



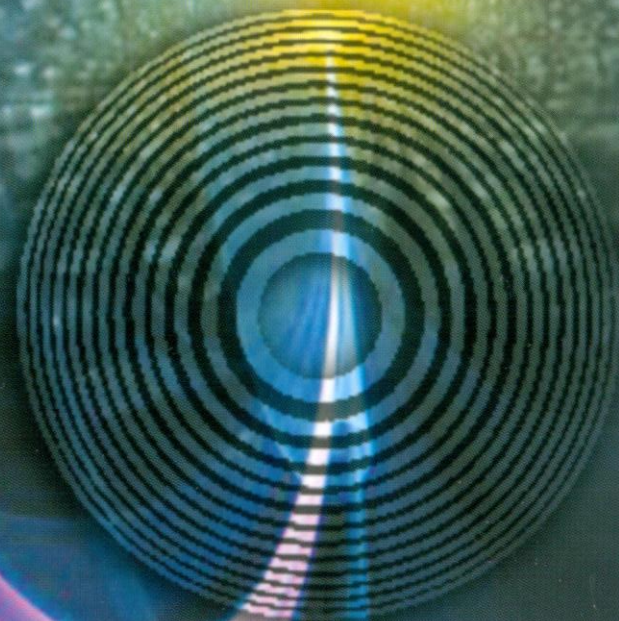
ВПК «Політехніка»

В. Г. Колобродов  
Г. С. Тимчик

Прикладна дифракційна оптика

В. Г. Колобродов  
Г. С. Тимчик

# Прикладна дифракційна оптика



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

**В.Г.Колобродов, Г.С. Тимчик**

# **ПРИКЛАДНА ДИФРАКЦІЙНА ОПТИКА**

*Затверджено Міністерством освіти і науки України  
як підручник для студентів вищих технічних навчальних закладів*

**КИЇВ**  
**НТУУ «КПІ»**  
**2014**

**УДК 535.42(075.8)+681.7(075.8)**

ББК 22.343.4я73

К 60

*Гриф надано Міністерством освіти і науки України  
(Лист № 1/11-12993 від 13.08. 2014 р.)*

Рецензенти:

*О.В. Ангельський, д-р фіз.-мат. наук, проф.*

Чернівецький національний університет імені Федьковича

*Л.В. Поперенко, д-р фіз.-мат. наук, проф.*

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

*С.В. Павлов, д-р техн. наук, проф.*

Вінницький національний технічний університет

**Колобродов В.Г.**

К60 Прикладна дифракційна оптика: Підручник / В.Г. Колобродов,  
Г.С. Тимчик. – К.: НТУУ „КПІ”, 2014. – 312 с.-300 пр.

**ISBN 978-966-622-652-8**

Викладено теоретичні і практичні основи проектування оптичних систем на основі скалярної теорії дифракції. Використано теорію дифракції Кірхгофа для аналізу когерентних і некогерентних систем, проектування дифракційних оптичних елементів, в тому числі офтальмологічної оптики, і спектроаналізаторів двовимірних сигналів. Для практичного засвоєння матеріалу значну увагу приділено розв'язанню прикладів розрахунку параметрів світлового поля, яке формується оптичними елементами і системами.

Для магістрів за напрямом оптотехніка за спеціальностями оптичні прилади і системи, фотоніка та оптоінформатика, лазерна та оптоелектронна техніка. Може бути корисним розробникам оптичних систем різного призначення.

**УДК 535.42(075.8)+681.7(075.8)**

ББК 22.343.4я73

ISBN 978-966-622-652-8

© В.Г. Колобродов

Г.С. Тимчик, 2014

© НТУУ"КПІ"(ПБФ), 2014

# ЗМІСТ

<b>Скорочення</b> .....	8
<b>Вступ</b> .....	9
<b>Розділ 1. Основні властивості оптичного випромінювання</b> .....	12
1.1. Рівняння Максвелла.....	12
1.2. Хвильове рівняння.....	14
1.3. Плоскі й сферичні монохроматичні хвилі.....	15
1.4. Скалярні гармонічні хвилі. Рівняння Гельмгольца .....	17
1.5. Рівняння ейконалу й перенесення.....	18
1.6. Кутовий спектр плоских хвиль.....	19
1.7. Приклади розрахунку параметрів електромагнітного поля.....	21
1.8. Задачі для самостійного розв'язання.....	27
<b>Розділ 2. Основи скалярної теорії дифракції</b> .....	29
2.1. Загальні положення теорії дифракції.....	29
2.2. Принцип Гюйгенса–Френеля.....	30
2.3. Зонна пластинка Френеля.....	34
2.4. Теорія дифракції Кірхгофа.....	36
2.4.1. Інтегральна теорема Гельмгольца–Кірхгофа.....	36
2.4.2. Дифракція на плоскому екрані.....	38
2.5. Дифракція Френеля.....	41
2.6. Дифракція Фраунгофера.....	43
2.7. Приклади розрахунку дифракції Фраунгофера.....	44
2.7.1. Прямокутний отвір.....	44
2.7.2.Круглий отвір.....	46
2.7.3.Синусоїдальна дифракційна ґратка.....	50
2.8. Дифракція Френеля на прямокутному отворі.....	52
2.9. Приклади розрахунку дифракційних картин.....	54
2.10. Задачі для самостійного розв'язання.....	62

<b>Розділ 3. Дифракційний аналіз оптичних систем .....</b>	<b>69</b>
3.1. Тонка лінза як елемент, що виконує фазове перетворення .....	69
3.2. Лінза як елемент, що виконує перетворення Фур'є.....	73
3.2.1. Поширення монохроматичного випромінювання через оптичну систему.....	73
3.2.2. Розподіл світлового поля у площині аналізу, коли транспарант встановлено перед лінзою.....	76
3.2.3. Розподіл світлового поля у площині аналізу, коли транспарант встановлено за лінзою.....	79
3.3. Дифракційна теорія формування зображення тонкою додатною лінзою.....	82
3.3.1. Функція розсіювання тонкої додатної лінзи .....	82
3.3.2. Функція розсіювання додатної лінзи у площині геометричного зображення.....	84
3.3.3. Зв'язок між амплітудами поля у площині зображення і площині предмета.....	85
3.4. Операторний метод аналізу когерентних оптичних систем.....	87
3.4.1. Узагальнена функція Френеля.....	87
3.4.2. Операторне представлення когерентної оптичної системи	91
3.4.3. Методика операторного аналізу.....	93
3.5. Приклади дифракційного аналізу оптичних систем.....	98
3.6. Задачі для самостійного розв'язання.....	109
<b>Розділ 4. Частотний аналіз дифракційно обмежених оптичних систем.....</b>	<b>117</b>
4.1. Узагальнена модель оптичної системи, яка формує зображення.....	117
4.2. Когерентні й некогерентні оптичні системи.....	119
4.2.1. Когерентне випромінювання.....	120
4.2.2. Вимірювання міри когерентності випромінювання... ..	122
4.1.1. Некогерентне випромінювання .....	125
4.3. Дифракційно обмежена когерентна оптична система.....	125

4.4. Дифракційно обмежена некогерентна оптична система.....	128
4.4.1. Оптична передавальна функція та її основні властивості.....	129
4.4.2. Зв'язок оптичної передавальної функції з фізичними параметрами оптичної системи.....	130
4.5. Приклади розрахунку передавальних функцій оптичних систем.....	135
4.6. Задачі для самостійного розв'язання.....	140
<b>Розділ 5. Дифракційні оптичні елементи.....</b>	<b>147</b>
5.1. Фізичні основи дифракційної оптики.....	147
5.1.1. Принцип роботи і класифікація ДОЕ.....	147
5.1.2. Дифракційна ефективність амплітудних і фазових ДОЕ... ..	154
5.1.3. Основні характеристики ДОЕ.....	155
5.1.4. Обернена задача дифракційної оптики.....	158
5.2. Габаритний розрахунок дифракційних лінз.....	159
5.3. Розрахунок дифракційних оптичних елементів у наближенні геометричної оптики.....	162
5.3.1. Загальні положення.....	162
5.3.2. Проектування кіноформу в параксіальному наближенні. ..	162
5.3.3. Фазова лінза, яка працює у збіжному світловому пучку. ..	170
5.3.4. Проектування лінз Френеля на сферичній поверхні.....	174
5.3.5. Проектування дифракційного дзеркала сферичної форми ..	182
5.4. Розрахунок дифракційних оптичних елементів в наближенні скалярної теорії дифракції.....	185
5.4.1. Загальні положення.....	185
5.4.2. Ітеративні методи розрахунку ДОЕ.....	186
5.4.3. Проектування ДОЕ методом послідовної ітерації – збіжності.....	189
5.4.4. Проектування ДОЕ, які формують радіально-симетричний розподіл освітленості.....	195
5.5. Багатопорядкові дифракційні лінзи.....	202

5.6. Дифракційно-рефракційні мультифокальні інтраокулярні лінзи	204
5.6.1. Біфокальні дифракційно-рефракційні інтраокулярні лінзи	204
5.6.2. Дифракційно-рефракційні лінзи з трикутним профілем...	207
5.6.3. Дифракційно-рефракційні лінзи з прямокутним профілем	208
5.6.4. Дифракційна інтраокулярна лінза.....	209
5.6.5. Особливості проектування дифракційно-рефракційних біфокальних лінз.....	213
5.6.6. Трифокальні дифракційні лінзи.....	218
5.7. Аберації дифракційних лінз.....	224
5.8. Ефективність і модуляційна передавальна функція дифракційної біфокальної лінзи.....	229
5.9. Окулярні рефракційно-дифракційні лінзи.....	235
5.10. Вимірювання оптичних характеристик дифракційних оптичних елементів.....	239
5.11. Приклади розрахунку параметрів дифракційних оптичних елементів.....	247
5.12. Задачі для самостійного розв'язання.....	268
<b>Розділ 6. Когерентні спектроаналізатори</b> .....	<b>270</b>
6.1. Фізичні основи роботи когерентних спектроаналізаторів...	270
6.1.1. Узагальнені оптичні схеми спектроаналізаторів.....	270
6.1.2. Функціональні перетворення в оптичних системах.....	273
6.2. Проектування спектроаналізаторів.....	279
6.2.1. Основні характеристики когерентних спектроаналізаторів	279
6.2.2. Енергетичний розрахунок когерентного оптичного спектроаналізатора.....	287
6.2.3. Роздільна здатність когерентного оптичного спектроаналізатора.....	293
6.3. Параксіальна дифракційна лінза, як оптичний елемент, що виконує перетворення Фур'є.....	300

6.4. Приклади розрахунку характеристик когерентних спектроаналізаторів.....	304
6.5. Задачі для самостійного розв'язання.....	307
<b>Список літератури.....</b>	<b>309</b>



## СКОРОЧЕННЯ

ІОЛ	Інтраокулярна лінза
ДЛ	Дифракційна лінза
ДОЕ	Дифракційний оптичний елемент
ЕФВ	Ефективна фокусна відстань
КЕ	Кіноформний елемент
КПФ	Когерентна передавальна функція
КОС	Когерентний спектроаналізатор
МПФ	Модуляційна передавальна функція
ОПФ	Оптична передавальна функція
ПЗЗ	Прилад з зарядовим зв'язком
РДЛ	Рефракційно-дифракційної лінзи
ФКЕ	Функція концентрації енергії
ФРЛ	Функція розсіювання лінії
ФРТ	Функція розсіювання точки

## ВСТУП

*Світло* – це електромагнітні хвилі з довжиною у межах від 1 нм до 1 мм, тому під час проходження світла через оптичні елементи його слід розглядати не як сукупність променів, а як хвильовий фронт, який змінюється у просторі й часі. Поширення електромагнітної хвилі розглядають з позиції дифракції світла. *Дифракція світла* у вузькому (найбільш вживаному) розумінні – явище обгинання променями світла контуру непрозорих тіл і, як наслідок, проникнення світла в область геометричної тіні. У широкому розумінні дифракція – це прояв хвильових властивостей світла в умовах, близьких до умов застосування положень геометричної оптики [1]. На основі такого уявлення про світло розробляють нові методи розрахунку оптичних систем, а також методи проектування принципово нових засобів оброблення інформації.

Першу елементарну кількісну теорію дифракції світла розвинув французький фізик О. Френель (1816), який пояснив її як результат інтерференції вторинних хвиль на основі принципу Гюйгенса–Френеля. Ідеї Френеля у математичному вигляді втілює німецький фізик Г. Кірхгоф (1882).

Головна перевага оптичних методів оброблення інформації – швидкодія і простота реалізації. Оброблення інформації в оптичних системах здійснюється із швидкістю світла й обмежується швидкодією пристроїв введення й виведення даних. В електронних пристроях, зокрема комп'ютерах, оброблення інформації відбувається у вигляді зміни в часі електричної напруги або струму, тобто у вигляді одновимірної функції. В оптичних системах перетворюються амплітуда і фаза (для когерентних систем) або інтенсивність (для некогерентних систем) світлового поля, які змінюються у просторі й часі. Це означає, що оброблення інформації здійснюється у вигляді багатовимірних функцій. У зв'язку з цим потенційні можливості оптичних систем оброблення інформації значно ширші за можливості електронних систем. Крім того, в оптичних системах оброблення інформації порівняно просто реалізуються такі операції, як

перетворення Фур'є, просторова фільтрація, низка інтегральних перетворень (кореляція, згортка, перетворення Гільберта, Лапласа та ін).

Під час проходження світла через елементи оптичної системи відбувається деформація хвильового фронту у часі і просторі. На основі аналізу цих деформацій можна якісно та точно оцінити вплив різних факторів на процеси перенесення інформації в оптичній або оптично-електронній системах. Також це дозволяє розробити принципово нові засоби оброблення інформації й суттєво вдосконалити безпосередньо оптичні елементи.

Теоретичним фундаментом оптичної обробки інформації є дифракційна теорія оптичних систем – основа цього підручника. Практичне застосування дифракції світла відображене у розробленні методів розрахунку параметрів світлового поля, яке формує когерентна або некогерентна система.

Ми припускаємо, що читач цього підручника добре знайомий з основами хвильової оптики, вищої математики та обчислювальної техніки. Складні диференціальні та інтегральні рівняння дифракційної оптики зведені до відносно простих співвідношень, які можна застосовувати при дослідженні розповсюдження світла через оптичну систему та проектуванні дифракційних оптичних елементів (ДОЕ). Теоретичний матеріал може бути використаний при проектуванні оптичних систем та виготовленні ДОЕ. В більшості випадків достатньо використовувати скалярну теорію дифракції, але при зменшенні геометричних розмірів мікроструктури ДОЕ до довжини хвилі світла необхідно розглядати векторний характер електромагнітного поля світла.

Інтенсивний розвиток науки і техніки постійно ускладнює задачі, які стоять перед оптикою і оптичним приладобудуванням. З одного боку, пред'являються більш високі вимоги до традиційних характеристик оптичних пристроїв (великі роздільна здатність і поле зору, широкий спектральний діапазон і т.п.), а з другого боку, з'явилися нові сфери застосування оптики: пристрої оптичної обробки інформації, волоконна та

інтегральна оптики і т.п. Розв'язання цих задач йде трьома напрямками: 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 та 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 дифракційних оптичних елементів та систем на основі скалярної теорії дифракції. Він є подальшим розвитком і удосконаленням підручників Колобродова В.Г. і Тимчика Г.С. «Дифракційна теорія оптичних систем» (2011р.) і «Проектування дифракційних оптичних елементів і систем» (2013р.). Підручник написано на основі курсу лекцій «Дифракційна теорія оптичних систем», який викладається в Національному технічному університеті України «КПІ» для магістрів напрямку «Оптотехніка» із спеціальності «Фотоніка та оптоінформатика».

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Физический энциклопедический словарь* / Гл. ред. А. М. Прохоров. – М.: Сов.энциклопедия, 1984. – 944 с.
2. *Борн М. Основы оптики* / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
3. *Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами* / Под ред. М. Абрамовица и И. Стинга; пер. с англ. – М.: Наука, 1979. – 832 с.
4. *Прудников А. П. Интегралы и ряды. Элементарные функции* / А. П. Прудников, Ю. А. Брычков, О. И. Маричев. – М.: Наука, 1981. – 798 с.
5. *Сороко Л. М. Основы когерентной оптики и голографии* / Л. М. Сороко. – М.: Наука, 1971. – 615 с.
6. *Колобродов В.Г. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження: підруч.* / В.Г.Колобродов, М.І. Лихоліт.– К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 364 с. – 500 пр. – ISBN966-622-230-2.
7. *Бегунов Б. Н. Теория оптических систем* /Б. Н. Бегунов, Н. П. Заказнов, С. И. Кирюшин, В. И. Кузичев. – М.: Машиностроение, 1981. – 432 с.
8. *Порфирьев Л.Ф. Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах: учебник* / Л.Ф. Порфирьев. – Л.: Машиностроение, 1989. – 387 с. – ISBN 5-217-00365-0.
9. *Ersoy Okan K. Diffraction, Fourier Optics and Imaging* / Okan K. Ersoy. – Canada.: John Wiley & Sons, 2007. – 428 p.
10. *Sheng Yuniong. Diffractive optics* / Yuniong Sheng, Pierre Ambs // *Optical Engineering*. – 2004. – Vol. 43. – N 11. – P. 2503–2504.
11. *Шредер Г. Техническая оптика* / Г. Шредер, Х. Трайберх.– М.: Техносфера, 2006. – 424 с. – 3 000 экз. – ISBN 94836-075-X.
12. *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.
13. *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.

14. *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.

15. *Кольер Р.* Оптическая голография /Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин. – М.: Мир, 1973. – 686 с.

16. *Futhey JohnA.* Diffractive bifocal intraocular lens / JohnA. Futhey // Proceedings SPIE. – 1989. – Vol. 1052. – P. 142–149.

17. Дифракционная компьютерная оптика / под.ред. В. А. Сойфера. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 736 с.

18. *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.

19. *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.

20. *Erismann Fernand.* Design of a plastic aspheric Fresnel lens with a spherical shape / Fernand Erismann. – Optical Engineering. – 1997. – Vol. 36(4). – P. 988–991.

21. *Колобродов В.Г.* Проектування пластикових лінз Френеля зі сферичним профілем / Є.Г. Балінський, І.В. Голюк, В.Г. Колобродов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – №1. – С. 66–70.

22. *Колобродов В.Г.* Оптичні системи космічних багато спектральних сканерів. В.Г. Колобродов, В.М. Тягур, М.І. Лихоліт // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2006. – №6. – С. 125–132.

23. *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.

24. *Коронкевич В. П.* Новое поколение бифокальных дифракционно-

рефракционных линз / В. П. Коронкевич, Г. А. Ленкова, В. П. Корольков, А. Г. Полецук и др. // Компьютерная оптика. – 2008. – № 1. – Т. 32. – С. 50–58.

25. 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 электротехники СО РАН. – № 2000104268/28; заявл. 22.02.2000; опубл. 27.07.2002, Бюл. № 23 (Ич.). – 35 с. :ил.

26. *Vatle P.J.* Visual axial PSF of diffractive trifocal lenses / P.J. Vatle, J.E. Oti, V.F. Canales M.P. and Cagigal // Optical Society of America. – 2005. – Vol. 13, No 7 / OPTICS EXPRESS. – P. 2782–2792.

27. *Buralli D.A.* Design of diffractive singlets for monochromatic imaging / D.A. Buralli, G.M. Morris // Applied Optics. – 1991. Vol. 30. – No 16. – P. 2151–2158.

28. *Buralli D.A., Morris G.M.* Design of a wide field diffractive landscape lens // Applied Optics. – 1989. – Vol.28, No.18. – P. 3950 – 3959.

29. *Castignoles F., Flury M., Lepine T.* Comparison of the efficiency, MTF and chromatic properties of four diffractive bifocal intraocular lens designs // Optical Society of America. – 2010. – Vol. 18. – No 5. – P. 5245–5256.

30. *Клевцов Ю. А.* Метод расчета рефракционно-дифракционных очковых линз / Ю. А. Клевцов // Автометрия. – 2008. – Т. 44. – № 4. – С. 105–118.

31. ISO/DIS 11979-2. Optics and Optical Instruments – Intraocular lenses. Pt.2: Optical properties and their Methods. 1996.

32. *G.A. Lenkova.* Methods for Investigating Optical Characteristics of Bifocal Diffractive-Refractive Intraocular Lenses. // Optoelectronics, Instrumentation and data Processing. – 2007. – Vol. 43. – No 3. – P. 262–273.

31. *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.

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

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

34. *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.

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

36. *Колобродов В. Г.* Проектування дифракційних оптичних елементів і систем: підруч. / В. Г. Колобродов, Г. С.Тимчик.– К.: НТУУ «КПІ», 2013. – 196 с. – 300 пр. – ISBN 978-966-622-563-7.

37. *Митрофанов С. А.* Применение лазеров в машиностроении и приборостроении / С. А. Митрофанов, К. И. Крылов, В. Т. Прокопенко. – Л.: Машиностроение, 1978. – 342 с.

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

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