

文章编号 1004-924X(2011)02-0457-06

170 ps 激光脉冲辐照可见光面阵 Si-CCD 的实验

蔡 跃,叶锡生,马志亮,王立君,冯国斌,陈林柱

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室,陕西 西安 710024)

摘要:开展了 532 nm ps 激光辐照面阵 Si-CCD 的实验研究,建立了 532 nm,170 ps 激光辐照 Si-CCD 效应实验测量系统,观察到了各种典型的干扰和损伤效应现象并测量了阈值。对破坏后的 CCD 器件的微观结构进行了显微观察,并深入分析了各种典型实验现象和电路层面的损伤机理。开展了 10 ns 和 150 fs 激光对 CCD 探测器的辐照效应实验,并对不同脉宽激光与 CCD 相互作用阈值的关系进行了比较分析。实验结果表明:激光能量密度为 $10^{-8} \sim 10^{-3}$ J/cm² 时,会干扰 CCD 成像;激光能量密度超过 10^{-1} J/cm² 时,则会出现 CCD 永久性损伤。

关键词:激光辐照;激光损伤;ps 激光脉冲;Si-CCD;阈值

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111902.0457

Experiment of 170 ps laser pulse irradiation effect on visible plane array Si-CCD

CAI Yue, YE Xi-sheng, MA Zhi-liang, WANG Li-jun, FENG Guo-bin, CHEN Lin-zhu

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter,
Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: A measurement system was established to study the laser pulse irradiation effects on a plane array Si-CCD at the wavelength of 532 nm and the pulse duration of 170 ps. Experiments on Si-CCD under picosecond laser irradiation were carried out, the typical experiment phenomena were observed and the corresponding energy density thresholds were measured. Furthermore, the microstructure of damaged CCD was observed, and the damage mechanism was analyzed. It was demonstrated that the most severe failures could result from the malfunction of CCD circuits. Experiments on a Si-CCD by laser pulses at the wavelength of 532 nm, 800 nm and the pulse duration in 10 ns, 150 fs were carried out, respectively, then the thresholds with different pulse durations were measured and compared. Experimental results indicate that the Si-CCD is disturbed when the laser energy density is between $10^{-8} - 10^{-3}$ J/cm², and the permanent damage of Si-CCD is observed when laser energy density is larger than 10^{-1} J/cm².

Key words: laser irradiation; laser damage; ps laser pulse; Si-CCD; threshold

收稿日期:2010-10-08;修订日期:2010-10-30.

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室基金资助项目(No. SKL110906)

1 引言

电荷耦合器件 (Charge Coupled Device, CCD) 是由整齐紧密排列的若干个小的光敏元 (通常称为像素) 组成的^[1-2], 它广泛应用于航天、航空、遥感、侦察、微光夜视等领域。近年来, 随着 CCD 图像处理技术的发展, CCD 也越来越多地应用于光学测量, 尤其是激光参数测量。

CCD 光电探测器极易受到激光的干扰和损伤, 这将严重影响其正常工作, 因此激光的辐照阈值是十分重要的参数。早在 20 世纪 70 年代起, 美国伊利诺斯大学、海军研究实验室、德州大学等就相继开展了激光辐照 CCD 探测器的研究工作^[3-8]; 国内在这方面的研究起步虽晚, 但也取得了大量的研究成果^[9-16]。但是以上这些工作主要是针对连续激光和脉宽纳秒以上的长脉冲激光, 对于脉宽小于纳秒的短脉冲及超短脉冲激光开展的工作却很少。

本文对 170 ps 激光辐照可见光面阵 CCD 的干扰损伤效应进行了研究, 获得了不同干扰损伤阶段的阈值, 这对物理实验中合理选择和应用 CCD 进行参数监测以及 CCD 的防护与加固具有一定的参考价值。

2 面阵 CCD 工作原理

目前主流的可见光面阵 CCD 图像传感器都是以陶瓷材料上粘接的 n 型或 p 型 Si 为衬底生长一层二氧化硅绝缘层, 再在绝缘层上沉积一层金属铝为栅极, 构成 MOS 电容器, 基本结构如图 1 所示。

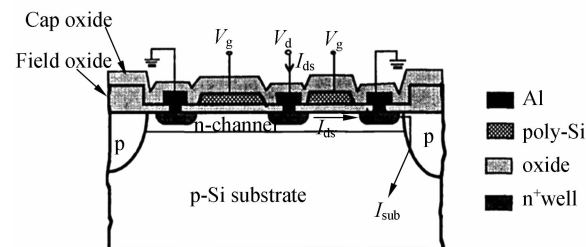


图 1 CCD 结构图

Fig. 1 CCD configuration

CCD 光敏单元实际上是硅光电二极管结构, 通过光敏物质将光子转换为光生信号电荷, 由加在移位寄存器上的脉冲电压控制信号电荷的存储和转移。输出信号在后续视频处理电路中再加入行、场同步和消隐信号, 则成为视频信号^[2-3]。

3 实验装置

实验采用 170 ps 激光器辐照可见光面阵 Si-CCD, 考察激光强度对干扰损伤的影响并测量阈值, 如图 2 所示。

实验中使用中心波长为 532 nm, 脉宽为 170 ps 的固体激光器作为辐照光源, 采用 OPHIR 公司的 PE9 型能量计进行能量测量, 通过格兰偏振棱镜组和中性衰减片实现透射激光能量的连续衰减。为提高靶面激光能量密度, 采用 f 200 mm 透镜聚焦。靶面光斑分布和光斑面积测量由 LBA-700PC COHU4812 型光束质量分析仪取得。

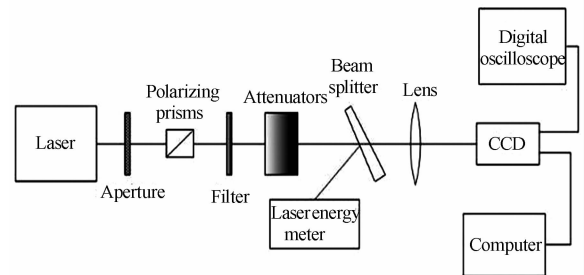


图 2 皮秒激光辐照可见光面阵 CCD 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup for picosecond laser irradiation on plane array Si-CCD

CCD 图像传感器采用韩国 A1 Pros 公司生产的行间转移型面阵 CCD 芯片 Ai329, 其有效像素为 500×582 , 像元大小为 $9.8 \mu\text{m} \times 6.3 \mu\text{m}$ 。该 CCD 的光谱响应曲线如图 3 所示, 实验所用激光波长 (532 nm) 位于 CCD 强响应区。

将 CCD 输出信号通过分配器分成二路, 一路通过 OK-M51K 型视频采集卡进入计算机, 实时观察并记录图像的变化, 并以此作为辐照效果的初步判别依据; 另一路连接 Tektronix DPO 4104 示波器, 观测 CCD 输出信号波形变化, 并据此判断干扰损伤效果。CCD 器件损伤的微观形貌采用日本电子公司生产的 JSM-6460 扫描电子显微镜观察并拍摄记录。

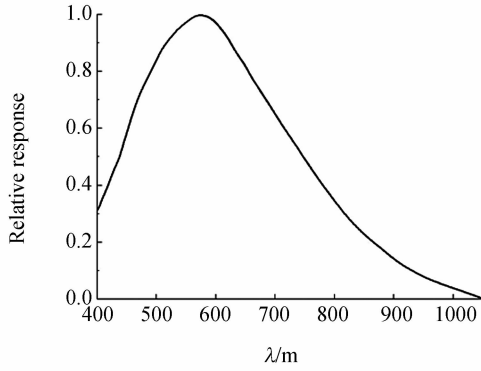


图 3 Ai329 CCD 的光谱特性曲线

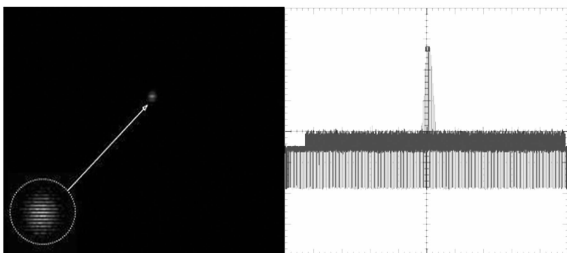
Fig. 3 Spectral characteristic of Ai329 CCD

4 实验结果及分析

实验中采用单脉冲激光正入射, 通过偏振棱镜组和衰减片组的调制作用, 逐步增强辐照激光强度, CCD 光电探测器由线性工作状态逐步发生饱和、串音等干扰效应, 当靶面激光能量密度达到 10^{-1} J/cm^2 数量级时, 出现了硬损伤。

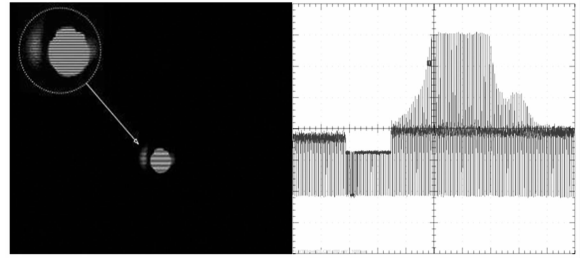
根据 CCD 输出信号的波形变化可以判断激光对 CCD 的干扰程度, 图 4 给出了 CCD 像元饱和、串扰和全屏饱和和 3 类典型的干扰结果。在较低能量密度激光辐照下 CCD 处于线性工作状态, 随着入射光的增强, 信号电荷不断增加而造成像元表面电势下降。当靶面激光能量密度达到 $9.43 \times 10^{-9} \text{ J/cm}^2$ 时, 耗尽层被光生电荷填满, 此时输出信号电压达到最大值, 像元内电荷不再积累, 出现如图 4(a) 所示的像元饱和现象。示波器记录波形的峰值点对应着饱和像元。

当激光脉冲增大到 $2.16 \times 10^{-6} \text{ J/cm}^2$ 时, CCD 像元表面电势下降到与探测器外加偏压相等, 电子穿越势垒向邻近势阱中扩散, 这时就出现



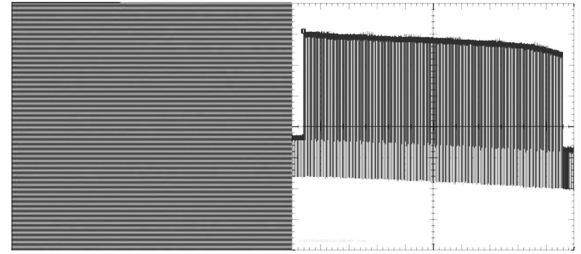
(a) $9.43 \times 10^{-9} \text{ J/cm}^2$, 像元饱和

(a) $9.43 \times 10^{-9} \text{ J/cm}^2$, pixel saturation



(b) $2.16 \times 10^{-6} \text{ J/cm}^2$, 串扰

(b) $2.16 \times 10^{-6} \text{ J/cm}^2$, cross-talk



(c) $2.03 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$, 全屏饱和

(c) $2.03 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$, full screen saturation

图 4 170 ps 激光干扰 CCD 的典型输出结果及波形

Fig. 4 Typical imaging and signal waveforms for CCD under interference of 170 ps laser pulse

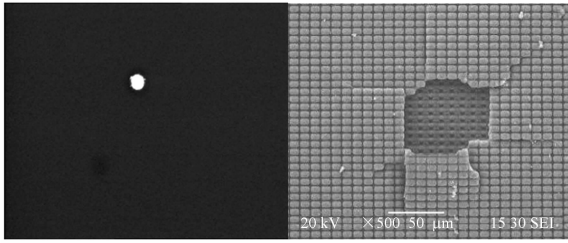
了如图 4(b) 所示的串音现象。在饱和波形的边缘出现由串音信号构成的波峰。

随着激光进一步增强产生大量电荷溢出, 以激光辐照处为中心的全部区域都出现电荷满阱状态, 出现了 CCD 全屏饱和现象, 如图 4(c) 所示, 此时靶面激光能量密度为 $2.03 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$ 。图 4(c) 中信号波形基线倾斜可能是因为光致饱和和导致 CCD 电路紊乱造成的。

在上述干扰实验结果中都发现了隔行饱和的现象, 这是由于 Ai329 CCD 的工作方式是分奇场和偶场交替进行再合成为一帧输出。皮秒激光脉宽较短, 在奇场和偶场中只能有一场可以接收到激光脉冲辐照, 故而出现隔行饱和的现象。

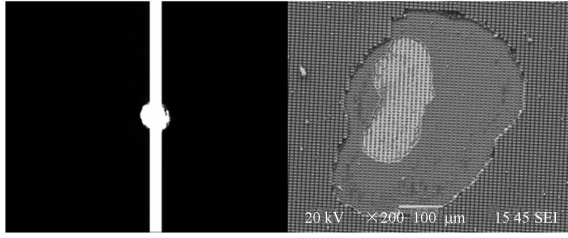
根据激光辐照后 CCD 的视频输出图像可以初步判断出其损伤程度, 如图 5 所示, 根据实验中激光对 CCD 的破坏程度归纳了 3 种典型的损伤类型。

当靶面激光能量密度增大到 0.309 J/cm^2 时, 由于材料吸收激光能量产生局部温升的不均匀而形成横向应力导致表面层材料断裂 (见图 5 (a)), 热应力损伤造成了 pn 结势阱被击穿。在偏



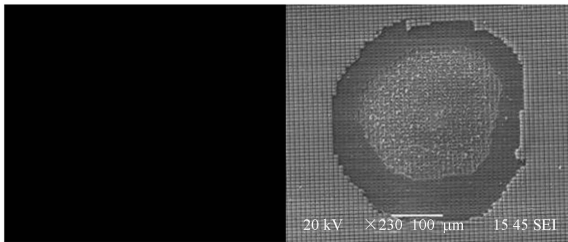
(a) 0.309 J/cm^2 , 轻微损伤 (出现白色亮斑)

(a) 0.309 J/cm^2 , slight damage (white blind spots)



(b) 0.842 J/cm^2 , 中等损伤 (沿时钟线出现白色亮带)

(b) 0.842 J/cm^2 , moderate damage (vertical bright white lines in the clock line direction of light spots)



(c) 2.02 J/cm^2 , 严重损伤 (CCD 失效)

(c) 2.02 J/cm^2 , severe damage (failure)

图 5 CCD 被 170 ps 激光损伤的典型输出结果及显微照片

Fig. 5 Typical imaging and microtopography for CCD under damage of 170 ps laser pulse

置电压的作用下,损伤区域的像元会一直有较大的反向电流输出,形成图 5(a)所示的白色亮斑。

当激光增强到 0.842 J/cm^2 时,在器件刚被破坏的阶段无信号输出,直至若干分钟后,CCD 才恢复输出。从图 5(b)可以看出,CCD 被辐照区域出现了两层材料剥落,CCD 内部网格状结构遭到一定程度破坏。损伤区域周围的颗粒应该是材料瞬间吸收大量激光能量形成高温等离子体冲击造成材料喷溅后附着在表面形成的。由于损伤较深,导致了辐照中心部分像元的电荷转移电路被

破坏,在反向偏压的作用下沿时钟线方向产生如图 5(b)所示的白色亮条纹。

随着激光不断增强,CCD 被损伤程度也不断加大。当激光能量密度达到 2.02 J/cm^2 时,CCD 不再有信号输出且无法恢复。通过显微照片图 5(c)可以发现,损伤区域中心的部分铝遮光膜网格结构已被激光脉冲清除,覆盖在其下方的输出栅极和转移栅极由于失去了保护,在热弛豫作用下被热损伤,造成了电路短路或断路,从而导致 CCD 时序信号紊乱而失去输出功能。

上述阈值的测量由于激光脉冲能量、分光镜分光比、靶面有效面积、效果判别等引入了测量不确定度,不确定度分析列于表 1。

为了比较激光脉冲宽度对阈值的影响,本文还开展了波长为 532 nm、脉宽为 10 ns 和波长为 800 nm、脉宽为 150 fs 脉冲激光对 CCD 的干扰损伤实验,各种典型辐照效应阈值列于表 2。考虑到测量不确定度的影响,不同脉宽激光对可见光面阵 Si-CCD 的干扰阈值在数量级上差别不大,由于 150 fs 激光的波长(800 nm)位于 CCD 弱响应区,故其干扰阈值略高。10 ns 激光的损伤阈值相对较小,而 150 fs 激光的阈值较高。这主要是因为纳秒激光对 CCD 的损伤主要是热破坏,而皮秒激光造成材料中等程度损伤时,靶面功率密度已经达到 $5.0 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$,这将使材料瞬间吸收大量激光能量而形成高温等离子体,等离子体吸收激光能量则造成了 170 ps 激光对 CCD 损伤阈值在一定程度上增加。飞秒激光对 CCD 造成损伤时功率密度已达到了 10^{12} W/cm^2 数量级,足以形成空气击穿,击穿空气形成高温等离子体会产生“屏蔽”作用而强烈吸收激光能量,因此造成 150 fs 对 CCD 损伤阈值增大。

表 1 170 ps 激光辐照 CCD 的阈值测量不确定度

Tab. 1 Uncertainty of thresholds measurement for 170 ps laser irradiation interaction with CCD

Variation	Uncertainty
Overall energy measurement	1.4%
Light splitting ratio measurement	9.2%
Effective area measurement	11.3%
Effect discrimination	3.7%
Thresholds	15.1%

表2 激光与 CCD 相互作用阈值测量结果

Tab.2 Measured thresholds during laser irradiation interaction with CCD

Typical effect	Threshold/(J · cm ⁻²)		
	170 ps,532 nm	10 ns,532 nm	150 fs,800 nm
Pixel saturation	9.43×10^{-9}	5.92×10^{-8}	1.61×10^{-8}
Cross-talk	2.16×10^{-6}	5.59×10^{-6}	2.75×10^{-6}
Full screen saturation	2.03×10^{-3}	2.90×10^{-3}	9.68×10^{-3}
Slight damage	3.09×10^{-1} × (1±15.1%)	— × (1±20.5%)	4.91×10^{-1} × (1±16.9%)
Moderate damage	8.42×10^{-1}	6.00×10^{-1}	—
Severe damage	2.02	9.00×10^{-1}	—

5 结 论

本文以普通型可见光面阵 Si-CCD 作为研究对象,开展了 532 nm,170 ps 脉冲激光辐照实验,同时还开展了波长为 532 nm,脉宽为 10 ns 和波长为 800 nm,脉宽为 150 fs 脉冲激光对 CCD 的干扰损伤实验。170 ps 脉冲激光辐照可见光面阵 Si-CCD,发现了像元饱和、串扰、全屏饱和、点破坏、沿时钟线出现亮线、失效等效应现象,但与其他脉宽激光辐照实验相比并没有新的现象发生。通过对阈值的数量级比较,170 ps 激光对普通型

可见光面阵 Si-CCD 的干扰阈值与纳秒和飞秒激光差别不大;损伤阈值略高于纳秒激光,而低于飞秒激光。

实验结果表明:普通型可见光面阵 Si-CCD 在 170 ps 激光辐照下,当靶面激光能量密度介于 $10^{-8} \sim 10^{-3}$ J/cm² 时,会出现饱和、串扰等干扰现象;当靶面激光能量密度超过 10^{-1} J/cm² 时,就可能出现永久性损伤。因此,在使用 CCD 器件作为核心器件的测量设备测量激光参数时,应根据靶面激光的能量密度范围采取适当的衰减措施,以确保设备的安全使用。

参考文献:

- [1] 胡渝,荣健. CCD 的发展现状及展望[J]. 仪器仪表学报,2005,26(S1):718-720.
HU Y, RONG J. The development and expectation of CCD [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005,26(S1):718-720. (in Chinese)
- [2] 王庆有. CCD 应用技术[M]. 天津:天津大学出版社,2000.
WANG Q Y. *CCD Application Technology* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2000. (in Chinese)
- [3] SAH C T, FU H S. Transient response of MOS capacitors under localized photoexcitation [J]. *IEEE*, 1974,ED-21(3): 202-209.
- [4] PECKERAR M C, BAKER W D, NAGEL D J. X-ray sensitivity of a charge-coupled- device array [J]. *J. Appl. Phys.*, 1977,48(6):2565-2569.
- [5] BECKER M F, ZHANG C Z, WATKINGS S E, et al.. Laser-induced damage to silicon CCD imaging sensors [J]. *SPIE*, 1989,1105:68-77.

- [6] BECKER M F, ZHANG C Z, BLARRE L, et al.. Laser-induced functional damage to silicon CCD sensor arrays [J]. *SPIE*, 1991,1624:67-79.
- [7] ZHANG C Z, BLARRE L, WALSER R M, et al.. Mechanisms for laser-induced functional damage to silicon charge-coupled imaging sensors [J]. *Appl. Opt.*, 1993,32(27):5201-5210.
- [8] LI F M, O N, NATHAN A. Degradation behavior and damage mechanisms of CCD image sensor with deep-UV laser radiation [J]. *IEEE*, 2004, 51(12): 2229-2236.
- [9] 王世勇,付有余,郭劲. 脉冲激光辐照 CCD 面阵探测器系统局部的干扰效应研究[J]. 应用激光, 2001,21(5):317-318.
WANG SH Y, FU Y Y, GUO J. Study of disturb effect to array CCD detectors irradiated locally by pulse laser [J]. *Applied Laser*, 2001,21(5):317-318. (in Chinese)
- [10] 王世勇. 激光对 CCD 探测器干扰损伤的研究及模糊评估[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2002.
WANG SH Y. *Study on laser-induced CCD de-*

- tector vulnerability and survivability and fussy synthetic evaluation on CCD jamming effects* [D]. Changchun: Changchun institute of optics, Fine mechanics and physics, CAS, 2002. (in Chinese)
- [11] 王金宝. 激光辐照可见光面阵 Si-CCD 探测器实验研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2003.
WANG J B. *Experimental investigation of the visible light arrays of Si-CCD irradiated by the laser* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003. (in Chinese)
- [12] 张大勇,赵剑衡,王伟平,等. 1.319 μm 连续 YAG 激光束对可见光面阵 CCD 系统的干扰研究[J]. 强激光与粒子束,2003,15(11):1050-1052.
ZHANG D Y, ZHAO J H, WANG W P, *et al.*. Study of disturbance to visible-light array CCD detectors irradiated by 1.319 μm CW YAG laser [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2003, 15 (11):1050-1052. (in Chinese)
- [13] 周建民,付有余,郭劲,等. 脉冲激光对 CCD 的软损伤技术研究[J]. 激光杂志,2005,26(2):20-21.
ZHOU J M, FU Y Y, GUO J, *et al.*. Research on the soft damage of CCD induced by pulse laser [J]. *Laser Journal*, 2005,26(2):20-21. (in Chinese)
- [14] 赵帅. 半导体激光器干扰 CCD 传感器实验研究[J]. 光机电信息,2008(12):26-29.
ZHAO SH. Experimental research of CCD sensors disturbed by laser diodes[J]. *OME Information*, 2008(12):26-29. (in Chinese)
- [15] 沈洪斌,沈学举,周冰,等. 532 nm 脉冲激光辐照 CCD 实验研究[J]. 强激光与粒子束,2009,21(10):1449-1454.
SHEN H B, SHEN X J, ZHOU B, *et al.*. Experimental study of 532 nm pulsed laser irradiating CCD [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2009,21(10):1449-1454. (in Chinese)
- [16] 王思雯,郭立红,赵帅,等. 高功率 CO₂ 激光对远场 HgCdTe 探测器的干扰实验[J]. 光学精密工程,2010,18(4):798-804.
WANG S W, GUO L H, ZHAO SH, *et al.*. Experiments of high-power CO₂ laser disturbance to far-field HgCdTe detectors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(4):798-804. (in Chinese)

作者简介:



蔡跃(1975—),男,辽宁锦州人,助理研究员,2000年于中国科学技术大学获学士学位,2009年于西北核技术研究所获硕士学位,主要从事激光辐照效应与机理的研究。E-mail: caiyc21@163.com

叶锡生(1967—),男,江苏泰兴人,博士,研究员,1989年、1997年于浙江大学分别获学士、博士学位,主要从事激光与物质相互作用的研究。E-mail: yxschx@yeah.net

马志亮(1979—),男,吉林松原人,硕士,助理研究员,2002年于吉林大学获学士学位,2005年于西北核技术研究所获硕士学位,主要从事激光辐照效应与机理的研究。E-mail: mzl1979@yahoo.com.cn



王立君(1967—),男,黑龙江海伦人,硕士,研究员,1988年于兰州大学获学士学位,1996年于国防科技大学获硕士学位,主要从事激光辐照效应与机理方面的研究。E-mail: wanglj0317@126.com

冯国斌(1971—),男,湖北大冶人,硕士,研究员,1994年于国防科技大学获学士学位,2000年于西北核技术研究所获硕士学位,主要从事激光辐照效应与机理的研究。E-mail: fenggb1971@163.com



陈林柱(1980—),男,浙江永康人,硕士,助理研究员,2001年于北京理工大学获学士学位,2010年于西北核技术研究所获硕士学位,主要从事激光辐照效应与机理的研究。E-mail: chenlzh1980@126.com