

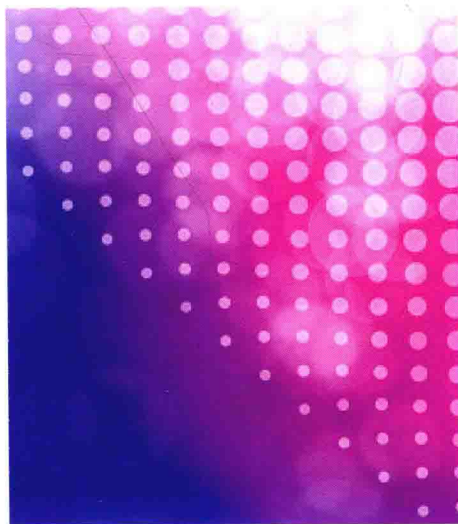
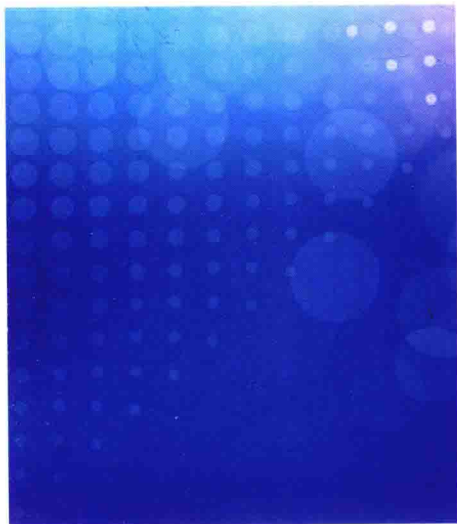
Statistical Optics

(Second Edition)

统计光学 (第二版)

[美] Joseph W. Goodman 著

陈家璧 秦克诚 曹其智 译



科学出版社

统计光学

(第二版)

Statistical Optics

(Second Edition)

[美] Joseph W. Goodman 著

陈家璧 秦克诚 曹其智 译



科学出版社

北京

图字: 01-2016-4964 号

内 容 简 介

本书是 Joseph W. Goodman 所著《统计光学》的第二版。

本书秉承第一版的精神,用通信理论中的概率统计方法,研究光场本身、光传播过程及检测接收时的随机涨落。它既是一门应用科学,在信息光学中有广泛的应用,又涉及对于光的本性的理解,同光学中的其他分支有着密切联系,它的基础知识已经成为光学工作者的必备知识。

本书介绍统计光学的基本内容及其所用的数学工具和方法,总结了直到 21 世纪的最新研究成果,可以作为高等学校光学专业高年级本科生和研究生的教材,也可供教师、科研人员和工程技术人员参考。

Copyright © 2015 by John Wiley & Sons

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Statistical Optics, Second Edition, ISBN: 9781119009450/1119009456, by Joseph W. Goodman, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

图书在版编目(CIP)数据

统计光学:第二版/(美)J. W. 顾德曼(Joseph W. Goodman)著;陈家璧,秦克诚,曹其智译. —北京:科学出版社,2018.1

书名原文:Statistical Optics (Second Edition)

ISBN 978-7-03-056338-5

I. ①统… II. ①J… ②陈… ③秦… ④曹… III. ①统计光学-研究
IV. ①O43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 010612 号

责任编辑:刘凤娟/责任校对:邹慧卿

责任印制:肖 兴/封面设计:耕 者

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018 年 1 月第一次印刷 印张:28 1/2

字数:574 000

定价:199.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

献给
翰美
她带来了光明

中文第二版前言

1978 年 J. W. Goodman 教授第一次访华时, 我和他见过面. 他欢迎我去他的实验室做访问学者, 研究信息光学, 在此期间我聆听了他的“统计光学”课程. 1982 年我回国后, 在他的实验室访问工作过的一些教师, 在国内开设统计光学课程进行推广. Goodman 教授也于 1985 年年底由 John Wiley & Sons 出版社正式出版了《统计光学》英文版. 我在收到他寄来的赠书后, 组织了刘培森 (北京理工大学)、曹其智 (南开大学)、詹达三 (中国科学院物理研究所) 和我 (北京大学) 共四人, 将书译成中文, 于 1992 年由科学出版社出版了第一版的中文版.

现在,《统计光学》已出第二版了. 与初版相比, 有不少的变动, 需要译成中文, 供我国光学工作者参考. 我作为初版书的主译者, 受 J. W. Goodman 教授委托, 组织这一任务. 但是原来的四个译者中, 达三已经去世, 年逾培森八旬, 在国外儿女照拂下养老. 只有其智和我, 还能参加这一工作. 翻译《傅里叶光学导论》(第三版) 时, 陈家璧同志加入翻译工作, 因此这次就再次邀请他参加.

家璧一直在信息光学领域工作, 经常用到 Goodman 教授的几本书, 对这几本书有深刻的领会, 这从书末他写的译后记可以看到. 他也担负了本版翻译工作的最大工作量, 由他来领衔这一版的翻译是合适的 (本版翻译工作具体的文字分工是: 秦克诚翻译第一至第四章及全书统稿和文字修饰、译名统一, 陈家璧翻译第五至第七章及附录, 主持最后定稿, 曹其智翻译第八和第九章).

我们相信这本书的中文版对 21 世纪我国光学事业的发展, 乃至我国整个科技事业的发展, 以及科技现代化的实现, 有着重要意义. 希望光学界的广大科技工作者能够从中得益, 应用《统计光学》, 在未来的宏伟计划中, 推动我国光学工作取得弯道超越, 跻身世界前沿.

秦克诚

2017 年 8 月

第二版序

本书初版出版于1985年,大约30年前.在这段时间里,技术发生了重大的变化:不仅在电子学中,而且在光学中.光学技术中的这些变化使一些新应用成为可能,其中许多在1985年用当时能提供的技术是根本无法实现的.但与此同时,一些基础性的基本概念,对理解这些老的和新的发展,仍然是有用的.本书引进的概念有许多就属于这一类.这个第二版与本书的初版有哪些区别?虽然各章的标题和顺序一仍其旧,但是内容在许多重要方面已经作了改变.首先,一切手绘的曲线图都已重绘,有的是用 Mathematica 绘制的,以得到各个函数的更精确的表示.更重要的是,作了以下的重大变化:

第4章:

- 扩充了关于单模激光的统计性质的一小节.

第5章:

- 将对 Fellgett 优点的讨论加进讨论 Fourier 光谱学的一小节.
- 增加了讨论光学相干层析术的一小节.
- 增加了讨论光纤传感器的相干复用技术的一小节.
- 增加了讨论 Schell 模型场和准均匀场的几小节.
- 增加了讨论互强度函数的相干模式的一小节.
- 增加了讨论系综平均相干性的一小节.

第6章:

- 重写了热光积分强度的概率密度函数的“精确”解的讨论.
- 精简了关于有限测量时间的互强度的统计性质的讨论,有些结果移到习题中.

第7章:

- 预备知识一节作了精简.
- Hopkins 公式一小节作了改进.
- 改进了像的强度谱的频域计算一节的若干部分.
- 用部分相干照明得到的像增加了几个例子.
- 讨论散斑的一节作了相当大的扩充.

第8章:

- 增加了几节,讨论有大气湍流存在时恢复物的信息的交叉谱技术和双谱

技术.

- 扩充了自适应光学一节.
- 增加了有大气湍流出现时相干照明物体的成像一节.

第9章:

- 增加了关于读噪声的一节.

附录:

- 将两个特别详尽的数学论证移到了附录中.

习题:

- 本版中收入了不少新习题.

参考文献:

- 增添了许多新参考文献.

本书初版是没有习题解答的,这一版有了,可向出版社索要.

感谢 San Ma 读这一版前几章的校样,也要感谢 Rochester 大学的 James Fienup 教授在我撰写和出版这一版的漫长过程中对本书的建议和评论. 此外,还想感谢他的3个研究生: Zack De Santis、Matt Bergkoetter 和 Dustin Moore,他们细心地读了这一版的大部分手稿,找出许多排印错误,并为改进提出了很有用的建议. 也感谢 Michael Roggemann 教授,他读了第8章并予以评论. 非常感谢 Moshe Tur 教授,他从本书初版出版以来,在这些年里提供了许多改进的建议. 最后,深深感谢我的妻子翰美 (Hon Mai),她容忍我在计算机旁一坐就是几个小时,来写本书的第二版. 希望读者会发现,这一新版表述清晰,并且对他们的工作有用.

Joseph W. Goodman

于加利福尼亚州 Los Altos

中文（初）版序言

在光学教学中，一种自然的进程通常是，从几何光学的光线处理方式出发，进而讨论对衍射和干涉现象的波动处理。在掌握了这些基本概念之后，学生就可以学习更数学化的 Fourier 光学，它讨论的是光通过透镜和透明片系统传播的完全确定性的问题。光学教程通常就在这里结束。我写本书的前提是，完整的光学教程也应当包括对光场的统计性质的详尽说明，因为许多光学问题是不能用确定性方式处理的，反之，它们需要从随机性观点出发来解决。

本书中文版翻译的准备工作经过了一段相当长的时间。特别感谢北京大学的秦克诚，他非常细心地读了本书的英文手稿，提出了许多重要的更正和改进的建议。也感谢参加本书翻译工作的其他人，包括刘培森、曹其智和詹达三^①。

诚挚地希望本书将对中国的四个现代化进程做出微薄的贡献，特别是能够有助于加强中国在光学的广阔领域内已经给人深刻印象的研究工作。

作 者

1985 年 9 月 1 日于加利福尼亚州斯坦福大学

^① 本书初版翻译分工如下：秦克诚译第一至四章及附录，詹达三译第五、六章，刘培森译第七章，曹其智译第八、九章，最后译文由秦克诚、刘培森总校。本书第二版翻译分工如下：秦克诚译第一至第四章及汉英对照索引，陈家璧译第五至第七章及附录，曹其智译第八和第九章，最后译文由秦克诚、陈家璧总校。——译者注

初 版 序

从 20 世纪 60 年代初期以来，人们已逐渐接受了这一主张：现代的光学专业训练应当充分阐明 Fourier 分析和线性系统理论的概念。我认为，对概率和统计学工具来说，一个类似的阶段也已到来，任何高等的光学教学计划都应将“统计光学”领域内的某种训练包括在内作为一个不可缺的部分。我写本书就是为了满足这个领域有一本合适的教科书的需要。

本书讨论的问题是非常物理的，但是常常被数学遮掩。因此，作为本书的作者，我便面临下面的两难处境：如何最好地使用强大的统计学数学工具，而又不致看不到它下面的物理内容。在数学严格性方面必须作一些让步，并且要尽可能反复强调各个数学量的物理意义。由于干涉条纹的生成是大多数这类问题中最基本的物理现象，我尽可能紧密结合条纹来讨论数学结论的意义。我希望，本书所用的处理方法对光学工程师和电气工程师特别有吸引力，同时对物理学家也有用。这种处理方法既适合自学，也适合课堂中的正式讲授。书中收入了许多习题。

本书包括的材料覆盖很宽的领域。第一章扼要叙述全书内容，我们不在此重复。本书是根据斯坦福大学“统计光学”课程的讲义改写而成，这门课在一个学季的 10 周时间内讲完，但是，书中的材料足够在 15 周的一个学期甚至两个学期内使用。于是问题在于在一个学季的情况下，哪些材料可以省略。

要在一个学季内学完这门课，重要的是，学生以前应学过概率论和随机过程，并且很好地掌握了 Fourier 方法。在这些条件下，我建议老师让学生自学第一、二、三章，直接从第四章的光学开始讲授。在时间不够时，下面各节可以省略或都留给学生自己阅读：5.6.4 节，5.7 节，6.1.3 节，6.2 节，6.3 节，7.2.3 节，7.5 节，8.2.2 节，8.6.1 节，8.7.2 节，8.8.3 节，9.4 节，9.5 节及 9.6 节。值得一提的是，有时我也用第二章和第三章的内容作为一门一学季的“概率论和随机过程初步”课程的基础。

本书的雏形是 1968 年斯坦福大学的“统计光学”课程所用的粗略的讲义，因此本书的成书已经历了一段很长的时间。从许多方面来讲，它的成书时间是太长了（我的有耐心的出版者一定会同意这一点），因为在 15 年多的时期里，任何领域都会发生重大的变化。因此，我面临的挑战是，处理题材的方式能够不随时间的推移而过时。为了使信息尽可能最新，在有些章的末尾给出了最新的补充参考文献。

1973 ~ 1974 学年, 当我有幸在法国 Orsay 光学研究所度过一年教学假时, 那份粗略的讲义开始变成得到更细致加工的手稿. 直接邀请我的 S. Lowenthal 教授和研究所所长 A. Marechal 教授都非常周到地尽了东道主之谊. 他们不仅向我提供了使工作富于成果所需的全部环境, 而且还非常善意地免除了通常伴随一个正式职位而来的各项责任. 我非常感谢他们的支持和劝告, 没有这些, 本书就不会有一个坚实的开端.

书写进展缓慢带来的一个好处是, 多年来, 我有机会把本书的内容向许多研究生讲授, 他们有一种神奇的能力, 会指出手稿中缺乏说明力的论点和错误. 因此, 我非常感谢在斯坦福大学听过我的统计光学课的学生们. 这份不断改进的讲义还在一些别的大学使用过, 我感谢佐治亚州理工学院的 W. Rhodes 和南加州大学的 T. Strand, 他们反馈给我的信息有助于表述方式的改进.

一个作者同他(她)的出版者之间的关系常常是疏远的, 有时甚至是不愉快的, 但是本书的情况完全不是这样. John Wiley 出版公司的编辑 B. Shube 在 15 年前鼓励我写这本书, 她不但极有耐心和非常体谅作者的困难, 而且给了我许多鼓励并成了我很好的朋友, 与她共事是非常愉快的.

我特别感谢北京大学的秦克诚, 他花了很多时间读手稿, 并提了许多改进的建议. 还感谢 J. Clark, 她非常出色地打印了全部手稿, 包括所有难打的数学公式.

最后, 我无法以恰当的言辞表达我对妻子 Hon Mai (林翰美) 女士和女儿 Michele 的感激之情, 在我埋头写作时, 她们没有我的陪伴度过了漫长时光, 却仍然给予了我亲切的鼓励.

Joseph W. Goodman

1984 年 10 月于加利福尼亚州斯坦福大学

目 录

中文第二版前言

第二版序

中文（初）版序言

初版序

第一章 引言	1
1.1 确定性的与统计的现象和模型	1
1.2 光学中的统计现象	2
1.3 本书内容概述	4
第二章 随机变量	5
2.1 概率的定义和随机变量	5
2.2 分布函数和密度函数	6
2.3 推广到两个或多个联合随机变量	9
2.4 统计平均	11
2.4.1 随机变量的矩	12
2.4.2 多个随机变量的联合矩	12
2.4.3 特征函数和矩生成函数	14
2.5 随机变量的变换	16
2.5.1 普遍变换	16
2.5.2 单调变换	18
2.5.3 多元变换	20
2.6 实数随机变量之和	21
2.6.1 求 $p_Z(z)$ 的两种方法	22
2.6.2 独立随机变量	23
2.6.3 中心极限定理	24
2.7 Gauss 型随机变量	25
2.7.1 定义	25
2.7.2 Gauss 型随机变量的特殊性质	27

2.8	复数值随机变量	29
2.8.1	一般描述	29
2.8.2	复数 Gauss 型随机变量	30
2.8.3	复数值 Gauss 矩定理	32
2.9	随机相矢量和	33
2.9.1	初始假设	33
2.9.2	均值、方差和相关系数的计算	34
2.9.3	长度和相位的统计	35
2.9.4	一个常相矢量加一个随机相矢量和	37
2.9.5	强恒定相矢量加一个弱随机相矢量和	40
2.10	Poisson 随机变量	41
	习题	41
第三章	随机过程	45
3.1	随机过程的定义和描述	45
3.2	平稳性和遍历性	47
3.3	随机过程的谱分析	51
3.3.1	已知函数的谱密度	51
3.3.2	随机过程的谱密度	52
3.3.3	随机过程经线性滤波后的能谱密度和功率谱密度	53
3.4	自相关函数和 Wiener-Khinchin 定理	55
3.4.1	定义及性质	55
3.4.2	与功率谱密度的关系	55
3.4.3	一个计算例子	57
3.4.4	自协方差函数和结构函数	59
3.5	交叉相关函数和交叉谱密度	59
3.6	Gauss 型随机过程	61
3.6.1	定义	61
3.6.2	经过线性滤波后的 Gauss 型随机过程	62
3.6.3	广义平稳性和严格平稳性	63
3.6.4	四阶矩和高阶矩	63
3.7	Poisson 脉冲过程	63
3.7.1	定义	63
3.7.2	从基本假设推导 Poisson 统计	66
3.7.3	从随机事件时间推导 Poisson 统计	67
3.7.4	Poisson 过程的能谱密度和功率谱密度	68

3.7.5	双重随机 Poisson 过程	70
3.7.6	经过线性滤波的 Poisson 脉冲过程	72
3.8	从解析信号导出的随机过程	74
3.8.1	单色信号的复信号表示	74
3.8.2	非单色信号的复信号表示	75
3.8.3	复包络或随时间变化的相矢量	77
3.8.4	解析信号作为一复数值随机过程	77
3.9	圆形复数 Gauss 型随机过程	80
3.10	Karhunen-Loève 展开	81
习题		83
第四章	光的某些一阶统计性质	87
4.1	光的传播	87
4.1.1	单色光	87
4.1.2	非单色光	88
4.1.3	窄带光	89
4.1.4	强度或辐照度	90
4.2	热光	91
4.2.1	偏振热光	91
4.2.2	非偏振热光	94
4.3	部分偏振热光	95
4.3.1	窄带光通过偏振敏感系统	95
4.3.2	相干矩阵	97
4.3.3	偏振度	100
4.3.4	瞬时强度的一阶统计	102
4.4	单模激光	103
4.4.1	理想振荡	104
4.4.2	具有随机的瞬时频率的振荡	105
4.4.3	Van der Pol 振子模型	106
4.4.4	激光器输出强度统计的一个更完备的解	112
4.5	多模激光	114
4.5.1	振幅统计	115
4.5.2	强度统计	116
4.6	激光通过变动的漫射体产生的热光	118
习题		119

第五章 光波的时间相干性和空间相干性	122
5.1 时间相干性	122
5.1.1 测量时间相干性的干涉仪	123
5.1.2 自相关函数对预言干涉图的作用	125
5.1.3 干涉图与光的功率谱密度的关系	127
5.1.4 Fourier 变换光谱学	130
5.1.5 光学相干层析术	132
5.1.6 相干复用技术	137
5.2 空间相干性	138
5.2.1 Young 氏实验	139
5.2.2 实验的数学描述	140
5.2.3 若干几何因素的考虑	143
5.2.4 准单色条件下的干涉	145
5.2.5 交叉谱密度和谱相干度	147
5.2.6 相干性的各种度量的小结	149
5.2.7 针孔有限大小的效应	150
5.3 空间相干性与时间相干性的可分离性	151
5.4 互相干的传播	153
5.4.1 基于 Huygens-Fresnel 原理的解	153
5.4.2 支配互相干性传播的波动方程	155
5.4.3 交叉谱密度的传播	157
5.5 互相干函数的特殊形式	157
5.5.1 相干光场	158
5.5.2 非相干光场	160
5.5.3 Schell 模型光场	161
5.5.4 准均匀光场	161
5.5.5 互强度函数的相干模式展开	162
5.6 部分相干光被一个透射结构衍射	162
5.6.1 薄透射结构对互强度的作用	163
5.6.2 观察到的强度图样的计算	163
5.6.3 讨论	165
5.6.4 一个实例	166
5.7 Van Cittert-Zernike 定理	167
5.7.1 定理的数学推导	168
5.7.2 讨论	169
5.7.3 一个实例	170

5.8 广义 Van Cittert-Zernike 定理	173
5.9 统计平均相干性	175
习题	177
第六章 涉及高阶相干性的一些问题	183
6.1 热光或膺热光的积分强度的统计性质	184
6.1.1 积分强度的均值与方差	184
6.1.2 积分光强概率密度函数的近似形式	187
6.1.3 积分光强概率密度函数的“精确”解	191
6.2 有限测量时间下互强度的统计特性	195
6.2.1 $J_{12}(T)$ 的实部和虚部的矩	196
6.3 强度干涉仪的经典分析	200
6.3.1 振幅干涉度量学和强度干涉度量学	201
6.3.2 强度干涉仪的理想输出	202
6.3.3 干涉仪输出中的“经典”噪声或“自”噪声	205
习题	208
第七章 部分相干性对成像系统的影响	210
7.1 预备知识	210
7.1.1 部分相干光通过薄透射结构	210
7.1.2 Hopkins 公式	212
7.1.3 焦平面到焦平面之间相干性的关系	214
7.1.4 一般光学成像系统	214
7.2 像强度的空间域计算	216
7.2.1 计算照射到物体上互强度的一种方法	217
7.2.2 Zernike 近似	217
7.2.3 临界照明和科勒照明	219
7.3 像强度谱的频率域计算	220
7.3.1 在频率域中互强度的关系	220
7.3.2 传递交叉系数	222
7.4 非相干极限和相干极限	224
7.4.1 非相干情况	225
7.4.2 相干情况	226
7.4.3 光学成像系统何时是完全相干的或者是完全非相干的?	227
7.5 若干实例	229
7.5.1 两个相距很近的点的像	229

7.5.2	振幅阶跃的像	232
7.5.3	π 弧度相位阶跃的像	233
7.5.4	正弦振幅物体的像	233
7.6	在干涉度量过程中像的形成	236
7.6.1	成像系统作为一个干涉仪	236
7.6.2	非相干物体的情况	238
7.6.3	用干涉仪收集像的信息	240
7.6.4	Michelson 测星干涉仪	242
7.6.5	相位信息的重要性	243
7.6.6	一维情况下的相位信息恢复	245
7.6.7	二维情况下的相位信息恢复——迭代相位恢复	247
7.7	相干成像中的散斑效应	249
7.7.1	散斑的起源和一阶统计	250
7.7.2	统计平均 Van Cittert-Zernike 定理	251
7.7.3	图像散斑的功率谱密度	253
7.7.4	散斑的抑制	255
习题		258
第八章	通过随机非均匀介质时的成像	261
8.1	薄随机屏对像质的影响	262
8.1.1	假设和简化	262
8.1.2	平均光学传递函数	263
8.1.3	平均点扩展函数	265
8.2	随机相位屏	265
8.2.1	一般表述	266
8.2.2	Gauss 随机相位屏	266
8.2.3	相位方差很大时平均 OTF 和平均 PSF 的极限形式	270
8.3	当作厚相位屏的地球大气	272
8.3.1	定义和符号	273
8.3.2	大气模型	275
8.4	电磁波通过非均匀大气的传播	278
8.4.1	非均匀介质中的波动方程	278
8.4.2	Born 近似	280
8.4.3	Rytov 近似	281
8.4.4	强度统计	283
8.5	长曝光 OTF	285

8.5.1	用波结构函数表示长曝光 OTF	286
8.5.2	波结构函数的近场计算	289
8.5.3	折射率结构常数 C_n^2 的平滑变化效应	294
8.5.4	大气相干直径 r_0	296
8.5.5	球面波的结构函数	298
8.5.6	推广到更长的传播路程——对数振幅和相位滤波函数	298
8.6	短曝光 OTF	304
8.6.1	长曝光和短曝光的比较	304
8.6.2	平均短曝光 OTF 的计算	305
8.7	星体散斑干涉计量术	309
8.7.1	方法的原理	310
8.7.2	对方法的一个启发性分析	312
8.7.3	模拟	314
8.7.4	更完全的分析	316
8.8	交叉谱或 Knox-Thompson 技术	317
8.8.1	交叉谱传递函数	317
8.8.2	对 $ \Delta\vec{r} $ 的制约	318
8.8.3	模拟	319
8.8.4	从交叉谱复原物谱相位信息	320
8.9	双谱技术	321
8.9.1	双谱传递函数	322
8.9.2	从双谱中复原全部物的信息	323
8.10	自适应光学	324
8.11	理论结果的普遍性	327
8.12	激光照明的物通过有湍流的大气成像	328
	习题	330
第九章	光的光电探测的基本限制	335
9.1	光电探测的半经典模型	335
9.2	经典光强的随机涨落的效应	337
9.2.1	十分稳定的单模激光器的光电计数统计	338
9.2.2	偏振热光的光电计数统计	339
9.2.3	偏振效应	342
9.2.4	空间相干性不完全的效应	344
9.3	简并参量	345
9.3.1	光电计数的涨落	346