

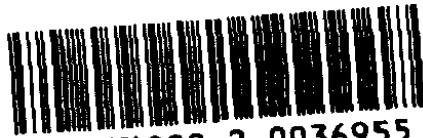
光学知识丛书

强光光学浅说

赫光生 刘颂豪 著



科学出版社



科工委学院802 2 0036955 0

光学知识丛书

强光光学浅说

赫光生 刘颂豪 著



科学出版社

1987

内 容 简 介

本书以简明通俗的语言，提纲挈领的描写方法，概括地介绍了激光技术出现之后，产生的一门新兴学科——强光光学或称非线性光学的主要内容，包括各种强光光学效应的产生原理、过程规律性、主要研究成果以及今后应用的发展趋势。

作者注重于新技术、新理论、新方法的介绍，避免使用繁琐的数学工具，对从事激光专业的同志有一定的参考作用，可以从中受益；就是那些高等数学基础欠佳的同志，也可以从本书中得到某种乐趣。

本书可作为高中以上文化程度的一般读者，包括大、中专学校的师生，非激光专业的科技工作者，对强光光学这门学科进行初步了解的入门参考书。

光学知识丛书 强 光 光 学 浅 说

赫光生 刘颂豪 著

责任编辑 姚平录

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1987年2月第 一 版 开本：737×1092 1/32

1987年2月第一次印刷 印张：5 1/4

印数：0001—2,100 字数：118,000

统一书号：15031·780

本社书号：4345·15-4

定价：1.00 元

前 言

六十年代激光技术的出现，是现代科学技术发展史上的一个重大事件。它不仅极大地促进了各种光学应用技术的发展，而且也极大地促进了一些基础学科的研究，带来了一系列新变化。在物理学（主要是光学）领域内，这些新变化的主要标志，是一门新兴分支学科——强光光学或所谓非线性光学的产生与发展。

强光光学，是研究强激光辐射与物质相互作用中出现的一系列新效应的产生原理、过程规律性和各种应用的可能性的专门学科。由于这门学科在学术内容上有许多新的特点，在技术发展上又有重要的应用潜力，因此它不但引起有关领域内专业科技人员的重视，而且同样引起对现代科学技术最新成就感兴趣的广大读者的关注。

编写本书的目的，在于力求以简明通俗的语言和提纲挈领式的描写方式，来概略地介绍各种强光光学效应的产生原理、过程规律性、主要研究成果以及今后应用的发展趋势。因此本书可作为具有中等以上文化程度的一般读者（包括大学低年级学生和非激光专业的科技工作者），对强光光学这门学科进行初步了解的入门参考书。

涉及到强光光学具体专业内容的严格描述，必须借助于基础光学、量子力学、量子电动力学、固体物理学等学科领域中的有关基础理论和数学工具；有兴趣对这方面作深入了解和钻研的读者，可进一步参阅作者和其他中外作者所写的有关专门著作。

作 者

1984年

目 录

前言

第一章 什么是强光光学	1
一、漫长的光学发展史的简短回顾	1
二、光学的内容和分类	5
三、强光辐射究竟“强”在哪里?	8
四、强光光学的内容和价值	12
第二章 光学介质的非线性电极化效应	17
一、线性电极化效应	17
二、非线性电极化效应	23
三、非线性电极化过程产生的条件	28
第三章 两波作用何以产生第三种光波	34
一、光学二次谐波效应	34
二、光学和频与差频效应	41
三、光学参量放大与振荡效应	45
第四章 三波作用何以产生第四种光波	51
一、光学三次谐波效应	51
二、光学四波和频效应	59
三、光学四波参量(差频)混频效应	63
第五章 强光自聚焦、自调制与自加宽效应	68
一、强光引起的介质折射率变化	68
二、强光自聚焦与自散焦效应	72
三、动态自聚焦引起的自调制与自加宽效应	75
四、自聚焦效应的研究意义	80
第六章 受激散射效应	82
一、普通光散射现象概述	82

二、受激喇曼散射效应	85
三、受激布里渊散射效应	93
第七章 光学双稳态效应	101
一、光学双稳态的定义和产生原理	101
二、纯光学控制法-珀干涉仪型双稳态装置的实验研究	108
三、其他几种类型的光学双稳态装置研究	113
第八章 光学相位共轭效应	118
一、畸变的平面光波和它的相位共轭波	118
二、用四波混频方法产生相位共轭波	123
三、产生相位共轭波的其他方法	131
第九章 强光光谱学效应	136
一、新型强光光谱学技术的特点	136
二、饱和吸收光谱学效应	139
三、双光子吸收光谱学效应	145
四、相干反斯托克斯喇曼光谱学效应	148
五、光声光谱学效应	151
六、光电流光谱学效应	154
七、激光分离同位素效应	156

第一章 什么是强光光学

在本书第一章里，我们将先简单回顾一下整个光学的发展历史，然后着重介绍六十年代激光技术出现之后，引起的光学学科本身的深刻变革以及强光光学这一崭新分支学科的产生与发展。

一、漫长的光学发展史的简短回顾

光学是一门十分古老，生命力又十分旺盛的技术学科。说它古老，是容易为人们所接受的。自从有了人类以来，人们的社会生产和社会生活活动就离不开光（特别是阳光）。人们对日常生活中经常看到的光学现象或不常见到的特殊的光学现象，自然会感到好奇并且会产生联想。早在公元前四至五世纪，已经有了对于简单光学现象的描述以及对于光的本性的猜想的正式文字记录，这可以看作是研究光学发展史的起点。由于受到当时社会发展水平的限制，所以在相当长的历史阶段内，人们对于光的本性和光学现象规律性的认识，相对说来，一直是处在一种相当初级的阶段。

现在回顾起来，整个光学的发展，可以粗略分为三个比较大的历史阶段：经典光学阶段（二十世纪以前），近代光学阶段（二十世纪初至六十年代），现代光学阶段（二十世纪六十年代以后）。

经典光学的发展历史阶段最长，其中意义重大的发展标志有三个：第一个标志，是十七世纪牛顿提出的关于光的本性的

微粒学说，以及惠更斯提出的关于光的本性的波动学说的并立；第二个标志，是十九世纪初，经杨氏和菲涅耳等人对于干涉和衍射现象的成功解释，而为人们所接受的关于光在本质上是一种波动过程的论断的成立；第三个标志，则是十九世纪后半叶，关于光在本质上是一种电磁波场，并可由麦克斯韦方程组加以描述的理论的确立。至此，经典光学的发展已达到十分完善的程度，它几乎可以解释所有当时人们已知的有关光的传播的现象（干涉、衍射、偏振、双折射等）的规律性。但也存在着用麦克斯韦电磁场理论无法解释的一些“例外”现象。其中最著名的是关于光的黑体辐射、光电效应、原子的线状光谱以及迈克尔逊-莫雷干涉实验等。这些现象当时虽然看来是个别的，但实际上，正是对这种关系重大的现象的深入研究与大胆探索，才导致了一场意义深远的光学革命的发生。

1900年，德国物理学家普朗克首次提出了关于物质体系与电磁波场交换能量过程中的量子化假设，并且成功地导出了与实验相符合的以他的名字命名的黑体辐射定律。这一突破，意味着光学的发展至此已告一段落，而新的近代光学开始诞生。这也是近代光学发展初期取得的第一项重大成就。这个时期取得的第二项重大成就，是1905年前后爱因斯坦提出的光在本质上是由光量子（光子）组成的假设以及狭义相对论的假设。基于光量子假设，可以成功地解释光电效应和黑体辐射；而基于狭义相对论假设，则可成功地解释迈克尔逊-莫雷干涉实验和其他有关光在运动坐标系中传播的现象。这以后不久，在普朗克假设和爱因斯坦光子假设的基础上，并受到他人研究成果的启发，丹麦物理学家玻尔首次提出关于原子中电子运动轨道量子化的假设，从而成功地定性解释了原子的线状光谱。到此为止，人们不得不承认这样

一种事实：一方面，在与光的传播特性有关的一系列现象（干涉、衍射、偏振、双折射等）中，光表现出波动的本性并可由麦克斯韦电磁场理论完美地描述；另一方面，在光与物质作用并产生能量与动量交换的现象过程中，光又充分表现出分立的量子化（粒子性）特征，并可由爱因斯坦的光子理论加以成功描述。受到光的这种波动-粒子双重性的启发，德布罗意于1924年前后首次提出关于一些基本粒子（如电子）也同样具有波动-粒子双重性的大胆假设，从而导致量子力学（波动力学）的诞生。相对论和量子力学的相继创立，宣告了整个经典物理学的终结和近代物理学的开始，并且是构成现代物理学的两大根本支柱。近代光学的最重要的标志，是本世纪二十年代末和三十年代初，由狄拉克和费米等人在量子力学基础上创立的量子电动力学理论。在这种理论体系中，将光场（电磁场）与物质体系（原子或分子等）作为一个统一的整体而加以量子力学式的处理，从而导致量子化电磁场与量子化物质体系的同时存在。量子电动力学理论能够对光场的波动-粒子二重性给出严格的合理说明。这种说明就是：首先承认，光在本质上的确是一种真实的电磁波场，它的传播规律可由麦克斯韦方程理论描述；其次还必须承认，电磁波场的能量与动量结构应满足分立的量子化要求，因此在与物质体系相互作用并发生能量与动量交换的过程中，必须把光场看成是一群光子的集合。采用量子电动力学的理论或观点，在原则上可以解决至今为止人们发现的所有光学问题。

从以上关于光学发展的两个历史阶段的说明中可充分看出，光学这一学科本身的潜在生命力的确是十分顽强的，并且在一定的历史条件下，还表现出具有强大的突破力量——光学中一些基本理论与实验课题，往往也是整个物理学领域

中的基本课题，这些课题的解决与突破，在导致近代光学的诞生与发展的同时，也导致整个近代物理学的诞生与发展。如果说，光学对整个物理学发展的第一次重大突破性的贡献主要表现在本世纪初的话，那么，光学对现代物理学和整个科学技术发展的第二次重大贡献，则表现在本世纪六十年代初激光技术的诞生与发展。这一重大事件的出现，宣告了光学的发展已进入了一个新的历史阶段——现代光学的阶段。

早在1917年，爱因斯坦为了能合理地描述电磁场与物质体系之间的热平衡相互作用，就唯象式地引入了光的受激发射的物理假设。量子电动力学理论建立后，能够对光与物质相互作用过程中三种基本过程——自发发射、受激吸收与受激发射，给出更加严格的定量描述。但由于种种原因，受激发射这一物理过程和它的应用潜力，长期未引起人们的足够重视。直到四十年代末五十年代初，一方面在微波波谱学的研究过程中人们才首次联想到，利用粒子数反转体系的受激发射作用，有可能实现对微波频率的电磁波场的量子化相干放大。这种设想于1954年前后得以实现，并成功地研制出第一批微波激射器。另一方面，在光学领域内，其基本理论体系在三十年代前后已渐趋完善，再也没有遇到新的重大挑战。在应用技术方面，近代光谱学与后来的红外物理与技术等也取得不小的成就与发展。但是人们越来越认识到，由于缺乏一种强的相干辐射光源，使许多光学应用技术取得重大的突破性进展遇到严重的困难。在这种背景下，微波激射器的研制成功，自然促使人们去推想。利用粒子数反转体系的受激发射原理，去实现光频波段的电磁波的相干放大作用或振荡作用。1960年，在这种设想的指导下，人们终于研制成功第一台激光器，从而宣告了一门崭新的科学技术——激光技术的出现。

激光技术的出现与发展，标志着人类对光频相干电磁辐射的产生手段、控制能力及其与物质相互作用规律性的认识，都达到了一个新的更高级的阶段。由于激光器的工作原理与普通光源的发光机理完全不同，从而能从根本上突破以往普通光源的种种局限性，引起了各种光学应用技术的革命性进展，大大丰富了人们对光与物质相互作用过程的了解，促进了多种基础学科和边缘学科的发展。所有这些，都意味着光学学科的确进入一个新的更加繁荣的历史发展阶段。

二、光学的内容和分类

光学是整个物理学领域内一个比较大的分支学科。概括说来，光学是研究光的本性、光的产生与控制、光的传输与检测、光与物质的相互作用，以及研究光在科学研究和技术中的各种应用的科学。由于光学的发展历史悠久，学科内容丰富，应用范围广泛，因此可以从不同的角度，对这门学科所包含的内容和分支，进行多种多样的区分和分类。下面，仅从与本书的论述有关的几个角度和方面，去进行粗线条的分类，从而使读者对整个光学学科的全貌以及强光光学在其中所占据的地位，有一大致的轮廓式的了解。

按历史阶段分类

如本章前面一节所述，光学的发展可粗略地分为经典光学、近代光学和现代光学几个阶段。经典光学以光场的麦克斯韦电磁方程组理论为其标志；近代光学以光子假说、光子统计学与量子电动力学理论为其标志；而现代光学则以激光

理论（包括强光光学）与技术，以及现代光信息处理技术与光电子技术等为其标志。

按基本理论体系分类

从描述光的本性及其与物质体系相互作用的角度来看，光学领域内存在着三种基本的理论体系，亦即全经典理论、半经典理论、全量子理论。全经典理论的主要特点是，将光场看成是满足麦克斯韦方程组的经典电磁波场，而将物质体系（原子、分子等）看成是一些简单的经典的电的谐振子的集合。这种理论在单纯描述普通光辐射在真空或一般介质中的传播行为时，是非常成功与成熟的；但在描述光与物质相互作用方面，则在原则上是不成功的，并基本已为人们所废弃。半经典理论的主要特点，是将光场仍看成是经典的电磁波场，但对物质体系却加以量子力学式的完整描述。这种半经典理论的主要成功之处，是能够对大多数人们已知的涉及到光与物质相互作用有关的光学现象，给出解析的或半定量的解释。其不足之处，是对一些个别的但又是十分重要的光学过程（如自发发射、光场的量子起伏、自发与受激喇曼散射之间的关系等），不能给出自然而又合理的描述。全量子理论，实质上即为量子电动力学理论，是把光场与物质作为一个整体再加以量子力学式处理，从而把光与物质的相互作用，归结为量子化电磁场（光子集合）与量子化物质体系（原子或分子集合）之间的相互作用。这种理论体系的优点是，对所有涉及到光与物质相互作用的现象而言，既能从理论上给出简单明了的定性描述，又能在一定的原则下给出严格的定量描述。其不足之处是它所采用的数学处理过程相当复杂，往往得不到简单的解析结果。但在一定的近似条件或限

制范围内，由全量子理论体系可以派生出一些大为简单适用的专门性理论。例如若只限于描述量子化电磁场本身的宏观能量与动量行为，可派生出光子统计理论；若忽略量子化电磁场的波动（相位）特点，而只考虑数目一定的光子集合与物质体系间的能量与动量交换行为，则可派生出在激光理论中经常采用的所谓速率方程理论。

按课题性质和大的方面分类

广义说来，光学这门学科发展到今天，可认为是由基础研究，应用技术基础研究以及纯应用技术研究三类性质不同的课题所组成。第一类课题，是以增加或加深人们对光的本性、光的传播以及光与物质作用等方面的知识和认识为目的，而不以任何一种实际应用目的为前提。第二类课题，基本上是以单元光学技术或专门化课题的基础研究为主，这些研究的成果最终都有可能导致直接的或间接的实际应用。第三类课题，基本上是以直接的应用目的为前提，例如光测距、光雷达、光通信、光制导、光计量，激光分离同位素与激光加工等。

就上面所说的两类课题性质而言，按课题内容又可区分为两个大的方面。第一个大的课题方面，主要涉及到光的传播行为，包括光的反射、折射、干涉、衍射、偏振、双折射，以及光场的传播轨迹、振幅与相位分布的时空变化等特性。第二个大的课题方面，则涉及到光场与物质体系间的各种形态的相互作用，其中包括了有关光的发射、吸收、散射、色散，还包括了各种光谱学效应、光-电效应、光-磁效应、光-声效应、光-热效应与光-力学等效应的研究。

按光场及其与物质作用程度的强弱分类

在激光技术出现以前，所有光源（包括自然界的光源与人造光源）的发光基本上属于自发辐射过程，这种过程是人们无法加以有效控制的，因此决定了输出光辐射的低单色定向亮度或低单色电磁场强等特点；激光技术出现后，人们利用受激发射原理，可通过各种类型的激光器按照可控制的方式，发射出高单色定向亮度或高单色电磁场强的激光辐射。这意味着前一类光辐射在本质上属于弱光辐射，它们与物质间的相互作用属于弱光作用；后一类光辐射在本质上属于强光辐射，它们与物质间的相互作用属于强光作用。下面一节的内容将进一步表明，普通光辐射与激光辐射在其强弱程度上的巨大数量差异，导致它们与物质体系相互作用规律性的本质上的差异。从上述这个意义上来说，可把激光技术出现前，涉及到普通光辐射的传播及其与物质相互作用的学科内容，称为普通光学或弱光光学；而把激光技术出现后，人们逐渐掌握和积累起来的有关强激光的传播及其与物质相互作用的学科内容，称为强光光学。后者，正是本书所要讨论和介绍的内容。

三、强光辐射究竟“强”在哪里？

为了比较不同光源的发光能力的大小及其输出光辐射水平的高低或质量的优劣，人们可从不同的考查角度引入不同的物理量来加以对比描述。其中比较常见的描述参量有：总输出功率 P 、总发光面积 S 、总立体发散角 Ω （表征发光的定向性程度）总光谱范围 $\Delta\nu$ （以频谱宽度表征光源辐射的

单色性程度)等。至于输出光辐射的空间相干性程度,则只由光场的定向性程度所决定;而时间相干性程度,则只由光场的单色性程度所决定。以上这些参数,只能对光源及其输出光辐射的特性分别给出个别的和片面的描述;为能同时给出更具有综合性的描述,人们进一步引入一些新的物理量。首先,可引入定向亮度的概念,它定义为光源单位发光面积向单位立体角内发出的光功率大小,并可表示为

$$B = P / (S\Omega) \quad (1-1)$$

它实质上表征光辐射在空间位置范围和方向范围内的集中程度。其次,可引入单色定向亮度的概念,它定义为光源单位发光面积向单位立体角和单位频谱范围内发射出的光功率大小,并可表示为

$$B' = P / (S\Omega\Delta\nu) \quad (1-2)$$

它实质上表征光辐射在空间位置范围、方向范围以及频谱范围内的集中程度。从光子统计理论出发,可引入光子简并度的概念,它定义为光场单个光子状态(单个量子统计状态或单模)内的平均光子数,并可表示为

$$n = (2h\nu/\lambda^2)P / (S\Omega\Delta\nu) = (2h\nu/\lambda^2)B' \quad (1-3)$$

从(1-2)与(1-3)两式的比较可以看出,单色定向亮度与光子简并度是两个彼此相当的物理量,它们都能综合描述光源辐射的强弱程度或水平高低;这两个物理量的值越大,意味着光束经光学系统会聚后,可获得的局部单色光功率的空间密度越高。按电磁波场的能流密度定律,这也意味着可获得的局部单色电场强度的数值也越高。

众所周知,太阳是自然界中最强的光源之一,而一般人造的具有较强发光能力的气体放电光源,充其量也只能算是人造“小太阳”罢了。它们与新型光源——激光器相比,那就不知要逊色多少了。为了便于比较,表1给出了太阳、

普通人造光源以及各类激光器输出辐射主要综合指标的数量级对比数据。

表 1 激光器与普通光源输出光的比较

辐射参数 光源种类	单色性 ($\Delta\nu/\nu$)	定向性 (Ω) 单位: 球面度	定向亮度 (B) 单位: 瓦/ (厘米 ² ·球 面度)	单色定向亮 度 (B') 单位: 瓦/ (厘米 ² ·球 面度·赫)	光子简并度 (n) (可见光 波段)
太 阳	极 差 (为白光)	6.8×10^{-5} (地面测)	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-12}$	$\sim 10^{-2}$
人造光源	极 差 (照明灯) $10^{-4} \sim 10^{-6}$ (单色灯)	$2\pi \sim 4\pi$ (面光源或 体光源) $10^{-2} \sim 10^{-4}$ (定向光源)	$< 10^{-3}$	$< 10^{-12}$	$< 10^{-2}$
一般气体激光器	$10^{-6} \sim 10^{-13}$	$10^{-4} \sim 10^{-8}$	$10^4 \sim 10^8$	$10^{-2} \sim 10^2$	$10^8 \sim 10^{12}$
一般固体激光器	$10^{-3} \sim 10^{-6}$	$10^{-4} \sim 10^{-8}$	$10^7 \sim 10^{11}$	$10 \sim 10^3$	$10^{11} \sim 10^{13}$
调Q大功率激光器	$10^{-2} \sim 10^{-7}$	$10^{-6} \sim 10^{-8}$	$10^{12} \sim 10^{17}$	$10^4 \sim 10^7$	$10^{14} \sim 10^{17}$

从上表中的数据可以明显看出，与普通光源的发光相比，激光器的输出光辐射在亮度上和光子简并度上有成百万倍(10^6)到亿亿倍(10^{16})以上的提高！从这个意义上来说，或者从光辐射对物质体系作用的能动潜力上来说，激光辐射与普通光辐射的区别，非常相似于热核爆炸与普通炸药能力之间的区别。因此，可把普通光辐射称为弱光，其光子简并度在数量级上远远小于1；而把激光辐射称为强光，其光子简并度在数量级上远远大于1。这种区分，不但是严格的和合理的，而且是有定量判据的，其判据标准就是光子简并度的大小。

下面，我们还可以从另一个角度，来说明普通光辐射与激光辐射对物质作用的不同特点。一切物质都是由原子或者分子组成的，在没有外界入射光场的作用下，组成物质的原

子或分子本身保持着一定的稳定的状态分布。例如，以原子系统为例，在无外界入射光场作用下，带正电荷的原子核与在其外围运动着的带负电荷的电子(电子云)构成了一个电平衡的微观系统，因此整个原子表现为电中性。在有外界光场入射作用的情况下，由于光场在本质上是一种频率甚高的电磁波场，因此有可能使原子中的电子(特别是外层价电子)运动发生一定程度的微扰变化，或者说有可能使原子中的外层电子云发生一定程度的畸变。这意味着整个原子在电性上有可能呈现出类似于电偶极子的响应特点，人们把这种响应效应称为物质在入射光场作用下的感应电极化效应。这种感应电极化效应，不但反映了入射光对物质体系的作用大小；而且反过来，它也同样决定了物质体系对入射光场的反作用的大小。所以在分析和解释涉及到光场与物质相互作用(也包括光场在物质中的传播在内)的众多现象时，首先要弄清物质感应电极化程度的大小和变化形态是至关重要的。对于原子中的外层价电子而言(它们最容易受到外界入射光场的影响)，在无外场作用的情况下，它是靠着原子内部的电场而维持其稳定的平衡运动的。粗略说来，这种原子内部的电场强度值大约为 $E_0 \approx 10^8$ 伏/厘米数量级左右，而一般的普通入射光所具有的单色电场强度数值远远小于上述 E_0 值，因此光场对原子的影响是十分微弱的，这就相当于在普通情况下的弱光作用过程；对强激光辐射(特别是经光学系统聚焦后的激光辐射)而言，局部空间的光频电场强度数值可达到与 E_0 值相比或相接近的程度，从而可对原子产生较明显的影响，甚至可达到使大量原子中的外层电子游离开原子本身的程度(光致电离或击穿)，这相当于强光作用下的情况。从以上的说明中可看出，光辐射所产生的单色电场强度是否达到可与原子或分子内固有场强相比的程度，亦可作为区别弱光作