

**А. И. Толкачѳв** (ГГУ имени Ф. Скорины, Гомель)  
 Науч. рук. **В. Н. Капшай**, канд. физ.-мат. наук, доцент

## ДВА МЕТОДА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОБ ОТРАЖЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ОТ ДВУХСЛОЙНОЙ БИИЗОТРОПНОЙ СТРУКТУРЫ НА ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОДЛОЖКЕ

**Введение.** Использование биизотропных материалов по сравнению с диэлектриками позволяет существенно увеличить число варьируемых параметров в задаче создания новых многослойных покрытий, поскольку материальные уравнения в биизотропной среде принимают вид

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} + (\chi + i\alpha) \vec{H}, \quad \vec{B} = (\chi - i\alpha) \vec{E} + \mu \vec{H}. \quad (9)$$

Рассмотрим нормальное падение плоской циркулярно поляризованной электромагнитной волны на структуру, изображенную на Рис. 1, а, состоящую из биизотропных материалов. Ранее нами был найден коэффициент отражения от этой структуры матричным методом. Рассмотрим еще два способа его нахождения.

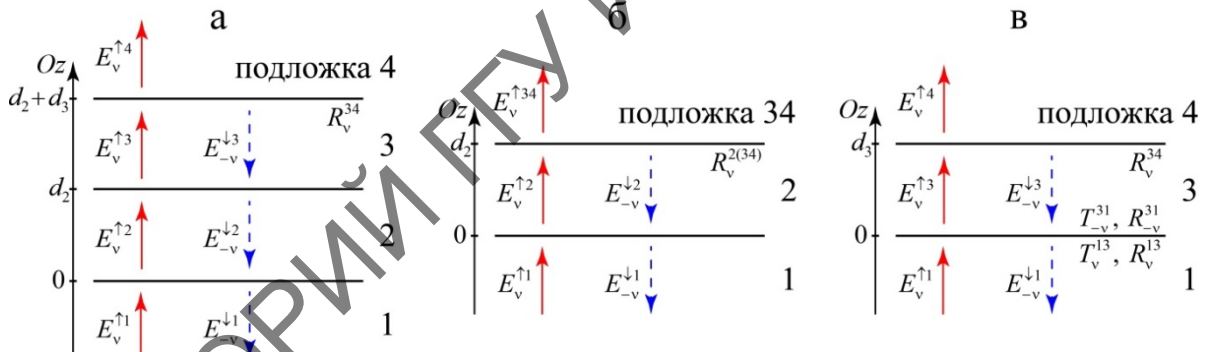


Рисунок 1 → а) Схема отражения волны от двухслойной биизотропной структуры 23 на отражающей подложке 4; б) Схема отражения волны от биизотропного слоя 2 на эквивалентной отражающей подложке 34; в) Схема отражения волны от биизотропного слоя 3 на отражающей подложке 4 с эквивалентными коэффициентами прохождения и отражения на границе 13.

**Рекуррентный метод.** Ранее нами был рассмотрен случай падения плоской электромагнитной волны из полубесконечной биизотропной среды 2 на биизотропный слой 3, находящийся на отражающей подложке 4 и найдено выражение для коэффициента отражения от такой структуры:

$$R_v^{2(34)} = \frac{(b_v^3 - b_v^2) + (b_{-v}^3 - b_{-v}^2) R_v^{34} \eta_v^3 \eta_{-v}^3}{(b_{-v}^2 - b_v^3) + (b_{-v}^2 - b_{-v}^3) R_v^{34} \eta_v^3 \eta_{-v}^3}. \quad (10)$$

Рассматриваемая структура (Рисунок 1, а) содержит слой 2 конечной толщины  $d_2$  и дополнительно полубесконечную среду 1. Используя выражение (2), можно заменить слой 3 на подложке 4 на эквивалентную подложку 34 с коэффициентом отражения на границе со слоем 2 равным  $R_v^{2(34)}$ . Такая структура представлена на рисунке. 1, б. Таким образом, снова получается структура, состоящая из трех частей: полубесконечная среда 1, биизотропный слой 2 и эквивалентная подложка 34. Коэффициент отражения для нее может быть рассчитан путем применения формулы (2) еще один раз:

$$R_v = \frac{(b_v^2 - b_v^1) + (b_{-v}^2 - b_{-v}^1) R_v^{2(34)} \eta_v^2 \eta_{-v}^2}{(b_{-v}^1 - b_v^2) + (b_{-v}^1 - b_{-v}^2) R_v^{2(34)} \eta_v^2 \eta_{-v}^2}. \quad (11)$$

С учетом подстановки (2) в (3), получается выражение, совпадающее с коэффициентом отражения, рассчитанным матричным методом.

**Метод эквивалентных коэффициентов.** При нормальном падении электромагнитной волны поляризации  $\sigma$  из биизотропной среды  $q$  на границу раздела с биизотропной средой  $s$  можно ввести коэффициенты прохождения и отражения:

$$\tau_{\sigma}^{qs} = \frac{b_{\sigma}^q - b_{-\sigma}^q}{b_{\sigma}^s - b_{-\sigma}^q}, \quad \rho_{\sigma}^{qs} = \frac{b_{\sigma}^q - b_{\sigma}^s}{b_{\sigma}^s - b_{-\sigma}^q}. \quad (12)$$

В работе [1] было показано, что аналогичные (4) коэффициенты прохождения и отражения можно ввести для случая распространения электромагнитной волны из биизотропной среды 1 в биизотропную среду 3 через биизотропный слой 2 толщины  $d_2$ :

$$T_{\sigma}^{13} = \tau_{\sigma}^{12} \frac{\eta_{\sigma}^2 \tau_{\sigma}^{23}}{1 - \eta_{-\sigma}^2 \eta_{\sigma}^2 \rho_{\sigma}^{23} \rho_{-\sigma}^{21}}, \quad R_{\sigma}^{13} = \rho_{\sigma}^{12} \frac{1 - \eta_{-\sigma}^2 \eta_{\sigma}^2 \rho_{\sigma}^{23} / \rho_{\sigma}^{21}}{1 - \eta_{-\sigma}^2 \eta_{\sigma}^2 \rho_{\sigma}^{23} \rho_{-\sigma}^{21}}. \quad (13)$$

Аналогичным образом определяются коэффициенты прохождения и отражения для обратного падения (из среды 3 в среду 1):

$$T_{\sigma}^{31} = \tau_{\sigma}^{32} \frac{\eta_{\sigma}^2 \tau_{\sigma}^{21}}{1 - \eta_{-\sigma}^2 \eta_{\sigma}^2 \rho_{\sigma}^{21} \rho_{-\sigma}^{23}}, \quad R_{\sigma}^{31} = \rho_{\sigma}^{32} \frac{1 - \eta_{-\sigma}^2 \eta_{\sigma}^2 \rho_{\sigma}^{21} / \rho_{\sigma}^{23}}{1 - \eta_{-\sigma}^2 \eta_{\sigma}^2 \rho_{\sigma}^{21} \rho_{-\sigma}^{23}}. \quad (14)$$

Теперь, используя выражения (5) и (6), мы эквивалентно «избавились» от слоя 2 и структура принимает вид, изображенный на рисунке 1, в. Получается структура из трех частей, коэффициент отражения для которой представим в виде

$$R_v = \rho_v^{12} \frac{1 - R_v^{34} \eta_{-v}^3 \eta_v^3 \rho_{-v}^{32} - (1 - \eta_{-v}^3 \eta_v^3 R_v^{34} / \rho_v^{32}) \eta_{-v}^2 \eta_v^2 \rho_v^{23} / \rho_v^{21}}{1 - R_v^{34} \eta_{-v}^3 \eta_v^3 \rho_{-v}^{32} - (1 - \eta_{-v}^3 \eta_v^3 R_v^{34} / \rho_v^{32}) \eta_{-v}^2 \eta_v^2 \rho_v^{23} / \rho_v^{21}}. \quad (15)$$

Данное выражение полностью совпадает с выражением, полученным матричным методом, но имеет более компактный вид благодаря введению коэффициентов  $\tau_{\sigma}^{qs}$  и  $\rho_{\sigma}^{qs}$ , определяемых формулами (4).

**Численный анализ.** Проведем численный расчет коэффициентов отражения (3) и (7) для частного случая металлической подложки 4 ( $R_v^{34} = -1$ ). Для произвольных параметров задачи энергетический коэффициент отражения  $R = |R_v|^2$  равен единице, что подтверждает правильность полученных аналитических формул. Но коэффициент отражения  $R_v$ , как комплексное число, также характеризуется аргументом, это является изменением фазы волны при отражении от многослойной структуры. Построим графики зависимости аргумента  $R_v$  от толщины слоя 3 для трех различных толщин слоя 2 (Рисунок 2).

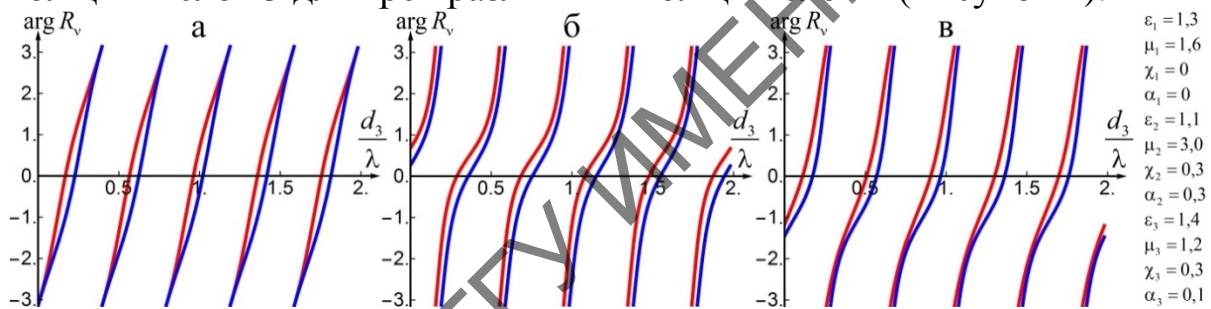


Рисунок 2 – Зависимость аргумента коэффициента отражения от отношения  $d_3/\lambda$  при а)  $d_2/\lambda = 0$ ; б)  $d_2/\lambda = 0,45$ ; в)  $d_2/\lambda = 0,9$ . Красному цвету соответствует  $v = +1$ , синему —  $v = -1$ .

**Заключение.** В данной работе двумя методами получен коэффициент отражения нормально падающей электромагнитной волны от двухслойной биизотропной структуры на отражающей подложке (Рисунок 1, а), это формулы (3) и (7).

В частном случае полностью отражающей металлической подложки 4 энергетический коэффициент отражения оказался равен единице. Графики на рисунке 2 свидетельствуют о том, что изменение фазы при отражении от такой структуры сложным образом зависит от толщин слоев 2 и 3, а также о различии фаз для правой и левой поляризации падающих волн.

## Литература

1. Капшай, В.Н. Прохождение плоских электромагнитных волн через многослойную биизотропную структуру / В.Н. Капшай, А.А.

**А. С. Чугунов** (БрГТУ, Брест)  
Науч. рук. **С. В. Чугунов**, ст. преподаватель

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ P-I-N ФОТОДИОДОВ**

III-нитридное соединение материалов, состоящее из InN, GaN, AlN, и их сплавы, являются полупроводниками, обладающими такими физическими свойствами как: высокая подвижность электронов; высокое значение скорости насыщения носителей; хорошая термостойкость и проводимость; прямая и перестраиваемая по ширине запрещенная зона с высоким коэффициентом оптического поглощения.

Коэффициент поглощения III-нитридных материалов составляет более  $10^4 \text{ см}^{-1}$  [1]. Значительная доля падающего света проникает в глубину на несколько сотен нанометров поглощающей области. Ширина запрещенной зоны материала  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  (AlGaN) варьируется в диапазоне от 3,4 эВ до 6,2 эВ, в зависимости от пропорции  $x$  алюминия в составе соединения  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  [2, 3]. Благодаря этим физическим свойствам, III-нитридные полупроводники являются перспективными материалами для многочисленных оптоэлектронных устройств, таких как светодиоды, лазерные диоды, солнечные элементы и фотодиоды.

В данной работе представлено моделирование p-i-n-фотодиодов на основе тройного соединения AlGaN с помощью программного средства Comsol-Multiphysics.

Исследуемая структура является типичной для нитридных фотодиодов и показана на рисунке 1. Между слоями “n” и “p”, с умеренной электронной и дырочной проводимостью, помещается i-слой с собственной проводимостью, в котором происходит основное поглощение принимаемого света и преобразование его в свободные носители заряда. Данная трехслойная структура дополняется сверху и снизу слоями с высокой степенью легирования “n+” и “p+”, которые позволяют получить омические контакты с металлическими выводами, изображенными на рисунке 1, утолщенными черными линиями.