

# 激光超声的原理及其在固体中的应用\*

应 崇 福

(中国科学院声学研究所, 北京 100080)

**摘 要** 激光超声是指脉冲激光所产生的脉冲超声. 激光超声是较新的产生超声的方法. 它的主要特色是, 可以遥发遥收, 这样就有可能在高温、有危险辐射等恶劣环境下以及在样品运动的生产线上进行超声检测. 皮秒级和飞秒级的激光所激发的超声近来又用来研究固体中电子和声子的相互作用. 文章介绍了固体中激光超声的声学性能及两种产生机理: 热弹机理和电子机理.

**关键词** 激光超声, 声学性能, 两种产生机理

**Abstract** Laser-generated ultrasound denotes the pulsed ultrasound excited in a medium by a pulsed laser. This is a relatively new means of generating ultrasound, the main advantage of which is that the ultrasound may be remotely excited (and reecepted), and thus may be applied to material evaluation in hostile environments like elevated temperatures and dangerous radiation as well as on the production line with fast-moving products. Ultrasound excited by pico-second or femto-second lasers has recently been used to study the coupling of electrons and phonons in solids. This paper reviews the acoustical properties of laser ultrasound in solids and two important mechanisms of generation, the thermal and the electronic.

**Key words** laser-generated ultrasound, acoustical properties, two generation mechanisms

## 1 引言

激光超声是指激光在介质中所产生的超声, 有时也指利用激光来产生超声这件事. 目前人们在努力研究利用激光干涉仪来测量超声, 所以有时又偶然把利用激光来产生超声和测量超声统称激光超声. 这里的激光是指脉冲激光, 不指连续激光, 也不指幅度调制的连续激光. 后两种激光在光声学中有广泛的应用, 但不属这里所谈的专门的激光超声范围.

在超声学里, 产生和测量超声是一项基本的课题, 因为人类自身器官不能发生和听到超声. 近百年来已经发明了许多的方法来发射和接收超声, 但这项工作还在继续, 原因是, 超声是多种多样的, 而应用需求也是多种多样的. 当前发射和接收超声的最广泛手段是压电换能器. 简单说, 这种换能器是由单个压电片或多片

阵列构成; 人们所熟知的医院内诊断用的 B 超仪, 便采用压电换能器, 工业上普遍使用的超声探伤仪也采用同样的器件. 激光超声是在 60 年代激光出现后两年内提出来的方法, 不过近十几年来才得到较广泛的重视和研究.

激光超声具有吸引力的原因之一是, 可以从较远处发射激光, 照射材料, 在材料内激发超声, 而压电换能器则必须贴在材料(或人体)的表面上. 因此激光产生超声的方法常称为非接触式的. 等到激光干涉仪改进到具备或接近压电换能器那样的检测灵敏度时, 将可以组成精确的遥发遥收超声的体系, 这在许多场合十分有用, 例如当被测对象温度很高或有放射性辐射时, 又如当工件在生产线上快速运动时. 激光

\* 国家自然科学基金资助项目.

1995 年 12 月 14 日收到初稿, 1996 年 2 月 27 日收到修改稿.

超声还有不少其他优点:激光的频带宽,光点小,光束容易移动和组成阵列,由此可以在不平的表面上产生超声和扫动超声,而所产生的超声频带宽、脉冲短、检测分辨率高.激光超声的缺点是激光设备庞大复杂.

可以看出,激光超声吸取了激光的诸多长处.随着激光技术不断进步,激光超声也陆续引进激光研究的新成果.近几年来人们采用了皮秒级、飞秒级激光来产生超声,观察到电子和声子相互作用的某些细节.

激光可以在固体中产生超声,也可以在气体和液体中产生超声.流体中激光超声的研究内容也相当丰富,有关这方面的进展,水声学工作者特别关心.本文将限于讨论激光超声在固体中的应用研究,而且将只限于小功率激光的应用.所谓小功率是指激光的强度不足以导致固体表面的熔化和蒸发,从而损伤固体的表面.下面将综述固体中小功率激光所激发的超声的一些基本的声学性质,并介绍两种激发的机理:一种是热弹机理,另一种是电子机理.

## 2 激光超声的基本声学性质和产生的主要机理

小功率激光在介质中产生超声,主要的机理是光能在介质中转换为热能,从而引起材料的局部热膨胀,导致局部应变,而由于激光是脉冲式的,这种局部应变也是脉冲式的,这就形成典型的脉冲声源,产生超声波.这种机理称为热弹机理.激光脉冲的时间宽度一般很窄,工业上常用 10 ns 级的,这时超声的脉冲时间宽度只稍许大一些,有的频宽达几十兆赫.在实验室中,激光如果是皮秒级的,则超声的频率上限可达百吉赫级.

前面提到,这里的激光通常是用作超声源.对于任何超声源,一般需要了解它会产生什么样的超声波,即所产生超声波有哪些声学特性.标准的声学特性包括波形、振动幅度和指向性图案,最后一项标志介质内在不同方向的相对振幅.在 80 年代初期,研究者们对激光在金属里产生超声的这些特性进行了测量.波形的测

量比一般的测量要困难,这是因为一般的测量是用压电换能器来测量,也是由压电换能器产生的超声,而压电换能器,无论是发射的还是接收的,频带都相当窄,通常只有几兆赫;激光超声的频带却宽得多,如用压电换能器来测量,只能测量出激光超声的一小段频谱,以致给出畸变了波形.为了测量激光超声的真正波形,对于纳秒级的激光源,需要采用带宽可达几十兆赫或更宽的电容式接收器,或者带宽可达百兆赫的激光干涉仪.这两种测量仪器,与压电换能器相比,灵敏度目前都较低,但它们仍可测出直接发射的激光超声的波形.所给出波形没有畸变,这可以从下列事实来旁证:一是两种仪器测量出的波形相同,二是这些波形同理论预计的一致.理论分析中所取模型已在前面提到,理论计算的结果将在下面显示.

激光超声的振幅大小,可以从测量仪器经过校准的灵敏度确定.至于指向性图案,按照定义,只需得出给定频率的曲线,因此可用窄带的压电换能器来接收、测量.

图 1 是一个测量的例子<sup>[1]</sup>,它给出 10 ns 级激光照射到铝合金表面时所产生的超声的波形.这时样品是块厚板,激光照射到板的上表面,测量点是板下表面的震中位置.对同一超声,图 1(a)是用激光干涉仪测的,(b)是用电容式接收器测的.两根曲线看起来完全一样,实际上有可以解释的很细微的差别.在图 1 的波形中,最开始有个小尖峰(对它我们下面将专门讨论),随后曲线接近陡直下降,这对应于纵波的到达,这时样品表面是下凹,紧跟着下凹继续增长,不过过程逐渐缓慢,直到一个瞬间,波形转过来急剧上升,根据时间计算,这时对应于横波的到达.原来在固体中,表面声源既产生纵波,又产生速度约慢一半的横波.显然,图 1 显示的波形,颇不同于通常熟悉的接近正弦的形状.图 2 是对薄板理论计算的波形示意图,它同图 1 的实验波形是相符的.

铝合金内激光超声指向性图案的实测一例由图 3 给出<sup>[2]</sup>.这是用 1 MHz 压电换能器测出的,这时的样品做成半圆柱形.图中同时给出了

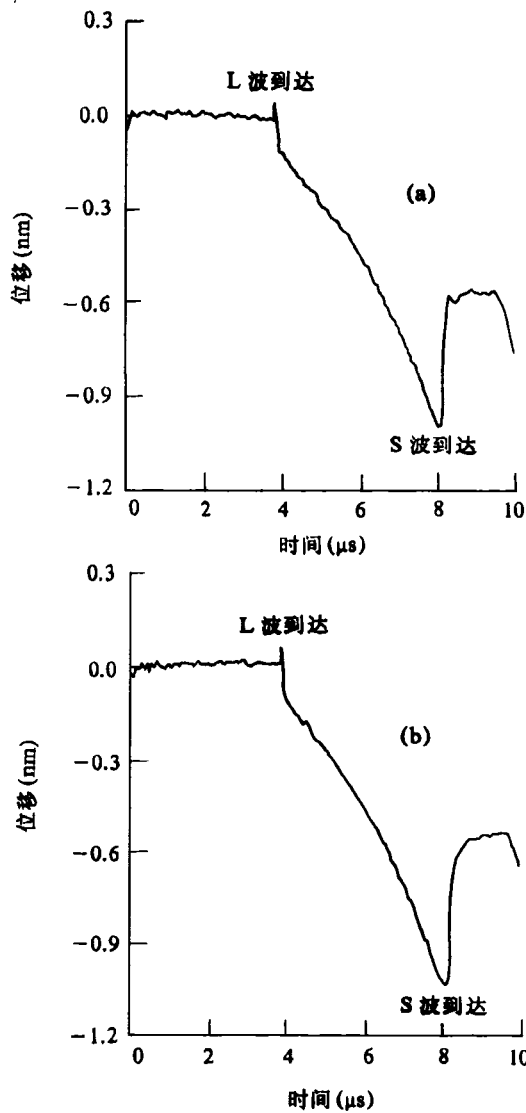


图1 铝合金样品中激光超声的波形<sup>[1]</sup>  
 (a)用激光干涉仪测的;  
 (b)用电容式接收器测的

理论计算的曲线,实验曲线和理论曲线各自画了一半,因为它们都是对 $\theta=0^\circ$ 线对称的。

上面两个图所显示的是铝合金内激光超声的声学性质,这些结果在金属中有代表性.80年代初期,人们对金属比较感兴趣,这是因为当时工业中最常用的材料大多是金属.随后,非金属的新型材料兴起,例如复合材料、陶瓷和工业塑料.在激光超声领域,人们很自然把注意力

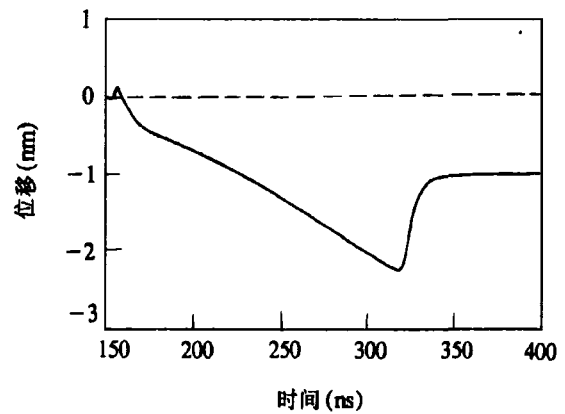


图2 金属中理论预期的激光超声的波形

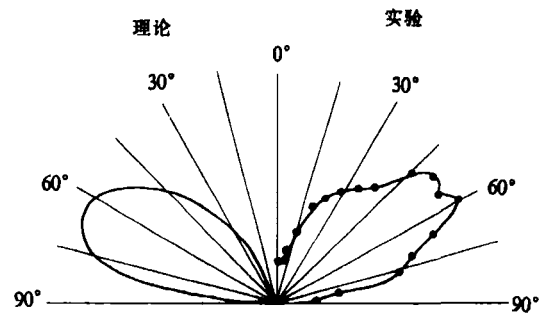


图3 铝合金中激光超声的指向性图案<sup>[2]</sup>  
 (左半是理论曲线,右半是实验曲线,其实每条曲线都只画了一半,各自是左右对称的)

扩大到非金属材料.非金属材料中的激光行为不同于金属中的,主要差别是,在金属中,常用的激光不能穿透较深,例如在铝中只能穿透约10 nm,其原因是熟知的电磁波在金属中的趋肤效应,而非金属中则没有这一效应,因此激光可以穿透较深,深透多少要看光吸收系数的大小.声学上人们常近似地把金属中声源看作表面上的面源,而在非金属中,则认为声源是从表面延续到表面下一定的深度.另外,金属的导热性强,而非金属的一般较弱,理论上有时取作零。

文献[3]首先对非金属中激光超声的波形进行了理论分析和实验观察,样品为滤光的中性玻璃(见图4),理论分析中忽略了材料的导热性.中国科学院声学研究所则首先对非金属中激光超声的指向性图案进行了研究,从理论

上分析了激光透入介质的影响<sup>[4]</sup>,并做了实验验证<sup>[5]</sup>.滤光玻璃的理论和实验研究结果由图5<sup>[5]</sup>给出,其中曲线a是理论值,曲线b是实验值.理论预期和实验数据比较符合,但都明显不同于图3中的铝合金情况.

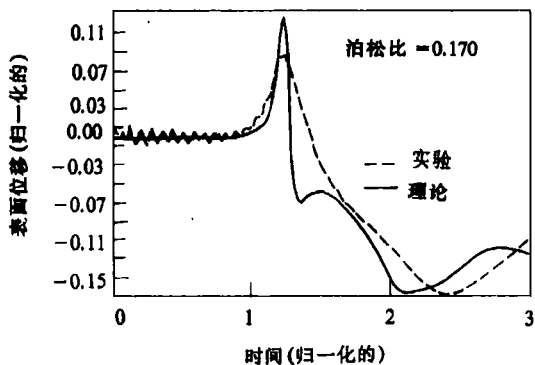


图4 滤光玻璃中激光超声的波形<sup>[3]</sup>  
(虚线代表实验结果,实线代表理论结果.  
激光透入玻璃深度是 0.39 mm)

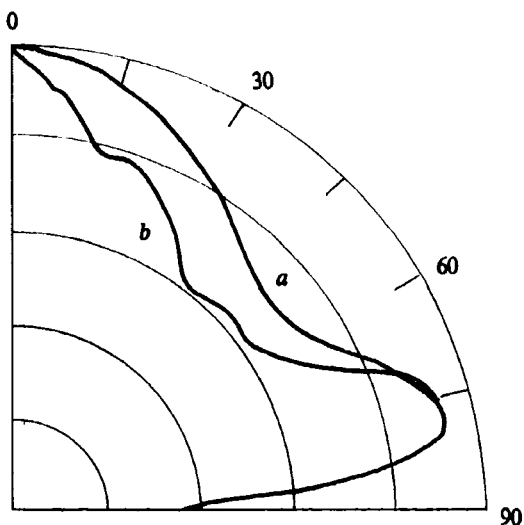


图5 滤光玻璃中激光超声的指向性图案<sup>[5]</sup>  
a 是理论曲线;b 实验曲线  
(激光透入玻璃深度是 0.2 mm)

### 3 波形中的先驱脉冲与第二声——热波

在前面图1和图2中,铝合金内激光超声的实测波形,在起始处有个小尖峰.图2为理论曲线的示意图.实际上,早期的理论分析并没有

预期这个小尖峰的存在.后来文献[3]指出,金属中的热源虽然原来只是面源,但由于热扩散,面源会扩散成体源,而体源根据计算是可以产生这么一个小尖峰的.同时因为热源已扩散到介质表面以下的小范围,这个小尖峰在热源下远处一点测量时出现的时间会稍许早于由介质表面发射的纵波,为此,这个小尖峰可称为先驱脉冲.文献[3]引用这个体热源模型,得出前面图4的理论曲线,但图4是对非金属的.对于金属却没有算出明确的理论曲线.在计算时,需要数值计算几百项之和.我国同济大学<sup>[6]</sup>则引进了较巧妙的数学近似,得到解析解,大量简化了数值计算.

文献[7]采用了另一种物理观点来分析这个先驱脉冲.这个观点涉及第二声,同物理学关系比较密切,所以我们打算简单谈一下.顺便指出,先驱脉冲虽然只是小尖峰,但它是明显的标志,在超声检测时很有用.

前面曾提到,先驱脉冲牵涉到热传导现象.在考虑热传导时,过去一直根据经典的傅里叶定律导出熟知的热扩散方程.后者引出下面一个结论:在介质的某个局部受到热扰动时,这个热扰动会在介质的任何远处立即感受到,换句话说,热信号是以无限大的速度传播的.这个问题一直困扰着人们.早在1867年,麦克斯韦就设想有波动的热流存在,热流以有限速度传播.直到1941年,朗道才预言,在超流体氦 He II 中,在1 K附近,有称为第二声的热波存在,而V. Peshkov到1944年才首次用实验证实了这种热波的存在.值得强调的是,第二声不是声波而是热波.随后,人们开始探讨,固体里是否存在第二声,并逐步得出结论:在一定条件下这是可能的.1966年,C. C. Ackermann等第一次在固体<sup>4</sup>He中观察到第二声.1970年,T. F. McNelly等则第一次在寻常的绝缘固体 NaF 中观察到第二声的初现.到今天,已不再有人怀疑第二声的存在,就是说,热的传递有可能不是扩散式的,而是波动式的,由此,它的传播速度不是无限大的,而是有限的.

但是,固体中第二声的出现要满足苛刻的

条件. 实验上, 它是在相当低的温度区, 例如 10—20 K 之间, 才观察到的, 而且固体必须是极为纯洁的完整单晶. 理论上也确认, 需要最大限度地减少对声子的阻性散射, 包括化学杂质散射、同位素混合物散射、位错散射、倒逆过程散射等. 有人导出定量的判据是, 热波波长应远大于正常散射过程的平均自由程, 并远小于样品的尺寸, 同时, 阻性散射的平均自由程应远大于样品尺寸. 从这些理论预期和实验结果看, 第二声即热波的出现并不容易.

另一方面, 人们仍然难以接受热信号会以无限大速度传播这种结论. 特别是近年来在实践中, 在热弹力学范围, 要面对许多温度变化十分迅速的瞬态热源问题. 在航天器重入气层、原子弹爆炸形成热浪、激光焊接、瞬爆核反应、电子束加速等一些过程中, 温度会在很短的瞬间急剧上升到很高的值, 并且带有很大的热通量, 这时有理由更不能满足于经典的扩散方程. 为此, 不少人相继指出, 不只在低温下, 而且在室温或高温下, 热扰动传播速度也应是有限的. 人们先后提出了几种修正理论, 其中一种是修正经典的傅里叶定律. 对于各向同性材料, 把它从

$$\mathbf{q} = -k \nabla T$$

修正为

$$\mathbf{q} + \tau \dot{\mathbf{q}} = -k \nabla T. \quad (1)$$

把这个公式同能量守恒定律

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0$$

结合起来, 就得到称为扩展了的热传导方程:

$$(1 + \tau \frac{\partial}{\partial t}) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C} \nabla^2 T, \quad (2)$$

式中  $\mathbf{q}$  是热流密度矢量,  $T$  是温度变化,  $k, \rho, C$  分别是介质的热导率、密度和单位体积的热容,  $\tau$  是热弛豫时间, 即把一个温度梯度突然加到介质的体积元时, 这个体积元重新建立热传导平衡态时所需的时间. 上面的(2)式可改写

$$\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{1}{\tau} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C \tau} \nabla^2 T.$$

这就表示, 温度的传播是波动式的, 而不是扩散式的,  $\frac{1}{\tau} \frac{\partial T}{\partial t}$  项只表示波动是衰减的. 温度的传

播速度是有限值  $C_T = (\frac{k}{\rho C \tau})^{\frac{1}{2}}$ .

$\tau$  是个独立的量, 应当从电介质中的声子理论来计算, 或者从金属中的电子理论来计算. 不过有人作了简化, 即假设在绝缘体中按简单的声子气体模型,  $C_T^2 = \frac{1}{3} S^2$ ,  $S$  是声子的传播速度. 又有人把  $S$  取作声纵波的传播速度  $v_L$ , 因而近似地得到  $C_T^2 = \frac{1}{3} v_L^2$ . 这样, 反过来可以从  $\tau = \frac{3k}{\rho C v_L^2}$  来估计  $\tau$ . 作如此近似时,  $\tau$  的数量级是  $10^{-12} - 10^{-14}$  s. 从(2)式可以看出, 虽然  $\tau$  很小, 如果  $\frac{\partial T}{\partial t}$  足够大,  $(1 + \tau \frac{\partial}{\partial t})$  中的  $\tau \frac{\partial}{\partial t}$  项便不能忽略.

回到先驱脉冲问题, McDonald<sup>[7]</sup> 针对短脉冲激光加热迅速的情况, 引用了第二声的概念来计算激光超声的波形. 通过计算发现, 并不需要体热源, 而是在考虑了热的波动性质时, 介质表面的热源会导致表面薄层的起伏, 从而会导致波形中有先驱脉冲出现. 中国科学院声学研究所<sup>[8]</sup> 对这种机理作了进一步的分析.

上面的讨论仅限于小功率的激光激励. 如果激光的功率加大, 则终于会使固体的表面熔化并蒸发, 产生等离子体. 这时激光超声的产生机理便不同于热弹范围, 波形和指向性图案也将迥异.

#### 4 激光超声与固体物理

前面介绍了激光超声作为介质中新型超声源的应用, 这时人们只把脉冲光能用作瞬态的热源. 但在有些固体如半导体中, 激光的作用不限于直接产生热和热膨胀, 而会产生一些微观的影响, 特别是当激光作用时间十分短促时. 这里实际上牵涉到光和物质之间的相互作用有多种形式的问题, 直接热效应只是这些相互作用形式之一.

如果激光的量子能量足够大, 使共价晶体中原子的价电子能够脱离原子, 那么在短促的时间内, 在这些自由电子还没有回复到平衡状

态之前,部分被吸收的光能便转化为电子和离子之间的相互作用,形成一种电子的应变源,有别于直接的热膨胀源.电子的应变源同样可以激励超声,这种激励机理称为电子机理或“形变”机理.当晶体是半导体时,则价电子带的电子可能被激发到导带,而在价电子带留下空穴,形成电子-空穴对,即载流子.锗、硅、砷化镓等半导体的价电子带与导带之间能隙  $E_g$  是相当的,只要激光的量子能量  $h\omega_L$  超过  $E_g$ ,相当于  $E_g$  的部分能量将被吸收,并用来激发电子,而剩余能量则仍直接转化为热.载流子将在传输过程中逐渐复合,但这需要纳秒至微秒的时间.国内南京大学对这个现象进行了研究,并计算了载流子的演化过程<sup>[9]</sup>.

在金属中,光能只在趋肤层激发一部分电子到较高的能态.对于一般脉冲宽度的激光(如毫秒级的或几十纳秒级的),电子与声子之间可以认为是经常保持着热平衡,这样导致一般的超声产生的热机理或热弹机理.但是,近年实验中运用了皮秒级以至飞秒级的激光,其结果是电子和声子在非常短暂的期间会失去耦合,从而使电子和声子各有明确的不同的温度,其中电子的温度可以高达 500—600 K 或更高,随后电子将以超音速的速度扩散,通过电子-声子的耦合把能量传给晶格而自身冷却下来.晶格的温度则与电子不一样,变化很小,不过几度.这个微观过程,按照理论分析和实验验证,可以从激光所产生的宏观波形显示出来.在超音速传递期间,电子会对介质产生应力,从而会影响所产生的超声的波形,具体讲将加宽波形,加宽的程度和电子-声子耦合程度有关.于是对照实验测出的飞秒激光在金属中产生的超声波形,不仅可以验证理论模型是否正确,而且可以定量确定在实验温度下的电子-声子耦合系数.

图 6 是文献[10]所得的金属铜中激光超声的间接波形,图中给出了实验测量与理论预期结果的对比.这时样品是溅射到硅衬底的铜薄膜,膜厚只有 235 nm.实验过程如下:飞秒激光射到薄膜的自由表面后,所产生的超声传入薄膜下表面,被衬底与膜的界面反射,回到自由

表面,再被反射至下表面,如此多次来回反射,在铜膜自由表面引起微隆起,并测量了微隆起随时间的变化.铜膜自由表面的隆起,是用另一束探测用的激光测出的,隆起度表示为激光“探针”的角偏斜,隆起高度的数量级是皮米,偏斜角的数量级是微弧度.图 6 中占主要地位的粗糙曲线(图的最上部),是随延迟时间起伏的激光探针的角偏斜实验曲线.实验曲线下面的几根光滑细曲线则是理论曲线,其中  $a$  和  $b$  是假设电子和声子是始终耦合的,也就是假设单纯的热机理,不过在  $a$  中计算时忽略了铜的热扩散,而在  $b$  中考虑了这项因素; $c$  则是采用了短暂间非平衡电子激励的假设,并取电子-声子耦合系数的最佳符合值为  $60 \times 10^{15} \text{Wm}^{-3} \text{K}^{-1}$ .可以看出,曲线  $c$  和实验曲线很相似.

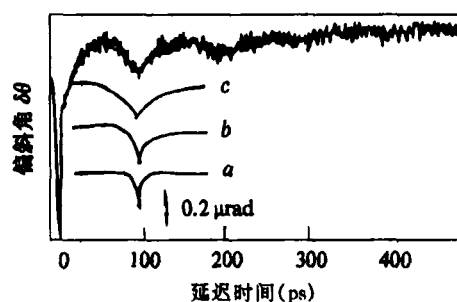


图 6 硅衬底上铜薄膜(厚 235 nm)中来回反射的激光超声,在薄膜自由表面所引起的微隆起随延迟时间的变化  
(微隆起由测量用的激光探针的偏斜角来表示,偏斜角的数量级是微弧度.产生超声的激光脉冲的宽度为 200 fs.粗的毛糙曲线是实验曲线,细的光滑曲线是理论曲线)

## 5 结束语

在 60 年代初发明激光后,两年内便有声学工作者提出激光超声的设想和理论,但研究强度约在 1980 年前后才得到加强.现在还属发展阶段.

作为超声源,激光超声的特色有:它可以不接触地产生超声,声源可以是小面积,容易移动和容易组成阵列,所激励的超声脉冲宽度很窄,

频谱很宽,频率很高.目前在加强研究灵敏度能够和压电换能器相当的检测超声用激光干涉仪,这样可以组成遥发遥收超声的系统,对恶劣环境下或生产线上的待测对象,对薄膜材料、异形材料等都将是—种独特的超声检测手段.在原理研究上,对激光超声的产生机理和声学特性都已经有了相当的了解,但还有不少工作要做.在应用上,激光超声有许多优势,但却存在激光设备比较复杂和庞大等问题,在十分需要的场合,这也许可以承受,但为了普及,设备需要简化.

由于频率可以高达 100 GHz 以上,激光超声已挤入开展了多年的超声研究固体物理的领域,这在过去是采用非常薄的压电换能器和微波技术艰难地进行的.这方面的工作刚开始,但内容既包含超声和物质的相互作用,也包含光和物质的相互作用,将—定的前途.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] R. J. Dewhurst et al., *Ultrasonics*, **25**(1987), 315.
- [ 2 ] D. A. Hutchins, R. J. Dewhurst and S. B. Palmer, *J. Acoust. Soc. Am.*, **70**(1981), 1362.
- [ 3 ] H. L. Telschow and R. J. Conant, *J. Acoust. Soc. Am.*, **88**(1990), 1494.
- [ 4 ] Fang Qiping, Bai Yuhai, Ying Chongfu, *Chinese J. Acoustics*, **14**(1995), 289.
- [ 5 ] Bai Yuhai et al., *Ultrasonics*, **32**(1994), 323.
- [ 6 ] 李志淳,激光超声的热弹激发理论,博士学位论文,同济大学声学研究所,1994年9月,上海.
- [ 7 ] J. A. McDonald, *J. Nondestructive Evaluation*, **9**(1990), 223.
- [ 8 ] 张鹏智,热的波动模型下固体中激光超声的热弹激发,博士学位论文,中国科学声学研究所,1996年2月,北京.
- [ 9 ] Cheng Jianchun, Zhang Shuyi, *J. Appl. Phys.*, **74**(1993), 5718.
- [ 10 ] O. B. Wright and V. E. Gusev, *IEEE Trans. UFFC*, **42**(1995), 331.

## 脉冲管制冷研究进展\*

梁 惊 涛

(中国科学院低温技术实验中心,北京 100080)

**摘 要** 简要介绍了脉冲管制冷机的产生和发展,特别是近年来所取得的突破性进展,揭示了脉冲管制冷原理,并且指出了脉冲管制冷机的应用前景.

**关键词** 脉冲管, 制冷, 低温, 低温制冷机

**Abstract** The invention and development of the pulse tube refrigeration, and particularly the breakthroughs achieved in recent years, are briefly reviewed. The principles and potential applications of pulse tube refrigerators are also described.

**Key words** pulse tube, refrigeration, cryogenics, cryocooler

在许多热工设备中,存在着一个有趣而又常令人烦恼的物理现象,即在内部存在着周期性气体压力波动的连接管道上,往往会沿轴向建立起一个可观的温度梯度.这一现象于 60 年代初被当时正从事制冷机研究的美国 Gifford 教授及其学生 Longsworth<sup>[1]</sup>注意到,并由此想到,能否利用这一现象来制成—种新型的

制冷机?他们对—根—端封闭的薄壁圆管从其开口端交替地充放气,使其内部产生周期性的压力波动,于是热便由管子的开口端传输到封闭端,以致于封闭端热得烫手,而开口端温度降

\* 本文作者获国际制冷学会首届卡皮查奖(1995年8月于海牙).  
1995年11月16日收到.