

# Математическое моделирование нерегулярных интегрально-оптических волноводов методом адиабатических мод

Э.А. Айрян<sup>1,\*</sup>, А.А. Егоров<sup>2</sup>, А.Л. Севастьянов<sup>3</sup>, К.П. Ловецкий<sup>3,\*</sup>,  
Л.А. Севастьянов<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup>Лаборатория информационных технологий ОИЯИ, Дубна

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова, 38, 119991 Москва, Россия

<sup>3</sup>Российский университет дружбы народов, ул. Миклухо-Маклая, 6, 117198 Москва, Россия

E-mails: ayrtjan@jinr.ru, yegorov@kapella.gpi.ru, alsevastyanov@gmail.com, lovetskiy@gmail.com, sevast@sci.pfu.edu.ru

**Аннотация.** Рассматривается распространение поляризованного света в интегрально-оптических многослойных волноводах. В случае регулярных однородных пленок уравнения Максвелла редуцируются к паре систем обыкновенных дифференциальных уравнений для ТЕ- и ТМ-мод методом разделения переменных. В случае нерегулярных слоев метод разделения переменных не применим. Нами разработан метод адиабатических мод, являющийся обобщением метода Канторовича приведения дифференциального уравнения в частных производных к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. При плавном изменении полученная система обыкновенных дифференциальных уравнений решается приближенно асимптотическим методом. Полученное при этом нулевое приближение исследовано нами полностью.

Таким образом, распространение поляризованного монохроматического света в диэлектрических продольно-платно-нерегулярных интегрально-оптических волноводах описано приближенно методом адиабатических мод. Применения данного метода к проектированию тонкопленочной обобщенной волноводной линзы Люнеберга продемонстрировало его состоятельность. Предлагаемый нами подход учитывает векторный характер полей, т.е. позволяет вполне адекватно в отличие от традиционного скалярного рассмотрения описать реальные платно-нерегулярные многослойные трехмерные волноводящие структуры.

Анализу распространения плоской монохроматической световой волны в планарных многослойных маломодовых регулярных диэлектрических волноводах посвящено много работ. При наличии плавных волноводных нерегулярностей (показателей преломления слоев и/или их толщин) направляемая мода претерпевает возмущение. В отличие от направляемых мод регулярного волновода слабо возмущенные ("квазиволноводные") моды платно-нерегулярных волноводов могут обмениваться энергией между собой и с окружающей средой.

Примерами плавных "нерегулярностей" яв-

ляются широко используемые устройства сопряжения, связывающие различные элементы интегрально-оптического процессора, а также, например, такие элементы оптических интегральных схем как тонкопленочная волноводная линза Люнеберга<sup>1</sup>. Эффективность сопряжения сильно зависит от согласования между полями до и после элемента сопряжения. Для успешного решения задачи эффективной передачи энергии через элементы оптической интегральной схемы через устройство сопряжения необходимо учесть векторный характер полей на всех этапах решения электродинамической задачи распространения плоской монохроматической световой волны в планарной многослойной интегральной оптической структуре.

Развитие векторной трехмерной (3D) теории волноводного распространения и рассеяния света в нерегулярном интегрально-оптическом волноводе является одной из актуальных задач современной интегральной оптики и волноводной оптоэлектроники. Действительно, двухмерный (2D) анализ соответствующих электродинамических задач применим с рядом оговорок, например, для таких интегрально-оптических устройств как каналные волноводы, анализаторы спектра радиочастот, интерферометры, мультиплексоры/демультиплексоры, датчики параметров окружающей среды, линзы, призмы, разветвители и т.д. Однако при переходе в субмикронный и тем более в нанометровый диапазон линейных размеров элементов интегральных оптических устройств 2D-анализ ограничивает возможности исследователей.

Действительно, использование 2D-теории справедливо только для слабо направляющих структур и не подходит для описания оптических волноводов, у которых сильно варьируется диэлектрическая проницаемость. Использование скалярного волнового уравнения для анализа трехмерных волноводов оптического диапазона

\* Работа поддержана грантами РФФИ №10-01-00467, №11-01-00278

<sup>1</sup>Хансперджер Р. Интегральная оптика: Теория и технология. - М.: Мир, 1985

оказалось, например, возможно в случае последовательного уточнения решения скалярной волноводной задачи. Однако непосредственное применение такого подхода к исследованию, например, вытекающих мод микроструктурных оптических волокон не позволило найти их коэффициенты затухания с приемлемой точностью.

Асимптотический метод решения системы уравнений Максвелла на наш взгляд лучше других подходит для описания процессов эволюции квазиволноводных мод. Удержание в полученном решении и граничных условиях слагаемых, пропорциональных градиенту диэлектрической проницаемости  $\vec{\nabla} \varepsilon$ , позволяет учесть векторный характер распространения монохроматического электромагнитного поля вдоль плавно-нерегулярных участков многослойного многомодового диэлектрического волновода.

Группой сотрудников ОИЯИ в соавторстве с коллегами из ИОФ РАН и РУДН в 2010-2011 гг. подготовлены и опубликованы работы [1-9], посвященные математическому моделированию процесса распространения линейно поляризованных монохроматических волн через нерегулярные участки открытых волноводов с целью проектирования и создания элементной базы трехмерных интегрально-оптических устройств. Данные публикации являются продолжением исследований, начатых частью соавторов в работах<sup>2</sup>. Работы [1, 5, 6] посвящены теоретическо-

му изучению и численному моделированию процесса распространения волноводных мод через нерегулярные участки интегрально-оптических волноводов, подчиняющихся заданному закону фазовой и амплитудной трансформации электромагнитного поля. Результаты исследования предполагается применять для проектирования и расчета преобразователей, делителей, дефлекторов, мультиплексоров и т.п. Разработанная теория применима для анализа аналогичных структур из диэлектрических, магнитных и метаматериалов в достаточно широком диапазоне электромагнитных длин волн.

Особое внимание было уделено разработке асимптотического метода теоретического и численного исследования уравнений для двух слабо связанных мод в нерегулярной трехмерной области. Другой актуальной задачей является получение и исследование выражений для сдвигов постоянных распространения (собственных волновых чисел). Поскольку анализ распределения комплексных постоянных распространения, искажения их спектра, структуры соответствующих мод, проводимый на комплексной плоскости, может стать одним из важных методов исследования плавно-нерегулярных трехмерных интегрально-оптических устройств. Одним из значимых разделов является разработка методов численного решения дисперсионных соотношений плавно-нерегулярных трехмерных интегрально-оптических устройств, т.к. до настоящего времени они не были разработаны.

Предлагаемый нами подход учитывает векторный характер полей, т.е. позволяет вполне адекватно в отличие от традиционного скалярного рассмотрения описать реальные плавно-нерегулярные многослойные трехмерные волноводные структуры. В качестве метода исследования интегрально-оптического многослойного волновода, удовлетворяющего условию плавного изменения профиля исследуемой трехмерной структуры, использован асимптотический метод. Аналитически описаны трехмерные поля плавно деформирующихся мод. Для вертикального распределения электромагнитного поля в волноводе получены обыкновенные дифференциальные уравнения и граничные условия. Получена явная зависимость вкладов первого порядка малости в амплитуды электрического и магнитного полей квазиволноводных мод.

Для квазиволноводных мод выделены вклады нулевого порядка малости в дифференциальных уравнениях и граничных условиях. Получены явные выражения для вертикального распределения электромагнитного поля в волноводе и граничные условия на границах слоев. В итоге за-

<sup>2</sup>Севастьянов Л.А., Егоров А.А. Теоретический анализ волноводного распространения электромагнитных волн в диэлектрических плавно-нерегулярных интегральных структурах. Оптика и Спектроскопия, 2008. Т. 105, №4, стр. 632-640.

Егоров А.А., Севастьянов Л.А., Севастьянов А.Л. Исследование электродинамических свойств планарной тонкопленочной линзы Лунеберга. Журнал радиоэлектроники, 2008, №6.

Egorov A.A., Sevastianov L.A., Sevastyanov A.L., Lovetskiy K.P. Propagation of electromagnetic waves in thin-film structures with smoothly irregular sections. ICO Topical Meeting on Optoinformatics/Information Photonics 2008. St. Petersburg: ITMO, 2008, pp. 231-234.

Егоров А.А., Севастьянов Л.А. Структура мод плавно-нерегулярного интегрально-оптического четырехслойного трехмерного волновода. Квантовая Электроника, 2009. Т. 39, №6, стр. 566-574.

Егоров А.А., Севастьянов А.Л., Ловецкий К.П. Модель интегрально-оптической обобщенной линзы Лунеберга в нулевом приближении. Вестник РУДН. Серия Математика. Информатика. Физика. 2009. №3, стр. 55-64.

Егоров А.А., Айрян Э.А., Севастьянов А.Л., Севастьянов Л.А. Структура мод плавно-нерегулярного трехмерного интегрально-оптического четырехслойного волновода. Сообщение ОИЯИ P11-2009-121, 2009, 15 стр. Айрян Э.А., Егоров А.А., Севастьянов А.Л., Ловецкий К.П., Севастьянов Л.А. Адиабатические моды плавно-нерегулярного оптического волновода: нулевое приближение векторной теории. Препринт ОИЯИ P11-2009-120, Дубна, 2009, 19 стр.

дача сведена к решению однородной системы линейных алгебраических уравнений, зависящей от спектрального параметра, и поиску значений параметра, при которых система нетривиально разрешима. Приведены методы и алгоритмы решения обеих задач.

Представлен канонический вид квазирезонансных уравнений, описывающих распространение квази-ТЕ и квази-ТМ мод в плавно-нерегулярной части трехмерного четырехслойного интегрально-оптического волновода. С помощью теории возмущений и метода связанных волн в явном виде получены сдвиги комплексных постоянных распространения для квази-ТЕ и квази-ТМ мод.

Нами установлено, что в нулевом приближении описания волноводные моды, линейно поляризованные в регулярном участке волновода, при прохождении через нерегулярный участок волновода деформируются таким образом, что их исходная поляризация сохраняется. Напротив, в первом приближении наряду с возмущениями нулевого приближения появляется эффект деполаризации исходных мод, превращающий их в слабо (адиабатически) гибридные моды.

Предлагаемый нами подход учитывает векторный характер полей, т.е. позволяет вполне адекватно в отличие от традиционного скалярного рассмотрения описать реальные плавно-нерегулярные многослойные трехмерные волноводные структуры. Важно отметить, что разрабатываемая нами теория и методы исследования применимы для анализа аналогичных структур из диэлектрических, магнитных и метаматериалов (в том числе состоящих из  $N$  слоев) в достаточно широком диапазоне электромагнитных длин волн, что является их несомненным преимуществом и отличает от ранее разработанных методов исследования подобных волноводных структур.

### Список литературы

[1] Севастьянов А.Л. Компьютерное моделирование полей направляемых мод тонкопленочной

обобщенной волноводной линзы Люнеберга. - Дисс. канд. физ.-мат. наук. М.: РУДН. 2010.

- [2] Егоров А.А., Севастьянов А.Л., Айрян Э.А., Ловецкий К.П., Севастьянов Л.А. Адиабатические моды плавно-нерегулярного оптического волновода: нулевое приближение векторной теории. Математическое моделирование, 2010. Т. 22, №8, стр. 42-54.
- [3] Егоров А.А., Ловецкий К.П., Севастьянов А.Л., Севастьянов Л.А. Моделирование направляемых (собственных) мод и синтез тонкопленочной обобщенной волноводной линзы Люнеберга в нулевом векторном приближении. Квантовая Электроника, 2010. Т. 40, №9, стр. 830-836.
- [4] Egorov A.A., Sevastianov L.A., Sevastyanov A.L., Stavtsev A.V. Propagation of the monochromatic electromagnetic waves in irregular waveguides. A brief introduction to an analysis in the case of smooth or statistic irregularities. Bulletin of PFUR. Series Mathematics. Computer science. Physics. 2010, №1, pp. 67-76.
- [5] Егоров А.А., Ловецкий К.П., Севастьянов А.Л., Севастьянов Л.А. Модель многослойного плавно-нерегулярного интегрально-оптического волновода в нулевом векторном приближении. Электронный журнал "Исследовано в России", 010, 2011, стр. 96-122. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2011/010.pdf>
- [6] Севастьянов Л.А., Егоров А.А. Моды плавно-нерегулярных многослойных интегрально-оптических волноводов. Материалы III-й Междунар. Научно-практич. конфер. "Оптика неоднородных структур", Беларусь, Могилев, 16-17 февраля 2011. - Могилев, МГУ им. Кулешова А.А., 2011, стр. 98-100.
- [7] Ayrjan E.A., Egorov A.A., Michuk E.N., Sevastyanov A.L., Sevastianov L.A., Stavtsev A.V. Representations of guided modes of integrated-optical multilayer thin-film waveguides. Preprint JINR E11-2011-31, Dubna, 2011, 46 p.
- [8] Ayrjan E.A., Egorov A.A., Sevastianov L.A., Lovetskiy K.P., Sevastyanov A.L. Mathematical modeling of irregular integrated optical waveguides. Lecture Notes in Computer Science, 2011 (in press).
- [9] Севастьянов Л.А., Егоров А.А., Севастьянов А.Л. Адиабатические моды в гладко-нерегулярных многослойных интегрально-оптических волноводах. Труды семинара ЛТФ ОИЯИ, 2011 (принята в печать).