

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА В ЗАДАЧЕ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ БРЭГГОВСКОГО ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА

Д.В. Богданович<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский инженерно-физический институт (государственный университет), Москва, Россия

### Аннотация

С использованием генетического алгоритма оптимизирована структура брэгговского световода с полый сердцевиной на максимальное отражение света от многослойной оболочки. Представлено краткое описание метода и основные результаты.

Очень часто при исследовании различных физических явлений возникают ситуации, когда необходимо численно получить корень системы уравнений, найти глобальный экстремум функции многих переменных. Задачами такого рода являются задачи оптимизации, для решения которых, к сожалению, среди интегро-дифференциальных методов нет универсального алгоритма. Для каждого отдельного случая приходится подбирать свой метод или даже комбинировать несколько. Общими недостатками для этих алгоритмов являются необходимость знания «рельефа» исследуемой поверхности и точного ограничения положения глобального экстремума функции, неспособность выходить из возможных локальных экстремумов.

Наиболее подходящим для решения такого рода задач, на наш взгляд, является генетический алгоритм (ГА), впервые предложенный Ж. Н. Holland (1975) [1]. Методологическая основа ГА базируется на прямой аналогии гипотез селекции, существующих в природе. ГА оперирует популяциями потенциальных решений, применяя принцип выживания и участия в формировании потомства наиболее приспособленных из них. Приспособленность каждого потенциального решения определяется значением его целевой функции, насколько данное решение отличается от желаемого результата. Чем выше приспособленность решения, тем выше вероятность того, что в потомстве, полученном с его участием, «полезные» признаки, определяющие приспособленность, будут выражены еще сильнее. Практикуемый в ГА способ описания математических моделей подразумевает символическое кодирование информации о них. «Вектор переменных» играет здесь ту же роль, что и категория «генотип» в биологии. Группировка ключевых параметров в вектор переменных, по существу, придает им статус генетической информации. ГА не требует знания рельефа поверхности, на которой происходит поиск экстремума, способен выходить из точек локальных экстремумов, прост в реализации и не нуждается в больших вычислительных мощностях.

В волоконной оптике ГА может быть применен в задаче оптимизации брэгговского волоконного световода для достижения максимального отражения света от многослойной оболочки. Брэгговский волоконный световод представляет собой одномерный фотонный кристалл, свет в котором распространяется, в основном, в полый сердцевине или сердцевине

из материала с меньшим, чем у оболочки, показателем преломления (рис. 1). Это оказывается возможным, поскольку оболочка служит многослойным диэлектрическим зеркалом, работающим по принципу брэгговских резонансов [2]. Благодаря этому, ряд свойств брэгговского световода значительно отличается от стандартных двухслойных световодов. В частности: высокий порог возникновения нелинейных явлений, одномодовость и возможность возбуждения поляризационно-невырожденных мод в широком спектральном диапазоне, возможность варьирования дисперсионных свойств, – делают брэгговские волоконные световоды перспективными во многих приложениях, где обычные волоконные световоды имеют существенные ограничения или не применимы вовсе.

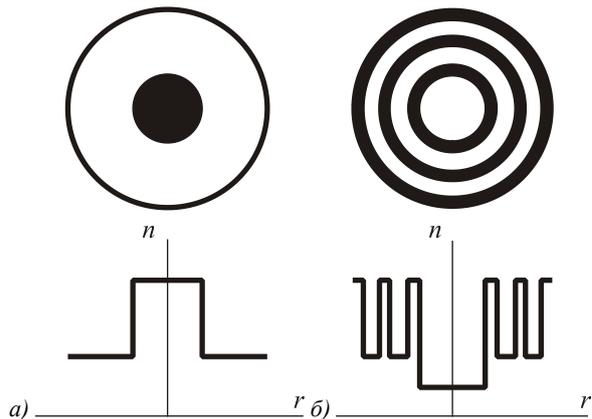


Рис. 1. Схематичное распределение профилей показателя преломления  $n$  в зависимости от радиальной координаты  $r$  для обычного кварцевого (а) и брэгговского световодов (б)

Несмотря на то, что методы анализа свойств многослойных цилиндрических световодов были предложены Р. Yeh, А. Yariv (1978) [2] достаточно давно, и на сегодняшний день также существует большое количество теоретических работ, посвященных данной проблеме, полного понимания поставленной задачи пока нет [3]. В частности, авторы, по аналогии с плоскопараллельным случаем, исследуют структуры с оптическими толщинами слоев равными четверти длины волны, не учитывая специфики задачи, обусловленной ее цилиндрической симметрией. Дело в том, что при цилиндрической геометрии компоненты электромагнитного поля выражаются цилиндрическими функциями с меняющимся пространственным периодом, что приводит к



ства. Вычислялась средняя приспособленность популяции.

$$\bar{f} = \frac{\sum_{i=1}^M f_i}{M} \quad (3)$$

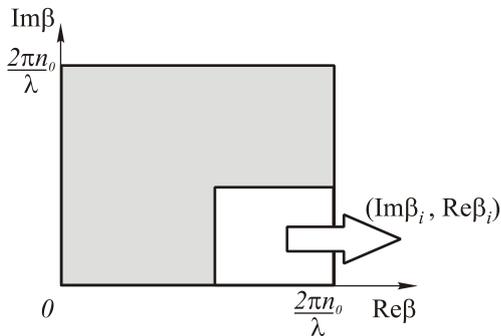


Рис.3. Область допустимых значений для  $Re\beta$  и  $Im\beta$

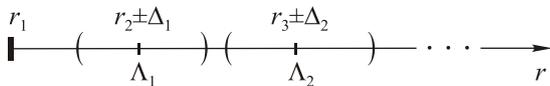


Рис.4. Область допустимых значений для координат границ слоев оболочки  $r$

Далее осуществлялся отбор кандидатов на роль родительских особей. Случайным образом равновероятно выбирались две особи и производилось сравнение их целевых функций. Особь с большим значением целевой функции участвовала в формировании потомков. Повторным испытанием подбиралась вторая родительская особь. Над генотипами родителей производилась операция скрещивания - кроссинговер, а затем равновероятно выбирался один из полученных потомков. Кроссинговер, описывающий механизм формирования хромосомы потомка, приводит к тому, что она включает в себя фрагменты родительских хромосом. Именно благодаря наличию кроссинговерных обменов особи популяции обмениваются между собой генетической информацией, таким образом, поиск приобретает коллективный характер. Поскольку ГА имеют дело с популяциями постоянной численности, особую актуальность здесь наравне с отбором в родители приобретает отбор кандидатов на выбывание из популяции.

Поскольку каждый участок хромосомы любой особи из популяции несет определенную функциональную нагрузку, желательно создание такой комбинации участков хромосом, которая составляла бы наилучшее из решений, возможных при исходном генетическом материале. Целью рекомбинации является накопление в конечном решении всех лучших функциональных признаков, какие имелись в наборе исходных решений. В основном, эффективность ГА определяется структурой оператора кроссинговера, поэтому при скрещивании генотипов родителей и заменой потомком одной особи из популяции, над оператором кроссинговера в четыре этапа проводилась процедура модификации. На первых двух этапах генотип потомка формировался при помощи одноточечного кроссинговера двух родитель-

ских особей. Разница заключалась в том, что на первом этапе особь на элиминирование выбиралась произвольным образом, а на втором этапе на элиминирование выбиралась особь с наименьшим значением целевой функции в популяции. Простой одноточечный оператор кроссинговера производил преобразование двух хромосом и частичный обмен информацией между ними, используя точку разрыва, выбранную случайно. Более эффективным по сравнению с одноточечным, является двухточечный оператор кроссинговера, в котором точки разрыва так же выбираются случайно. На третьем этапе, над генотипами родителей производился двухточечный кроссинговер и потомок заменял особь с наименьшим значением целевой функции. Отличие четвертого этапа заключалось в том, что в формировании потомков участвовали уже три родительские особи, над которыми производилась процедура двухточечного кроссинговера и генотипы потомков формировались так, как это показано на рис. 5. Развитием двухточечного оператора кроссинговера является многоточечный оператор кроссинговера, который выполняется аналогично двухточечному, однако в работе он не использовался, так как большое число точек разрыва может привести к потере хороших родительских свойств [8].

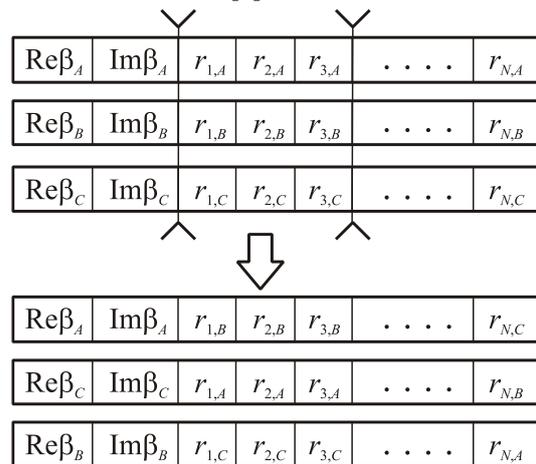


Рис.5. Формирование генотипов потомков, полученных путем двухточечного кроссинговера трех родительских особей

На рис. 6 представлено сравнение эффективности разных вариантов генетического алгоритма при одинаковом числе потомков  $n$ . Так как формирование первичных популяций особей носит вероятностный характер, то их начальная средняя приспособленность  $\bar{f}$  может отличаться друг от друга. Кривая  $GA I$  показывает, что произвольный выбор особи на элиминирование, может приводить к случаям, когда «плохой» потомок заменяет «хорошую» особь и значение функции  $\bar{f}$  уменьшается. Однако, несмотря на это, с увеличением числа потомков  $n$  наблюдается рост  $\bar{f}$ . Из  $GA II$  видно, что отбор на элиминирование наименее приспособленных особей

привел к тому, что среднее значение целевой функции  $\bar{f}$  с увеличением числа поколений потомков постоянно росло. Применение двухточечного кроссингвера *GA III* существенно повышало эффективность метода, а ввод третьего родителя в *GA IV* позволил ускорить накопление «полезных» признаков, что привело в итоге к значительному росту  $\bar{f}$ .

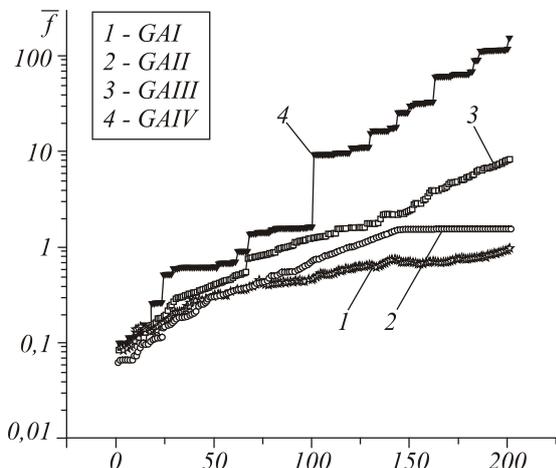


Рис. 6. Сравнение эффективности различных вариантов оператора кроссингвера

Применение начальных популяций большой численности увеличивало вероятность нахождения области глобального минимума, модифицированный оператор кроссингвера в свою очередь способствовал накоплению «полезных» признаков и позволял эффективно конструировать из исходного генетического материала наилучшее возможное решение. Дальнейшее улучшение решения потребовало бы применения оператора мутации, который, вероятностным образом, генерировал особи с новыми фенотипическими признаками. Но такое доведение решения до заданной точности потребовало бы много времени. Для того чтобы этого избежать, на данном этапе применялся безградиентный метод многомерной минимизации, в котором особь с наибольшим значением целевой функции использовалась в качестве начальной точки. В методе многомерной минимизации функция  $F$  последовательно минимизировалась по каждой координате в отдельности и по истечении некоторого количества итераций, решение доводилось до требуемой точности.

Для проверки работоспособности описанного метода решалась задача оптимизации структуры брегговского световода для низших поперечных  $TE_{01}$ ,  $TM_{01}$  и гибридной  $HE_{11}$  мод при  $\lambda = 1,65$  мкм. Структура обладала радиусом сердцевин  $r_1 = 7,5$  мкм, показателями преломления сердцевин  $n_0 = 1,0$ , оптически более плотных слоев  $n_1 = 3,5$  и менее плотных  $n_2 = 2,0$  и числом слоев  $N = 8$ . На рис. 7 и рис. 8 приводятся зависимости потерь  $\alpha$  и эффективных показателей преломления  $n_{eff}$  от длины волны  $\lambda$  для  $TE_{01}$ ,  $TM_{01}$  и  $HE_{11}$  мод. Индексом  $\lambda/4$  помечены моды структуры с толщинами слоев равными четверти длины волны, индексами *Opt* обозначены моды оп-

тимизированных структур. На рис. 9 представлены распределения координат границ слоев  $r_i$  для четвертьволновой и оптимизированных структур. Координаты границ слоев для структур, оптимизированных на  $TE_{01}$  и  $HE_{11}$  моду, совпали.

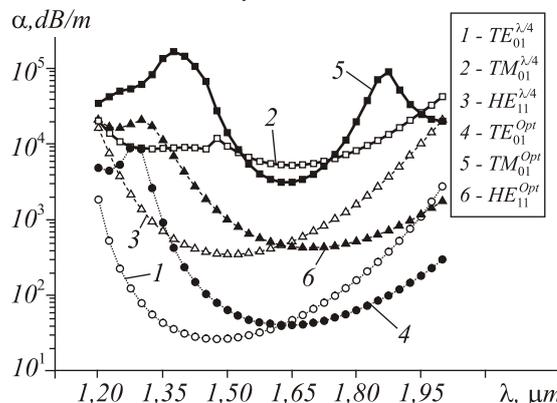


Рис. 7. Зависимость потерь  $\alpha$  от длины волны  $\lambda$  для  $TE_{01}$ ,  $TM_{01}$  и  $HE_{11}$  мод четвертьволновой и оптимизированных структур

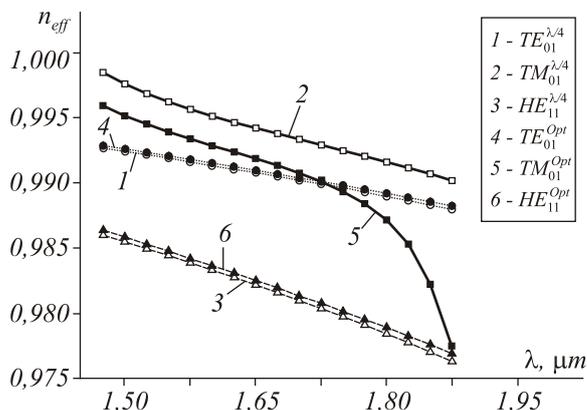


Рис. 8. Зависимость эффективного показателя преломления  $n_{eff}$  от длины волны  $\lambda$  для мод четвертьволновой и оптимизированных структур

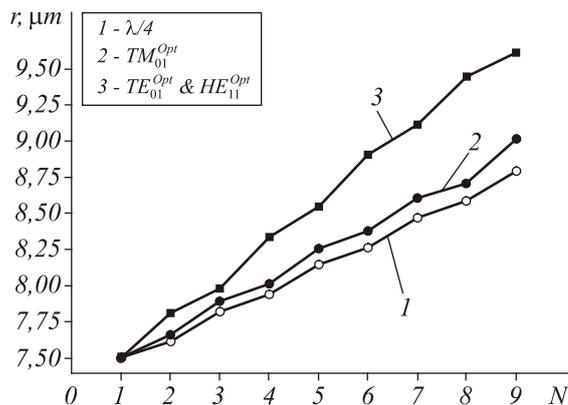


Рис. 9. Распределения координат границ слоев  $r_i$  четвертьволновой и оптимизированных структур

Таким образом, соединив гибкость, простоту и универсальность ГА с точностью метода многомерной минимизации, удалось создать метод, который

быстро и эффективно решает задачу оптимизации брэгговского световода.

В заключение автор выражает признательность профессору А.Н. Малову за проявленный к работе интерес и плодотворные дискуссии.

### *Литература*

1. Holland J.H. Adaptation in Natural and Artificial Systems // Cambridge, MA: The M.I.T. Press, 1975.
2. Yeh P., Yariv A., Marom E. Theory of Bragg fiber // J. Opt. Soc. Am., 1978. Vol. 68. P. 1196-1201.
3. Бирюков А.С., Богданович Д.В., Дианов Е.М. Брэгговские волоконные световоды: основные методы исследования // Фотон-Экспресс, 2005. №6. С. 72-76.
4. Николаев В.В., Соколовский Г.С., Калитеевский М.А. Брэгговские отражатели для цилиндрических волн // Физика и техника полупроводников, 1999. Т. 33. В. 2. С. 174-179.
5. Press W.H. et al. Numerical recipes in Fortran 77: the art of scientific computing // 2nd ed., Cambridge University Press, 1997. P. 406-413.
6. Xu Y., Yariv A., Fleming J.G., Lin S.Y. Asymptotic analysis of silicon based Bragg fibers // Opt. Express 2003. Vol. 11. P. 1039-1049.
7. Борн М., Вольф Э. Основы оптики // М.: Наука, 1970. С. 95.
8. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы // под ред. Курейчика В.М. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Физматлит, 2006.

## **APPLICATION OF A GENETIC ALGORITHM IN THE OPTIMIZATION PROBLEM OF A BRAGG OPTICAL FIBER STRUCTURE**

*D.V. Bogdanovich<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Moscow Engineering Physics Institute (National Research Nuclear University), Moscow, Russia*

### **Abstract:**

A hollow-core Bragg optical fiber structure is optimized using a genetic algorithm with respect to the maximum light reflection from a multilayered shell. A new method and its main findings are briefly summarized.

**Keywords:** Bragg optical fiber, genetic algorithm, multilayered shell

**Citation:** Bogdanovich DV. Application of a genetic algorithm in the optimization problem of a Bragg optical fiber structure [In Russian]. Computer Optics 2007; 31(2): 34-38.

**Acknowledgements:** The author is deeply indebted to Professor A.N. Malov for his fruitful discussions and his enthusiasm for work.

### **References:**

- [1] Holland JH. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Cambridge, MA: The M.I.T. Press, 1975.
- [2] Yeh P, Yariv A, Marom E. Theory of Bragg fiber. J. Opt. Soc. Am., 1978; 68: 1196-1201.
- [3] Biryukov AS, Bogdanovich DV, Dianov EM. Bragg optical fibers: the main research methods [In Russian]. Photon-Express 2005; 6: 72-76.
- [4] Nikolaev VV, Sokolovskii GS, Kaliteevski MA. Bragg reflectors for cylindrical waves [In Russian]. Semiconductors 1999; 33(2): 174-179.
- [5] Press WH et al. Numerical recipes in Fortran 77: the art of scientific computing. 2nd ed. Cambridge University Press, 1997: 406-413.
- [6] Xu Y, Yariv A, Fleming JG, Lin SY. Asymptotic analysis of silicon based Bragg fibers. Opt. Express 2003; 11: 1039-1049.
- [7] Born M, Wolf E. Principles of Optics [in Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher, 1970; 95.
- [8] Gladkov LA, Kureichik VV, Kureichik VM. Genetic algorithms [In Russian]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow: "Fizmatlit" Publisher, 2006.