



王 驰 编著

激光检测技术及应用

JIGUANG JIANCE JISHU JI YINGYONG

清华大学出版社



王 驰 编著

激光检测技术及应用

JIGUANG JIANCE JISHU JI YINGYONG



图书在版编目(CIP)数据

激光检测技术及应用/王驰编著. —上海:上海
大学出版社, 2016. 11

ISBN 978-7-5671-2526-1

I. ①激… II. ①王… III. ①激光检测—研究
IV. ①TN247

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 248290 号

责任编辑 黄晓彦 管玉娟
封面设计 施羲雯
技术编辑 金鑫 章斐

激光检测技术及应用

王 驰 编著

上海大学出版社出版发行

(上海市上大路 99 号 邮政编码 200444)

(<http://www.press.shu.edu.cn> 发行热线 021-66135112)

出版人:郭纯生

*

上海市华业装璜印刷厂有限公司印刷 各地新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 14.25 字数 347 000

2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5671-2526-1/TN·017 定价:40.00 元

前 言

激光具有高定向性、高单色性、高相干性和高亮度等特点。自 1960 年第一台红宝石激光器问世以来,激光技术发展很快,广泛用于物理学、化学、生物医学、通信技术、加工技术、工业检测及军工武器等诸多领域,渗透到几乎所有的自然科学领域。激光检测技术是激光技术的一个重要分支,具有分辨率高、抗干扰性和实时性好等优点,是现代精密测量技术中必不可少的技术手段,广泛用于长度、位移、振动、速度等物理参数测量,为实现超精密检测提供了新的研究思路,也为超精密加工技术的发展奠定了技术基础。

随着激光技术的发展,目前有关激光原理和激光检测的书籍出版不少,内容大多以激光作为能量媒介,进行位移、振动等物理量的测量,但对激光光束自身质量参数的检测,鲜有相关的书籍出版。本书在参阅大量资料的基础上,结合近年来教学和科研的实践经验,充分利用计算机技术的最新发展成果,将激光技术原理、激光检测技术和激光光束质量数值仿真技术融为一体,力求结构合理、内容准确、知识更新、理论和实践结合。尤其是将最新的超小光纤镜头和 VirtualLab、GLAD 等物理光学软件引入并有机结合,进行激光光束质量检测技术的应用实践,具有深刻的启发性和实用性。

本书在阐述激光原理和检测技术基本概念的基础上,介绍了几种典型激光器的工作原理和应用,重点描述激光光束质量参数的检测方法;基于计算机仿真技术的最新研究成果,描述利用物理光学软件进行激光光束质量参数仿真检验的基本原理和基本方法。此外,以编者近年来研究的超小 GRIN 光纤探头为对象,将最新的科研成果引入激光检测技术课程,通过科研与教学相结合的方法,以提高实践的可操作性,使学生充分了解和掌握激光检测技术的学术动态和最新成果,以适应 21 世纪科技人才培养的需要。本书可作为高校相关专业的教学用书,也可作为科研院所从事相关科学研究的技术参考书。

本书的编写,得到了上海大学的大力支持。研究生许婷婷、毕书博、徐龙龙、孙凡、朱茜、王宁等在本书编写过程中,对书中的插图汇总、文字校对、资料收集等付出了艰辛的劳动,在此表示衷心感谢。在编写过程中,参阅了一些编著者的著作和文章,在参考文献中未一一列举,这里也顺致敬意。此外,上海大学出版社做了认真细致的编辑工作,谨在此一并表示感谢。

鉴于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,殷切希望广大读者批评、指正。

编 者

2016 年 10 月 18 日

目 录

第 1 章 激光概述	1
1.1 激光的概念及特点	1
1.1.1 激光的概念	1
1.1.2 激光的特点	1
1.1.3 激光的应用	4
1.2 激光检测技术的发展动态	7
第 2 章 激光器的基本构成与工作原理	9
2.1 黑体辐射的普朗克公式	9
2.2 光与物质相互作用的三个过程	10
2.2.1 自发辐射	10
2.2.2 受激辐射	11
2.2.3 受激吸收	11
2.2.4 三个爱因斯坦系数之间的关系	12
2.3 激光产生的条件	13
2.3.1 受激辐射光放大	13
2.3.2 粒子数反转	14
2.3.3 激活粒子的能级系统	15
2.3.4 光的自激振荡	16
2.4 激光器的基本构成	17
2.4.1 工作物质	18
2.4.2 泵浦源	18
2.4.3 谐振腔	18
2.5 典型激光器	39
2.5.1 固体激光器	39
2.5.2 气体激光器	43
2.5.3 液体激光器	49
2.5.4 半导体激光器	53
2.5.5 其他激光器	54
第 3 章 高斯光束	57
3.1 基本性质	58
3.1.1 振幅分布及光斑半径	58
3.1.2 等相面分布	59

3.1.3	远场发散角	59
3.1.4	瑞利长度	60
3.2	特征参数	60
3.2.1	束腰半径 ω_0 和束腰位置	60
3.2.2	光斑半径 $\omega(z)$ 和等相面曲率半径 $R(z)$	60
3.2.3	高斯光束的 q 参数	60
3.3	变换方法	61
3.3.1	普通球面波的传输与变化规律	61
3.3.2	高斯光束的传输与变化规律	63
3.3.3	实例分析	64
3.4	特性改善	66
3.4.1	高斯光束的聚焦	66
3.4.2	高斯光束的准直	70
3.4.3	高斯光束的自再现变换	72
3.4.4	高斯光束的匹配	74
第 4 章	激光光束质量检测技术	76
4.1	光束质量评价方法	76
4.1.1	激光束束宽的定义	76
4.1.2	光束质量评价方法	78
4.2	光束质量检测技术	82
4.2.1	光束束宽测量	82
4.2.2	远场发散角测量	87
4.2.3	M^2 因子测量	89
4.3	CCD 图像传感器	91
4.3.1	CCD 概念	91
4.3.2	CCD 工作原理	92
4.3.3	CCD 基本特性参数	98
4.3.4	激光束诊断中的 CCD 相机	103
4.4	激光光束质量检测技术的应用	104
4.4.1	激光制造领域	104
4.4.2	信息与通信领域	106
4.4.3	医疗保健与生命科学领域	107
4.4.4	国防科技领域	109
第 5 章	激光光束质量检测技术在超 GRIN 光纤探头研究中的应用	111
5.1	超小 GRIN 光纤探头概述	111
5.2	超小 GRIN 光纤探头设计	112
5.3	超小 GRIN 光纤探头聚焦性能检测	114
5.3.1	光学变换系统	115
5.3.2	精密调整方法	115

5.3.3	实验数据处理	116
第6章	激光光束质量数值分析技术——VirtualLab	118
6.1	场追迹原理	118
6.2	场追迹光学软件 VirtualLab 概述	121
6.2.1	VirtualLab 的技术背景和基本思想	122
6.2.2	VirtualLab 的工具箱	123
6.3	VirtualLab 的理论基础与光学元件设置	124
6.3.1	电磁谐波场	125
6.3.2	传输算子	126
6.3.3	光源	128
6.3.4	光学元件	138
6.3.5	探测器	147
6.4	VirtualLab 的基本操作	156
6.4.1	用户界面结构	156
6.4.2	光学系统的创建方法	157
6.4.3	光学系统性能分析	163
6.5	应用案例——GRIN 光纤探头数值分析	169
第7章	激光光束质量仿真技术——GLAD	173
7.1	GLAD 简介	173
7.2	GRIN 光纤探头在 GLAD 中的建模方法	175
7.3	GRIN 光纤探头在 GLAD 中的参数设计方法	177
7.4	GRIN 光纤探头在 GLAD 中的传光特性仿真	181
第8章	激光测量技术	186
8.1	激光干涉仪测量技术	186
8.1.1	光纤 Michelson 干涉仪	186
8.1.2	光纤 Mach-Zehnder 干涉仪	191
8.1.3	光纤 Sagnac 干涉仪	194
8.1.4	光纤 F-P 干涉仪	197
8.2	光学相干层析技术	201
8.2.1	背景	201
8.2.2	光学相干层析技术的成像特点	202
8.2.3	光学相干层析技术的成像原理	203
8.2.4	OCT 系统主要组成部件	205
8.2.5	OCT 系统分类	209
8.2.6	OCT 系统参数	210
8.2.7	光学相干层析技术的研究及应用现状	212
	参考文献	216

第1章 激光概述

1.1 激光的概念及特点

1.1.1 激光的概念

1916年,著名物理学家爱因斯坦提出受激辐射的概念,从理论上预言了存在受激辐射光的可能性。随后,陆续有科学家进行研究。1940年,苏联物理学家法布里坎特首先注意到了负吸收现象。1947年,兰姆和雷瑟夫指出通过粒子数反转可以受激辐射,从此激光理论的研究开始突破。1952年,帕塞尔及其合作者实现了粒子数反转,观察到了负吸收现象。1957年,斯科威尔实现了固体顺磁微波激射器。1958年,汤斯和肖洛发表了著名的《红外与光学激射器》一文,向人们展示了获得激光的可能性。1960年5月,由休斯航空公司的梅曼建造出第一部可用的激光装置。至此,世界上第一台激光器宣告诞生。

激光英文为 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER),是一种因刺激产生辐射而强化的光。科学家在电管中以光或电流的能量来撞击某些晶体或原子易受激发的物质,使其原子的电子达到受激发的高能量状态,当这些电子要回复到平静的低能量状态时,原子就会射出光子,以放出多余的能量;而接着,这些被放出的光子又会撞击其他原子,激发更多的原子产生光子,引发一连串的“连锁反应”,并且都朝同一个方向前进,形成强烈而且集中朝向某个方向的光就是激光。我国第一台红宝石激光器于1961年8月建成。1964年,钱学森院士提议取名为“激光”,既反映了“受激辐射”的科学内涵,又表明它是一种很强烈的新光源,贴切、传神而又简洁,得到我国科学界的一致认同并沿用至今。

激光技术包括激光器技术与激光应用技术。自第一台激光器诞生后,激光器技术一直是激光技术的一个重要部分,至今已研制了上百种激光器。按工作物质可以将它们划分为:固体激光器、气体激光器、半导体激光器等。目前固体激光器领域较活跃的课题是二极管泵浦固体激光器,半导体激光器中激光二极管成为它的重要发展方向,气体激光器中以 CO_2 激光器的研究最成熟也发展最快。

自诞生之初至今,激光技术应用发展迅猛,已与多个学科相结合形成多个应用技术领域,比如光电技术、激光医疗与光子生物学、激光加工技术、激光检测与计量技术、激光全息技术、激光光谱分析技术、非线性光学、超快激光学、激光化学、量子光学、激光雷达、激光制导、激光分离同位素、激光可控核聚变、激光武器,等等。这些交叉技术与新的学科的出现,大大推动了传统产业和新兴产业的发展。

1.1.2 激光的特点

普通光是物质随机发出的光,通常包含多种波长,向四面八方辐射,光源发出的不同波

列之间不具有相干性。而激光是可控制的电磁波,具有一系列与普通光不同的特点,直观地观察,激光具有高定向性、高单色性或高相干性特点;用辐射光度学的术语描述,激光具有高亮度特点;用统计物理学的术语描述,激光则具有高光子简并度特点;从电磁波谱的角度来描述,激光是极强的紫外、可见或红外相干辐射,具有波长可调谐(连续变频)等特点。

激光由于产生的机理与其他光源有很大的不同,具有一系列优异特性。首先,激光的谱线宽度很窄,具有良好的单色性,或者说它的时间相干性很高,根据这一特性,激光可以用于长度基准、测量和检测,不仅方便快捷,还可以获得很高的精度。例如国际计量局就选用了 He - Ne 激光器所产生的单色波长来定义长度单位“米”。其次,激光束具有很强的方向性,激光束几乎是平行准直的,由此而及的激光测距、测速、准直导向等应用广泛开展起来。极小的发散角使得激光束具有高亮度,一个 He - Ne 激光器以 10 mW 的功率可以产生比太阳高几千倍的亮度。良好的方向性和高亮度使得激光束的能量在空间高度集中,这正是激光材料加工和激光核聚变的应用基础。最后,激光束还具有很高的空间相干性,激光全息和激光无损检测等应用都基于此。当然,在实际应用中,激光几个方面的特性不能截然分开,它们相辅相成,成为激光在各个领域应用的基础和依据。

1. 高方向性和空间相干性

光源的方向性通常采用光束的平面发散角 θ 评价,其定义如图 1 - 1 所示。光源发光面所发出光线中,两光纤直径的最大夹角,一般用 2θ 表示, θ 角越小,光源的方向性越好。

普通光源发出的光都是非定向的,向空间四面八方辐射,不能集中在确定的方向上发散到较远的地方,如图 1 - 2 所示的电灯泡发光,其发散角几乎达 360° ,照明距离过短。因此常需要连接辅助的光学系统,如采用定向聚光反射镜的探照灯,其光束的平面发散角约为 10 rad,而其发射口径为 1 mm 左右,相当于光束传输到 1 km 外,光斑直径扩至 10 m 左右。

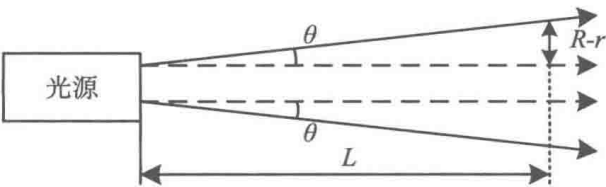


图 1 - 1 平面发散角

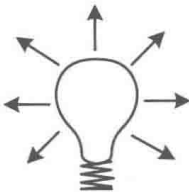


图 1 - 2 电灯泡发光

激光的高方向性是由其产生的物理过程决定的,而其所能达到的最小光束发散角受衍射效应的限制,一般情况下应不小于衍射极限角 θ_m 。在近似情况下,激光器所输出的平面发散角 θ 等于光束的衍射角,则有

$$\theta = \theta_m \approx 1.22 \frac{\lambda}{D} \tag{1 - 1}$$

式中, λ 表示波长, D 表示光束直径。

激光的发散角一般可达 mrad 量级甚至更小,即光束经过同样 1 m 的发射口径,传输至 100 km 外时光斑直径仅仅扩至几米。由于激光的高方向性,可实现远距离传输强光束的目的,因此激光在远距离通信、测距、导航等应用方面具有明显的优越性。

在实际应用中,通常是根据激光束沿光传播路径上,光束横截面内的功率或者能量在空间二维方向上的分布曲线的宽度来确定平面发散角的大小。

研究表明,光的相干特性可区分为空间相干性和时间相干性。空间相干性又可称为横向相干性,描述的是在垂直于光束传输方向的平面内,不同空间点处光波能够产生干涉的条件和干涉程度,由横向相干长度 $D_{\text{相干}}$ 来表征,其大小由光束的平面发散角 θ 决定,即

$$D_{\text{相干}} = \frac{\lambda}{\theta} \tag{1-2}$$

$D_{\text{相干}}^2$ 即为相干面积 $S_{\text{相干}}$,从相干面积内的任意两点发出的光波之间都是相干的,即

$$S_{\text{相干}} = \left(\frac{\lambda}{\theta}\right)^2 \tag{1-3}$$

由式(1-3)可知,当波长一定时,发散角越小,则方向性越好,光源的相干面积越大,空间相干性越好。

对于激光来说,激光的空间相干性由激光器的横模结构决定,只有属于同一横模模式的光子才是空间相干的。横模模式数越少,空间相干性越好,光束的发散角也越小。单横模激光器的空间相干性最好,其方向性也是最好。

2. 高单色性和时间相干性

光源的单色性描述的是光源的光谱线宽,一个光源发射的光所包含的波长范围越窄,它的颜色就越单纯,即光源的单色性越好。在图 1-3 中,曲线 $f(\nu)$ 描述了一条光谱线内光的相对强度按频率 ν 分布的情况。 $f(\nu)$ 称为光谱线的线性函数,不同的光谱线可以有不同形式的 $f(\nu)$ 。设 ν_0 为光谱线的中心频率,当 $\nu = \nu_0$ 时, $f(\nu)$ 的极大值为 $f_{\text{max}}(\nu)$ 。通常以 $f(\nu) = \frac{1}{2} f_{\text{max}}(\nu)$ 时对应的两个频率 ν_1 和 ν_2 之差的绝对值作为光谱线的频率宽度 $\Delta\nu$,简称线宽,即

$$\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1 \tag{1-4}$$

由式(1-4)可知,与频率宽度相对应,光谱线也有一定的波长宽度 $\Delta\lambda$ 。单色性量度常用比值 $\frac{\Delta\nu}{\nu}$ 或 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ 表征,其中 ν 和 λ 为辐射波的中心频率和波长, $\Delta\nu$ 和 $\Delta\lambda$ 为谱线宽度。

自然光包含多种波长的光,谱线较宽,而激光是由原子受激辐射而产生,再加上谐振腔的选模作用,因而谱线极窄。理论上,单色指光波中只含有一种波长,如图 1-4(b)所示。实际上,受温度、振动、泵浦电源的波动的影响,造成谐振腔腔长的变化和谱线频率的改变,激光的谱线达不到理想的状态,中心波长附近仍存在一定的有限谱线宽度 $\Delta\lambda$,如图 1-4(b)所示。

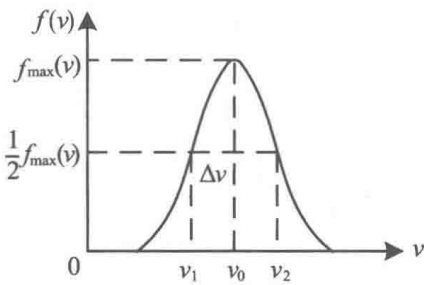


图 1-3 激光强度按频率的分布曲线

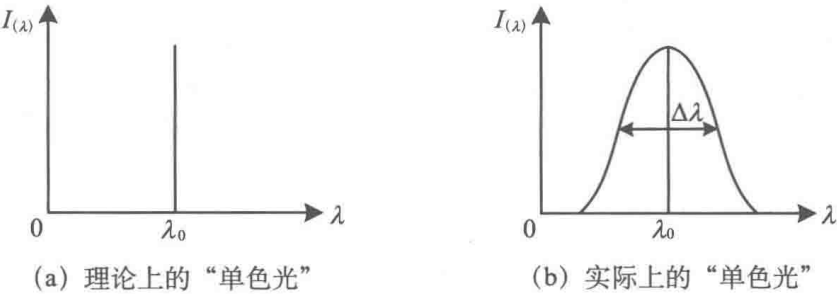


图 1-4 理论与实际的激光带宽

光源的时间相干性是描述光源上同一空间点在两个不同时刻光波场之间的相干性,通常用使两个不同时刻的光波场具有相干性的最大时间间隔度量,即相干时间 $\tau_{\text{相干}}$ 。相干时间和单色性之间存在简单关系,即

$$\tau_{\text{相干}} = \frac{1}{\Delta\nu} \quad (1-5)$$

有时用纵向相干长度 $L_{\text{相干}}$ 来表示相干性,相干长度指使光传播方向上两个不同点处的光波场具有相干性的最大空间间隔,即光源在相干时间内的最大光程,则有

$$L_{\text{相干}} = \tau_{\text{相干}} \cdot c = \frac{c}{\Delta\nu} \quad (1-6)$$

式(1-6)表明,光源单色性越高,则相干时间或相干长度越长。这种相干程度在两个光波传播到空间同一点叠加时,表现为形成干涉条纹的能力。

利用激光的高单色性,可以显著地提高各种光学干涉测量的精度和量限。在普通光源中,单色性最好的是氪同位素 $86(\text{Kr}^{86})$ 灯发出的波长 $\lambda = 605.7 \text{ nm}$ 的光谱线。在低温下,其谱线半宽度 $\Delta\lambda = 0.47 \times 10^{-6} \mu\text{m}$,单色性程度为 $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-6}$ 量级。将该光源应用于精密干涉测长时,最大量程不超过 1 m ,测量误差为 $1 \mu\text{m}$ 。而单模稳频的氦氖激光器发出的波长 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 的光谱线,其谱线半宽度 $\Delta\lambda < 10^{-12} \mu\text{m}$,输出的激光单色性可达 $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-13}$ 量级。采用该激光进行干涉测长时,量程可扩大到 1000 km ,测量误差 $10^{-2} \sim 10^{-1} \mu\text{m}$ 。

此外,激光不仅可作为标准的长度、时间和频率标准,还可对各种物理、化学、生物学等过程进行高选择性的光学激发,达到对有关过程进行深入研究和控制的目的。

3. 高亮度

光源的亮度反映了光源的明亮程度。光源的单色亮度 B_ν 定义为单位截面、单位频带宽度和单位立体角内发射的功率,即

$$B_\nu = \frac{P}{\Delta S \Delta\nu \Delta\Omega} \quad (1-7)$$

式中, P 为光功率, ΔS 为光源的面元, $\Delta\nu$ 为频带宽度, $\Delta\Omega$ 为立体角的量纲为 $\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{Hz})$ 。

普通光源如太阳光,虽然发出的总功率很高,但是由于其发散角大,光谱范围宽,能量过于分散,因而单色亮度仍很小,太阳辐射在波长 500 nm 附近的单色亮度 $B_\nu \approx 2.6 \times 10^{-12} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{Hz})$ 。激光由于具有高定向性、高单色性等特点,决定了它的单色定向亮度极高。对于激光辐射而言,一般气体激光器的单色亮度 $B_\nu \approx 10^{-2} \sim 10^2 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{Hz})$,一般固体激光器 $B_\nu \approx 10 \sim 10^3 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{Hz})$,调 Q 大功率激光器 $B_\nu \approx 10^4 \sim 10^7 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{Hz})$ 。

具有高亮度的激光经透镜聚焦后能产生数千度乃至上万度的高温,使其几乎可以加工所有材料。原子在通过激光放大器得到的高强度光的作用下,很容易激发、加热、加速,因此激光可以作为激光核聚变、等离子体物理、高能物理等领域的新的研究手段。

1.1.3 激光的应用

激光辐射具有高定向性、高单色性、高相干性、高亮度性以及可调谐等诸多特点,使得它突破了以往所有普通光源和普通光辐射的种种局限性,在现代光学应用技术中取得了革命性进展,在生产、生活、国防等各个方面都有着应用。

1. 激光在自然科学研究上的应用

(1) 非线性光学效应。

在熟悉的反射、折射、吸收等光学现象中,反射光、折射光的强度与入射光的强度成正比,这类现象称为线性光学现象。如果强度除了与入射光强度成正比外,还与入射光强度成二次方、三次方乃至更高的方次,这就属非线性光学效应。这些效应只有在入射光强度足够大时才表现出来。高功率激光器问世后,人们在激光与物质相互作用过程中观察到非线性光学现象,如频率变换、拉曼频移、自聚焦、布里渊散射等。

(2) 用激光固定原子。

气态原子、分子处在永不停息的运动中(速度接近 340 m/s),且不断与其他原子、分子碰撞,要“捕获”操纵它们十分不易。1997 年华裔科学家、美国斯坦福大学朱棣文等人,首次采用激光束将原子束冷却到极低温度,使其速度比通常作热运动时降低,达到“捕获”操纵的目的。

具体做法是,用六路两两成对的正交激光束,沿三个相互垂直的方向射向同一点,光束始终将原子推向这点,于是约 10^6 个原子形成的小区,温度在 $240\text{ }\mu\text{K}$ 以下。这样使原子的速度减至 10 m/s 量级。后来又制成抗重力的光-磁陷阱,使原子在约 1 s 内从控制区坠落后被“捕获”。此项技术在光谱学、原子钟、研究量子效应方面有着广阔的应用前景。

2. 激光测距、激光雷达、激光准直

利用激光的高亮度和极好的方向性,成功研制了激光测距仪、激光雷达和激光准直仪。

激光测距的原理与声波测距原理类似,因为光速 c 已知,只要测量从激光发射至接收到从物体反射回来的激光的时间间隔即可。

激光雷达与激光测距的工作原理相似,只是激光雷达对准的是运动目标或相对运动目标。利用激光雷达又发展了远距离导弹跟踪和激光制导技术,这些在 1991 年海湾战争中都已投入使用。激光制导导弹,头部有四个排成十字形的激光接收器(四象限探测仪)。若四个接收器收到的激光一样多,则按原来方向飞行;否则就自动调整方向。另一类激光制导是用激光束照射打击目标,经目标反射的激光被导弹上的接收器收到,引导导弹击中目标。

激光准直仪起到导向作用,例如在矿井坑道的开挖过程中为挖掘机导向。激光准直仪还被用在安装发动机主轴系统等对方向性要求很高的工作环境中。

3. 激光用在加工领域

利用激光的亮度高和方向性好的特点可以在机械加工领域大有作为。如可以在零件上打一般钻头不能打的异形孔和尺寸达微米级的小孔。利用激光进行切割,具有速度快、切面光洁、不发生形变等特点。激光焊接可焊一般焊接法不能焊的难熔金属。利用激光亮度高、能量集中、通过理论计算进行控制的特点,可对金属工件表面进行改形处理。

4. 激光信息处理

激光技术能大幅度提高信息处理能力,特别是引入激光全息技术后。全息技术是 1948 年英国科学家盖伯提出的一种新成像原理。“全息”一词引自希腊语,是“完全”的意思。但由于当时没有好的相干光源,因而无法获得好的相干像片。激光的出现,使全息术飞速发展成为一个新领域,盖伯因此获得了 1971 年诺贝尔物理学奖。

普通照相的原理是物体表面发出的光经过透镜成像落到感光底片上,底片记录下物体的光强分布,再翻印到相纸上,呈现出物体的平面图像。普通照相只记录了物体表面的光强

分布,没有记录到物体各部分到观察者的远近和角度,即没记录下物体发出光线的相位分布,这样的像没有立体感。

全息照相是以激光良好的单色性和相干性为基础,用相干光照射物体,从物体反射或漫射的光不是经透镜成像而是直接照射到全息底片上,用干涉图样把那些光的光强分布和相位记录下来。底片上并没有被拍物体的形象,在显微镜下看到的是一幅长短不一、间距不等、走向不同的复杂干涉条纹,称为全息图。用相干光按一定方式照射全息图,便可在一定方向看到物体的像,称为再现。所再现的是从物体反射或漫射的光束本身,是立体像。激光全息技术可以用于无损探伤,即不用损坏零件便可检测出零件内部的缺陷。

光刻技术,如光刻集成电路及光盘。光盘的外形有点像唱片,写入读出的原理也和机械唱片差不多,只是用激光束来代替唱针,因为激光的相干性很好,用聚光系统可以把激光聚焦成比针头还细小的光束,所以它在介质上写入信息所占空间尺寸可以非常小(小于 1 nm),而信息存储密度很大。CD、DVD 盘是用声音调制了的激光束刻制光盘,由于在读写光盘时光点与光盘无机械接触,就不存在由摩擦引起的杂音,同时也无磨损,因而光盘音质佳、寿命长。

5. 激光通信

激光通信也是利用激光束单色性好、方向性好的特点。提高传递信息容量的有效办法是提高载波的频率,如用波长 10 cm 的电波代替波长 100 m 的电波,通信容量可以提高 $1\,000$ 倍,所以从19世纪开始不断发展短波通信。最初使用波长几千米的无线电通信(长波通信),后来发展为波长几百米的中波通信,20世纪50年代又发展厘米级的微波通信,波长再缩短进入光波波段,光波的频率在 $1\,014\sim 1\,015\text{ Hz}$ 之间,厘米波的频率是 $1\,010\text{ Hz}$ 左右,所以光波通信的容量又比微波通信提高1万倍到10万倍。

普通光源发出光波是不能作通信载波的,因为普通光源发出的光单色性不好,若用这种光波作载波,相当于同时有多套频率的节目到达接收器。激光提供了单色性很好的光波,光波通信才进入实用化阶段。

利用光波作载波的通信方法与微波通信类似,激光器输出的光束经过光电调制器调制后送到发射天线(一只光学反射镜)发射出去。在用户接收端,接收天线(也就是反射镜)把传送过来的光信号汇集到光电接收器上转换为电信号,再经放大和解调得到所传递的信息。在实际应用中为避免光波在大气传播中损失,光信号在光纤内传递,其损耗很小。

现在发展的光计算机是用光波束代替电流构造计算机,会获得更高的运算速率和容量。在显示技术上,激光液晶大屏幕将代替阴极射线管,有望成为21世纪电视的主角。

6. 激光的生物应用

生物育种上可以采用“诱发育种”方法培育良种。诱发育种有化学诱变、核辐射诱变、光诱变等。激光照射属光诱变。生物组织吸收激光能量后,将会使生物体发生光-生物热效应、生物光压效应、生物光化学效应、生物电磁效应和生物刺激效应,由此引起生物遗传异变。我国已用激光照射种子培育新品种,不断改善品质。

7. 激光用于医学领域

利用高亮度激光束产生的热效应以及单色性好的激光束产生的生物效应可以治疗疾病。现在激光技术作为医学中的新技术,已形成一个新的医学分支——激光医学。主要应用有:

(1) 激光刀。

激光刀是通过光学系统聚焦激光束,将其作用于生物体组织,在短时间内使之烧灼和气化。当光束以一定速度移动时,能把组织切开,起到手术刀的作用。激光的能量把组织中的血管、淋巴管烧结封闭起来,减少出血量,在做肿瘤手术时也可防止肿瘤扩散。利用激光脉冲时间短(小于 $1\mu\text{s}$)、激光束很细,可以进行精细的眼科手术,病人的眼睛还来不及转动,“刀”已经下去了。激光刀与手术部位是非接触性的,因而是自身消毒手术。

(2) 激光纤维内窥镜。

借助于光纤,可以提高管腔内选择治疗效果。用光纤把激光引入人体内部施行手术,避免一些剖腹大手术。将激光内窥镜插入血管,用激光蒸发动脉粥样硬化斑块,焊接血管;用激光在生物体内产生冲击波可粉碎肾结石、输尿管结石等。

(3) 低功率激光的应用。

弱激光(功率 1W)对生物组织有刺激、镇痛、消炎、扩张血管等作用,用弱激光照射病灶,有治疗效果。利用弱激光照射穴位,可产生类似针灸的效果。低强度 He-Ne 激光血管内照射可治疗脑梗塞、颈椎病、冠心病等缺血性疾病。

(4) 基础医学研究和疾病的检测诊断。

可以利用相应的激光仪器,研究细胞、亚细胞和大分子的结构以及一些特殊细胞的生物学过程,例如可以借助于激光微束仪,把激光束聚焦到 $0.5\sim 1.0\mu\text{m}$,用以切割和焊接细胞,研究生物的遗传规律。

激光诊断目前主要是应用激光的光谱技术、干涉技术等,通过对血液、尿液和人体其他组织成分的测定,无损地鉴别待测组织是否发生病变。

8. 激光与能源

激光与能源密切相关的应用是激光分离同位素和激光核聚变。

如用 ^{235}U 作核燃料需要对铀同位素进行分离,于是有利用铀核质量不相同的气体扩散法和离心分离法等,但是 ^{235}U 与 ^{238}U 在大小和重量上相差很小而分离困难。激光出现后,利用激光的单色性,使 ^{235}U 选择性电离(原子分离法)或选择性离解(分子分离法),达到分离目的。利用激光还可对其他同位素进行分离。

1.2 激光检测技术的发展动态

激光的产生机理与其他光源不同,使得激光具有一系列优异特性,在汽车、电子、钢铁、石化、航空航天、机械制造、军事以及文化教育等部门及科研院所中的运用越来越广泛,并发挥重要作用。目前,激光以及其相互产业已经进入快速发展期,形成其高技术产业群。世界各国都将激光技术的研究及发展列入国家计划。

激光科学技术是我国科学技术发展规划中的重点项目,在国家“863 计划”中占有重要的地位。虽然激光器的发明只有短短的 50 多年,但激光技术在航空航天、海洋勘探、材料加工、精密测量、全息技术、信息处理、军事、通信、医疗、农作物育种及娱乐等各方面的应用所取得的非凡成就令人瞩目;在同位素分离、催化处理等方面的应用已经获得了显著的成果并显示出广阔的发展前景;以激光引发聚变是探索实现受热核反应的重要途径之一,激光技术的应用有力地促进了各个方面的发展。

在激光应用技术当中,激光测量作为众多应用的一个分支,由于其自身的优势(高单色性、高方向性、相干性好),已经成为测量技术方面不可或缺的工具,逐步深入信息处理、通信、生物、医疗、制造业等各个领域而形成大规模产业。激光检测技术应用十分广泛,如激光干涉测长、激光测距、激光测振、激光测速、激光散斑测量、激光准直、激光全息、激光扫描、激光跟踪、激光光谱分析、激光外差干涉等。在这样的应用需求下,激光测量技术近年取得了高速的发展,出现了适应不同场合、不同任务要求的激光测量技术、测量体制,开发的产品型号多达数百种。与此同时,随着光电子技术、工艺水平的不断提高,新型激光发射、探测器件的不断涌现,激光测量技术也得到不断的改进和完善。

在光电检测领域,利用光的干涉、衍射和散射进行检测已经有很长的历史。由泰曼干涉仪到莫尔条纹,然后到散斑,再到全息干涉,出现了一个个干涉场,一些物理量(如位移、温度、压力、速度、折射率等)不再需要单独测量,而是整个物理量场一起进行测量。自从激光出现以后,电子学领域引入许多探测方法,如外差、相关、取样平均、光子计数等,使测量灵敏度和测量精度得到大大提高。由于光纤能控制光束的传播路径,光纤技术的出现使光调整方法增多,接收更为方便,同时它能进入物体内部,扩大了测量范围,提高了测量精度,甚至可以事先铺设在各种建筑物内部,进行实时检测和自动控制等。光纤激光器具有非常高的电光转化效率,其光束质量无与伦比,在光学检测领域发挥着重要作用。

在激光技术发展过程中,利用 CCD 图像处理技术,可以提高测量信噪比,扩大测量范围,目前其正全面改造着传统的光学测量方法;因其高分辨率,可以直接用于物体外部尺寸、轮廓以及位移和有关物理量的测量。由于图像具有非常高的信息量,特别是彩色 CCD,在遥感技术和光纤传感技术中也得到普遍应用。利用光与物质的相互作用,如激光致超声、激光热效应等新的探测方法,在无损检测中也得到广泛应用。随着科学技术的日新月异,新的检测方法还会不断出现。

激光检测技术属于非接触式测量技术,与接触式测量方法相比,具有限制更少、效率更高、不损伤测量表面、不易受被测对象表面状态影响等优点。因此高精度的激光检测技术越来越广泛地应用到精密、超精密加工中。超精密加工技术,其精度从微米级到亚微米级、纳米级,在高技术领域和军用工业以及民用医疗工业中都有大量需求。就国防工业而言,如人造卫星用的姿态轴承和遥测部件、飞机发动机转子叶片、导弹惯性仪表、激光陀螺仪的平面反射镜、红外制导的导弹反射镜等,其表面粗糙度均要求微纳米级,需要高精度的激光检测技术。目前,利用激光检测关键技术(激光干涉测量技术、激光共焦测量技术、激光三角测量技术)实现的激光干涉仪、激光位移传感器等,可以完成纳米级非接触测量。可以说,超精密加工技术将随着高精密激光检测技术的发展而发展。

第2章 激光器的基本构成与工作原理

2.1 黑体辐射的普朗克公式

由普通物理学中可知,处于某一温度下的物体能够发射和吸收电磁波。如果某一物体能完全吸收任何波长的电磁辐射,则称该物体为绝对黑体。如图2-1所示的空腔可视为比较理想的绝对黑体,因为从外界射入小孔的任何光线都将在腔内多次反射后很难逸出腔外。物体除吸收电磁辐射外还能发出电磁辐射,这种电磁辐射称为热辐射或温度辐射。太阳、电灯等普通光源均为这一类热辐射光源。

在一定温度下,当黑体内部的辐射和吸收达到热平衡,即空腔内辐射能量等于黑体吸收能量时,空腔内存在完全确定的辐射场。这种辐射场称为黑体辐射或空腔辐射。黑体辐射是黑体温度 T 和辐射频率 ν 的函数,可用单色能量密度 ρ_ν 来描述。 ρ_ν 定义为单位体积内处于 ν 附近的单位频率间隔中的电磁辐射能量,其量纲为 $(\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s})$ 。应当指出,黑体辐射与构成腔体的材料及腔体结构无关。

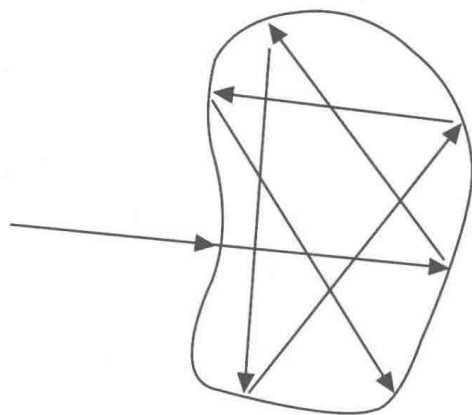


图2-1 绝对黑体

在实际测得黑体辐射后,人们试图从理论上得出其函数表达式来解释黑体辐射的规律。一些基于经典物理学的种种努力因不能完全解释黑体辐射现象

的实验事实而归于失败。1900年,普朗克开创性地提出了光量子的概念后,把黑体辐射看作由带电谐振子组成,并假定这些谐振子的能量取值只能为谐振子最小能量 $\epsilon_0 = h\nu$ 的整数倍, h 为普朗克常数, ν 为谐振子振荡频率,并在此基础上成功地得到了与黑体辐射实验相符的普朗克公式。如果设想黑体辐射由无数个谐振子组成,这些谐振子各自发射一种单色平面电磁波,全部振子就形成频率连续分布的黑体辐射。振子每一种振动状态对应于辐射场内一种场分布,即一个模式。普朗克公式可描述为:在温度 T 的热平衡条件下,黑体辐射分配到空腔内每个模式上的平均能量为

$$E = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (2-1)$$

可以证明,黑体空腔内单位体积、频率在 $\nu \sim \nu + \Delta\nu$ 间隔的光波模式数 n_ν 为

$$n_\nu = \frac{P}{Vd\nu} = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \quad (2-2)$$

于是,黑体辐射的普朗克公式为

$$p_{\nu} = n_{\nu} E = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} - \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (2-3)$$

式中, K 为玻尔兹曼常数, h 为普朗克常数, ν 为谐振子振荡频率, T 为热平衡时的绝对温度, c 为光速。

2.2 光与物质相互作用的三个过程

在一个原子体系中,总有些原子处于高能级,有些处于低能级。而自发辐射产生的光子既可以去刺激高能级的原子使它产生受激辐射,也可能被低能级的原子吸收而造成受激吸收。因此,在光和原子体系的相互作用中,自发辐射、受激辐射和受激吸收总是同时存在的。

2.2.1 自发辐射

被激发到高能级 E_2 上的粒子是不稳定的。如存在着可以接纳粒子的较低能级 E_1 ,即使没有外界作用,粒子也有一定的概率自发地从高能级 E_2 向低能级 E_1 跃迁,同时辐射出一个能量为 $h\nu = E_2 - E_1$ 的光子,光子频率 $\nu = \frac{(E_2 - E_1)}{h}$ 。这个过程是在没有外界作用的情况下完全自发地进行的,所以称为自发辐射跃迁,如图 2-2 所示。

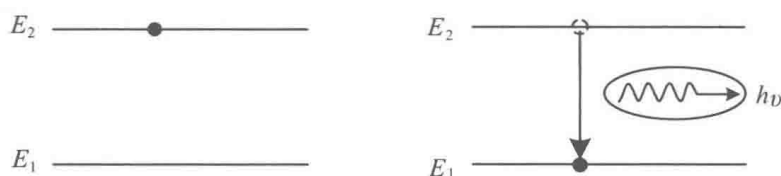


图 2-2 自发辐射示意图

其中,粒子自发辐射跃迁的随机过程用概率 A_{21} 描述,表示每一个处于 E_2 能级的粒子在单位时间内向 E_1 能级跃迁的几率,物理描述为

$$A_{21} = \left(\frac{dn_{21}}{dt} \right)_{sp} \frac{1}{n_2} \quad (2-4)$$

式中, n_2 表示 t 时刻处于能级 E_2 上的粒子数, $\left(\frac{dn_{21}}{dt} \right)_{sp}$ 表示单位时间内从高能级自发跃迁到低能级的粒子数。 A_{21} 又称为自发辐射跃迁爱因斯坦系数。因此,单位时间内能级 E_2 所减少的粒子数为

$$\frac{dn_2}{dt} = - \left(\frac{dn_{21}}{dt} \right) = -A_{21} n_2 \quad (2-5)$$

粒子在某一能级的平均寿命 τ_s ,表示该粒子停留在能级的平均时间,等于粒子数密度由起始值降到其 $\frac{1}{e}$ 所用的时间,由式(2-2)可得

$$n_2(t) = n_{20} e^{-A_{21}t} = n_{20} e^{-\frac{t}{\tau_s}} \quad (2-6)$$

即

$$A_{21} = \frac{1}{\tau_s} \quad (2-7)$$

式中, n_{20} 为起始时刻 $t=0$ 时 E_2 能级的粒子数密度。由式(2-7)可知, A_{21} 只与粒子本身性