

文章编号: 1001-1455(2006)06-0486-06

钽和 LY12 铝的高压声速测量*

俞宇颖¹, 谭 华¹, 胡建波¹, 戴诚达¹, 陈大年²

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰波物理实验室, 四川 绵阳 621900;

2. 宁波大学力学与材料科学研究中心, 浙江 宁波 315211)

摘要: 应用两种不同的实验装置钽飞片/LY12 铝缓冲层/LiF 窗口和钽飞片/LiF 窗口, 采用逆向碰撞法测量了钽在 110~131 GPa 冲击压力下的纵波声速。实测的钽的声速结果与文献[5]报道的数据有较好的一致性。研究表明, 作为缓冲层的 LY12 铝与 LiF 窗口的阻抗比较接近, 使用缓冲层对钽的声速测量结果没有明显影响。实验测量同时获得了 LY12 铝在 110 GPa 和 131 GPa 冲击压力下的纵波声速。结合文献[4]的数据表明 LY12 铝在 125~150 GPa 冲击压力范围内, 纵波声速随冲击压力的增加逐渐降低至体波声速。

关键词: 爆炸力学; 纵波声速; 逆向碰撞法; 钽; VISAR 技术; LY12 铝

中图分类号: O382.3

国标学科代码: 130·3520

文献标志码: A

1 引言

高压声速研究是冲击波物理的重要内容, 声速的测量在材料的高压本构研究中有重要意义^[1~2]。谭华^[3]较全面总结了高压声速测量相关技术。目前声速的测量通常采用光分析技术^[4~5]和加窗 VISAR 技术^[6]。光分析技术适用的冲击压力范围较宽广, 但需使用多块样品, 实验装置较复杂, 而且常常得不到体积声速。相比而言, 加窗 VISAR 技术装置简单, 而且可以对卸载过程或再加载过程进行连续测量, 但对窗口材料在冲击压缩下的透明性以及样品的阻抗匹配方面要求较高。目前使用的窗口材料主要是单晶 LiF, 阻抗与 LY12 铝接近, 在低于 200 GPa 的冲击压缩下能够保持良好的透明性^[7]。在对称碰撞条件下, 文献[8]中已对 LY12 铝在 20~71 GPa 冲击压力下的高压声速进行了测量, 获得了较高精度的实验结果。但由于 LY12 铝阻抗较低, 在对称碰撞条件下, 依靠目前的气炮加载能力难以进行 100 GPa 冲击压力以上的声速测量。另外, 多数的金属材料与 LiF 窗口的阻抗并不匹配, 需采用逆向碰撞法即以样品作为飞片直接撞击窗口, 以减少冲击波在样品与窗口界面(简称为样品/窗口界面, 下同)反射产生的反射波对声速测量的干扰。

本文中对逆向碰撞法测量金属高压声速的基本原理进行分析。以单晶 LiF 为窗口, LY12 铝作为缓冲层, 采用逆向碰撞法测量钽的高压声速, 同时获得 LY12 铝在 100 GPa 以上冲击压力下的声速。

2 实验方法

热力学声速是小扰动的传播速度。材料在动高压下的声速测量是通过确定冲击波后的追赶稀疏波的传播速度来获得的。利用加窗 VISAR 技术测量动高压下的声速就是通过测量稀疏波到达样品/窗口界面时引起的界面粒子速度变化来确定稀疏波在样品中的传播时间, 进而计算声速。逆向碰撞法实验装置如图 1 所示, 将待测样品(金属钽)作为飞片, 直接撞 LiF 窗口。窗口前方通常加一层与窗口材料阻抗接近的缓冲层, 以保护窗口上的镀膜层。铝的阻抗与 LiF 窗口非常接近, 选用 LY12 铝合金作为缓冲层。当钽飞片与缓冲层发生碰撞时($t=t_0$), 在飞片中传入左行冲击波的同时, 在缓冲层中传入右行冲击波(见图 2)。由于 LY12 铝的阻抗略高于 LiF 窗口, 当缓冲层中的右行冲击波到达它与 LiF 窗口界

* 收稿日期: 2005-10-27; 修回日期: 2006-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(10232040, 10672149); 中国工程物理研究院基金项目(2002-4210501-1-03)

作者简介: 俞宇颖(1976—), 男, 博士研究生。

面时 ($t = t_1$)，界面粒子速度起跳。在向 LiF 窗口中传入右行冲击波的同时，向缓冲层反射一左行弱稀疏波。该稀疏波到达钽/LY12 铝界面时，由于钽比铝的阻抗高，将反射一右行稀疏波。该稀疏波到达 LY12 铝/LiF 窗口界面时 ($t = t_2$)，将使界面粒子速度稍有降低。另一方面，当飞片中的左行冲击波到达飞片后表面时，立即反射右行中心稀疏波。当该中心稀疏波到达 LiF 窗口界面时 ($t = t_3$)，将使界面粒子速度再次下降。如图 2 所示，从 VISAR 测得的缓冲层/窗口界面粒子速度剖面的两个速度峰值平台可以确定上述各特征时刻，进而计算声速。

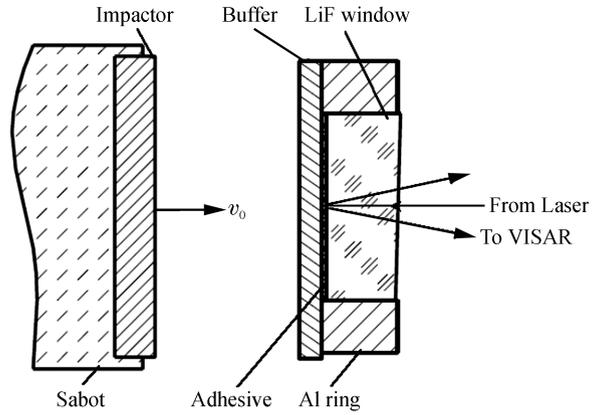


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental set-up

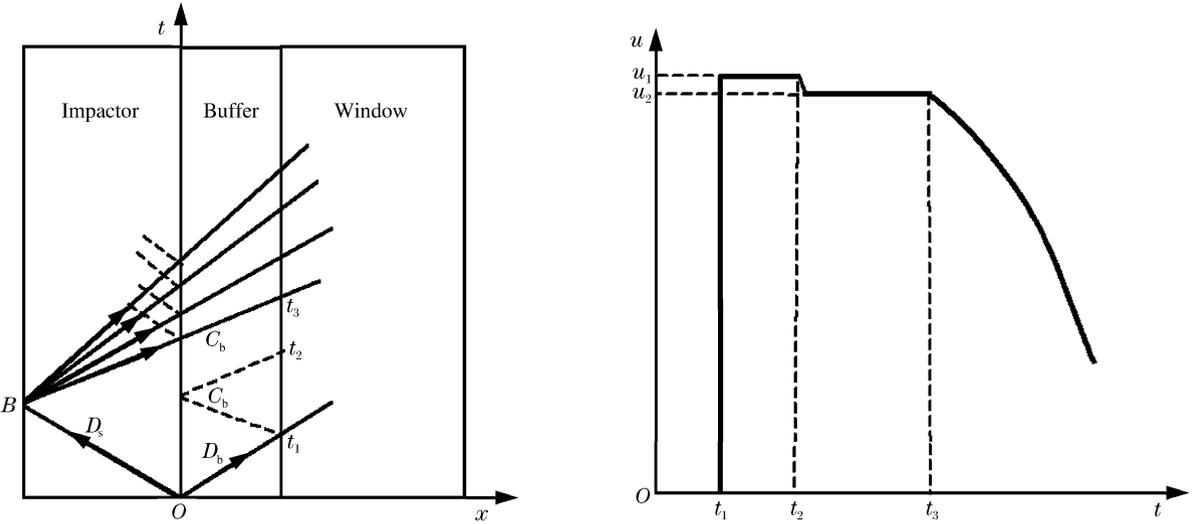


图 2 逆向碰撞法测量声速示意图

Fig. 2 Schematic of sound velocity measurement using reverse-impact method

由波系作用图 2 所示的几何关系可得

$$\Delta t = t_3 - t_1 = h_s/D_s + h_s/C_s + h_b/C_b - h_b/D_b \tag{1}$$

式中： D 为冲击波速度， C 为 Lagrange 声速， h 为厚度。下标 s 和 b 分别表示飞片（样品钽）和缓冲层（LY12 铝）。由此可得钽飞片的 Lagrange 纵波声速

$$C_s = \frac{h_s}{\Delta t + h_b/D_b - h_s/D_s - h_b/C_b} \tag{2}$$

式中： C_b 为 LY12 铝缓冲层的 Lagrange 声速，可以通过前面叙述的反射稀疏波在缓冲层中来回反射的时间来确定

$$C_b = 2h_b/(t_1 - t_2) \tag{3}$$

此处 C_b 的计算忽略了稀疏波在缓冲层来回反射引起的压力变化对声速测量的影响。由于 LY12 铝与 LiF 阻抗比较接近，计算表明在百吉帕冲击压力下稀疏波在缓冲层来回反射引起的压力变化小于 3%，大约与目前精密物理实验测量的冲击波压力的不确定度相当，因此可以忽略它对声速测量的影响。

对于无缓冲层的情况，即 $h_b = 0$ ，由公式(2)得

$$C_s = \frac{h_s}{\Delta t - h_s/D_s} \tag{4}$$

以上公式是基于飞片和缓冲层中形成单一冲击波情况下得到的,即要求冲击波速度大于弹性前驱波速度。对于相对较低冲击压力下形成双波结构的情况,应用类似分析方法,T. S. Duffy 等^[6]已给出了结果。

实验室坐标系中的 Euler 声速 c_s 与实验测量的 Lagrange 声速 C_s 的关系为

$$c_s = C_s \rho_0 / \rho_h \quad (5)$$

式中: ρ_0 为材料的初始密度, ρ_h 为冲击压缩下的密度。

由波系作用图 2 可以看出,逆向碰撞方法有效地避免了传统的正向碰撞方法中(即将待测样品钽直接置于缓冲层 LY12 铝前方或直接置于窗口前方)初始入射冲击波在样品/缓冲层界面或样品/窗口界面的反射波对来自后界面的追赶稀疏波的干扰作用,提高了声速测量精度。但是由于追赶稀疏波本身在飞片/缓冲层或飞片/窗口界面的反射仍然不可避免,因此使用单样品 VISAR 测量技术难以对卸载路径的声速进行精确测量,但是可以采用 L. C. Chhabildas 等^[9]提出的双台阶样品方法使反射波的干扰作用得到某种程度的抵消,实现沿着卸载路径的声速测量。

3 实验结果与分析

在二级轻气炮上进行了 3 发实验,其中 2 发在 LiF 窗口前粘接 LY12 铝作为缓冲层,另一发则无缓冲层,作对比实验。材料的状态方程参数和冲击实验参数分列于表 1 和表 2。表 2 中 v_0 为冲击速度, p_h 为钽样品中的峰值压力, c_s 为钽中的欧拉声速, c_b 为 LY12 铝中的欧拉声速,

表 1 状态方程参数^[10]

Table 1 Parameters of Grüneisen equation of state^[10]

材料	$\rho_0 / (\text{g/cm}^3)$	$c_0 / (\text{km/s})$	λ	γ_0
LY12 Al	2.785	5.37	1.29	2.0
Ta	16.654	3.43	1.19	1.6
LiF	2.638	5.148	1.358	1.63

表 2 实验参数及声速结果

Table 2 Experimental conditions and measured Euler sound velocities in Ta and LY12 Al

实验号	$v_0 / (\text{km/s})$	p_h / GPa	Ta Impactor/ mm×mm	LY12 Al Buffer/ mm×mm	LiF Window/ mm×mm	$c_s / (\text{km/s})$	$c_b / (\text{km/s})$
1	5.150	110.0	∅27×2.032	∅33×1.120	∅25×11	5.55±0.15	11.67±0.16
2	5.812	131.0	∅27×1.968	∅33×1.151	∅25×11	5.86±0.15	11.34±0.25
3	5.414	114.1	∅27×2.178		∅25×11	5.76±0.15	

图 3 给出了实验 1 和 2 两发实验的 LY12 铝缓冲层/窗口界面粒子速度剖面。从图中清楚地显示了两个速度峰值平台及相应的特征时刻 t_1 , t_2 和 t_3 。图 4 为实验 3 中钽飞片直接冲击 LiF 窗口情况得到的 VISAR 干涉条纹。可能 LiF 窗口上的薄膜受到飞层前方的前冲气体的破坏,获得的 VISAR 信号的信噪比较低,未能处理成粒子速度剖面信号。但从图中可以确定冲击时刻 t_1 和稀疏波到达的时刻 t_3 。在直接冲击的情况下,有关实验技术还有待进一步研究。

由测得的冲击速度及各材料的状态方程参数可以确定其 Hugoniot 状态。在第一发实验中,钽飞片和 LY12 铝缓冲层中的冲击波速度分别为 5.01 km/s 和 10.44 km/s,均已大于钽和 LY12 的弹性前驱波速度 4.16 km/s 和 6.36 km/s。因此可以应用公式(2)~(5)来计算声速。钽和 LY12 铝的欧拉声速实验结果列于表 2。

图 5 给出了钽在不同冲击压力下的欧拉声速,同时给出了 J. M. Brown 等^[5]应用光分析法获得的钽的声速以及按有限应变理论计算的纵波声速^[11]。从图中可以看到,应用逆向碰撞法得到的 3 发实验结果与 J. M. Brown 等^[5]的结果较一致。同时也表明由于 LY12 铝与 LiF 窗口阻抗比较接近,LY12 铝作为缓冲层对钽的声速测量结果没有明显影响。同样应用加窗 VISAR 技术,通过对称碰撞实验,已经测

量了 LY12 铝在 20~71 GPa 冲击压力下的高压声速。但因 LY12 铝的阻抗较低,而目前二级轻气炮加载速度有限,难以对 100 GPa 以上冲击压力下的声速进行测量。此实验有效克服了冲击压力的局限。

应用逆向碰撞法得到的 LY12 铝的纵波声速见图 6。从图中可以看到,本文的结果与应用 VISAR 技术(对称碰撞法^[8])和 R. G. McQueen 等^[4]用光分析法测量得到的结果吻合较好。图中同时给出了按有限应变理论计算的纵波声速和体波声速^[11]和 Grüneisen 状态方程计算的体波声速^[12]。图 6 还清楚地表明,LY12 铝在冲击熔化压力区间(125~150 GPa),纵波声速并不等于体波声速,而是逐渐接近体波声速。这也意味着达到初始冲击熔化压力时,剪切模量并没有突变为零,而是逐渐降低直至完全熔化时才为零。从图 5 和图 6 中还可以看出,随着冲击压力的增加有限应变理论与实验结果的偏离越来越大。因此将静高压下超声声速测量结果用于构建动高压本构方程时须作较大的修正。

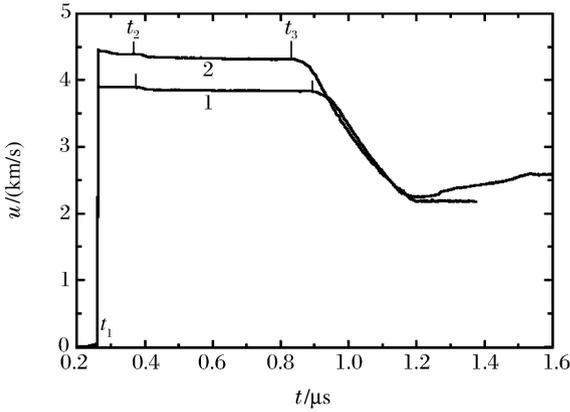


图 3 钽飞片撞击 LY12 铝缓冲层/LiF 窗口的实验测量结果

Fig. 3 VISAR measured particle velocity profiles at buffer (LY12 Al)/LiF window interface

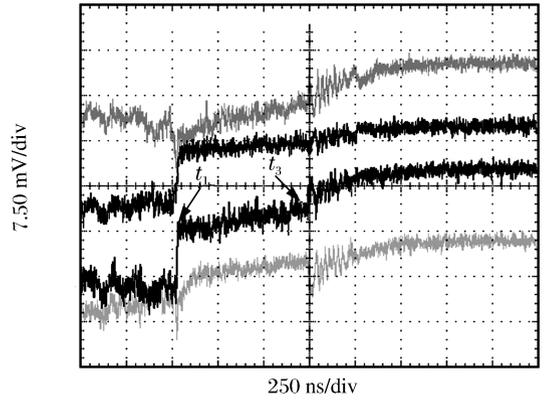


图 4 钽飞片直接撞击 LiF 窗口的实验测量 VISAR 条纹记录

Fig. 4 VISAR fringe records at Ta/LiF window interface

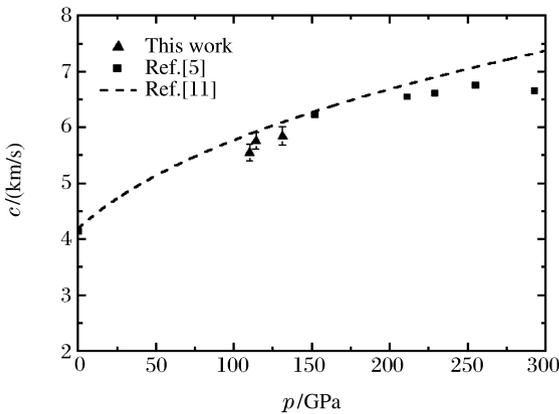


图 5 不同冲击压力下钽的高压声速结果
Fig. 5 Sound velocities in Ta as a function of pressure

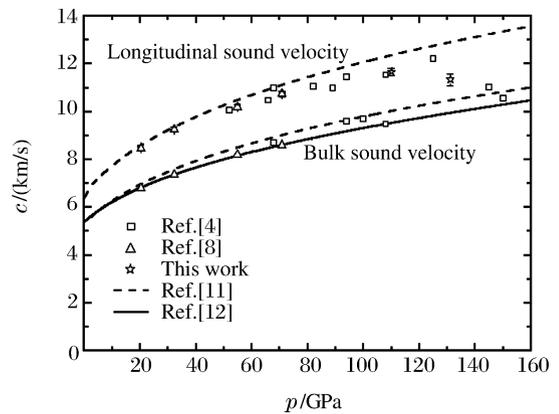


图 6 不同冲击压力下 LY12 铝的高压声速结果
Fig. 6 Sound velocities in LY12 Al as a function of pressure

4 结 论

(1)以单晶 LiF 为窗口,采用逆向碰撞法测量了钽在 110~131 GPa 冲击压力下的纵波声速。实验结果与 J. M. Brown 等^[5]的数据有较好的一致性,实验结果的不确定度小于 3%。通过对有无缓冲层的 3 发实验结果的比较表明,由于 LY12 铝与 LiF 窗口的阻抗比较接近,在逆向撞击法中采用缓冲层对钽的声速测量结果没有明显影响,但对提高 VISAR 实验的信噪比有益。

(2)获得了 LY12 铝在 110 GPa 和 131 GPa 冲击压力下的纵波声速。结合 R. G. McQueen 等^[4]的

数据表明 LY12 铝在初始冲击熔化压力 125 GPa 和完全熔化压力 150 GPa 之间,纵波声速随冲击压力的增加逐渐降低至体波声速。

(3)以上数据为进一步开展动高压本构研究提供了基础。

参考文献:

- [1] 张江跃,谭华,虞吉林. 动高压拉格朗日声速的测定及其应用[J]. 高压物理学报,1999,13(1):42-49
ZHANG Jiang-yue, TAN Hua, YU Ji-lin. The determination of Lagrangian sound velocity for 93W alloy under shock loading and its applications[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1999,13(1):42-49.
- [2] Asay J R, Chhabildas L C. Determination of the shear strength of shock compressed 6061-T6 aluminum[A]. Meyers M M, et al. Shock Waves and High-strain-rate Phenomena in Metals[M]. New York: Plenum, 1981:417-431.
- [3] 谭华. 高压声速测量与卸载路径[J]. 爆轰波与冲击波,2003(2):60-70.
- [4] McQueen R G, Fritz J N, Morris C E. The velocity of sound behind strong shock waves in 2024 Al[A]. Asay J R, et al. Shock Waves in Condensed Matter-1983[C]. Amsterdam: North-Holland, 1984:95-98.
- [5] Brown J M, Shaner J W. Rarefaction velocities in shocked tantalum and the high pressure melting point[A]. Asay J R, et al. Shock Waves in Condensed Matter-1983[C]. Amsterdam: North-Holland,1984:91-94.
- [6] Duffy T S, Ahrens T J. Compressional sound velocity, equation of state, and constitutive response of shock-compressed magnesium oxide[J]. Journal of Geophysical Research, 1995,100(B1):529-542.
- [7] Furnish M D, Chhabildas L C, Reinhart W D. Time-resolved particle velocity measurement at impact velocities of 10 km/s[J]. International Journal of Impact Engineering, 1999,23:261-270.
- [8] YU Yu-ying, TAN Hua, DAI Cheng-da, et al. Sound velocity and release behaviour of shock-compressed LY12 Al [J]. Chinese Physics Letter, 2005,22(7):1742-1745.
- [9] Chhabildas L C, Asay J R, Barker L M. Shear strength of tungsten under shock and quasi-isentropic loading to 250 GPa[R]. SAND88-0306.
- [10] Marsh S P. LASL Shock Hugoniot Data[M]. Berkeley: University of California Press, 1980.
- [11] Duffy T S, Ahrens T J. Sound velocity at high pressure and temperature and their geophysical applications[J]. Journal of Geophysical Research, 1992,97(B4):4503-4520.
- [12] 经福谦. 实验物态方程导引[M]. 北京:科学出版社,1999.

Measurements of sound velocities in shock-compressed tantalum and LY12 Al

YU Yu-ying^{*1}, TAN Hua¹, HU Jian-bo¹,
DAI Cheng-da¹, CHEN Da-nian²

(1. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;*

2. *Mechanics and Materials Science Research Center, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China)*

Abstract: Reverse-impact method used to measure the high-pressure sound velocity in shock-compressed metals was described. Two reverse-impact set-ups, Ta/LY12 Al buffer/LiF window and Ta/LiF window, were used to measure the sound velocity in shock-compressed Ta over the range of 110~131 GPa. Measured longitudinal sound velocities in Ta are consistent with the data reported by Brown J M, et al. No significant effects of LY12 Al buffer on the measurement uncertainty of sound velocity

were found because of little difference in impedance between LY12 Al and LiF. The longitudinal sound velocities of LY12 Al buffer were determined at 110 GPa and 131 GPa. The data combining with those reported by McQueen R G show that the longitudinal sound velocities in LY12 Al decrease gradually to bulk sound velocities with pressure over the range of 125~150 GPa.

Key words: mechanics of explosion; sound velocity; reverse-impact method; Ta; VISAR technique; LY12 Al

* Corresponding author: YU Yu-ying

E-mail address: yyy1210185@163.com

Telephone: 0816-2485104

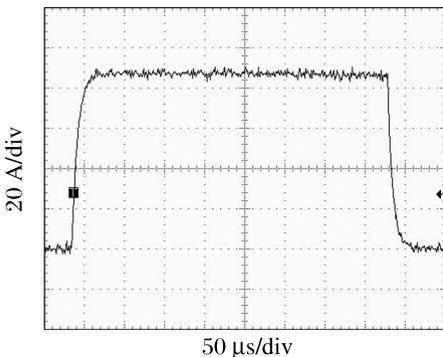
LME150 型激光二极管驱动电源介绍

LME150 型激光二极管驱动电源(LME150 型程控高功率脉冲信号源)用于驱动激光二极管,是二极管泵浦固体激光器(DPL)研究中的重要设备。由于准连续量子阱激光二极管是一种低阻、快速响应器件,驱动电源任何瞬态过流、过压都会导致器件损坏。为了减轻热冲击,避免器件内部因温度梯度过高而可能引起的热应力破坏,同时也为了消除快速电流波形可能引起的反射、振荡现象,驱动电流最好是前后沿比较缓慢的梯形波。

采用微处理器控制 D/A 变换器产生一个宽度频率均可精确调节的梯形电压波驱动大功率模块,输出稳定的电流脉冲。脉冲前后沿过渡平缓、无振铃和过冲。专配的电源滤波器抑制来自电源的干扰,专用的输出线和输出短路开关抑制开关的瞬态冲击,具有限流功能的专门驱动电路可为激光二极管提供可靠的驱动电流脉冲。输出脉冲电流 0~150 A,脉宽 20~400 μs 、重复频率 1~1 000 Hz。

该项目在《二极管泵浦固体激光器信标光源研究》高科技项目中得到应用,脉冲电流实时显示,抑制干扰性能强,锁式开关,键入式操作。技术先进,在国内具有领先水平,1997 年《LME150 型程控高功率脉冲信号源》荣获国防科工委科技进步三等奖。

新研制 LDD1530 型准连续二极管驱动电源,工作电压可达 300 V 连续可调。



LDD1530 型输出电流波形图



LME150 型激光二极管驱动电源

(中国工程物理研究院流体物理研究所提供)