МЕТОД АДИАБАТИЧЕСКИХ МОД ДЛЯ РАСЧЁТА ПРОФИЛЯ ТОНКОПЛЁНОЧНОЙ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ ЛЮНЕБЕРГА

Дашицыренов Г.Д.,
Российский университет дружбы народов, genin_dl@mail.ru

Исследуется модель адиабатических мод плавно нерегулярного тонкоплёночного интегрально оптического волновода на примере тонкоплёночной волноводной линзы Люнеберга.

Ключевые слова: математическое моделирование, интегральная оптика, оптимизация, электродинамика.

Введение

Распространённым методом математического моделирования плавно нерегулярных интегрально оптических структур является метод волноводов сравнения, первые публикации по которому появились ещё в конце пятидесятых.

Характерным представителем рассматриваемого класса структур является тонкоплёночная линза Люнеберга. Основным свойством, которой является фокусировка параллельного пучка лучей падающего на неё на некотором расстоянии за линзой. По форме линза напоминает цилиндр, расположенный на поверхности трёхслойного планарного волновода, при этом она рассматривается как дополнительный волноведущий слой с переменной толщиной, вне линзы толщина соответственно равна нулю.

Тезисы

Метод волноводов сравнения [1,2] заключается в разложении поля в области нерегулярности на полный набор мод регулярного волновода. В случае линзы это означает, что в каждой точке (y,z) с толщиной x=h(x,y) рассматривается эквивалентный регулярный волновод, моды соответственно ищутся в виде

$$H(x,y,z,t) = H(x)\exp\{i(wt + kf3z)\}$$
$$E(x,y,z,t) = E(x)\exp\{i(wt + kf3z)\}$$

Уравнения Максвелла в этом случае сводятся к уравнениям Гельмгольца:

$$\frac{d^2E_y}{dx^2} + k_0^2(E\mu - f3^2)E_y(x) = 0$$
$$\frac{d^2H_y}{dx^2} + k_0^2(E\mu - f3^2)H_y(x) = 0$$

Поле в методе адиабатических мод [3] имеет вид:

$$\left\{\begin{matrix}\vec{E}(x,y,z,t)\\ \vec{H}(x,y,z,t)\end{matrix}\right\} = \begin{matrix}\vec{E}(x,y,z)\\ \vec{H}(x,y,z)\end{matrix}\exp\{i[wt - \varphi(y,z)]\} / \sqrt{f3(y,z)}$$

Применение этой подстановки сводит уравнения Максвелла к уравнениям второго порядка для продольных компонент (E_z, H_z) поля направляемой моды:

$$\frac{\partial^2E_z}{\partial x^2} + x^2E_z = -p_y x_z^2\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{x_z^2}\right)E_z - \frac{c}{iwE}\left(p_y x_z^2\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{x_z^2}\right)\right)\frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2H_z}{\partial x^2} + x^2H_z = -p_y x_z^2\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{x_z^2}\right)H_z + \frac{c}{iw\mu}\left(p_y x_z^2\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{x_z^2}\right)\right)\frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (2)$$

Для остальных компонент поля из уравнений Максвелла выводятся дифференциальные соотношения, выражающие их через продольные компоненты.

Для широкого класса тонкоплёночных многослойных интегрально-оптических волноводов выполняется условие малости изменения характеристик мод при перемещении в горизонтальном направлении на длину порядка длины волны:

$$о = \text{тах}\frac{(\nabla \varepsilon)}{k_0 \varepsilon^2} \ll 1$$

Это даёт возможность применить асимптотический подход по малому параметру δ. В нулевом приближении асимптотического метода правые части уравнений (1, 2) обнуляются:

$$\frac{д^2 E_z}{дх^2} + k_0^2 (\text{E}\mu - f3^2) E_z = 0$$

$$\frac{д^2 H_z}{дх^2} + k_0^2 (\text{E}\mu - f3^2) H_z = 0$$

Граничные условия для обоих методов в регулярной области для обоих методов одинаковы:

$\vec{E}_у\big|_{-d-0} = \vec{E}_у\big|_{-d+0}$, $\vec{H}_у\big|_{-d-0} = \vec{H}_у\big|_{-d+0}$, $\vec{E}_z\big|_{-d-0} = \vec{E}_z\big|_{-d+0}$ $\vec{E}_у\big|_{-d-0} = \vec{E}_z\big|_{-d+0}$

– равенство тангенциальных компонент на поверхности между подложкой волноводным слоем,

$\vec{E}_у\big|_{-0} = \vec{E}_у\big|_{+0}$, $\vec{H}_у\big|_{-0} = \vec{H}_у\big|_{+0}$, $\vec{E}_z\big|_{-0} = \vec{E}_z\big|_{+0}$, $\vec{E}_у\big|_{-0} = \vec{E}_z\big|_{+0}$

– равенство тангенциальных компонент на поверхности между волноводным слоем и линзой.

В нерегулярной части для метода волноводов сравнения между линзой и покровным слоем граничные условия имеют вид:

$\vec{E}_у\big|_{h(y,z)+0} = \vec{E}_у\big|_{h(y,z)-0}$, $\vec{H}_у\big|_{h(y,z)+0} = \vec{H}_у\big|_{h(y,z)+0}$, $\vec{E}_z\big|_{h(y,z)+0} = \vec{E}_z\big|_{h(y,z)-0}$, $\vec{E}_у\big|_{h(y,z)+0} = \vec{E}_z\big|_{h(y,z)+0}$

Метод адиабатических мод позволяет учесть наклон поверхности линзы:

$\vec{E}\big|_{-h(y,z)} = \vec{E}\big|_{+h(y,z)}$, $\vec{H}\big|_{-h(y,z)} = \vec{H}\big|_{+h(y,z)}$,

$\vec{H} = F(\vec{H}, h(x,y), \frac{дh}{дх}, \frac{дh}{ду})$, $\vec{E} = F(\vec{E}, h(x,y), \frac{дh}{дх}, \frac{дh}{ду})$

После подстановки общих решений граничные условия составляют однородное уравнение: $м\,(f3, f3_z, f3_y, d, h, \frac{дh}{дх}, \frac{дh}{ду})\,(\vec{A}, \vec{B})^T = 0$, где $(\vec{A}, \vec{B})$ неизвестные амплитудные коэффициенты в общих решениях.

Чтобы упростить поиск профиля линзы, используется свойство симметричности линзы относительной центральной оси, профиль при этом представляется рядом:

$$h_N(y,z) = \sum_{i=1}^{N} K_i \exp\{\frac{r^2}{c}\}$$

Профиль h(y,z) находится путём минимизации функционала

$$\text{Det}\, м\,(f3, f3_z, f3_y, d, h_N, \frac{дh}{дх}, \frac{дh}{ду}) \to \min_{K_i, c_i}$$

Выводы

Численные расчёты показали различия в вычисленных значениях толщины волноводного слоя ТОВЛ Люнеберга в приближении метода волноводов сравнения и в нулевом приближении модели адиабатических мод, учитывающем векторный характер электромагнитного поля направляемой моды ТОВЛ Люнеберга в отличие от более грубых скалярных моделей.

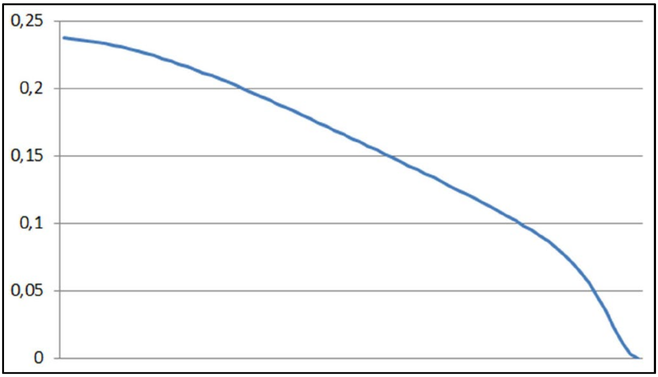

Рис. 1. Профиль линзы h(r).

Литература

1. *Каценеленбаум Б.З.* Теория нерегулярных волноводов с медленно изменяющимися параметрами. – М.: Изд. АН СССР, 1961.
2. *Шевченко В.В.* Плавные переходы в открытых волноводах (Введение в теорию). – М.: Наука, 1969.
3. *Севастьянов А.Л.* Компьютерное моделирование полей направляемых мод тонкопленочной обобщенной волноводной линзы Люнеберга / Дисс. канд. физ.-мат. наук. – М.: РУДН, 2010.

ADIABATIC WAVEGUIDE MODES METHOD FOR CALCULATING PROFILE OF THIN-FILM INTEGRATED OPTICAL LUNEBERG LENS

Dashitsyrenov G.D.

Peoples' Friendship University of Russia (PFUR), genin_d @mail.ru

A model of adiabatic modes of smoothly irregular integrated thin-film optical waveguide is investigated on an example of waveguide Luneburg lenses.

Key words: mathematical modeling, integrated optics, optimization, and electrodynamics.