

# CW Nd·YAG 激光器中 Cr<sup>4+</sup>·YAG 被动调 Q 的实验研究\*

王明伟 邢岐荣 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院教育部光电信息技术科学开放实验室 天津 300072)

徐 军 乔景文 邓佩珍

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

**提要** 对 Cr<sup>4+</sup>·YAG 被动调 Q CW Nd·YAG 激光器的重复频率和脉冲宽度与输出功率的关系作了系统的实验研究。用 Cr<sup>4+</sup>·YAG 作为可饱和吸收体在 CW Nd·YAG 激光器中获得了重复频率为 2.2~10 kHz, 脉宽为 120~900 ns 的稳定的调 Q 序列脉冲输出。不同初始透过率的 Cr<sup>4+</sup>·YAG Q 开关对应不同范围的重复频率和脉宽。观察到了调 Q 脉冲包络中的调制现象并给出了合理的解释。

**关键词** Cr<sup>4+</sup>·YAG, 被动调 Q, 可饱和吸收体, 锁模, 拍频

## 1 引 言

Cr<sup>4+</sup>·YAG 是 1988 年出现的一种新型近红外宽带可调谐固体激光材料<sup>[1]</sup>。由于它的发射谱(1.3~1.6 μm)处于光纤的零损耗、零色散区和人眼工作的安全波段,因此近几年成为国内外学者研究的热点。人们利用 Cr<sup>4+</sup>·YAG 作为激光增益介质已经实现了不同种类的锁模运转<sup>[2,3]</sup>,获得了飞秒量级的超短脉冲。同时,由于 Cr<sup>4+</sup>·YAG 在 0.9~1.2 μm 具有显著的饱和吸收特性,而且跟其它在相似波段表现出可饱和吸收特性的有机染料(如 BDN)和色心晶体(如 Li·F<sub>2</sub>)相比,具有吸收截面大、易获得高掺杂浓度、可饱和吸收稳定性好、热传导性和机械性能良好、使用方便、寿命长等优点,所以它又是掺 Nd<sup>3+</sup> 激光介质(如 Nd·YAG, Nd·YVO<sub>4</sub>)的理想被动 Q 开关。国外采用 Cr<sup>4+</sup>·YAG 作为被动 Q 开关实现了对连续和脉冲 Nd·YAG 激光器的调 Q 运转<sup>[4,5]</sup>。利用国产 Cr<sup>4+</sup>·YAG 晶体研究 CW Nd·YAG 激光器调 Q 的某些特性及 CW Nd·YAG 激光器中 Cr<sup>4+</sup>·YAG 被动调 Q 的稳定性,中国科学院上海光机所的丁彦华等人做了详尽的工作并给出了很好的实验结果<sup>[6]</sup>。我们采用中国科学院上海光机所生长的不同初始透过率的 Cr<sup>4+</sup>·YAG 晶体对 CW Nd·YAG 激光器进行了系统的调 Q 实验,获得的调 Q 序列脉冲的重复频率范围为 2.2~10 kHz, 频率抖动 < 3%; 单脉冲宽度的范围为 120~900 ns, 幅度抖动 < 3%。另外,在实验中观察到调 Q 脉冲包络中的调制现象,并给出了合理的解释。

\* 国家自然科学基金资助项目。

## 2 实 验

实验装置如图 1 所示。Nd·YAG 激光腔为平凹腔,全反镜  $M_1$  的曲率半径为 5 m,耦合输出镜  $M_2$  为一楔形平面镜,其透过率为 12%,Nd·YAG 棒的直径为 4 mm,有效长度为 108 mm,用连续氙灯 ( $\phi 9 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ) 泵浦,谐振腔长为 63 cm。其中 Cr<sup>4+</sup>·YAG 薄片通过铜片支架用水冷却,置于靠近  $M_1$  的位置,两通光表面均镀  $1.06 \mu\text{m}$  的增透膜。 $A$  为小孔光阑,改变其大小与位置以控制其横模运转。

采用初始透过率分别为 93%, 86.5% 和 80%

的 Cr<sup>4+</sup>·YAG 对 Nd·YAG 激光器实现了被动调 Q 运转。当把 Cr<sup>4+</sup>·YAG 插入连续运转的 Nd·YAG 激光器腔内时,在示波器上就会观察到千赫兹量级的几乎等间距的调 Q 脉冲序列输出。图 2 (a) 是一典型的脉冲序列,其重复频率为 2.3 kHz,脉冲间隔抖动为 3%。图 2 (b) 是相应的展宽后的单脉冲波形,脉冲宽度(FWHM)约为 170 ns,幅度抖动为 3%。

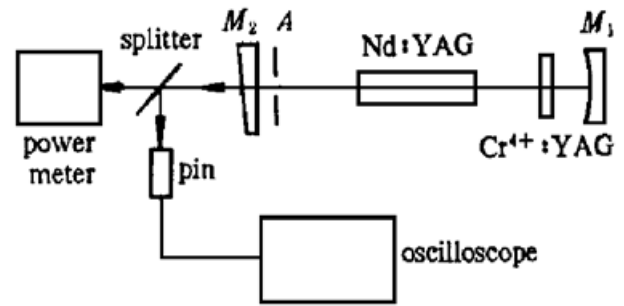


图 1 Cr<sup>4+</sup>·YAG 对 CW Nd·YAG 激光器被动调 Q 实验装置

Fig. 1 Experimental setup for a Nd·YAG laser Q-switched by Cr<sup>4+</sup>·YAG

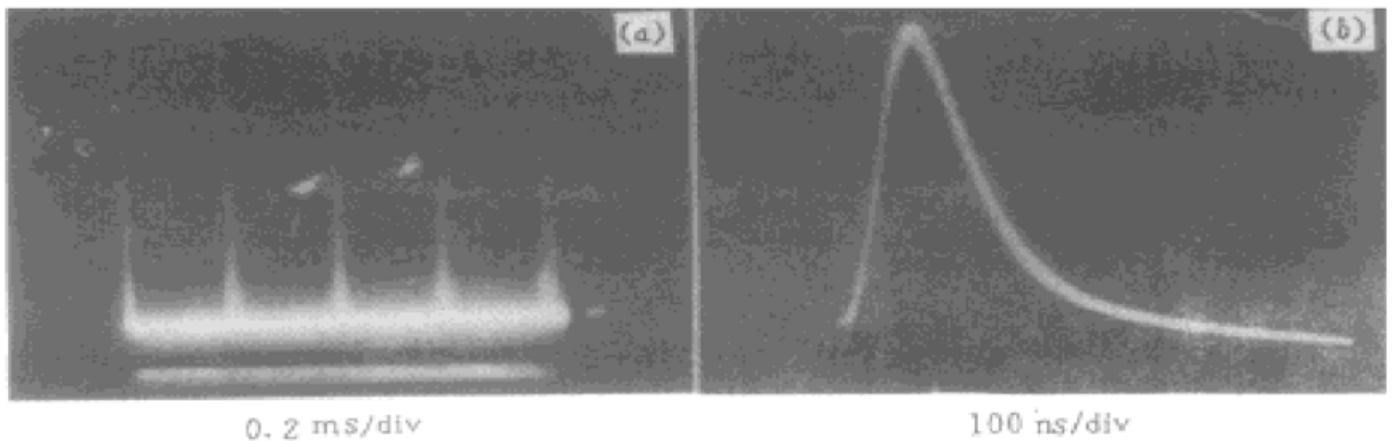


图 2 (a) 初始透过率为 80% 的 Cr<sup>4+</sup>·YAG 对 CW Nd·YAG 激光器被动调 Q 的 2.3 kHz 的序列脉冲波形;  
(b) 脉冲宽度为 170 ns(FWHM) 的单脉冲波形

Fig. 2 (a) Oscilloscope traces of a train of pulses at 2.3 kHz from the CW pumped Nd·YAG laser Q-switched by a Cr<sup>4+</sup>·YAG absorber of initial transmission of 80%; (b) An expanded shape of a single pulse, showing a 170 ns width (FWHM)

## 3 结果与讨论

### 3.1 平均输出功率对脉宽和重复频率的影响

平均输出功率对脉宽和重复频率的影响如图 3 所示。可以看出,对初始透过率为 80% 的 Cr<sup>4+</sup>·YAG 晶体,随着平均输出功率的提高,调 Q 脉冲的重复频率近似线性增高,如图 3 (a) 所示;单脉冲的宽度也近似线性变窄,如图 3 (b) 所示。这是因为,当泵浦功率增加时,Nd·YAG 激发态粒子数集聚的速度增加,反转粒子数密度提高,腔内净增益系数变大,增益达到阈值所用的时间缩短,因此两次漂白可饱和吸收体的时间间隔缩小了,缩短了调 Q 周期,提高了调 Q 脉冲的重复频率。另外,由于腔内净增益系数变大,腔内光子数的增长及反转粒子数的衰减就越迅速,因此脉冲的建立及熄灭过程也就越短,单脉冲的宽度变窄。

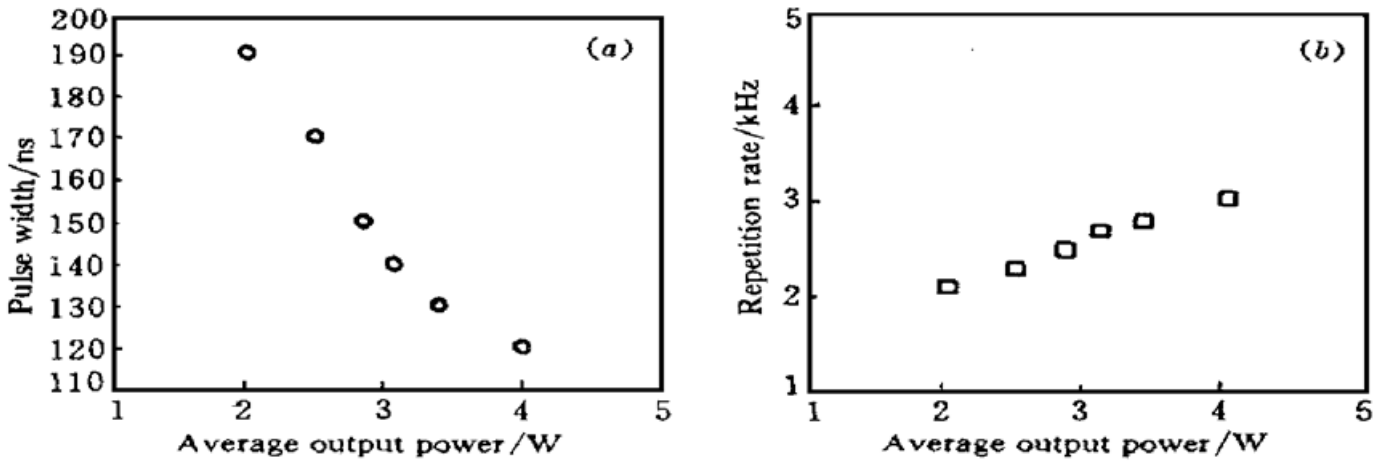


图3 初始透过率为 80% 的 Cr<sup>4+</sup> :YAG 所对应的脉冲宽度和重复率与平均输出功率的关系

Fig. 3 Pulse width and repetition rate of the Q-switched laser vs average output power. The initial transmission of the Cr<sup>4+</sup> :YAG absorber was 80%

### 3.2 Cr<sup>4+</sup> :YAG 晶体的初始透过率对调 Q 脉宽及其重复频率的影响

改变 Cr<sup>4+</sup> :YAG 晶体的初始透过率, 调 Q 脉冲的重复频率和脉宽就发生明显的变化。图 4

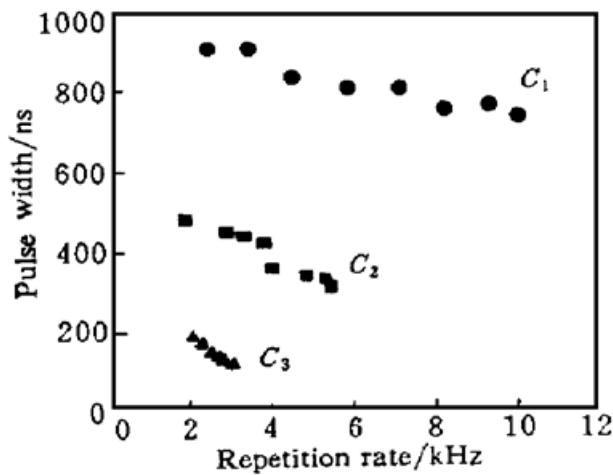


图4 初始透过率分别为 93%, 86.5% 和 80% 的三块 Cr<sup>4+</sup> :YAG 晶体 C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> 和 C<sub>3</sub> 所对应的调 Q 脉宽与重复率的关系

Fig. 4 Pulse width vs repetition rate for Cr<sup>4+</sup> :YAG saturable absorbers. C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> and C<sub>3</sub>, are initial transmissions, being 93%, 86.5% and 80%, respectively

给出了初始透过率分别为 93%, 86.5% 和 80% 的三块 Cr<sup>4+</sup> :YAG 晶体的调 Q 输出情况。从中可以清楚地看出, 不同初始透过率的 Cr<sup>4+</sup> :YAG 晶体对应不同范围的重复频率和脉宽, 对于同一重复频率, 初始透过率较低的 Cr<sup>4+</sup> :YAG 晶体对应较窄的调 Q 脉冲宽度。这是因为, 初始透过率低的 Cr<sup>4+</sup> :YAG 晶体对应高的激光阈值, 反转粒子数达到阈值需要更长的时间, 为了获得与初始透过率高的 Cr<sup>4+</sup> :YAG 晶体相同的调 Q 重复频率, 就必须大大提高泵浦功率, 泵浦功率的大幅度提高导致反转粒子数密度大幅度提高, 从而大大窄化了调 Q 脉冲。

### 3.3 调 Q 脉冲中的调制现象

在利用初始透过率为 93% 的 Cr<sup>4+</sup> :YAG 晶体进行调 Q 时, 当激光低阶横模运转时, 就会出现如图 5 所示的调制现象, 从中可以看出, 调制频率约为 12.2 MHz。在脉冲运转情况下, 曾有人观察到类似的调制现象<sup>[7,8]</sup>。我们认为, 这是腔内相位相关的

不同激光振荡频率的横模之间拍频的结果。调制周期与参加拍频激光的频差有关, 调制深度与参与拍频的激光横模振幅之差成反比。

设有两个低阶横模运转, 它们的电场强度分别为

$$E_1 = E_{10} \exp(-\alpha^2) \exp(i\omega t) \exp[i(\omega t + \varphi)]$$

$$E_2 = E_{20} \exp(-\alpha^2) \exp(i\omega t) \exp\{i[(\omega + \Delta\omega)t + \varphi + \beta]\}$$

则拍频光强为

$$I(t) = (E_1 + E_2)(E_1 + E_2)^* = E_{10}^2 \exp(-2\alpha^2) [r^2 + 2r \cos(\Delta\omega t + \beta) + 1]$$

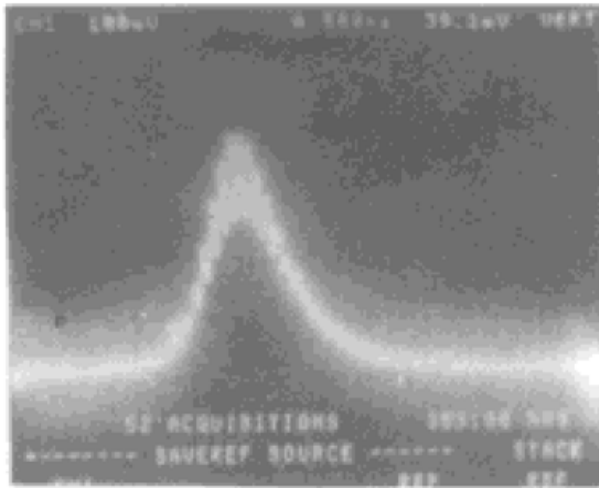


图 5 调 Q 包络中的调制现象

Fig. 5 Modulation in a Q-switched envelope

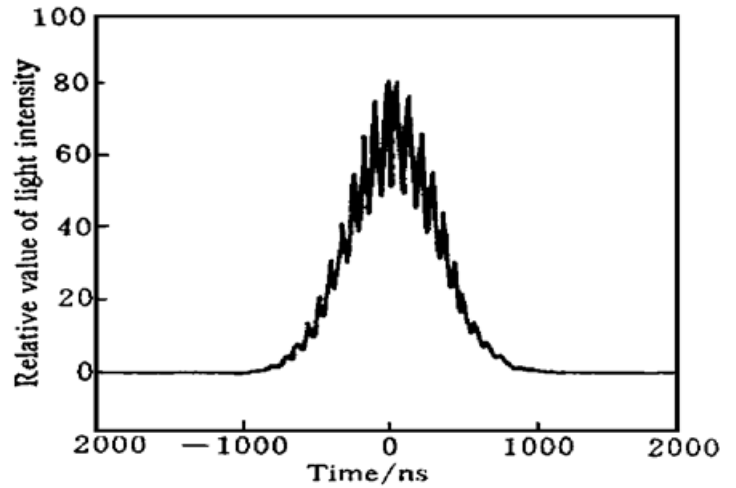
图 6 计算出的 TEM<sub>00y</sub> 和 TEM<sub>10y</sub> 两个横模的拍频曲线。其中两横模的频差为 12.4 MHz, 振幅之比为 8·1(纵坐标为相对光强)

Fig. 6 Calculated curve of the beat frequency of two transverse modes. The frequency difference between the two modes is 12.4 MHz, and the ratio of their amplitudes is 8·1

其中,  $r = E_{20}/E_{10}$ ,  $\beta$  为固定初位相差,  $a$  由调 Q 脉冲的宽度决定,  $\Delta\omega$  为两横模之间的频差。当脉宽为 700 ns 时,  $a = 2.8 \times 10^{-6}$ ;  $\Delta\gamma_m = \Delta\gamma_q \frac{ML}{8a^2} \left[ m + \frac{1}{2} \right]$ ,  $\Delta\gamma_q$  为相邻纵模间隔,  $L$  为腔长,  $\lambda$  为波长,  $a$  为端镜处光斑尺寸,  $m$  为横模阶数。

图 6 是根据我们的腔参数计算出的 TEM<sub>00y</sub> 和 TEM<sub>10y</sub> 两个横模拍频后的光强随时间变化的曲线, 可见与实验中所观察到的调制现象基本吻合。若参与拍频的是激光的纵模, 则拍频的结果即为通常所说的锁模运转。

## 参 考 文 献

- 1 Hergen Eilers, William M. Dennis, William M. Yen *et al.*. Performance of a Cr<sup>4+</sup>·YAG Laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(9): 2508~ 2512
- 2 Alphan Sennaroglu, Clifford R. Pollock. Continuous-wave self-mode-locked operation of a femtosecond Cr<sup>4+</sup>·YAG laser. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(6): 390~ 392
- 3 Yuzo Ishida, Kazunori Naganuma. Compact diode-pumped all-solid-state femtosecond Cr<sup>4+</sup>·YAG laser. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(1): 51~ 53
- 4 Y. Shimony, Z. Burshtein, Y. Kalisky. Cr<sup>4+</sup>·YAG as passive Q-switch and Brewster plate in a pulsed Nd·YAG laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(10): 1738~ 1741
- 5 Y. Shimony, Z. Burshtein, A. Ben-Amar *et al.*. Repetitive Q-switching of a CW Nd·YAG laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(2): 305~ 310
- 6 Ding Yanhua, Ouyang Bin, Xu Jun *et al.*. Stability and power improvement in passive Q-switching of CW Nd·YAG laser using Cr<sup>4+</sup>·YAG. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(3): 197~ 201 (in Chinese)
- 7 H. J. Eichler, A. Haase, M. R. Kokta *et al.*. Cr<sup>4+</sup>·YAG as passive Q-switch for a Nd·YALO oscillator with an average repetition rate of 2.7 kHz, TEM<sub>00</sub> mode and 13 W output. *Appl. Phys. B*, 1994, **58**: 409~ 411
- 8 Ouyang Bin, Ding Yanhua, Wan Xiaoke *et al.*. Saturable absorption of Cr<sup>4+</sup>·YAG and its performance as passive Q-switches. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(12): 1665~ 1670 (in Chinese)
- 9 K. Thyagarajan, A. K. Chatak. *Laser: Theory and Applications*. New York: Plenum, 1981. Chap. 3, 113

## Experimental Study on a CW Nd·YAG Laser Q-switched by Cr<sup>4+</sup>·YAG Absorber

Wang Mingwei Xing Qirong Wang Qingyue

(The Laboratory of Optoelectrical Information of NED, China,

College of Precision Instruments & Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Xu Jun Qiao Jingwen Deng Peizhen

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** An experimental study on the relation between repetition rate, pulse width and average output power of a CW pumped Nd·YAG laser Q-switched by a Cr<sup>4+</sup>·YAG absorber was carried out. Stable Q-switched pulses with duration of 120~900 ns wide (FWHM) and repetition rates between 2.2 and 10 kHz were obtained by using different absorbers of different initial transmissions. Modulation in the Q-switched envelope was found and an explanation was given.

**Key words** Cr<sup>4+</sup>·YAG, passive Q-switching, saturable absorber, mode-locking, beat frequency

## Nd·Ca<sub>4</sub>YO(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 单晶研制成功并实现基频和自倍频激光运转

近年来,新型激光自倍频晶体 Nd·Ca<sub>4</sub>YO(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>(简称 Nd·YCOB)受到学术界密切关注,并成为新型激光工作物质研究的一个热点<sup>[1~3]</sup>。1998年2月,我们用 Czochralski 法成功生长出 Nd·YCOB 晶体,掺 Nd 量为 5 at-%。测定了晶体的吸收光谱,进行了 LD 泵浦和钛宝石激光泵浦的原型激光器件的初步实验,实现了该晶体的红外激光发射和自倍频运转。初步结果如下:

1) 生长晶体所用材料为事先合成好的 Nd·YCOB 多晶,采用化学计量比配方。生长过程中各元素的有效分凝系数分别为:  $K_{\text{eff}}(\text{Nd}) = 0.88$ ,  $K_{\text{eff}}(\text{Y}) = 1.03$ ,  $K_{\text{eff}}(\text{Ca}) = 0.96$ ,  $K_{\text{eff}}(\text{B}) = 0.98$ ;

2) 晶体属单斜晶系,空间群为 Cs<sup>2</sup>-Cm,晶胞参数为  $a = 0.8076(7)$  nm,  $b = 1.6020(10)$  nm,  $c = 0.3527(2)$  nm,  $\beta = 101.23^\circ$ ,理论密度为 3.297 g/cm<sup>3</sup>;

3) 对 LD 或钛宝石激光泵浦有意义的吸收峰波长为 794 nm 和 812 nm;

4) 用钛宝石激光泵浦 Nd·YCOB 原型激光器件,实现了 1.06  $\mu\text{m}$  红外激光输出,其阈值振荡泵浦功率为 163 mW;斜效率为 46.9%。该值高于国外最新报道的 44%<sup>[3]</sup>。用 LD 和钛宝石作泵浦源,均获得了自倍频绿光输出,只是因为样品方向与位相匹配方向尚不一致,绿光输出功率仅为几个微瓦。

### 参 考 文 献

- 1 Makot Iwai *et al.*. Crystal growth and optical characterization of Rare-Earth (Re) calcium oxyborate Re-Ca<sub>4</sub>O(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>(Re= Y or Gd) as new nonlinear optical material. *Jan. J. Appl. Phys.*, 1997, **36**(Pt. 2, 3A): L276~ L279
- 2 G. Aka *et al.*. Linear- and Nonlinear-optical properties of a new gadolinium calcium oxyborate crystal, Ca<sub>4</sub>GdO(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(9): 2238~ 2247
- 3 B. H. T. Chai *et al.*. Visible light generation by self-frequency doubling in Nd·YCOB, in 1998 Tech. Dig. Ser., CLEO, San Francisco, 1998, **6**: 325

山东大学晶体材料国家重点实验室,晶体材料研究所 济南 250100

孟宪林 张怀金 祝 俐 程瑞平 刘训民 于文涛 王正平 张少军 孙连科

1998年8月27日收稿