Письма в ЖТФ, том 18, вып. 4 26 февраля 1992 г.

06.3; 07

ДИСПЕРСИОННЫЕ УРАВНЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАНАРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ, СОДЕРЖАЩИХ АНИЗОТРОПНЫЕ И ПОГЛОЩАЮЩИЕ СЛОИ

А.Ю. Агапов, П.М. Житков,
В.Г. Фавстов, В.М. Шевцов

Многослойные оптические волноводы являются базовыми элементами интегральных оптоэлектронных схем обработки информации. В настоящей работе получены точные дисперсионные уравнения многослойных планарных волноводов, включающих изотропные или одноосные анизотропные диэлектрические, полупроводниковые или металлические, в том числе поглощающие, слои. Запись уравнений в виде рекуррентных формул, имеющих единый инвариантный вид независимо от профиля распределения показателя преломления по слоям волновода, существенно упрощает процедуру вычислений на ЭВМ и позволяет рассчитывать дисперсионные характеристики многослойных систем планарных связанных волновдов, обладающих искусственной отрицательной анизотропией и обеспечивающих синхронизм основных волноводных мод при генерации второй оптической гармоники [1], а также определять поляризационные характеристики планарных фильтров на основе многослойных анизотропных волноводов на поглощающих подложках [2].

Рассмотрим N-слойный планарный оптический волновод (рис. 1) состоящий из одноосных анизотропных слоев, оптическая ось каждого из которых перпендикулярна границам раздела. Будем считать, что материалы, составляющие слои системы, обладают потерями. В случае волн ТЕ-поляризации электромагнитное поле полностью описывается компонентой E_y [3], которую будем искать в виде

$$E_y=\begin{cases} C_1\exp(k_1x), & x<0 \\ A_2\exp(-k_2x)+B_2\exp(k_2x)=C_2\,ch(k_2x+\delta_2), & 0<x<t_2 \\ \ldots & \\ A_i\exp\left(-k_i\left(x-\sum\limits_{n=2}^{i-1}t_n\right)\right)+B_i\exp\left(k_i\left(x-\sum\limits_{n=2}^{i-1}t_n\right)\right)= & \\ =C_i\,ch\left(k_i\left(x-\sum\limits_{n=2}^{i-1}t_n\right)+\delta_i\right), & \sum\limits_{n=2}^{i-1}t_n<x<\sum\limits_{n=2}^{i}t_n \\ \ldots & \\ C_N\exp\left(-k_N\left(x-\sum\limits_{n=2}^{N-1}t_n\right)\right), & x>\sum\limits_{n=2}^{N-1}t_n\;. \end{cases} \tag{1}$$

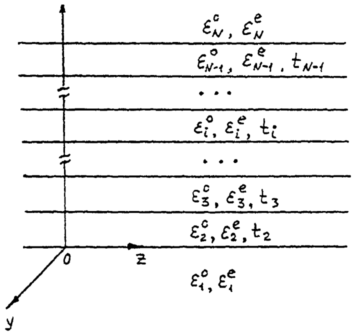

Рис. 1. N-слойный планарный оптический волновод.

Здесь A_i, B_i, C_i-комплексные амплитуды, δ_i – комплексные фазовые постоянные, $k_z = k_0 \cdot \gamma = 2\pi/\lambda_0 \cdot (\beta - j\alpha)$ – продольная постоянная распространения, которая в случае поглощающих слоев является комплексной величиной, $k_i = k_0 \cdot (\gamma^2 - \varepsilon_i^o)^{1/2}$ – комплексные поперечные волновые числа, ε_i^e – комплексная диэлектрическая проницаемость i-го слоя для обыкновенной волны, t_i – толщина i-го слоя. Общий множитель $\exp[j(\omega t - k_z z)]$ в (1) опущен.

Из граничных условий, требующих непрерывности тангенциальных составляющих полей на границах раздела сред, получаем дисперсионное уравнение в виде следующих рекуррентных формул [4]

$$\begin{cases} th(\delta_2) = k_1/k_2 \\ th(\delta_3) = k_2/k_3 \cdot th(k_2 t_2 + \delta_2) \\ \quad \cdots \\ th(\delta_{i+1}) = k_i/k_{i+1} \cdot th(k_i t_i + \delta_i) \\ \quad \cdots \\ th(k_{N-1} t_{N-1} + \delta_{N-1}) = -k_N/k_{N-1}. \end{cases} \qquad (2)$$

Амплитуды волн в слоях волновода связаны следующим образом

$$\begin{aligned} & C_2 = C_1/ch(\delta_2) \\ & C_3 = C_2 ch(k_2 t_2 + \delta_2)/ch(\delta_3) = C_1 ch(k_2 t_2 + \delta_2)/ch(\delta_2)/ch(\delta_3) \\ & \quad \cdots \\ & C_{i+1} = C_i ch(k_i t_i + \delta_i)/ch(\delta_{i+1}) = \\ & = C_1 \prod_{n=2}^{i} ch(k_n t_n + \delta_n) / \prod_{n=2}^{i+1} ch(\delta_n) \\ & \quad \cdots \\ & C_N = C_{N-1} ch(k_{N-1} t_{N-1} + \delta_{N-1}) = C_1 \prod_{n=2}^{N-1} \left(ch(k_n t_n + \delta_n)/ch(\delta_n) \right). \end{aligned} \qquad (3)$$

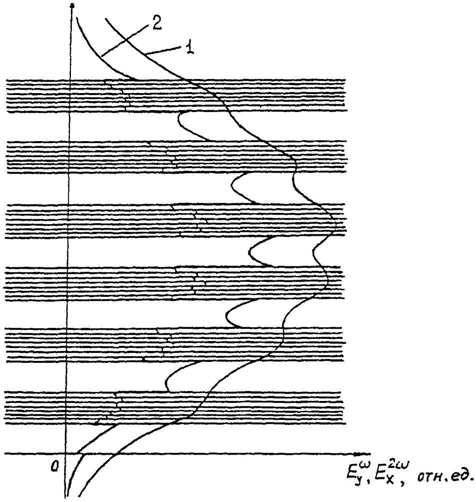

Рис. 2. Эпюры напряженностей полей основных волноводных мод TE_0^{ω} и $TM_0^{2\omega}$ многослойной системы связанных волноводов, использовавшейся в [1] для генерации второй гармоники: 1 – E_y^{ω}, 2 – $E_x^{2\omega}$.

В случае волн ТМ-поляризации электромагнитное поле полностью описывается компонентой H_y [3], которую также необходимо искать в виде, аналогичном выражениям (1). Из граничных условий получаем, что амплитуды волн в слоях и дисперсионное уравнение многослойной волноводной системы и в случае ТМ-волн задаются в виде рекуррентных соотношений (3) и (2), соответственно, при этом в них отношения k_i / k_{i+1} необходимо заменить на отношения $(\varepsilon_{i+1}^{o} \cdot k_i)/(\varepsilon_i^{o} \cdot k_{i+1})$, положив

$$k_i = k_o\left(\gamma^2 \cdot \varepsilon_i^{o} / \varepsilon_i^{e} - \varepsilon_i^{o}\right)^{1/2},$$

где ε_i^{e} – диэлектрическая проницаемость i-го слоя для необыкновенной волны. Для изотропных слоев $\varepsilon_i^{o} = \varepsilon_i^{e} = \varepsilon_i$. Система рекуррентных соотношений (2) может быть записана в виде $F(\gamma) = 0$. Для нахождения комплексных корней $\gamma = \beta - j\alpha$ комплекснозначной фукнции F необходимо применять численные методы, например, метод наискорейшего спуска.

Подчеркнем, что во всех слоях волновода мы записали поперечные волновые числа в одинаковом виде $k_i = k_o \cdot (\gamma^2 - \varepsilon_i^{o})^{1/2}$ (обычно, если в i-ом слое $|\gamma| < |\varepsilon_i^{o}|$, то выбирают запись $k_i = k_o \cdot (\varepsilon_i^{o} - \gamma^2)^{1/2}$. Такой выбор функций k_i позволяет записать дисперсионное уравнение для систем с различным распределением диэлектрических проницаемостей $\varepsilon_i(x)$ по слоям волновода и произвольном соотношении величин γ и ε_i в едином инвариантном виде (2). Иначе нам бы пришлось учитывать величину отношения $|\gamma| / |\varepsilon_i^0|$ в каждом слое и для волноводов с различным распределением $\varepsilon_i(x)$ дисперсионное уравнение имело бы различный вид. Таким образом, запись дисперсионного уравнения многослойных волноводов в едином виде (2) позволяет значительно упростить процедуру численных расчетов.

На практике довольно часто необходимо рассчитывать дисперсионные характеристики многослойных волноводных систем без потерь. При использовании дисперсионного уравнения, записанного в виде инвариантных рекуррентных соотношений (2), вычисления в этом случае необходимо проводить на комплексной плоскости, так как при вещественных значениях γ величины k_i и δ_i могут быть либо чисто действительными, либо чисто мнимыми, а значения функции F - всегда чисто мнимыми. Другими словами, задача нахождения корней дисперсионного уравнения (2) в случае волноводных систем без потерь сводится к поиску нулей действительной функции одного действительного переменного. Данные обстоятельства позволяют применять в этом случае более простые и быстрые численные методы, например, метод деления отрезка пополам.

В качестве примера на рис. 2 приведены рассчитанные по (1)-(3) эпюры напряженности полей E_y^{ω} и $E_x^{2\omega}$ в системе связанных волноводов, обладающей искусственной анизотропией отрицательного одноосного кристалла и позволяющей обеспечить фазовый синхронизм основных мод TE_0^{ω} и $TM_0^{2\omega}$ при генерации второй гармоники [1]. Эта система состояла из 6 периодов, каждый из которых включал высокопреломляющий и низкопреломляющий слои. Каждый высокопреломляющий слой был сформирован из семи чередующихся пленок Ta_2O_5 и ZnO толщиной по 15 нм, толщина низкопреломляющего слоя из SiO_2 равнялась 105 нм. Поля основных мод, как видно из рисунка, имеют значительный интеграл перекрытия, что обеспечило в [1] высокую эффективность нелинейных преобразований.

Таким образом, представление дисперсионных уравнений многослойных оптических волноводов в едином инвариантном виде (2) при произвольном распределении $\varepsilon_i(x)$ по слоям существенно упрощает процедуру численных расчетов на ЭВМ.

Список литературы

[1] Дерюгин Л.Н., Сотин В.Е., Шевцов В.М. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 2. С. 81-85.

[2] Агапов А.Ю., Горобец А.П., Житков П.М., Шевцов В.М. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 15. С. 89-92.

[3] Интегральная оптика. / Под редакцией Т. Тамира. М.: Мир, 1978. 344 с.

[4] Житков П.М. Материалы 8 конференции молодых ученых Ун-та дружбы народов им. П. Лумумбы. М.: УДН. 1985. Ч. 3. С. 33-37. Деп. в ВИНИТИ, № 3715-85ДЕП.

Университет Дружбы народов
им. Патриса Лумумбы

Поступило в Редакцию
30 декабря 1991 г.