

激光漫谈

任长征
孙迭簏 编著
王培南

复旦大学出版社



激 光 漫 谈

伍长征 孙迭簏 王培南 编著

复旦大学出版社

内 容 简 介

激光是现代高技术的重要领域,它在工业、交通、通信、医学、科学技术等范围的应用日益广泛。本书旨在向正在从事有关工作的初、高中文化水准的读者,普及激光的基本原理、主要特点及应用方法等方面的知识,全书共十章,前三章介绍激光的原理、器件及主要特性;四、五两章阐述激光在工业和测量中的应用;第六章介绍全息照相技术;七、八、九章分别讲述激光在医学、通信及军事上的应用;第十章专门讨论激光在科学技术上的应用前景,并对开拓激光应用的潜力作了启发性的介绍。

本书可供初中以上文化水准的读者作为了解激光应用的入门书,也可供文科大学生阅读。

激 光 漫 谈

伍长征 孙迭篪 王培南 编著

复旦大学出版社出版

(上海国权路579号)

新华书店上海发行所发行 复旦大学印刷厂印刷

开本787×1092 1/32 印张7.5 插页0 字数172,000

1988年7月第1版 1988年7月第1次印刷

印数1—3,000

ISBN7-309-00082-X/O·08 定价:1.25元

目 录

第一章 激光的特性	1
1 一种崭新的光源.....	1
2 高单色亮度的功能.....	8
3 激光的由来和发展.....	15
第二章 激光的产生	21
1 原子结构的特点.....	21
2 原子发光的秘密.....	25
3 光的放大.....	32
4 反射镜的奥秘.....	40
第三章 激光器件	50
1 基本结构.....	50
2 工作物质.....	52
3 激励方法.....	57
4 工作方式.....	66
5 典型激光器.....	70
第四章 激光在工业中的应用	78
1 激光在机械工业中的应用.....	78
2 激光在微电子工业中的应用.....	88
3 激光在化学工业中的应用前景.....	92
4 激光在印刷工业中的应用.....	96
第五章 激光在精密测量中的应用	100

1 长度的测量.....	100
2 速度的测量.....	109
3 转速的测量.....	114
4 其他精密测量.....	118
第六章 全息照相技术	127
1 全息照相的发展历史.....	128
2 光的相干性.....	129
3 全息照片的拍摄.....	135
4 全息照片的显示.....	137
5 彩色全息照相.....	140
6 全息照相的应用.....	142
第七章 激光在医学上的应用	150
1 激光的眼科手术.....	150
2 激光的外科手术.....	156
3 攻克癌症的新武器.....	160
4 激光的牙科应用.....	163
第八章 激光通讯.....	167
1 空间激光通讯.....	168
2 光导纤维通讯.....	171
第九章 激光的军事应用	176
1 激光测距.....	176
2 激光雷达.....	179
3 百发百中的激光导弹.....	182
4 激光实战模拟演习.....	185
5 看不见的防线.....	187

6	死光.....	190
第十章 激光在科学技术研究中的应用		
1	激光受控热核反应.....	196
2	非线性光学效应.....	199
3	探索微观世界超快速运动的奥秘.....	205
4	光计算机.....	208
5	激光使卫星改道.....	218
6	激光加速器.....	221
7	长度和时间的统一标准.....	224
8	激光光谱分析.....	228
参考资料		
		231

第一章 激光的特性

1 一种崭新的光源

不论是白天或者夜晚，人们都离不开光。它来自大自然中的太阳、月亮和星星，还有人们创造的各种各样的光源：课堂里的日光灯、人行道上的高压水银灯、足球场上的人造小太阳、十字路口的红绿灯、以及霓虹灯、车灯、航标灯、闪光灯、探照灯……。这些光源使人类的学习、工作和生活变得更加方便、更加美好、更有成效。

在各种不同的生活和工作场所，人们对光源的要求也不同。有的要求发光时间短一些；有的要求光线射得远一些；有的要求颜色单纯一些；有的要求亮度高一些，等等。总之，人们希望不断改善光源的性能，制造出更多的新型光源，以满足各种不同的需要。

发光时间最短

那么，世界上什么光源的发光时间最短呢？你也许会说是闪光灯，或脉冲氙灯。其实，它们的发光时间最短不过是千分之一至万分之一秒（ $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 秒）。而激光的出现，可以使光源的发光时间缩短到惊人的地步。采用适当的技术，可以使激光脉冲的持续时间仅为10亿分之一秒（ 10^{-9} 秒）、1万亿分之一秒（ 10^{-12} 秒），甚至还可以更短。

光源的发光时间长短究竟意味着什么呢？大家知道光源的

辐射功率 P 等于光源辐射的能量 W 除以发光时间 t , 表示为

$$P = \frac{W}{t}. \quad (1-1)$$

可见, 缩短发光时间可以提高光源的辐射功率。比如, 一只 100 支光的电灯泡的辐射功率是 100 瓦特, 表示在 1 秒钟内辐射出 100 焦耳的能量, 这是一个非常普通的光源。如果我们能够设法使 100 焦耳的能量集中在 10^{-11} 秒内辐射出来, 那么它的瞬时辐射功率就不再是 100 瓦特, 而是 10^{13} 瓦特, 即 10 万亿瓦特。这是一个比目前全世界的总发电功率还要大的数字呢! 现在激光的辐射功率已经超过这个数字。从这里可以看到压缩光源发光时间的巨大意义。我们常常用“昙花一现”来形容世界上短暂的变化过程, 而激光可以在一万亿分之一秒内(这个发光时间实在短到无法形容和无法想像的地步!)辐射出巨大的能量。

光线射得最远

接着, 我们又问, 世界上什么光源的光线射得最远? 除了大自然中的太阳和星星之外, 有人会说是探照灯, 因为在节日的夜空, 探照灯使五彩缤纷的烟花更加显得绚丽多姿。这是由于探照灯通过一个聚光镜把光线集中在某个方向上。大家可以看到, 几乎所有的普通光源都是向着四面八方发光, 光线射得越远, 光的亮度就变得越弱。显然, 光源发射的光越强就能射得越远。在许多场合中, 人们并不希望光源向四面八方照射, 而是集中在某个特定的方向上面, 如照射在桌面上、午台上、马路上、足球场上等, 所以通常在光源上加上必要的聚光罩或聚光镜, 就能提高光源在照明方向上的辐射能量, 从而使光源变得更完善或射得更远。可见聚光镜的作用是减小光源光束的发散角度, 以提高光源的亮度。光源的发散角越小, 它的方向性就越好。而激光的

出现,正是对光源方向性的极大改善。激光的光束几乎只沿着一个方向传播,其发散角仅10分之一度左右,而普通光源是360度。无疑,激光是光线射得最远的光源。它可以从地球射到月亮,长达40万公里,这是手电筒和探照灯绝对无法相比的。

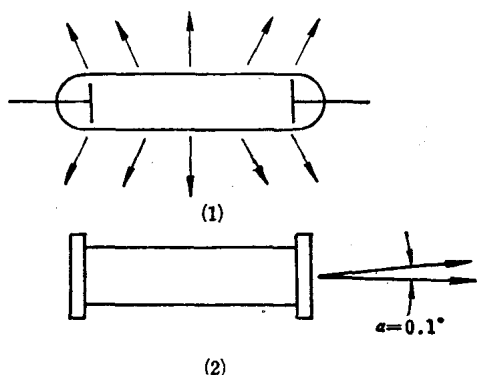


图 1-1

(1) 脉冲氙灯 (2) 激光器

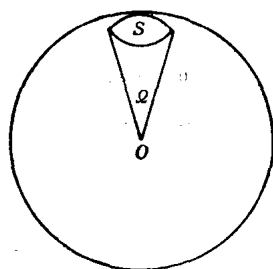


图 1-2 立体角 Ω

光源的方向性好意味着什么呢?让我们来比较一下氙灯和激光的发光情况。假如它们的总辐射能量完全相同(参见图1-1),若氙灯灯管直径为6毫米,电极间距离为80毫米,可以计算出总发光面积约15平方厘米;而激光集中在管子的一端发光,发光面积仅0.2平方厘米。相比之下,激光器在每单位面积上的发光能量要比氙灯大75倍。更为重要的差别还在于氙灯发光的能量是分散在四周的整个立体空间内,而激光器的发光仅仅局限在很小的发散角 α 所包含的立体角 Ω 内。立体角的大小是这样规定的:以激光源为顶角,然后以顶角 O 为球心,以单位长度为半径作球,则此球与激光束圆锥相截出的球面积 S 的大

小用来表示立体角 Ω 的大小(见图 1-2)。整个球面在球心所张的立体角为 4π 。经过计算,在相同的立体角内,激光的输出能量比氙灯大 1 千万倍。如果把激光器每单位面积上发光能量比氙灯大的因素一起考虑的话,激光能量由于发光面积和发光方向的高度集中,使它的亮度比氙灯大上几亿倍!从这里可以看到激光器的定向发射具有多么大的优越性!

亮 度 最 高

人们最感兴趣的问题可能是世界上什么光源最亮?多数人会说太阳最亮,因为整个世界沐浴在明亮的阳光下,它给人类带来温暖和光明。太阳表面的亮度比蜡烛大 30 万倍,比白炽灯大几百倍。但是,人类已创造出比太阳更亮的光源,人们在足球场上看到的氙灯(人造小太阳)的亮度已经和太阳表面的亮度相近,而人们比较少见的高压脉冲氙灯的亮度比太阳高近 10 倍。激光的出现,更是光源亮度上的一次惊人的飞跃。一台普通的激光器的亮度比太阳表面的亮度大 10 亿倍。可见,激光是当今世界上最亮的光源。

激光的亮度为什么这样高,让我们来看一下亮度的定义。我们规定一个光源在单位时间、单位面积和单位立体角内辐射的能量为光源的亮度,用 B 表示;

$$B = \frac{W}{\Delta S \cdot \Delta t \cdot \Delta \Omega}, \quad (1-2)$$

W 表示光源发射的总能量,以焦耳为单位。 ΔS 表示光源发光的面积,用平方厘米作单位。 Δt 表示光源发光的时间,用秒作单位。 $\Delta \Omega$ 表示光源发光的空间立体角,用立体弧度作单位。亮度的单位是瓦特/(厘米²·立体角)。按照上面的讨论,激光的发光时间可以压缩得很短,发光面积和发光立体角也可以压缩

得很小,即 Δt 、 ΔS 、 $\Delta \Omega$ 都很小,自然激光的亮度 B 就可以达到很高了。简单说来,如果普通光源和激光器具有相同的辐射能量 W ,假定激光的发光时间 Δt 、发光面积 ΔS 和发光立体角 $\Delta \Omega$ 都比光源小 1 千倍的话,三个因素将使激光器的亮度比光源大 10 亿倍。可见,激光高亮度的奥秘在于它能把巨大的能量集中在很短的时间、很小的发光面积和立体角内发射出来。

颜色最单纯

光为什么会有各种不同颜色呢?让我们先从水的波动说起。如果我们到海边去游泳或游玩,常常可以看到一个个波浪涌向

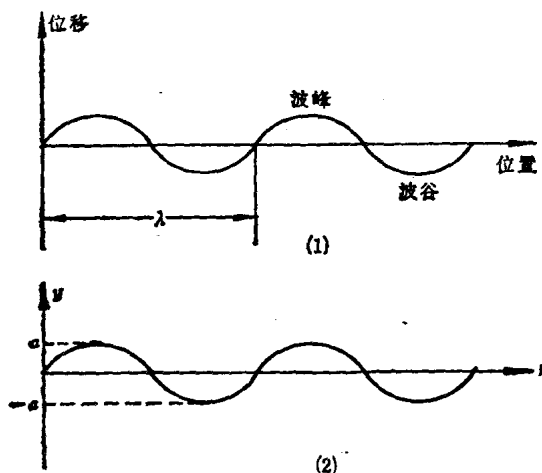


图 1-3

(1) 波形图 (2) 振动图

岸边溅起雪白的水花。或者当你把一块石头投入池塘,就会看到激起的层层波浪向四方传播,有些地方高起来,有些地方低下去,高低相间。水波最高的地方叫做波峰,最低的地方叫做波

谷,相邻两个波峰(或者波谷)之间的间隔叫做波长,用 λ 表示。参见图1-3(1)波形图。如果水波的传播速度为 v ,水面每秒钟内波动的次数叫做波的频率,用 ν 表示,波长和频率之间的关系表示为

$$\nu = \frac{v}{\lambda}. \quad (1-3)$$

显然,频率和波长成反比,水波的波长越长,它的频率就越低。波不断地向前传播,如果我们固定在水面上某一点观察,水面将有规则地时高时低。我们用 y 表示水波高低的大小, y 随时间 t 的波动情况可以用数学上的正弦函数来描写,记为

$$y = a \sin(2\pi\nu t + \phi), \quad (1-4)$$

a 为波峰的高度,称为波动的振幅, ν 是频率,如图1-3(2)振动图所示。横坐标表示时间 t ,纵坐标表示波的振动大小。如果

$$\sin(2\pi\nu t_1 + \phi) = 1, \quad (1-5)$$

y 将对应波峰 a 的地方。如果

$$\sin(2\pi\nu t_2 + \phi) = -1, \quad (1-6)$$

y 将对应波谷 $-a$ 的地方。可见在振幅 a 相同的条件下, $(2\pi\nu t + \phi)$ 决定了波的高低,称为波的位相(或周相), ϕ 表示在起始时刻 $t=0$ 时的位相,称为初位相。

光也具有波动的性质,波长和频率关系类似于水波的情况,即公式(1-3)。但是传播的速度是光速,记为 c 。光和普通无线电一样都是一种电磁波,只是波长的长短不同而已。中波广播电台发出的无线电波的波长有几百米,而光波的波长还不到1微米(1米 $=10^6$ 微米)。我们眼睛感觉到的不同颜色,正是由于光波的不同波长所致。光的波长从0.76~0.40微米为可见光范围(见表1-1)。波长大于0.76微米的光称为红外线,波长小于0.40微米的光称为紫外线,它们都是人眼看不见的光线。

表 1-1 各色光的波长和频率范围

光的颜色	波长范围(微米)	频率范围 ($\times 10^{14}$ 赫)
红外线	>0.76	<3.95
红色	$0.76\sim 0.63$	$3.95\sim 4.76$
橙色	$0.63\sim 0.60$	$4.76\sim 5.00$
黄色	$0.60\sim 0.57$	$5.00\sim 5.26$
绿色	$0.57\sim 0.50$	$5.26\sim 6.00$
青色	$0.50\sim 0.45$	$6.00\sim 6.67$
蓝色	$0.45\sim 0.43$	$6.67\sim 6.98$
紫色	$0.43\sim 0.40$	$6.98\sim 7.50$
紫外线	<0.40	>7.50

如果一个光源发射的光所包含的波长范围越窄,那么它的颜色就越单纯,看起来就越鲜艳,我们就说光源的单色性越好。因此,单色光就是指波长范围很窄的一段光辐射。光波的波长为 λ ,它包含的波长范围为 $\Delta\lambda$,光波的单色性表示为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}, \quad (1-7)$$

或者

$$\frac{\Delta\nu}{\nu}. \quad (1-8)$$

显然,波长范围 $\Delta\lambda$ (或频率范围 $\Delta\nu$) 越小,比值越小,单色性越好。在激光没有产生以前,最好的单色光源是氪灯。氪是一种惰性气体原子,其发射波长为 $6047 \text{ \AA}$ ($1 \text{ 微米} = 10^4 \text{ 埃}$,埃表示为 $\text{\AA}$),波长范围 $\Delta\lambda = 0.0047 \text{ \AA}$ 。而激光的出现,使光源单色性有了极大提高。例如,氦-氖气体激光器产生的激光所包含的波

长范围小于一千万分之一埃 ($10^{-7} \text{ \AA}$), 其单色性比氦灯好十万倍。对于一些特殊的激光器, 其单色性还要好得多。可见, 激光器是世界上发光颜色最纯的光源。

综上所述, 激光是由激光器中的物质在受激情况下产生的辐射, 这种辐射具有高亮度、高方向性、高单色性等优点。激光的应用都同这些特性密切相关, 后面章节分别阐述激光在工业加工、测距、通信、照相、医学及科技等广泛领域中的应用。

2 高单色亮度的功能

上面的讨论告诉我们, 激光是当今世界上发光时间最短、单色性方向性最好和亮度最高的人造光源。可以用一个叫做单色亮度的物理量大致地描写这些特性。光源单位面积在单位时间、单位频率间隔内向着某一方向的单位立体角内发射的光能量称为该光源在这个方向上的单色亮度, 用 B_ν 表示, 表示式为

$$B_\nu = \frac{W}{\Delta S \cdot \Delta t \cdot \Delta \Omega \cdot \Delta \nu}, \quad (1-9)$$

W 、 ΔS 、 Δt 、 $\Delta \Omega$ 和 $\Delta \nu$ 分别表示光源辐射的能量、发光面积、发光时间、发光立体角和发光频率范围。 ΔS 、 Δt 、 $\Delta \Omega$ 和 $\Delta \nu$ 越小, 光源的单色亮度 B_ν 也越高。由此可见, 激光的奇特性质正是由于它和普通光源相比具有较小的发光面积、极短的发光时间、极小的立体角和极窄的频率范围, 从而获得极大的单色亮度。所以我们可以将激光的特性简单地概括为一句话: 激光是一种能量在空间、时间和频率上高度集中的新颖光源, 或者说激光是一种高单色亮度的奇妙光源。

对于实际的激光器来说, 并不需要也不可能同时做到 ΔS 、 Δt 、 $\Delta \Omega$ 和 $\Delta \nu$ 都很小, 只有其中的三个量都很小的时候, 就可

获得非常高的单色亮度。一般说来,激光器的发光面积 ΔS 总是比普通光源小,发光立体角 $\Delta\Omega$ 更比普通光源小得多,而发光时间 Δt 和发光频率范围 $\Delta\nu$ 两个量中只要有一个量远小于普通光源的话,就可以获得远远大于普通光源的单色亮度。

激光的高单色亮度使得它在工业、军事、医学以及科学研究等各种领域中已经有了广泛的用途,并且显示出光辉的应用前景。激光高单色亮度的奇异功能可以从下面三个方面加以叙述。

高亮度的功能

人们都有这样的常识,用普通的放大镜会聚炎热的太阳光,很容易把纸片烧一个洞或者把火柴点燃。如果光源的亮度越高,会聚后所能达到的温度也越高。会聚一束激光,不但在会聚点(焦点)附近产生高温、高压和强电场,而且焦点的直径小到接近光波长的大小。前者是由于激光能量在焦点附近高度集中的缘故,后者是由于激光的高单色性,避免了透镜对不同颜色的光会聚在不同地方(造成焦点范围增大)的色散影响。

一束会聚得很细的中等功率的激光,可以用作为精密的切割工具。它可以给极为坚硬、难熔的金刚石、红宝石打孔,加工钟表的钻石、尼龙喷丝头和金属拉丝模等。它可以为集成电路刻线、划片、焊接,制造微型精密电阻和电容器等元件。它可以作为外科手术刀作无血开刀或治疗视网膜脱落,把视网膜重新焊接在眼底上。它甚至还可以作为“能工巧匠”,

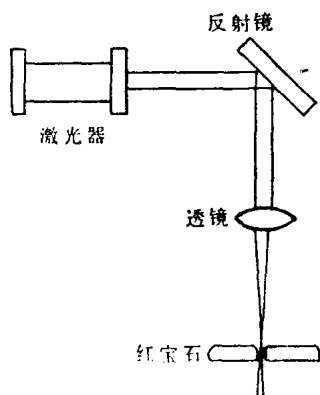


图 1-4 激光打孔

在玉石、象牙上进行“巧夺天工”的精细雕刻。

会聚高亮度的脉冲激光可以在几个微米的焦点区域内产生几百万度的高温、几百万个大气压和每厘米几千万伏的强电场，它不但可以用来加工、焊接、切割大型金属部件，如钢板、汽车齿轮等。更为重要的用途是能够用来引发热核聚变，比如使氘和氚聚变为氦和中子后释放出大量的能量，以解决人类面临着越来越迫切的能源问题。

显然，超高亮度的激光有可能用作“死光”武器，以摧毁敌人的装甲车、坦克以至飞机、导弹，甚至卫星等。

高方向性的功能

激光具有极好的方向性，意味着它是一束很细很强可以射得很远的光线。由于光的性质决定它不受干扰，沿直线传播又可以被目标反射，它可以转变为电信号又可以随电信号的强弱变化。这样的一束光将是神通广大的。

激光测距仪通过测量激光束射向目标并被反射回来所经历的时间，可以精确地测量到目标的距离。用它来测量地球和月亮之间的距离，虽然长达40万公里，其测量误差不超过15厘米，这是过去任何光学测距仪所望尘莫及的。如果在坦克上装上激光测距仪，它对目标的命中率就会大大提高，在许多国家都已普遍采用。激光雷达不但可以准确测量目标的距离，还能自动、精密地跟踪飞机、导弹、卫星的高速飞行。

激光通讯机是把声音的电信号“骑”在光线上（将声音的强弱调制为光的强度或频率的相应变化）发射出去，经过对方接受并还原为声音的信号来达到通讯的目的。由于光的频率高至约 $10^{13} \sim 10^{15}$ 赫（1/秒）。根据通讯原理，在同一条光路中可以同时容纳100亿个通话线路或者一千万套电视节目，这是一个多

么大的数字，它象征着全世界人民可以同时在同一条激光通讯线路上通话。这是普通无线电通讯机所无法比拟的。使用看不见的红外线激光通讯，保密性特别强，并且不怕窃听和干扰。激光通讯机特别适合于宇宙空间通讯和短程的固定点之间的通讯。比如大河两岸的高层建筑，深谷两边的高山峻岭，深山老林中的观察哨所，它们之间架设电话很不方便，利用激光通讯特别有利。由于光线不能避开大的障碍物，在恶劣的气候（尤其是雨天和雪天）光的衰减十分严重，这就给激光通讯带来麻烦。但是激光可以通过光学纤维来传输信息，光学纤维就像普通的电线或电缆那样可在空中地下任意弯曲绕行，光线则在其中畅通无阻。

激光报警器用来封锁重要的通道，以保护机场、仓库、国境线、军营等重要军事要地。它让一条激光束通过待监视的区域，当有人闯入该地区时，遮断了光线，远处的报警器就会立即发出特定的信号告诉守卫者。如果使用红外线激光并加上棱镜折射或反射镜反射，使一条看不见的激光束变成几十束光纵横交叉封锁特定的区域，这样一来，任何“猎物”都是逃脱不了的。

激光准直仪把激光束当作一条又细又长的直线可以对物体作精确的定位。激光束既不会像拉直的细绳或者钢丝那样，受到重力而下弯，也不会受到风吹而飘动。人们常利用这样一条光线来帮助工程施工和机器安装。比如在高山中挖掘长距离的隧道时，可以利用激光来“导向”。沿着激光照射的方向掘进，当偏离方向时立即给出信号使挖掘机迅速纠正，这样打出来的隧道又准又直。在高层建筑中，利用激光束代替传统的铅垂线，能使高楼大厦或者电视高塔建造得笔笔直直。使用更为精确的激光准直仪，可以准确地标定方位。在一公里的范围内，精度可达百分之几毫米，这种仪器可用来安装大型精密柴油机 and 飞机。