

РАСЧЕТ КОМБИНИРОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ГОЛОВОК ДЛЯ ЧТЕНИЯ И ЗАПИСИ ЦИФРОВЫХ ДИСКОВ НЕСКОЛЬКИХ ФОРМАТОВ

Ежов Е. Г., Грейсух Г. И., Степанов С. А.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

Аннотация

Представлена псевдолоучевая методика получения исходных решений при проектировании оптических головок записи и считывания информации с цифровых дисков нескольких форматов. Ее эффективность продемонстрирована на примере расчета оптической системы, предназначенной для записи и считывания информации с цифровых дисков CD и DVD форматов.

Введение

Появление новых высокочастотных форматов записи информации на оптических дисках определяет актуальность работ по синтезу оптических систем комбинированных pick-up головок, работающих с дисками любого из двух или более форматов. Схемы таких систем, как правило, включают несколько каналов и один общий высокоапертурный объектив, фокусирующий лазерное излучение той или иной длины волны на информационную поверхность через подложку диска [1, 2]. Толщины подложек дисков разных форматов существенно отличаются и для надежной работы комбинированного устройства записи/считывания система объектив – плоскопараллельная пластина (СОП) с дискретно изменяющейся толщиной должна быть свободна от всех аберраций, ограничивающих качество фокусировки на оси и вблизи нее, т.е. от сферической аберрации и комы, на всех длинах волн, соответствующих комбинируемым форматам. Синтез СОП, удовлетворяющих этим требованиям с использованием даже весьма мощных универсальных САПР оптических систем, таких как «ОПАЛ» Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики или «ZEMAX» Focus Software, Inc. (США), весьма трудоемок, т.к. требует «хороших» исходных решений. В данной работе описана методика, позволяющая получать такие решения, и продемонстрирована ее эффективность.

Формирование банка и выбор исходных решений

Исходные решения для последующей оптимизации выбираются из банка наборов конструктивных параметров, обеспечивающих заданные габаритные соотношения и требуемую коррекцию аберраций третьего и пятого порядков. Банк набирается следующим образом. Из физических и технологических соображений выбираются диапазоны допустимых значений кривизны преломляющих поверхностей, перепадов показателей преломления неоднородных материалов, пространственных частот дифракционных линз (ДЛ), других конструктивных параметров, а также шаг по каждому из них. Здесь рассматривается самый общий случай использования разработчиком для построения объектива однородных, градиентных и дифракционных элементов.

По заданному минимально допустимому воздушному промежутку между объективом и диском для

начальных значений вышеперечисленных параметров в параксиальном приближении определяются фокусное расстояние объектива и воздушный промежуток на всех длинах волн. Затем по диаграммам рассеяния псевдолоучей, ход которых через оптическую систему на каждой из длин волн рассчитывается в приближении заданного порядка малости, вычисляются коэффициенты всех аберраций третьего и пятого порядков [3, 4]. Далее выбранные коэффициенты и, в частности, коэффициенты сферической аберрации третьего и пятого порядков, комы третьего и круговой комы пятого порядков обнуляются или доводятся до приемлемо низкого уровня. Данная операция выполняется путем решения соответствующих компенсационных уравнений относительно эффективных коррекционных параметров.

В случае преломляющей асферической поверхности, описываемой уравнением

$$z(\rho) = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - (1 - \varepsilon^2)c^2\rho^2}} + \sum_{p=1} \alpha_p \rho^{2p}, \quad (1)$$

такими коррекционными параметрами являются полиномиальные коэффициенты α_2 , α_3 и эксцентриситет ε . В случае градиентных сред с радиальным распределением показателя преломления, описываемым выражением

$$n(\rho) = \sum_{p=0} n_p \rho^{2p}, \quad (2)$$

это коэффициенты радиального градиента n_2 и n_3 . Наконец, в случае ДЛ, пространственная частота микроструктуры которой изменяется по закону

$$\Omega(\rho) = \frac{1}{\pi} \sum_{p=1} p A_p \rho^{2p-1}, \quad (3)$$

это коэффициенты асферической деформации микроструктуры A_2 и A_3 .

В уравнении (1) c – кривизна асферической преломляющей поверхности при ее вершине, а ρ во всех трех вышеприведенных уравнениях – расстояние от оси системы.

При невозможности обнуления или уменьшения до приемлемого уровня выбранных аберрационных коэффициентов, т.е. при отсутствии решения, один из фиксированных конструктивных параметров получает приращение, равное выбранному шагу и процедура повторяется. Если решение найдено, его физическая реализуемость проверяется путем расче-

та хода реальных лучей, а качество фокусировки при этом оценивается с помощью лучевых функций Q_1 и Q_4 имеющих вид:

$$Q_1 = \frac{1}{N\delta_R} \sum_{i=1}^N \Delta r_i, \quad (4)$$

$$Q_4 = \delta_R \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{(\Delta r_i + \delta_R)^2}}, \quad (5)$$

где δ_R – радиус диска Эйри; Δr_i – расстояние между точкой пересечения i -го луча с плоскостью изображения и гауссовым изображением; N – число лучей, исходящих из бесконечно удаленной точки и равномерно заполняющих входной зрачок [4, 5].

Адекватной оценкой качества найденного решения может считаться максимальное значение числовой апертуры системы в пространстве изображений, при которой она формирует изображение еще близкое к дифракционно-ограниченному, т.е. при $Q_1 \leq 0,55$ и $Q_4 \geq 0,7$. Целесообразность одновременного использования двух лучевых функций оценки качества обусловлена нижеследующим. При требуемых весьма высоких апертурах остаточные aberrации содержат большие по модулю составляющие многих порядков и в условиях плохой сходимости aberrационного разложения совместное использование двух лучевых функций существенно повышает достоверность оценки качества. Использование, несомненно, более надежного энергетического критерия $E(\delta_R) \geq 0,73$, контролирующего относительную энергию, приходящуюся на центральный кружок дифракционного изображения точки радиусом δ_R [4, 5], на данном этапе исследования

не представляется возможным из-за ресурсоемкости его вычислений.

Найденное решение вместе с максимальным значением числовой апертуры заносится в банк решений, после чего соответствующий конструктивный параметр получает приращение, равное выбранному шагу и процедура повторяется. После прохода по всем диапазонам свободных конструктивных параметров и составления банка начальных решений производят отбор наиболее перспективных из них, с точки зрения последующей оптимизации. При этом, в случае близких значений максимальной числовой апертуры, предпочтение следует отдать решениям с минимальными по модулю теми из коэффициентов рядов (1)–(3), которые, не влияя на параксиальные соотношения, определяют aberrационные характеристики элементов. Это, как показала практика расчетов, позволяет добиться требуемых характеристик при наименьшей асферизации преломляющих поверхностей и достаточно гладких функциях распределения пространственной частоты микроструктуры ДЛ и показателя преломления неоднородной среды. Выбранные решения подвергаются оптимизации по коэффициентам рядов (1)–(3), не влияющим на параксиальные характеристики и ранее устраненные aberrации третьего и пятого порядков.

CD/DVD система объектив–цифровой диск

В качестве примера использования предлагаемой методики проектирования приведем результаты расчета и анализа СОП, предназначенной для записи и считывания информации с дисков форматов CD и DVD. Основные параметры этих форматов, которые должны быть учтены при расчете системы (см., например, [6]), представлены в таблице.

Формат	Числовая апертура NA'	Угловое поле зрения 2ω , град.	Длина волны λ , мкм	Толщина подложки диска d_D , мм	Материал подложки диска
CD	0,51	0,7	0,798	1,2	Поликарбонат
DVD	0,65		0,66	0,6	

Для надежной работы накопителя, при заданных апертурах и в пределах указанного полевого угла, система должна фокусировать лазерное излучение в дифракционно-ограниченное пятно. Кроме того, предпочтительно, чтобы на обеих длинах волн объектив работал с бесконечно удаленной предметной точкой. Что касается воздушного промежутка между объективом и диском, то технологические требования и возможности системы автофокусировки определяют как минимально допустимое значение этого промежутка d_A , так и его изменение при переходе с одной длины волны на другую Δd_A . И, наконец, из экономических и технологических соображений ясно, что объектив должен содержать минимально возможное число легко тиражируемых элементов, например, литьем или прессованием.

Исходя из вышеперечисленных требований и с учетом типов aberrаций, подлежащих устранению,

была выбрана гибридная схема, включающая ДЛ на поликарбонатной подложке и рефракционную однородную линзу, с двумя асферическими поверхностями, выполненную из того же пластика (рис. 1).

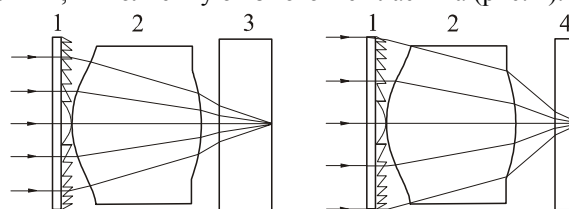


Рис. 1. CD/DVD система объектив – цифровой диск: 1 – дифракционная линза; 2 – рефракционная однородная линза с двумя асферическими поверхностями; 3 – CD диск; 4 – DVD диск

Для выбранной схемы описанный выше поиск исходных решений осуществлялся по кривизнам поверхностей c_1, c_2 и толщине рефракционной линзы d_{RL} .

Воздушный промежуток между ДЛ и рефракционной линзой полагался равным нулю. Эти параметры в совокупности с воздушным промежутком между объективом и диском d_A , заданным на длине волны $\lambda = 0,798$ мкм, однозначно определяют оптическую силу ДЛ и объектива в целом на этой длине волны. При переходе на вторую длину волны $\lambda = 0,66$ мкм пересчитываются оптическая сила ДЛ и воздушный промежуток между объективом и диском. Оптическая сила ДЛ при переходе на короткую длину волны уменьшается, а воздушный промежуток, соответственно, увеличивается.

Выбор диапазона допустимых значений толщины d_{RL} осуществлялся с учетом того, что снизу эти значения ограничены возможностью устранения комы при относительно небольшой асферизации преломляющих поверхностей, а сверху - массогабаритными требованиями. С целью изначального ограничения оптической силы ДЛ рефракционная линза полагалась двояковыпуклой ($c_1 > 0$, $c_2 < 0$), а диапазоны возможных значений их модулей снизу ограничивались допустимым значением параметра Δd_A , а сверху – возможностью обеспечить требуемую числовую апертуру $NA' = 0,65$.

Лучшие из найденных решений, благодаря устранению сферической aberrации третьего и пятого порядков для обеих длин волн, а также комы третьего порядка и круговой комы пятого порядка для $\lambda = 0,66$ мкм, формировали дифракционно-ограниченное пятно в пределах заданного полевого угла при $NA' \leq 0,45$. Последующая их оптимизация по пяти полиномиальным коэффициентам каждой из преломляющих поверхностей и пространственной частоты микроструктуры ДЛ позволила увеличить апертуру и получить конструктивные параметры объективов, удовлетворяющих всем перечисленным требованиям.

Аберрационные характеристики одного из рассчитанных объективов представлены на рис 2. При расчетах предполагалось, что $d_A = 1,3$ мм, а $\Delta d_A = 0,3$ мм. Нормированная интенсивность в дифракционном фокусе (интенсивность Штреля) на обеих длинах волн в пределах полевого угла $0 \leq \omega \leq 0,35^\circ$ не опускается ниже 0,95 (см. рис. 3), а относительная энергия $E(\delta_R)$ превышает 0,81. Напомним, что в случае безабберационного дифракционно-ограниченного изображения относительная энергия $E(\delta_R) = 0,84$ [4, 5].

Заключение

В работе показана возможность и продемонстрирована эффективность использования разработанной авторами псевдодолучевой методики для получения исходных решений при проектировании оптических систем записи и считывания информации с цифровых дисков нескольких форматов.

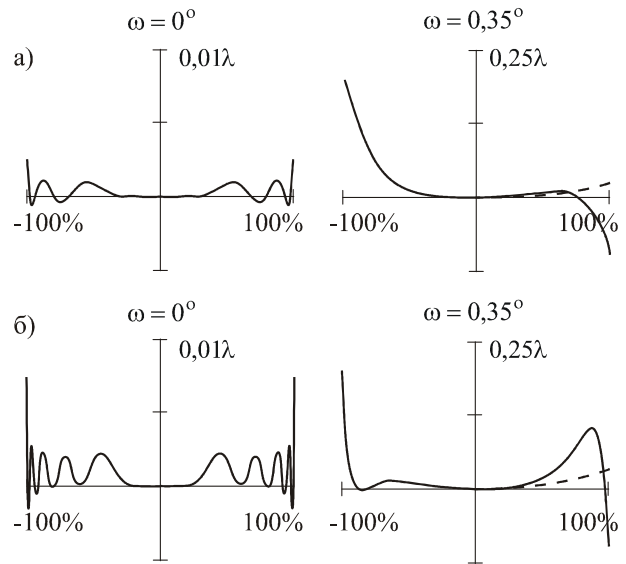


Рис. 2. Графики aberrаций широких наклонных пучков: а) – для $\lambda = 0,798$ мкм, б) – для $\lambda = 0,66$ мкм (сплошная линия – для меридиональной плоскости; штриховая – для сагиттальной плоскости).

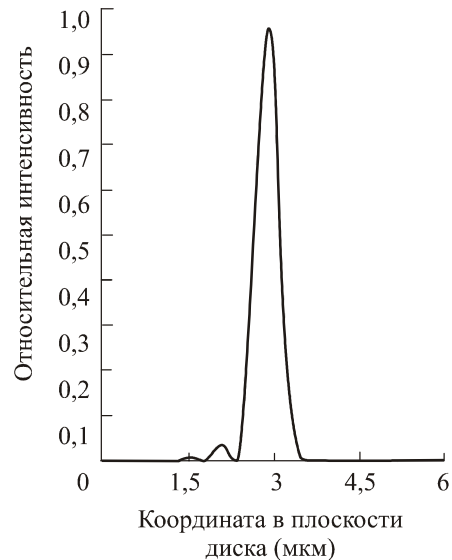


Рис. 3. Распределение интенсивности в центральном сечении дифракционного изображения, формируемого СОП на длине волны $\lambda = 0,66$ мкм при полевым угле $\omega = 0,35^\circ$.

Дальнейшая оптимизация исходных решений может быть осуществлена как с использованием авторских программных продуктов (см., например, [7]), так и коммерческих САПР оптических систем, например, таких как уже упоминавшихся «ОПАЛ» или «ZEMAX».

Благодарность

Авторы выражают благодарность О.В. Рожкову и А.Ф. Ширанкову за инициирование данной работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования РФ и американского фонда CRDF; грант № Y1-P-14-03 в рамках про-

граммы «Фундаментальные исследования и высшее образование».

Литература

1. Ширанков А.Ф., Рожков О.В., Анканов А.Г., Штыков С.А. Рациональное построение оптической системы комбинированной головки для чтения/записи цифровых дисков CD и DVD формата // Сб. трудов VI Международной конференции «Прикладная оптика». Том 3: «Компьютерные технологии в оптике». – СПб, 2004. – С. 103–107.
2. Патенты № TW475065, № TW479252, № US6304541.
3. Грейсух Г.И., Ефименко И.М., Степанов С. А. Оптика градиентных и дифракционных элементов. – М.: Радио и связь, 1990. – 136 с.
4. Greisukh G.I., Bobrov S.T., Stepanov S.A. Optics of diffractive and gradient-index elements and systems. – Bellingham: SPIE Press, 1997. – 414 p.
5. Бобров С.Т., Грейсух Г.И., Туркевич Ю.Г. Оптика дифракционных элементов и систем. - Л.: Машиностроение, 1986. – 223 с.
6. Фролов М.Е., Хорохоров А.М. Ширанков А.Ф. Расчет объектива с микрорельефом для комбинированной оптической головки для чтения и записи CD, DVD дисков // Сб. трудов VI Международной конференции «Прикладная оптика». Том 3: «Компьютерные технологии в оптике». – СПб, 2004. – С. 236–240.
7. Ежов Е.Г. Расчет и моделирование высокоразрешающих градиентных и дифракционно-градиентных объективов: Дис. ... канд. физ.- мат. наук. – Самара, 2001. – 140 с.