

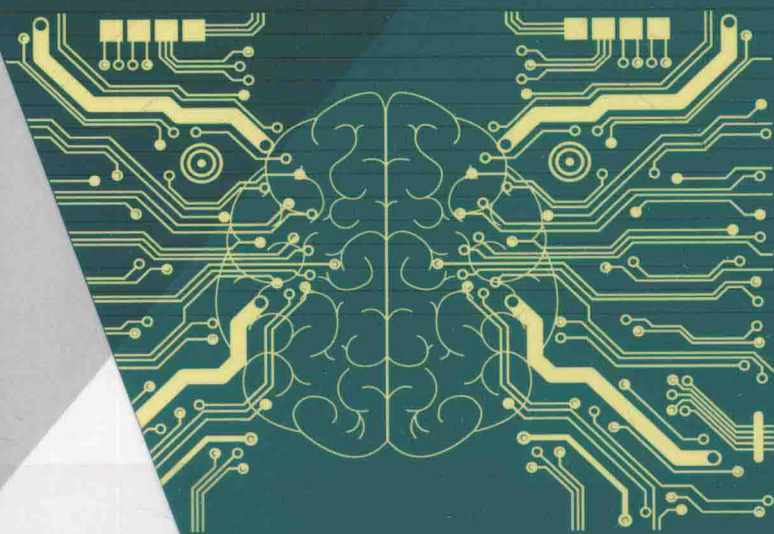


工业和信息化部“十二五”规划专著
21世纪高等学校规划教材

固体中的 激光超声

沈中华 袁玲 张宏超 倪辰荫 著

*L*aser Ultrasound
in Solids



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



工业和信息化部“十二五”规划专著
21世纪高等学校规划教材

固体中的 激光超声

●—— 沈中华 袁玲 张宏超 倪辰荫 著

*L*aser Ultrasound
in Solids

人民邮电出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

固体中的激光超声 / 沈中华等著. — 北京: 人民邮电出版社, 2015. 12
21世纪高等学校规划教材
ISBN 978-7-115-41203-4

I. ①固… II. ①沈… III. ①激光检测—高等学校—教材②超声检测—高等学校—教材 IV. ①TN247②TB553

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第292664号

内 容 提 要

本书对固体中的激光超声进行了较全面的论述和归纳总结。全书共分6章,系统地论述了激光激发超声的机理、特点,研究激光超声的有关理论模型和计算方法,探测超声的多种光学技术原理及特点,激光超声在材料性质检测、缺陷检测、在线过程监测等领域的相关应用研究及其最新进展。

本书可供高等院校物理学、光学工程、无损检测等相关专业的高年级本科生、研究生和教师使用,也可供从事相关研究的科研人员参考使用。

-
- ◆ 著 沈中华 袁玲 张宏超 倪辰荫
责任编辑 张孟玮
责任印制 沈蓉 彭志环
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京昌平百善印刷厂印刷
- ◆ 开本: 787×1092 1/16 彩插: 2
印张: 9.5 2015年12月第1版
字数: 233千字 2015年12月北京第1次印刷
-

定价: 39.80元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

前言 Forward

自 20 世纪 60 年代世界上第一台红宝石激光器发明以来,激光已在信息、医学、工业和军事技术各个部门得到了广泛应用。激光可以连续或脉冲发射,波长覆盖紫外到红外,这种高亮度的定向光束以其发散角小、单色性好等特点在包括光谱学、度量学、探伤检测、通信、核聚变研究、武器系统和外科医学等多个科学技术领域得到应用。当然,在不同的应用场合可能利用激光的不同特性,如激光加工利用的是激光的高亮度和能够精确聚焦的特性,而干涉测量则利用了激光光束良好的相干性。

毫无疑问,激光的发现首先对光学技术产生了巨大的影响,同时对其他领域也产生了愈来愈重要的贡献。比如,现在已经是一门应用广泛且为成熟技术的超声学。超声探测已经成为对工程材料和结构进行无损检测的常规方法,利用超声进行诊断也成为医学上的常规方法。传统的超声一般是利用压电传感器激发,是接触式激发,需要耦合剂,很多时候耦合剂的存在会对超声的产生和接收产生影响,在高温和一些较苛刻的环境下,甚至无法正常使用。一方面正是为了克服传统超声技术的这些缺点,另一方面,激光的多种优异特性和激光技术的发展,促使激光技术与超声学相结合,诞生了激光超声学。

脉冲激光或调制激光辐照固体、液体或气体,由于热弹效应或腐蚀效应产生的超声波称为激光超声。激光超声的研究涉及激光激发超声的机理、方法和技术,超声在媒质中的传播特性,超声的光学接收原理、技术以及激光超声的应用原理和方法等内容,涉及光学、声学、电学、材料学等诸多交叉学科和技术。固体中的激光超声由于具有非接触、无需耦合剂、多模式同时激发、高频宽带等特点,成为近年来无损检测领域的一个发展新方向。

本书的目的是对固体中的激光超声进行相对系统和具体的理论阐述、实验总结以及研究进展介绍。第 1 章简要地介绍了本书的两个主题:超声和激光以及两者结合的激光超声;第 2 章介绍了固体中传播的超声波的基础理论知识;第 3 章则系统地阐述了激光激发超声的机理、激光超声源的方向性和激发方式等;第 4 章归纳和总结了激光激发超声及其传播的理论研究方法、数值模拟方法和结果;第 5 章则重点介绍超声的光学探测方法和技术及其特点;第 6 章对激光超声在材料性质、缺陷检测、过程监测等领域的应用研究中涉及的原理、方法及研究进展情况进行了较为全面的归纳和总结。

本书所涉及的研究工作长期以来得到了国家自然科学基金委员会的支持，先后获得了 6 项国家自然科学基金青年和面上项目（60208004, 60778006, 60878063, 11274175, 61405093, 61108013）的资助。本书的有关学术思想与作者在南京大学声学研究所、德国海德堡大学的学习工作经历是分不开的，作者对张淑仪院士、章肖融教授、Peter Hess 教授多年来的指导和学术影响表示诚挚的谢意。本书的很多研究工作是作者和同事们共同完成的，他们是本书的共同作者袁玲博士、倪辰荫博士，还有许伯强博士、王纪俊博士、关建飞博士、赵艳博士、石一飞博士、董利明博士、李加博士等，在此对他们一并表示感谢。书中所涉及的研究工作还得益于与法国维多利大学 Vitali Goussev 教授和俄罗斯科学院通用物理研究所 Alexey Lomonosov 博士的长期合作研究和建设性的讨论。本书的出版工作得到南京理工大学研究生院、教务处、理学院的大力支持，借此向所有关心和支持作者工作的同事们表示衷心的感谢。

本书中的内容既有我们十多年来的相关研究成果，也参考了国内外相关研究小组的成果。作者尽可能地参考和引用了国内外相关小组的最新研究成果，鉴于作者水平有限，疏漏之处在所难免，书中在内容和文字方面也难免存在不妥之处，欢迎广大读者不吝指正。

沈中华
2015 年 8 月

目 录 Content

第 1 章 激光超声概述	1
1.1 超声	1
1.1.1 超声的压电激发和接收	2
1.1.2 压电换能器的缺点	2
1.1.3 非接触式换能器	3
1.2 激光	4
1.2.1 激光基本原理	4
1.2.2 激光的特性和参数	5
1.2.3 超声中常用激光光源	7
1.3 激光超声	9
第 2 章 固体中的超声波	11
2.1 无界固体中的超声体波	11
2.2 有界固体中的超声导波	12
2.2.1 声表面波	13
2.2.2 板中的导波	15
参考文献	23
第 3 章 超声的激光激发	24
3.1 激光的吸收	24
3.2 激光辐照下的温度场分布	26
3.2.1 金属中的温度场	26
3.2.2 非金属中的温度场	28
3.3 激光辐照下的力源	29
3.3.1 热弹应力	29
3.3.2 其他效应	33
3.4 激光辐照下的超声场及其方向性	35
3.4.1 热弹性机制下超声场及其方向性	35
3.4.2 融蚀机制下的超声场及其方向性	40
3.5 超声的激光激发方式	45
3.5.1 时空调制的激光阵列源	45
3.5.2 表面约束	48
参考文献	51

第 4 章 激光超声理论及模拟方法..... 53

4.1 激光激发超声及其传播理论	53
4.1.1 线性热弹性方程	53
4.1.2 均匀各向同性固体中激光激发超声波的物理模型	55
4.2 有限元法	57
4.2.1 热弹耦合问题的有限元方程	57
4.2.2 热弹性有限元方程的求解	61
4.2.3 均匀各向同性固体中的激光超声波	64
4.2.4 涂层(薄膜)/基底系统中的激光声表面波	66
4.3 双积分变换法	68
4.4 传递矩阵法	71
4.4.1 激光辐照均匀各向同性多层平板的控制方程	71
4.4.2 层状板中的传递关系	73
4.4.3 无限半空间上多层板结构中的传递关系	74
4.4.4 瞬态响应	74
4.4.5 多层平板中的激光超声波	74
4.5 正交模态展开法	76
4.5.1 正交各向同性薄板中激光激发的 Lamb 波	77
4.5.2 改进的正交模态展开法	78
参考文献	82

第 5 章 超声的光学探测技术..... 84

5.1 强度调制技术	84
5.1.1 泵浦—探针技术	85
5.1.2 光偏转技术	86
5.2 相位/频率调制技术	89
5.2.1 参考光干涉测试技术	90
5.2.2 自参考干涉技术	95
参考文献	100

第 6 章 激光超声的应用..... 102

6.1 厚度测量	103
6.2 力学性质表征	104
6.2.1 体材料弹性常数测量	104
6.2.2 薄膜力学性质表征	109
6.3 晶粒尺寸的激光超声检测	114
6.4 相变过程的激光超声监测	116
6.5 缺陷的激光超声检测	118

6.5.1 脉冲回波法与投捕法·····	118
6.5.2 时间飞行散射法·····	119
6.5.3 扫描激光源法·····	126
6.5.4 光热调制辅助的激光超声法·····	129
6.5.5 非线性混频激光超声方法·····	136
参考文献·····	138
结束语 ·····	142
参考文献·····	143

第1章

激光超声概述

当液体、固体或气体受到强的激光束（脉冲的或连续调制的）照射时会产生激波和声波。激光激发的超声波有伴随激光激发激波而后产生的超声波，也有没有伴随激波直接由激光激发的超声波两种。不管属于哪一种，凡遇激光导致的超声均叫作激光超声。研究激光激发超声的机理、方法和技术，激光超声在媒质中的传播特性，激光超声的接收原理、方法以及激光超声检测技术的应用等的学科称为激光超声学，是涉及光学、声学、电学、材料科学、生物学、医学等多学科交叉的学科和技术，有着非常诱人的科学和应用的前景。限于篇幅，本书中涉及的主要是固体中的激光超声技术及其在无损伤检测中的应用。本章我们先简要地回顾一下有关超声和激光方面的知识，然后再介绍激光超声的特点。

1.1

超声

声波是一种机械波，由物体（声源）振动产生，能量能够以声波的形式在固体、液体和气体中传播。流体中声波的传播一般只有纵波一种模式，其质点位移方向与传播方向平行，也被称为压缩波。而在弹性固体中，包括绝大部分的金属中，声波的传播情况就要复杂得多。除了纵波外，还有水平剪切和垂直剪切两种横波模式，其位移方向与传播方向垂直，这些不同模式的波的传播速度是不同的。在各向同性固体中，两种模式的横波的传播速度一样。

声波的频谱范围是相当广的。可听声的范围大概为 $20\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ ，当然这个频率界限是粗略的，依赖于个体的年龄等因素。低于 20Hz 的是次声波，地震波的大部分能量为次声。超声是指频率高于 20kHz 的声波。自然界中超声是广泛存在的，人们听到的声音，只是实际声音的一部分，即可听声部分，而实际声音还带有超声成分，只是人们听不到。例如，日常生活中两个金属片的相撞，管道上小孔的漏气，其中都有超声成分。需要说明的是，本书涉及的超声频率上限为 GHz 量级，因为这是可以用经典力学处理的范围。频率高于 GHz 以上的为晶格振动，即声子，一般固体中的声子频率可以达到 10^{13}Hz 。目前工业超声检测中常用的频率范围是 $50\text{kHz} \sim 20\text{MHz}$ ，当然也有高达 100MHz 的，声显微镜中超声频率甚至高达 $200\text{MHz} \sim 2\text{GHz}$ 。

超声波的应用可分为功率超声和检测超声两大领域。功率超声是利用超声振动形式的能量使物质的一些物理、化学和生物特性或状态发生改变，或者使这种改变的过程加快的一门技术，是利用超声能量来对物质进行处理、加工。最常见的频率范围从几千赫到几十千赫，而功率由几瓦到几万瓦。功率超声应用主要有超声清洗、超声加工、超声塑料、金属焊接和超声金属成型等。超声检测技术是利用超声来进行各种检验和测量的技术。广义地讲，超声检测包括超声工业检测和超声医学检测。超声医学是研究超声波与生物组织（主要指人体组织）的相互作用机理、规律及其应用的学科。本书涉及的是固体中的超声波，对应于工业中的超声检测。这类

检测大致可分为两类,一类是利用超声进行介质和部件内部缺陷的探测,通常称为超声无损探测。声波在物理介质(如被检测材料或结构)中传播时,通过被检测材料或结构内部存在的缺陷处,声波会改变原来的传播规律,如产生折射、反射、散射或剧烈衰减等,通过分析这些规律的变化,就可以建立缺陷(被检测物理量)与声波的幅度、相位、频率特性、声速、传播时间、衰减特性等之间的相关关系,因而可定量地检测出材料中的缺陷,如气孔、裂缝、夹杂等。另一类是利用待测的与介质特性有关的非声学量与某些描述介质声学特性的超声量之间存在的关系,通过测定这些超声量来分析介质的特性,如可通过测量超声量来得到材料的杨氏模量和泊松比等。

1.1.1 超声的压电激发和接收

产生和接收超声的方法有很多种。因为超声是一种机械波,为了产生这种波,需要在激发源处激发机械振动,自然想到可以利用单纯的机械方式,如历史上最早靠手摇齿轮来打击的方法,只能勉强产生很低频率的微弱超声,随后又产生了利用高速流体喷注来激发流体的机械振荡的方法。不过,利用这种方法难以产生近兆赫的超声。随着压电效应被发现,加上电子学的发展,利用压电换能器产生超声已成为最常用的方式。压电换能器是一种可逆超声换能器,它在发射和接收中都占有独特的地位。压电换能器原理是利用某些晶体具有压电性,即当这些晶体沿一定方向受到应力或压力作用时,会在表面产生一定数量的电荷,从而形成电势差。反之,如果在其表面施加电势差,那么就可以在材料中产生应力和(或)应变。压电材料正是以这两种方式分别被做成超声的接收和产生器件。超声换能器常用的一些压电材料包括压电单晶体以及多晶的压电陶瓷。石英单晶是最熟知的压电单晶之一,铌酸锂单晶则可算是较新压电单晶的代表。多晶的压电陶瓷的压电性能可以很强,比起单晶来,生产和机械加工又方便,因此目前被大量使用,如锆钛酸铅(PZT)就是其代表。而一些高分子材料同样会呈现出一定的压电效应,如聚偏二氯乙烯(PVDF),可以把其制成较薄的膜用来接收超声信号。

要把换能器发出的超声传输(或耦合)到样品中必须要借助于一定的介质,即耦合剂,反之亦然,因此这是一种接触式的激发和探测方式。如果超声测试是浸在水中或其他液体中进行,那么这些流体本身就是耦合剂,因此这是非常方便的。事实上,除非在非常高频的情况下,水由于对超声的吸收很小,是超声传播的一种非常好的液体。对于固体中的超声测试来说一般可以有两种选择,一种是所谓的“干接触”,即在换能器和样品之间涂上一层薄薄的液体、油或油脂作为耦合剂,另外一种样品直接浸没在耦合液体箱中,即水浸法等浸没式检测。

1.1.2 压电换能器的缺点

压电换能器是一种接触式换能器,而接触式超声换能器的最大问题来源于耦合剂。耦合层的存在会对超声的灵敏度和带宽带来很大的不确定性。一种极端的情况是某些接触地方由于没有耦合剂而使得耦合效率很低,而另一个极端是耦合层太厚而导致超声波在耦合层和(或)形成共振损失很多能量。另外,换能器在流体耦合剂加载和固体加载情况下的性能差别很大。特别是当换能器需要在表面以任意速度扫描时,所有这些不确定性问题会更突出,尤其是样品表面是粗糙的情况下。要保证良好的耦合就要严格限制扫描的速度。因此,在实际情况允许的条件下,可以通过浸没法来改善上述耦合问题和灵敏度变化问题。但是,接触式换能器加载在样品表面上总是会影响到超声的传播。接触式超声换能器的另外一个缺点是很难在足够宽的温度范围内适用,在500℃以上很难找到合适的液体耦合剂。而且,很多耦合剂会对研究的样品表

面产生影响。比如有时因为水会带来腐蚀而无法用水作为耦合剂使用,一些商用的耦合剂中含有的微量氯化物和硝酸盐对样品表面的化学接触对某些样品来说也是不允许的,对一些特殊的材料来说,因为有可能存在的降解而不允许任何液体接触样品表面。

压电换能器的带宽比较窄,这在很多需要带宽比较宽的应用中也是不利因素。另外,大部分压电换能器的尺寸比较大,在一些空间分辨率要求比较高的场合就很难满足要求。尽管采用聚焦或者综合孔径技术能够提高分辨率,但也很难将分辨率提高到毫米以上并保证足够的效率。换能器的尺寸也会使其在一些受限制的孔径区域很难使用,包括一些非常小的样品上。同时,换能器的直径直接决定了近场区域的大小,在接触模式下,样品表面下的这部分相应的区域就会形成探测盲区。

1.1.3 非接触式换能器

由于接触式换能器中液态耦合剂的存在带来的一系列问题,因此人们一直孜孜以求非接触式的方法来产生和接收超声。空气耦合式超声波换能器主要是从传统的压电陶瓷超声换能器出发,通过增加耦合层的方法,制作适应以空气做介质的换能器。采用低特性声阻抗、低衰减率、具有足够机械 Q 值的耦合材料,比如聚醚砜(Polyethesulfone)和尼龙(Nylon)等,将其加工成厚度合适的薄膜耦合层,并将其应用到压电陶瓷制作的超声波换能器上。目前在商品化产品中占大多数的空气耦合声换能器是1-3连接结构的压电陶瓷复合晶片换能器结构,这种结构能减小传感器材料阻抗,具有更高的效率和更好的耦合性能。但是,由于空气与金属材料往返透射率极小(10^{-5}),因此无法使用传统接触式超声常用的脉冲反射法检测,发射探头和接收探头必须为专用探头。另外,超声波在空气中衰减剧烈,目前主要在上限为1MHz的低频率领域使用。当然,从另一个方面讲,可以使用空气耦合式低频超声波检测传统超声波检测困难的材料,如软质材料、高衰减材料等不能用耦合剂和水等做介质的材料,所以也可以说空气耦合超声波是对传统超声波(指一般的接触式检测或水浸检测方法)不能检测领域的补充。

另一种常见的非接触式传感器是电磁声换能器(Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT),洛仑兹力式 EMAT 的基本原理是通有高频电流的线圈放置在金属物体附近,金属物体表层产生感生电流,若在同一时间施加一强磁场,与涡流相互作用后产生交变洛仑兹力。金属原子在交变洛仑兹力的作用下产生往复振动,当振动以一定方式传播出去就可以产生超声波。该过程的逆效应过程就是利用 EMAT 接收超声的原理。铁磁材料中 EMAT 产生超声的耦合机理还有磁致伸缩力和磁化力等。通过改变外加偏转磁场的大小和方向、高频电流的大小和频率、线圈的形状和尺寸可以控制 EMAT 产生超声的类型、强弱、频率及传播方向等参数。EMAT 可以克服接触式换能器中耦合剂所带来的一系列问题,可以做到非接触,具有不需要耦合介质、可应用于自动、高速检测、高温状态检测等特点。但 EMAT 也有其局限性。首先 EMAT 的工作原理决定了它只能用于导电样品或者样品具有导电表面层。其次,EMAT 也有共振和带宽的问题,其灵敏度要比压电系统低得多。电磁声换能器中感应线圈的阻抗随着频率的增大而增大,因此要得到几 MHz 以上的高频换能器相对比较困难。另外,与接触式换能器一样,EMAT 换能器由于尺寸限制,其空间分辨率要做到毫米及以下量级比较困难,而且很难在一些空间受限的结构中使用。

光学方法是另一种非接触式的超声激发和探测方法。虽然在超声场的探测和可视方面,条纹照相技术先于激光在超声学中得到应用,但是激光的出现却使超声的激发、探测技术和应用

得到了全新的发展。正如我们在本章 1.3 节中所列的那样,激光激发和探测超声可以克服上面所述的绝大部分缺点,因此,虽然要比传统的换能器代价昂贵且使用复杂,激光超声的研究还是受到越来越多的重视,某些应用研究已经逐渐开始从实验室走向工业应用,比如航空工业中的聚合物基复合材料检测、钢管厚度在线检测等。

1.2

激光

1.2.1 激光基本原理

物质是由原子、分子、离子等大量粒子组成,按照量子力学揭示的规律,这些粒子存在着一些不同的分立的能量状态结构,称之为能级。粒子在一定的物理条件下处于某个特殊的能级,如果粒子从一个高能级 E_2 跃迁到一个低能级 E_1 ,它就会释放对应于这两个能级的能量差值 $\Delta E = E_2 - E_1$,该能量差如果以发光的方式放出,那么就将产生光发射。这种光发射为自发辐射,发射出的光子能量为

$$h\nu = \Delta E = E_2 - E_1 \quad (1.1)$$

粒子系统在常温下处于热力学平衡态时,它们的能量分布在宏观上满足玻尔兹曼分布。假设某粒子系统中处于高能级的粒子数为 N_2 、低能级的粒子数为 N_1 ,那么

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-(E_2 - E_1)/kT} = e^{-h\nu/kT} \quad (1.2)$$

可见,在常温粒子体系,大量的粒子处于低能态。在受到光辐射时,粒子也可能选择吸收光辐射中的适合的光子 $h\nu = E_2 - E_1$,从低能态 E_1 跃迁到高能态 E_2 。

1917 年,爱因斯坦在研究黑体辐射时,发现存在第三种跃迁:处在高能态 E_2 的粒子发生自发辐射之前,受到外来的,能量为 $h\nu = \Delta E = E_2 - E_1$ 的光子的刺激作用,高能态 E_2 跃到低能态 E_1 ,同时发出一个和激发光子同频率、同相位、同偏振态的光子 $h\nu = E_2 - E_1$,这种光发射称为受激辐射。而自发辐射和受激辐射的概率之比为

$$R = e^{h\nu/kT} - 1 \quad (1.3)$$

在室温下,对波长为 600nm 的光,这个概率之比 $R \approx 10^{35}$ 。可见,在室温下可见光范围内,受激辐射几乎可以忽略。所以一般光源的发光都是自发辐射。

为了使受激辐射取得主导地位,必须使高能级的粒子数超过低能级的粒子数,这就要颠倒热平衡系统中由式 (1.2) 给出的粒子分布,即要实现 $N_2 > N_1$,这可以在非平衡系统中实现,该条件通常简记为粒子数反转。要实现粒子数反转,第一,必须选取适当的工作物质,这些物质必须具有亚稳态能级结构;第二,必须要有外来激励能量,为实现粒子数反转分布提供所需能源。

产生激光除了要实现粒子数反转以外,还有一个重要条件是要建立一个谐振腔,使受激辐射产生的光子在粒子数反转的工作物质中传播时,不断得到光放大。

因此,由形成激光的技术条件分析,激光器的基本结构由工作物质、泵浦源和光学谐振腔三部分构成。任何激光器件可以有设计的不同,但都必须有以上三大部件。激光器基本结构如图 1.1 所示。

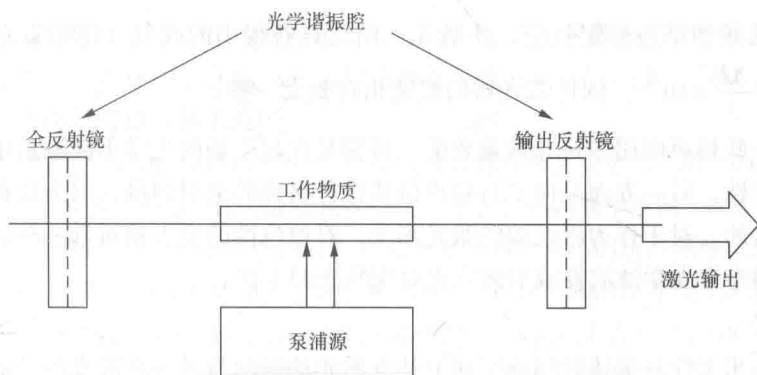


图 1.1 激光器基本结构示意图

1. 激光工作物质

激光工作物质是激光器的核心，是激光器产生光的受激辐射放大作用的源泉。它是一种可以用来实现粒子数反转和产生光的受激发射作用的物质体系。它接受来自泵浦源的能量，对外发射光波并保持能够强烈发光的活跃状态，因此也称其为工作介质。

2. 泵浦源

泵浦源为在工作物质中实现粒子数反转分布提供所需能源。工作物质的类型不同，采用的泵浦方式也不同。提供泵浦源可以是光能、电能、化学能及原子能等。

3. 光学谐振腔

光学谐振腔则为激光振荡的建立提供正反馈，同时，谐振腔的参数影响输出激光束的质量。光学谐振腔由两个面向工作物质的反射镜组成，一个为全反射镜，一个为部分透射镜（输出反射镜）。在光学谐振腔内，工作物质吸收能量发射光波，沿谐振腔轴线的那一部分光波在谐振腔内来回振荡，多次通过处于激活状态的工作物质，“诱发”激活的工作物质发光，光被放大。当光达到极高的强度，就有一部分放大的光通过输出反射镜输出，这就是激光。可见，谐振腔的作用是将被放大的光中的一部分输出，即发射激光；另一部分反射回工作物质中进行再放大，即正反馈作用。

光学谐振腔除了形成受激发射和提供光学正反馈外，还对振荡光束的方向和频率进行限制，以保证输出激光的高单色性和高定向性。

1.2.2 激光的特性和参数

与普通光源相比，激光光源有很多独特的光学特性，主要的光学特性有 4 个——单色性、相干性、方向性和高亮度，这些特性之间也是相互联系的。比如，相干长度是和激发的腔模数成反比的，也和激光的有效带宽成反比，因此理想的单色光应该有无限长的相干长度，而激光的高亮度的主要原因就是激光的方向性好。激光的参数包括波长、脉宽、能量、功率等。在激光超声研究中，激光既是激发光源，同时也可以作为探测光源，比如光偏转探测、光干涉探测等。作为激发源或探测源时需要考虑的激光特性和参数是不同的。下面我们结合激发和探测超声的需要来简要分析一下激光的这些特性和参数。

1. 单色性

激光的产生来源于原子从亚稳态能级到低能级的跃迁，辐射的波长应该是一定的。但是，由于各种因素（主要是光的多普勒效应）的影响，实际上发出的激光波长具有一定的宽度，但

由于谐振腔的选频和增益稳定效应,使激光光谱线具有很小的线宽。比如氦氖激光器光谱线 632.8nm 的线宽 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 10^{-11}$ 。固体激光器的线宽相对要大一些。

单色性在一些超声应用中是非常重要的。特别是在超声场的光学干涉测量中,一方面是为了得到高的相干性,另一方面是便于对超声位移进行精确的绝对测量,因为这种位移测量是以光波长进行校准的。对于作为激发源的激光来说,对单色性的要求相对低一些,但如果单色性好的话,便于用窄带光学滤波器减少激发光对探测光的干扰。

2. 相干性

简单地说,相干性是描述时间或空间上某点的光场振动与另一点的光场振动之间相关情况的物理量。 t 时刻 P_1 点的光场矢量 $E(P_1, t)$ 和 $t+\tau$ 时刻 P_2 点的光场矢量 $E(P_2, t+\tau)$ 之间的相关性可以由它们的互相关的统计平均,即下面的互相关函数来表示:

$$\Gamma_{12}(\tau) = \langle E(P_1, t) E^*(P_2, t+\tau) \rangle \quad (1.4)$$

相干性可以用归一化的互相关函数 $\gamma_{12}(\tau)$ 来表示:

$$\gamma_{12}(\tau) = \frac{\Gamma_{12}(\tau)}{[\Gamma_{11}(0)\Gamma_{22}(0)]^{1/2}} = \frac{\Gamma_{12}(\tau)}{\sqrt{I_1 I_2}} \quad (1.5)$$

该函数包含了空间和时间相干性,其模量满足 $0 < |\gamma_{12}(\tau)| < 1$ 。其中 $\gamma_{12}(0)$ 体现了空间相干性, $\gamma_{12}(0) = 0$ 表示 P_1 点和 P_2 点的光场之间空间完全不相干, $\gamma_{12}(0) = 1$ 表示空间完全相干; $\gamma_{11}(\tau)$ 或者 $\gamma_{22}(\tau)$ 体现了时间相干性, $\gamma_{11}(\tau) = 0$ 表示某一点在 t 和 $t+\tau$ 时刻的光场完全不相干,而 $\gamma_{11}(\tau) = 1$ 表示这两个时刻光场完全相干。

时间相干性是由光源的波长展宽决定的,近似的相干长度表达式为

$$L_c = \frac{c}{\delta\nu} = \frac{\lambda^2}{\delta\lambda} \quad (1.6)$$

式中, $\delta\nu$ 和 $\delta\lambda$ 分别是频率展宽和波长展宽。白炽灯的 $\delta\lambda$ 是波长量级,因此相干长度很小,为波长量级。钠蒸气灯,相干长度在毫米量级。对于单模 He-Ne 激光,其 $\delta\nu$ 约为 50kHz,其相干长度约为 6km,对于多模振荡的激光器,其相干性取决于模数。如多模的 He-Ne 激光,频率展宽约为 1.5GHz 时其相干长度约为 20cm。与传统的“单色光”不同的是,多模气体激光器的相干和非相干特性是以激光谐振腔长往返长度为周期重复的。假设多模激光器的腔长为 30cm,那么该多模激光器的光束会在 60cm、120cm、180cm 等处恢复其相干性。

在利用激光来探测超声场的时候,相干性往往是非常重要的,因为很多场合是利用干涉法探测,这时就需要考虑信号光和参考光之间的相干性。除非在一些特殊需要高度准直或需要非常细的聚焦情况下,激发超声时对激光的时间相干性几乎没有要求,对空间相干性的要求也很低。这一点对激光超声来说是至关重要的,因为对用作激发光源的脉冲固体激光器来说,通常是多模激光,其相干长度也就在厘米量级。

3. 方向性

激光是沿着谐振腔的轴线发出的,光束的平行度很高,一般发散角在毫弧度量级。因此可以将激光聚焦成很小的光斑,这样在激光超声应用中,一方面可以保证高空间分辨率,另一方面,在用于干涉仪测量超声位移场时,可以收集粗糙表面散射的大部分激光能量,从而提高探测灵敏度。另外,其优良的方向性也使得远程激发和探测成为可能。

除了上述激光的特性以外,作为激发超声的激光,还需要考虑的主要参数有波长、脉冲宽度、能量和重复频率。选择什么样的激光参数特性作为激发超声波的源,取决于在其中产生超声的材料特性和期望的超声频率范围。

激光波长的选择主要取决于材料的吸收,可以从紫外到红外甚至更长。激光的脉冲宽度主要决定了产生超声的频率范围,当然,有时激发光斑的大小也会影响到频率范围,比如在讨论激光激发表面波的时候。通常情况下,用脉宽为 10ns 左右的激光脉冲激发出的超声频率在几十 MHz 量级。对于更高频率的要求,需要的激光脉冲宽度则更短,100ps 量级(100MHz 量级)甚至飞秒激光(GHz 量级)都有可能。从第 2 章的分析我们可以发现,调制的连续激光只有在较低的超声频率要求下(几十千赫兹)有可能作为激发源。激光能量的选择取决于要测试的材料性质、所用激光的脉冲宽度、激发光斑的大小以及能否容许材料表面的损伤等,可以从纳焦、微焦到几百毫焦甚至更高。利用激光超声进行无损检测时若对检测的速度有要求的话,则需要考虑激发激光的重复频率。

1.2.3 超声中常用激光光源

自 1960 年世界上第一台激光器诞生到现今,各种各类激光器层出不穷,如以激光工作物质进行分类就有气体激光器、液体激光器、固体激光器、化学激光器和半导体激光器等。同样,也可以按激光波长进行分类,或以激光器工作方式、输出功率等方式进行分类。在各种激光器中,用以激光超声研究的激光工作物质通常是固体(如 Nd:YAG 晶体、红宝石晶体或钕玻璃)和气体(He-Ne、CO₂等)。下面我们结合超声的激发和探测来介绍几种在激光超声领域用得比较多的固体和气体激光器。

固体激光器是以绝缘晶体或玻璃作为工作物质,将能起受激发射作用的激活离子镶嵌在基质中,具有输出能量或功率高的特点。世界上第一台激光器就是红宝石固体激光器,最初的激光超声实验也是用红宝石激光器完成的,其工作物质是在 Al₂O₃ 中掺入 Cr³⁺ 离子的红宝石。自从第一台激光器产生以后,数以百计的晶体、玻璃、甚至可塑性材料作为基质与各种跃迁金属离子和稀土离子结合用来产生激光。然而最终成为商用的激光材料却很少, Nd:YAG 是迄今使用最为广泛的激光晶体。表 1.1 给出的是 3 种常用固体激光工作物质的性能比较。目前激发超声领域常用的光源是 Nd:YAG 固体激光器,激发用调 Q 的脉冲 Nd:YAG 固体激光器,探测则用连续 Nd:YAG 固体激光器。Nd:YAG 固体激光器的输出波长为 1.06μm,加上倍频晶体、二倍频、三倍频可以实现 532nm、355nm、266nm,覆盖从紫外到红外的波长输出范围。

表 1.1

3 种常用固体激光工作物质的性能比较

工作物质	红宝石	Nd:YAG	钕玻璃
折射率	$n_0 = 1.764$ $n_e = 1.756$	1.82	1.52
吸收光谱带	宽	较窄	较宽
能级系统	三能级	四能级	四能级
亚稳态寿命/s	3×10^{-3}	0.23×10^{-3}	$\sim 0.8 \times 10^{-3}$
荧光谱线宽度/cm ⁻¹	11	6.5	100
激光波长/nm	694.3	1064	1064
光电转换效率/%	0.1~0.3	3~7	4~6

Nd:YAG 称为掺钕钇铝石榴石,就是在基质晶体 YAG (钇铝石榴石的英文缩写,化学式为 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) 中掺入 Nd_2O_3 (Nd^{3+} 作激活离子)。YAG 是一种光学、力学和热学性能优良的固体激光基质。Nd:YAG 激光器属于四能级系统,具有量子效率高、受激辐射界面大的优点,其阈值比红宝石和钕玻璃激光器小得多,而且钇铝石榴石还具有较高的热导率,易于散热。 Nd^{3+} 适合于不同的工作状态,能被有效地被宽带光源(闪光灯)和窄带光源(二极管)所激发。

固体激光器一般采用光激励方式使粒子数反转,传统的固体激光器主要采用气体放电灯——弧光灯和脉冲灯作为泵浦源。这主要是因为:①制作工艺较为简单,使用方便;②适用范围广,能在脉冲或连续状态下工作。脉冲方式工作的激光器通常采用脉冲氙灯,连续输出的激光器则采用氪灯。这类激光器的特点是相对体积较大,但脉冲能量比较高。20 个世纪 80 年代末,由于大功率激光二极管和阵列型激光二极管成为理想的泵浦源,固体激光器在制作工艺方面发生了质变,在此基础上出现了二极管泵浦固体激光器(Diode Pump Solid State Laser, DPSSL),目前在中小功率范围内已逐步取代灯泵的固体激光器。

目前在激光超声的光学干涉探测技术中用的光源很多就是连续的 DPSSL,其功率一般在几百 mW。激光二极管泵浦相比于传统灯泵技术,具有以下的一些优点。

(1) 转换效率高。泵浦灯是宽带泵浦,灯的辐射光谱只有极小部分被晶体棒吸收并转换成激光能量,转换效率仅为 3%~6%;激光二极管的辐射光谱与固体激光工作物质的吸收光谱基本重合,并且泵浦光模式可以很好地与激光振荡模式相匹配,因此光转换效率很高,达到 50% 以上,比灯泵浦固体激光器高出 1 个数量级。

(2) 激光系统的体积小。使用灯泵浦的固体激光器需要庞大的电源和水冷系统,激光系统的体积大。激光二极管体积小、质量轻、结构紧凑,在平均输出功率 200mW 的情况下,耗散在管子上的功率只有瓦级,采用自然风冷即可,因而大大地简化了机械装置,为激光系统的小型化提供了有利条件。

(3) 光束质量好。泵浦灯中注入的大部分电功率转换成热能,造成激光晶体不可消除的热透镜效应,使激光光束质量变差,而激光二极管避免了激光介质热效应,泵浦光的能量稳定性好,改善了光束质量。

(4) 性能可靠、寿命长。泵浦灯的寿命为 300~1000h,换灯要中断系统工作,而激光二极管性能可靠,寿命大大长于泵浦灯,达 15000h。二极管泵浦固体激光器为全固化器件,是无需维护的激光器。

以自由振荡方式工作的脉冲固体激光器输出的激光脉冲有着复杂的时间结构,是由许多振幅、脉宽和间隔作随机变化的尖峰脉冲组成。每个尖峰的宽度为 $0.1\sim 1\mu\text{s}$ 。间隔为数微秒,脉冲序列的长度大致与闪光灯泵浦时间相等。激光器的输出能量分散在这样一串脉冲中,因而不可能有很高的峰值功率。这是因为通常的激光器的损耗是不变的,一旦光泵浦使反转粒子数达到或略超过阈值时,激光器便开始振荡,于是上能级的粒子数因受激辐射而减少,致使上能级不能累计很大的反转粒子数,只能被限制在阈值反转数附近,这是普通激光器峰值功率不高的原因。因此,要使上能级积累大量的粒子,可以设法通过改变激光器的阈值来实现,而这可以通过改变谐振腔的品质因数 Q 值(或损耗)来实现改变。在输出波长和腔长一定的条件下, Q 值与谐振腔的损耗成反比,即损耗大, Q 值就低,阈值高,不易起振;当损耗小, Q 值就高,阈值低,易于起振。调 Q 技术就是通过某种方法使腔的 Q 值按一定程序变化的技术。不同的调 Q 技术就是用不同的方法控制不同类型的损耗变化。如电光调 Q 技术是控制反射损耗变化,声

光调 Q 技术是控制衍射损耗变化, 染料调 Q 技术控制吸收损耗变化。总体来说就是, 在泵浦开始使腔处于低 Q 值状态, 即提高振荡阈值使振荡不能形成, 上能级的反转粒子数就可以大量积累, 能量可以储存的时间决定于上能级的寿命; 当积累到最大值 (饱和值) 时, 突然使腔的损耗减小, Q 值突增, 激光振荡迅速建立起来, 在极短的时间内上能级的反转粒子数被消耗, 转变为腔内的光能量, 从腔的输出端以单一脉冲形式释放出来, 于是就获得峰值功率很高的巨脉冲。作为工业应用中的激发超声光源, 由于激发出超声所需的激光峰值功率的需要和超声脉冲频率的需要, 一般采用的就是调 Q 的固体激光器。

气体激光器与固体激光器不同的不仅是工作物质为气体, 而且激励方法常采用放电方式。通常由气体放电管组成, 在其两端放置形成谐振腔的不透明和部分透明的反射镜。由于气体的密度比固体小, 所以为了得到大功率, 其尺寸较大。

He-Ne 激光器是典型的惰性气体原子激光器, Ne 为工作物质, He 为辅助气体。He-Ne 激光器输出连续光, 主要工作波段在可见光到近红外区域, 其中, 最常用的工作波长为 632.8nm (红光), 其次是 $1.15\mu\text{m}$ 和 $3.39\mu\text{m}$ 以及 $1.52\mu\text{m}$ 、 543.5nm 等。He-Ne 激光器输出光束质量很高, 表现为单色性好 ($\Delta\nu < 20\text{Hz}$) 和方向性好 ($\theta < 10^{-3}\text{rad}$)。由于增益低, 输出功率一般为毫瓦量级 ($0.5\sim 100\text{mW}$)。器件结构简单, 造价低廉。He-Ne 激光器主要用于激光超声的实验室研究工作, 比如在超声的光偏转探测中。

CO_2 是能得到较高功率输出的气体激光器的工作物质, 能产生波长为 $10.6\mu\text{m}$ 的激光, 但也可以有其他波长的振荡。由于是远红外输出, 所以在一些复合材料中超声的激光激发中使用脉冲 CO_2 激光器。

1.3

激光超声

激光超声, 就是利用激光来激发和探测超声, 这种方式可以克服传统超声换能器的大部分缺点。简单地说, 激光激发超声是将部分激光能量转化成热能, 再转化成机械能的一个过程。当一束脉冲激光入射到固体表面时, 部分激光能量被固体吸收并转化成热能, 辐照区域附近产生局部迅速的温升, 导致局部快速的热膨胀从而产生超声, 这是热弹机制激发超声。如果入射激光功率较高, 有可能在固体表面引起熔融、气化、等离子体等现象, 而表面材料的融蚀、飞溅等引起对材料表面的反冲力, 从而激发超声, 这是融蚀机制激发超声。热弹和融蚀是两种主要的激光激发超声机制。激光探测超声, 是连续或脉宽足够长 (能够捕获到所有感兴趣的信号) 的激光入射样品表面, 散射或者反射的光携带了超声信息, 再由干涉型或非干涉型的光学接收器收集后进行信号解调分析处理。

其实无论哪种机制激发超声, 在这里待测样品或材料本身就是超声的发射换能器, 而压电类传统超声中的超声源是待测样品分开的压电元件。正是这种不同使得激光超声与压电换能器相比, 具有如下的特点。

(1) 激光激发超声是激光直接照射样品产生, 激光与样品之间无须耦合剂, 也不必用水浸法作检测, 是非接触式的, 可消除因耦合剂引起的附加影响。