

文章编号: 0258-7025(2006)08-1127-06

金属和非金属材料中激光超声前驱小波分析

王纪俊^{1,2}, 沈中华¹, 许伯强², 关建飞¹, 倪晓武¹, 陆建¹

(¹ 南京理工大学信息物理与工程系, 江苏 南京 210094; ² 江苏大学理学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 根据激光脉冲的时间分布、空间分布及材料物理参数与激光超声波形特征的关系, 采用有限元方法(FEM)建立了激光超声的热弹有限元数值模型, 得到了金属和非金属材料中的温度场分布, 将温度场作为超声力源进而得到热弹激发的超声对心波形。根据对心波形, 分析了前驱小波的成因和规律。结果表明, 金属材料中由于热扩散效应在金属表面附近激发出一个位于表面的力源; 非金属材料由于同时存在光学穿透效应, 在材料表面层下形成一个有一定深度的体力源。激光辐照导致金属材料中加热区域急速膨胀进而产生垂直于表面方向的应力, 而非金属材料该垂直表面方向的应力作用于材料表面下方一定深度处。因此金属材料中前驱小波为单极波形, 而在非金属材料中表现为双极波形。前驱小波波形的特征反映了材料的物理性质和参数。该研究为利用前驱小波进行材料的定量检测和无损评价提供了依据。

关键词 激光物理; 超声; 有限元法; 前驱小波

中图分类号 TG 665; O 242.1 **文献标识码** A

Analysis on Precursor in Laser Ultrasonics in Metal and Non-Metallic Materials

WANG Ji-jun^{1,2}, SHEN Zhong-hua¹, XU Bai-qiang²,
GUAN Jian-fei¹, NI Xiao-wu¹, LU Jian¹

¹Department of Information Physics & Engineering,
Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China
²Faculty of Science, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

Abstract Based on the relationship between the features of laser ultrasonic waveform and the spatial distribution, temporal distribution of the laser pulse as well as the material physical properties, a model for the thermoelastic generation of ultrasonic wave in metals and non-metals is established by using finite element method (FEM). The temperature distributions in metal and non-metallic materials excited by laser pulse are obtained, and the ultrasonic waveforms at the epicenter caused by thermoelastic expansion are calculated by utilizing the temperature distributions as ultrasonic force source. The generation reason and rules of precursor are analyzed according to the waveforms at the epicenter. The results show that, because of the thermal diffusion, a force source is excited on the metal surface, whereas a body force source with relatively large depth is caused due to the optical penetration in non-metals. The stresses normal to surface are excited by rapid expansion of material heated by laser pulse, but the location that the stresses act on is below the surface in the case of non-metals, so the precursor is monopolar in metals and it becomes dipolar in non-metals. The precursor waveforms include the material physical properties and parameters, so this research is useful for nondestructive materials test and evaluation by utilizing the characteristic of precursor.

Key words laser physics; ultrasound; finite element method; precursor

收稿日期: 2005-09-29; 收到修改稿日期: 2006-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(60208004)和江苏大学高级人才基金(05JDG007)资助项目。

作者简介: 王纪俊(1966—), 男, 江苏扬中人, 江苏大学物理系副教授, 南京理工大学博士研究生, 主要从事激光和材料的相互作用的研究。E-mail: wjj4461@uj.s.edu.cn

导师简介: 倪晓武(1955—), 男, 江苏苏州人, 南京理工大学教授, 博士生导师, 主要从事激光与物质相互作用的研究。E-mail: nxw@mail.njust.edu.cn

1 引 言

激光超声具有非接触激发、宽频带和能同时激发多种模式超声波等特点,特别是和激光检测技术相结合,在无损伤检测和材料评价中得到了越来越广泛的应用^[1~3]。

Scrubby 等^[4]首先提出了激光超声的点源模型,把激光加热区域看成表面中心扩展力源(即 SCOE 模型)。Rose^[5]给出了这一模型严密的数学证明。SCOE 模型能正确预示金属材料中的激光超声波的主要特征,但仍然无法解释实验中前驱小波的存在。McDonald^[6]和 Sanderson 等^[7]对 SCOE 模型进行了修正,考虑热扩散效应,数值研究了激光热弹激发超声波,并且理论上证明了前驱小波的存在。虽然许多学者对前驱小波进行了理论和实验上的研究^[6~8],但到目前为止,对金属情况下的前驱小波是否为单极脉冲波形仍有分歧;对前驱小波,特别是双极波形的产生原因并没有明确的物理解释。实验中得到的金属情况下前驱小波为单极波形^[8],而 McDonald 和 Sanderson 等提出的修正的 SCOE 模型在说明前驱小波的存在的同时,理论推导的前驱小波应为双极波形。在非金属情况下,对半透明中性玻璃、硅晶体板进行的激光超声实验得到的前驱小波确为双极波形^[9]。以纵波速度传播的前驱小波其特征(幅值和脉宽)同样包含着所研究材料的许多物理性质,为更好地利用前驱小波信号反演出材料的物理参数(如热传导率、热膨胀系数、非金属材料的光穿透深度等),有必要进一步分析前驱小波产生的物理机制。

在激光超声的研究中,主要工作集中在激光超声波的解析解,使用最多的方法是双积分变换法(Double Laplace-Hankle transform method),但其反变换极其复杂,常常需要与数值解法相结合^[7, 8]。而且由于激光超声过程的复杂性,理论推导中必然应用很多近似简化,因此解析方法难以处理材料参数随温度变化、复杂结构材料的激光超声问题。

有限元方法(FEM)建立在严密的数学理论基础之上,能处理复杂的几何结构,能同时分析多种复杂因素。利用有限元方法已经对单一金属、薄膜/基底系统的激光超声进行了研究,计算结果能有效地分析激光超声的产生和传播过程^[10~14]。本文在同时考虑激光的时间、空间分布和材料物理参数随温度变化的情况下,建立了热弹激发超声的有限元数值模型,分析了金属和非金属样品的激光超声对心波

形,着重分析了前驱小波的产生原因。

2 热弹性理论及数值方法

2.1 热传导理论

如图 1 所示,当激光脉冲照射到样品表面时,介质吸收激光辐射能量,材料内部的局部温度升高,产生非均匀温度场。假设激光束为高斯分布,考虑到对称性,分析中采用柱坐标系,则经典热传导方程^[12]可表示为

$$\rho C \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[rK \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \right] + q, \quad (1)$$

式中 $T(r, z, t)$ 表示不同时刻空间中某一点的温度, ρ, C, K 分别表示介质的密度、比热和热传导率, q 为热源,是激光作用产生的材料吸收的激光能量。

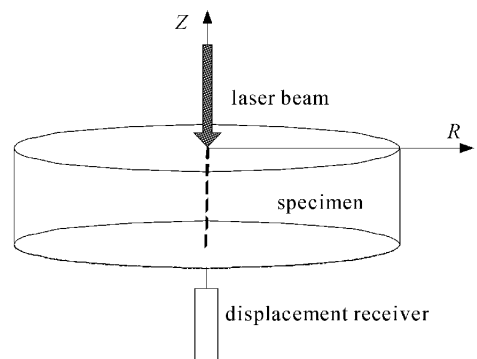


图 1 激光辐照系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram for laser irradiating

对金属材料,由于趋肤效应,激光能量的吸收只发生在金属的表面层

$$q|_{z=0} = I_0 A(T) f(r) g(t), \quad (2)$$

式中 I_0 表示入射光中心处的光强, $A(T)$ 为介质的光吸收系数, $f(r)$ 和 $g(t)$ 分别表示激光脉冲的空间和时间高斯分布

$$f(r) = \exp(-r^2/a_0^2), \quad (3)$$

$$g(t) = (t/t_0) \exp(-t/t_0), \quad (4)$$

式中 a_0 表示激光束半径, t_0 为激光脉冲的上升时间。

对非金属材料,激光可以穿透进介质内一定深度

$$q = \beta(1-R) I_0 e^{-\beta z} f(r) g(t), \quad (5)$$

式中 β 为介质的光吸收系数($1/\beta$ 为光穿透深度), R 为介质的光反射系数。

设样品的表面绝热,则边界条件为

$$-K \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0, h} = 0, \quad (6)$$

式中 h 为样品的厚度。

2.2 热弹性方程

若激光能量低于材料的熔融阈值,即只考虑热弹效应。介质吸收激光能量,在介质表面和表面附近区域形成瞬态温度场,导致材料内产生应力、应变,由热弹效应激发出瞬态位移场,在介质中形成超声波。由热弹性理论,位移场满足方程^[10]

$$(\lambda + 2\mu)\nabla(\nabla \cdot U) - \mu\nabla \times \nabla \times U - \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \alpha(3\lambda + 2\mu)\nabla T, \quad (7)$$

式中 $U = U(r, z, t)$ 表示介质内质点的位移, λ 和 μ 为拉梅常数和泊松比。

设介质的边界是自由的,即无外力约束。初始条件为介质各质点初始位移为零,无初始速度和加速度。

2.3 数值方法

线性热弹性方程的有限元控制方程可表述为

$$M\ddot{U} + KU = F_{\text{ext}}, \quad (8)$$

其中 M 为质量矩阵, K 为刚度矩阵, U 为位移矢量, \ddot{U} 为加速度矢量, F_{ext} 为有限元的外力作用矢量。对热

弹性体而言,在柱坐标系下,外力作用矢量可表示为 $\int_V B^T D \epsilon_0 dV$, 其中 ϵ_0 为热应变矢量, B^T 为形函数倒数的转置矩阵, D 为材料特性矩阵。用无条件收敛的纽马克(Newmark)时间积分方法求解(8)式。

数值积分的精度取决于时间步长和单元长度。根据先前的研究^[12,14],在保证求解精度下,时间步长选取为: $\Delta t = 1/180f_{\text{max}}$, f_{max} 为所期望的超声波最高频率。有限元单元取4节点的平面单元,采用如下关系以保证能量在连续的两个节点之间传递: $L_e = \lambda_{\text{min}}/20$, 其中 L_e 为单元的长度, λ_{min} 为传播过程中的最小波长。

3 数值计算结果和讨论

3.1 激光和材料参数

金属样品为铝,非金属样品为半透明中性玻璃。样品半径均为3 cm,厚度为5 mm。激光脉冲上升时间为10 ns,激光光束半径为50 μm ,金属样品时激光能量为0.35 mJ;考虑到非金属材料的光穿透效应,材料的温升区域大,非金属样品时激光能量为3.5 mJ。有限元网格大小取值为20 μm 。有限元计算中材料的热物理参数见表1。

表1 铝和中性玻璃的材料参数

Table 1 Properties of aluminum and neutral glass used in the calculation (T_m is the melting point of the material)

Physical properties	Aluminum	Neutral glass
Optical reflectivity R		0.79
Absorptivity	$A(T) = 5.2 \times 10^{-2} + 3 \times 10^{-5}(T - 300 \text{ K})$	
Thermal conductive coefficient K /($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	$249.45 - 0.085T, 300 \text{ K} < T \leq 730 \text{ K}$ $198.47 - 0.014T, T < 730 \text{ K} < T_m$	$1.83 \times 10^{-5}T + 0.012, 300 \text{ K} < T < 800 \text{ K}$ $1.2 \times 10^{-5}T + 0.021, 800 \text{ K} < T < T_m$
Density ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$-0.22T + 2769, 300 \text{ K} \leq T \leq T_m$	2400
Thermal capacity C /($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	$780.3 + 0.488T, 300 \text{ K} \leq T \leq T_m$	840
Poisson's ratio	0.34	0.23
Young's modulus /Pa	6.85×10^{10}	6.0457×10^{10}
Thermal expansion coefficient	2.65×10^{-5}	0.63×10^{-6}

3.2 温度场

3.2.1 金属中的温度场分布

激光超声产生过程中的热膨胀起源于样品吸收激光能量后的温度升高,温度场的精确计算对研究激光超声波的产生非常重要。在考虑了材料参数随温度变化的情况下首先计算了脉冲激光照射铝样品后不同时刻的温度场分布。计算结果表明受辐照区域的温度上升很快,在40 ns左右时温度达到最高,

以后温度下降。图2为0.5 μs 时刻辐照表面附近的温度场分布。由图2可以看出,金属的温度升高区域局限在一个很小的范围内,轴向小于30 μm ,半径方向小于100 μm 。结果表明,由于热扩散,在金属材料表面附近激光作用产生的温度升高和材料的膨胀,均有一很小的轴向深度,金属材料中激光超声力源是一个存在于表面、有一很小轴向深度的力源。

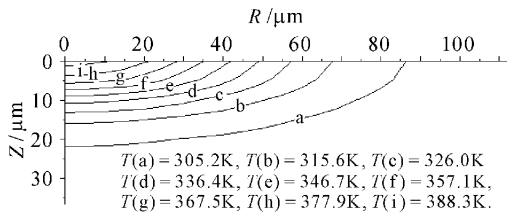


图 2 0.5 μs 时铝的瞬态温度场分布

Fig. 2 Contour plots of transient temperature at 0.5 μs near the heat affected zone in the aluminum plate

3.2.2 非金属中的温度场分布

在考虑材料参数随温度变化的情况下计算了光穿透深度为80 μm时脉冲激光照射非金属样品后不同时刻的温度场分布。图 3 为 0.5 μs 时刻材料受辐照表面下方的温度场分布,由图 3 可以看出,温度升高区域在轴向已经接近260 μm,而半径方向和金属的情况基本相同。数值结果表明,由于光学穿透效应,轴向温升区域比金属材料中大得多。在金属介质中,温度场的形成主要产生于热扩散效应,而非金属介质的温度场产生于热扩散和光穿透效应的共同作用,其中起主要作用的是光穿透效应。温度升高的不均匀产生热膨胀,因此非金属材料中由热膨胀产生的应力场(即激光超声波的力源)在轴向方向有较大的深度,是一个有一定深度和体积的体力源。

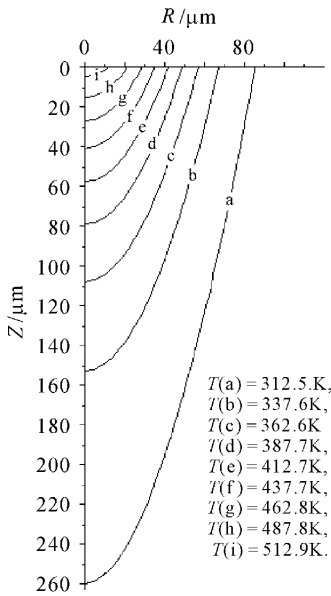


图 3 0.5 μs 时中性玻璃的瞬态温度场分布

Fig. 3 Contour plots of transient temperature at 0.5 μs near the heat affected zone in the neutral glass plate

3.3 激光超声对心波形

3.3.1 金属中的激光超声对心波形

温度升高的不均匀性导致热膨胀,产生瞬态热应力场,进而激发激光超声波。由热弹效应,温度分布不均匀在材料内部产生瞬态应力场分布,径向温度的不均匀(温度梯度)对应于径向应力产生横波,轴向温度的不均匀对应于轴向应力产生纵波^[10]。将温度场的结果作为应力场分析的载荷,计算脉冲激光照射在铝表面时产生的对心波形,如图 4 所示。图中的纵波(L 波)和横波(S 波)特征明显。纵波的到达时间为0.783 μs,横波的到达时间为1.601 μs,对应的纵波和横波的速度分别为 6380 m/s 和 3140 m/s,该数值结果和理论值非常接近^[15]。

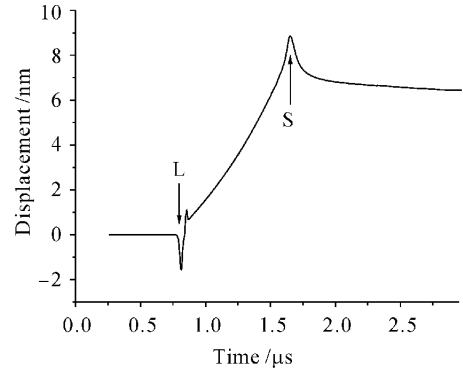


图 4 单铝板的对心波形

Fig. 4 Normal waveform at the epicenter in the aluminum plate

波形中的一个重要特征是前驱小波的存在。金属情况下的前驱小波基本上是为单极负向脉冲(在图 1 所示的坐标系下,负值代表在对心位置处的质点的位移方向为 Z 轴负方向,即向下表面外膨胀)。前驱小波的产生是由于受辐照区域温度升高后介质的急速膨胀所致。材料温度升高后,水平方向(即 R 轴方向)的膨胀由于受到周围未被加热部分的约束而产生水平方向的热应力,在金属材料中该方向的应力和 SCOE 模型的表面正交力偶作用相同;而垂直方向的热膨胀由于上表面是自由的,在温度升高后随即产生了急速膨胀。由于材料的惯性,这个急速膨胀产生一作用于温升区域底部的脉冲压应力。该脉冲力就是金属情况下单极前驱小波的力的来源,其产生的振动向下传播,在下表面激发出负向的前驱小波,该脉冲力的大小和温升区域的温度升高值和体积(对应于质量)等有关^[6]。

3.3.2 非金属中的激光超声对心波形

图 5 是脉冲激光在非金属材料中产生的对心超

声波形。波形中的前驱小波明显为双极波形,该结果和 Edwards 等^[9]对玻璃和单晶硅的激光超声实验中得到的波形特征基本一致。

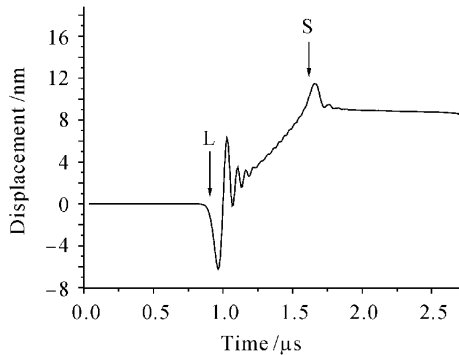


图 5 中性玻璃的对心波形

Fig. 5 Normal waveform at the epicenter in the neutral glass plate

双极波形的出现是由于轴向方向应力作用的位置不同。非金属情况下的前驱小波同样也是由材料被加热后迅速膨胀所产生的在轴向方向的应力激发,但金属时该作用力可近似认为作用于表面。而非金属情况下,由于光学穿透效应,温升区域在轴向方向有一定深度,该脉冲作用力作用于温升区域的底部,所以作用的位置在表面下方一定深度处,其深度和材料的光学穿透深度有关。在轴向方向的脉冲作用力产生的振动向下直接传播产生对心波形中的负向脉冲,而振动向上传播经自由表面反射形成波形中的正向脉冲。

为研究光学穿透深度对前驱小波的影响,进一步计算了在相同的入射光强下不同光学穿透深度时的激光超声对心波形,结果如图 6 所示,图中的光学穿透深度分别为 $20\ \mu\text{m}$, $40\ \mu\text{m}$, $100\ \mu\text{m}$ 。由图 6 可以看出,光学穿透深度越大,前驱小波的幅值和正负

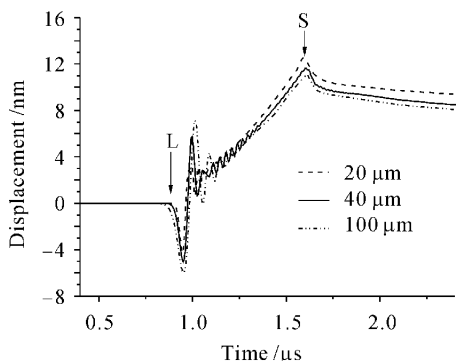


图 6 不同光学穿透深度时的对心波形比较

Fig. 6 Waveforms at the epicenter in the neutral glass plate at different penetration depths

脉冲峰-峰值之间的时间间隔也随之增大。原因在于光学穿透深度越大,对应的温度升高区域的体积和质量(惯性)也将增大,因此由急速膨胀所产生的轴向脉冲作用力随之加大,因而激发出的振动和对应的前驱小波幅值也相应变大。同样,光学穿透深度越大,脉冲作用力作用的深度也越深,反射过程的时间也要加大,所以正负脉冲峰-峰值之间的时间间隔增大。

4 结 论

考虑激光的时间、空间分布和材料的物理参数随温度变化,分析了热扩散和光学穿透效应,建立了激光超声的热弹有限元模型,分别对金属和非金属样品进行了数值计算,得到了两种材料中的温度场分布和激光超声对心波形。结果表明,由于热扩散在金属介质被辐照的表面处激发出位于表面的力源,激发的对心波形的前驱小波为单极波形;对非金属材料由于光学穿透效应,在材料表面下方形成一个有一定深度的体力源,前驱小波也表现为双极波形。前驱小波波形的幅值和脉宽反映了材料的物理性质和参数,特别是热扩散系数和光穿透深度。该研究为利用前驱小波进行金属和非金属的定量检测和无损评价提供了依据。

参 考 文 献

- Zhang Shuyi. New techniques in ultrasound nondestructive evaluation [J]. *International Academic Trends*, 1998, **8**:58~60
张淑仪. 超声无损检测高新技术[J]. 国际学术动态, 1998, **8**:58~60
- Qian Menglu. Laser ultrasound technique and its application [J]. *Shanghai Measurement and Evaluation*, 2003, **30**(1):4~7
钱梦露. 激光超声检测技术及其应用[J]. 上海计量测试, 2003, **30**(1):4~7
- Zhang Xiaorong. Evaluation of composites and nano-structured materials by laser ultrasound [J]. *Applied Acoustics*, 2000, **19**(5):1~9
章肖融. 用激光超声评估复合材料[J]. 应用声学, 2000, **19**(5):1~9
- C. B. Scruby, R. J. Dewhurst, D. A. Hutchins *et al.*. Quantitative studies of thermally generated elastic waves in laser-irradiated metals [J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**(12):6210~6216
- L. R. F. Rose. Point-source representation for laser-generated ultrasound [J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1984, **75**(3):723~732
- Alan F. McDonald. On the precursor in laser-generated ultrasound waveforms in metals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(3):230~232
- Terry Sanderson, Charles Ume, Jacek Jarzynski. Longitudinal wave generation in laser ultrasonics [J]. *Ultrasonic*, 1998, **35**:553~561

8 R. J. Dewhurt, D. A. Hutchins, S. B. Palmer. Quantitative measurements of laser-generated acoustic waveforms [J]. *J. Appl. Phys.*, 1982, **52**(6):4064~4071

9 C. Edwards, T. Stratoudaki, S. B. Palmer. A new thermoelastic source model for non-metals [C]. ed. by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Vol. 22, in *Review of Progress Quantitative Nondestructive Evaluation*, New York: Plenum Press, 2003. 326~332

10 Baiqiang Xu, Zhonghua Shen, Xiaowu Ni *et al.*. Numerical simulation of laser-induced ultrasonic by finite element method [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **95**(4):2116~2123

11 Baiqiang Xu, Zhonghua Shen, Xiaowu Ni *et al.*. Determination of elastic properties of a film-substrate system by using the neural networks [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(25):2109~2115

12 Xu Baiqiang, Ni Xiaowu, Shen Zhonghua *et al.*. Numerical simulation of laser-generated ultrasonic by finite element method in the plate material [J]. *Chinese J. Laser*, 2004, **31**(5):621~625

许伯强,倪晓武,沈中华等. 激光激发板状材料中超声导波的有限元数值模拟[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5):621~625

13 Shen Zhonghua, Xu Baiqiang, Ni Xiaowu *et al.*. Numerical simulation of pulsed induced ultrasound in monolayer and double layer materials [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10):1275~1280

沈中华,许伯强,倪晓武等. 单层和双层材料中的脉冲激光超声数值模拟[J]. *中国激光*, 2004, **31**(10):1275~1280

14 Jijun Wang, Zhonghua Shen, Baiqiang Xu *et al.*. Numerical simulation of laser-generated Lamb wave in transversely isotropic composite material by using the finite element method [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(Suppl.):308~310

15 Joseph L. Rose. *Ultrasonic Waves in Solid Media* [M]. 1st Edition, Cambridge, U. K.: Cambridge University Press, 1999. 24~30



征 订 启 事

《中国激光》增刊

第十七届全国激光学术会议于 2005 年 10 月 19~22 日在四川绵阳富乐山大酒店召开。本次会议由中国光学学会与中国电子学会联合主办。共有 350 多名来自高校、研究所以及公司激光领域的研究人员参加了本次会议。

本次大会共收到论文 330 篇,《中国激光》将其中的优秀论文 126 篇汇编成册,以增刊形式出版了《第十七届全国激光学术会议论文集》,为广大激光工作者提供了一份有价值的参考资料。

按照研究方向,论文集分为激光物理、非线性光学、高能固体激光与超短脉冲激光、新型激光器、激光技术及晶体材料、激光应用、光束传输、激光薄膜及元器件等专栏。较全面地反映了近年来我国激光科学技术研究、应用和产业化的最新成果,显示了激光科学技术对国家十一五规划、国家 863 计划、国家 973 计划、重大项目、国家基金和产业发展等方面的重要作用与贡献。

论文集共计 462 页,进口雅光纸精印,定价 100 元。欢迎订阅。

《光学手册》

这是我国编写的第一本基础性大型光学手册。本书顾问为著名光学专家龚祖同,主编为李景镇。

本书为 16 开,1541 页,定价 100 元。全书有 2700 多个公式,1400 余幅插图和 400 多个数据表格,230 万字。是“一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书”(引自王大珩院士为本书的题词)。本书能使读者在较短时间内全面了解某门光学分科的主要内容,查阅公式、数据省时省力。

电话:021-69918427 电子信箱:gexiaohong@siom.ac.cn
地址:上海 800-211 信箱 邮政编码:201800 联系人:葛晓红