

# 激光物理和基本理论

《激光手册》 第一分册

F. T. 阿 雷 克 主编  
E. O. 舒尔茨-杜波依斯

科 学 出 版 社

## 内 容 简 介

本书包括五篇综述性论文,论述光场统计性质的理论及实验测量,激光系统的半经典理论,激光系统的量子理论以及光学谐振腔的理论.本书着重介绍基本概念和物理图象,叙述简洁清晰,可供光学、激光等有关专业师生及科研人员参考.

F. T. Arecchi, E. O. Schulz-DuBois

LASER HANDBOOK

North-Holland, 1972

### 激光物理和基本理论

《激光手册》第一分册

F. T. 阿雷克 E. O. 舒尔茨-杜波依斯 主编

《激光手册》翻译组 译

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

北京印刷三厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1977年11月第一版 开本: 787×1092 1/32

1977年11月第一次印刷 印张: 11 1/8

印数: 0001—12,300 字数: 245,000

统一书号: 13031·634

本社书号: 923·13-3

定 价: 1.15 元

## 中译本前言

自从第一台激光器出现以来,激光理论和激光技术的发展非常迅速.目前激光已在国防、国民经济和科学技术的许多方面得到了广泛应用.《激光手册》综述了激光的物理原理、技术设计及其应用,虽出版于1972年,但书中论述的许多基本原理和基本技术仍然适用.遵照伟大领袖和导师毛主席关于“洋为中用”的教导,我们将它译成中文,以供读者参考.

本书原著分为基础理论(A),各类激光器(B),激光器件与技术(C),非线性光学材料(D),物理应用(E)及技术应用(F)等六个部分,共收综述性文章40篇,分为上、下两卷出版.中译本对部分章节作了调整,准备分六个分册出版.原书的A部分为第一分册,原书的B和C两部分调整为第二和第三分册,自原书E部分选出一篇文章与D部分合编成第四分册, E部分的其他文章为第五分册, F部分为第六分册.

本分册第一、第三和第五章由杨顺华同志翻译;第二章由吴令安、黄锡毅、杨国祯同志翻译;第四章由邱元武同志翻译,张志三同志校订.由于译者水平有限,肯定会有错误和不足之处,欢迎读者批评指正.

## 序 言

激光领域在许多方面是很吸引人的，这种吸引人的魅力无疑大部分是由于激光出现以来所表现出来的快速进展。促成这种快速发展的有很多因素，这些因素是：过去有可能，现在仍然有可能在这方面作出重大的科学技术成就；过去认为，现在仍然认为只要不多的投资，激光工作就可以带来有利的报酬；过去有，现在仍然有相当数量的高级研究小组，由于他们的共同努力，已取得了惊人的进展；最后的，但并非不重要的是，对激光工作的热忱大部分可能和这样一个事实有关，即激光过去是，现在仍然是一个年青的领域。

的确，几乎用任何尺度来衡量，激光领域都是年青的。和一个科学家可能希望经历的二十年或三十年富有成果的时期相比，激光是年青的。和其它发挥了同样科学技术影响的领域——例如半导体硅和锗的领域——相比，激光是年青的。即使我们考虑到，把实验室环境的新现象推广到常规的工业工程上去所必需的通常的发展周期是几年，激光领域也是年青的，因此它未来的发展是大有希望的。

从历史上看，激光领域的产生是通过把受激放大技术从电磁波谱的微波波段推广到光学波段而实现的。Townes (1951)<sup>[1]</sup>，Weber (1953)<sup>[2]</sup>，Basov 及 Prokhorov (1954)<sup>[3]</sup> 等人曾经各自提出过辐射的受激发射，作为实现微波频段的振荡和放大的一个方法。Bloembergen(1956)<sup>[4]</sup> 提出了一个成功的多用途微波激射器抽运方案。Gordon, Zeiger 及 Townes (1954)<sup>[5]</sup>，Scovil, Feher 及 Seidel(1957)<sup>[6]</sup> 所作的由辐射的

受激发射而产生的微波放大作用(简称微波激射器作用)的演示,及随后的研究与发展的努力,证明了这一原理有可能导致实现噪声很低的高度单色性的振荡器与放大器. 1958年, Schawlow及 Townes<sup>[7]</sup>第一次建议把微波激射器原理推广到光学频段. 他们的文章把微波激射器及光学光谱领域的知识总结起来并加以外推. 它提出,开放式共振腔,例如 Fabry-Pérot干涉仪,可能会有选择地提供几个Q值很高的辐射模式,而使大量的其它模式的Q值很低. 这篇文章接着就预言了激光的一些性质,如相干性、方向性、线宽和噪声等.

1960年 Maiman<sup>[8]</sup>第一次观测到激光作用. 这是从室温下的红宝石得到的,其光泵用的是一个闪光灯,类似于照相术中使用的这种闪光灯. 这一发现刺激了激光工作,使之有如雪崩一般在各地许多实验室中开展起来,并很快就导致了其它系统的激光作用的演示,有用其它固体,用各种气体,用半导体的,还有用各种液体的.

到这里,我们不打算继续叙述此后激光与有关研究的历史. 本书中论述激光领域各种具体问题的章节,将简要地谈到一些有关的历史. 这里只须指出,由于许多研究小组的共同努力,激光领域尽管年青,却已达到惊人的成熟程度. 虽然这一论断也许不能适用于整个激光领域,但它的确适用于许多重要的专门部分,这些专门部分相当早地就被选定,而在随后的几年中曾被集中力量探索过.

可以提出几个例子来说明这一发展情况:

(i) 在固态离子激光器中,所有可能重要的起激光作用的离子,一段时间以来,恐怕全是已知的了. 在连续波功率、脉冲峰功率及脉冲能量密度等方面的现有成效,接近了由激光物质与光学元件的破坏所施加的根本限制,从而进一步的显著增加似乎是办不到的. 但是,也得承认,我们有可能找到

新的适合于激光器的基质材料,而且可以期望工程上的不断进展可能使这些器件变得更容易操作和维护。

(ii) 在气体激光器方面,很可能所有有关的原子激发机制都已被识别清楚。另一方面,在这几年内,能够进行激光工作的气体,金属蒸气以及气体混合物等的数目不断地增加,并且很可能还要继续增加。激光跃迁的数目也是这样。在连续的或脉冲的输出功率、最小线宽以及频率稳定性等方面,今天的成就已经达到了令人惊叹的水平。虽然理论推断指出相当大的改进应当还有可能,但可以合理地推论,对这些参数之一做任何数量级上的改进,将要求和技术上继续付出更为重大的努力。另一方面,在气体激光器中,通过新颖的激励手段,例如横向放电、气体动力学、或化学反应,所取得的新近的进展表明,其它一些类型的技术还有发展的余地。

(iii) 在半导体激光器中,最近几年进展的特点是 GaAs 器件的结的结构精致程度的大大提高。除非发生一个现在还未能预料的突破,否则继续前进就要投入相当多的技术力量,以求得在可能达到的成就方面获得缓慢进展。另一方面,除 GaAs 以外的其它材料的潜力尚未大力研究。

(iv) 液体激光器,比较起来更为年青,发展较差。可以预料会有许多进展。但是,除了调频能力外,难以想象液体激光器能在某个方面大幅度地超过固体激光器的成就。

(v) 激光理论,在某些近似的范围内,已经达到了高度完善的程度。对复杂程度不同的各种激光器模型已经进行了分析,达到了不同的精致程度。最有意义的可能是,激光反映辐射的量子性质的某些方面,例如起伏与光子统计,都已为理论适当地作了描述。这一点使人们设想,可能激光理论中最重要的工作已经完成了。

上面提到的各种近似之中,有一个近似意味着激光系统

中的激活原子在某种意义上是统计无关的，从而允许对密度矩阵进行因式分解。另一近似允许对原子变量进行所谓“绝热”消去。曾假定光子寿命（即在激光器腔中光场的时间常数）大大长于原子极化的响应时间，因此原子极化总是与瞬时场平衡的。这两个近似引导出激光器动力学的相当简化了的描述。这些作为基础的物理假定显然已在现存的激光器中得到了很好的验证。但是，还不清楚的是，是否可能有一些激光器，对于它们某一个近似是不成立的。对于这么一类激光器，就必须发展另一类型的理论。

当人们寻求激光理论的一些自然推广时，这些推广可能可以适用于激光系统以外的一些系统。人们把激光理论看作是量子统计力学中特定的非线性问题的一般解。但是，可以希望类似的技术能被发展用于更复杂的多模合作的量子系统，这些系统会表现不稳定性，例如表现为二级相变的形式。这一方面<sup>[10]</sup>将在第一分册第二章中简要地讨论。

(vi) 在非线性光学中，激光器被用作原始光源。在这一领域中已经完成了许多基础工作。材料有关参量的对称性质已经了解，原子结构给这些参量的数值带来的限制性也已了解。然而，还有许多材料参量仍有待测定。因此开发性的研究工作接近完成，而有关设计所要求的工作中还留有許多要做。

(vii) 在科学实验室中，特别是与固体物理研究有关的实验室中，已经把激光器用于日益复杂与精致的一些实验，这种情形是显著的，虽然不全是如此。已经设计出许多高度成功的实验技术，并获得了不少有价值的知识。肯定这一趋势将继续下去，或许很有可能会加速。

(viii) 在工业应用方面，激光器的使用为人们接受的程度要比许多人所预期的慢一些。到目前为止，最受人欢迎的激光器应用都是相当平凡的那些应用，其中辐射只是作为用

以打孔和焊接的一个方便形式的能量来源；或者是利用波长的尺度测量一些距离；或者是，用光束决定建筑工程中的参考方向。但是，可以比较安全地设想，在一定时间内，有一些别的更非此不可的激光器应用，将会广泛地采纳。

重复一句，我们认为激光领域尽管年青，但已成为一个相当成熟的领域。说它成熟，最明显之点在于，对基本过程与基础技术有了很好的研究。然而从激光器在科学与技术的各个领域的应用，就可以最清楚地看出激光领域是年青的。

在这种情况下，我们认为现在正是时候，应该采用一种百科全书式的评述方式，把激光领域中的现有知识集中起来。这样一部书能起两个作用，即对于激光研究中的比较成熟的那些部分提供一个有持久价值的评述，而对那些激光器应用的比较年青的部分则提供一个有用的现代的概观。在编者及其部分友人与出版者的早期讨论中，逐步明确了《激光手册》（我们那时就已想到这个书名）将满足一种许多人共同感到的需要。对于激光领域中那些可以预见到不会有重大改变的比较确定的方面，需要有一部书来介绍现有知识与经验，对于这些方面，这部手册应当对于各种论题提供内容完整的论述。虽然为了易读，它们是按教学方式写的，但却必须把它们引向与研究工作的前沿发生密切联系。一般说来，在阅读了这部手册的适当章节以后，去学习原始的研究文章应当是可能的。至于对激光器研究与应用中的那些比较容易变化的部分，本书的目的就多少有些不同了。对这些部分，手册应当集中在那些已确定的基本问题上，而应以较少篇幅评述已经获得的结果，或是指出将来可能的发展方向。虽然手册的这一部分有关各章会显出具有较少持久价值，但是它们应当对一特定专业方面，它的问题，它的术语与文献，提供一个方便的入门。



这些目标使《激光手册》有别于许多导引式的教科书，最近几年来出版了许多这类教科书<sup>[11]</sup>。但是，我们认为，初学激光的人员最好是先通过某一本这类教科书先熟悉这个领域，然后他就能充分利用这部《激光手册》了。同样，这部《激光手册》不可能也不企图去代替详尽的专门的专著。

在我们早期的讨论中逐步明确，这部《激光手册》主要将在科学和技术队伍中得到应用，我们谈几个典型的情况：

(i) 有一些工业方面的发展工作小组，他们工作的目标是使先进的制造过程趋于完善。对于他们激光器只是一种工具，虽说是一种精致而多用途的工具。这部手册对这些工作者们提供足够的背景，而无须求助于原始文献。所给出的资料可以提示他们对原来的方法做出改进，或者提供另外的、更为有效的途径。

(ii) 有一些科学工作小组，他们研究某一类现象，对于这些现象，同样地，激光器也只不过是一种诊断工具，或是作为一种手段借以激发其它令人感兴趣的过程。这里，这部手册提供的背景资料也可以证明为对设计改善的实验是有价值的，例如，可以得到更高的精确度，更快的速率，更高的灵敏度，或者是在光谱中的另一频段工作。

(iii) 还有一些研究小组，他们的工作范围是激光领域本身的某一特殊分支。对于这样的小组，这部手册将对他们自己的专业给出内容充实的导论，这种小组中新的成员可能最能感到这一好处。另一方面，在这些专门领域中的生气勃勃的工作显然要求非常详细地熟悉当前的研究工作出版物，所以只由一部手册的有关章节所提供的知识对专业研究工作者来说是不够的。本书对这样一个研究组的作用，大概能够提供可能有关的其它专门激光课题的好的背景知识。这种背景知识，由于要从原始文献中集中起来，所以得来不易，它可能会刺

激在某些方向上的进展,这些方向并非在一开始就是明显的.

(iv) 有一些激光理论研究组,它们的主要任务是对激光现象与量子统计力学中的有关论题进行理论分析或者还进行数字计算.对这样的小组,这本手册将给他们提供一大类现象的描述,如果没有这样的描述,这些现象就有可能为理论工作者所忽视.同时,这部手册将使这些理论小组了解应用科学家与设计工程师所关心的那些问题.我们希望这种了解可能导致使理论家与工程师同样都感兴趣的方案,而如果这办不到,它至少可以有助于消除象牙之塔的心理状态.对于初学理论的人,这本手册中,关于激光理论的简要章节也可能被证明是进入这一领域的一个方便之点.

在早期关于这部手册的范围的讨论中,我们也明确了需要有相当数量的作者作出贡献.事实上,在我们方案的酝酿过程中,所要求的作者数增加了一些.现在共有四十章是由 53 位作者写出的.我们认为很幸运的是,大多数我们所邀请的作者都以愉快的合作来回答我们的请求.我们不曾企图使作者的阵容尽可能地国际化,也不企图使这个阵容在任何意义上有代表性.事实上,作者阵容中缺了几个很富有成果的激光实验室及某些国家中的成员.虽然如此,我们高兴地看到,在《激光手册》各章的作者当中,有许多重要的研究组织的成员,几乎遍及全世界.不用说,在这一方案上的合作已经加强了旧的友谊,并建立了一些新的友谊.

在这里仅仅提出一个例证,说明为了对某一领域作出充分的表述,我们感到需要如此大量的篇幅.现以固态离子激光器为例.这一论题的讨论自然地分解为几个更为专门化的论题范围,显然涉及到激光理论(第一分册第二、三章),也涉及到光学谐振腔的理论(第一分册第四章),尽管都不是以很具体的方式涉及到的.一个重要的题目是作为激光活性材料

的过渡金属及稀土金属离子的固态光谱(第二分册第一章)。除了选择激光活性材料以外,激光器设计还涉及要有一个适当的抽运装置,并附有冷却设备及其它配件(第二分册第二章)。为固体激光器还发展了许多特殊的技术,如Q开关和锁模(第二分册第三章)以及高功率脉冲放大(第三分册第一章)。最后固态离子激光器在许多应用方面都有用途,这些方面太多以致在这里无法举出那些有关的章节。显然在所有这些不同的专门论题上全是专家的作者,如果有也是很少的。因此我们决定,把这些论题交给不同作者(或者在某些情况下是成为小组的作者们)分别论述,这些作者都是在这些有关专业中名列前茅的专家。

为了方便,这一部手册分两卷出版。第一卷主要讨论激光器本身。第一部分是理论,包括相干理论,激光器工作与起伏的理论,光学谐振腔理论,以及光子计数统计理论,后一论题还有实验技术与实验结果的讨论。第二部分描述各种类型激光器的原理,即Q气体激光器、固态离子激光器、染料激光器以及半导体激光器的工作原理。第三部分考虑许多重要的实验室技术,它们是用激光器做实际工作所必需的。这一分册包括:用于固体激光器的光学抽运装置,Q开关及锁模,以及高功率放大;气体激光器的设计和操纵输出特性的一些技术;激光光束的调制与光检测;可调频参量振荡器;最后还有用于设计激光器线路组成的光学薄膜技术。第四部分讨论在研究光与光场、或电场、磁场、声场的非线性相互作用中所用的固态材料。

第二卷广泛地讨论了激光应用。第五部分集中叙述了激光器在物理实验室中富有成果的若干应用,其中大多数是用于固体的研究。它们包括:关于一些自发散射与受激散射过程[例如喇曼(Raman)散射,布里渊(Brillouin)散射及瑞利(Rayleigh)散射等]的叙述;光学二次谐波的产生及双光子光

谱学; 克尔(Kerr)液体中自聚焦以及类似的效应, 在这些效应中, 激光光束由于光学介质中的感生变化而改变了它们的传播特性; 相干共振传播效应, 诸如所谓的 $\pi$ 脉冲与 $2\pi$ 脉冲; 激光器用于产生并研究高温等离子体. 第六部分同样集中叙述了激光器在技术上的若干应用, 这些应用已经表现出实际的重要性, 或者至少有希望在实际上很重要. 它们包括: 全息术、图样识别、光学信息处理、计算机逻辑及存储的光学实现; 在高精度的计量学与雷达测距及导航中测量长度或距离; 激光器的机械加工技术, 例如, 冲孔、焊接、修整; 还有高速照相; 通讯; 以及最后, 激光在生物与医学上的应用. 这一卷末有一个主题索引.

上面所说的这一大纲及一般性的考虑表明, 这部手册着重于在光谱的可见与红外波段的现在可用的设计与技术. 我们感到, 在手册计划开始的时候, 论题的选择是恰当的, 而且在某种意义上说甚至是最好的. 不幸, 出版一本书所要的提前时间是太长了, 因而包括某些更新近的发展是不可能的. 在可调谐的可见及红外光源方面, 很强的连续或脉冲红外激光器(横向激发的 $\text{CO}_2$ 激光器, 气体动力学激光器)方面, 都已得到了一些出色的成就. 一个与此相类似的成就是非常短的紫外波长激光器的演示. 激光控制化学反应也已成为一个有相当意义的研究领域, 而且很有可能, 它会发展成一个化学实验的标准技术. 我们感到遗憾, 本书未能叙述这些课题.

有一些论题, 虽然我们可能希望它们在将来某一时间会有进展, 但迄今为止还没有任何工作在进展; 当然, 要把这类论题写出来是更不可能了. 我们感到, 已经产生紫外与真空紫外激光器的现在盛行的向短波长方面的突击, 将在适当时间导致毫微米波长范围(X射线)的激光器——让我们简称为“毫微激光器”(nanolasers). 如果一旦这样的突破来到, 它

会引起在系统与组成部件上的有关工作。例如光波导, 聚焦器, 共振器, 调频器, 光束偏转器, 检测器等全部必须发展以适应这一新的波谱范围, 并要符合异乎寻常的设计判据。而且, 可能有的应用范围会大为扩展。只要想到, 从 X 射线衍射的数据(其中在记录过程中丢掉了位相的信息)来确定出维生素 B<sub>12</sub> 的分子结构<sup>[13]</sup>花了八年。现在, 试设想一下, 人们可能用相干的毫微米激光辐射记下一个全息图(这里位相的信息全部记录下来了的)再用可见光重现出来。这就会使分子结构成为直接可见的, 从而使分析的工作量减少千百倍。

这些最后的考虑, 使我们希望, 现有的手册内容应随时用出版新的补编的办法来加以补充。这些补编能预定是较短的, 因为, 有关的数学性基础应当已经包括在原来的《手册》之中了, 从而它们也可能较快出版。编者<sup>[14]</sup>希望读者提出关于应当这样处理的论题的意见。此外, 编者欢迎读者对现有的《手册》提出的任何评论。

最后, 愉快地对所有帮助这部手册出版的人们致谢。(下略)

### 注记及文献

- [1] 关于分子束微波激光器未发表的提议, 应用一个静电的态选择器以得到粒子布居反转。
- [2] 关于利用迅速倒反对一个史塔克盒上所施加的偏压以得到气体中粒子布居反转的提议, *Trans. I.R.E., P.G.E.D.*, 3.
- [3] 关于利用静电的态选择器得到分子束的粒子布居反转的提议, *J. Exp. Theoret. Phys. U.S.S.R.* **27**, 282; 关于利用一个气体的三能级抽运方案得到反转的提议, *ibid*, **28**, 249.
- [4] 关于利用固体中三能级抽运的提议, *Phys. Rev.* **104**, 324.
- [5] 氨分子束微波激光器作为放大器和振荡器的工作状态, *Phys. Rev.* **95**, 282.
- [6] 第一台固态三能级微波激光器的工作, *Phys. Rev.* **105**, 762.

- [7] Phys. Rev. **112**, 1940.
- [8] 早期出版物中命名为光学脉泽 (Optical Maser), 现在普遍采用 "Laser" 一词是 "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" (受激辐射引致的光放大) 的缩写.
- [9] Brit. Commun. Electron. **7**, 674; Nature **187**, 493.
- [10] 也请参看 Graham, R. and H. Haken (1970) Z. Phys, **237**, 31.
- [11] 关于激光专著比较新近的书目, 可见 Siegman, A. E. (1971).
- [12] 参阅比较新近的评述论文: 发表在 Ann. Rev. Phys. Chem. (1971) 上 C. Bradley Moore 的文章.
- [13] L. Bragg, Scientific American, July 1968.
- [14] 编者的邮寄地址是: Centro Informazioni Studi Esperienze, Casella Postale 3986, 20100 Milano, Italy, 和 IBM Zurich Research Laboratory, Säumerstr. 4, 8803 Rüschlikon, Switzerland.

# 目 录

中译本前言	.....
序言	.....
第一章 光子统计	.....1
1. 引论	.....1
2. 经典理论	.....3
3. 量子理论: 导言	.....5
4. 强度测量与符合测量	.....8
5. 一阶相干性与高阶相干性	.....13
6. 相干态	.....18
7. 依相干态展开	.....26
8. 特征函数与准概率密度	.....33
9. 若干例证	.....40
10. 光子计数分布	.....44
第二章 激光器工作的理论	.....54
1. 引论	.....54
2. 受激发射	.....58
2.1. 爱因斯坦的黑体辐射理论	.....59
2.2. 一个经典模型——弹簧上的电荷	.....61
2.3. 感生偶极矩	.....62
3. 激光的半经典理论	.....66
3.1. 电磁场方程	.....67
3.2. 介质的极化	.....70
3.3. 运动方程的积分	.....74
3.4. 单模工作	.....77
4. 多模工作	.....79
4.1. 双模工作	.....81

4.2. 三模间拍频的锁定 .....	84
4.3. 一般多模工作 .....	88
5. 气体激光器理论 .....	90
5.1. 多普勒展宽介质的极化 .....	92
5.2. 多模现象 .....	98
5.3. 强信号理论 .....	102
6. 半经典理论的推广 .....	106
6.1. 环型激光器 .....	107
6.2. Zeeman 激光器 .....	112
7. 量子理论, 运动方程 .....	119
8. 光子统计与激光辐射的线宽 .....	124
9. 与相变的类似 .....	130
附录	
A. 确定多模场的方程式 .....	136
B. 气体激光器的强度公式 .....	138

### 第三章 激光相干性, 噪声和光子统计的理论 .....

1. 激光理论的各种侧面 .....	145
2. 模式图象与波动图象 .....	146
3. 空间相干性与时间相干性 .....	147
4. 绝热近似及小振幅近似下的单模激光方程 .....	149
5. 激光方程的解释 .....	151
6. 近似解; 位相起伏与强度起伏 .....	152
7. 量子-经典对应 .....	155
8. 福克-普朗克方程和它的解 .....	157
8.1. 福克-普朗克方程 .....	157
8.2. 简约福克-普朗克方程的解 .....	158
9. 与超导电性的类似 .....	166
10. “非马尔科夫”效应 .....	168
10.1. 场方程 .....	170
10.2. 偶极矩 .....	170
10.3. 粒子占据数 .....	170
11. 历史的说明 .....	176



## 附录

- A. 郎之万力  $F^+$ ,  $F^-$ , 和  $F$  的性质 .....181
- B. 耦合常数与增益函数 .....182
- C. 具有非均匀展宽谱线的气体激光器与固体激光器 .....183

## 第四章 光学谐振腔 .....190

- 1. 放大相干光的开放式谐振腔 .....190
- 2. 开放式谐振腔的模的定义 .....194
  - 2.1. 模作为 Fredholm 积分方程的本征函数 .....194
  - 2.2. 模作为开放式谐振腔的自由振荡 .....198
  - 2.3. 开放式谐振腔的模的两个定义之间的关系 .....202
  - 2.4. 模的其他定义 .....204
- 3. 开放式谐振腔的模的计算 .....205
  - 3.1. 基本积分方程的简化 .....205
  - 3.2. 积分方程的迭代解法 .....209
  - 3.3. 其他方法和共振激发 .....217
  - 3.4. 对于大  $N$  值的渐近表达式 .....220
- 4. 几何光学近似 .....223
  - 4.1. 自由空间中的窄波束 .....223
  - 4.2. 封闭式腔中的窄波束 .....227
- 5. 其他类型的谐振腔 .....228
- 6. 研究谐振腔的实验技术 .....231

## 第五章 光场统计性质的测量 .....239

- 1. 引论 .....239
  - 1.1. 古典随机变量 .....240
  - 1.2. 古典随机过程 .....243
  - 1.3. 光场统计与光子计数统计 .....248
  - 1.4. 光检测过程: 一个启发式模型 .....255
  - 1.5. 光子计数统计与关联函数  $G^{(n)}$  的比较 .....259
  - 1.6. 光子计数统计几例 .....261
- 2. 光子计数实验技术 .....263
  - 2.1. 光检测器 .....263
  - 2.2. 光子计数技术 .....266
  - 2.3. 非关联噪声的减去法 .....270