



**Національний технічний
університет України
«Київський
Політехнічний
Інститут»**



В. Г. Колобродов, Г. С. Тимчик

**Проектування дифракційних
оптичних елементів і систем**



Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

В. Г. Колобродов
Г. С. Тимчик

Проектування дифракційних оптичних елементів і систем

Підручник

*Затверджено Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України
як підручник для студентів вищих навчальних закладів,
які навчаються за напрямом підготовки
«Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології»
та «Опtotехніка»*

Київ
НТУУ «КПІ»
2013

УДК 681.7.06(075.8)
ББК 34.96я73
К61

Гриф надано Міністерством освіти і науки,
молоді та спорту України
(Лист № 1/11-15271 від 01.10.2012 р.)

Рецензенти:

О. В. Ангельський, д-р фіз.-мат. наук, проф.,
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

Л. В. Поперенко, д-р фіз.-мат. наук, проф.,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка

С. О. Воронов, д-р техн. наук, проф.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

Відповідальний редактор

І. В. Максимчук, канд. техн. наук, доц.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

Колобродов В. Г.

К61 Проектування дифракційних оптичних елементів і систем [Текст] :
підруч. / В. Г. Колобродов, Г. С. Тимчик. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. –
196 с. – Бібліогр.: с. 189–193. – 500 пр. (перший запуск 1–80 пр.)
ISBN 978-966-622-563-7

Викладено фізичні основи дифракційної оптики, методи проектування дифракційних оптичних елементів у наближенні геометричної оптики та скалярної теорії дифракції. Показано технології виготовлення дифракційних оптичних елементів і наведено приклади їх застосування в офтальмології, вимірювальних системах та інших пристроях. Розглянуто операторний метод аналізу когерентних оптичних систем. Для практичного засвоєння матеріалу значну увагу приділено розв'язанню прикладів, що виникають під час дослідження перетворення електромагнітного поля в оптичних системах.

Для магістрів напряму підготовки «Опtotехніка» спеціальностей «Фотоніка та оптоінформатика», «Оптико-електронне приладобудування», «Лазерна та оптоелектронна техніка». Може бути корисний розробникам оптичних систем різного призначення.

УДК 681.7.06(075.8)
ББК 34.96я73

ISBN 978-966-622-563-7

© В. Г. Колобродов, Г. С. Тимчик, 2013
© НТУУ «КПІ» (ПБФ), 2013

ЗМІСТ

Вступ	6
Розділ 1. Дифракційні оптичні елементи	8
1.1. Фізичні основи дифракційної оптики	8
1.1.1. Принцип роботи і класифікація дифракційних оптичних елементів	8
1.1.2. Дифракційна ефективність амплітудних і фазових дифракційних оптичних елементів	14
1.1.3. Основні характеристики дифракційних оптичних елементів	15
1.1.4. Обернена задача дифракційної оптики	18
1.2. Габаритний та енергетичний розрахунки дифракційних лінз	20
1.2.1. Габаритний розрахунок	20
1.2.2. Енергетичний розрахунок	22
1.3. Розрахунок дифракційних оптичних елементів в наближенні геометричної оптики	23
1.3.1. Загальні положення	23
1.3.2. Проектування кіноформу в параксіальному наближенні	24
1.3.3. Фазова лінза, яка працює у збіжному світловому пучку	31
1.3.4. Проектування асферичних лінз Френеля зі сферичним профілем	34
1.4. Розрахунок дифракційних оптичних елементів у наближенні теорії дифракції	38
1.4.1. Ітеративні методи розрахунку дифракційних оптичних елементів	39
1.4.2. Проектування дифракційних оптичних елементів методом послідовної ітерації – збіжності	42
1.4.3. Проектування дифракційних оптичних елементів, які формують радіально-симетричний розподіл освітленості	47
1.5. Багатопорядкові дифракційні лінзи	53

1.6. Дифракційно-рефракційні мультифокальні інтраокулярні лінзи	55
1.6.1. Біфокальні дифракційно-рефракційні інтраокулярні лінзи	55
1.6.2. Дифракційно-рефракційні лінзи з трикутним профілем	58
1.6.3. Дифракційно-рефракційні лінзи з прямокутним профілем	59
1.6.4. Дифракційна інтраокулярна лінза	60
1.7. Технологія виготовлення дифракційних оптичних елементів	63
1.7.1. Основні положення	63
1.7.2. Комп'ютерне проектування дифракційних оптичних елементів	64
1.7.3. Технології виготовлення дифракційних оптичних елементів	66
1.7.4. Порівняння методів виготовлення дифракційних оптичних елементів	69
1.8. Особливості застосування дифракційних лінз	71
1.8.1. Окулярні рефракційно-дифракційні лінзи	71
1.8.2. Застосування дифракційної оптики у вимірювальній техніці	75
1.8.3. Вимірювання основних характеристик дифракційних лінз	81
1.9. Приклади розрахунку параметрів фракційних оптичних елементів	86
1.10. Задачі для самостійного розв'язання	91
Розділ 2. Когерентні спектроаналізатори	93
2.1. Фізичні основи роботи когерентних спектроаналізаторів	93
2.1.1. Узагальнені оптичні схеми спектроаналізаторів	93
2.1.2. Функціональні перетворення в оптичних системах	96
2.2. Проектування спектроаналізаторів	101
2.2.1. Енергетичний розрахунок когерентного оптичного спектроаналізатора	101

2.2.2. Роздільна здатність когерентного оптичного спектроаналізатора	108
2.3. Особливості побудови когерентних систем обробки інформації	115
2.3.1. Похибки складання та юстирування когерентного оптичного спектроаналізатора	115
2.4. Застосування спектроаналізаторів	133
2.4.1. Дослідження мікрodefектів відбивних поверхонь і прозорих плівок за допомогою когерентного оптичного спектроаналізатора	134
2.4.2. Визначення пористості тонких волоконних матеріалів за оптичним коефіцієнтом прозорості	138
2.4.3. Диференціювання спектра сигналів за допомогою когерентного оптичного спектроаналізатора	143
2.4.4. Дослідження геометричних параметрів просторових квазіперіодичних структур за допомогою когерентного оптичного спектроаналізатора	148
2.4.5. Спектральні методи контролю статистичних характеристик штрихових квазіперіодичних структур	154
2.5. Приклади розрахунку спектроаналізаторів	160
2.6. Задачі для самостійного розв'язання	165
Розділ 3. Операторний метод аналізу когерентних оптичних систем	168
3.1. Узагальнена функція Френеля	168
3.2. Операторне подання когерентної оптичної системи	172
3.3. Методика операторного аналізу системи	173
3.4. Приклади дифракційного аналізу оптичних систем	177
3.5. Задачі для самостійного розв'язання	184
Список літератури	189

ВСТУП

Інтенсивний розвиток науки і техніки постійно ускладнює задачі, які стоять перед оптикою та оптичним приладобудуванням. З одного боку, висуваються більш високі вимоги до традиційних характеристик оптичних пристроїв (роздільна здатність, велике поле зору, широкий спектральний діапазон і под.), а з другого боку, з'явилися нові сфери застосування оптики: пристрої оптичної обробки інформації, волоконна та інтегральна оптика тощо. Розв'язання цих задач відбувається у трьох напрямках: використання асферичних оптичних поверхонь; розробка градієнтних лінз із змінним показником заломлення і проектування та розробка технології виготовлення дифракційних оптичних елементів (ДОЕ).

Сучасний розвиток дифракційної оптики фактично виходить на рівень, коли вона стає таким же невід'ємним компонентом оптичних систем, як лазери та світлодіоди. Інтегрованість напівпровідникових джерел і приймачів випромінювання, дифракційних та волоконних елементів і мікропроцесорної техніки відкриває можливості створення мікрооптоелектронних систем для вирішення широкого спектру задач оптотехніки та оптоінформатики.

Цей підручник присвячено проектуванню ДОЕ на основі геометричної оптики та скалярної теорії дифракції, а також дифракційних когерентних систем обробки інформації. Він є другою частиною підручника В. Г. Колобродова і Г. С. Тимчика «Дифракційна теорія оптичних систем» (2011 р.), в якому розглянуто теоретичні основи скалярної теорії дифракції та дифракційний аналіз когерентних і некогерентних систем.

Дифракційні оптичні елементи перетворюють падаючий хвильовий фронт за рахунок дифракції світла на їх мікроструктурі. Можна виділити три основні види ДОЕ: дифракційні лінзи (ДЛ), дифракційні ґратки і дифракційні асферики для корекції хвильового фронту. Дифракційну лінзу можна описати двома способами. Один із них розглядає ДЛ як тонку рефракційну лінзу, показник заломлення і радіуси поверхонь якої наближаються до нескінченності таким чином, щоб оптична сила лінзи залишалась постійною. Такий підхід зручний тим, що дозволяє вести розрахунки оптичних систем із ДЛ на основі стандартних програм рефракційної оптики.

Другий підхід полягає в тому, що ДЛ розглядають як нескінченно тонкий транспарант, з наперед заданим амплітудним коефіцієнтом пропускання. Перевагою цього методу є те, що ДОЕ достатньо реально відображає його роботу: дифракція світла на мікроструктурі поверхні відбувається в межах тонкого шару. Крім того, амплітудний коефіцієнт пропускання дозволяє дуже просто задавати асферичні відхилення у структурі ДОЕ.

Для створення ДОЕ потрібно розв'язати пряму й обернену задачі теорії дифракції. Пряма задача дифракції полягає в аналізі поширення світла в заданій оптичній системі. Обернена задача полягає у створенні такої мікроструктури поверхні ДОЕ, яка забезпечила б задані властивості цього елемента.

Дифракційні лінзи набувають широкого впровадження в офтальмології у вигляді штучного кришталіка при катаракті ока. Використання таких лінз дозволяє пацієнту бачити чітке зображення об'єктів, розташованих як на малій, так і на великій відстані, без застосування окулярів.

Використання когерентних спектроаналізаторів дозволяє створити відносно прості комплекси, здатні обробляти значний обсяг інформації, який неспроможні виконати сучасні електронні процесори.

Підручник написано на основі курсу лекцій «Дифракційна теорія оптичних систем», який викладають у Національному технічному університеті України «КПІ» для магістрів напряму підготовки «Оптехніка» спеціальності «Фотоніка та оптоінформатика».

Підручник складається із трьох розділів, в яких розглянуто проектування, технологію виготовлення та застосування дифракційних оптичних, когерентних спектроаналізаторів, а також операторний метод аналізу когерентних оптичних систем.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Sheng Yuniong*. Diffr,active optics / Yuniong Sheng, Pierre Ambs // *Optical Engineering*. – 2004. – Vol. 43. – N 11. – P. 2503–2504.
2. *Шредер Г.* Техническая оптика / Г. Шредер, Х. Трайберх. – М.: Техносфера, 2006. – 424 с. – 3 000 экз. – ISBN 94836-075-X.
3. *Колобродов В. Г.* Дифракційна теорія оптичних систем: підруч. / В. Г. Колобродов, Г. С. Тимчик. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 148 с. – 300 пр. – ISBN 978-966-622-415-9.
4. *Сойфер В. А.* Компьютерная оптика / В. А. Сойфер // Соросовский образовательный журнал. – Ч. 1. Дифракционные оптические элементы. – 1999. – № 4. – С. 110–115. – 40 000 экз. – ISSN 1684-9876.
5. *O'Shea D. C.* Diffractive Optics Design, Fabrication and Test / D. C. O'Shea, T. J. Suleski, A. D. Kathman, D. W. Prather. – SPIE PRESS, Washington USA, 2005. – 238 p.
6. *Борн М.* Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
7. *Кольер Р.* Оптическая голография / Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин. – М.: Мир, 1973. – 686 с.
8. *Futhey John A.* Diffractive bifocal intraocular lens / John A. Futhey // *Proceedings SPIE*. – 1989. – Vol. 1052. – P. 142–149.
9. Дифракционная компьютерная оптика / под ред. В. А. Сойфера. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 736 с.
10. *Buralli D. A.* Optical performance of holographic kinoforms / D. A. Buralli, G. M. Morris, J. B. Rogers // *Applied Optics*. – 1989. – Vol. 28. – N 5. – P. 976–983.
11. *Ленкова Г. А.* Фазовая линза Френеля в сходящемся световом пучке / Г. А. Ленкова // Сб. трудов IX Междунар. конф. «Прикладная оптика – 2010» (С.П.); Изд. опт. общ. им. Д. С. Рождественского, 2010. – Ч. 1. – С. 151–155.
12. *Erismann Fernand.* Design of a plastic aspheric Fresnel lens with a spherical shape / Fernand Erismann. – *Optical Engineering*. – 1997. – Vol. 36 (4). – P. 988–991.
13. *Bao N. K.* Adjacent sequence iteration method for designing a diffractive element with function of long focal depth / N. K. Bao,

- Chen Zhongyu, Chen Yansong* // Optical Engineering. – 2004. – Vol. 43. – N 10. – P. 2348–2352.
14. *Коронкевич В. П.* Новое поколение бифокальных дифракционно-рефракционных линз / В. П. Коронкевич, Г. А. Ленкова, В. П. Корольков, А. Г. Полещук и др. // Компьютерная оптика. – 2008. – № 1. – Т. 32. – С. 50–58.
15. Пат. 2186417 Российской Федерации, мпк G02C7/04, A61F2/16, G02B3/08, G02B13/18. Дифракционная интраокулярная линза / В. П. Коронкевич, Г. А. Ленкова, И. А. Исаков, С. Н. Федоров; заявитель и патентообладатель Ин-т автоматизации и электрометрии СО РАН. – № 2000104268/28; заявл. 22.02.2000; опубл. 27.07.2002, Бюл. № 23 (I ч.). – 35 с. : ил.
16. *Волотовский С. Г.* Программное обеспечение по компьютерной оптике / С. Г. Волотовский, М. А. Голуб, Л. А. Досколович и др. // Компьютерная оптика. – 1995. – № 14–15. – С. 94–106.
17. *Бобров С. Т.* Применение лазеров в системах преобразования, передачи и обработки информации / С. Т. Бобров, Ю. Г. Туркевич. – Л.: Машиностроение, 1978. – 160 с.
18. *Гуревич С. Б.* Оптические методы обработки информации / С. Б. Гуревич, Н. И. Ильяшенко, Б. Т. Коломиец. – Л.: Машиностроение, 1974. – 186 с.
19. *Грейсух Г. И.* Оптика градиентных и дифракционных элементов / Г. И. Грейсух, И. М. Ефименко, С. А. Степанов. – М.: Радио и связь, 1990. – 124 с.
20. Введение в фотолитографию / под ред. В. П. Лаврищева. – М.: Энергия, 1977. – 400 с.
21. *Клевцов Ю. А.* Метод расчета рефракционно-дифракционных очковых линз / Ю. А. Клевцов // Автометрия. – 2008. – Т. 44. – № 4. – С. 105–118.
22. *Полещук А. Г.* Применение дифракционной оптики в измерительной технике / А. Г. Полещук, В. П. Коронкевич, В. П. Корольков и др. // Компьютерная оптика. – 2001. – Вып. 22. – С. 86–95.
23. ГОСТ Р 52038 – 2003 (ИСО 11979-2-99). Имплантаты офтальмологические. Интраокулярные линзы. Ч. 2. Оптические свойства и методы их испытаний. – М.: ИПК Из-во стандартов, 2003.
24. ИСО 9334-95. Оптика и оптические приборы. Оптическая передаточная функция. Определение и математические соотношения. – М.: ИПК Из-во стандартов, 2003.

25. ИСО 9334-95. Оптика и оптические приборы. Оптическая передаточная функция. Основы и процедуры измерений. – М.: ИПК Из-во стандартов, 2003.

26. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику / Дж. Гудмен; пер. с англ. – М.: Мир, 1970. – 364 с.

27. Юу Ф. Т. С. Введение в теорию дифракции, обработку информации и голографию / Ф. Т. С. Юу; под ред. В. К. Соколова; пер. с англ. – М.: Сов. радио, 1979. – 304 с.

28. Кейсесент Д. Оптическая обработка информации / Д. Кейсесент; пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 350 с.

29. Зверев В. А. Экспериментальная радиооптика / В. А. Зверев, Н. С. Степанов. – М.: Наука, 1979. – 255 с.

30. Колобродов В. Г. Анализ оптических схем когерентных спектроанализаторов / В. Г. Колобродов, Г. С. Тымчик // Оптико-механическая промышленность. – 1982. – № 10. – С. 4–7.

31. Колобродов В. Г. Исследование геометрических параметров квазипериодических структур с помощью когерентного оптического спектроанализатора / В. Г. Колобродов, Г. С. Тымчик // Оптико-механическая промышленность. – 1982. – № 2. – С. 9–11.

32. Колобродов В. Г. Погрешность сборки и юстировки оптической системы когерентного спектроанализатора / В. Г. Колобродов, Г. С. Тымчик, С. П. Сахно // Оптико-механическая промышленность. – 1983. – № 9. – С. 6–9.

33. Прудников А. П. Интегралы и ряды. Элементарные функции / А. П. Прудников, Ю. А. Брычков, О. И. Маричев. – М.: Наука, 1981. – 800 с.

34. Колобродов В. Г. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження: підруч. / В. Г. Колобродов, М. І. Лихоліт. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 364 с. – 500 пр. – ISBN 966-622-230-2.

35. Прудников А. П. Интегралы и ряды. Специальные функции / А. П. Прудников, Ю. А. Брычков, О. И. Маричев. – М.: Наука, 1983. – 752 с.

36. Гуревич С. Б. Передача и обработка информации голографическими методами / С. Б. Гуревич. – М.: Сов. радио, 1978. – 376 с.

37. Сороко Л. М. Гильберт-оптика / Л. М. Сороко. – М.: Наука, 1981. – 114 с.

38. Франсон М. Когерентность в оптике / М. Франсон, С. Сланский. – М.: Наука, 1967. – 220 с.

39. *Митрофанов С. А.* Применение лазеров в машиностроении и приборостроении / С. А. Митрофанов, К. И. Крылов, В. Т. Прокопенко. – Л.: Машиностроение, 1978. – 342 с.
40. *Папулис А.* Теория систем и преобразований в оптике / А. Папулис: пер. с англ. – М.: Мир, 1971. – 495 с.
41. *Литвиненко О. Н.* Основы радиооптики / О. Н. Литвиненко. – К.: Техника, 1974. – 205 с.
42. *Акаев А. А.* Когерентные оптические вычислительные машины / А. А. Акаев, С. А. Майоров. – Л.: Машиностроение, 1977. – 440 с.
43. *Москалев В. А.* Теоретические основы оптико-физических исследований / В. А. Москалев. – Л.: Машиностроение, 1987. – 316 с.
44. *Таланчук П. М.* Лазеры в контрольно-измерительной технике / П. М. Таланчук, С. П. Голубков, В. П. Маслов. – К.: Техника, 1992. – 363 с.
45. *Колобродов В. Г.* Возможность исследования микродефектов отражающих поверхностей и прозрачных плёнок с помощью когерентного спектроанализатора / В. Г. Колобродов, Г. С. Тымчик // Оптико-механическая промышленность. – 1980. – № 11. – С. 11–13.
46. *Фризер Х.* Фотографическая регистрация информации / Х. Фризер. – М.: Мир, 1978. – 323 с.
47. *Коваль С. Т.* Статистические характеристики коэффициента отражения некоторых зеркальных поверхностей / С. Т. Коваль, В. Г. Колобродов // Оптико-механическая промышленность. – 1976. – № 6. – С. 6–10.
48. *Косторнов А. Г.* Проницаемые металлические волоконные материалы / А. Г. Косторнов. – К.: Техника, 1983. – 318 с.
49. *Косторнов А. Г.* Термообработка металонаполненных целлюлозных войлоков и их прочностные свойства / А. Г. Косторнов, О. В. Кириченко, Н. С. Гужва // Порошковая металлургия. – 1981. – № 12. – С. 26–30.
50. *Кондратенко Г. С.* Обработка информации когерентными оптическими системами / Г. С. Кондратенко. – М.: Сов. радио, 1972. – 452 с.
51. *Сороко Л. М.* Основы когерентной оптики и голографии / Л. М. Сороко. – М.: Наука, 1971. – 615 с.
52. *Карлин С.* Основы теории случайных процессов / С. Карлин. – М.: Мир, 1971. – 536 с.

53. *Большаков И. А.* Прикладная теория случайных потоков / И. А. Большаков, В. С. Ракоши. – М.: Сов. радио, 1978. – 247 с.

54. *Абакшин Ю. Е.* Описание пространственного импульсного поля помех вероятностной моделью составного процесса / Ю. Е. Абакшин, Л. Г. Коваленко, Р. П. Филимонов // Автометрия. – 1975. – № 6. – С. 3–8.

55. *Иваницкий Г. В.* Исследование микроструктуры объектов методами когерентной оптики / Г. В. Иваницкий, А. С. Куниский. – М.: Энергия, 1981. – 166 с.

56. *Колобродов В. Г.* Искажения Фурье-образа сигналов при гауссовом освещении входного транспаранта в когерентных оптических спектроанализаторах / В. Г. Колобродов, С. П. Сахно, Г. С. Тымчик // Оптико-механическая промышленность. – 1984. – № 11. – С. 1–4.

57. *Фесенко Н. И.* Влияние положения детали в лазерном пучке на точность определения ее размера по дифракционной картине / Н. И. Фесенко, Ю. Н. Солодкин // Изв. вузов СССР. Сер. «Приборостроение». – 1983. – № 11. – Т. 26. – С. 56–62.

58. *Зубов В. А.* Оптический метод исключения аппаратной функции спектрального прибора / В. А. Зубов // Оптика и спектроскопия. – 1968. – Т. XXV. – Вып. 5. – С. 738–743.

59. *Горяинов В. Т.* Статистическая радиотехника / В. Т. Горяинов, А. В. Журавлев, В. И. Тихонов. – М.: Сов. радио, 1980. – 543 с.

60. *Васильев Л. А.* Интерферометр с дифракционной решеткой / Л. А. Васильев, И. В. Еригов. – М.: Машиностроение, 1976. – 232 с.

61. *Голант М. Б.* Изготовление резонаторов и замедляющих систем электронных приборов / М. Б. Голант, А. А. Маклакова, М. Б. Шур. – М.: Сов. радио, 1969. – 408 с.

Навчальне видання

Колобродов Валентин Георгійович
Тимчик Григорій Семенович

Проектування дифракційних оптичних елементів і систем

Підручник

Редактор *Н. В. Мурашова*
Комп'ютерна верстка *А. М. Мушницький*

Темплан 2012 р., поз. 1-1-002

Підп. до друку 26.03.2013. Формат 60×84^{1/16}. Папір офс. Гарнітура Times.
Спосіб друку – ризографія. Ум. друк. арк. 11,39. Обл.-вид. арк. 18,94. Зам. № 13-4
Наклад 500 пр. (перший запуск 1–80 пр.)

НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка»
Свідоцтво ДК № 1665 від 28.01.2004 р.
03056, Київ, вул. Політехнічна, 14, корп. 15
тел./факс (044) 406-81-78