

# Математическое моделирование адиабатических мод нерегулярного открытого волновода для проектирования многослойных интегрально-оптических устройств

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

<sup>1</sup> Лаборатория информационных технологий, ОИЯИ, ул. Жолио-Кюри, 6, 141980 Дубна, Россия;

<sup>2</sup> Российский университет дружбы народов, ул. Миклухо-Маклая, 6, 117198 Москва, Россия;

<sup>3</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова, 38, 119991 Москва, Россия

e-mail: ayrjn@jinr.ru, sevast@sci.pfu.edu.ru, yegorov@kapella.gpi.ru,

alsevastyanov@gmail.com, lovetskiy@gmail.com

В качестве метода исследования интегрально-оптического многослойного волновода, удовлетворяющего условию плавного изменения профиля исследуемой трехмерной структуры, использован асимптотический метод. На основе адиабатического представления собственных мод интегрально-оптического многослойного волновода для вертикального распределения электромагнитного поля в волноводе получены обыкновенные дифференциальные уравнения и граничные условия. Для плавно-нерегулярных волноводов применен асимптотический метод и выделены вклады нулевого порядка малости в дифференциальных уравнениях и граничных условиях. Получены явные выражения для вертикального распределения электромагнитного поля в волноводе и граничных условий на границах слоев. В итоге задача сведена к решению однородной системы линейных алгебраических уравнений, зависящей от спектрального параметра, и поиску значений параметра, при которых система нетривиально разрешима. Разработанная теория применима для анализа аналогичных структур из диэлектрических, магнитных и метаматериалов в достаточно широком диапазоне электромагнитных длин волн.

Группой сотрудников ЛИТ ОИЯИ в соавторстве с коллегами из ИОФ РАН и РУДН в 2009 году подготовлены и опубликованы работы [1, 2, 3, 4, 5], посвященные теоретическому изучению и численному моделированию процесса распространения волноводных мод через нерегулярные участки интегрально-оптических волноводов, подчиняющихся заданному закону фазовой и амплитудной трансформации электромагнитного поля, с целью проектирования и создания элементной базы трехмерных интегрально-оптических устройств. Данные публикации являются продолжением исследований, начатых частью соавторов в работах [6, 7, 8]. Работы [1, 2, 3, 4, 5] посвящены теоретическому изучению и численному моделированию процесса распространения волноводных мод через нерегулярные участки интегрально-оптических волноводов, подчиняющихся заданному закону фазовой и амплитудной трансформации электромагнитного поля,

с целью проектирования и расчета преобразователей, делителей, дефлекторов, мультиплексоров и т.п. для создания элементной базы трехмерных интегрально-оптических устройств. Разработанная теория применима для анализа аналогичных структур из диэлектрических, магнитных и метаматериалов в достаточно широком диапазоне электромагнитных длин волн. В качестве метода исследования интегрально-оптического многослойного волновода, удовлетворяющего условию плавного изменения профиля исследуемой трехмерной структуры, используются асимптотический метод и метод связанных волн. В основу планируемых исследований положены полученные ранее авторами проекта результаты исследований распространения монохроматической электромагнитной волны в многослойной плавно-нерегулярной интегральной диэлектрической структуре, главной особенностью которых является аналитическое описание трехмерных векторных полей плавно деформирующихся волноводных мод. Для поиска приближенного решения векторной электродинамической задачи, удовлетворяющего условию плавного изменения профиля исследуемой структуры, авторами было предложено использовать метод "частичного" разделения переменных, поскольку метод разделения переменных, используемый для регулярных волноводов, в данном случае неприменим. В результате удалось не только аналитически описать поля плавно деформирующихся мод диэлектрического волновода, но и их взаимную связь, и дисперсионные соотношения, связывающие распределение коэффициента замедления с локальными наклонами слоев исследуемой структуры. Получен канонический для асимптотического метода вид квази-волновых уравнений в плавно-нерегулярном четырехслойном интегрально-оптическом трехмерном волноводе. Особое внимание уделено разработке метода теоретического и численного исследования полученных 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. в настоящее время они не 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 волноведущие 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 граничных условий на границах слоев. В итоге задача 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 квазиволновых 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 волноведущие структуры. Важно отметить, что разрабатываемая нами теория и методы исследования применимы для анализа аналогичных структур из диэлектрических, магнитных и мета-материалов (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 волноведущих структур.

## Список литературы

- [1] Егоров А.А., Севастьянов Л.А. *Структура мод плавно-нерегулярного интегрально-оптического четырехслойного трехмерного волновода* // Квантовая Электроника, 2009, Т.39, еб, с.566-574.
- [2] Севастьянов А. Л. *Численная реализация модели интегрально-оптической линзы Люнеберга в нулевом приближении* (подано в труды ММСР 2009).
- [3] А.А. Егоров, Э.А. Айрян, А.Л. Севастьянов, Л.А. Севастьянов *Структура мод плавно-нерегулярного трехмерного интегрально-оптического четырехслойного волновода* // Сообщение ОИЯИ Р11-2009-121.
- [4] Э. А. Айрян, А. А. Егоров, А. Л. Севастьянов, К. П. Ловецкий, Л. А. Севастьянов *Адиабатические моды плавно-нерегулярного оптического волновода: нулевое приближение векторной теории* // Препринт ОИЯИ Р11-2009-120.
- [5] А.А. Егоров, А.Л. Севастьянов, Э.А. Айрян, К.П. Ловецкий, Л.А. Севастьянов *Адиабатические моды плавно-нерегулярного оптического волновода: нулевое приближение векторной теории* (подано в журнал "Математическое моделирование").
- [6] Севастьянов Л.А., Егоров А.А. *Теоретический анализ волноводного распространения электромагнитных волн в диэлектрических плавно-нерегулярных интегральных структурах* // Оптика и Спектроскопия, 2008, Т.105, е4, с.632-640.
- [7] Егоров А.А., Севастьянов Л.А., Севастьянов А.Л. *Исследование электродинамических свойств планарной тонкопленочной линзы Люнеберга* // Журнал радиоэлектроники, 2008, еб, с.1-20.
- [8] 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. September 15-18, 2008. St. Petersburg. Russia. St. Petersburg: ITMO, 2008, pp.231-234.