

УДК 004.021:535.345.673

**СИНТЕЗ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ**

Е.Н. Котликов, В.Б. Шалин, А.Н. Тропин

Представлен новый подход к решению задач проектирования многослойных оптических покрытий с использованием эволюционных стратегий на основе генетических алгоритмов. Предложен способ кодирования альтернативных решений, а также разработаны генетические операторы для реализации простого генетического алгоритма. На примере проектирования 3-, 5- и 7-слойных хроматических просветляющих покрытий показаны возможности предложенного метода синтеза. Исследованы скорости сходимости процедур от входных функциональных параметров.

**Ключевые слова:** генетический алгоритм, генетические операторы, оптические покрытия, метод синтеза.

**Введение**

Функционирование подавляющего большинства современных оптических и оптико-электронных систем невозможно без использования оптических покрытий. Для проектирования многослойных оптических покрытий в основном используется подход, основанный на минимизации оценочной функции – функции качества [1]. Основные трудности при такой постановке задачи конструирования оптических покрытий связаны с многоэкстремальностью функции качества, подлежащей минимизации.

Детальный анализ современного состояния задач, связанных с проектированием многослойных оптических покрытий, показывает, что в настоящее время прослеживается тенденция к разработке таких алгоритмов проектирования, которые не дают единственное квазиоптимальное решение, а находят набор альтернативных решений, с заданной точностью удовлетворяющих требованиям [2]. Затем из полученного набора решений с применением того или иного критерия пригодности выбирается наиболее подходящая структура покрытия. Такими критериями, например, могут служить результаты исследования воспроизводимости спектральных характеристик покрытий [3], анализ устойчивости [4] или результаты так называемого предпроизводственного анализа [5].

Получившие развитие в последнее время генетические алгоритмы (ГА) применяются в задачах многопараметрической оптимизации и проектирования в различных областях науки и техники. Применительно к задачам оптимизации и проектирования, в том числе и оптических покрытий, основное отличие этих методов заключается в том, что в процессе нахождения оптимального решения нет необходимости вычислять производные функции качества, что существенно сказывается на быстродействии и эффективности алгоритмов. Кроме этого, отличительной чертой алгоритмов, в основе функционирования которых лежат эволюционные стратегии и генетические алгоритмы, является то обстоятельство, что на каждом шаге (итерации) уже используется набор (популяция) альтернативных решений. В основе работы генетических алгоритмов лежит моделирование некоторых механизмов популяционной генетики: манипулирование хромосомным набором при формировании генотипа новой особи путем наследования участков хромосомных наборов родителей (кроссинговер), случайное изменение генотипа, известное в природе как мутация. Важным механизмом, заимствованным у природы, является процедура естественного отбора, направленная на улучшение от поколения к поколению приспособленности членов популяции путем большей способности к «выживанию» особей, обладающих определенными признаками.

Задачи исследования заключались в адаптации генетических алгоритмов многопараметрической оптимизации, а также в разработке и исследовании эффективных генетических операторов для решения задач проектирования многослойных оптических покрытий.

**Особенности использования генетических операторов при проектировании оптических покрытий**

Обычно в структуре данных генетического алгоритма альтернативное решение выражается в виде символического представления – хромосома. Как правило, хромосома – это битовая строка, однозначно определяющая соответствующее ей альтернативное решение. Каждая хромосома представляет собой набор подкомпонентов, называемых генами. Гены располагаются в различных позициях или локусах хромосомы и принимают значения, называемые аллелями. В представлениях с бинарными строками ген – бит, локус – его позиция в строке, аллель – его значение (0 или 1).

Совокупность хромосом на каждом шаге итерационного процесса представляет собой популяцию (набор) особей – альтернативных решений. Работа ГА представляет собой итерационный процесс, который продолжается до тех пор, пока не сформируется заданное число поколений или какой-либо иной

критерий остановки. На каждой итерации ГА популяция решений подвергается действию построенных специальным образом генетических операторов – селекции, одноточечного кроссинговера и мутации.

В качестве оператора селекции наиболее приспособленных решений был выбран отбор на основе колеса рулетки [6]. Его работа организована следующим образом. Для каждого элемента популяции альтернативных решений вычисляется значение функции пригодности. Для случая проектирования оптических покрытий за численное значение функции пригодности в работе принималась величина функции качества [1]. Затем колесо рулетки разбивается на секторы, количество которых равно числу элементов популяции альтернативных решений. Площадь каждого сектора пропорциональна отношению величины функции пригодности данного элемента к суммарному значению функций пригодности всех элементов популяции. Очевидно, что чем больше величина этого отношения, тем больше площадь соответствующего ему сектора на колесе рулетки.

В работе использовался одноточечный оператор кроссинговера (скрещивания) для последовательной системы кодирования альтернативных решений. Одноточечный кроссинговер работает следующим образом. Сначала у пары родительских хромосом случайным образом выбирается одна из  $l-1$  точек разрыва, где  $l$  – количество бит в строке, а точка разрыва – это участок между соседними битами в строке. Обе родительские структуры разрываются на два сегмента по этой точке. Затем соответствующие сегменты различных родителей склеиваются, и получаются два генотипа потомков. Так, например, если один из родителей состоит из 10 нулей, а другой – из 10 единиц, то процесс формирования потомков выглядит следующим образом:

|                   |            |             |   |             |            |                  |
|-------------------|------------|-------------|---|-------------|------------|------------------|
| <i>Родитель 1</i> | 0000000000 | 000~0000000 | → | 111~0000000 | 1110000000 | <i>Потомок 1</i> |
| <i>Родитель 2</i> | 1111111111 | 111~1111111 | → | 000~1111111 | 0001111111 | <i>Потомок 2</i> |

Оператор мутации с некоторой вероятностью изменяет значение гена в хромосоме на любое другое возможное значение. Например, если в хромосоме 1001101010 мутации подвергается ген на позиции 7, то его значение, равное 1, изменяется на 0, что приводит к образованию хромосомы 1001100010. Вероятность мутации обычно очень мала, и именно от нее зависит, будет данный ген мутировать или нет.

### Алгоритм и результаты проектирования

Схема предлагаемого алгоритма для проектирования оптических покрытий показана на рис. 1.

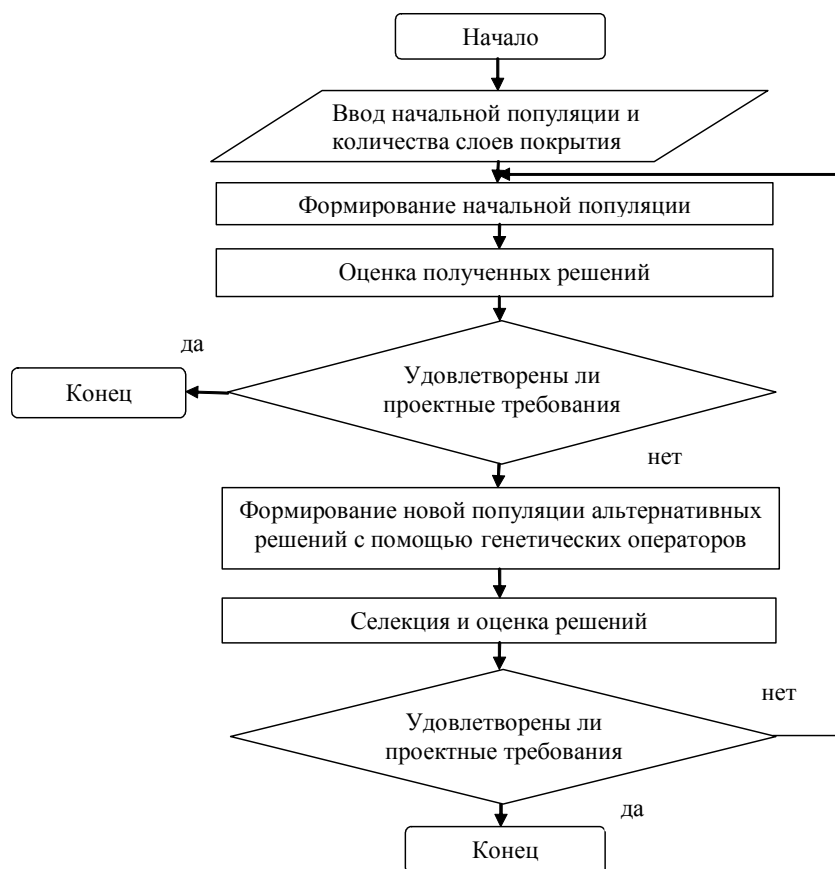


Рис. 1. Алгоритм эволюционного проектирования оптических покрытий

При проектировании оптических покрытий с использованием генетических алгоритмов в работе в качестве переменных величин использовались количества слоев покрытия и толщины для каждого слоя. Количество слоев ограничивается требованиями, предъявляемыми к оптическому покрытию.

Для удобства представления информации об альтернативных решениях пронумеруем слои и соответствующие им толщины слоев, начиная от подложки. Обозначим толщину  $n$ -го слоя как  $d_n$ . Таким образом, для описания альтернативного решения необходимо кодировать, например, для 5-слойного оптического покрытия 5 чисел.

В последовательной системе кодирования альтернативных решений числа, характеризующие конструкцию оптического покрытия, группируются. Структура хромосомы, описывающей альтернативное решение в последовательной системе кодирования, может быть представлена следующим образом:  $d_1d_2d_3d_4d_5$ . Для применения генетических алгоритмов с бинарным кодированием необходимо преобразовать значения параметров в двоичные коды и записать их в соответствующие места хромосомы. Переход из пространства объектов в пространство представлений в работе осуществлялся следующим образом. В зависимости от максимально возможного значения толщина каждого слоя в структуре покрытия кодировалась двоичной строкой – геном длиной 8 бит. Гены последовательно добавлялись друг к другу справа. Таким образом, длина хромосомы альтернативных решений, например, для 3-, 5- и 7-слойных структур составляет 24, 40 или 56 бит соответственно.

Для математического моделирования была выбрана задача проектирования ахроматического просветляющего покрытия. Проектировались 3-, 5- и 7-слойные покрытия с чередующимися слоями с показателями преломления  $n_H=1,80$  и  $n_B=4,0$  на кремниевой подложке с показателем преломления  $n_S=3,50$ . При этом требование к спектральной характеристике структуры заключалось в достижении максимального пропускания в спектральном диапазоне от  $0,8 \lambda_0$  до  $1,2 \lambda_0$ , где  $\lambda_0$  – любая требуемая длина волны в спектральной области прозрачности кремния от 1,3 мкм до приблизительно 8 мкм.

Для реализации простого генетического алгоритма была составлена программа в среде MatLab, реализующая алгоритм, представленный на рис. 1, с использованием которой были спроектированы 3-, 5- и 7-слойные просветляющие покрытия. Поглощение в слоях покрытия и в подложке в рассмотрение не принималось. Толщины слоев покрытий в единицах  $\lambda_0 / 4$  представлены в таблице, а их спектральные характеристики отражения, соответствующие случаю полубесконечной подложки, приведены на рис. 2.

| № слоя           | $n$ | 3     | 5     | 7     |
|------------------|-----|-------|-------|-------|
| 1                | 1,8 | 0,17  | 0,09  | 0,22  |
| 2                | 4,0 | 0,37  | 0,92  | 0,33  |
| 3                | 1,8 | 1,07  | 0,17  | 2,11  |
| 4                | 4,0 | –     | 0,64  | 0,59  |
| 5                | 1,8 | –     | 1,07  | 0,11  |
| 6                | 4,0 | –     | –     | 1,08  |
| 7                | 1,8 | –     | –     | 0,98  |
| Функция качества |     | 0,019 | 0,015 | 0,012 |

Таблица. Структуры просветляющих покрытий

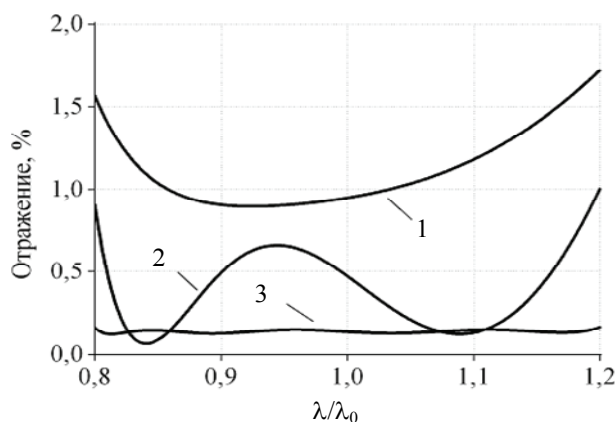


Рис. 2. Спектры отражения покрытий: 1 – 3-слойного; 2 – 5-слойного; 3 – 7-слойного

В работе были исследованы зависимости усредненной функции качества от размера начальной популяции при постоянном количестве итераций, равном 10 (рис. 3), и усредненной функции качества от количества итераций при постоянном размере начальной популяции, равном 20 (рис. 4).

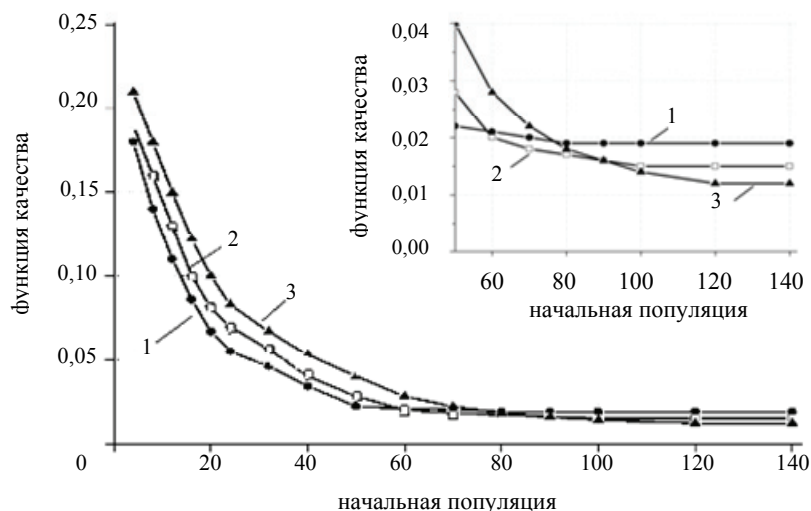


Рис. 3. Зависимость функции качества от размера начальной популяции при постоянном количестве итераций (10 итераций): 1 – 3-слойное покрытие; 2 – 5-слойное покрытие; 3 – 7-слойное покрытие. Вставка на графике показывает в увеличенном масштабе значение функции качества при размерах начальной популяции 50–140

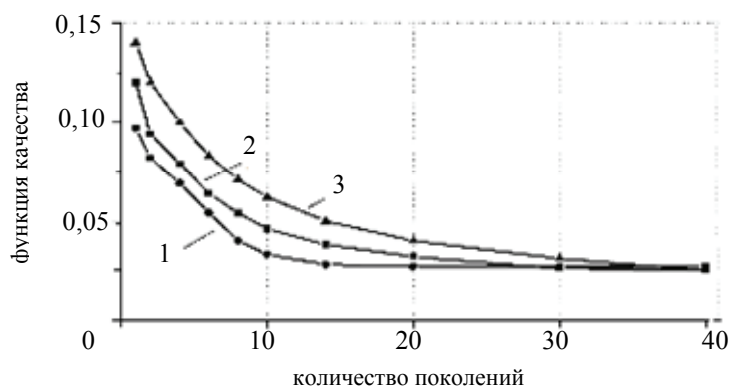


Рис. 4. Зависимость усредненной функции качества от количества поколений (итераций) при постоянном размере начальной популяции (начальная популяция – 20 особей): 1 – 3-слойное покрытие; 2 – 5-слойное покрытие; 3 – 7-слойное покрытие

Анализ зависимости функции качества от размера начальной популяции (рис. 2) показывает, что увеличение размера популяции приводит к уменьшению среднего значения функции пригодности. Это означает, что увеличение размера популяции альтернативных решений при неизменном количестве итераций сопровождается увеличением вероятности отыскания оптимального решения. Для 3-слойного покрытия скорость сходимости алгоритма выше, чем для 5- и 7-слойных покрытий. Это обстоятельство обусловлено наличием меньшего количества локальных экстремумов и, как следствие, большей вероятностью отыскания глобального экстремума. Однако сама величина функции качества оптимального решения тем больше, чем меньше количество слоев в покрытии. В то же время полученные зависимости функции качества от количества итераций показывают (рис. 3), что увеличение количества итераций генетического алгоритма также приводит к уменьшению среднего значения функции качества. При этом видно, что для каждого покрытия есть свое оптимальное количество итераций. Так, например, для 3-слойного просветляющего покрытия достаточно 15 повторений алгоритма, чтобы функция пригодности достигла насыщения, т.е. было найдено оптимальное решение.

#### Заключение

В работе на примерах конструирования 3-, 5- и 7-слойных ахроматических просветляющих покрытий с применением простого генетического алгоритма продемонстрированы возможности использования эволюционных стратегий поиска и генетических алгоритмов для решения задач проектирования многослойных оптических покрытий. Исследованы зависимости скорости сходимости процедур от размера популяции альтернативных решений и количества итераций. Проведение подобных исследований сходимости рассмотренной поисковой стратегии позволит в дальнейшем построить оптимальным образом соответствующие эволюционные алгоритмы проектирования оптических покрытий.

Дальнейшие изыскания по тематике работы, по всей видимости, будут связаны с разработкой и исследованием новых эффективных генетических операторов кроссинговера и мутации, а также с исследованием символьных моделей отличных от традиционной, например, кодировки на основе рефлексивного кода Грея, позволяющих манипулировать более короткими хромосомными наборами.

#### **Литература**

1. Vaumeister P. Design of Multilayer Filters by Successive Approximations // J. Opt. Soc. Amer. – 1958. – V. 48. – P. 955–957.
2. Тихонравов А.В., Трубецков М.К. Современное состояние и перспективы развития методов проектирования многослойных оптических покрытий // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74. – № 12. – С. 66–73.
3. Бальшев К.В., Путилин Э.С., Старовойтов С.Ф. Исследование воспроизводимости выходных параметров многослойных диэлектрических систем во время изготовления // Оптический журнал. – 1998. – Т. 65. – № 3. – С. 39–43.
4. Котликов Е.Н., Тропин А.Н. Критерий устойчивости спектральных характеристик многослойных оптических покрытий // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76. – № 3. – С. 60–64.
5. Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K. Computational manufacturing as a bridge between design and production // Applied Optics. – 2005. – V. 44. – № 32. – P. 6877–6884.
6. Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. – 242 с.

- Котликов Евгений Николаевич** – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой, [ekotlikov@mail.ru](mailto:ekotlikov@mail.ru)
- Шалин Валентин Борисович** – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, студент, [midgard\\_m11@yahoo.com](mailto:midgard_m11@yahoo.com)
- Тропин Алексей Николаевич** – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кандидат физ.-мат. наук, старший преподаватель, [tropal@mail.ru](mailto:tropal@mail.ru)