

变焦彩色 CCD 成像系统的激光干扰实验

汤 伟^{1,2}, 王 锐^{1,2}, 王挺峰^{1,2}, 郭 劲^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033 ;

2. 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘 要: 开展了变焦彩色 CCD 成像系统的激光外场干扰实验, 测得了半导体激光(750 nm)对变焦距(17~187 mm)彩色 CCD 相机的干扰效果 ; 同时利用典型的激光干扰 CCD 模型, 完成了对实验结果的验证与理论分析。理论与实验结果表明 : 750 nm 激光对彩色 CCD 成像系统的干扰效果明显, CCD 靶面出现了明显的光饱和和串扰现象 ; 在激光辐照条件相同情况下, 光学系统焦距 f 越大, 被光阑截断的激光就越少, 到靶的激光功率密度就越高, CCD 靶面的光饱和面积就越大 ; 光学系统焦距 f 为 17 mm 时, CCD 靶面的光饱和面积为 0.33 mm×0.29 mm, 而当光学系统焦距 f 增大至 120 mm 时, CCD 靶面的光饱和面积为 1.8 mm×1.2 mm。仿真结果与实验结果基本一致, 证明了理论模型的正确性。研究结果将对 CCD 器件的实际应用具有一定的指导意义。

关键词: 激光干扰 ; 变焦光学系统 ; 半导体激光器 ; 光饱和串扰

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0406007

Laser jamming experiment of varifocal colour CCD imaging system

Tang Wei^{1,2}, Wang Rui^{1,2}, Wang Tingfeng^{1,2}, Guo Jin^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun 130033, China)

Abstract: Out-field laser jamming experiment of varifocal colour CCD imaging system irradiated by semiconductor laser was done. Laser jamming effects of colour CCD imaging system with different focal lengths were measured. Laser jamming model was set-up, and theoretical proving and analysis on experimental results were completed. Theoretical and experimental results show that laser jamming effect of colour CCD imaging system irradiated by 750 nm laser is obvious, and CCD surface appears obvious light saturation and crosstalk phenomena. In the same initial laser irradiating condition, laser power truncated by the aperture gradually decreases with increase of focal length f , and light saturation area on the CCD surface gradually increases. When focal length f of colour CCD imaging system is 17 mm, light saturation area on the CCD surface is 0.33 mm×0.29 mm. While focal length f of colour CCD imaging system increases to 120 mm, light saturation area on the CCD surface is 1.8 mm×1.2 mm. Simulation results are

收稿日期: 2016-08-05; 修订日期: 2016-09-13

基金项目: 长春市科技计划(长科技合 2013270 号)

作者简介: 汤伟(1985-), 男, 助理研究员, 主要从事激光辐照效应以及光机结构方面的研究。Email: twei222@163.com

coincident with experimental results, and it proves laser jamming model is correct. The conclusions have a reference value for colour CCD in the practical application.

Key words: laser jamming; varifocal optical system; semiconduction laser; light saturation and crosstalk

0 引言

CCD 成像系统目前被广泛应用于光电探测、目标识别与跟踪,然而由于其属于弱光探测器件,易受到强激光的干扰,使其不能正常工作^[1-3]。因此,近年来国内外开展了大量的激光辐照 CCD 器件研究^[4-8],研究内容涉及了视场内和视场外^[9]、波段内和波段外^[10]等多种复杂作用环境。目前,受试器件主要是针对的定焦光学系统,而关于变焦光学系统的激光干扰研究则鲜有报道。为此,实验室利用多波段半导体激光器(750 nm)开展了变焦光学系统的激光干扰效果研究。

文中利用半导体激光(750 nm)完成了对彩色 CCD 成像系统在焦距 f 分别为 17、60、120 mm 时外场干扰实验,测得了不同光学镜头焦距 f 下彩色 CCD 成像系统的激光干扰效果,并利用激光干扰模型对实验结果进行了仿真验证与分析。

1 变焦彩色 CCD 成像系统激光干扰模型

1.1 激光干扰机理

CCD 器件受强激光辐照,势阱在积分时间 t_0 内会产生大量的信号电荷 Q_s ,信号电荷 Q_s 可表示^[11]为:

$$Q_s = (1-R)es\eta I_0 t_0 / h\nu \quad (1)$$

式中: h 为普朗克常数; ν 为光子频率; R 为 CCD 器件反射率; s 为深耗尽层厚度; e 为电子电荷; η 为量子效率; t_0 为积分时间; I_0 为到靶功率密度。表 1 给出了 Si 基 CCD 的主要参数^[11]。

表 1 Si 基 CCD 器件的光电参数

Tab.1 Main parameters of Si-based CCD device

Parameter	Value	Parameter	Value
s/m^2	2×10^{-10}	V_{ms}/V	-0.85
V_G/V	10	Q_e/C	3.2×10^{-13}
d/m	10^{-7}	η	0.6
ε	3.9	R	0.35

入射激光功率越高,积分时间内产生的信号电荷 Q_s 越多,当信号电荷 Q_s 近似等于势阱的存储极限 Q_l 时,该 CCD 像元就会发生光饱和现象;而当信号电荷

Q_s 大于存储电荷极限值 Q_l 时,信号电荷 Q_s 就会向邻近势阱“溢出”,即发生串音现象,如图 1 所示。光饱和、饱和串音是 CCD 器件发生干扰的典型现象。

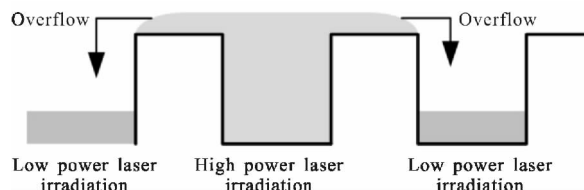


图 1 光生电荷 Q_s 的溢出过程

Fig.1 Overflow process of laser-induced charge Q_s

由于 CCD 器件在水平方向上势垒要远高于竖直方向上的势垒,电荷在竖直方向上溢出量较多,因此光饱和和串扰通常发生在竖直方向。模型中,竖直和水平方向的电荷溢出比取 19:1 (此溢出比仅为仿真时做定量分析)。

1.2 光束等效传输

文中主要是通过数值方法来仿真彩色 CCD 器件的激光干扰效果,由于 CCD 器件通常是放置在光学系统的焦平面上,因此建模时将光学镜头等效为一个理想透镜,图 2 给出了激光束进入光学系统后的等效传输示意图。

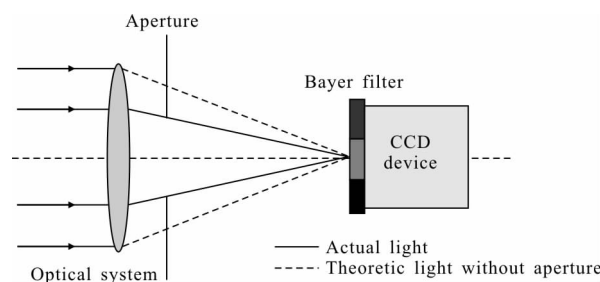


图 2 激光束在光学系统内传输示意图

Fig.2 Schematic diagram of laser transmission in inner optical system

经过透镜后,光束的复振幅^[12]可表示为:

$$U_T(x, y) = U(x, y)T(x, y) \quad (2)$$

其中复振幅变换函数 $T(x, y)$ 为:

$$T(x, y) = p(x, y) \exp\left(-ik \frac{x^2 + y^2}{2f}\right) \quad (3)$$

式中: $p(x, y)$ 为光学系统的光瞳; f 为焦距。对于变焦光学系统,光瞳 $p(x, y)$ 会随着光学系统焦距 f 的增

加而增大, 这样通过改变焦距 f 和入瞳直径 D 的大小, 就可以得到不同焦距下进入光学系统的光通量, 从而获得相应焦距下的激光干扰效果。

1.3 Bayer 滤镜分光

实验中彩色 CCD 相机是利用 Bayer 滤镜来实现分光的。Bayer 滤镜由红色、绿色和蓝色三种微型滤镜组成, 每种微型滤镜仅允许一种特定波长的激光通过。Bayer 滤镜置于 CCD 芯片前, 相当于每一个像元上都放置一个微型滤镜; 这样, 将微型滤镜对入射激光的透过率加入到干扰模型中, 即可以实现对彩色 CCD 器件干扰模型的建立。图 3 给出了 Bayer 滤镜分光过程。

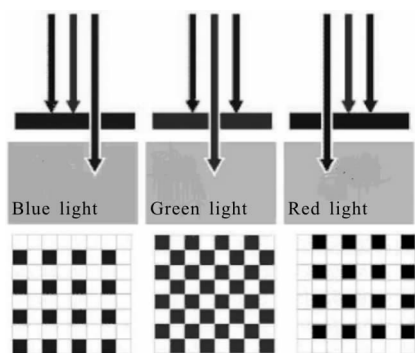


图 3 Bayer 滤镜工作原理

Fig.3 Basic principle of Bayer filter

综上, 可以得到激光干扰变焦彩色 CCD 器件的干扰模型, 仿真计算流程如图 4 所示。

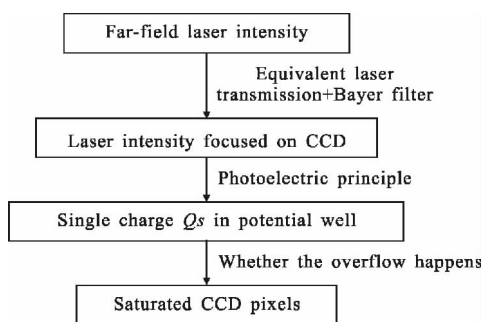


图 4 激光干扰彩色 CCD 器件模型流程图

Fig.4 Flow chart of laser jamming model

2 变焦彩色 CCD 成像系统的激光干扰实验

2.1 实验装置与实验仪器

实验装置如图 5 所示, 激光器与 CCD 成像系统相距 1.3 km, 实验中为避免杂散光的影响, 在光学系统前加入了红外截止滤光片。

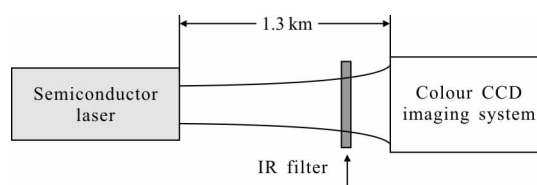


图 5 实验原理示意图

Fig.5 Schematic diagram of experimental principle

干扰光源选用的是输出波长为 750 nm 的连续波半导体激光器, 输出功率最大可达 160 W, 功率稳定性小于 5%, 初始光斑直径 30 mm, 激光发散角小于 5 mrad。

受试器件为彩色 CCD 成像系统, 分为光学镜头和感光元件两部分, 其中光学镜头为变焦系统, 调焦范围为 17~187 mm, 入瞳直径 40 mm, 系统 $F^\#$ 为 5, 光学总透过率为 0.5; 感光元件选用的是 SONY 公司 ICX409AK 芯片, 如图 6 所示, 该芯片像元数 752×582, 像元大小 6.5 μm ×6.25 μm 。

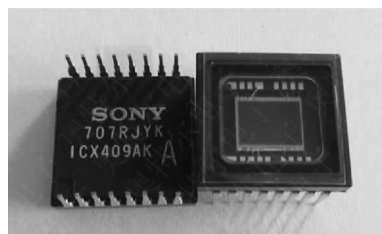


图 6 ICX409AK 芯片

Fig.6 ICX409AK chip

图 7 给出 ICX409AK 芯片的响应曲线, 其中虚、点线、粗实线三条曲线分别表示相应颜色微型滤镜的透过率曲线, 黑线为 CCD 器件的灵敏度曲线。

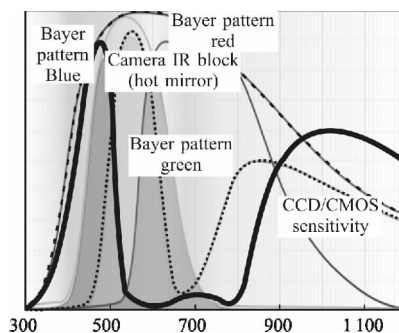


图 7 ICX409AK 芯片响应曲线

Fig.7 Response curves of ICX409AK chip

2.2 到靶功率密度估算

实验中采用几何光学方法对到靶功率密度进行

估算:

$$I = \frac{P_0 \tau_a \tau_0 D_0^2}{l^2 \theta^2 S} \quad (5)$$

式中: P_0 为激光器发射功率; τ_a 为大气透过率, 在这里通过 Motran 软件计算得到; τ_0 为光学镜头总透过率; D_0 为入瞳直径; l 为激光作用距离; θ 为激光发散角; S 为会聚光斑所占的 CCD 靶面面积。

2.3 实验结果与分析

实验测得了不同焦距 f 下彩色 CCD 成像系统的激光干扰效果, 实验结果如图 8 和表 3 所示。

从实验结果上看, 750 nm 激光对彩色 CCD 成像系统具有一定的干扰效果, 在图像中心处出现了明显光饱和现象以及串扰现象, 且随着成像系统聚焦 f 的增大, 彩色 CCD 相机的光饱和面积和串扰线逐渐增大, 激光对图像的干扰效果逐渐增强。串扰线是 CCD 发生光干扰的典型现象, 这说明入射激光已使 CCD 发生了光饱和串音。



图 8 变焦彩色 CCD 成像系统的激光干扰效果

Fig.8 Laser dazdling effects of varifocal colour CCD imaging system

表 3 变焦彩色 CCD 成像系统的激光干扰结果

Tab.3 Laser dazdling results of varifocal colour CCD imaging system

Power/W	Power density to target /kW · cm ⁻²	Focal length/mm	Distance/km	Light saturation area/mm
160	4.2	17	1.3	0.33×0.29
160	4.2	60	1.3	0.75×0.66
160	4.2	120	1.3	1.8×1.2

此外, 值得注意的是在图 8(b)和(c)还可以发现在光饱和区域附近还出现了一些弥散斑, 弥散斑形

状相同且较为规则, 分析认为这主要是由光学“鬼像”造成的。实验时由于入射激光功率非常高, 激光在透镜表面发生了多重反射, 进而在焦平面附近上产生了如图所示附加像; 图 8(a)干扰图像不同, 在图像中未形成“鬼像”, 而是出现了一系列的杂散光, 该杂散光的形成主要是由于入射激光经镜筒侧壁折转后倾斜进入探测器靶面造成的。图 8(a)~(c)干扰图像不同的原因主要是受成像视场角以及进入光学系统的激光能量不同所致, 一方面视场角越大, 入射激光越容易打在镜筒侧壁上; 另一方面进入光学系统能量越高, 系统越容易出现“鬼像”。对于短焦光学系统, 由于视场大、入瞳直径小, 进入到光学系统能量低, 从而形成了如图 8(a)所示的杂散光效果。

基于彩色 CCD 相机激光干扰模型, 对实验结果进行了数值仿真, 仿真结果如图 9 所示。

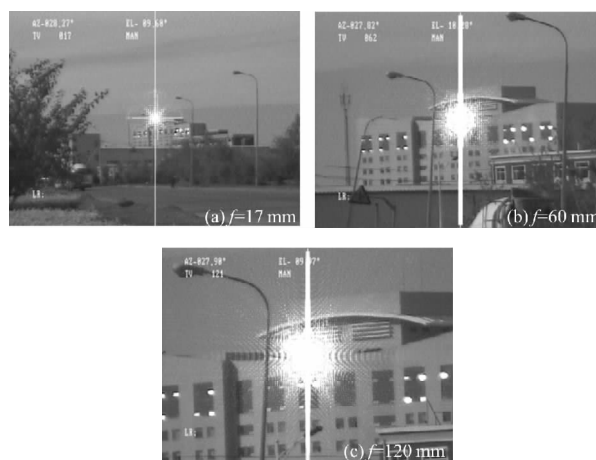


图 9 变焦光学系统的激光干扰仿真结果

Fig.9 Laser dazdling simulation images of varifocal optical system

由图 9 可以发现: 图像的光饱和及串扰现象明显, 且随着成像系统焦距 f 的增加, 激光对彩色 CCD 图像的干扰效果逐渐增强, 饱和光斑面积逐渐增大, 这与实验得到规律是一致的, 进而证明了理论模型的正确性。另外, 通过读取干扰仿真图像饱和和像素数, 可以得到图 9 中三幅干扰仿真图像所对应的光饱和和面积分别为 0.2 mm×0.2 mm, 0.55 mm×0.56 mm 和 0.96 mm×0.95 mm。对比实验结果, 仿真得到激光干扰效果弱于实验结果, 分析认为这是由两点原因造成: 一是模型中未考虑杂散光对光学系统成像效果的影响, 二是仿真溢出比等参数与实际器件存在差异。

为深入分析成像系统焦距 f 对干扰效果的影响; 图 10 中给出了不同聚焦 f 下的到靶光强分布。

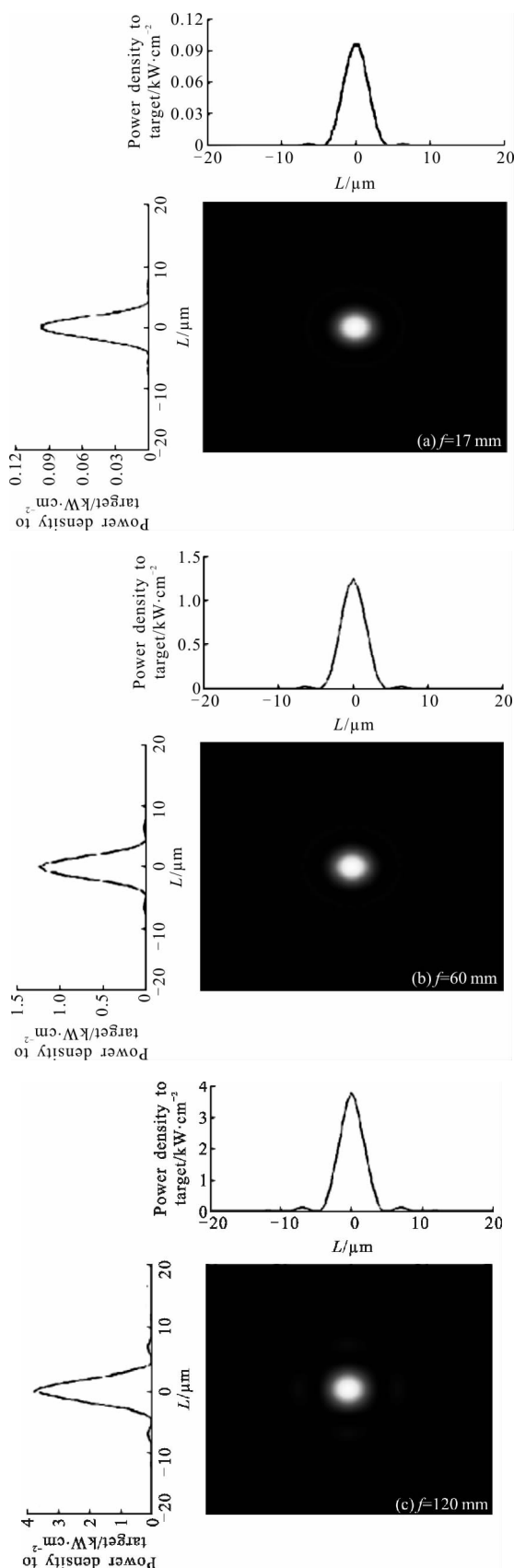


图 10 750 nm 激光到靶光强分布

Fig.10 Distribution of 750 nm laser power density to target

由图可以发现,不同焦距 f 下到靶光斑大小基本相同,其大小为 $9\mu\text{m}$,约占探测器4个像元,这与通过衍射极限公式计算的结果基本一致。另外,通过对比到靶功率密度的大小可以发现,随着成像系统焦距 f 减小,激光到靶功率密度也逐渐减小,这主要是由于系统的 F 数相同,在系统焦距 f 变小的情况下,入瞳直径也相应地减小,这样就有一部分激光被光阑截断,从而使得实际到靶功率密度减小。可见,短焦光学系统图像干扰效果较差的原因是孔径光阑的截断作用使实际到靶功率密度变小所致。

3 结 论

开展了变焦彩色 CCD 成像系统的激光干扰外场实验,测得了光学系统焦距 f 分别为17、60、120 mm 时 750 nm 激光对彩色 CCD 相机的干扰效果,并通过仿真模型的建立对实验结果进行了验证与分析。研究结果表明:在初始激光辐照条件相同的情况下,光学系统焦距 f 不同,半导体激光对彩色 CCD 的干扰效果不同,总体规律是随着光学系统焦距 f 的增加,CCD 靶面的光饱和面积逐渐增大,远场实际干扰面积逐渐减小。光学系统焦距 f 为 187 mm 时,CCD 靶面的光饱和面积为 $1.34\text{ mm}\times 1.34\text{ mm}$,实际干扰面积为 $9.3\text{ m}\times 9.3\text{ m}$ 。

此外,值得注意的是文中所得结论是针对 F 数一定的光学系统,而对于变 F 数的光学系统,则干扰效果应与实际系统的入瞳直径有关。

参考文献:

- [1] Jiang Tian, Zhang Zhen, Cheng Xiang'ai. Study on 'vertical bright line' image of CCD camera irradiated by Laser[C]// SPIE, 2010, 7656: 76561A-1-5.
- [2] Xu Yin, Sun Xiaoquan, Shao Li. Simulation of laser jamming and its influence on CCD imaging performance [C]//SPIE, 2010, 7850: 78501W-1-8.
- [3] Xu Jie, Zhao Shanghong, Hou Rui, et al. Laser-jamming effectiveness analysis of combined-fiber lasers for airborne defense systems[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(36): 6852-6859.
- [4] Zhang Zhen, Cheng Xiang' ai, Jiang Zongfu. Mechanism analysis of CCD excessive saturation effect induced by intense light [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(2): 232-237. (in Chinese)

张震,程湘爱,姜宗福. 强光致 CCD 过饱和效应机理分析

- [J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(2): 232-237.
- [5] Zhang Chao, Zhang Wei, Wang Bin, et al. Experimental study on interference characteristics of CCD at different laser wavelengths[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(6): 826-829. (in Chinese)
- 张超, 张伟, 王滨, 等. 不同波长激光对 CCD 的干扰性实验研究[J]. 激光技术, 2014, 38(6): 826-829.
- [6] Wang Siwen, Guo Lihong, Guo Ruhai. Analysis of laser jamming to satellite-based detector [C]//SPIE, 2009, 7382: 73822W-1-9.
- [7] Che Jinxi, Wang Dong, Zheng Hengwei, et al. Study on image jamming effect of infrared imaging system induced by CO₂ laser[C]//SPIE, 2011, 8193: 81930F-1-8.
- [8] Li Haiyan, Zhu Min, Lv Junwei, et al. Experiment research and theory analysis for off-axis laser disturbing CCD detection system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 840-843. (in Chinese)
- 李海燕, 朱敏, 吕俊伟, 等. 视场外激光干扰 CCD 探测系统实验研究与理论分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 840-843.
- [9] Liu Chang'an, Chen Jinbao, Ma Jinlong, et al. Jamming of visible light array CCD imaging system by infrared laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(8): 1727-1730. (in Chinese)
- 刘长安, 陈金宝, 马金龙, 等. 红外激光对可见光 CCD 成像系统的干扰[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(8): 1727-1730.
- [10] Wang Taotao, Fu Yuegang, Tang Wei, et al. Laser jamming model and out-field laser jamming experiment of single CCD colour imaging system [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(5): 588-594. (in Chinese)
- 王涛涛, 付跃刚, 汤伟, 等. 单 CCD 彩色相机激光干扰模型及外场干扰实验[J]. 发光学报, 2015, 36(5): 588-594.
- [11] Sun Chengwei. Laser Irradiation Effects[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 349-356. (in Chinese)
- 孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 349-356.
- [12] Li Junchang. Calculation of Laser Diffraction and Thermal Acting[M]. Beijing: Science Press, 2002: 154-159. (in Chinese)
- 李俊昌. 激光的衍射及热作用计算 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 154-159.