

高功率调 Q YAG 倍频激光器的稳定性

毛少卿 于 川 温中一 张宇峰 王金华 李再光

(华中理工大学激光技术国家实验室, 武汉 430074)

提要 较全面地讨论了高峰值功率的 $\text{LiF}:\text{F}_2^-$ 色心晶体调 Q YAG 倍频激光器的稳定性。对谐振腔、聚光腔、闪光灯、倍频器、调 Q 器件及发射激光谱线中的不稳定性进行了理论分析和实验测量, 给出了相应的数据和图表。

关键词 高功率, YAG 激光器, $\text{LiF}:\text{F}_2^-$ 调 Q, 倍频, 稳定性

1 前 言

机载探测用的蓝绿激光器输出的激光具有高脉冲重复率、高峰值功率和窄的光谱线宽。其测量可靠性要求脉冲系列的激光在峰值功率、模式、波长及谱线宽度方面都具有高稳定性。为了提高在强背景日光下测弱激光的信噪比, 激光波长和线宽要稳定在探测系统的窄带光学滤波器的透过带宽度为 0.2 nm 范围内。影响激光器的稳定性的因素较多, 有泵浦源、腔参数、激光晶体的热畸变和热光效应、倍频效率、调 Q 性能等。因此, 在设计和制备激光器的过程中, 必须对各种因素逐个地分析, 并测量其稳定度。在此基础上采取相应的措施来提高激光器总体的稳定度。本文讨论峰值功率兆瓦量级, 脉冲重复率 100 Hz 的 $\text{LiF}:\text{F}_2^-$ 色心晶体调 Q YAG 倍频激光器的稳定性。

2 提高激光器各部件稳定性的方法

高重复率脉冲激光器的稳定性是基于脉冲系列的各种参数涨落的统计结果。激光器固有的量子噪声是不可避免的。然而一般激光器的其他因素造成的不稳定性比它要大得多, 故不作讨论。弛豫振荡在调 Q 开关作用情况下, 可由开关速度的选择来消除。对被动调 Q, 如果泵浦能量过高, 多脉冲振荡的影响也会在输出脉冲光的稳定性上有所反映。器件的老化导致的不稳定性是一种缓变过程, 在短时间的运行中一般不明显。脉冲 Xe 灯在高重复率情况下的寿命短, 对激光器输出很有影响。另一种是各部件中的随机波动, 这是我们讨论的主要方面。

2.1 提高聚光腔内光泵的统一性

灯泵 Nd:YAG 棒激光介质时, 总存在棒内泵浦光场分布的不均匀性^[1], 它主要导致激光棒的横截面内增益分布不均匀, 容易产生多横模振荡。在其它因素的扰动下将会出现模式跳变, 使激光功率不稳定。我们在激光器运行过程中观察到模式跳变的现象。采用我们改进的光

线传输模拟算法,对该激光器的相交圆聚光腔的聚光效率和光泵不均匀度进行核算。在棒表面圆周上的泵浦光强分布如图 1 所示。

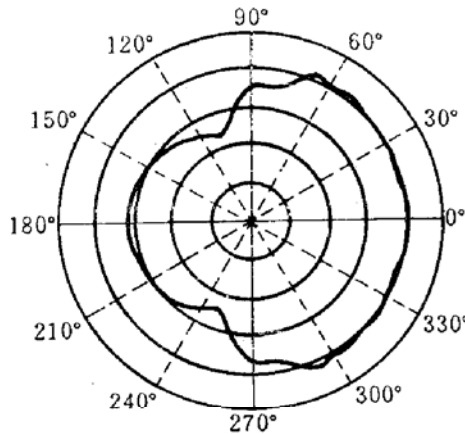


Fig. 1 Pumping intensity distribution on the YAG rod surface in the unoptimize collecting light cavity

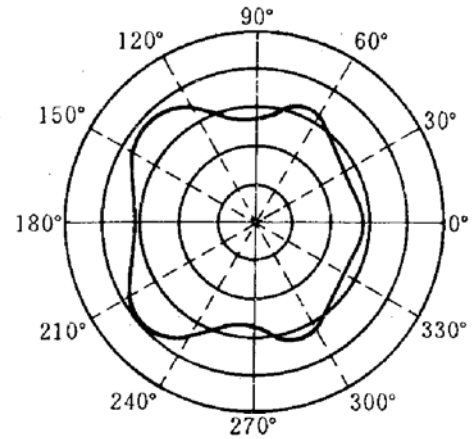


Fig. 2 Pumping intensity distribution on the YAG rod surface in the optimize collecting light cavity

光强分布不均匀度 $S = 6(\delta^2)^{1/2}/I = 35\%$, 其中 $(\delta^2)^{1/2}$ 为棒表面各点光强的均方根误差, I 为平均光强。它具有明显的不均匀性。如果采用同样的聚光腔横截面积 1600 mm^2 , 灯的直径取 $\phi = 5 \text{ mm}$, 计算机优化设计, 得到最佳的泵浦效率和光泵均匀性。其参数为相交圆的半径 $r = 23.75 \text{ mm}$, 圆心到相交圆两交点之间连线的垂直距离 $h = 14.25 \text{ mm}$, 灯和棒中心间距 $d = 14 \text{ mm}$, 泵浦效率 $\eta = 63.4\%$ 。此时棒表面圆周上的泵浦光强分布如图 2 所示, 光强分布不均匀度 $S = 12.1\%$ 。由图 2 可见, 棒表面泵浦光强分布基本对称。相应地棒内光场分布比较均匀, 便于得到稳定的基模, 克服跳模现象。

2.2 提高谐振腔的热稳性和降低失调灵敏度

许多作者已对 Nd:YAG 固体激光器的热稳腔作了分析^[2,3]。但 J. Steffen 等人导出的热不灵敏条件是在棒端面紧靠输出镜的特定情况下的近似结果, 不能随意搬用。而在我们的调 Q 腔内倍频的谐振腔内, YAG 棒与两腔镜之间分别放置倍频器与调 Q 器件, 因此, 不能直接套用该条件。再者, 倍频器和调 Q 器件分别放在有热透镜的稳定球面镜腔内的两个高斯光束束腰处, 根据束腰光斑 w_0 与含有焦距 f 的单个热透镜腔的 G 参数的关系^[4]为

$$\omega_{01}^2 = \lambda \frac{b}{\pi} \sqrt{\frac{G_1 G_2 (1 - G_1 G_2)}{G_1 + a^2 G_2 - 2a G_1 G_2}} \quad (1)$$

$$Z_1 = b G_2 (a - G_1) / G_1 + a^2 G_2 - 2a G_1 G_2 \quad (2)$$

$$G_1 = -\frac{I_2 (I_1 - R_1)}{R_1} \left(\frac{1}{I_2} + \frac{1}{I_1 - R_1} - \frac{1}{f} \right) \quad (3)$$

$$G_2 = -\frac{I_1 (I_2 - R_2)}{R_2} \left(\frac{1}{I_1} + \frac{1}{I_2 - R_2} - \frac{1}{f} \right) \quad (4)$$

ω_{01} 和 Z_1 为一个束腰处的光斑尺寸和束腰位置, 另一个束腰光斑有类似的公式。式中 a, b 为谐振腔的光线传输矩阵元, Z_1 为束腰 w_{01} 的位置。它们都是热焦距 f 的函数, 由此可见, 腔内的倍频晶体、YAG 棒、调 Q 晶体上的光斑并非随 f 的变化作相同比例的变化。倍频晶体上及调 Q 晶体上的光斑尺寸和功率密度, 关系到倍频效率和调 Q 效率, 都直接影响到输出功率。这与单一 YAG 构成的谐振腔的情况不同, 相应的热稳条件也有所变化。因此, 我们重新定义调 Q 腔内倍

频的热稳腔的条件为,倍频晶体 KTP, YAG 棒和调 Q 晶体 LiF 上的三个光斑尺寸,在热焦距 f 变化情况下都是足够稳定。这些光斑都可由光线传输矩阵方法求出。根据此定义,通过数值计算,求得热稳腔的最佳参数和稳定度。腔镜的失调影响振荡模式和功率输出的稳定性,考虑到激光器在机载振动情况下运行,降低谐振腔的两腔镜的失调灵敏度是非常必要的。由文献[5]可知,失调灵敏度也是腔参数和热焦距的函数。计数对比凹、平、凸三种腔镜的失调灵敏度,以凹面镜为最,故谐振腔采用双凹镜稳定腔,在此腔型中选择失调灵敏度最小的腔参数。

上述高热稳定性和低失调灵敏度的要求,可以通过计算机对谐振腔进行优化设计来达到。对五个目标函数求极小值,它们分别为 YAG 棒上光斑 w_f , 调 Q 晶体上光斑 w_q , 倍频晶体上光斑 w_b , 及倍频输出功率 P_{\max} 随热焦距 f 变化所产生的相对波动 S_f, S_q, S_b 和 S_p , 以及失调灵敏度 S 。优化设计的几何条件为 YAG 棒长 80 mm, $\phi = 5$ mm, 调 Q 晶体 LiF : F_2^- 长 30 mm, KTP 倍频晶体长 7 mm, 腔长 630 mm, 由三种晶体的折射率影响,等效腔长缩短为 580 mm, 热透镜焦距 $f = 1310$ mm, 优化得到的谐振腔参数为 $R_1 = 747$ mm, $R_2 = 1059$ mm, $l_1 = 329$ mm, $l_2 = 250$ mm, 三种晶体上的相对波动度 $S_f = 0.083\%$, $S_q = 0.296\%$, $S_b = 0.316\%$, 倍频光峰值功率相对波动度 $S_p = 1.175\%$, 由此可见,优化设计的谐振腔大大提高了激光器的稳定性。

2.3 消除调 Q 倍频的不稳定性

LiF : F_2^- 色心晶体被动调 Q 在最佳状态时输出激光的能量起伏为 $\pm 1.5\%$, 但它是面心立方晶体,在 $[011]$ 和 $[0\bar{1}1]$ 两个正交的方向上有最大的饱和吸收,产生两正交的偏振模。这两模在振荡过程中,由模式竞争而产生跳模^[6],导致输出的不稳定性。消除这种不稳定,在腔内插入一个格兰棱镜起偏,仅使其中一个方向的偏振模振荡。从后面的实验结果中将看到这种稳模的效果。

腔内倍频的方式可因腔内基频光的功率密度高而增加倍频效率。但由于高功率运转中 YAG 晶体的热致双折射效应和 KTP 晶体的双折射,一方面会在非线性晶体 KTP 中产生正交线偏振光耦合的不稳定性^[7]。LiF : F_2^- 色心晶体调 Q 时主要是两正交偏振光振荡,必然产生这种偏振模耦合。另一方面还由多纵模振荡而在倍频晶体中产生多纵模耦合,导致大的光波振幅扰动。根据速率方程的理论分析,这两种非线性耦合不稳定性是由多模的和频耦合所引起。其消除的办法除了上述插入起偏器外,还必须采用旋转倍频晶体的快轴方向到一定角度范围内来克服同一偏振方向的多模入射到倍频晶体中的非线性耦合不稳定性^[8]。

3 实验方法及结果

激光稳定性试验装置如图 4 所示。

YAG 棒、LiF : F_2^- 调 Q 晶体、KTP 倍频晶体的尺寸及腔长如前所述。 M_2 为平面双色全反

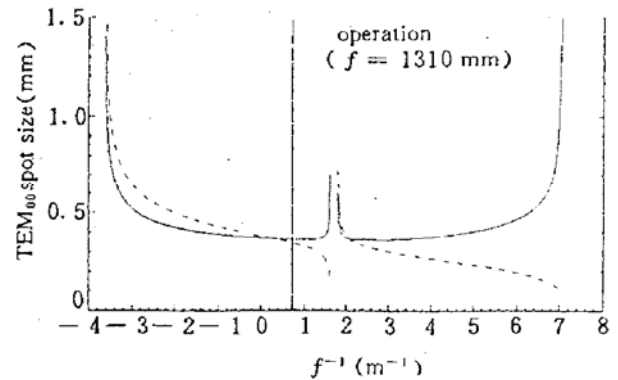


Fig. 3 Relation curve between spot size and thermal focus in the optimize resonator
 — w_f , radius of the spot in the YAG rod
 ---- w_b , radius of the spot in the LiF : F_2^-
 w_q , radius of the spot in the KTP

镜, M_1 为 1064 nm 全反、532 nm 全透的平面输出镜, M_3 为 1064 nm 全反和 532 nm 全透的平面隔离镜。脉冲 Xe 灯注入单脉冲电能为 32 J。脉冲重复率 1~100 Hz 可调。输出倍频光单脉冲能量为 20 mJ、脉宽为 10 ns。为测量重复率高于 100 Hz 的调 Q 倍频激光脉冲序列的稳定性, 组建了一套自动测量系统, 如图 5 所示。

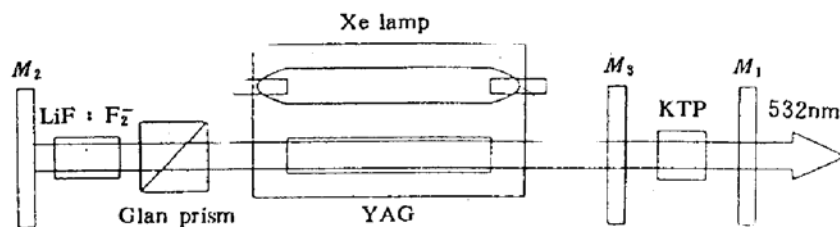


Fig. 4 Schematic layout of the laser

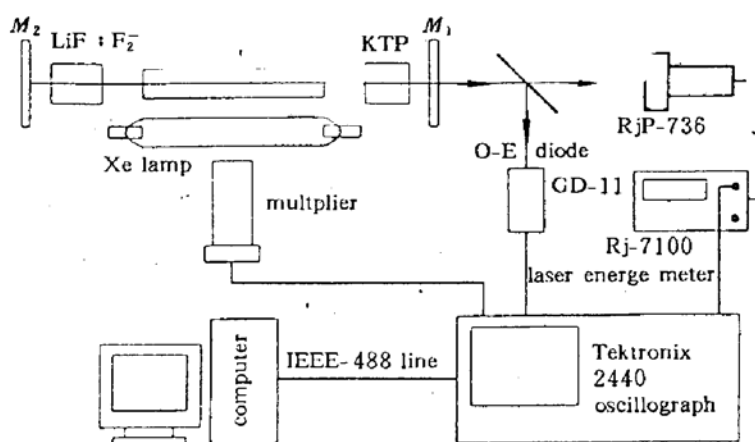


Fig. 5 The experimental arrangement for measuring stability of the lasers

GD-11 型强流管和 GDB-333 型光电倍增管分别探测激光和 Xe 灯光的脉冲波形。Rj-7100 型高重复率脉冲能量计及 RjP-736 探头测量脉冲激光能量。能量计的输出接口将波形峰值电压正比于激光脉冲能量的信号输入到 Tektronics 2440 型数字存储示波器。示波器采样速率为 500 MHz, 通过 IEEE-488 型通用仪表接口将数字化波形信息送入 32 位 386 型计算机连续采集、记录、存储和处理。计算机还可以对示波器进行控制和传输存储的波形。稳定性测量中, 每一个值都是对 200 个脉冲统计的结果, 并且分组测定激光器在不同重复频率下的不稳定性。为了便于对长时间的脉冲涨落情况统计和限于示波器的存储速率, 除了在 1 Hz 情况下是每次脉冲连续地采样外, 其余的重复率脉冲序列都是每秒采样 10 个脉冲, 连续累计到 200 个采样脉冲数据。然后统计其不稳定性, 并重复测量和统计三组, 以便对比在长时间运行中的变化情况。不稳定度的定义与前面的光斑涨落等波动度一样, 根据数理统计误差理论定义为 $S_x = 6 \times (\delta_x^2)^{1/2} / \bar{x}$ 。这里 \bar{x} 为统计量 x 的算术平均值, $(\delta_x^2)^{1/2}$ 为均方根误差。按此定义的不稳定度比一般标准误差系数的数值大。但对有限抽样统计的准确性高。随机变量的波动超出不稳定度 S_x 的概率仅在 0.26% 以内。用以上方法分别测量了脉冲 Xe 灯、自由振荡激光、调 Q 输出、倍频输出的稳定性, 并由单色仪测量系统测出了倍频光光谱的稳定性, 其结果分列如下。

3.1 脉冲 Xe 灯的稳定性

用 GDB-333 型光电倍增管对脉冲 Xe 灯发出的泵浦光能量的涨落进行测量, 通过对比光脉冲波形积分便得到光脉冲能量的相对值。每次统计 200 个采样的不稳定性列于表 1。

由表 1 可见, 脉冲 Xe 灯的不稳定度 S_x 在 4% 以内, 而在 100 Hz 重复率情况 $S_x < 3\%$ 。表 2

是对 Xe 灯使用一百万次脉冲运行后的旧灯测量的结果,也就是在 Xe 灯寿命将完结时的情况,此时的不稳定性高达 10% 以上。Xe 灯的冷却水温对不稳定性也有影响,当水温从 15 °C 变化到 36 °C 时,不稳定性增加约 1.4%。

Table 1 Unstability of pumping light resulted from the new Xe flashlamp

Repetition	Unstability %		
	Group 1	Group 2	Group 3
1 Hz	3.68	3.84	3.54
20 Hz	3.40	3.39	3.46
50 Hz	3.05	3.03	3.08
100 Hz	2.85	2.71	2.70

Table 2 Unstability of pumping light resulted from the old Xe flashlamp

Repetition	Unstability %		
	Group 1	Group 2	Group 3
1 Hz	10.7	11.0	9.94
20 Hz	7.43	7.62	7.58
50 Hz	6.31	6.24	6.41
100 Hz	5.36	5.19	5.33

3.2 自由振荡激光输出的不稳定性

考察自由振荡激光输出能量的稳定性,有助于确定 YAG 棒的热透镜效应和腔镜失调灵敏度对不稳定性的影响。自由振荡输出的光是一个弛豫振荡的尖峰脉冲序列。只能用能量计测量,其统计结果如表 3 所示。

对比表 1 和表 3,自由振荡的不稳定度 S_z 比闪光灯的值近乎大一倍。仔细观察输出的激光光斑,发现有跳模现象。腔内加一小孔光阑限模后消除了此现象。通过用 He-Ne 激光监测腔镜发现有微小的高频振动,腔镜有失调。

Table 3 Unstability of pulse energy resulted from the free-running lasers

Repetition	Unstability %		
	Group 1	Group 2	Group 3
1 Hz	9.22	9.27	9.40
20 Hz	6.62	6.54	6.37
50 Hz	5.16	5.20	4.96
100 Hz	4.04	4.41	4.30

Table 4 Unstability of pulse peak power resulted from the lasers with Q-switch

Repetition	Unstability %		
	Group 1	Group 2	Group 3
1 Hz	13.89	13.81	14.19
20 Hz	11.13	10.86	10.61
50 Hz	9.04	8.26	8.71
100 Hz	7.27	7.31	7.04

3.3 色心晶体调 Q 的稳定性

测量调 Q 输出巨脉冲光的稳定性时,撤掉倍频器部份及格兰棱镜,输出镜改用透过率 $T = 30\%$ 的平面镜。测量结果列于表 4。

色心调 Q 后的激光脉冲不稳定性明显增加,两正交偏振模的耦合是原因之一。另外,在色心晶体制备过程中曾发现 LiF 晶体中有散射粒子及多晶混杂,它们将影响色心浓度的均匀性。

3.4 倍频光的稳定性

在调 Q 的腔内换上双通倍频元件,为考察色心晶体调 Q 时的两正交偏振模的跳模导致的不稳定性,腔内加上格兰棱镜起偏器,其测量结果分别列于表 5 和表 6。

Table 5 Unstability of pulse peak power resulted from the frequency-doubled lasers without polarizer

Repetition	Unstability %		
	Group 1	Group 2	Group 3
1 Hz	26.95	26.77	27.12
20 Hz	21.28	22.15	21.99
50 Hz	18.22	18.18	17.31
100 Hz	14.86	15.21	14.95

Table 6 Unstability of pulse peak power resulted from the frequency-doubled lasers with polarizer

Repetition	Unstability %		
	Group 1	Group 2	Group 3
1 Hz	17.94	18.88	18.33
20 Hz	14.63	14.46	13.62
50 Hz	12.02	12.01	11.79
100 Hz	9.81	9.79	10.12

对比表 5 和表 6 的数据,色心晶体调 Q 的两偏振模跳变的影响很明显,其中还包含在 KTP 晶体中偏振模的非线性耦合及多模的和频耦合造成的大的光波振幅扰动。热畸变使倍频效率变化也带来不稳定性。

3.5 倍频光谱的稳定性

YAG 晶体中 Nd^{3+} 离子的受激发射谱线,在晶体温度变化时会产生热光畸变。它使 Nd 离子与晶格的相互作用发生变化。随之 Nd 离子的吸收谱和发射谱、能级寿命都有变化。我们用倍频光的测量对应基频光谱的变化,原因是光电倍增管对可见光的灵敏度高,测量的准确性好。测量装置是 THR 1500 型单色仪和 4420 型 Boxcar,4402 型信号处理系统。因难以测量激光振荡过程中的激光棒中的温度,这里是通过激光周围的冷却水温的变化来反映棒中温度的变化。理论上可以由棒的表面温度计算出棒的中心温度。实际上使用激光器时,人们所关注的也是冷却水温的变化所引起的光谱中心波长和谱线宽度漂移的程度。因 SX-10 型温控水循环系统的控温范围仅在 $15\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$,温控精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,加之受空气湿度的限制,最低循环水温不能低于起露点,因此仅在 $19\sim 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水温变化条件下测量发射光谱随水温变化的关系,其结果列于表 7。

Table 7 Unstability of the wavelength and line wide of second harmonic

Water temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Wavelength λ (nm)	Line wide $\Delta\lambda_{1/2}$ (nm)
15	532.040	0.096
21	532.044	0.099
23	532.055	0.10
25	532.060	0.10
27	532.065	0.10

由此可见,激光波长在冷却水温变化 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时,它的变化很小。 $\Delta T = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,波长仅变化 0.025 nm ,而且波长随温度的变化近乎线性关系。线宽的变化难以分辨,由此可见它与窄带滤波器的通带宽度 0.2 nm 匹配不成问题。理论上,YAG 晶体中的 Nd 离子发射光谱对于 ${}^4F_{3/2}$ 向 ${}^4I_{11/2}$ 辐射跃迁强线的中心波长在晶体温度 300 K 时是 1064.15 nm ,对应的倍频光是 532.07 nm ,我们的测量值与它基本相符。

致谢 作者衷心感谢上海交通大学李胜华教授和上海光学仪器研究所的范福昌高级工程师的帮助,我们激光技术国家实验室赵晓杰博士和毛慈波,毛代胜硕士以及同仁在实验测量方面给

予了大力支持和帮助,在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 E. J. Seppi. New Monte Carlo method and review of present methods for calculating the characteristics of excitation geometries for solid state laser, paper p. 655, Contract DAGC15-67-C0011, Inst. for Defense Analysis, Sci. and Tech. Div., 1970
- 2 J. Steffen *et al.*. *IEEE. J. Quant. Electr.*, 1972, **QE-8** : 239
- 3 张光寅. 两类固体激光热稳定谐振腔. *中国激光*, 1992, **19**(5) : 321
- 4 蔡伯荣. 激光器件, 长沙: 湖南科技出版社, 1984. 246
- 5 Vittorio Magri. Resonators for solid state lasers with large volume fundamental mode and high alignment stability. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(1) : 107
- 6 张贵芬. LiF:F₂⁻ 晶体调 Q 的偏振特性. *中国激光*, 1982, **10**(4) : 207
- 7 Michio Oka, Shigeo Kubota. Stable intracavity doubling of orthogonal linearly polarized modes in diode-pumped Nd : YAG lasers. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(10) : 805
- 8 T. Baer. Large amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd : YAG lasers. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(9) : 1175

Stability of a High Power, Frequency-doubled Nd : YAG lasers with a LiF : F₂⁻ crystal Q- switch

Mao Shaoqing Yu Chuan Wen Zhongyi Zhang Yufeng
Wang Jinhua Li Zaiguang

(National Laboratory of Laser Technology Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract Stability of the high repetition and high peak power, frequency-doubled Nd : YAG lasers with a LiF : F₂⁻ crystal Q- switch is discussed overally. Unstability in the laser resonator, pumping cavity, Xe-lamp, doubler, color center crystal Q- switch and laser spectral line are calculated or measured. Results of theoretical calculation and experimental measurement are shown.

Key words high power, YAG laser, LiF : F₂⁻ Q- switch, frequency-doubled, stability