文章编号 1004-924X(2011)02-0348-06

# $CO_2$ 激光辐照氧化矾热像仪的实验

张来明[1],徐东东[1,2],亓风杰[3],王 敏[3],谢冀江[1],郭 劲[1],吴军辉[3]
(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所
激光与物质相互作用国家重点实验室,吉林 长春 130033;
2.中国科学院研究生院,北京 100049;3.中国人民解放军 63880 部队,河南 洛阳 471003)

**摘要**:为了研究波段内激光辐照焦平面阵列热像仪时的性能表现,设计了一系列视场内辐照实验。理论上采用了平顶高斯函数和有限个复高斯函数之和模拟激光器输出的平顶型光束以及激光器输出镜和光路中各种光学元件构成的光阑,结合近轴光学系统的柯斯林光束衍射公式计算了激光光束的传递以及变换。在实验中,通过在光路中放置单透镜光学元件以及调节该元件和激光器与热像仪之间距离的方法实现了实验室激光光束对热像仪的有效干扰。实验结果表明,通过设计的光路,连续的低功率激光能够对热像仪成像形成干扰,激光光束在热像仪焦平面上形成的弥散斑能覆盖热像仪近 30%的像元,使热像仪无法识别背景目标物。理论分析与实验结果相符。

**关 键 词**:激光辐照效应;热像仪;$CO_2$ 激光
**中图分类号**:TN249;TN216 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/OPE.20111902.0348

# Experimental research on $VO_2$ thermal imager irradiated by $CO_2$ laser

ZHANG Lai-ming[1], XU Dong-dong[1,2], QI Feng-jie[3],
WANG Min[3], XIE Ji-jiang[1], GUO Jin[1], WU Jun-hui[3]

(1. *State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;
3. *Unit* 63880 *of Chinese People's Liberation Army, Luoyang* 471003, *China*)

**Abstract**: In order to research the performance of the laser on a focal plane array thermal imager in a wavelenth, several field range irradiation experiments were designed and the actual light path transformation of the laser beam was calculated and simulated with the corresponding beam path theoretical calculation model. In theoretical analysis, the flat-topping laser beam, optical stop formed by a laser output mirror and the optical elements in the light path were simulated by the flat-topping Gaussian function and the sum of a finite number of complex Gaussian functions, then the delivery and transformation of laser beam were calculated with the Collins diffraction formula of a paraxial optical system. In the laboratory, the laser beam disturbance on the thermal imager was implemented by placing the singlet and changing the distance between the optical element and the laser. Experimental results indi-

**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. SKLLIM0901)

cates that low power CW lasers could disturb the thermal imager and the disc of confusion on the focal plane could overlay almost approximate 30 percent of image cells. The conclusion shows that the theoretical calculation is coinciden with the experimental results well.

**Key words**: laser irradiation effect; thermal imager; $CO_2$ laser

## 1　引　言

氧化矾($VO_x$)热像仪采用非制冷微测辐射热计焦平面，经红外成像光学系统聚焦成像[1]。$VO_x$ 薄膜材料在军事、工业以及通信等行业中均得到广泛应用，很多国家对这种材料都开展了深入研究，研究内容包括 $VO_x$ 薄膜材料的制备方法[2]、电学性质[3]、热学性质[4]、光学性质[5]、红外焦平面的制造工艺[6]以及读出电路的设计和信号优化[7]。国内也有学者开展了关于红外激光辐照 $VO_x$ 薄膜损伤阈值测量的相关研究[8]。

微测辐射热计焦平面阵列的每个像元均是一个热敏电阻，且 $VO_x$ 薄膜温度升高到某临界值时会发生相变。$VO_2$ 薄膜的相变温度是 68 ℃，相变时 $VO_2$ 薄膜会由具有四方晶格结构的半导体状态迅速变化为具有单斜晶格结构的金属态。如果激光光束经过聚焦，能量达到某个值，能使 $VO_x$ 薄膜的温度迅速升高到相变温度，便可对热像仪造成永久破坏[9]。但如果热像仪距激光光源较远，造成永久破坏即需要极高的能量密度，而且热像仪焦面少数几个像元的破坏通过信号处理系统校正后，并不影响对目标物的成像[10]。文献[11]用不同能量密度和不同重复频率的激光辐照 CMT 热像仪，利用眩光效应干扰热像仪对目标物的成像，随着激光能量的增加，焦面上饱和像元阵列半径与 $I_0^{1/3}$ 成正比，其中 $I_0$ 为入射光强。文献[12]综合考虑了激光光源与成像设备的参数，在激光低重复频率和高重复频率条件下，实验研究了激光的单脉冲能量、重复频率、成像设备的自动增益控制、背景光补偿、入射孔径和数据读出时间对眩光效应的影响。实验结果表明，针对某一台成像设备，适当调节激光参数可以产生十分强烈的眩光效应，降低成像质量，达到干扰目的。目前，利用眩光效应干扰热像仪一般采用脉冲激光器，因为产生眩光需要较高的激光功率密度，而连续激光器功率普遍较低。如果热像仪帧频大于激光器的重复频率，那么热像仪仍然可以对目标物成像而不受眩光效应干扰。为了实现用低功率连续激光对热像仪的有效干扰，在不知道热像仪参数的情况下，本文采用单透镜对激光光束进行变换，使用经过变换的连续激光辐照热像仪，利用激光辐照热像仪时光束的衍射和干涉现象，并通过变换光学元件的方法使激光光束在热像仪焦面上的像斑放大，通过覆盖和干扰目标物在焦面上的像斑，使目标物无法识别，从而对热像仪形成有效干扰。

## 2　激光光束传输理论计算

本实验激光器的出射光束为平顶型光束，采用平顶高斯函数模拟该光束，计算公式为

$$E(x,0)=\exp\left[-\frac{(N+1)x^2}{\omega_0^2}\right]\sum_{n=0}^{N},\frac{1}{n!}\left[\frac{(N+1)x^2}{\omega_0^2}\right]^n,\quad N=0,1,2\cdots, \tag{1}$$

式中，$\omega_0$ 为与平顶高斯函数腰宽有关的量；$N$ 为高斯函数阶数，$N=0$ 时，式(1)表示高斯函数。

使用幂级数

$$x^{2k}=\frac{(2k)!}{2^{3k}}\sum_{n=0}^{k}\frac{1}{(k-1)!(2n)!}H_{2n}(\sqrt{2}x),\quad k=0,1,2\cdots, \tag{2}$$

可以将平顶高斯函数表示成高斯函数与有限个厄米函数之和的乘积形式

$$E(x,0)=\exp\left[-\frac{(N+1)x^2}{\omega_0^2}\right]\sum_{n=0}^{N}\frac{1}{(2n)!}\cdot\sum_{k=n}^{N}\frac{1}{2^{3k}}\frac{(2k)!}{k!(k-n)!}\mathrm{H}_{2n}\left(\frac{\sqrt{2(N+1)}z}{\omega_0}\right), \tag{3}$$

式中，$N$，$\omega_0$ 为平顶高斯函数的阶数和激光光束参数。若光路中存在宽度为 $2a$ 的硬边光阑，可以用有限个复高斯函数之和逼近该光阑

$$\mathrm{rect}(x)=\sum_{m=1}^{M}A_m\exp\left(-\frac{B_m x^2}{a^2}\right). \tag{4}$$

式中，$A_m$，$B_m$ 和 $m$ 如表 1 所示。

**表 1　复高斯函数的系数 $A_m$，$B_m$ 和项数 $m$**

Tab. 1　Coefficients of complex Gaussian functions $A_m$，$B_m$ and number of terms $m$

| $m$ | $A_m$ | $B_m$ |
|---|---|---|
| 1 | 2.029 7−0.396 47i | 3.722 7−0.130 38i |
| 2 | 0.067 33−0.004 17i | 3.033 1+15.467i |
| 3 | −0.291 08−0.010 913i | 2.247 4−4.527 5i |
| 4 | 0.009 01−0.015 54i | 2.336 6+21.301i |

柯斯林光束衍射公式为

$$U_2(x_2,y_2)=\frac{\exp(\mathrm{i}kL)}{\mathrm{i}\lambda B}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}U_1(x_1,y_1)\exp\{\frac{\mathrm{i}k}{2\boldsymbol{B}}[\boldsymbol{A}(x_1^2+y_1^2)+\boldsymbol{D}(x_2^2+y_2^2)-2(x_1x_2+y_1y_2)]\}\mathrm{d}x_1\mathrm{d}y_1\ , \tag{5}$$

式中，$\boldsymbol{A}$，$\boldsymbol{B}$ 和 $\boldsymbol{D}$ 为光学系统近轴光束转换矩阵参数。

结合(1)，(2)，(3)，(4)，(5)式可以得到平顶高斯函数通过孔径为 $2a$ 的光阑传播公式为：

$$E(x,z)=\frac{\omega_0}{\sqrt{N+1}}\sqrt{\frac{\mathrm{i}k}{2B}}\exp(-\frac{\mathrm{i}kD}{2B}x^2)\cdot\sum_{m=1}^{M}A_m\exp\left[-\frac{(\frac{kx}{2B})^2}{\frac{N+1}{\omega_0^2}+\frac{\mathrm{i}kA}{2B}+\frac{B_m}{a^2}}\right]\cdot\sum_{n=0}^{N}\frac{1}{n!}(-\frac{1}{4})^n\left[\frac{\frac{N+1}{\omega_0^2}}{\frac{N+1}{\omega_0^2}+\frac{\mathrm{i}kA}{2B}+\frac{B_m}{a^2}}\right]^{n+1/2}\cdot\mathrm{H}_{2n}\left[\frac{\frac{kx}{2B}}{\sqrt{\frac{N+1}{\omega_0^2}+\frac{\mathrm{i}kA}{2B}+\frac{B_m}{a^2}}}\right]. \tag{6}$$

将光路的具体参数代入式(6)，便可计算光束的传播特性[13]。

## 3　实验与理论计算结果

### 3.1　实验仪器与光学元件

使用连续 $CO_2$ 激光器辐照热像仪，波长 $\lambda=10.6\ \mu$m，使用衰减片组调节激光器辐照热像仪的功率。采用焦距为 2 m 和 127 mm 的 ZnSe 透镜变换激光光束。热像仪具体参数如表 2。

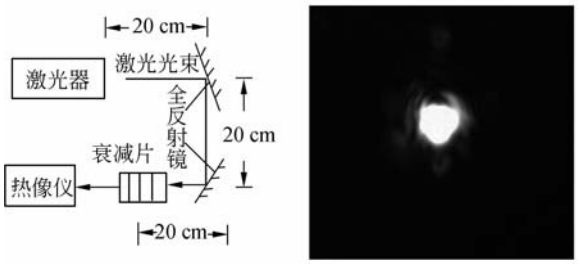
**表 2　热像仪参数**

Tab. 2　Parameters of thermal imager

| 像元数 | 波段 /μm | 等效噪声温度 /mK | 视场 /(°) | 焦距 /mm |
|---|---|---|---|---|
| 320×240 | 7.5～13.5 | ≤50 | 4.6×3.8 | 150 |

### 3.2　实验光路以及实验结果

使用激光器直接近距离辐照热像仪光路以及实验图像如图 1 所示。



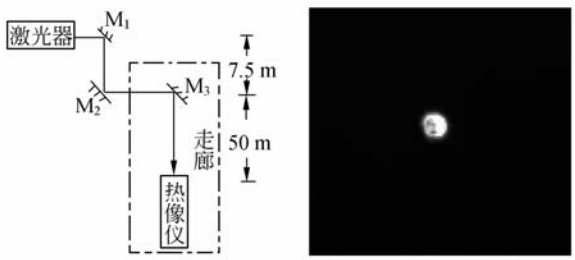

(a)实验光路　(b)实验图像

(a)Experimental light path　(b)Experimental image

图 1　激光器近距离直接辐照热像仪

Fig. 1　Laser irradiation on thermal imager in close range

激光远距离辐照热像仪时，实验光路与实验图像如图 2 所示。




(a)实验光路　(b)实验图像

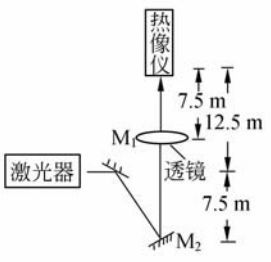
(a)Experimental light path　(b)Experimental image

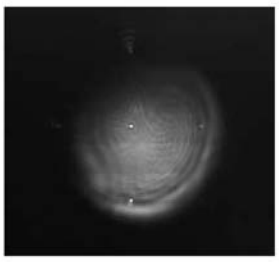
图 2　激光器远距离直接辐照热像仪

Fig. 2　Laser irradiation on thermal imager in long-range

在光路中放置单透镜，实验光路与实验图像如图 3 所示。

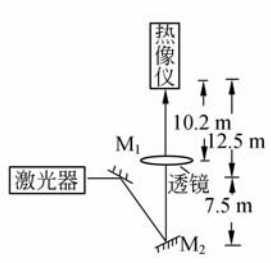
从图 1、图 2 可以看出，激光器直接辐照热像仪，无论距离远近，成像像斑均很小，对热像仪成像干扰效果有限。局部像元破坏之后，热像仪图像读出电路通过一系列算法实现的像元补偿技术可以将小面积像元被破坏造成的成像干扰降到最低。在光路中放置单透镜之后，如图 3(b)、图 3(d)所示，激光束在像面上成像像斑覆盖面积很

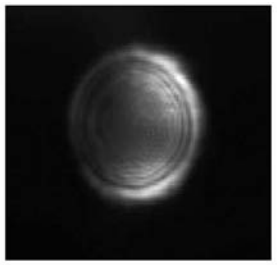


(a)实验光路，$f=2$ m　　(b)实验图像

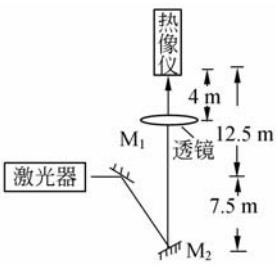
(a)Experimental light path, $f=2$ m　(b)Experimental image



(c)实验光路，$f=2$ m　　(d)实验图像

(c)Experimental light path, $f=2$ m　(d)Experimental image



(e)实验光路，$f=127$ mm　　(f)实验图像

(e)Experimental light path, $f=127$ mm　(f)Experimental image

图 3　激光器经单透镜辐照热像仪

Fig. 3　Laser irradiation on thermal imagers through singlet

大，将近 30%，对热像仪的干扰效果很好。但是如果透镜距热像仪的距离较近，且透镜焦距较小时，激光成像光斑很小，也无法实现对热像仪的成像干扰。所以通过调节热像仪与透镜之间的距离以及选择合适焦距的透镜可以有效地干扰热像仪的成像，使目标物成像无法判读。

### 3.3　理论计算结果

实验室激光器输出窗口为 2 cm×2 cm 的正方形，其输出光束呈平顶型，理论模型如图 4 所示。

激光近距离辐照热像仪时，其成像计算模型如图 5 所示。此时，由于激光器距热像仪较近，热像仪入瞳为圆形，半径为 50 mm，所以成像可以

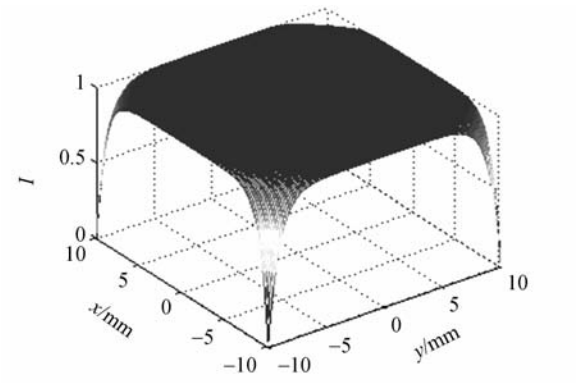
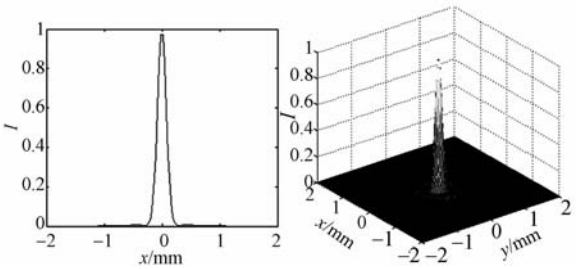



图 4　平顶光束模型

Fig. 4　Flat-topping beam model

看成是近轴没有遮拦的，对应图 1 光路。



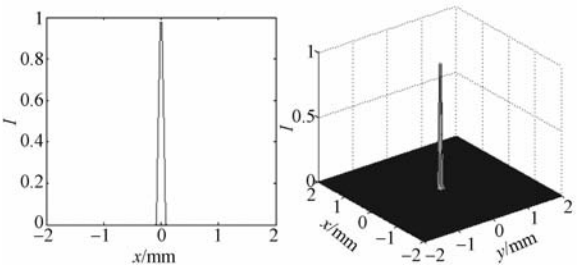

(a)光强分布　　(b)光强分布

(a)Light intensity distribution　(b)Light intensity distribution

图 5　激光近距离直接辐照热像仪

Fig. 5　Laser irradiation on thermal imager in close range

激光远距离辐射热像仪时，光强计算结果如图 6 所示，对应图 2 光路。




(a)光强分布　　(b)光强分布

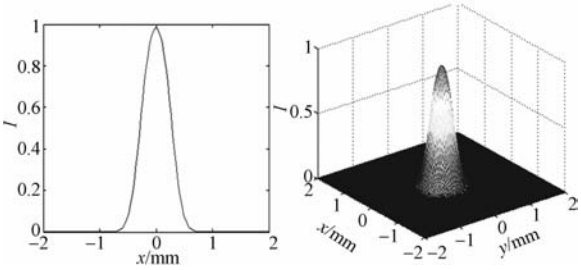
(a)Light intensity distribution　(b)Light intensity distribution

图 6　激光远距离直接辐照热像仪

Fig. 6　Laser irradiation on thermal imager in long-range

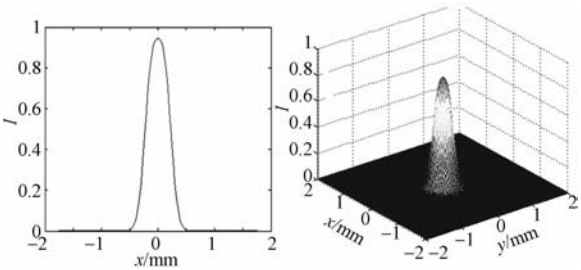
在光路中放置透镜时，光强计算如图 7 所示，图 7(a)～(b)、图 7(c) ～(d)、图 7(e) ～(f)分别对应图 3(a)、图 3(c)、图 3(e)所示光路。

对比数值模拟与实验结果可以看出，使用平顶高斯光束和有限个复高斯函数之和模拟激光器输出的平顶型光束以及各类光学元件产生的光阑，结合光束传输的柯斯林公式可以有效地模拟激光光束的传播过程。



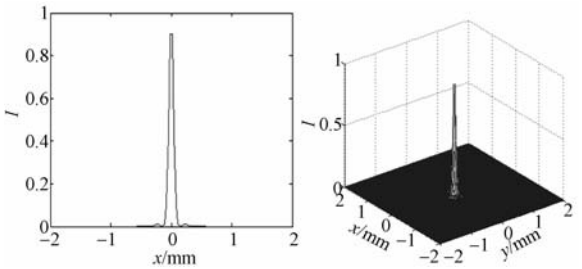

(a)光强分布　(b)光强分布

(a)Light intensity distribution　(b)Light intensity distribution




(c)光强分布　(d)光强分布

(c)Light intensity distribution　(d)Light intensity distribution




(e)光强分布　(f)光强分布

(e)Light intensity distribution　(f)Light intensity distribution

图 7　激光器经单透镜辐照热像仪

Fig. 7　Laser irradiation on thermal imager through singlet

## 4　结　论

为了使用低功率连续激光对热像仪形成有效的干扰，本文提出了单透镜变换激光光束的方法。实验以及理论计算证明，使用合适的光学变换装置以及调节光学元件之间的相互位置可以使激光束对热像仪形成有效干扰。激光光束经成像在焦平面上覆盖将近 30%的像元，实现了对热像仪的干扰。

**参考文献：**


[1] 许旻，崔敬忠，贺德衍. 非制冷红外焦平面阵列 $VO_2$ 薄膜结构和性能研究[J]. 微细加工技术，2003(1)：34-39.
XU M，CUI J ZH，HE D Y. Study of structure and properties of $VO_2$ thin film for uncooled IR focal plane array[J]. *Microfabrication Technology*，2003(1)：34-39. (in Chinese)

[2] 丰世凤，宁桂玲，王舰等，等. 二氧化矾薄膜制备研究的最新进展[J]. 化工进展，2007，26(6)：814-818.
FENG SH F，NING G L，WANG J，*et al*.. Recent progress of research on $VO_2$ thin film[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*，2007，26(6)：814-818. (in Chinese)

[3] 王银铃，李美成，赵连成. 磁控溅射氧化矾薄膜的相成分及电阻-温度特性[J]. 稀有金属材料与工程，2005，34(7)：1077-1080.
WANG Y L，LI M CH，ZHAO L CH. Phase compositions and resistance—temperature characteristic of VOx thin films by magnetron sputtering[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*，2005，34(7)：1077-1080. (in Chinese)

[4] 胡再勇，徐楚韶，杨绍利，等. $VO_2$ 薄膜相变及其温度滞后[J]. 过程工程学报，2002，2(5)：421-424.
HU Z Y，XU CH SH，YANG SH L，*et al*.. Phase transition and transition temperature hysteresis of $VO_2$ thin film[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*，2002，2(5)：421-424. (in Chinese)

[5] 许旻，邱家稳，贺德衍. 非晶氧化矾薄膜光学性质研究[J]. 真空与低温，2003，9(3)：134-137.
XU M，QIU J W，HE D Y. Optical property study of amorphous vanadium oxide films[J]. *Vacuum & Cryogenics*，2003，9(3)：134-137. (in Chinese)

[6] 王利霞. 微侧辐射热计阵列结构的制备[J]. 南京邮电大学学报，2009，29(5)：54-58.
WANG L X. Preparation of $VO_2$ microbolometer array[J]. *Journal of Nanjing University of Posts*

*and Telecommunications*, 2009, 29(5): 54-58. (in Chinese)

[7] 陈西曲，易新建，王强. 具有低噪读出特性的 $VO_2$ 非致冷焦平面读出电路[J]. 红外与毫米波学报，2006，25(4)：246-250.
CHEN X Q, YI X J, WANG Q. Low-noise readout circuit of $VO_2$-based uncooled focal plane array[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2006, 25(4): 246-250. (in Chinese)

[8] 陈学荣，胡军志，韩文政. 氧化钒薄膜脉冲激光损伤研究[J]. 材料热处理学报，2007，28(4)：122-124.
CHEN X T, HU J ZH, HAN W ZH. Study on pulse laser damage of vanadium oxide thin film[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2007, 28(4): 122-124. (in Chinese)

[9] 骆永全，王伟平，罗 飞. 连续激光辐照下二氧化钒薄膜热致相变实验研究[J]. 强激光与粒子束，2006，18(5)：713-716.
LUO Y Q, WANG W P, LUO F. Experimental study on heating—induced phase transition of vanadium dioxide thin films irradiated by CW laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(5): 713-716. (in Chinese)

[10] 邢素霞. 非制冷红外热像仪系统研究[D]. 南京：南京理工大学，2005.
XING S X. *Study of uncooled inrfared thermal imaging system*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005. (in chinese)

[11] SCHLEIJPEN R M A, DIMMELER A, EBERLE B, *et al*.. Laser dazzling of focal plane array cameras[J]. *SPIE*, 2007, 6738: 67380O-1-67380.

[12] DURÉCU A, BOURDON P, VASSEUR O. Laser-dazzling effects on TV-cameras: analysis of dazzling effects and experimental parameters weight assessment [J]. *SPIE*, 2007, 6738: 67380L-1-67380L-6.

[13] 吕百达. 激光光学[M]. 北京：高等教育出版社，2003.
LV B D. *Laser Optics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. (in Chinese)

**作者简介：**

**张来明**(1979－)，男，山东青州人，博士，副研究员，主要从事高功率气体放电激光器、激光辐照效应方面的研究。E-mail: lightcoming@ciomp.ac.cn

**徐东东**(1986－)，男，内蒙古呼和浩特人，硕士研究生，主要从事激光技术方面的研究。E-mail: xdd198537@126.com

**谢冀江**(1959－)，男，江苏镇江人，副研究员，主要从事激光器及激光应用技术方面的研究。E-mail: laserxjj@163.com

**郭　劲**(1964－)，男，研究员，主要从事光电测控技术和光学工程技术方面的研究。E-mail: guojin6957@163.com