

КРИТЕРИИ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛИНЗ ДЛЯ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА

Д. Г. МАКАРОВА

*Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
630108, Новосибирск, Россия
E-mail: Diana_ssga@mail.ru*

Рассмотрена возможность оптимизации процесса формообразования оптических поверхностей для субмиллиметрового диапазона спектра на основе критериев качества изображения, допусков на изготовление (допуск размера, допуск формы, допуск расположения, шероховатость) и трудоемкости для материалов, прозрачных в субмиллиметровом диапазоне спектра (полиэтилена, кварца кристаллического, полиэтилентерефталата, α -сапфира, кремния).

Ключевые слова: технология, формообразование, субмиллиметровый, допуски размеров, допуски формы, допуски расположения, шероховатость, трудоемкость

Классическая технология формообразования оптических поверхностей элементов оптических систем включает в себя заготовительные операции — точение, фрезерование, и окончательные — шлифование грубое, точное и полирование [1]. Эта технология, разработанная для видимого диапазона спектра, применима в инфракрасном диапазоне, но целесообразность ее использования в субмиллиметровом диапазоне (СМД) спектра не обоснована.

На выбор критериев технологии формообразования оптических поверхностей детали в СМД спектра влияют:

- серийность изготовления деталей;
- область „прозрачности“ материала. В отличие от видимого спектра в СМД излучение пропускают оптические материалы с разными физическими свойствами (металлы, кристаллы, стекла, пластики), технологии обработки которых могут различаться;
- физические свойства материалов;
- длины волн, на которых рассчитываются допуски для изготовления оптических деталей, отличаются на три порядка от длин волн видимого диапазона, в котором проводится их контроль.

Как известно, точность изготовления детали определяется:

- 1) допуском размера (радиуса сферической поверхности — Δr , N в линейной мере и интерференционных кольцах соответственно),
- 2) допуском формы (отступление формы поверхности от сферы — Δz , ΔN в линейной мере и интерференционных кольцах соответственно),
- 3) допуском расположения (децентрировка — C),
- 4) шероховатостью (высотой микронеровностей сферической поверхности — R_a или R_z).

Анализ влияния допусков на качество изображения [2] показывает, что первые три определяются параметрами качества изображения (размером абберрационного кружка, концентрацией энергии в пикселе ФПУ и т.д.), а четвертый — максимальным пропусканием излучения конкретного оптического материала.

Существует несколько методов назначения допусков: методы подобия, подобия, прецедентов и расчетный. Последний — наиболее рациональный, а для новых разработок единственно применимый.

Моделирование проведем на примере одиночной линзы при падении на нее параллельного пучка лучей. Линзы из разных оптических материалов при одинаковых оптических параметрах должны иметь одинаковое значение критерия качества изображения, в рассматриваемом случае — RMS (среднеквадратический размер диска Эри). Этот критерий качества изображения используется для систем, размер диска Эри которых больше „дифракционного“ уровня, т.е. рэлеевского.

Выбор материала линзы обусловлен величиной показателя преломления — для $\lambda=200$ мкм из интервала значений $n = 1,5—4$: полиэтилен — 1,5137 [3], полиэтилентерефталат (ПЭТФ, майлар, лавсан) — 1,717 [4], кварц кристаллический — 2,1170 [3], α -сапфир — 3,0770 [5], кремний — 3,4165 [3].

Физические свойства материалов определяют технологии формообразования оптических поверхностей [6].

На первом этапе моделирования проведен расчет радиуса r линз толщиной 5 мм, выполненных из разных материалов и имеющих угол поля зрения 4° , диафрагменное число $K=2,5$) и единое значение критерия качества изображения RMS [7] — 160 мкм для линзы, изготовленной из материала с минимальным значением показателя преломления ($n=1,5137$), т.е. полиэтилена.

Для анализа влияния материала оптической детали на значения допусков при изготовлении ее поверхностей в субмиллиметровом диапазоне спектра проведем моделирование с помощью программы расчета оптических систем „Zemax“. Расчет допусков произведем для двух длин волн $\lambda_1=200$ мкм (реальные допуски) и $\lambda_2=0,6328$ мкм (допуски для производственного контроля), поскольку в настоящее время не существует методов контроля параметров оптической поверхности в СМД спектра.

В табл. 1 приведены расчетные значения допусков на первую и вторую преломляющие поверхности линзы из полиэтилена для λ_1 и λ_2 . Из таблицы видно, что на разных длинах волн допуски в линейных величинах одинаковы.

Таблица 1

Поверхность	r , мм	Δr_{\min} , мм	Δr_{\max} , мм	C_x , мм	C_y , мм
1 λ_1	59,75	-1,14	1,42	6,43	6,43
2 λ_1	-355,73	-61,24	38,86	26,76	26,80
1 λ_2	59,75	-1,1395	1,4244	6,4471	6,4471
2 λ_2	-355,73	-61,24	38,856	26,769	26,769

Отступления формы поверхности от сферы (ΔN) рассчитываются в интерференционных кольцах [8, 9], для пересчета в линейные величины следует воспользоваться соотношениями

$$\rho_x = \frac{C_x}{r_{\max}}, \quad \rho_y = \frac{C_y}{r_{\max}}, \quad \rho = \sqrt{\rho_x^2 + \rho_y^2}, \quad (1)$$

$$\Delta z = \frac{\lambda \Delta N}{4} (\rho^4 + \rho_y^2), \quad (2)$$

где C_x и C_y — значения децентрировки по координатам x и y ; r_{\max} — радиус входного зрачка линзы.

Шероховатость поверхности R_a должна обеспечивать минимальное рассеяние падающего потока. В работе используются соотношения, предложенные в [10], которые связывают коэффициент отражения от поверхности (R) с длиной волны излучения (λ), также применяются результаты работ [11, 12]:

$$R = R_0 \left(1 - 8\pi^3 R_a^2 / \lambda^2 \right), \quad (3)$$

где R_0 — коэффициент отражения от полированной поверхности.

Значение R_0 определяется коэффициентом Френеля и не зависит от шероховатости. Таким образом, коэффициент отражения от шероховатой поверхности зависит от высоты микронеровности и длины волны излучения: для определения минимального значения R_a положим в (3) выражение в скобках равным нулю

$$1 - 8\pi^3 R_a^2 / \lambda^2 = 0,$$

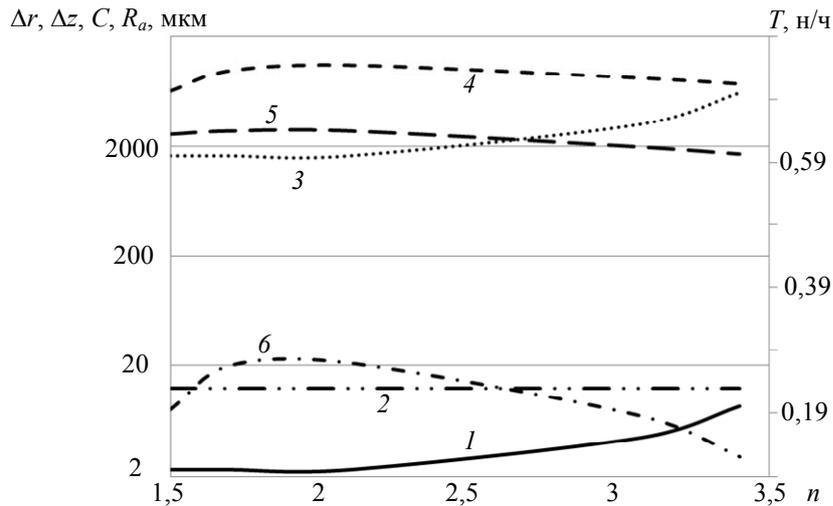
откуда

$$R_a = \sqrt{\lambda^2 / 8\pi^3}.$$

Для граничных значений длин волн субмиллиметрового диапазона при $\lambda=100$ мкм $R_a = 6,3$ мкм, а при $\lambda=1000$ мкм — $R_a = 63,5$ мкм. Для рассматриваемого случая при $\lambda=200$ мкм $R_a = 12,5$ мкм.

При выборе технологии формообразования оптической поверхности линзы необходимо учитывать трудоемкость изготовления T в нормочасах. Значения допусков на конструктивные параметры определяются трудоемкостью: с ужесточением допуска трудоемкость увеличивается.

На рисунке приведены графики допусков и норм времени для изготовления первой поверхности линз из разных материалов (1 — T для $R_a = 12,5$ мкм; 2 — $\Delta z_1 = 12,5$ мкм; 3 — T для $R_a = 0,01$ мкм; 4 — C ; 5 — ΔR_1 ; 6 — R_a).



Как следует из кривых 1 и 3, технологии формообразования поверхностей для оптических материалов с большим показателем преломления примерно в два раза более трудоемки, чем для материалов с меньшим показателем преломления.

Укрупненные нормы времени техпроцессов определялись согласно работе [13]. Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметр	Полиэтилен	ПЭТФ	Кварц кристаллический	α-Сапфир	Кремний
n_{λ_1}	1,5137	1,7170	2,1170	3,0770	3,4165
r_1 , мм	59,75	68,03	83,50	95,76	96,12
r_2 , мм	-355,73	1287,60	320,53	171,41	153,74
S'_f , мм	94,50	94,2	94,73	94,85	94,76
f' , мм	99,99	100,00	99,98	100,00	99,99
Радиус диска Эри, мкм	1173	1189	1204	1213	1213
RMS, мкм	160	159	160	161	160

Параметр	Полиэтилен	ПЭТФ	Кварц кристаллический	α -Сапфир	Кремний
Δr_1 , мкм	2564	2741	2742	1964	1694
N_{λ_1} , о.е.	0,8	0,8	0,6	0,3	0,3
N_{λ_2} , о.е.	248	276	190	104	89
Δz_1 , мкм	8	20	21	7	3
ΔN_{λ_1} , о.е.	1,0	0,8	0,6	0,3	0,3
ΔN_{λ_2} , о.е.	310	264	183	102	87
C , мкм	6428	9806	11021	8414	7453
Δr_2 , мкм	100096	216405	47156	6982	4797
$N_{2\lambda_1}$, о.е.	0,8	0,8	0,6	0,3	0,3
$N_{2\lambda_2}$, о.е.	260	288	195	105	90
Δz_2 , мкм	675	269200	764	12	7
$\Delta N_{2\lambda_1}$, о.е.	0,9	0,8	0,5	0,3	0,3
$\Delta N_{2\lambda_2}$, о.е.	296	249	177	100	86
C , мкм	26769	107520	31985	11758	9502
T , н/ч, для $R_d=12,5$ мкм	0,1	0,1	0,1	0,15	0,2
T , н/ч, для $R_d=0,01$ мкм	0,6	0,6	0,6	0,65	0,7
Вид материала	Термопласт	Термопласт	Кристалл	Кристалл	Поликристалл
Техпроцесс формообразования поверхности	Литье	Литье	Алмазное точение	Алмазное точение	Точение

В заключение настоящей статьи можно сделать следующие выводы:

— разработка оптической элементной базы для субмиллиметрового диапазона спектра требует оптимизации технологии формообразования преломляющих поверхностей с учетом свойств материалов и трудоемкости производства;

— при равенстве значений критериев качества изображения основным показателем технологии формообразования является трудоемкость изготовления детали;

— результаты работы позволяют выбрать материал и технологию изготовления преломляющих поверхностей (например, на первом этапе формообразования поверхностей операции точение, фрезерование и горячее прессование);

— учет длины волны излучения при обеспечении минимального отражения от шероховатой поверхности позволяет расширить значения допуска на изготовление;

— оптимизация технологии формообразования поверхностей при обоснованном исключении из техпроцесса трудоемких операций (например, полирования и тонкого шлифования), при обеспечении требований к качеству изображения, позволяет снизить трудоемкость изготовления оптических деталей в СМД спектра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Окатов М. А., Байгожину А. и др. Справочник технолога-оптика. СПб: Политехника, 2004. 679 с.
2. Сокольский М. Н. Допуски и качество оптического изображения. Л.: Машиностроение, 1989. 221 с.
3. Ефремов В.С., Макарова Д. Г. Применение дисперсионных формул материалов в субмиллиметровом диапазоне длин волн // Вестн. СГГА. 2012. № 1(17). С. 122—132.
4. Золотарев В. М., Морозов В. Н., Смирнов Е. В. Оптические постоянные природных и технических сред: Справочник. Л.: Химия, 1984. 216 с.
5. Wakaki M., Kudo K., Shibuya T. Physical Properties and Data of Optical Materials. BocaRaton, London, NJ: CRC Press, 2007. 561 p.

6. Макарова Д. Г. Влияние показателя преломления материала на коррекционные свойства линзы в субмиллиметровом диапазоне спектра // Междунар. науч. конф. „СибОптика–2013“. Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. С. 12—15.
7. Ефремов В. С., Макарова Д. Г. Коррекционные свойства полевого компенсатора астрообъектива в субмиллиметровом диапазоне длин волн // Сб. матер. VIII междунар. науч. конф. „ГЕО-Сибирь 2012“. Т. 1. „Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии“. 10—20 апреля 2012 г. С. 116—120.
8. Malacara D. Optical Shop Testing. NY: John Wiley & Sons, Inc., 1985. 773 p.
9. Optical Design Program „ZEMAX“ [Electronic resource]: <www.zemax.com help/Manual.pdf>.
10. Bennett H. E., Porteus J. O. Relation between surface roughness and specular reflectance at normal incidence // JOSA. 1961. Vol. 51, N 2. P. 123—129.
11. Хусу А. П., Витенберг Ю. Р., Пальмов В. А. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход). М.: Наука, 1975. 344 с.
12. Тымкул В. М., Овчинников С. С., Кузнецов М. М. Оптический метод контроля шероховатости поверхности // Междунар. науч. конф. „СибОптика–2013“. Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. С. 282—285.
13. Соболев С. Ф., Кузьмин Ю. П. Методические указания по разработке технологических процессов изготовления деталей механической обработкой. СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. 118 с.

Сведения об авторе

Диана Георгиевна Макарова — аспирант; Сибирский государственный университет геосистем и технологий; кафедра наносистем и оптотехники; E-mail: Diana_ssga@mail.ru

Рекомендована кафедрой
наносистем и оптотехники

Поступила в редакцию
26.09.15 г.

Ссылка для цитирования: Макарова Д. Г. Критерии выбора технологии формообразования оптических поверхностей линз для субмиллиметрового диапазона спектра // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 2. С. 159—163.

SELECTION CRITERIA FOR TECHNOLOGY OF OPTICAL SURFACE FORMATION FOR SUBMILLIMETER WAVELENGTH LENS

D. G. Makarova

Siberian State University of Geosystems and Technology,
630108, Novosibirsk, Russia
E-mail: Diana_ssga@mail.ru

The possibility to optimize lens optical surface formation for submillimeter spectrum is considered. The presented analysis is based on image quality criteria and takes into account the manufacturing tolerances (dimensional tolerance, form tolerance, position tolerance, allowable roughness) and the labor costs for materials transparent in the submillimetre range (polyethylene, crystal quartz, polyethylene terephthalate, α -sapphire, silicon).

Keywords: technology, forming, submillimeter, dimensional tolerance, form tolerance, position tolerances, tolerance to roughness, labor costs.

Data on author

Diana G. Makarova — Post-Graduate Student; Siberian State University of Geosystems and Technology, Department of Nanosystems and Optical Devices;
E-mail: Diana_ssga@mail.ru

For citation: Makarova D. G. Selection criteria for technology of optical surface formation for submillimeter wavelength lens // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2016. Vol. 59, N 2. P. 159—163 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-2-159-163