

# 基于 Zemax 软件的准分子激光模拟

靳羽华 赵 艳 蒋毅坚

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要** 提出了一种模拟准分子激光光能量分布的方法。通过使用 Matlab 软件分析实际拍摄到的准分子激光光能量分布彩色图像并提取相关信息进行计算,使用光学软件 Zemax 模拟出实际的准分子激光的光能量分布。实际准分子光源光斑的尺寸约为  $16.5\text{ mm} \times 35.4\text{ mm}$ ,光束在  $x$  方向的发散角度约为  $3.3\text{ mrad}$ ,在  $y$  方向的发散角度约为  $11.5\text{ mrad}$ 。使用该方法所模拟的光源的光斑尺寸约为  $16.7\text{ mm} \times 35.3\text{ mm}$ ,光束在  $x$  方向的发散角度约为  $3.41\text{ mrad}$ ,在  $y$  方向的发散角度约为  $11.53\text{ mrad}$ ,光能量分布在细节上与实际光源保持一致。该方法解决了准分子激光光能量空间分布较为复杂难以进行光学模拟的问题,同时也为准分子激光的光学特性研究以及应用于准分子激光光学元件的研发提供了技术基础。

**关键词** 激光光学; 准分子激光; 能量分布建模; Zemax 软件

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0902010

## Simulation of Excimer Laser Based on Zemax Software

Jin Yuhua Zhao Yan Jiang Yijian

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** A method to simulate the energy distribution of excimer laser is provided. The color image of an actual excimer laser energy distribution is captured, and the image and extract relevant information are analyzed using Matlab software. Meanwhile the actual excimer laser light source is simulated by the optical software Zemax. The beam dimension of the actual excimer laser light source is about  $16.5\text{ mm} \times 35.4\text{ mm}$ . The beam divergence is about  $3.3\text{ mrad}$  in the  $x$  direction, and  $11.5\text{ mrad}$  in the  $y$  direction. The beam dimension of the light source simulated by this method is about  $16.7\text{ mm} \times 35.3\text{ mm}$ , and the beam divergence is about  $3.41\text{ mrad}$  in the  $x$  direction, and  $11.53\text{ mrad}$  in the  $y$  direction. The energy distribution of the simulated light is consistent with that of the actual excimer laser light in details. This method provides a perfect solution to the optical simulation difficulty of the complex spatial energy distribution of the excimer laser. It also provides a technical foundation for the investigation on the optical property of excimer laser and development of its optical components.

**Key words** laser optics; excimer laser; energy distribution simulation; Zemax software

**OCIS codes** 200.4560; 100.2960; 140.3300; 140.7240

## 1 引 言

准分子激光器是在激光辐射源中运用日益广泛的紫外波段激光器。由于稀有气体卤化物的准分子激光具有脉冲能量大、峰值功率高且波长在紫外区域的优点,很快就引起了研究人员对高功率、高能量、高平均功率、高重复频率激光器的兴趣<sup>[1]</sup>,使得准分子激光广泛地应用于科研、医疗和工业等诸多

领域。在科研方面,准分子激光用于激光诱导荧光检测多环芳烃类物质和脉冲激光沉积;医疗方面,准分子激光可用于眼科疾病和皮肤病治疗等;工业领域,可利用准分子激光进行低温硅退火、高密度电路板制作和布拉格光栅制作等<sup>[2]</sup>。早在 1960 年, Houtermans<sup>[3]</sup>就提出了准分子束缚-自由电子跃迁产生增益的思想,即以准分子为激活介质来实现激

**收稿日期**: 2013-03-29; **收到修改稿日期**: 2013-04-29

**基金项目**: 国家自然科学基金(10974009)、北京市自然科学基金 B 类重点项目(JC101311201201)

**作者简介**: 靳羽华(1988—),男,硕士研究生,主要从事激光先进制造外光路系统方面的研究。

E-mail: yuyuyusuke@126.com

**导师简介**: 蒋毅坚(1962—),男,教授,主要从事激光先进制造技术方面的研究。E-mail: yjjang@bjut.edu.cn

光振荡。1970年, Bosov等<sup>[4]</sup>采用强流电子束激发液态氙得到Xe<sub>2</sub>准分子激光, 输出激光波长为172 nm, 这是首次用准分子跃迁得到激光振荡。此后研究人员先后实现了XeF、KrF、ArF、XeCl、KrCl、ArCl等准分子激光<sup>[5-7]</sup>, 激励方式也由纯电子束扩展到自持放电、预电离放电等多种形式<sup>[8]</sup>, 其波段主要是193 nm (ArF)、248 nm (KrF)、308 nm (XeCl)以及351 nm (XeF)<sup>[9]</sup>。

准分子激光离不开惰性气体和卤素气体, 这也决定了准分子激光器的工作方式<sup>[10]</sup>。准分子激光器的混合气体在受到能量的激发后, 在一系列物理及化学反应中形成的分子并不稳定, 其寿命仅为几十毫微秒<sup>[11]</sup>。这就需要高压和高电压来不断维持激光的输出, 而气压和电压本身的不稳定极易导致增益本身的不均匀和输出窗的热扩散不稳定, 从而使得输出光束的横截面能量分布不均匀。通常情况下输出的激光为高阶多模式光束, 光束的横截面能量分布较为复杂, 光能量在X方向为高斯分布, Y方向为近平顶分布, 且光能量的分布会随准分子激光器的使用条件而发生变化<sup>[12]</sup>。对于激光加工或者科研应用, 要求光源具有很好的光束均匀性, 为此国内外研究人员对准分子激光能量均匀化做了大量的分析和研究<sup>[13-16]</sup>。对于空间分布较复杂的激光光束, 目前只有通过简单的光学计算模拟或者用单一的光学光源来进行替代模拟的报道。

本文提供了一种方法, 通过实际拍摄到的准分子激光光能量分布图像, 计算并分析其光能量的分布规律, 使用光学软件Zemax模拟出实际测试到的准分子激光光能量分布, 为准分子激光的光学特性研究以及应用于准分子激光光学元件的研发提供了技术基础。

## 2 准分子激光光能量分布

为了得到准分子激光的能量分布特征, 对德国Lambda Physik公司生产的LPXpro 305iF型KrF准分子激光器进行了研究, 该激光器输出激光的波长为248 nm, 最高单脉冲能量为1200 mJ, 最高重复频率为50 Hz, 平均功率为60 W。

实验中将准分子激光器的脉冲能量调整至500 mJ, 脉冲频率设置为2 Hz。在距离出光口50 cm处放置投射屏幕, 调整光路使激光光斑可以完整投射到屏幕中心。使用美国SPIRICON公司的LBA-usb-L230型激光光束分析仪对靶面的激光光斑能量分布进行实时跟踪捕捉。将图像捕获模式

调整为视频触发模式, 当激光脉冲被检测到时, 捕获该帧, 如此便可得到准分子激光光斑能量分布的彩色图像, 如图1所示。

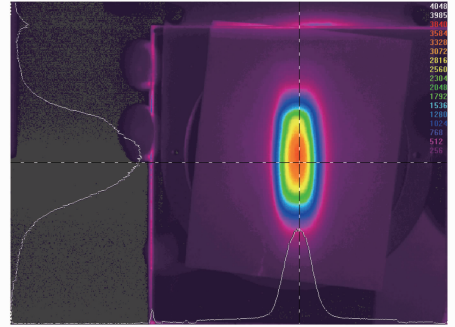


图1 激光光束分析仪得到的准分子激光能量分布彩色图像

Fig. 1 Color image of energy distribution shoted by laser beam analyzer

由光斑能量分布图可以直观得到准分子激光能量分布的特性: 光斑在X方向近似为高斯能量分布, 在Y方向则为一个不规则的能量分布: 总的来说, 整个光斑呈现出中心光强度大, 周边光强度逐渐减弱的一个能量分布状态。从空间光学的角度来分析, 该激光光束实际上是一个空间能量分布较复杂的激光光束<sup>[17]</sup>。

## 3 数学模型的建立及模拟方案

首先从光学和数学的角度去分析激光的叠加。在波动光学中, 激光的光场可用定态标量波来描述。对于超高斯光束在自由空间的传输, 柯林斯公式给出详细的解释<sup>[18]</sup>, 传输z距离后光场强度为

$$E(r, z) = U(r, z) \exp\{i[kz + \varphi(r, z)]\}, \quad (1)$$

$$U(r, z) = 2\pi F \int_0^{+\infty} \exp(-v^n) J_0\left(2\pi F v \frac{r}{w_0}\right) \exp(i\pi F v^2) v dv, \quad (2)$$

$$\varphi(r, z) = \frac{kr^2}{2z} + \arg\left[\int_0^{+\infty} \exp(-v^n) J_0\left(2\pi F v \frac{r}{w_0}\right) \exp(i\pi F v^2) v dv\right], \quad (3)$$

式中J<sub>0</sub>为零阶贝塞尔函数; F为与光束相关的菲涅耳数,  $F = w_0^2/\lambda z$ , 其中w<sub>0</sub>为光束束宽, λ为激光波长; k为波数; v为积分中间变量; n为幂级数。光强为复振幅的模方, 即

$$I_2(r, z) = E(r, z) E^*(r, z). \quad (4)$$

根据波的叠加原理, 多列波同时存在时, 交叠区

域内每点的振动是各列波单独在该点产生的振动的合成,其数学表达式为

$$E(r, z) = \sum_{i=1}^{\infty} E_i(r, z), \quad (5)$$

而总光强应为

$$I = |E(r, z)|^2 = \left| \sum_{i=1}^{\infty} E_i(r, z) \right|^2. \quad (6)$$

将(5)式代入(6)式就可以得到相干叠加后的光强。而对于非相干叠加情况下的光强,则为各光束光强的简单相加。

通过分析超高斯光能量叠加的数学模型,制定出模拟实际准分子激光光源的方案:首先要使用数学软件 Matlab 对光强度能量分布图像进行分析,并且提取出相关的数据生成光强度分布图;再用得到的光强分布图像进行数据拟合分析,得到光能量分布的规律并且生成各子光源的模型参数;最后在 Zemax 软件非序列模式下,用计算所得到的参数建模,测试光能量叠加后的结果。

#### 4 基于 Matlab 软件的图像信息提取

对于该彩色图像,想要挖掘其中的数据信息,就需要使用 Matlab 软件强大的图像处理功能来分析图像本身的色彩值来实现。使用程序在 Matlab 软件中导入图像,应用程序会对所有的像素进行分析。每个像素会被图像识别成为一个独立的点  $\{x, y\}$ , 每个点会包含独立的信息<sup>[19]</sup>, 对于真彩色的图像,每个像素的色彩都是用 RGB 三种颜色的灰度组合来实现,根据 RGB 三种颜色的灰度值,总共有

$256 \times 256 \times 256 = 16777216$  种颜色<sup>[20]</sup>。

由于该图像色彩的编辑函数和色彩的合成函数均为未知函数,因此从数学的角度去计算是较为困难的。如果根据各像素所携带的色彩信息直接来计算各点的光强度,则必须明确知道图像中光强度变化和色彩变化之间的对应关系,这种对照关系称为 colormap 软件。使用 LBA-sub-L230 客户端软件分析出图像的 colormap,如图 2 所示,可得到对应此 colormap 的 RGB 数值。

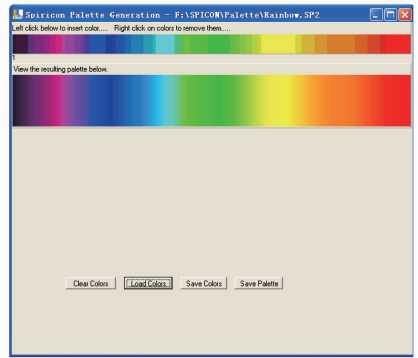


图 2 LBA-usb-L230 客户端软件处理图像的 colormap

Fig. 2 Colormap of the processed images by LBA-usb-L230 client software

将 colormap 编辑成一个数值矩阵,并且对应其色彩建立一个强度值的映射。使用 Matlab 软件编辑程序依次扫描图像中所有像素的 RGB 值,建立循环语句和 colormap 矩阵进行对照,若符合相应的 color 则将强度值赋予该点。由此得到了图像中各像素所代表的光强度,进一步利用坐标变换等手段得到光斑在  $x, y$  方向上的光强度分布数据,如图 3 所示。

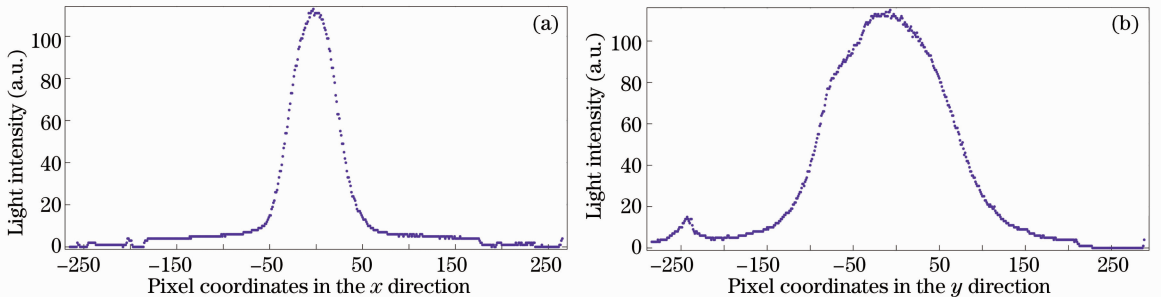


图 3 光能量密度分布数据。(a)  $x$  方向; (b)  $y$  方向

Fig. 3 Energy intensity distribution data. (a)  $x$  direction; (b)  $y$  direction

#### 5 数据拟合分析

为了更好地模拟该准分子激光光源,选用高阶高斯光源为子光源模型。在 Zemax 软件中代表高阶高斯光源光强度分布的多项式为

$$I(\theta_x, \theta_y) = I_0 \exp \left\{ -2 \left[ \left( \frac{\theta_x}{\alpha_x} \right)^{2G_x} + \left( \frac{\theta_y}{\alpha_y} \right)^{2G_y} \right] \right\}, \quad (7)$$

(7)式为高阶高斯光源的远场光强度分布公式,式中若光场沿  $X$  方向入射,则  $\alpha_x$  为  $x_z$  方向的衍射角,  $G_x$

为  $x$  方向的超级高斯因数,若  $G_x = 1.0$ ,那么该光源能量分布曲线为标准的高斯曲线,若  $G_x > 1.0$ ,曲线会趋近于方形;若光场沿  $y$  方向入射  $\alpha_y$  为  $yz$  方向的衍射角, $G_y$  为  $y$  方向的超级高斯因数,且  $G_x$  和  $G_y$  都必须大于等于  $0.01$ 。

若同时考虑  $x$  方向和  $y$  方向,则要进行数据的二维拟合,过程较复杂。因此试着由一个方向分析入手,若两个光源叠加,则建立基本模型。假设两个高阶高斯光叠加,建立如下公式

$$I(x) = I_1 \exp\left[-2\left(\frac{x-a_1}{b_1}\right)^{2G_1}\right] + I_2 \exp\left[-2\left(\frac{x-a_2}{b_2}\right)^{2G_2}\right], \quad (8)$$

$$I(y) = I_1 \exp\left[-2\left(\frac{y-c_1}{d_1}\right)^{2G_3}\right] + I_2 \exp\left[-2\left(\frac{y-c_2}{d_2}\right)^{2G_4}\right], \quad (9)$$

(8)式为  $x$  方向的光强度叠加, $a_1, a_2$  为两个高阶高斯光源在  $x$  方向距离坐标原点的倾斜量。 $b_1, b_2$  为两个光源的发散角度。(9) 式为  $y$  方向的光强度叠加, $c_1, c_2$  为两个高阶高斯光源在  $x$  方向距离坐标原点的倾斜量, $d_1, d_2$  为两个光源的发散角度。

基于非线性最小二乘法,加入二次平方的暴力趋近条件,限制拟合的边界条件后利用 Matlab 软件得到了一个较为理想的拟合结果,并计算出了公式中的未知参数,如图 4 所示。

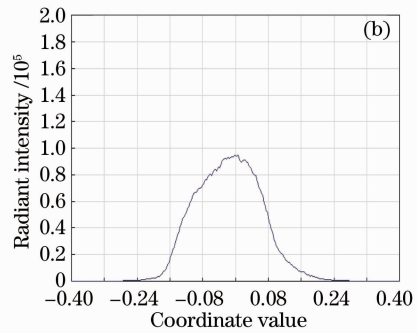
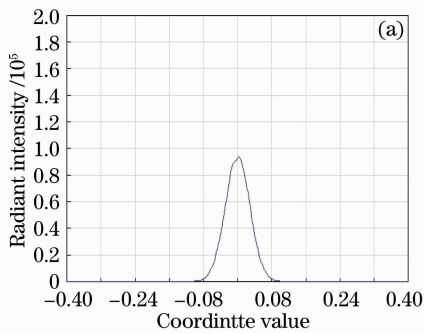


图 5 Zemax 软件中模拟光源在光探测器上得到的光能量密度分布。(a)  $x$  方向; (b)  $y$  方向

Fig. 5 Energy intensity distribution of virtual light source in Zemax software. (a)  $x$  direction; (b)  $y$  direction

实际光源光斑的尺寸约为  $16.5 \text{ mm} \times 35.4 \text{ mm}$ ,光束在  $x$  方向的发散角度约为  $3.3 \text{ mrad}$ ,在  $y$  方向的发散角度约为  $11.5 \text{ mrad}$ 。基于 Zemax 软件所模拟光源与实际光源相符,由探测器平面坐标易知其光斑尺寸约为  $16.7 \text{ mm} \times 35.3 \text{ mm}$ ,其光

束在  $x$  方向的发散角度约为  $3.41 \text{ mrad}$ ,在  $y$  方向的发散角度约为  $11.53 \text{ mrad}$ 。由 LBA-usb-L230 激光光束分析仪拍摄得到的实际激光光斑的能量分布曲线与使用 Zemax 软件模拟光源得到的光斑能量分布曲线的对比如图 7、8 所示。

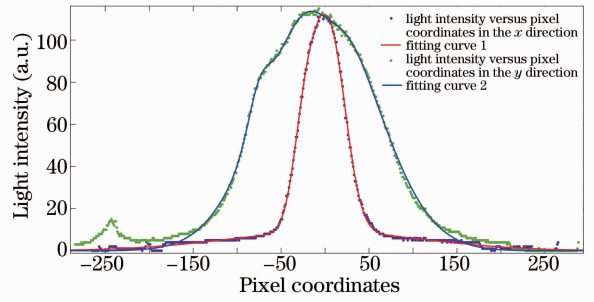


图 4 利用 Matlab 软件对光源能量分布数据拟合  
Fig. 4 Light source energy intensity distribution data fitted by Matlab software

## 6 基于 Zemax 光学软件的光源建模

使用 Zemax 光学设计软件在非序列模式下建立两个高阶高斯光源,并设置参数使两个高斯光源叠加进行追迹,在距离光源一定的距离上设置虚拟的光探测器以检测光能量分布的状态,将上面通过 Matlab 软件计算得到的参数输入 Zemax 软件生成模型。在虚拟光探测器上得到了所模拟的光斑,模拟得到的光能量密度分布和实际拍摄的准分子激光光斑得到的光能量密度分布在细节上保持一致,如图 5 所示。

图 5(a), (b) 分别为虚拟光探测器所得到的模拟光斑在  $x$  方向和  $y$  方向上的光能量分布。两者叠加后最终得到一个理想的模拟结果,模拟光能量分布与原始拍摄得到的光能量密度分布对比图如图 6 所示。



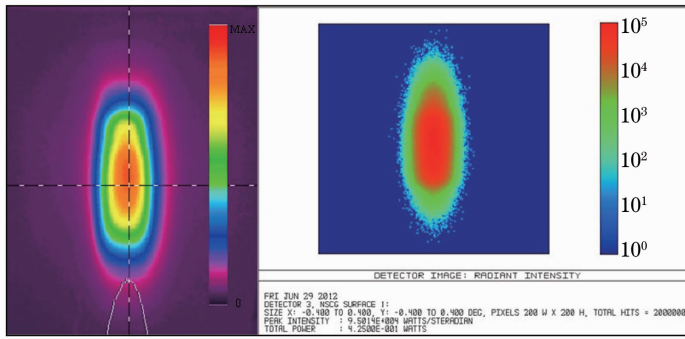


图 6 实际拍摄得到的光斑与模拟光源光斑的对比图

Fig. 6 Comparison chart of the actual captured energy image with its simulation

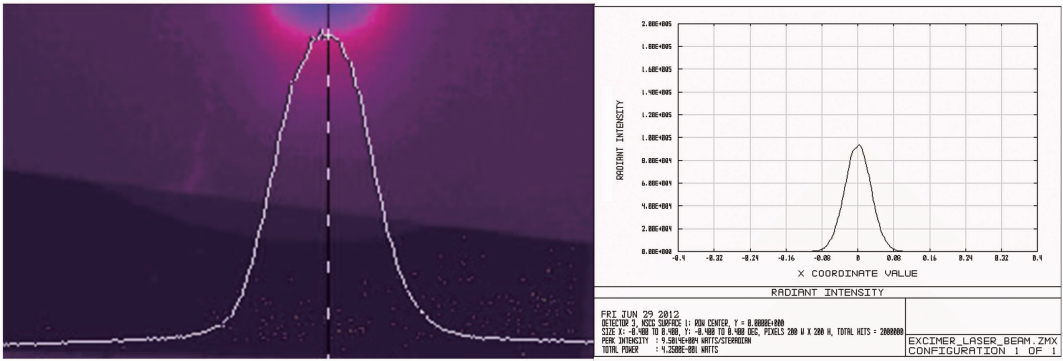


图 7  $x$  方向光能量曲线对比

Fig. 7 Comparison of light energy curves along the  $x$  direction

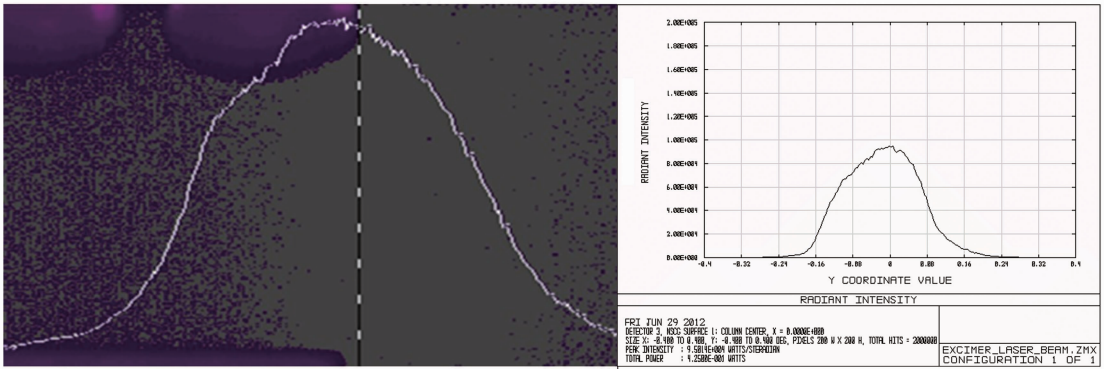


图 8  $y$  方向光能量曲线对比

Fig. 8 Comparison of light energy curves along the  $y$  direction

## 7 结 论

提供了一种方法来模拟准分子激光的光源。通过使用 Matlab 软件分析实际拍摄到的准分子激光能量分布彩色图像,并利用相关信息计算出光强度分布的规律,使用光学软件 Zemax 模拟出实际的准分子激光光源。解决了由于准分子激光光能量空间分布较为复杂难以进行光学模拟的问题。该方法的实现为准分子激光的光学特性研究扩展了新的思路;同时对应用于准分子激光光学的光学系统,如激

光微加工系统、激光整形均束系统、激光扩束系统、激光聚焦系统等系统的设计和研发提供了技术基础。

## 参 考 文 献

- 1 Lou Qihong. Progress of excimer lasers and its applications[J]. Chinese J Lasers, 1994, 21(5): 361-364.  
楼祺洪. 准分子激光器的发展和应用[J]. 中国激光, 1994, 21(5): 361-364.
- 2 Yu Yinshan, You Libing, Liang Xu, *et al.*. Progress of excimer lasers technology [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(9): 2264-2266.

- 余吟山, 游利兵, 梁 勳, 等. 准分子激光技术发展[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2264—2266.
- 3 Lou Qihong, Xu Jie, Fu Shufen, *et al.*. Pulsed Gas Discharge Lasers[M]. Beijing: Science Press, 1993, 243.  
楼祺洪, 徐 捷, 傅淑芬, 等. 脉冲放电气体激光器[M]. 北京: 科学出版社, 1993, 243.
- 4 N G Basov, V A Danilychev, Y M Popov, *et al.*. Laser operating in vacuum region of spectrum by excitation of liquid xenon with an electron beam[J]. JETP Letters, 1970, 12(10): 329—331.
- 5 H A Koehler, L J Ferderber, D L Redhead, *et al.*. Stimulated VUV emission in high pressure xenon excited by high current relativistic electron beams[J]. Applied Physics Letters, 1972, 21(5): 198—200.
- 6 J E Velazco, D W Setser. Bound free emission spectra of diatomic xenon halides [J]. J Chemical Physics, 1975, 62(5): 1990—1991.
- 7 S K Searles, G A Hart. Stimulated emission at 281.8 nm from XeBr[J]. Applied Physics Letters, 1975, 27(4): 243—245.
- 8 M K Makarov. Once upon a time; a hearty glance over the 30 year history of excimer lasers[C]. SPIE, 2005, 5777: 542—547.
- 9 D Lo. The role of halogen donors in discharge instability of rare-gas halide excimer lasers[J]. Applied Physics B, 1989, 49(6): 535—540.
- 10 A Vill. Principles and technology of excimer lasers[J]. Eesti NSV Teaduste Akadeemia Fuusika Instituudi Uurimused, 1984, 56: 18—37.
- 11 M Maeda. Principles of excimer light sources[J]. Review of Laser Engineering, 1995, 23(12): 1027—1037.
- 12 Ye Zhenhuan, Li Hongxia, Lou Qihong, *et al.*. Beam profile diagnosis technology for excimer laser[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2004, 16(5): 619—622.  
叶震寰, 李红霞, 楼祺洪, 等. 准分子激光的光束波面测量技术[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(5): 619—622.
- 13 Li Chengde, Chen Tao, Zuo Tiechuan. Design of fly's eye homogenizer for excimer laser micromachining [J]. Chinese J Lasers, 1999, 26(6): 560—564.  
李呈德, 陈 涛, 左铁钊. 两级复眼式准分子激光微加工均匀器的设计[J]. 中国激光, 1999, 26(6): 560—564.
- 14 Ye Zhenhuan, Lou Qihong, Li Hongxia, *et al.*. Beam homogenizing technology for UV excimer laser [J]. Laser Technology, 2005, 29(2): 207—212.  
叶震寰, 楼祺洪, 李红霞, 等. 准分子激光光束均匀技术[J]. 激光技术, 2005, 29(2): 207—212.
- 15 M Zimmermann, N Lindlein, R Voelkel, *et al.*. Microlens laser beam homogenizer: from theory to application[C]. SPIE, 2007, 6663(1): 1—13.
- 16 T Kajava, A Hakola, H Elfstrom, *et al.*. Flat-top profile of an excimer laser beam generated using beam-splitter gratings[J]. Opt Commun, 2006, 268(2): 289—291.
- 17 A Masters, T Geuking. Beam-shaping optics expand excimer laser applications [J]. Laser Focus World, 2005, 41(66): 99—103.
- 18 Lü Baida. Laser Optics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 223—249.  
吕百达. 激光光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 223—249.
- 19 Tang Jiyu, Sang Ziqin. Computation for color image rendering on visible spectra [J]. J Optoelectronics • Laser, 2001, 12(6): 631—634.  
唐吉玉, 桑梓勤. 可见光谱的彩色图像着色计算[J]. 光电子 • 激光, 2001, 12(6): 631—634.
- 20 P Rattanasakornchai, Y Hoshino, T Shimizu. Extraction of the characteristic points for motion detection by using color information[C]. SPIE, 2002, 4666: 141—148.

栏目编辑: 张 腾