

文章编号: 0253-2239(2005)07-939-4

La₃Ga₅SiO₁₄ 电光调 Q 的 Nd:LiYF 激光器研究*

王 浩¹ 王青圃¹ 张行愚¹ 李昫初¹ 刘兆军¹ 李述涛¹ 张少军² 刘泽金³ 姜宗福³

{ 1 山东大学信息科学与工程学院, 济南 250100
2 山东大学晶体材料国家重点实验室, 济南 250100
3 国防科技大学, 长沙 410073 }

摘要: 报道了以 Nd:LiYF(Nd:LYF) 为增益介质、用硅酸镓钽(La₃Ga₅SiO₁₄, LGS) 晶体进行电光调 Q 的非稳腔调 Q 激光器的脉冲特性。Nd:LiYF 的两端按 σ 偏振 1.053 μm 光的布儒斯特角切割, 不需另加起偏镜, 实现了单一偏振光振荡。LGS 晶体电光 Q 开关插入损耗小(2%), 抗光伤阈值高(950 MW/cm²), 与 DKDP 相比, 具有不潮解等优点。当抽运能量为 120 J、重复率 3 Hz 时, 单脉冲输出能量为 275 mJ, 脉冲宽度为 8 ns, 动静比为 76%, 输出能量不稳定性小于 3%, 偏振度大于 99%, 光束发散角为 0.7 mrad。文中还对本激光器偏振特性、非稳腔设计、LiYF 导热性能和热透镜效应补偿进行了分析, 对 LGS 电光调 Q 开关工作性能、工作方式以及存在的问题也进行了分析。

关键词: 激光技术; 掺钕氟化钇锂(Nd:LiYF) 晶体; 布儒斯特角切割; La₃Ga₅SiO₁₄ (LGS 晶体) 调 Q; 变反射率输出镜非稳腔; TEM₀₀ 模偏振输出

中图分类号: O482.537 文献标识码: A

La₃Ga₅SiO₁₄ as Active Electrooptic Q-Switch in a Pulsed Nd:LiYF Laser

Wang Hao¹ Wang Qingpu¹ Zhang Xingyu¹ Li Yunchu¹ Liu Zhaojun¹ Li Shutao¹
Zhang Shaojun² Liu Zejin³ Jiang Zongfu³

{ 1 School of Information Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan 250100
2 State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Ji'nan 250100
3 National University of Defense Science and Technology, Changsha 410073 }

Abstract: A Nd:LiYF(Nd:LYF) laser actively Q-switched with an electrooptic La₃Ga₅SiO₁₄ (LGS) single crystal was designed. Each end of the Nd:LiYF rod was cut at Brewster's angle and the orientation of the two surfaces with respect to the crystal's optic axis was such as to ensure operation at 1.053 μm , which saved the use of a polarizer. LGS Q-switch has the advantages of small insertion loss (2%), high damage threshold (950 MW/cm²) and non-deliquescence. When the pump energy was 120 J and the repetition rate was 3 Hz, the energy of single pulse was 275 mJ, pulse width was 8 ns, dynamic to static ratio was 76%, pulse fluctuation was smaller than 3%, polarization degree was more than 99%, and beam divergence was 0.7 mrad. The polarization characteristics of the laser, the design of the unstable cavity, the characteristics of the thermal effect of LiYF and its compensation were discussed. The principle, characteristics and problems of the LGS E-O Q-switch were also investigated.

Key words: laser technique; Nd:LiYF (Nd:LYF) crystal; cut at Brewster angle; La₃Ga₅SiO₁₄ (LGS crystal) Q-switch; variable-reflectivity-mirror unstable cavity; polarized output of TEM₀₀ mode

1 引 言

电光调 Q 激光器是获得高峰值功率激光脉冲的重要手段, 经过多年的研究, 在调 Q 激光器的理论与实验研究以及相关激光材料生长方面都取得了长足的发展^[1~5]。对氙灯抽运而言, 重要的工作物质有 Nd:YAG、钕玻璃、Nd:LiYF(Nd:YLF) 等; 对

电光调 Q 开关而言, 重要的电光晶体有 DKDP、LiNbO₃ 等。好的电光材料应具有大的电光系数和低的半波电压、小的吸收损耗、高的抗光伤阈值、大的透光范围、好的物化性能并易于生长。DKDP 光电系数大、半波电压低, 抗光伤阈值高, 透过波长范围大, 而且吸收损耗小, 易于生长, 是目前最好的光

* 国家自然科学基金(69978009)、山东省自然科学基金(Y2002G06)、教育部博士点基金(2002022048)和国防预研资助课题。

作者简介: 王 浩(1971~), 男, 山东大学信息科学与工程学院博士研究生, 主要从事激光和非线性光学领域的研究。

E-mail: haowang@sdu.edu.cn

收稿日期: 2004-08-10; 收到修改稿日期: 2004-11-19

电材料之一,但由于 DKDP 是水溶液条件下生长的,因此在大气条件下,具有潮解性,这对晶体加工和应用带来诸多不便;LiNbO₃ 是用高温熔融法生长的,不潮解,但是其抗光伤阈值低,限制了这种材料在中、高功率激光器中的应用。

硅酸镓钽(La₃Ga₅SiO₁₄,LGS)晶体是一种具有压电、电光、旋光特性的多功能晶体。LGS 透光范围为 190~2400 nm,抗光伤阈值是 LiNbO₃ 的 9.5 倍;具有良好的物化稳定性、小的热膨胀系数和相当大的电光系数($\gamma_{11} = 2.3 \times 10^{-12}$ m/V)。在 LGS 电光开关的设计和制作方面,已有不少报道^[6,7]。本文在已有工作的基础上,提出一种以 Nd:LiYF 为激光工作物质、以 LGS 晶体为电光调 Q 开关、并采用变反射率输出镜的卡塞格林非稳腔激光器,实验证明这种激光器激光输出性能良好。在这种新型激光器中,Nd:LiYF 晶体对 1053 nm 的 σ 光按布儒斯特角切割,即使不镀增透膜,1053 nm 的正常光的损耗也极小,并很好的抑制 1047 nm 的非常光的振荡。如果 Nd:LiYF 晶体对 1047 nm 的非常光按布儒斯特角切割,同样可以得到 1047 nm 的偏振光输出。本工作按照 1053 nm 的正常光的布儒斯特角切割,利用了 LiYF 晶体具有大的自然双折射的特性,与通常 YAG 激光器相比省去了起偏器,简化了激光器结构,且由于 Nd:LiYF 自然双折射远大于热致双折射,有利于线偏振光稳定运转。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,激光器采用卡塞格林非稳腔结构。腔长 $L = 600$ mm。后反射镜为凹面镜,曲率半径 $R_1 = 2650$ mm,输出耦合镜为高斯型变反射率反射镜(VRM),曲率 $R_2 = -1500$ mm,非稳腔横向放大率为 $M = 1.8$ 。

工作物质为掺钕浓度 1% 的 LiYF,尺寸为

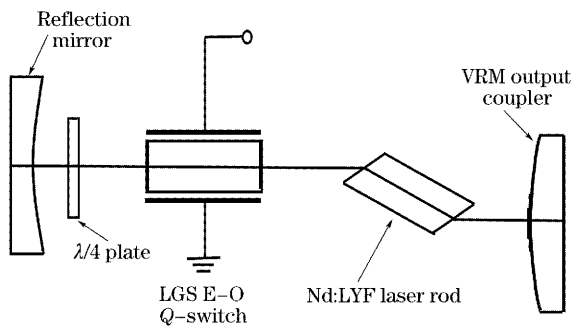


图 1 用 LGS 晶体调 Q 的 Nd:LiYF 激光器结构示意图
Fig. 1 Scheme of Nd:LiYF laser Q-switched with LGS

$\phi 5$ mm \times 80 mm,对 σ 偏振的 1053 nm 正常光的折射率 $n_o = 1.448$ (对 π 偏振的 1047 nm 的非常光的折射率 $n_e = 1.470$),Nd:LiYF 晶体按 1053 nm 光布儒斯特角切割,如图 2 所示:入射角 φ_1 和晶体的表面倾角 α 均为布儒斯特角 φ_B :

$$\varphi_1 = \varphi_B = \alpha = \arctan(n_o) = 55.37^\circ. \quad (1)$$

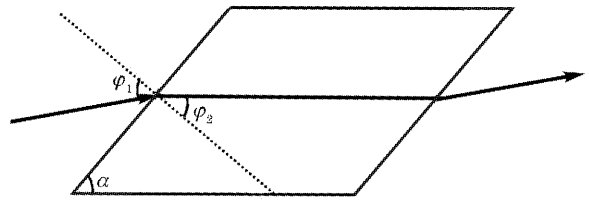


图 2 LiYF 晶体棒的两端均按 1053 nm 光的布儒斯特角切割。 $\varphi_1 = \varphi_B = \alpha = 55.37^\circ$, $\varphi_2 = 90^\circ - \varphi_1$

Fig. 2 Each end of the LiYF rod was cut at Brewster angle of 1053 nm light, $\varphi_1 = \varphi_B = \alpha = 55.37^\circ$, $\varphi_2 = 90^\circ - \varphi_1$

单块 LGS 晶体电光调 Q 开关尺寸为 8 mm \times 8 mm \times 38 mm($x \times y \times z$),激光沿光轴方向通过。利用 LGS 的横向电光效应,在 x 方向施加电场,半波电压为

$$V_\pi = \lambda / [2n_o^3 \gamma_{11} (l/d)], \quad (2)$$

其中 λ 为激光波长(1053 nm), $n_o = 1.448$ 为 LGS 晶体的 o 光折射率, l/d 为 LGS 晶体通光方向长度和电场方向厚度之比(纵横比), $\gamma_{11} = 2.3 \times 10^{-12}$ m/V 为电光系数,可见通过改变其纵横比 l/d ,可以来调节器件的半波电压。经计算实验中所用 1/4 波电压 $V_{\lambda/4}$ 为 3600 V,实验中用 MRD500 型快速光电二极管(PIN)探测器和 TEKTDS620B 型存储示波器对波形进行观测,用 EPM-1000 型能量/功率计测量脉冲能量,采用可旋转的偏振棱镜对偏振度进行测量。

3 实验结果与讨论

3.1 电光 Q 开关采用加压激光输出工作方式

实验中采用 LGS 光电 Q 开关加电压时输出激光的工作方式(加压式)。当 LGS 电光 Q 开关不加电压时,线偏光沿 LGS 的光轴往返通过 LGS,由于 LGS 的旋光效应(旋光度 $1.1^\circ/\text{mm}$),在光往返一周后,偏振矢量旋转的总角度为 $\Delta\theta = 0$ 。但在往返通过 $\lambda/4$ 波片后,偏振矢量旋转了 $\pi/2$,正好在 Nd:LiYF 的布儒斯特面上遭受最大的损耗,激光不能够振荡,这时无激光输出,为关门状态。当 LGS 光电 Q 开关上加 $V_{\lambda/4} = 3600$ V 电压时,由 Nd:LiYF 布儒斯特角起偏的线偏振光过 LGS 后就变成圆偏振光,经反射镜反射,再次通过 LGS 时,又经历了一次 $\lambda/4$ 延迟,成为线偏

振光,但与初始方向成 $\pi/2$ 角度,再加上光往返通过 $\lambda/4$ 波片产生的偏振面旋转的 $\pi/2$,总效应为偏振矢量偏转 180° ,这时以极小的损耗通过 Nd:LiYF 的布儒斯特面,产生调 Q 激光。

3.2 LGS 插入损耗、动静比及输出特性

$\lambda/4$ 波片是极薄的石英薄片,双面镀 1053 nm 光增透膜,损耗很低。LGS 电光 Q 开关对 1053 nm 的光吸收损耗很少,加上双面镀 1053 nm 的增透膜,使插入损耗也很小。当单次抽运能量为 120 J,重复率 3 Hz 时,插入损耗仅有 $\delta = 1 - E_{s2}/E_{s1} = 2\%$,其中 E_{s1} 为静态运转且没加 LGS 时的输出能量, E_{s2} 为静态运转加 LGS 后(不加 $\lambda/4$ 波片)的输出能量。调 Q 运转时,输出单脉冲能量为 275 mJ,脉冲宽度为 8 ns,动静比为 $G = E_3/E_{s2} = 76\%$ (E_3 为调 Q 脉冲能量),图 3 给出单脉冲波形。当改变输入能量时,测得的输出输入能量曲线为图 4 所示。在抽运能量为 120 J,重复率为 3 Hz 的情况下连续工作 1 h,每 1 min 测量一次输出能量,测得输出能量不稳定性 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_{3i} - \bar{E}_3| < 3\%$,其中 n 为测量次数, E_{3i} 为每次测量的脉冲能量, \bar{E}_3 为平均脉冲能量。

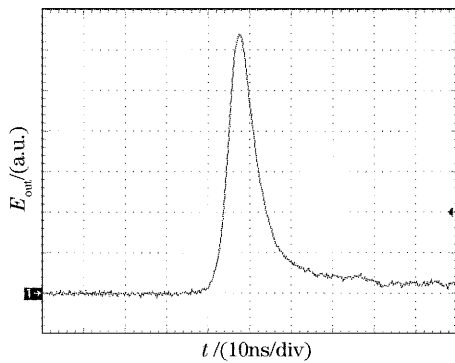


图 3 激光输出脉冲波形

Fig. 3 Pulse profile of the laser output

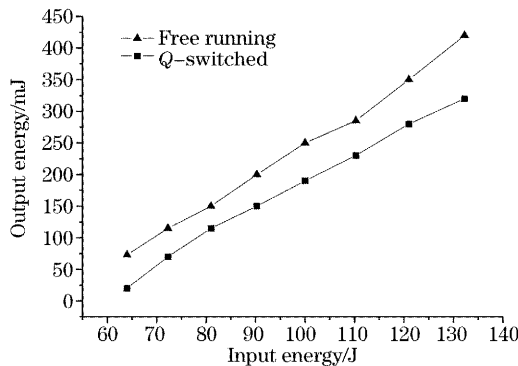


图 4 输入输出特性

Fig. 4 Relation between output energy and input energy

3.3 偏振度

用偏光棱镜测得输出激光为线偏振光,偏振度大于 99%。这是由于 Nd:LiYF 具有比热致双折射大得多的自然双折射,当 Nd:LiYF 两个端面按 1053 nm 光布儒斯特角切割后,有效地抑制了 1047 nm 的偏振光振荡,只有 1053 nm 的光振荡。这也是我们提出的这种激光器结构的优点之一,利用 Nd:LiYF 大的自然双折射,布儒斯特角切割,抑制了另一偏振光振荡,不需另加起偏器,且端面即使不镀制增透膜损耗也极小。当 YAG 为工作物质时,必须加起偏器,且由于大的热致双折射,往往使线偏振光变成椭圆偏振光。

值得注意的是,当 LGS 电光 Q 开关加 $V_{\lambda/4} = 3600$ V 电压时;LGS 晶体同时具有旋光效应和光电效应。LGS 晶体加 $V_{\lambda/4}$ 的电压时其折射率椭球将发生改变,这是否对旋光性能产生影响? 即偏振光往返 LGS 晶体时,由旋光特性引起的偏振矢量旋转的角度是否仍为 $\Delta\theta = 0$,这是我们正在深入研究的课题。但在我们目前的实验装置条件下,如此高的稳定的偏振度说明当旋光和电光特性同时存在时,电光特性的运用并没受到明显的影响。

另外在我们的实验条件下,Nd:LiYF 晶体布儒斯特角有比较大的的容限;当 Nd:LiYF 精确按布儒斯特角切割时,输出激光单脉冲能量为^[8]

$$E_{\text{out}} = \frac{1}{\gamma} S l h\nu (\Delta n_i - \Delta n_f) \frac{\ln(1/R)}{\ln(1/R) + L_a}, \quad (3)$$

其中 S 是光束截面, l 是增益介质长度, Δn_i 、 Δn_f 分别为初始和结束时的反转粒子数, $h\nu$ 为激光光子能量, γ 为与能级精细结构及平衡弛豫时间有关的粒子数反转因子, $\ln(1/R)$ 为输出耦合, L_a 为其他往返损耗。当入射角 φ_1 偏离精确的布儒斯特角 φ_B 一个小的角度

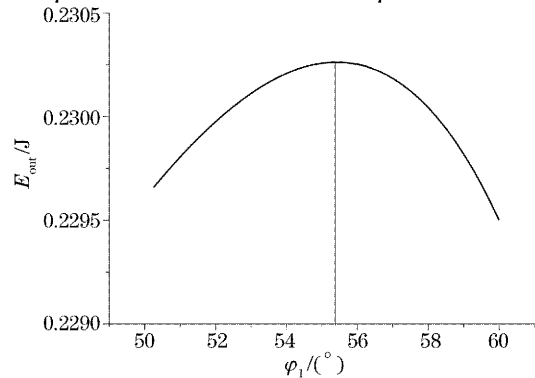


图 5 E_{out} 与入射角 φ_1 的关系曲线。其中 $\gamma = 1$, $L_a = 0.1$, $R = 24.2\%$, $S = 19.6 \text{ mm}^2$, $l = 80 \text{ mm}$, $h\nu = 1.89 \times 10^{-19} \text{ J}$

Fig. 5 Relationship between E_{out} and incident angle φ_1 with $\gamma = 1$, $L_a = 0.1$, $R = 24.2\%$, $S = 19.6 \text{ mm}^2$, $l = 80 \text{ mm}$, $h\nu = 1.89 \times 10^{-19} \text{ J}$

时,光在入射面上将产生一个附加的反射率 R' ,且 R' 是入射角的函数,这时的腔内往返损耗 L'_a 将变为

$$L'_a = L_a + 2\ln\left(\frac{1}{1-R'}\right), \quad (4)$$

$$R' = \left[\frac{n_0^2 \cos \varphi_1 - \sqrt{n_0^2 - \sin^2 \varphi_1}}{n_0^2 \cos \varphi_1 + \sqrt{n_0^2 - \sin^2 \varphi_1}} \right]^2, \quad (5)$$

容易模拟计算得到 $E_{\text{out}} \sim \varphi_1$ 的变化关系,如图 5 所示。从 $E_{\text{out}} \sim \varphi_1$ 曲线可见,入射角 φ_1 偏离 φ_3 几度范围时,不会给 E_{out} 造成大的影响。

3.4 卡塞格林式非稳腔设计与激光发散角

非稳腔具有很强的模式分辨能力,可使高阶模受到抑制,对Nd:YAG和Nd:LiYF等高增益工作物质可使腔内只有 TEM_{00} 模稳定振荡。腔结构按几何光学方法设计^[9],两个反射镜的曲率半径为

$$R_1 = 2ML/(M-1), \quad R_2 = -2L/(M-1), \quad (6)$$

式中 L 为谐振腔的长度, R_1 、 R_2 分别为后反射镜和输出镜的曲率半径。另外,当必须考虑工作物质的热透镜焦距 f 时,可以由

$$1/f + 1/R'_1 = 1/R_1, \quad (7)$$

进行热透镜效应补偿,其中 f 为热透镜焦距, R'_1 为考虑热透镜焦距以后的曲率半径。当 $(dn/dT) > 0$ 时, f 为正值,需增大反射镜曲率半径才能补偿棒的热透镜效应。如果 $(dn/dT) < 0$, f 为负值,这时需要减小反射镜的曲率半径,才能补偿棒的热透镜效应。Nd:LiYF 具有相当大的热导率,可以允许热量很快的释放,因而具有小的热透镜效应。Nd:LiYF 折射率随温度变化 $dn/dT < 0$,可以和腔内其他 $dn/dT > 0$ 的元件进行热焦距补偿。实际上,Nd:LiYF 的热透镜焦距比 Nd:YAG 大得多^[11,12],需要的补偿量很小。实验中设定的参量为 $R_1 = 2650 \text{ mm}$, $R_2 = -1500 \text{ mm}$, $L = 600 \text{ mm}$, $M = 1.8$ 。另外,一般的硬边输出镜,使激光在近场、远场光强分布不均。而采用高斯型变反射率反射镜可以克服上述缺点,使近场光强分布均

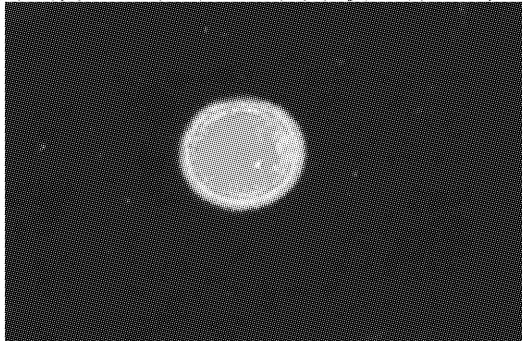


图 6 使用 LGS 调 Q 的 Nd:LiYF 激光器的激光光斑

Fig. 6 Light spot of Nd:LiYF laser using the LGS Q-switch

匀,远场更加集中。图 6 是激光束的光斑。采用透镜法测量发射角为 0.7 mrad 。这样小的发散角主要是包含变反射率输出镜的非稳腔作用。

4 结 论

本文给出了以 Nd:LiYF 为工作物质、用 LGS 晶体进行电光调 Q,采用变反射率输出镜的非稳腔激光器的输出特性。Nd³⁺:LiYF 通光面对 σ 偏振的 1053 nm 光按布儒斯特角切割,抑制了 π 偏振的 1047 nm 光,不需另加起偏器,而且在布儒斯特面上反射损耗极小。LGS 抗光伤阈值高、透光范围大,不易潮解,插入损耗小,采用电光效应的横向运用,可以通过 l/d 调节改变 $V_{\lambda/4}$ 。在抽运能量为 120 J 、重复率为 3 Hz 时,调 Q 单脉冲能量为 275 mJ ,脉冲宽度 8 ns ,偏振度大于 99% ,脉冲不稳定性小于 3% ,发散角为 0.7 mrad ,是一个好的中等功率激光器,可以单独使用,也可以作为高功率激光放大器的振荡级。

参 考 文 献

- 1 J. J. Degnan. Theory of the optimally coupled Q-switched laser [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1989, **25**(2): 214~220
- 2 Xingyu Zhang, Shengzhi Zhao, Qingpu Wang *et al.*. Modeling of diode pumped actively Q switched laser [J]. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 1999, **35**(12): 1912~1918
- 3 J. J. Zayhowski, C. Dill III. Diode-pumped microchip lasers electro-optically Q switched at high pulse repetition rates [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(17): 1201~1203
- 4 J. J. Zayhowski, P. L. Kelley. Optimization of Q-switched lasers [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **27**(9): 2220~2225
- 5 W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Springer-Verlag, 1999. Ch8
- 6 Yin Xin, Wang Jiyang, Zhang Shaojun. The study of the electro-optic effect of the optical active crystals in the polarized light interferometric experiment [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1484~1488 (In Chinese)
- 7 尹鑫,王继扬,张少军. 旋光晶体在偏光干涉实验中电光效应的研究 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(12): 1484~1488
- 8 Yin Xin, Wang Jiyang, Zhang Shaojun. Study on electro-optic Q-switch of $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ single crystal [J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(1): 29~32 (in Chinese)
- 9 尹鑫,王继扬,张少军. $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ 晶体电光 Q 开关的研究 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 29~32
- 10 Wang Qingpu, Zhang Xingyu, Liu Zejin *et al.*. *Principles of Laser* [M]. Jinan: Shandong University Press, 2003. 253~262 (in Chinese)
- 11 王青圃,张行愚,刘泽金等. *激光原理* [M]. 济南: 山东大学出版社, 2003. 253~262
- 12 A. E. Siegman. Unstable optical resonator [J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(2): 353~366
- 13 J. E. Murray. Pulsed gain and thermal lensing of Nd:LiYF₄ [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1983, **19**(4): 488~491
- 14 G. T. Maker, A. I. Ferguson. Mode locking and Q-switching of a diode laser pumped neodymium-doped yttrium lithium fluoride laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **54**(5): 403~405
- 15 T. M. Pollak, W. F. Wing, R. J. Grasso *et al.*. CW laser operation of Nd:LiYF₄ [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **18**(2): 159~163