

雷仕湛 编著

激光技术手册

科学出版社

激光技术手册

雷仕湛 编著

科学出版社

1992

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书以条目的形式,系统而全面地论述了激光技术及其应用(其中包括激光特性,激光器的工作原理、工作特性及输出特性),并从工作物质的物理性质、泵浦方式及输出方式等方面对激光器进行分类介绍。本书既详述了各种单元激光技术,又介绍和分析了激光应用的历史、现状及前景。全书共收条目1800余条。

本书可供从事激光技术研究、开发及应用的广大科研技术人员、管理人员以及大专院校有关专业的师生参考。

激 光 技 术 手 册

雷仕湛 编著

责任编辑 杨家福 李 红

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100707

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

*

1992年2月第一版 开本:850×1168 1/32

1992年2月第一次印刷 印张:37 插页:2

印数:1-1 550 字数:982 000

ISBN 7-03-002536-9/TB·81

定价:39.40元

序

激光是 20 世纪的重大发明，它的问世使光学技术进入一个新时期。由于这项新技术为科学实验和工农业生产不断提供广泛而重要的应用途径，从而使得光学技术更加繁荣。激光技术在军事、精密计量、机械加工、医疗卫生等领域，以及在研究物质的微观运动规律方面，显示着尤为巨大的作用。因此，各国都在积极地发展激光技术。

在我国，党和政府始终注意发展新技术。我们国家的第一台激光器问世于 1961 年，比国际上第一台激光器仅仅晚了一年左右的时间。在我国近代科学技术的发展史上，一项重大新技术的起步时间与国际上的差距如此小还是少见的。经过 31 年的发展，我国目前已拥有一支近万人的激光技术队伍，300 多家从事激光科研及其应用开发的单位和生产厂家，取得了近千项重大成果。我国科技人员完全依靠自己的力量建成的 10^{12}W 高功率激光系统，是世界上能够进行激光等离子体物理实验研究的少数几个大型激光系统之一。我国利用国产元件和仪器设备研制成功的对撞脉冲调制 (CPM) 激光器，输出的激光脉冲宽度为 21fs，脉冲宽度连续调谐范围可以从最短脉宽 21fs 到 500fs，技术指标居国际前列。我国研制成功的偏硼酸钡、偏硼酸锂等新型非线性晶体，其性能优良，已达到国际先进水平。我国研制的输出波长为 640nm 的稳频 He-Ne 激光器，稳定度达 4×10^{-12} ，复现性达 10^{-11} ，是被第 17 届国际计量大会定为实现新米定义的国际波标准之后，最引人注目的先进波长。我国人造卫星激光测距仪，作用距离达 6000—8000km，测量精度高达 $\pm 4\text{cm}$ 。此外，在激光核聚变研究、激光同位素分离、X 射线激光、激光医学等方面，也取得了具有世界先进水平的成果。

激光技术经历了 30 多年的发展，在现阶段，需要特别强调

把激光技术的应用落到实处；应加快产业化的步伐，要充分发挥激光的特性，利用各种激光器件和激光单元技术开拓应用领域，提高工业、农业、科学研究和军事技术水平。

由中国科学院上海光学机械研究所雷仕湛编著的《激光技术手册》，系统而全面地介绍了激光技术领域的内容，它对于我们了解和学习激光技术、开发激光技术的应用将是很有帮助的。感谢科学出版社及时地组织出版这样的著作。这是件好事，愿这本书受到科技人员、管理人员及大专院校有关专业的师生的欢迎。

中国光学学会理事长
王大珩

前 言

激光是基于受激发射放大原理而产生的一种相干光辐射。它有极高的亮度、极好的单色性和相干性。激光的发现，进一步扩大了光学技术的应用范围，提高了光学技术在国民经济中的地位，使光学这门古老的学科进入了复兴时期。

激光的发展历史可以追溯到20世纪初。当时著名物理学家爱因斯坦提出了受激辐射的概念，并指出，这种辐射的显著特性是辐射的频率、传播方向和偏振状态都与诱导的光波相同。很显然，如果光源的发光是以受激辐射为主，那么光源的亮度、单色性和相干性便会有飞跃性的提高。然而，遗憾的是这个具有极大潜力的新概念，一开始并没有引人注目，原因之一是，科学家们当时的主要兴趣在于光谱技术。光谱技术为我们丰富了原子、分子结构知识，也是一种非常灵敏的化学成分分析技术，被广泛地应用于研究与生产。另外，在实际的光源中，受激辐射的成分极其微小，看不到有什么实际应用价值。怎样才可以改变光源的辐射成分，使其由通常的以自发辐射为主，转变成以受激辐射为主，这在当时的理论和技术上还都无法预见。

直到1958年，A. L. Schawlow和C. H. Townes发表了一篇著名的论文，给出了光源实现以受激辐射为主的条件，向人们展示了获得激光的可能性。随后，各国科学家为此相继设计了各种实验方案。美国休斯顿实验室的Maiman利用掺铬的红宝石晶体做发射激光的材料，以发光强度很高的脉冲氙灯泵浦发光。经过将近一年半时间的努力，Maiman终于在1960年5月17日，成功地制造出了一种以受激辐射为主的新光源仪器，亦即世界上第一台激光器——红宝石激光器。

我国第一台激光器也是红宝石激光器，是于1961年夏天在中国科学院长春光学精密机械研究所诞生的。不过，它与Maiman的红宝石激光器在器件结构上有所不同。我国红宝石激光器的泵浦

源用的是直管式氙灯，灯和红宝石棒并排放一只球形聚光器的球心附近。这种结构，能够更有效地利用泵浦灯的光辐射能量，提高激光器的输出功率和能量转换效率。到目前为止，几乎所有的固体激光器都是采用直管式泵浦灯的泵浦方式。

伴随着第一台激光器的问世，一门崭新的技术迅速发展起来，各式各样的激光器相继问世，如输出波长从紫外到远红外的以及波长可连续调谐的激光器，连续泵浦输出的和脉冲重复频率工作的激光器，工作物质为固体、气体、半导体、液体等等的激光器，有的业已形成了产品。

Q开关技术、锁模技术的发展，使激光器的输出功率大大增加，目前最高已达到 10^{14} W；脉冲持续时间可以短到与光振动周期同数量级。稳频技术的采用，能够使激光器输出的光频率极其稳定，频率漂移量只有本身的 10^{-14} 。

工业、医学、农业、通信、军事、科学研究等各个领域已相当广泛地使用了激光技术。在工业上，采用激光进行焊接、切割、打孔、热处理等机械加工，既简化了生产工序，又提高了加工精度，且较易实现自动化生产程序，大大地提高了生产效率和产品质量，还能够解决一些用以往加工手段难以完成或者无法完成的加工问题。在医学上，以激光束为医疗手段，不但能够治疗常见疾病，还能治疗某些顽症甚至“不治之症”。激光的运用简化了医疗手续，节省了医疗时间和医疗费用，也减少了患者的痛苦。

激光为光学研究开创了新天地。利用激光技术，光谱分辨率提高了百万倍，使我们能够进一步深入研究原子、分子的内部结构。激光与物质相互作用，还会出现一系列以往不曾观察到的新现象，比如光倍频、光混频、光学自感应透明、双光子吸收、自聚焦和自散焦、受激散射等。这些现象的研究和应用，又构成了光学新分支——非线性光学。

激光技术已从60年代的探索阶段和70年代的发展阶段进入了80年代的成熟阶段。我国对激光技术开展了深入的研究，激光在国民经济各个领域中的应用已相当广泛，研究和应用激光技术

的队伍在不断扩大，激光技术的内容也日益丰富。显然，一本简明扼要、全面综合介绍激光技术及其主要应用的手册，对从事激光器生产、设计的科学工作者，大专院校有关专业师生和激光技术开发应用的工程技术人员都是非常需要的。本书就是为此目的而编写的。为了尽可能地扩大信息量，又不致使篇幅过大，本书采用了条目叙述方式。全书收纳约1800个条目，基本上包括了激光领域中所有常用的概念。为方便读者查阅，特做索引附在书后。

随着激光技术领域的进一步扩大，激光器件种类也日益增多。限于作者水平，内容上难免有错漏之处，我真诚地希望同行们能够不吝赐教，以便改正。

中国光学学会理事长王大珩教授为本书写了序；王润文、汤星里、梁培辉研究员审阅了拙作，并提出了宝贵修改意见；江惠和秦蕙蕾绘制了全书插图，作者在此表示真诚的感谢。

目 录

序

前言

第一章 激光的基本特性和参数	1
1-1 光波和光量子.....	1
1-2 发光	21
1-3 激光	37
参考文献	135
第二章 激光单元技术	137
2-1 Q开关技术.....	137
2-2 锁模技术.....	164
2-3 激光频率稳定技术.....	189
2-4 选模技术.....	200
2-5 激光光谱技术.....	215
2-6 激光调制技术.....	233
2-7 激光全息照相.....	258
2-8 介质薄膜.....	301
参考文献	320
第三章 激光器结构和分类	323
3-1 激光工作物质.....	323
3-2 泵浦.....	346
3-3 激光器共振腔.....	393
3-4 激光器分类.....	463
参考文献	477
第四章 固体激光器	479
4-1 红宝石激光器.....	479
4-2 钕玻璃激光器.....	494
4-3 Nd^{3+} :YAG激光器.....	527

4-4	色心激光器	551
4-5	其他固体激光器	561
	参考文献	580
第五章	气体激光器	582
5-1	He-Ne激光器	582
5-2	CO ₂ 分子激光器	609
5-3	金属蒸气激光器	660
5-4	氩离子激光器	682
5-5	准分子激光器	695
5-6	氮分子激光器	723
5-7	CO分子激光器	733
5-8	其它类型气体激光器	739
	参考文献	752
第六章	染料激光器	755
6-1	工作物质	755
6-2	工作特性和输出特性	766
6-3	激光器件	786
	参考文献	815
第七章	半导体激光器	819
7-1	工作原理	819
7-2	工作特性和输出特性	831
7-3	激光器件	843
	参考文献	862
第八章	自由电子激光器、波导激光器和光纤激光器	863
8-1	自由电子激光器	863
8-2	波导激光器	878
8-3	光纤激光器	895
	参考文献	897
第九章	非线性光学	899
9-1	电磁场的非线性波动方程	899

9-2	光学倍频	902
9-3	光学混频	950
9-4	光学参量放大和参量振荡器	967
9-5	受激散射	978
9-6	瞬态相干效应	997
9-7	光学双稳态	1007
9-8	其他非线性光学现象	1013
	参考文献	1020
第十章	激光应用	1023
10-1	激光工业加工	1023
10-2	激光检测	1051
10-3	激光化学	1091
10-4	激光生物学与激光损伤	1099
10-5	激光防护	1122
	参考文献	1139
	索引	1141
	附录	1168

第一章 激光的基本特性和参数

激光与物质相互作用时出现的各种效应，与光的基本物理参量，如光波长（或频率）、光功率（或能量）、光的单色性和发散性、光斑尺寸、光脉冲宽度等有关。在这一章里我们给出这些量的物理意义、计量方法以及光在物质内部的传播规律。

1-1 光波和光量子

从光源发射出的光辐射能量以怎样的形式传播？1801年英国物理学家托马斯·杨做了著名的杨氏实验，回答了这个问题。他通过实验验证了光是一种波，即光能量是以波动方式在空间传播的，他称之为光波。

杨氏实验的实验装置如图1-1所示。一束狭窄的光束穿过十分靠近的小孔后，再投射到一块白布屏幕上。结果从屏幕上可观察到在两束透射光重叠的部分出现一组明暗交替的条纹，该现象表明光具有波动的最重要特征——干涉性。后来科学家又进一步证明，光波就是波长位于特定波段的电磁波。

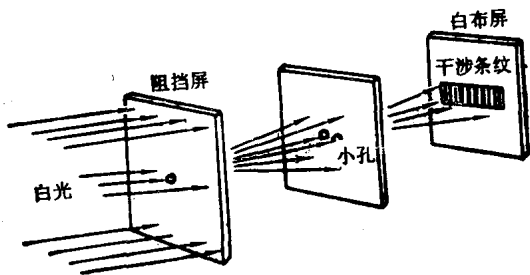


图 1-1

1905年，著名科学家爱因斯坦把普朗克的量子论推广到光辐射，提出了光量子概念。爱因斯坦认为从光源发射出来的光束是一群具有能量的“粒子流”，组成这一“粒子流”的“粒子”称为一个“光子”。“光子”的能量由辐射频率来决定，辐射频率越高，光子的能量也越高。辐射频率为 ν 的光束，相应的光子能量为

$$E = h\nu \quad (1-1)$$

这里 ν 以 Hz 为单位， h 是普朗克常数，如果能量 E 是以 J 为计算单位， h 的数值等于 $6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。

爱因斯坦光量子概念的实验基础之一就是光电效应，即一定波长的光辐射照射到某些金属上时，从金属表面有电子逸出。物理学家们以极高的精确度测量光电子的数目和它们的能量，发现光电子的能量与光辐射强度无关，与被照射的金属性质无关，而仅仅取决于光波频率。然而，这种性质用已有的光波动理论是无法解释的。

1-1-1 光波的频率、周期和波数

波动最基本的形式是用正弦函数描绘的波动，简称为正弦波。沿着 z 方向传播的电磁波的数学形式是

$$E = E_0 \sin(\nu t - kz) \quad (1-2)$$

式中 E_0 为波动的振幅， ν 为波动频率， k 为波数，它等于波长的倒数，即

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1-3)$$

式中 λ 代表波长。把正弦波的波动情况绘画出来，就得到如图 1-2 所示的图形。图形对称于时间轴，正负交替出现。从正到负再回到正值，一个来回的时间为波动的周期；而在一秒钟内正负交替的数目，为波动的频率。频率的计量单位是赫兹，用符号 Hz 表示。

光波的频率非常高，可见光的频率在 10^{14} — 10^{16} Hz 之间。

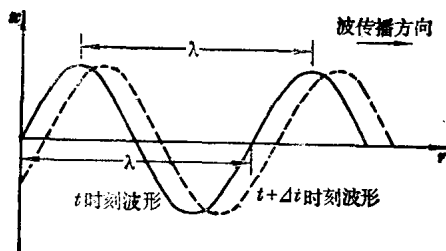


图 1-2

1-1-2 波长

波的物理长度称为波长，它的数值等于波动图形中相邻两个波峰之间的距离，通常用 λ 标记。假如波动传播速度是 v ，那么频率 ν 和波长 λ 之间的关系是

$$\lambda = v / \nu \quad (1-4)$$

对于光波来说，不管其波长是多少，它在真空中的传播速度都等于同一个数值，即每秒约 30 万公里。所以，真空中的光波、波长和频率的关系是

$$\lambda = c / \nu \quad (1-5)$$

式中 c 代表真空中的光速。

光波波长可以利用光的干涉实验测量出来。在光的干涉图上，亮条纹与相邻暗条纹的光程差等于波长的一半。于是根据实验装置的几何尺寸，从干涉图上量出形成亮条纹和暗条纹的光程差，便可以计算出波长。光波波长很短，一般以 \AA （埃）为单位。此外，通常用的单位还有 μm （微米）、 nm （纳米）。

1-1-3 激光波长计

这是一种专门用来测定激光器输出的激光波长数值的仪器。现有的激光波长计测量波长的精确度为 0.001nm ，测量时不受环境温度的影响。

用激光波长计测量波长的方法是：尽可能准确地把待测的波

长值夹在两个已知波长值之间，然后通过通常采用的内插法算出未知波长的数值。

仪器的主要结构如图1-3所示。一只非相干光源（如氙灯）有许多不同波长的谱线；He-Ne激光器为相干光源，狭缝的宽度可调节。

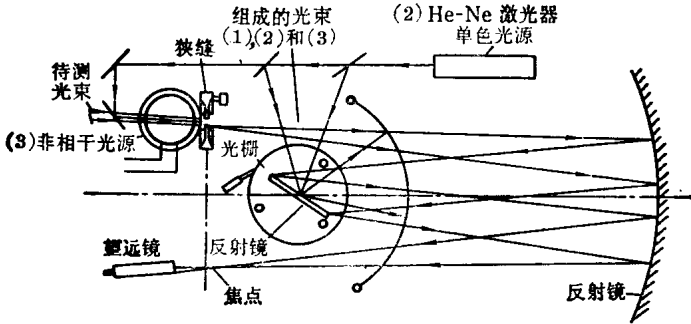


图 1-3

1-1-4 用稳频激光器测量真空中的光速

在所有的基本常数中，真空中的光速是最重要的参数之一。目前，通过准确测量用甲烷稳频的He-Ne激光频率和波长，由这两个值相乘而得到的光速数值是

$$c = 299792458.0 \text{ m/s} \pm 4 \times 10^{-9}$$

用CO₂分子激光器的R(2)支（波长9.3μm）谱线的频率和波长的乘积确定的光速数值是

$$c = 299792459.0(0.8) \text{ m/s}$$

这个数值已被长度计量标准咨询委员会推荐，用于距离测量。

1-1-5 电光调制法测量光速

这种方法是通过测量调制波波长 λ 和调制频率 f 来确定光速。

如图1-4所示，让激光束通过电光调制器，然后用分速器把

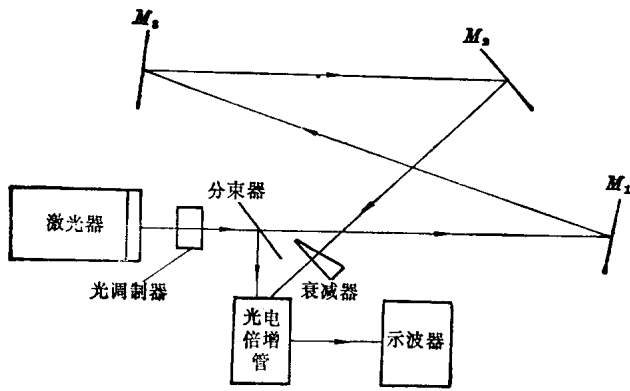


图 1-4

它分成两束，一束作为参考光由分束器直接反射到光电倍增管上；另一束作为测量光延长一段光程 l 之后才射到光电倍增管上。在一般情况下，这两束光叠加的结果与分束前的光应完全一样，都含有直流分量、调制波的基波和各次谐波。但如果调制器的工作点在 $k_0\pi = \frac{1}{2}\pi$ 处 (k_0 是波数)，则分束前的光束和分束后的两束叠加光束都没有偶次谐波分量。此时仔细调节在测量光光路上的可变光学衰减器，使参考光束和测量光束的直流分量、基波和各次谐波的幅度都相等，那么，这两束光叠加的结果是，基波分量和各次奇次谐波分量的幅度都正比于调制频率 f 与 f_0 之差，其中的 $f_0 = c/2ln_0$ ，式中 c 是光速， n_0 是介质的折射率。把光电倍增管接收到的由叠加光束产生的电信号放大，然后送到示波器进行观察，当调制频率 f 等于 f_0 时，在叠加光束中所有交流分量的幅度都等于零，即在示波器上出现一条直的扫描线。记下此时电光调制器的调制频率，便可以由下式算出光速：

$$c = 2f_0ln_0 \tag{1-6}$$

1-1-6 测量光波能量的单位

测量光波能量的单位一般使用能量单位，即 J (焦耳)，W (瓦) 和 eV (电子伏)。

$$1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

1-1-7 光的颜色与波长

光的颜色和波长之间有一定的联系。根据光的电磁波理论，不同颜色的光对应着不同波长的辐射。表1-1列出通常的红、橙、黄、绿、蓝、青、紫等七种颜色对应的波长范围。

表1-1 光的颜色与波长范围

颜色	波长(μm)	频率(Hz)
红	0.61—0.70	$4.92—4.28 \times 10^{15}$
橙	0.59—0.61	$5.01—4.92 \times 10^{15}$
黄	0.57—0.59	$5.27—5.01 \times 10^{15}$
绿	0.55—0.57	$6.00—5.27 \times 10^{15}$
蓝	0.45—0.55	$6.6—6.0 \times 10^{15}$
青	0.43—0.45	$7.0—6.6 \times 10^{15}$
紫	0.36—0.43	$8.3—7.0 \times 10^{15}$

需要说明一点的是，颜色是人眼视觉的结果。人眼对颜色的鉴别能力是有限的，并不是对每种波长的光波，我们都能够看到相应的颜色。比如说红光，我们一般只能鉴别出其中的橘红、朱红、玫瑰红等几种颜色。但属于红光的波长范围约有100 nm的宽度，如果以1nm的间隔为一组，就相当于有100种不同的红颜色。此外，两种颜色混合之后会显现出另外一种颜色，比如红色与绿色混合后，看起来便是紫色；蓝色和绿色混合后，看起来便是青色。这说明，我们肉眼视觉对颜色的分辨能力是有局限性的。所以，在研究不同颜色的光波对物质的作用时，采用波长为参数比采用颜色会精确得多。

1-1-8 光波频率的测量

直接测量光频率需要计数给定时间间隔内电磁辐射的周期数，现代的电子线路允许直接计数的周期数可以高到500MHz。较高的频率测量需采用拍频技术，即两个振荡器的辐射频率混合