

文章编号: 0253-2239(2005)03-359-5

# 低增益准分子激光最佳透射率的研究

邓国庆 朱志强 余吟山

(中国科学院安徽光学精密机械研究所准分子激光实验室, 合肥 230031)

**摘要:** 对于激光系统性能而言, 谐振腔最佳透射率具有非常重要的作用。低增益、宽带脉冲准分子激光的最佳透射率条件与其激光抽运脉冲引起的增益脉宽有密切关系。提出了在激光四能级系统速率方程的基础上模拟低增益准分子激光的跃迁行为, 并利用合理的近似, 研究低增益脉冲准分子激光谐振腔的最佳透射率。给出了其在不同增益脉宽情况下统一的最佳透射率条件, 并分析了以小信号增益系数为函数的最佳透射率变化规律。所得到的结论为: 低增益、宽带脉冲准分子激光的最佳透射率情况和连续激光器有所不同, 而是取决于增益脉宽和光子寿命之间的关系, 上述结论得到了相应实验研究结果的证实。

**关键词:** 激光器; 准分子激光; 最佳透射率; 速率方程; 增益

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

## Study of the Low Gain Excimer Laser Optimum Transmission

Deng Guoqing Zhu Zhiqiang Yu Yinshan

(Laboratory for Excimer Laser, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

**Abstract:** For the laser system performance, the resonator optimum transmission is of great important. The optimum transmission of low gain, broadband-pulsed excimer laser is closely relative to the gain duration, which is caused by its pump pulse. The transition behavior of excimer laser is simulated based on the rate equations of four-level laser energy systems. In terms of reasonable approximation, an analytical description for the optimum transmission of the low gain, pulsed excimer laser is developed. The uniform optimum transmission condition in the different gain duration is given, and the optimum transmission as a function of net gain is analyzed. The optimum transmission of low gain, broadband-pulsed excimer laser is fundamentally different from the continuous wave (CW) lasers, and it depends on the relation of gain duration and photon lifetime in the resonator, these above mentioned analytical results are approved by the corresponding experimental results.

**Key words:** lasers; excimer laser; optimum transmission; rate equation; gain

## 1 引 言

激光器光学谐振腔的最佳耦合透射率是激光器设计中的关键参量之一。连续激光器和增益脉宽比其谐振腔的光子寿命长的脉冲激光器, 存在着有效的激光谐振腔最佳透射率的近似公式。对于这类激光器而言, 如果小信号增益增大, 就必须增大谐振腔输出镜的透射率。在连续抽运激光系统中, 输出镜的最佳透射率在 2%~20% 之间; 在抽运增益脉宽大于谐振腔光子寿命的脉冲固体激光器中, 输出镜

典型的最佳透射率在 50%~70% 之间<sup>[1]</sup>。然而, 对于低增益、宽带准分子激光, 如电子束抽运的 C→A 态跃迁的 XeF<sup>[2,3]</sup> 和三原子准分子 Xe<sub>2</sub>Cl<sup>[4,5]</sup> 及 Kr<sub>2</sub>F<sup>[6]</sup> 等, 其增益脉宽和谐振腔光子寿命差不多, 甚至会更小。此时尽管激光系统参量中随时间变化的小信号增益系数还不能产生引起激光振荡的足够强的放大自发发射 (ASE), 但是它却仍能符合稳态激光阈值条件  $g_0 c \tau_{ph} \geq 1$ <sup>[7]</sup>。此时低增益准分子激光系统中输出镜的最佳透射率不能用连续激光器的谐

作者简介: 邓国庆(1976~), 男, 四川人, 在读博士生, 主要从事新型准分子激光技术及应用方面的研究工作。

E-mail: lerc@aiofm.ac.cn.

收稿日期: 2004-06-14; 收到修改稿日期: 2004-09-02

振腔最佳透射率的近似公式来计算,而是取决于增益脉宽和光子寿命之间的关系。本篇文章的目的就在于利用激光四能级系统的速率方程<sup>[8]</sup>模拟低增益准分子激光的跃迁行为,并利用合理的近似,得到在不同增益条件下的激光输出镜最佳透射率条件。分析了以小信号增益系数为函数的最佳透射率变化规律,所得到的结论得到了相应实验研究结果的证实。

## 2 准分子激光四能级速率方程

准分子激光器特别是稀有气体卤化物准分子激光在工业、科研和医疗等领域有重要应用。稀有气体、卤素气体和缓冲气体组成的激光介质在电子束或高压快放电抽运激励下,由于高能电子与中性粒子和离子之间相互作用,产生稀有气体卤化物准分子。准分子极其不稳定,激发态寿命一般为 $10^{-8}$  s,而其基态为排斥态寿命只有 $10^{-13}$  s,很快由于相互排斥而分解。因此准分子的出现总是以它们的特征辐射谱的出现为标志,受激辐射对应束缚的激发态到排斥的基态间的跃迁,典型的准分子势能曲线如图 1 所示。A, X 为排斥的基态, B, C, D 为激发态,在平衡核间距  $R_0$  处激发态势能最低,受激形成的准分子在  $R_0$  附近受到束缚。根据弗兰克-康登(Frank-Condon)原理,在  $R_0$  附近的弗兰克-康登区域内有最大的跃迁几率。由于基态几乎不存在准分子,很容易在激发态和基态间建立起粒子数反转,所以从理论上讲准分子是理想的四能级系统。准分子主要跃迁辐射发生在  $B \rightarrow X, C \rightarrow A$  过程中,本文中主要讨论的是低增益的  $C \rightarrow A$  跃迁辐射的准分子系统的最佳透射率问题。

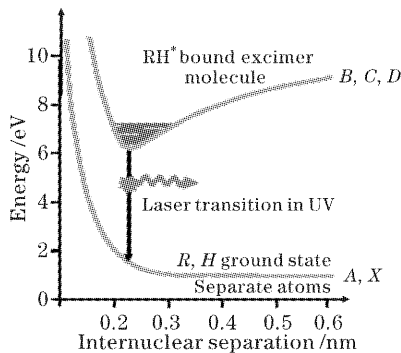


图 1 准分子势能曲线示意图

Fig. 1 Potential curve diagram of excimer

激光的动态特性可以通过一组联立速率方程相当精确地加以描述,最简单的方法是用一对联立微分方程来表示空间分布均匀的激光介质内的反转粒

子数和光子数密度。现在根据图 2 所表示的四能级系统能级简图来近似描述  $C \rightarrow A$  跃迁的准分子系统的速率方程。

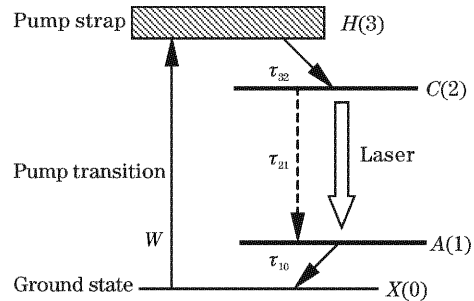


图 2  $C \rightarrow A$  跃迁准分子激光四能级简图

Fig. 2  $C \rightarrow A$  transition excimer four-level diagram

文中的速率方程涉及很多简化的假设,使用单组速率方程时,忽略了激光介质内辐射的轴向和径向变化。尽管有这些限制,这种简化的速率方程仍是有用的公式,有助于理解实际应用中准分子激光器件的特性。抽运带的高能级准分子向激光跃迁的上能级  $C(2)$  跃迁的速率非常快,以致可以忽略抽运带的粒子数,即  $n_3 \approx 0$ 。在具有这种假设下的四能级系统中,两个激光能级之间的变化量为

$$\frac{dn_2}{dt} = W - B_{21}\rho(\nu)n_2 - A_{21}n_2 + B_{12}\rho(\nu)n_1, \quad (1)$$

$$\frac{dn_1}{dt} = B_{21}\rho(\nu)n_2 - B_{12}\rho(\nu)n_1 + A_{21}n_2 - A_{10}n_1, \quad (2)$$

由于准分子能级是近似理想的四能级系统,受激形成的准分子在排斥的能级  $A(1)$  的寿命很短,可以认为能级  $A(1)$  以无限快的速度向基态能级消耗,那么有  $A_{10} \rightarrow \infty$ ,则根据(2)式得到  $n_1 \approx 0$ 。此时所有的粒子数都分布在激光跃迁的上能级中。则反转粒子数密度  $n$  就为上能级的粒子数密度,即  $n = n_2$ ,因此可以用下式取代(1)式和(2)式。

$$\frac{dn}{dt} = W - B_{21}\rho(\nu)n - A_{21}n, \quad (3)$$

为分析问题方便,用光子密度  $\phi$  和受激发射截面  $\sigma$  来表示上述速率方程。受激发射系数  $B_{21}$  和发射截面之间关系为

$$B_{21} = \frac{c}{h\nu g(\nu)} \cdot \sigma, \quad (4)$$

而单位频率能量密度可以用线型因子  $g(\nu)$ ,单光子能量  $h\nu$  和光子密度  $\phi$  表示

$$\rho(\nu) = h\nu g(\nu)\phi, \quad (5)$$

将(4)式、(5)式代入(3)式可得到

$$\frac{dn}{dt} = W - c\sigma\phi n - n/\tau_{21}. \quad (6)$$

至于谐振腔内光子密度随时间的变化率也可以根据同样的分析得到如下表达式：

$$\frac{d\phi}{dt} = c\sigma\phi n - \frac{\phi}{\tau_{\text{res}}} - \alpha\phi + \frac{\Omega}{4\pi} \frac{n}{\tau_{\text{rad}}}, \quad (7)$$

初始条件为  $n(0) = \phi(0) = 0$ 。

式中第一项为受激辐射光子密度增加量；第二项为谐振腔输出损耗，考虑腔长为  $d$  的稳定激光谐振腔中均匀加宽的增益介质长度为  $l$ ， $d$  和  $l$  都远大于激光腔的横向尺寸，为分析问题方便，假设激光腔长就等于激光增益介质长度  $d = l$ 。后腔反射镜的反射率为 100%，耦合输出窗透射率为  $T$ ，则谐振腔光子寿命为  $\tau_{\text{res}} = 2d/(cT)$ ；第三项为谐振腔内部损耗；第四项为沿光轴立体角内的自发辐射引起的光子数增加。 $\tau_{\text{rad}}$  为上激光能级向下激光能级的辐射寿命，一般来讲要大于激光上能级寿命  $\tau_{21}$ <sup>[9]</sup>。这种增加量虽小，但却提供了产生激光的辐射源。为了分析方便，我们进一步简化(7)式。首先忽略谐振腔内部损耗，由于自发辐射光子只是作为种子光子在激光振荡初期存在，所以可以利用初始光子密度  $\phi_0 = k \frac{2d\Omega}{c} \frac{g_0}{4\pi\sigma\tau_{\text{rad}}}$  替代自发辐射。这样准分子速率方程就写成

$$\frac{dn}{dt} = W - c\sigma\phi n - \frac{n}{\tau_{21}}, \quad n(0) = 0, \quad (8)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = c\sigma\phi n - \frac{\phi}{\tau_{\text{res}}}, \quad \phi(0) = \phi_0. \quad (9)$$

### 3 准分子激光最佳透射率条件

连续激光器和增益脉宽大于谐振腔光子寿命的准分子激光系统的输出镜最佳透射率可以用以下公式表示

$$T_{\text{opt}} = \sqrt{L}(\sqrt{G} - \sqrt{L}), \quad (10)$$

其中  $L = 2d\alpha_0$  为单次往返总损耗； $G = 2dg_0$  为单次往返总增益； $d$  为谐振腔腔长。下面我们将讨论增益脉宽小于光子寿命的准分子激光系统中的最佳透射率问题。在此基础上，我们假设两种情况，其一，抽运脉宽比激光上能级寿命短；其二，抽运脉宽远大于激光上能级寿命但小于谐振腔光子寿命。

假设准分子抽运脉宽比激光上能级寿命短，则增益脉宽就相当于激光上能级寿命，那么抽运脉冲可以描述成产生初始反转粒子数  $n_0$  的  $\delta$  函数脉冲。只要激光系统低于或接近阈值还没有达到饱和情况，反转粒

子数密度变化量根据其上的能级寿命指数衰减为  $n(t) = n_0 \exp(-t/\tau_{21})$ ，代入(9)式后积分得到

$$\phi(t) = \phi_0 \exp\{-t/\tau_{\text{res}} + \sigma n_0 \tau_{21} [1 - \exp(-t/\tau_{21})]\}, \quad (11)$$

(11)式表示的光子密度在  $t_{\text{max}} = \tau_{21} \ln(cg_0\tau_{\text{res}})$  时有最大的输出光子密度

$$\phi_{\text{max,ext}} = T\phi_0 \left(\frac{T}{2dg_0}\right)^{\sigma n_0 \tau_{21} T/2d} \exp\left[\left(cg_0 - \frac{cT}{2d}\right)\tau_{21}\right], \quad (12)$$

取  $\partial\phi_{\text{max,ext}}/\partial T = 0$  时，得到谐振腔最佳透射率  $T$  表达式为

$$T \cdot \exp\left(\frac{2d}{cT\tau_{21}}\right) = 2dg_0, \quad (13)$$

(13)式两边同乘以  $c\tau_{21}/(2d)$  得到下式

$$\frac{cT\tau_{21}}{2d} \exp\left(\frac{2d}{cT\tau_{21}}\right) = cg_0\tau_{21}, \quad (14)$$

令  $x = cT\tau_{21}/(2d)$ ，则(14)式的左边形式为  $x \exp(1/x)$ ，当  $x = 1$  时有最小值  $e$ 。

对于自发辐射占有主导地位的装置，最佳耦合输出率总是  $T = 1$ 。当受激辐射开始起作用，谐振腔反馈就变得很重要，当受激辐射足够强时，就有不为 100% 的最佳透射率出现，最佳透射率是受激辐射占主导地位的装置的特性之一。此时根据上式  $x = cT\tau_{21}/(2d) = 1$  可知激光系统的最佳透射率有相当简单的条件：

$$T_{\text{opt}} = \frac{2d}{c\tau_{21}} = \frac{\tau_{\text{RT}}}{\tau_{21}}, \quad (15)$$

式中  $\tau_{\text{RT}} = 2d/c$  是光子在谐振腔往返时间。

上面讨论了准分子抽运脉宽小于激光上能级寿命情况下的最佳透射率，接下来我们讨论抽运脉宽远大于激光上能级寿命的情况。此时，(8)式中的受激辐射项被忽略，谐振腔内光子数密度和增益系数主要由抽运脉冲决定，抽运脉宽为  $\tau_p$  的矩形增益脉冲代入(9)式得到最大输出光子密度近似为

$$\phi_{\text{max,ext}} \approx T\phi_0 \exp\left[g_0 c\tau_p - \left(\frac{c\tau_p}{2d}\right)T\right], \quad (16)$$

当  $\partial\phi_{\text{max,ext}}/\partial T = 0$ ，该式存在最佳耦合输出率的条件为  $\tau_p \cdot cT/(2d) = 1$ ，即

$$T_{\text{opt}} \approx \frac{2d}{c\tau_p} = \frac{\tau_{\text{RT}}}{\tau_p}. \quad (17)$$

在此定义  $\tau_g$  表示由激光上能级寿命  $\tau_{21}$  或激光抽运脉宽寿命  $\tau_p$  决定的增益脉宽，那么不同抽运条件下的低增益脉冲准分子激光最佳透射率条件(15)式、(17)式可统一写成

$$T_{\text{opt}} \approx \frac{2d}{c\tau_g} = \frac{\tau_{\text{RT}}}{\tau_g}. \quad (18)$$

这也表示当谐振腔光子寿命接近增益脉宽时,即  $\tau_{res} = \tau_g$  能得到激光系统的最佳透射率。

上面的分析是在忽略了激光谐振腔内部损耗的基础上进行的。实际上,当低增益脉冲准分子激光的内部损耗和其增益脉宽有不同的时间相关性时,为分析激光最佳透射率问题,其速率方程组(6)、(7)的数值解必须被给出<sup>[10]</sup>。而当激光腔内部损耗  $\alpha_0(t)$  和其小信号增益系数  $g_0(t)$  有相同的时间相关性,在这种条件下,将  $g_0$  替换成  $(g_0 - \alpha_0)$  后,所有上面分析的结果都能成立。

### 4 分析与讨论

下面我们假设谐振腔腔长和激光激活介质长度相等。以典型的低增益准分子激光数据为条件来分析激光系统的最佳透射率情况:  $g_0 = 0.02 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\sigma = 10^{-17} \text{ cm}^2$ ,  $\tau_{21} = 10^{-8} \text{ s}$ ,  $\tau_{rad} = 10^{-7} \text{ s}$ ,  $d = 15 \text{ cm}$ ,  $\Omega/(4\pi) = 8 \times 10^{-4}$ 。

准分子激光抽运激励为  $\delta$  函数脉冲时速率方程(11)的近似解和完整速率方程(6)、(7)的数值解如图3所示。由于近似公式认为函数脉冲产生初始反转粒子数,故在  $t=0$  处近似解和精确数值解有较大差异。但从图3中可以看出当耦合输出率  $T \leq 0.3$  时简化方程(11)的近似解是完备速率方程组(6)、(7)精确解的合理近似。

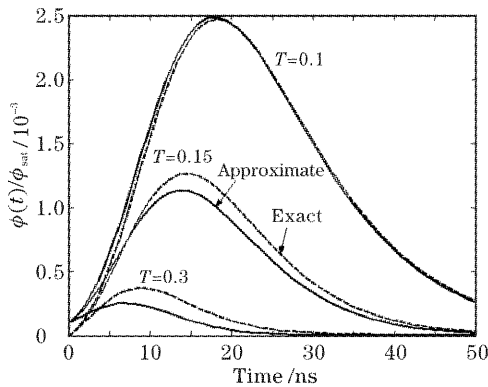


图3 不同耦合输出率的腔内光子数密度随时间变化曲线  
Fig. 3 Normalized intracavity photon density as a function of time for the different mirror transmissions

图4为根据(12)式绘出最大输出光子密度随谐振腔输出镜透射率变化曲线。对于很小的增益情况,光子密度随透射率增加而单调递增。当小信号增益系数超过  $0.01 \text{ cm}^{-1}$ , 激光系统就出现了最佳透射率。随着增益进一步增大,激光辐射强度很快增加,谐振腔最佳透射率也增大。当系统的小信号净

增益增加到一定值时,由于很强的放大自发辐射,在一趟往返光程中激光就饱和了,谐振腔的反馈不能增加激光输出强度,此时最佳透射率接近  $100\%$ 。这种情况符合  $B \rightarrow X$  态跃迁的高增益准分子激光器,如  $\text{XeCl}$  和  $\text{KrF}$  等。由于很高的增益系数,这些激光系统工作在放大自发辐射状态,其反馈受激辐射对激光没有增强效果,所以在设计此类高增益准分子激光系统时,谐振腔输出镜的最佳透射率的问题就显得没有低增益激光系统那么重要了<sup>[11]</sup>。

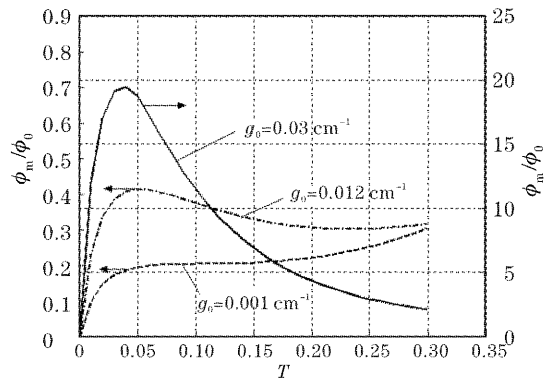


图4 归一化光子数密度随透射率变化曲线  
Fig. 4 Normalized peak extracted photon density as a function of transmission for three different gains

下面以已有的实验结果来讨论低增益准分子激光最佳透射率的问题。在 Nachshon<sup>[12]</sup> 和 Nighan<sup>[13]</sup> 等人的实验中,高能电子束抽运的  $C \rightarrow A$  态跃迁的  $\text{XeF}$  激光腔长  $d = 12.5 \text{ cm}$ , 往返时间  $\tau_{RT} \approx 0.83 \text{ ns}$ , 增益脉宽为  $\tau_g \approx 25 \text{ ns}$ 。根据(18)式此激光系统的最佳透射率  $T_{opt} \approx 0.033$ , 实验测得的最佳透射率为  $T_{ex} \approx 0.05$ , 与我们的理论计算得出的结果吻合得较好,略高于计算值,那是因为激光实际工作在其阈值之上。所测得相应的增益和损耗系数分别为  $0.038 \text{ cm}^{-1}$  和  $0.01 \text{ cm}^{-1}$ , 而按照连续激光器最佳透射率公式计算,最佳透射率为  $0.24$ , 远不符合实验结果。

下面对比分析一下连续激光器和低增益准分子激光的最佳透射率的情况。当增益脉宽  $\tau_g \leq \tau_{ph}$  时,低增益脉冲准分子系统和连续激光系统的最佳透射率随小信号净增益系数变化的曲线如图5所示。

统一的激光工作参量为  $\alpha_0 = 0.005 \text{ cm}^{-1}$ ,  $g_0 = 0.02 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\sigma = 10^{-17} \text{ cm}^2$ ,  $\tau_{21} = 10^{-8} \text{ s}$ ,  $\tau_{rad} = 10^{-7} \text{ s}$ ,  $d = 15 \text{ cm}$ ,  $\Omega/(4\pi) = 8 \times 10^{-4}$ 。如图5所示在其它激光参量完全一致的情况下,低增益脉冲准分子激光和连续激光的最佳透射率条件完全不同。对于连续激光来讲,每一正的净增益都能满足激光阈值条件,都

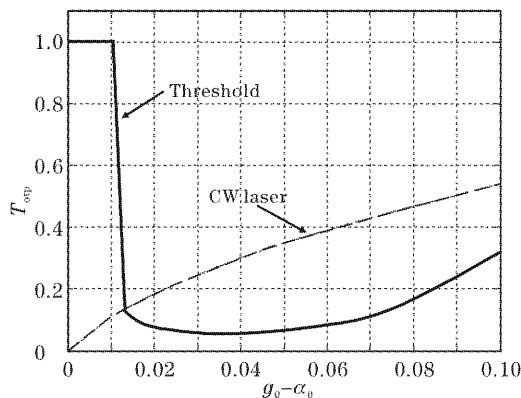


Fig. 5 最佳透射率随小信号净增益变化曲线

Fig. 5 Optimum transmission as a function of net gain coefficient for low gain excimer and CW configurations

存在一确定的最佳透射率。而对于低增益准分子激光来讲,当小信号净增益系数  $g_0 c \tau_g \leq e$  时,激光系统不能达到激光阈值条件,此时没有小于 1 的最佳透射率存在。随着小信号增益的增加,一旦达到激光阈值条件,最佳透射率就降至很小的值,随着增益系数增加,最佳透射率也缓慢增大,而当增益很大时,放大自发辐射取代受激辐射占主导地位,其激光系统谐振腔输出镜的最佳透射率又很快上升到 100%。

## 5 结 论

本文显示低增益脉冲准分子激光和连续激光有完全不同的最佳透射率条件。对于连续激光器而言,激光阈值条件下增益大于损耗意味着最佳透射率的存在;然而低增益脉冲准分子激光的最佳透射率情况却和其抽运脉冲宽度及激光阈值有很密切的关系,不能用简单的连续激光器的条件来解释,而是取决于其增益脉宽和光子寿命之间的关系。本文的结论对于设计不同抽运脉宽情况下的低增益脉冲准分子激光有着理论上的指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 Amon Yariv. *Instruction to Optical Electronics* [M]. Li Zhongqi trans. Beijing: Science Press, 1983. 132~140 (in Chinese)  
雅里夫. 光电子学导论[M]. 李宗琦译. 北京: 科学出版社, 1983. 132~140
- 2 R. M. Hill, P. L. Trevor, D. L. Huestis *et al.*. Measurement of gain on the XeF (C-A) blue green band[J]. *Appl Phys. Lett.*, 1979, **34**(2): 137~139
- 3 W. K. Bischel, H. H. Nakano, D. J. Eckstrom *et al.*. A new blue-green excimer laser in XeF[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **34**(9): 565~567
- 4 K. Y. Tang, D. C. Lorents, D. L. Huestis. Gain measurements on the triatomic excimer Xe<sub>2</sub>Cl[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **36**(5): 347~349
- 5 F. K. Tittel, W. L. Wilson, R. E. Stickel *et al.*. A triatomic Xe<sub>2</sub>Cl excimer laser in the visible[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **36**(6): 405~407
- 6 F. K. Tittel, M. Smayling, W. L. Wilson *et al.*. Blue laser action by the rare gas halide trimer Kr<sub>2</sub>F[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **37**(10): 862~864
- 7 Yao Baoquan, Wang Yuezhu, Liu Qiang *et al.*. Analysis of Influence of phase conjugate laser upon the threshold of optical parametric oscillator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 45~49 (in Chinese)  
姚宝权, 王月珠, 刘 强 等. 相位共轭激光对光学参量振荡器阈值影响的分析[J]. 光学学报, 2002, **22**(1): 45~49
- 8 Ahsan U. Khan, Michael Kasha. Mechanism of four-level laser action in solution excimer and excited-state proton-transfer cases[J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, 1983, **80**(6): 1767~1770
- 9 Xuanhui Lu, Kaikai Huang, Dajian Xue *et al.*. Laser beam characteristic for laser resonators with diffraction optical elements [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(3): 153~156
- 10 Naoya Hamada, Roland Sauerbrey, Frank K. Tittel. Analytical model for injection-controlled excimer laser amplifiers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, **24**(12): 2458~2466
- 11 Ma Haixia, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. A novel resonator to improve the laser beam quality[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(11): 977~980 (in Chinese)  
马海霞, 楼祺洪, 董景星等. 一种改善激光器输出光束质量的新型谐振腔[J]. 中国激光, 2003, **30**(11): 977~980
- 12 Y. Nachshon, F. K. Tittel, W. L. Wilson *et al.*. Efficient XeF (C-A) laser oscillation using electron-beam excitation [J]. *Appl. Phys.*, 1984, **56**(1): 36~48
- 13 W. L. Nighan, F. K. Tittel, W. L. Wilson *et al.*. Synthesis of rare gas-halide mixtures resulting in efficient XeF (C-A) laser oscillation[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **45**(9): 947~949