

激光技术和应用

邱元武 编著



出版社

责任编辑 张智中

封面设计 李志云

激 光 技 术 和 应 用

邱元武 编著

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号, 邮编 200092)

新华书店上海发行所发行

望亭发电厂印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 8.375 字数 230 千字

1997 年 8 月第 1 版 1997 年 8 月第 1 次印刷

印数 1—1000 定价:9.00 元

ISBN 7-5608-1836-6/O·156

DL 65/08

内容提要

本书在阐明激光基本原理的基础上,着重介绍最新的激光技术及其在加工、精密测量、通讯、信息处理、医学、军事和科学技术研究等领域的应用。

本书尽量避免涉及理论物理的推演,而着重阐述物理概念,突出物理图像,力求做到由浅入深,循序渐进,便于自学。本书既着重技术的介绍,又不失基础理论的阐述,既富于最新动态,又不乏基本知识。

本书可供高等院校有关系科作为教材,也可供从事激光研究和应用的科技工作者参考。

前 言

激光诞生 30 多年来,在理论和实验的基础研究方面已取得了巨大的进展。近来,人们更注意的是研制出性能更好的、有实用价值的激光器,并将激光技术应用到各个领域中去。现在,激光技术不仅在机械加工、精密计量、医疗卫生和军事等领域的应用日益广泛,而且激光唱机、激光影碟机、激光打印机等已进入人们的日常生活。有人预言,20 世纪后半叶是电子时代,21 世纪将是一个光子时代。

然而,在现有的有关激光的教材中,没有或很少列入激光技术和应用方面的内容,而且由于出版年代较早,内容已陈旧,不能反映激光技术和应用的日新月异的发展。本书尽量避免涉及理论物理的推演,而着重阐述物理概念,突出物理图像,力求做到由浅入深、循序渐进、便于自学。本书在深入浅出地阐明激光基本原理的基础上,着重介绍最新的激光技术及其在加工、精密测量、通讯、信息处理、医学、军事和科学技术研究等领域的应用。既着重技术应用的介绍,又不失基础理论的阐述,既富于最新动态,又不乏基本知识。使读者不仅能深刻地理解激光的基本原理,而且能拓宽知识结构、开扩视野、活跃思想、启发创造性。本书可供高等院校有关系科作为教材,也可供从事激光研究和应用的科技工作者参考。

由于编著者学识有限,加以时间仓促,缺点甚至错误都可能存在,恳切希望读者批评指正。

编著者

1996 年 10 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第二章 基础知识概述	(5)
§ 2.1 光的基本性质	(5)
§ 2.2 光的反射和折射	(10)
§ 2.3 光的干涉和衍射	(12)
§ 2.4 光的相干性	(18)
§ 2.5 光的偏振性	(22)
§ 2.6 原子的能级、分布和跃迁	(27)
§ 2.7 光的吸收和发射	(30)
§ 2.8 光谱线的宽度	(35)
习题	(40)
第三章 激光束的特性	(42)
§ 3.1 激光的特性	(42)
§ 3.2 光学谐振腔	(45)
§ 3.3 球面镜腔中的光束特性	(50)
§ 3.4 高斯光束通过薄透镜时的变换、聚焦和准直	(57)
§ 3.5 衍射损耗	(61)
§ 3.6 非稳定谐振腔	(63)
习题	(65)
第四章 激光形成的基本原理	(67)
§ 4.1 介质中受激态的粒子数	(67)

§ 4.2	光在介质中的增益·····	(74)
§ 4.3	激光形成的阈值条件·····	(78)
§ 4.4	连续运转激光器的工作特性·····	(81)
§ 4.5	连续运转激光器的输出功率和最佳 透射率·····	(85)
§ 4.6	脉冲激光器的尖峰脉冲·····	(88)
§ 4.7	激光的线宽·····	(90)
§ 4.8	有源谐振腔的纵模频率——频率牵 引效应·····	(92)
	习题·····	(94)

第五章	激光器件 ·····	(96)
§ 5.1	固体激光器·····	(96)
§ 5.2	气体激光器·····	(106)
§ 5.3	染料激光器·····	(122)
§ 5.4	半导体激光器·····	(125)
§ 5.5	其它激光器·····	(135)
	习题·····	(139)

第六章	激光技术 ·····	(141)
§ 6.1	选模技术·····	(141)
§ 6.2	调 Q 技术·····	(144)
§ 6.3	锁模技术·····	(147)
§ 6.4	激光调制技术·····	(151)
§ 6.5	激光束偏转技术·····	(154)
§ 6.6	非线性光学技术·····	(157)
§ 6.7	气体激光器的稳频技术·····	(162)
§ 6.8	激光放大技术·····	(166)

习题	(167)
第七章 激光的应用	(169)
§ 7.1 激光加工	(169)
§ 7.2 激光精密测量	(176)
§ 7.3 激光通讯	(191)
§ 7.4 激光信息处理	(198)
§ 7.5 激光医学	(214)
§ 7.6 激光的军事应用	(221)
§ 7.7 激光在科学技术研究中的应用	(226)
习题	(244)
参考文献	(246)
习题答案	(247)
附录	(248)
索引	(254)

第一章 绪论

1897年,美国皮尔逊杂志(Pearson's Magazine)刊登了作家韦尔斯(H. G. Wells)的小说《星球大战》(《The War of the Worlds》),其中有这样的描述:“他们(火星星人)用某些方法在实际上是绝对非导电的容器中产生强大的热……,他们用某种材料做成的、经抛光的抛物面镜将这强大的热聚成平行束,并射向任何他们所选中的目标……,经它的接触,可燃物爆发出火焰,铅变成液体,铁被软化,玻璃碎裂并熔化,水沸腾化为蒸汽。”无独有偶,将近一个世纪后,近代文明发现火星的大气基本上是由二氧化碳组成的,并且在其中发生天然的激光行为。使人联想到小说中所提到的“强大的热”,就是二氧化碳激光器发出的激光。如此看来,我们可以戏说,在地球上运转的第一台激光器是上世纪火星星人入侵地球时带来的。

不管火星星人是否在19世纪末已发明了二氧化碳激光器,生存在地球上的人类智慧已实现了这一点。事实上,物理学家爱因斯坦早在1917年就预言了受激发射过程必然存在。他指出原子或分子的发光除了自身自发地产生外,还可能在外来光子的“刺激”或“感应”下产生,这就是受激发射过程。然而,在本世纪20年代到40年代,物理学界正致力于量子力学、原子核物理和粒子物理等领域的新发现,受激发射的研究被搁在了一边。

资本主义大工业发展和第二次世界大战的需要,刺激和推动了微波通讯和雷达技术的大力研究和迅速发展,同时提出了如何将微弱的微波信号进行放大的课题。采用常规的电子学方法来放大微波信号,由于电子噪声比较大,效果甚差。因此,要侦察远距

离的敌机,就需要寻找新型的低噪声微波放大器。于是,1951年,美国哥伦比亚大学的汤斯(C. H. Townes)等人设想利用分子本身的受激发射来产生微波放大。由于受激发射过程所产生的光子和原来引起受激发射的光子具有完全相同的性质,那么,通过这个过程一个光子就可以产生两个、三个以至更多相同的光子,就可以产生“光的放大”了。他们经过几年的艰苦努力,终于在1954年首次做成了氨分子微波受激发射放大器,该装置的频率接近24GHz,在人类实践中首次成功地利用受激辐射过程使微波信号得以放大。几乎同时,前苏联的巴索夫(N. G. Basov)和普洛霍洛夫(A. M. Prokhorov)也建成了相似的装置。

随着微波受激发射放大器的研制成功,人们进一步提出了制造可见光受激发射放大器的要求,因为通讯和雷达都希望将电磁波的频率提高,从而增加传输的信息量。显然,光波的频率比微波的频率又高得多,更具有发展前途。此外,光波还包含了人眼看得见的可见光波段,其用途将更为广泛。还有,微波放大器需要庞大的低温设备和磁场装置,应用上受到了限制。1958年,美国的肖洛(A. L. Schawlow)和汤斯提出了制造光波受激发射放大器的具体设想和建议,为研制光波受激发射振荡器(即激光器)奠定了基础。

1960年,美国休斯实验室(Hughes Laboratories)的梅曼(T. H. Maiman)成功地制成了第一台激光器。他的激光器(图1.1)由一根插在螺旋形气体放电氙闪光灯中的红宝石棒构成,红宝石棒是粉红色的圆柱形晶体,棒的两个端面镀银,作为反射镜,激光器发射的激光是脉冲输出,峰值功率为10kW,波长为6943Å。这种光的辐射机理与天然光源及以往的人工光源在本质上是不同的,普通光源的辐射是自发发射占优势的辐射,激光辐射是受激发射占优势的辐射,它是通过辐射的受激发射进行光的放大,所以称为激光。“激光”一词译自英语“Laser”,它是从“Light Amplification

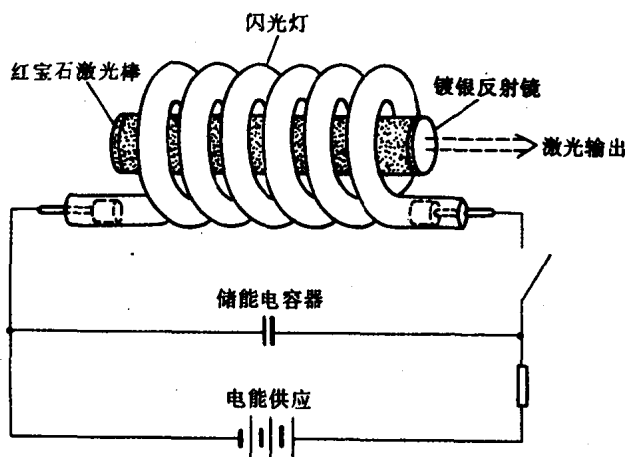


图 1.1 原型红宝石激光器

by Stimulated Emission of Radiation”各词取第一个字母缩写而成的。

激光具有普通光源所无法比拟的许多优点，即高度的方向性、单色性、相干性、高亮度、超短脉冲和可调谐性等。激光之所以具有如此多的优异特性，是和它的独特的发光机理和激光器的具体结构密切相关的。虽然后来迅速发展起来的各种激光器的结构千差万别，但是作为原理性的共同特点，一般都包括三个基本组成部分。如图 1.2 所示，图中 A 称为工作物质，激光就是由它发出的，如梅曼激光器中的红宝石。P 称为激励系统，是激励工作物质 A 的能源，如梅曼激光器中的螺旋形闪光灯。 M_1 和 M_2 构成激光器的光学谐振腔，如梅曼激光器中红宝石棒两个端面上镀的银膜，通常 M_1 和 M_2 是两块光学反射镜。一般， M_1 是全反射镜， M_2 是部分反射镜，激光由腔镜 M_2 输出。激光器有谐振腔，是它在结构上与普通光源最基本的区别。

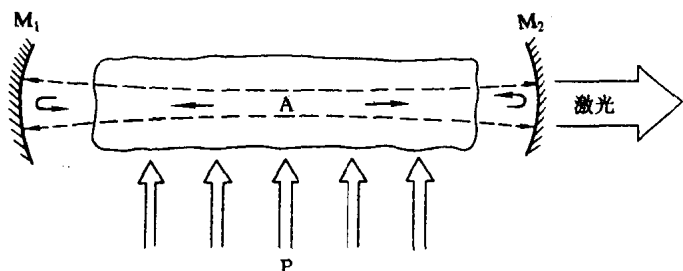


图 1.2 激光器的三个基本组成部分

激光是在有理论准备和生产实践迫切需要的背景下应运而生的，它一问世，就获得了异乎寻常的飞快发展。因为它有着上述那些普通光源所无法比拟的特点，所以获得了极其广泛的应用，反过来又成为它进一步发展的强大动力。到目前为止，其应用范围不仅覆盖了物理学、化学、生物学、电子学和技术科学各个学科领域，而且遍及工业、通讯、军事、医疗卫生及农业等国民经济乃至日常生活的各个方面。激光技术的诞生还具有重大的科学意义，它不仅使某些原有学科焕发出新的生命力，而且使一批新兴学科相继诞生，如非线性光学、激光化学、激光生物学、激光光谱学等。

激光的发展即将走完它的第四个十年，它不仅使古老的光学科学和光学技术获得了新生，而且导致整个一门新兴产业的出现。激光器的发明不仅是光学发展史上的伟大里程碑，而且是整个科学史上的一个伟大里程碑。激光技术在现代社会中正在发挥越来越大的作用。

第二章 基础知识概述

本章简短地回顾一下全书将要用到的光学和原子物理学的基础知识。

§ 2.1 光的基本性质

光的一个基本性质就是具有波粒二象性。一方面,光是电磁波,具有波动的性质,有一定的频率和波长。另一方面,光是光子流,光子是具有一定能量和动量的物质粒子。波动性和粒子性是光的客观属性,两者总是同时存在的。但是在一定条件下,可能某一方面的属性比较明显,而当条件改变后,另一方面的属性又变得明显起来。例如,光在传播过程中所表现的干涉、衍射等现象中其波动性较为明显,这时我们往往把光看成是由一系列的光波组成的;而当光与物质相互作用时(例如光的吸收、发射、光电效应等),其粒子性较为明显,这时我们往往又把光看成是一个一个光子组成的光子流。

一、光的经典描述

光波是一种电磁波,是交变电磁场在空间的传播。也就是说,光波既是电矢量 E 的振动和传播,同时也是磁矢量 B 的振动和传播。在均匀介质中,电矢量的振动方向与磁矢量的振动方向互相垂直,且 E 、 B 均垂直于光的传播方向。它们三者在方向上的关系如图 2.1 所示。

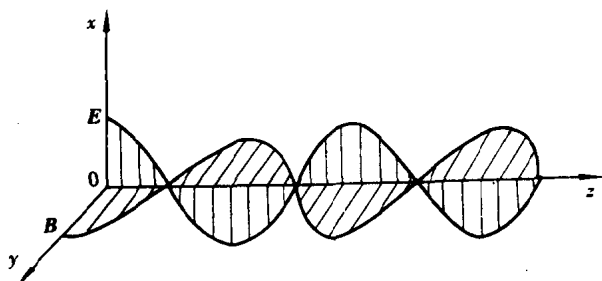


图 2.1 电磁波的传播

实验证明, 光对人眼的感觉、胶片的感光及在其它一般光学现象中起主要作用的是电矢量 E 。因此, 习惯上常把电矢量 E 称为光矢量。由图 2.1 可知, 电矢量振动方向和传播方向垂直, 因此, 光波是一种横波。

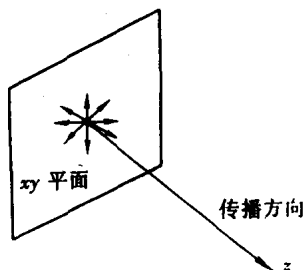


图 2.2 自然光

设光波沿 z 轴方向传播, 则光矢量的振动方向必在与 z 轴垂直的 xy 平面内。也说是说, E 的振动方向可取 xy 平面内的任意一个方向, 这种光矢量垂直于传播方向且只沿一个固定方向振动的光称为线偏振光(或平面偏振光)。普通光源发出的、沿 z 方向传播的光, 可以包含许多彼此独立的线偏振成分。它们的电

矢量振动方向都在 xy 平面内各取不同的方位, 如图 2.2 所示。这样的光称为自然光, 普通光源发出的光是自然光。

在光波场中, 光波相位相同的空间各点所连成的面称为波面, 也称波阵面或同相面。波面是平面的波称为平面波, 平面波在均匀介质中传播的特点是其波面是彼此平行的平面, 且在传播中如

果介质不吸收,则波的振幅保持不变。

具有单一频率的平面波称为单色平面波。实际上任何光波,包括激光在内,都不可能是完全单色的,总有一定的频率宽度。如果频率宽度 $\Delta\nu$ 比光波本身频率 ν 小很多,即 $\Delta\nu \ll \nu$ 时,这种波称为准单色波。 $\Delta\nu$ 越小,单色性越好,实际上的单色波都是准单色波。

为讨论方便起见,下面介绍经过科学抽象的理想单色平面波——简谐波(余弦波或正弦波),它是最简单、最重要的一种波。因为由付里叶分析可知,任何复杂的波都可以分解为一系列不同频率的简谐波,所以讨论它是有实际意义的。

一个沿 z 方向传播的线偏振单色平面光波,对应着作正弦振动的电场 E 和磁场 B , 它们分别为:

$$\begin{aligned} E &= E_0 \sin(2\pi\nu t - \frac{2\pi}{\lambda}z) \\ &= E_0 \sin(\omega t - kz) \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$B = B_0 \sin(\omega t - kz) \quad (2.2)$$

式中, ν 是电磁场振动的频率, $\omega = 2\pi\nu$ 是圆频率, λ 是光在介质中的波长。 $k/2\pi$ 是单位长度上波的数目,所以称为波数。

光的频率就是光矢量每秒钟振动的次数。如果以 T 表示光振动的周期(即完成一次振动所需的时间),则频率 ν 和周期 T 的关系互为倒数:

$$\nu = \frac{1}{T} \quad (2.3)$$

光的波长就是振动状态在经历一个周期的时间内向前传播的距离,而各种不同频率的光在真空中的传播速度均等于 c 。所以在真空中光速、频率和波长有如下的关系:

$$c = \lambda_0 \nu \quad (2.4)$$

式中, λ_0 是真空中波长, c 是真空中光速。

实验证明光在各种介质中传播时,保持其原有频率不变,而速度 v 各不相同,它等于真空中的光速 c 被介质的折射率 n 去除。所以介质中的光速为:

$$v = \frac{c}{n} \quad (2.5)$$

由于各种介质的折射率 n 总是大于 1, 所以 v 总是小于 c 。由于不同介质的折射率不同, 光速不同, 所以同频率的光在不同介质中的波长也不同。光在折射率为 n 的介质中的波长 λ 是真空中波长 λ_0 的 $1/n$ 。

电磁波可按频率(波长或波数)分为:无线电波、微波、光波、 x 射线和 γ 射线等。光波又分为红外、可见和紫外。各波段对应的大致频率列于表 2.1 中, 其中 $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ 。

表 2.1 电磁波谱

		ν	λ_0	$k/2\pi$
无线电波		$\leq 10^9 \text{ Hz}$	$\geq 300 \text{ mm}$	$\leq 0.033 \text{ cm}^{-1}$
微波		$10^9 - 3 \times 10^{11} \text{ Hz}$	$300 - 1.0 \text{ mm}$	$0.033 - 10 \text{ cm}^{-1}$
光波	红外光	$3 \times 10^{11} - 4 \times 10^{14} \text{ Hz}$	$1000 - 0.75 \mu\text{m}$	$10 - 1.3 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$
	可见光	$4 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$	$750 - 400 \text{ nm}$	$1.3 \times 10^4 - 2.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$
	紫外光	$7.5 \times 10^{14} - 10^{16} \text{ Hz}$	$400 - 30 \text{ nm}$	$2.5 \times 10^4 - 3.3 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$
x 射线		$10^{16} - 10^{19} \text{ Hz}$	$300 - 0.3 \text{ \AA}$	$3.3 \times 10^6 - 3.3 \times 10^8 \text{ cm}^{-1}$
γ 射线		$\geq 10^{19} \text{ Hz}$	$\leq 0.3 \text{ \AA}$	$\geq 3.3 \times 10^8 \text{ cm}^{-1}$

二、光的量子描述

从量子论观点看, 光场是由一个个光子组成, 光子是光的最小单位。物质发光是发射一系列光子, 吸收光也就是吸收光子。

每个光子有一定的能量 E 和频率 ν , 它们间的关系为:

$$E = h\nu \quad (2.6)$$

式中, h 是普朗克常数。

光子也具有动量 p , p 的方向为光子运动的方向(即传播方向)。 p 的数值为:

$$|p| = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} \quad (2.7)$$

也可用波矢 k 来表征光子, 它与 p 的关系为:

$$p = \frac{h}{2\pi} k \quad (2.8)$$

光子有偏振, 通常用偏振参量 σ 来表征。如果取 k 的方向为 z 方向, 则 σ_1 和 σ_2 分别表示沿 x 和 y 方向的线偏振光。也可以有圆偏振, σ_+ 和 σ_- 分别表示左和右两种圆偏振光。

对于一个光子, 只要给定 k 和 σ , 则它的传播方向、动量、偏振方向和能量都确定了。所以通常用这两个参量来表征光子。两个光子具有相同的 k 和 σ , 就有相同的能量、动量和偏振方向, 也就是两个光子相同。

但从量子力学观点看, 对光子 k 的值的测量总会带有一定的不确定值。说两个光子的 k 值绝对相同是没有意义的, 这个不确定值可以这样来估计: 如果一个光源在 x 、 y 和 z 方向上的尺度分别为 a 、 b 和 L , 如图 2.3 所示, 则该光源发射的光子 k 在 x 、 y 和 z 方向的不确定值分别为:

$$\Delta k_x = \frac{\pi}{a}, \Delta k_y = \frac{\pi}{b}, \Delta k_z = \frac{\pi}{L}$$

根据上述的 Δk_x 、 Δk_y 和 Δk_z 的值可以引进 k 空间中相格的概念。图 2.3 的 k 空间可以划分成以 $\Delta k_x \Delta k_y \Delta k_z$ 为基元的小格, 称为相格。由于光子 k 的不确定值分别为 Δk_x 、 Δk_y 和 Δk_z , 所以每个光子应属于一个相格, 但无法确定在该相格中的位置。因而光子可以按相格分类。我们认为, 属于同一相格、又有相同偏振方向的光子是相同的光子, 也称它们为属于同一模式的光子。光源的尺度越大, 相格在 k 空间中的体积越小。

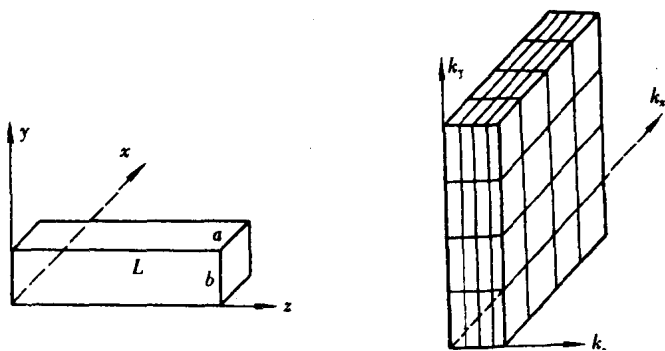


图 2.3 k 空间中的相格

在某一模式中的平均光子数称为该模式的光子简并度。在普通光源所发出的光中,光子在大量可能的模式中散布着。所以光子简并度很低,一般远小于“1”。

§ 2.2 光的反射和折射

一、光的反射

对于光的镜面反射,反射定律指出反射角等于入射角,如图

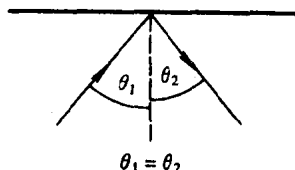


图 2.4 反射定律

2.4 所示。反射光线位于入射光线和镜面法线所在的同一平面内,这平面称为入射平面。所谓镜面是指其表面高低不平(表面不平度)的大小和间距的均方根变化比光的波长小很多的平面。换言之,在可见光

区域不是好的镜面,在较长波长区域可以认为是很好的镜面。这点对高功率(长波长)激光器是很重要的。