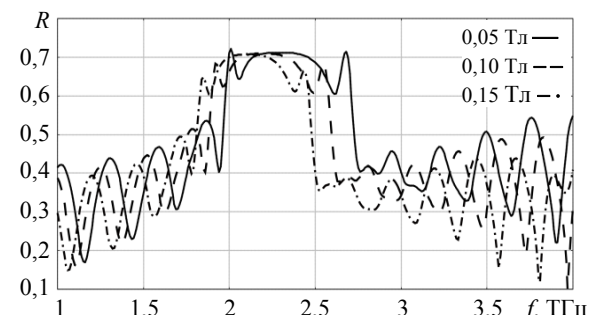


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента отражения описываемой структуры для измененной ориентации внешнего поля и напряженности внешнего поля 0,05...0,15 Тл

Здесь угол наклона оси  $15^\circ$ , полоса отражения по уровню 0,5 равна 0,61 ТГц, максимальный коэффициент отражения равен 0,71, уровень отсечки побочного излучения равен 0,35. Таким образом, увеличение угла наклона на  $5^\circ$  приводит к расширению полосы отражения сигнала в 1,1 раза, ослаблению отсечки побочного излучения до 35 раз, а также уменьшению коэффициента отражения в 1,13 раз.

Исходя из сказанного выше, данное устройство не может управляться механически посредством изменения направления магнитного поля.

**Выводы.** Приведены результаты исследований зависимости коэффициента отражения слоистой среды от частоты, направления и величины внешнего магнитного поля. С использованием методов оптимизации были выбраны параметры структуры, позволяющие использовать ее как управляемый полосовой фильтр ТГц диапазона, обладающий вентиляльными свойствами. Показано, что изменения величины магнитного поля на  $\pm 0,05$  Тл приводят к смещению средней частоты фильтра, однако изменения направления магнитного поля ведут к нарушению избирательных свойств коэффициента отражения от частоты. Полученная структура может найти свое применение в системах связи ТГц диапазона, как в передающей, так и в приемной части тракта.

#### Библиографический список

1. *Kleine-Ostmann T.* A review on terahertz communications research / T. Kleine-Ostmann, T. Nagatsuma // *J. of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves.* – 2011. – 32, iss. 2. – P. 143–171.
2. *Lee Yun-Shik.* Principles of terahertz science and technology / Yun-Shik Lee. – N. Y.: Springer Verlag, 2009. – 340 p.
3. *Design principles for infrared wide-angle perfect absorber based on plasmonic structure / Mingbo Pu, Chenggang Hu, Min Wang et al.* // *Opt. Express.* – 2011. – 19, iss. 18. – P. 17413–17420.
4. *Baumeister P.* Design of multilayer filters by successive approximations / P. Baumeister // *J. Opt. Soc. Am.* – 1958. – 48. – P. 955–958.
5. *Dobrowolski J. A.* Completely automatic synthesis of optical thin film systems / J. A. Dobrowolski // *Appl. Opt.* – 1965. – 4. – P. 937–946.
6. *Gradient-index optical filter synthesis with controllable and predictable refractive index profiles / Xinbin Cheng, Bin Fan, J. A. Dobrowolski et al.* // *Opt. Express.* – 2008. – 16. – P. 2315–2321.
7. *Tikhonravov A. V.* Modern design tools and a new paradigm in optical coating design / A. V. Tikhonravov, M. K. Trubetskov // *Appl. Opt.* – 2012. – 51, iss. 30. – P. 7319–7332.
8. *Tilsch M.* Optical Interference Coatings Design Contest 2004 / M. Tilsch, K. Hendrix, P. Verly // *Appl. Opt.* – 2006. – 45, iss. 7. – P. 1544–1554.
9. *Гуревич А. Г.* Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках / А. Г. Гуревич. – М.: Наука, 1973. – 592 с.
10. *Микаэлян А. Л.* Теория и применение ферритов на сверхвысоких частотах / А. Л. Микаэлян. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 664 с.
11. *Berreman D. W.* Optics in stratified and anisotropic media: 4x4 matrix formulation / D. W. Berreman // *J. Opt. Soc. Am.* – 1972. – 62, iss. 12. – P. 502–510.

12. *Teitler S.* Refraction in stratified anisotropic media / S. Teitler, B. W. Hennis // *J. Opt. Soc. Am.* – 1970. – 60, N 6. – P. 830–834.
13. *Борн М.* Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф; пер. с англ. под ред. Г. П. Мотулевич. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. – 1973. – 720 с.
14. *Лурье А. И.* Аналитическая механика / А. И. Лурье. – М.: Физматлит, 1961. – 824 с.
15. *Fourier Transform Spectroscopy of Magnetic Materials at Terahertz Frequencies / M. R. F. Jensen, S. A. Feiven, T. Dumelew et al.* // *Terahertz Science and Technology.* – 2009. – 2, N 4. – P. 105–119.

Рукопись поступила 07.11.2013.

К. А. Vytovtov, A. D. Arkhipov

#### THEORETICAL MODEL OF CONTROLLED FREQUENCY-TRANSMIT TERAHERTZ BAND FILTER WITH ISOLATOR PROPERTIES

Controlled frequency-transmit filter with isolator properties for terahertz band is presented in this work. The filter is based on non-homogeneous anisotropic structure. For this purpose the frequency, axis orientation and field value dependences are investigated for layered anisotropic structures. On the basis of the obtained results a layered structure with arbitrary axis orientation and arbitrary wave incidence is proposed. Optimization problem is solved for the acceptable characteristics obtaining. The theme is important because of fast terahertz telecommunications development. Thereby, development of controlled devices and their minimization is important. The obtained results may be useful for modern telecommunication systems. Calculation methods are fully analytical and may be used in any frequency region. Monte-Carlo and Newton optimization methods were chosen because the frequency-orientation characteristics of reflection coefficient of anisotropic layered structure are a multiextremal function.

**Key words:** terahertz, antiferromagnetic, layered media, controlled filter, isolator.

К. А. Витовтов, А. Д. Архипов

#### ТЕОРЕТИЧНА МОДЕЛЬ КЕРОВАНОВОГО СМУГОВОГО ФІЛЬТРА ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ З ВЕНТИЛЬНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Запропоновано керований смугопропускний фільтр терагерцового (ТГц) діапазону з вентиляними властивостями на основі неоднорідної анізотропної структури. З цією метою досліджено залежність відбивних властивостей анізотропних шаруватих середовищ у ТГц діапазоні від частоти, величини та напрямку магнітного поля. Базуючись на отриманих результатах, запропоновано структуру з довільними кутами падіння й орієнтацією вісі анізотропії. Для отримання найбільш прийнятних параметрів пристрою також розв'язувалась задача оптимізації. Актуальність теми зумовлена перш за все швидким розвитком ТГц систем зв'язку, саме тому особливу важливість отримує розробка керованих пристроїв та зменшення їх габаритних розмірів. Таким чином, отримані результати можуть бути цікавими для використання в сучасних системах зв'язку. Методи розрахунку, використані в роботі, повністю аналітичні та можуть бути використані у даному діапазоні частот без будь-яких обмежень. У задачі оптимізації вибір методів Монте-Карло та Ньютона зумовлено багатоекстремумним характером частотно-кутової залежності коефіцієнта відбиття анізотропних шаруватих структур.

**Ключові слова:** терагерци, антиферромагнетик, шаруваті середовища, керований фільтр, вентиль.