

文章编号: 0258-7025(2007)06-0743-05

利用高功率激光驱动冲击波进行金材料 状态方程实验测量

黄秀光¹, 傅思祖¹, 舒桦¹, 叶君建¹, 吴江¹, 何钜华¹, 马民勋¹, 顾援¹, 罗平庆², 龙滔²

(¹ 上海激光等离子体研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)
² 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘要 利用“神光-II”装置第九路输出的倍频激光, 采用直接驱动方式进行了金(Au)材料状态方程(EOS)实验。首先采用透镜阵列均匀辐照技术对输出的倍频激光进行了光束匀滑, 平面靶实验结果显示冲击波具有良好的平面性, 间接表明靶面上驱动激光强度的空间分布比较均匀。同时采用多台阶靶技术, 对驱动冲击波的传播稳定性进行了实验测量, 结果表明冲击波在实验测试的靶厚度范围内都是稳定传播的, 实验结果与数值模拟结果也符合得较好。在此基础上, 采用阻抗匹配方法, 实验测量了金材料的状态方程, 在金材料中获得了高达2.7 TPa的冲击压强, 冲击波速度测量相对扩展不确定度达2% ($K=2$), 并将实验数据与已有实验数据及状态方程模型进行了比较。

关键词 激光技术; 状态方程; 冲击波; 平面性; 稳定性

中图分类号 O 521⁺.2 **文献标识码** A

Experimental Measurements on Equation of State of Gold by Using High Power Laser Driving Shocks

HUANG Xiu-guang¹, FU Si-zu¹, SHU Hua¹, YE Jun-jian¹, WU Jiang¹,
HE Ju-hua¹, MA Min-xun¹, GU Yuan¹, LUO Ping-qing², LONG Tao²

(¹ National Laboratory on High Power Laser and Physics,
Shanghai Institute of Laser Plasma, Shanghai 201800, China)
² Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract Equation of state (EOS) experiments were performed using a double-frequency (2ω) laser pulse, which exported from the ninth beam of “SG-II” laser facility. The ninth laser beam was smoothed by lens-array (LA) uniform illumination technique to generate a flat-top intensity distribution at the target plane and planar shock fronts in targets, which was validated by the plane-target experiments. The shockwave stabilities were experimentally measured by the multi-step target technique. The results showed that the shocks were steady enough during the target thickness range in which the shock velocity was measured. Also, the results were consistent with the numerical simulation results. On this base, the Au EOS was measured by using the impedance-matching technique. Shock pressure higher than 2.7 TPa was achieved in Au, and the relative expanded uncertainties of the measured shockwave velocity were 2% ($K=2$). Moreover, the experimental data were compared with existing experimental data and EOS models.

Key words laser technique; equation of state; shock wave; planarity; stability

1 引言

研究物质在太帕(TPa)以上高压下的状态方程

(EOS)是现代物理许多领域都非常感兴趣的课题, 特别在惯性约束聚变(ICF)、天体物理、星际物理、

收稿日期: 2006-10-24; 收到修改稿日期: 2007-01-29

基金项目: 国家 863 计划(2005AA843030)和中国国防科技预研(42602060205)资助项目。

作者简介: 黄秀光(1970—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事激光状态方程方面的实验研究。

E-mail: huangxiuguang@sohu.com

地球物理、高密度等离子体及材料研究等许多学科领域中都具有重要的科学运用价值。20世纪90年代以前,借助于地下核爆炸获得了一些材料在太帕压强范围的少量状态方程数据^[1,2],而如今已全面禁止核试验,因此通过核爆炸获得状态方程数据已较为困难。近三十年来,随着高功率激光器的建立和不断完善,开辟了一条在实验室利用高功率激光直接或间接驱动冲击波进行材料高压状态方程研究的技术途径。激光驱动冲击波压强已从最初的0.2 TPa^[3]发展到近几年的几个太帕^[4,5],甚至75 TPa^[6]。但由于早期激光驱动的冲击波质量不好,以及相应的诊断技术滞后,使得获得的材料状态方程数据精度不高^[7,8],限制了其在各领域的应用。但随着激光技术的发展,激光驱动冲击波质量日益提高,基本满足状态方程实验对冲击波平面性、稳定性和干净性的要求;而且诊断设备的时空分辨率也在不断提高,使得实验数据的精度不断提高^[9]。激光状态方程实验研究已成为实验室研究材料高压(特别是太帕以上)状态方程的重要途径。

在惯性约束聚变研究领域,高Z材料金(Au)是一种关键而重要的材料,它被用来制作黑腔。同时,在状态方程研究领域,它也可能被用作高Z标准材料。因此,Au材料的状态方程是非常重要的。与铝(Al)、铜(Cu)、铅(Pb)等材料不同,Au没有在核爆驱动实验中进行过研究,因此,在20世纪90年代中期以前,Au材料状态方程测量的最高压强只有0.58 TPa^[10]。在激光状态方程实验中,Au材料中的冲击压强达3.5 TPa^[11],甚至达到10 TPa^[12],但冲击波速度测量精度有待提高。

本文主要介绍在“神光-Ⅱ”高功率激光装置上,采用倍频激光直接驱动方式和阻抗匹配测量方法^[13]进行Au材料高精度状态方程实验测量的情况。

2 实验排布与条件

实验是在高功率激光物理国家实验室的“神光-Ⅱ”装置上进行的,实验排布如图1所示。该装置第九路输出的倍频激光($\lambda_L = 0.527 \mu\text{m}$,半峰全宽(FWHM) τ_L 为2.2 ns,能量 E_L 为400~2500 J),经透镜列阵(LA)和非球面主透镜组合聚焦,在靶面形成强度均匀的六角形光斑(长轴宽为1200 μm ,短轴宽为840 μm)。激光辐照靶产生冲击波,当冲击波到达靶背面时,由于冲击加热,靶背面温度很高,可达

几千甚至几万度,辐射出很强的可见光,甚至紫外光;靶背面的冲击加热发光信号经组合放大成像镜成像在可见光条纹相机的入射狭缝上,被条纹相机时空分辨记录。为了保护成像镜及条纹相机,在它们前面分别插入保护玻璃片及衰减滤光片。成像镜放大倍数为11.8 \times ,空间分辨率好于2 μm 。条纹相机的时间分辨率为12.0 ps(对应于2 ns量程档)。

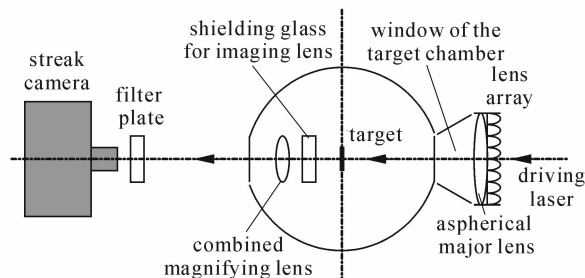


图1 实验排布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

分别以Al,Cu作标准材料,Au为待测材料,测量Au的冲击绝热线。采用单元体精密粘贴技术自行研制了Al-Au,Cu-Au阻抗匹配靶,材料密度均达到其各自的正常固体密度。靶台阶厚度采用Wyko NT1100白光干涉仪进行测量,仪器测量分辨率达0.1 nm。所有样品表面均方根(RMS)粗糙度均小于50 nm。

3 实验结果与讨论

3.1 冲击波平面性

为了得到高精度的状态方程实验测量数据,驱动冲击波必须是平面的、稳定的和干净的。

激光直接驱动实验中,入射激光在同一时刻聚焦辐照到靶面产生冲击波,靶面各处的冲击波压强取决于该点处的激光辐照强度,强度越高,压强越大,相应的冲击波速度也越快,靶中传播一段距离后,波阵面就越超前。因此,要获得平面冲击波,在实验观测范围内,靶面激光辐照强度的空间分布必须是均匀的。然而,即使入射光束为理想的高斯光束或均匀的平面波,使用通常的聚焦光学系统所得到的焦斑的光强分布也是很不均匀的,不能形成平面冲击波,必须对光束进行改造,实现对靶面的均匀辐照。“神光-Ⅱ”装置第九路上继续采用透镜列阵均匀化技术^[14,15]来进行光束匀滑。根据透镜列阵均匀化原理和第九路激光条件,并参考“神光-Ⅱ”装置八路上透镜列阵的设计经验与结果^[16,17],优化设

计了一套透镜列阵均匀化系统,其主要参数为:波长 $\lambda_l = 0.527 \mu\text{m}$;主透镜焦距 $F = 1575 \text{ mm}$;小透镜焦距 $f = 72988 \text{ mm}$;六角形小透镜长轴 $d = 55.61 \text{ mm}$,短轴 $d' = 38.82 \text{ mm}$,顶角 $\theta = 108.91^\circ$;焦斑尺寸长轴 $\delta_x = 1200.0 \mu\text{m}$,短轴 $\delta_y = 837.7 \mu\text{m}$;菲涅耳数 $F_n = 20.0$;衍射调制周期长轴方向 $\Delta x = 20.0 \mu\text{m}$,短轴方向 $\Delta y = 43.0 \mu\text{m}$ 。

激光状态方程实验中,主要用条纹相机来对靶背冲击发光信号作时空分辨记录。平面靶背面冲击发光信号前沿的平整度反映了冲击波的平面性,用发光信号各空间位置的前沿到达时刻起伏的标准偏差 δ_{RMS} 来衡量, δ_{RMS} 越小,平面性越好,间接说明靶面辐照激光强度空间分布越均匀。利用这套透镜列阵系统形成的大能量均匀光斑辐照 $30 \mu\text{m}$ Al 平面靶,图 2 给出了条纹相机记录下的靶背面冲击发光信号图像,其平面范围为 $800 \mu\text{m}$,时间起伏 δ_{RMS} 为 3.83 ps ,而冲击波在 $30 \mu\text{m}$ Al 平面靶中的渡越时间为 1.5 ns ,这说明其平面性是非常好的。结果表明,激光通过这套透镜列阵均匀化系统后,在 Al 平面靶中产生的冲击波具有很好的平面性,也间接证明靶面激光强度分布是比较均匀的,能满足精密状态方程实验对冲击波平面性的要求。

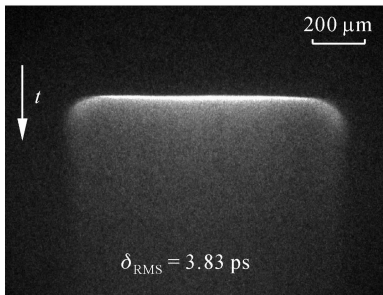


图 2 $30 \mu\text{m}$ Al 平面靶背冲击发光信号图像
Fig. 2 Shock luminescence from rear surface of $30 \mu\text{m}$ aluminum plane target

3.2 冲击波稳定性

采用阻抗匹配法测量 Au 材料的冲击绝热线,测量的物理量是标准材料与待测材料中的冲击波速度,它是通过测量冲击波渡越台阶(厚度已知)的时间来计算得到的,这就要求冲击波在台阶中传播必须是稳定的(或者说是匀速的)。激光直接驱动冲击波的传播特性主要取决于激光脉冲的时间波形,因此,通过对激光波形的时间整形^[18,19]可以控制冲击波的传播特性。理论上讲,当激光波形为方波或梯形波时,对激光状态方程实验最有利。“神光-II”装

置第九路采用的是变阻抗微带传输线技术^[20],原则上可以实现对激光波形的任意整形。实验时,第九路激光实际输出波形为 2.2 ns 的近梯形波,平顶部分有一定的起伏(如图 3 所示)。

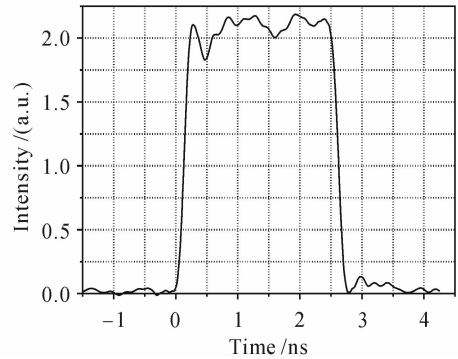


图 3 神光 II 第九路倍频激光脉冲波形
Fig. 3 Typical oscilloscope trace for the 2ω pulse of the ninth beam of SG-II



图 4 多台阶靶结构示意图
Fig. 4 Schematic configuration of multi-step target

采用多台阶靶方法(如图 4 所示)来实验考察冲击波的稳定性,与曾经采用过的斜面靶相比^[7],它不但可以考察冲击波在单一介质中的传播稳定性情况,而且可以考察冲击波在两种不同介质中的传播稳定性情况,更能反映阻抗匹配靶的实际情况。

为了考察目前激光脉冲波形条件下(2.2 ns ,近梯形波),冲击波在 Al 和 Al-Au 阻抗匹配靶中的传播情况,以 Al 作基底,分别进行了 Al 和 Au 四台阶靶实验。图 5(a)是其中一发 Al 四台阶靶实验的记录图像,经过数据处理,得到图 5(b)所示的处理结果。冲击波速度平均值为 20.950 km/s ,相对不确定度小于 0.5% ,线性相关系数为 0.99996 。结果表明,冲击波在 Al 材料中传播 $45 \mu\text{m}$ 后,仍然是非常稳定的。受靶研制能力和相机扫程限制,冲击波在 Al 材料 $45 \mu\text{m}$ 以后的传播情况未进行实验测量。Au 四台阶靶实验记录图像类似。结果表明,在 Al 基底厚度约 $30 \mu\text{m}$ 情况下,冲击波在 Au 台阶中传播距离为 $10.5 \mu\text{m}$ 时,仍是比较稳定的,而当传播距离为 $15.0 \mu\text{m}$ 时,冲击波速度开始衰减。在目前激光

条件和 Al 基底厚度(30 μm)下,理论数值模拟结果表明冲击波在 Au 台阶中稳定传播的距离为15 μm ,实验结果与之比较吻合。实验中,Al-Au 阻抗匹配靶的设计参数是 Al 基底厚度为30 μm ,Al 台阶厚度为15 μm ,Au 台阶厚度 7~8 μm 。而对 Cu-Au 阻抗匹配靶,Cu 基底厚度为 25 μm ,Cu 台阶厚度为 10 μm ,Au 台阶厚度 7~8 μm 。多台阶靶实验结果表明,这样的靶参数设计比较合理。

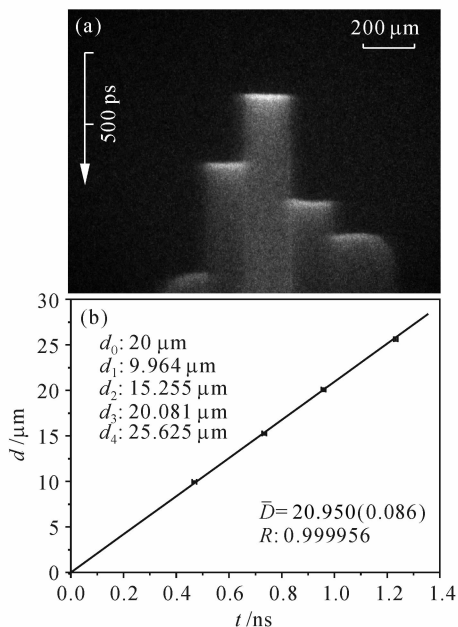


图 5 Al 四台阶靶实验结果

(a) 实验记录图像;(b) 实验数据处理结果

Fig. 5 Experimental results of aluminum four-step target

(a) experimental image recorded by streak camera;

(b) calculating result from the experimental image

3.3 金属材料冲击绝热线实验测量

分别以 Al 和 Cu 作标准材料,Au 为待测材料,进行 Al-Au 和 Cu-Au 阻抗匹配靶实验,测量了 Au 的冲击绝热数据。图 6 是条纹相机时空分辨记录的一发 Al-Au 阻抗匹配靶实验的靶背面冲击发光信号图像。图中,从上到下是时间扫描方向;从左到右是空间分辨方向;中间是 Al 基底窄槽后表面冲击加热发光信号,左、右两侧分别是 Al 台阶和 Au 台阶后表面的冲击加热发光信号,信号清晰,且平面性很好。用条纹相机的数据采集软件系统可以得到三个发光区信号强度半高值对应的平均时刻,各台阶对应的时刻与基底对应的时刻之差,就是冲击波在各台阶中的渡越时间。根据实验前测定的台阶厚度,进而求出冲击波在各台阶中传播的平均速度。这样,在一发实验中,可得到一对冲击波速度,即标

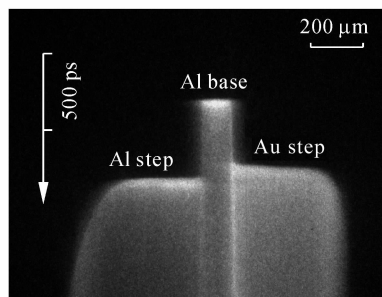


图 6 Al-Au 阻抗匹配靶背冲击发光信号图像

Fig. 6 Shock luminescence from rear surface of Al-Au impedance-matching target

准材料 Al(或 Cu)和待测材料 Au 中的冲击波速度。根据阻抗匹配原理^[13],就可求出待测材料 Au 中的粒子速度和冲击波压强,从而得到 Au 材料冲击绝热线上的一个点。

在激光状态方程实验中,冲击波速度的测量误差主要来源于:1) 靶台阶高度的测量误差及样品表面粗糙度的影响;2) 靶背冲击波发光时间拟合误差,包括条纹相机的噪声、冲击波空间的非平面性等;3) 白光干涉仪及条纹相机的分辨率及标定误差;4) 冲击波的衰减(即不稳定性)引起的误差,以及预热引起的样品密度变化带来的误差等。

在 Al-Au 阻抗匹配实验中,获得了冲击波压强在 0.48~2.71 TPa 范围的 Au 材料的冲击绝热数据;而在 Cu-Au 阻抗匹配实验中,相对 Al 与 Au 的阻抗差别,Cu 与 Au 的阻抗差别更小一些,冲击波从 Cu 材料传播到 Au 材料的增压效果也要小一些,因此,获得的 Au 材料冲击绝热数据的冲击波压强范围要低一些(0.59~1.24 TPa)。两类实验中冲击波速度测量相对扩展不确定度为 $\pm 2\%$ (置信因子 $K = 2$)。图 7 给出了本次实验结果与其他实验结果及理论状态方程模型的比较。图中 Koenig 及

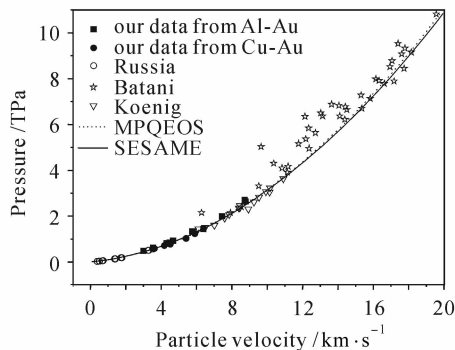


图 7 Au 材料冲击绝热线 P-u 图

Fig. 7 P-u graph of Au shock adiabetic line

Batani 实验数据也是采用激光驱动及阻抗匹配方法获得的,而且都是采用 Al 作标准材料,Au 材料中冲击压强最高达 10 TPa,Au 材料中的冲击波速度测量误差 $\pm 6.0\% \sim 10.0\%$ ^[11,12]。俄罗斯数据^[21]是在化爆及气炮实验中获得的,Au 材料中冲击压强比较低,最高才 0.58 TPa。此外,图中还给出了根据 MPQEOS^[22],SESAME^[12] 模型计算得到的 Au 材料冲击绝热线。从图 7 可以看出,本文的实验数据分散性较小,一致性较好,而且数据精度较高;同时与俄罗斯数据及两种理论模型均符合得很好。

4 结 论

在“神光-Ⅱ”装置第九路上,由于采用了良好的光束均匀化措施和激光时间波形控制技术,使得倍频激光直接驱动冲击波具有很好的平面性和稳定性。在此基础上,采用阻抗匹配方法,分别以 Al 和 Cu 材料作标准材料,进行了 Au 材料冲击绝热线的实验测量,Au 材料中冲击波压强最高达 2.7 TPa,冲击波速度测量相对扩展不确定度达 2% ($K = 2$),且数据一致性较好。实验数据与 MPQEOS,SESAME 状态方程理论模型符合得较好。

致谢 感谢高功率激光物理国家实验室“神光-Ⅱ”运行组同志为实验顺利进行所付出的辛勤劳动。

参 考 文 献

- 1 Charles E. Ragan III. Shock compression measurements at 1 to 7 TPa [J]. *Phys. Rev. A*, 1982, **25**(6):3360~3375
- 2 R. F. Trunin. Shock compressibility of condensed materials in strong shock waves generated by underground nuclear explosions [J]. *Physics-Uspeski*, 1994, **37**(11):1123~1145
- 3 C. G. M. van Kessel, R. Sigel. Observation of laser-driven shock waves in solid hydrogen [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1974, **33**(17):1020~1023
- 4 F. Cottel, M. Hallouin, J. P. Romain *et al.*. Enhancement of a laser-driven shock wave up to 10 TPa by the impedance-match technique [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **47**(7):678~680
- 5 A. Ng, D. Parfeniuk, L. DaSilva. Hugoniot measurements for laser-generated shock waves in aluminum [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **54**(24):2604~2607
- 6 R. Cauble, D. W. Phillion, T. J. Hoover *et al.*. Demonstration of 0.75 Gbar planar shocks in X-ray driven colliding foils [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **70**(14):2102~2105
- 7 Sizu Fu, Yuan Gu, Jiang Wu *et al.*. Laser-driven shock stability in Al and shock compressibilities of Fe up to 0.8 TPa and SiO₂ up to 0.4 TPa [J]. *Phys. Plasmas*, 1995, **2**(9):3461~3465
- 8 Alessandra Benuzzi, Thorsten Löwer, Michel Koenig *et al.*. Indirect and direct laser driven shock waves and applications to copper equation of state measurements in the 10~40 Mbar pressure range [J]. *Phys. Rev. E*, 1996, **54**(2):2162~2165
- 9 S. D. Rothman, A. M. Evans, C. J. Horsfield *et al.*. Impedance match equation of state experiments using indirectly laser-driven multimegabar shocks [J]. *Phys. Plasmas*, 2002, **9**(5):1721~1733
- 10 A. H. Jones, W. H. Isbell, C. J. Maiden. Measurement of the very-high-pressure properties of materials using a light-gas gun [J]. *J. Appl. Phys.*, 1966, **37**(9):3493~3499
- 11 M. Koenig, B. Faral, J. M. Boudenne *et al.*. Relative consistency of equations of state by laser driven shock waves [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**(12):2260~2263
- 12 Dimitri Batani, Antonio Balducci, Daniele Beretta *et al.*. Equation of state data for gold in the pressure range <10 TPa [J]. *Phys. Rev. B*, 2000, **61**(14):9287~9294
- 13 Ya B. Zeldovich, Yu P. Raizer. *Physics of Shock Wave and High Temperature Hydrodynamic Phenomena* [M]. New York: Academic Press, 1967
- 14 Ximing Deng, Xiangchun Liang, Zezun Chen *et al.*. Uniform illumination of large targets using a lens array [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(3):377~381
- 15 Qiu Ye, Deng Ximing. Optimization design of the optical array uniform illumination systems [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997, **9**(4):507~510
- 丘悦,邓锡铭. 列阵均匀照明系统的优化设计[J]. *强激光与粒子束*, 1997, **9**(4):507~510
- 16 Fu Sizu, Sun Yuqin, Huang Xiuguang *et al.*. Optimizing design for uniform irradiation system on target surface of “Shenguang-Ⅱ” facility [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2):129~133
- 傅思祖,孙玉琴,黄秀光等. “神光-Ⅱ”装置靶面均匀辐照系统的优化设计[J]. *中国激光*, 2003, **30**(2):129~133
- 17 Huang Xiuguang, Fu Sizu, Wu Jiang *et al.*. Experimental researches on planarity of shock wave directly driven by 2ω laser beam of “Shenguang-Ⅱ” facility [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(5):811~814
- 黄秀光,傅思祖,吴江等. “神光-Ⅱ”装置倍频激光直接驱动冲击波平面性的实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(5):811~814
- 18 Qinling Zhou, Xingqiang Lu, Jianrong Qiu *et al.*. Beam-shaping microstructure optical fiber [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(12):686~688
- 19 Xu Faming, Chen Shaohu, Chen Lanrong *et al.*. Shaping of laser complex shape pulse [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(7):943~947
- 许发明,陈绍和,陈兰荣等. 复杂激光脉冲波形的整形[J]. *光学学报*, 1996, **16**(7):943~947
- 20 M. D. Skeldon, A. V. Okishev, R. L. Keck *et al.*. A optical pulse shaping system based on aperture-coupled striplines for OMEGA pulse shaping applications [C]. *SPIE*, 1999, **3492**:131~135
- 21 <http://www.ficp.ac.ru/rusbank/>
- 22 A. J. Kemp, J. Meyer-ter-Vehn. An equation of state code for hot dense matter, based on the QEOS description [J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 1998, **415**(3):674~676