

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0131-05

可见光 CCD 相机对 1064 nm 激光饱和响应的实验研究

张 震 程湘爱 姜宗福

(国防科学技术大学光电科学与工程学院定向能技术研究所, 湖南 长沙 410073)

摘要 当辐照光强较低时, CCD 相机输出图像中的灰度值分布代表了辐照光的功率密度分布。利用此时 CCD 相机输出激光光斑的灰度分布及辐照激光功率计算了光斑中心像素上的平均激光功率密度。利用激光功率密度与激光功率成正比的关系, 由实验测得的激光功率值获得了一系列中心像素上的激光功率密度值, 并利用示波器测量了相应的像素输出电压值, 得到了可见光 CCD 对 1064 nm 激光的响应曲线。由像素灰度值与激光功率密度值可知, 相机系统饱和即令像素灰度值达到最大的激光功率密度阈值约为 0.11 mW/cm^2 ; 而由 CCD 的光响应曲线可知, 令 CCD 芯片输出开始趋向于饱和的激光功率密度值约为 0.20 mW/cm^2 。

关键词 成像系统; CCD 芯片; 光电响应曲线; 饱和

中图分类号 TN249; TB852 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201037s1.0131

Experimental Study on Saturation Effect of Visible Light CCD Induced by 1064 nm Laser

Zhang Zhen Cheng Xiang'ai Jiang Zongfu

(Institute of Direct Energy, College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract When the irradiation light intensity is low, the gray value distribution of CCD camera output image represents power density distribution. Using the gray value distribution and the corresponding laser power, we calculated the laser power density on the centre pixel of laser facula area. Because laser power density is proportional to laser power, we got a series of power density value on the centre pixel of laser facula from the laser power measured in experiment. The corresponding pixel output voltage value was measured through oscillograph. And then we got the photoelectric response curve of CCD to 1064 nm laser. From the gray value and laser power density value, the approximate threshold value of laser intensity inducing CCD camera system saturation was 0.11 mW/cm^2 . And from the photoelectric response curve of CCD, the value causing CCD chip saturation was 0.20 mW/cm^2 .

Key words imaging systems; CCD chip; photoelectric response curve; saturation

1 引 言

激光器和 CCD 分别出现在 20 世纪 60 年代初期和末期。由于它们具有广阔的应用前景, 关于激光和 CCD 的各种技术已经十分成熟, 二者也切实地被应用到了科学研究、生产生活及安全防护等各大领域。例如, 激光可以用来进行测距、制导、加工和

超快事物的照明等工作; 而 CCD 图像传感器可用来实现遥感、探测、夜视及强光功率密度分布测量等工作。激光的大多数应用必须配合以探测器对光信号的接收, 其中 CCD 图像传感器就是所用探测器中很重要的一个; 而 CCD 的正常工作对光信号的强度有一定的要求。过弱的光, CCD 无法分辨; 而过强的

收稿日期: 2010-03-06; 收到修改稿日期: 2010-05-05

作者简介: 张 震(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事激光与物质相互作用等方面的研究。E-mail: zhyc8@126.com

导师简介: 姜宗福(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事高能激光技术、激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: jiangzongfu@yahoo.com.cn

光容易使 CCD 饱和或损伤。所以研究激光对 CCD 的辐照效应将会为很多实际工作提供参考。自 20 世纪 80 年代末,人们开始展开激光对 CCD 的辐照效应研究工作^[1],并报道了大量研究成果^[2~21]。依据干扰的效果,激光对 CCD 的辐照问题可分为:致眩和致盲两个大类^[22]。致眩是指激光造成 CCD 的暂时性失真或失效,光照结束后,CCD 即恢复正常工作;致盲是指激光造成 CCD 的永久性损伤。在致眩问题中,国内有许多关于 CCD 的激光饱和和功率密度阈值的报道^[9~11,18],其饱和的判定方法是图像中光斑像素灰度值达到最高(通常为 255),功率密度阈值的测量和计算方法则没有介绍。本文用 1064 nm 连续波(CW)激光辐照线阵 DALSA 相机进行实验,用示波器对 CCD 芯片的输出电压信号进行监测,详细研究了激光对 CCD 的饱和响应问题,介绍了饱和和激光功率密度阈值的确定方法,对激光造成 CCD 相机系统的饱和及 CCD 芯片的饱和作了区分。

2 实 验

实验系统如图 1 所示。光源为 1064 nm CW 激光器。光阑和滤光片配合使用以消除激光器抽运光的影响。激光经过衰减片和反射镜后辐照到 CCD 的光敏面上。分光片与功率计配合使用以实时监测激光功率。实验所用的线阵 CCD 相机须置于步进电机之上以实现扫描成像。相机的型号为 DALSA SP-14;CCD 芯片的型号为 DALSA IL-P3,其像素尺寸为 $14\ \mu\text{m}\times 14\ \mu\text{m}$ 。实验过程中,相机镜头对焦到无穷远。步进电机携带 CCD 旋转扫描;CCD 输出数字图像。实验存储该图像,并记录对应的激光功率。示波器则仅记录激光正入射时 CCD 芯片的输出电压信号。具体做法是,通过逐步旋转步进电机以调整激光入射角度,当示波器信号显示最强时表明激光已经正入射,存取此时的示波器信号。

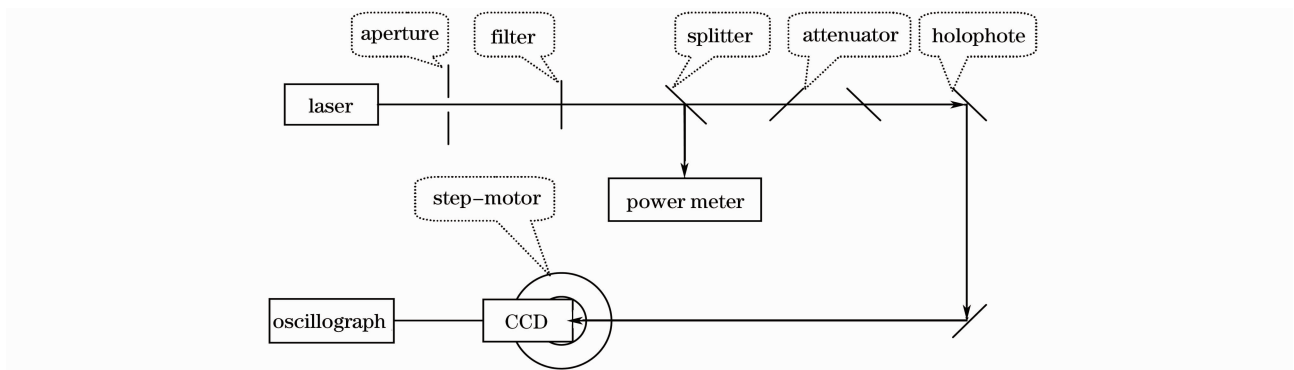


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Sketch map of experimental setup

3 可见光线阵 CCD 对 1064 nm 激光的响应特性

3.1 激光功率密度值的计算

3.1.1 光斑灰度值的读取与光斑大小的确认

当光强较弱时,CCD 输出图像中的光斑区域未达到饱和。此时像素灰度值分布表征了激光功率密度分布。在保证较好的光束质量及出光稳定性的前提下,限于衰减片的数量,本次实验所能达到的激光功率最小量级为 $10^{-10}\ \text{W}$ 。此时,由于光极弱,CCD 输出数字图像中的激光光斑很大一部分区域淹没在背景之中,不利于提取出较合理的光斑区域。实验中,激光功率为 $2.12\times 10^{-9}\ \text{W}$ 时的光斑图像如图 2(a)所示。图中光斑区及光斑所在背景区的灰度值分布分别如图 2(b),(c)所示。此时,光斑区域中,像素

灰度的最大值为 240。该值未达饱和,但接近灰度饱和值 255。此时,光斑能从背景中突显出来,而灰度分布又能体现出激光功率密度分布,故选择这组数据来提取激光光斑。图 2(c)各像素灰度值平均值约为 5。令图 2(b)各像素减去此平均值得图 2(d)。

图 2(d)中像素灰度值分布代表着激光的功率密度分布。其三维图如图 3 所示。激光近似为平行光,它经过相机镜头后在像平面上的功率密度分布为中心较高向周围逐渐降低的近似正态分布。故确定光斑大小的方法为以光斑中心区峰值强度处为中心,取光强近似为峰值的 $1/e^2$ 处作为光斑的边缘;此时,边缘环围内的激光功率为总激光功率的 86.5%^[23]。如图 2 所示,光斑区的最大灰度值为 235,故取灰度值高于或等于 $235/e^2\approx 32$ 的像素作为光斑区域,如图 2(d)中深色背景部分所示。

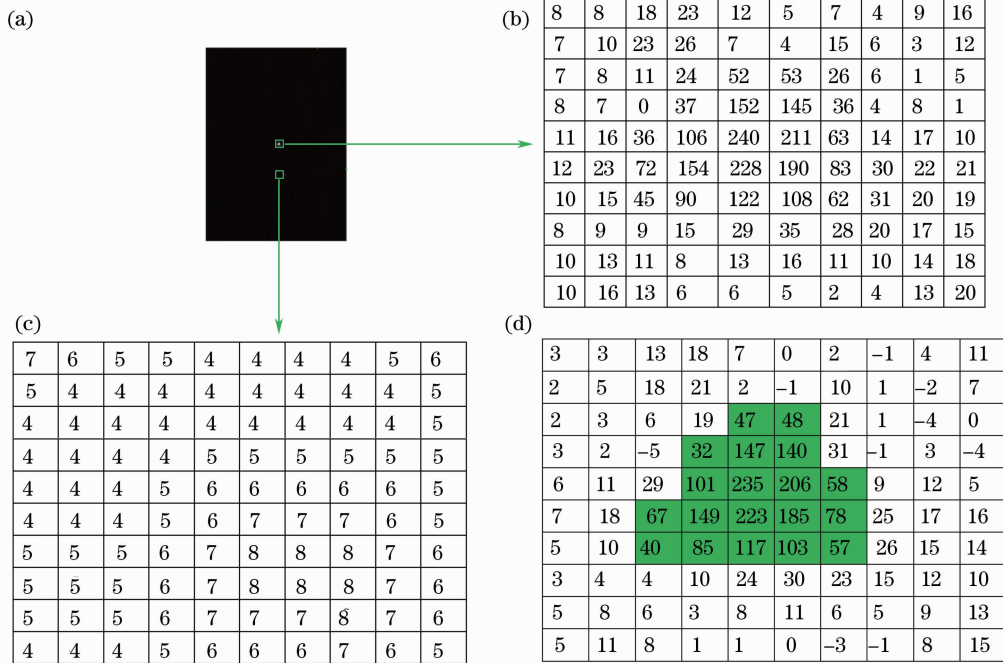


图 2 功率为 2.12×10^{-9} W 的激光光斑图及其灰度值分布

Fig. 2 Facula of laser with a power of 2.12×10^{-9} W and its pixel value

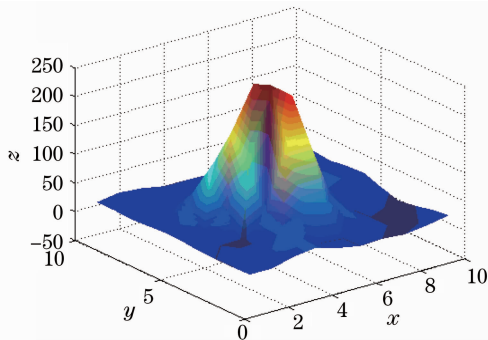


图 3 激光光强分布

Fig. 3 Distribution of laser intensity

3.1.2 按比例分配法取得每个像素上的激光功率

设光斑区域单个像素上每单位灰度所代表的激光功率密度值为 j_0 。由图 2(d) 光斑区域内部, 像素灰度总和为 2118。CCD 的像素尺寸为 $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$ 。图 2 中光斑对应的激光功率为 $P_0 = 2.12 \times 10^{-9}$ W。则有

$$2118j_0 \times 196 \times 10^{-12} \text{ m}^2 = 2.12 \times 10^{-9} \times 0.865 \text{ W},$$

$$j_0 = 4.4 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2,$$

$J_0 = 235j_0 = 1.03 \text{ W/m}^2 = 0.10 \text{ mW/cm}^2$,
此即图 2 光斑中激光功率密度最大值。

$J_s = 255j_0 = 1.12 \text{ W/m}^2 = 0.11 \text{ mW/cm}^2$,
此即像素灰度饱和的激光功率密度阈值。

在光路不变的情况下, 光斑中心的激光功率密度与激光功率成正比。故由实验测得的激光功率数

据可以获得各组数据中光斑中心的激光功率密度值, 即 $J_n = J_0 \times (P_n/P_0) = 4.7 \times 107 P_n \text{ mW/cm}^2$, 其中 J_n 为第 n 组数据的光斑中心像素上的激光功率密度, P_n 为以瓦为单位的第 n 组激光功率值。

3.2 CCD 芯片对 1064 nm 激光的响应曲线

示波器数据为激光正入射时 CCD 芯片输出的一帧像素的电压值。图 4 为其中三组示波器数据。如图 4(a) 和 (b) 所示, 示波器输出信号图中左侧箭头所指示的位置为基准电压, 各像素输出电压值与该基准之差的绝对值为电压幅值, 该幅值的大小与激光功率密度相对应。每组示波器数据中, 输出电压幅值最大的一个像素的电压值对应着 3.1 节所得的光斑中心像素的激光功率密度值。

由图 4(a)~(f), 可明显地看出中心像素的电压值随激光功率密度值增大的幅度逐渐变小。由图 4(d) 到 (f) 激光功率密度值由 0.15 mW/cm^2 上升至 0.36 mW/cm^2 , 即激光功率密度值增加了一倍多, 而像素对应的电压却增加极小。这说明 CCD 芯片的响应已经不在线性区而已经趋向于饱和。

以光斑中心像素上的激光功率密度值为横坐标, 以该像素的电压输出信号幅值为纵坐标绘制的 CCD 芯片的光电响应曲线如图 5 所示。图中曲线按其斜率大小分为两部分。其一斜率较大, 表示电压幅值随激光功率密度的变化很大, 表征了 CCD 对激光信号的响应性; 其二斜率很小, 当激光功率密度

成倍增长时, CCD 像素输出电压却几乎不变, 这表征了 CCD 对激光响应的饱和。这两部分的转折区域所对应的横坐标值即为 CCD 芯片的饱和激光功率密度阈值所在区间。以响应曲线饱和区末端切线与线性响应区延长线的交点为 CCD 芯片的饱和阈值点。则如图 5 所示, CCD 芯片饱和的激光功率密度阈值为 0.20 mW/cm^2 。

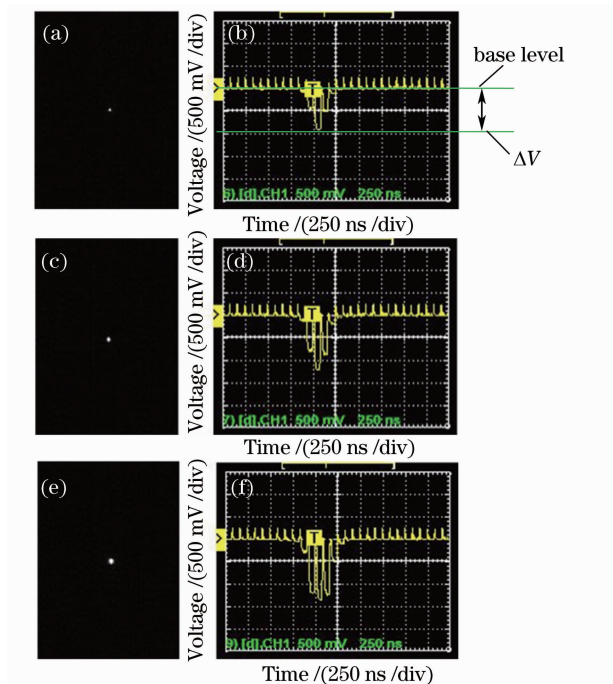


图 4 激光峰值功率密度为(a), (b) 0.10 ; (c), (d) 0.15 ; (e), (f) 0.36 mW/cm^2 时激光光斑及 CCD 芯片的最大输出

Fig. 4 Laser facula and maximum output voltage of CCD chip with a laser power density on centre pixel of (a), (b) 0.10 ; (c), (d) 0.15 ; (e), (f) 0.36 mW/cm^2 respectively

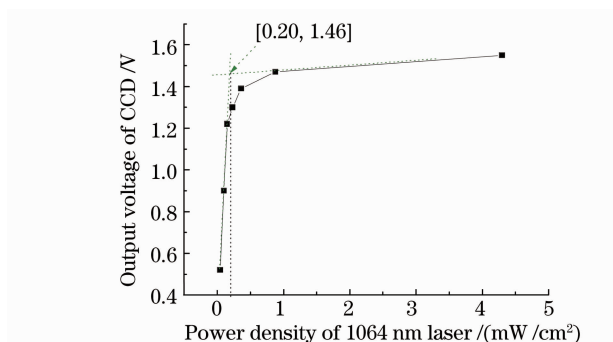


图 5 CCD 芯片对 1064 nm 激光的响应曲线
Fig. 5 Photoelectric response curve of CCD to 1064 nm laser

4 结 论

可见光 CCD 相机系统可划分为光电转换系统及模数转换系统。前者主要包括镜头和 CCD 芯片; 后者主要是接 CCD 芯片输出的模拟信号处理及 A/D 转换器。后者接收前者 CCD 芯片输出的电信号。当芯片输出的电信号已经达到最大即处于饱和时, 而后者仍未饱和, 则 CCD 相机系统的饱和效应由 CCD 芯片决定; 如果芯片输出信号未达最大, 而已经使模数转换系统饱和, 则 CCD 相机系统的饱和效应由模数转换系统决定。显然本文属于第二种情况。这里所用的 DALSA SP-14 可见光 CCD 相机系统对 1064 nm 激光的饱和功率密度阈值为 0.11 mW/cm^2 ; 而相机系统中的 DALSA IL-P3 CCD 芯片输出则在 1064 nm 激光强度达 0.20 mW/cm^2 时才开始趋向于饱和。

参 考 文 献

- 1 M. F. Becker, C. Zhang, S. E. Watkins *et al.*. Laser-induced damage to silicon CCD imaging sensors[C]. *SPIE*, 1989, **1105**: 68~77
- 2 M. F. Becker, C. Zhang, L. Blarre *et al.*. Laser-induced functional damage to silicon CCD sensor arrays[C]. *SPIE*, 1991, **1624**: 67~79
- 3 C. Z. Zhang, L. D. Blarre, R. M. Walser *et al.*. Mechanisms for laser induced functional damage to silicon charge-coupled imaging sensors[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(27): 5201~5210
- 4 Ni Xiaowu, Lu Jian, He Anzhi. Study of hard-destructive mechanism of the charge-coupled devices by a laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 1994, **43**(11): 1795~1802
- 5 Liu Zejin, Lu Qisheng, Jiang Zhiping *et al.*. Study of damage effect in CCD detectors irradiated locally by laser [J]. *Laser Technology*, 1994, **18**(6): 344~347
- 6 Liu Zejin, Lu Qisheng, Jiang Zhiping *et al.*. Research on damaging mechanism of CCD video camera irradiated by a focusing laser beam [J]. *Applied Laser*, 1995, **15**(2): 86~88
- 7 Zhong Hairong, Lu Qisheng, Wen Tiefeng *et al.*. Review on the laser induced damage mechanism of CCD detector [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **10**(4): 537~542
- 8 N. Machet, C. Hubert-Habart, V. Baudinaud. Study of the mechanism of electronic diffusion in a CCD camera subject to intense laser illumination[C]. *RADECS*, 1997, **97**: 417~423
- 9 Wang Shiyong, Fu Youyu, Guo Jin. Study of disturb effect to array CCD detectors irradiated locally by pulse laser [J]. *Applied Laser*, 2001, **21**(5): 317~318
- 10 Zhang Dayong, Zhao Jianheng, Wang Weiping *et al.*. Study of disturbance to visible-light array CCD detectors irradiated by $1.319 \mu\text{m}$ CW YAG laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(11): 1050~1052

- 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
- 11 Wang Jinbao. Experimental Investigation of the Visible Light Arrays of Si-CCD Irradiated by the Laser [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003. 13~32
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. 13~32
- 12 F. M. Li, O. Nixon, A. Nathan. Degradation behavior and damage mechanisms of CCD image sensor with deep-UV laser radiation[J]. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 2004, **51**(12): 2229~2236
- 13 Jiang Jijun, Luo Fu, Chen Jianguo. Research on femtosecond laser induced damage to CCD [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(4): 515~517
江继军, 罗福, 陈建国. CCD 在 fs 激光辐照下的损伤研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(4): 515~517
- 14 Li Wenyu, Wang Jinbao, Cheng Xiang'ai *et al.*. New analysis on laser-induced damage mechanism of array CCD device [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(10): 1457~1459
李文煜, 王金宝, 程湘爱等. 激光对面阵 CCD 器件破坏的一种新机理[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(10): 1457~1459
- 15 Guo Shaofeng, Cheng Xiang'ai, Fu Xiquan. Failure of array CCD irradiated by high-repetitive femtosecond laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(11): 1783~1786
郭少锋, 程湘爱, 傅喜泉. 高重复频率飞秒激光对面阵 CCD 的干扰和破坏[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(11): 1783~1786
- 16 Zhang Zhen, Cheng Xiang'ai, Jiang Zongfu. Excessive saturation effect of the visible light CCD [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(6): 917~920
张震, 程湘爱, 姜宗福. 可见光 CCD 的光致过饱和现象研究[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(6): 917~920
- 17 Jiang Nan, Zhang Chu, Niu Yanxiong *et al.*. Numerical simulation of pulsed laser induced damage on CCD arrays [J]. *Laser and Infrared*, 2008, **38**(10): 1004~1007
姜楠, 张雏, 牛燕雄等. 脉冲激光辐照 CCD 探测器的硬破坏效应数值模拟研究[J]. *激光与红外*, 2008, **38**(10): 1004~1007
- 18 Shen Hongbin, Shen Xueju, Zhou Bing. Experimental study of 532 nm pulse laser irradiating CCD [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(10): 1449~1454
沈洪斌, 沈学举, 周冰. 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
- 19 Jiang Tian, Luo Qun, Cheng Xiang'ai. Study of measuring the saturation threshold of 3CCD system by CW laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(suppl.): 203~205
江天, 罗群, 程湘爱. 连续激光对 3CCD 系统的饱和阈值测量[J]. *中国激光*, 2009, **36**(suppl.): 203~205
- 20 A. Durécu, P. Bourdon, O. Vasseur. Laser-dazzling effects on TV-cameras: analysis of dazzling effects and experimental parameters weight assessment [C]. *SPIE*, 2007, **6738**: 67380L
- 21 A. Durécu, O. Vasseur, P. Bourdon. Assessment of laser-dazzling effects on TV-cameras by means of pattern recognition algorithms [C]. *SPIE*, 2007, **6738**: 67380J
- 22 Lu Qisheng, Fan Zhengxiu, Chen Yuze *et al.*. Laser Irradiation Effect [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 1~5
陆启生, 范正修, 陈裕泽等. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 1~5
- 23 Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. 16~17
苏毅, 万敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004. 16~17