

C轴 YLF 激光发射光谱和锁模性质

唐贵琛 裘佩霞

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文研究了C轴 YLF 晶体的光谱性质,并利用这种新型激光晶体,进行了主动锁模,被动锁模和主被动锁模实验。C轴 YLF 激光器直接发射 $1.053\mu\text{m}$ 激光,锁模脉冲序列能量起伏小于 $\pm 4\%$,脉宽起伏不大于 $\pm 10\%$ 。

一、前 言

Nd:YLF 能够输出 $1.053\mu\text{m}$ 波长激光,这个波长与高功率磷酸盐钕玻璃激光系统峰值波长($1.054\mu\text{m}$)匹配,是高功率激光系统振荡器最理想的工作物质。因此,近年来越发受到人们的重视。当然,Nd:YLF 激光振荡器也能为磷酸盐钕玻璃中小器件的应用,提供一个合适的激光振荡源,这是它受到重视的另一个原因。但是,从国外已经发表的几篇文章来看^[1~3],都用美国桑德尔斯(Sonders)公司生长的A轴晶体。我们分析了YLF晶体的各种性质之后认为,从发射 $1.053\mu\text{m}$ 波长激光的观点看,C轴晶体优于A轴晶体,并用华北光电技术研究所为我们生长的C轴晶体,进行了一系列实验,取得了若干结果。本文仅报告C轴Nd:YLF的激光光谱性质和锁模性质。

C轴Nd:YLF的光谱特点是,它能直观发射 $1.053\mu\text{m}$ 激光,它的锁模特点是稳定性良好。C轴Nd:YLF主被动锁模激光器已在高功率磷酸盐钕玻璃激光系统中运转。C轴Nd:YLF激光器作为中小应用磷玻璃激光系统的振荡器,具有值得推广的价值。

二、YLF 激光发射光谱比较

YLF有两个等价的A轴和一个C轴,用A轴生长的晶体,随着偏振的选择,可以分别获得两种波长的激光。一个是电矢量平行于C轴的 π 偏振,波长 $1.047\mu\text{m}$;另一个是电矢量垂直于C轴的 σ 偏振,波长 $1.053\mu\text{m}$ 。由于 π 偏振的受激发射截面大于 σ 偏振的受激发射截面(相对的受激发射截面分别是 $1.8 \times 10^{-19}\text{cm}^2$ 和 $1.2 \times 10^{-19}\text{cm}^2$),因此, $1.047\mu\text{m}$ 总是优先振荡。为了获得 $1.053\mu\text{m}$ 的激光,必须在腔内加起偏器,抑制 $1.047\mu\text{m}$ 的振荡,这会引入附加的损耗,并使器件复杂化。但是,如果我们用C轴生长的晶体,则只有一个 σ 偏振分量的 $1.053\mu\text{m}$ 的激光振荡,腔内无须加任何起偏元件去抑制 $1.047\mu\text{m}$,这样既能减少不必要的损耗,又使器件简单化。我们用比较两种晶体的光谱及其相应激光阈值的方法,证实了上述推论的正确性。

光谱实验是用 1 m 光栅光谱仪做的。由于该光谱仪只能在可见波段工作。因此, 我们先将激光倍频, 然后拍摄激光倍频光谱。用汞灯的 5466.73 \AA 作为定标谱线。光谱仪在激光倍频区的色散, 是用本实验室曾经做过的 Nd:YAG 选波长激光谱线标定的。在 Nd:YAG 激光器腔内加色散元件, 可分别选出 10738 \AA , 641.4 \AA , 10615.2 \AA 和 10520.5 \AA 四支激光谱线。用 10615.2 \AA 和 10520.5 \AA 的倍频光谱标定出该光谱仪的色散是 $d\lambda/dl = 7.5 \text{ \AA}$ 。

C 轴 Nd:YLF 激光倍频光谱如图 1(a) 所示, 对应基波波长是 10529.9 \AA , 总是单线输出。

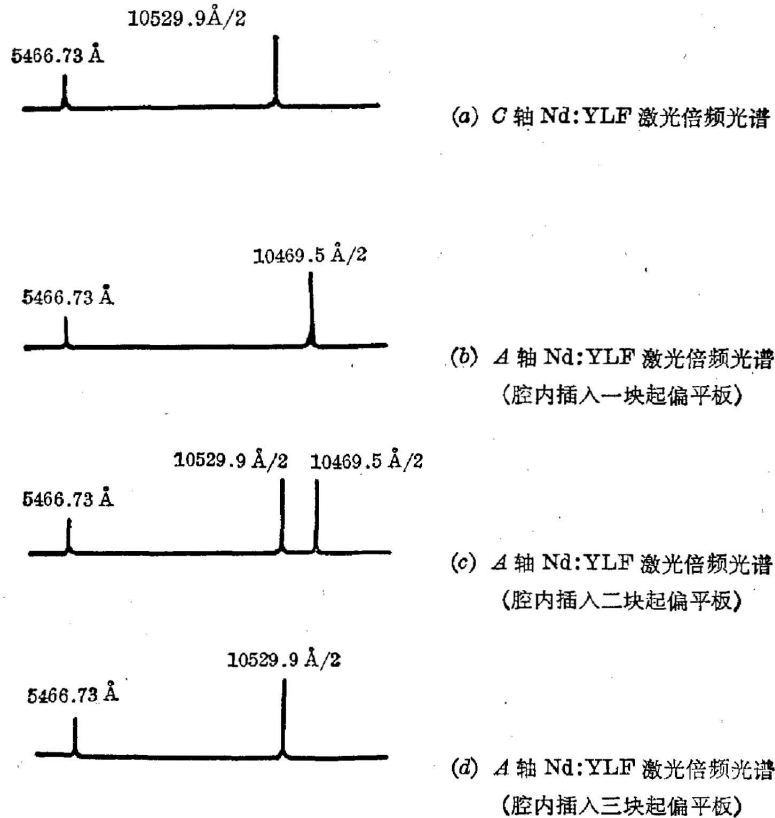


图 1

Fig. 1

- (a) The lasing spectrum of the C axis YLF laser;
 (b) The lasing spectrum of an axis YLF laser with a plate inserted in the cavity;
 (c) The lasing spectrum of an axis YLF laser with two plates inserted in the cavity;
 (d) The lasing spectrum of an axis YLF laser with three plates inserted in the cavity

A 轴 Nd:YLF 激光倍频光谱如图 1(b)、(c)、(d) 所示。腔内不加任何起偏元件, 则总是输出 10469.5 \AA 的单线激光光谱。腔内加入一块 σ 起偏的布鲁斯特角放置的平板, 也总是输出 10469.5 \AA 。加二块起偏平板, 则有时发射 10529.9 \AA 单线光谱, 几率约 67%; 有时发射 10529.9 \AA 和 10469.5 \AA 双线光谱, 几率约占 33%, 这说明加二块起偏平板还不足以完全抑制 10469.5 \AA 的振荡。加三块起偏平板之后, 10469.5 \AA 的激光不再出现了, 总是 10529.9 \AA 的单线光谱, 而且运转得很稳定, 即使把氙灯的能量增加 1.47 倍, 也仍然只有 10529.9 \AA 的单线光谱。有趣的是, 加三块起偏平板时, 10529.9 \AA 的激光阈值反而比加二

块平时低 15%，原因是，加二块起偏板时，10469.5 Å 不能完全被抑制，它要同 10529.9 Å 竞争反转粒子数。

加三块起偏平板时，10529.9 Å 的激光阈值，比不加起偏平板时 10469.5 Å 的激光阈值，提高 1.16 倍，但是根据两个波长受激发射截面计算，阈值仅应提高 0.5 倍，这说明腔内加起偏平板，不仅使器件复杂化，而且还引入了很大附加损耗。可是，如果用 C 轴 Nd:YLF 就不存在这个问题了，它可以直接发射 10529.5 Å 的激光，无须在腔内加任何起偏器。

C 轴 YLF 还有一个优点，那就是热膨胀系数 α 比较小。A 轴晶体的 $\alpha = 13 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，而 C 轴晶体的 $\alpha = 8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，这表明 C 轴 YLF 的热畸变远小于 A 轴 YLF 的热畸变。热畸变不仅影响光束质量，而且还会影响锁模的稳定性。

综上所述，从发射 10529.9 Å 波长激光的观点来看，不论是光谱性质还是热学性质，C 轴 YLF 均优于 A 轴 YLF，这就是我们为什么提出采用 C 轴 Nd:YLF 的理由。

三、C 轴 Nd:YLF 的锁模性质

我们用 C 轴 YLF 进行了主动锁模、被动锁模和主被动锁模等一系列实验。

实验装置如图 2 所示。仍然采用半共焦腔^[4]，腔长 1.5 m。凹面全反射镜与流动染料

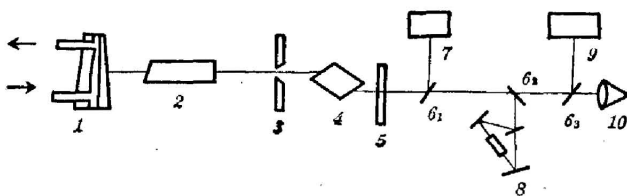


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 The schematic diagram of the experimental setup

1—optically contacted saturable absorber cell; 2—YLF rod; 3—small hole; 4—acousto-optic modulator; 5—semi-transmission reflection mirror; 6—part-transmission mirror; 7—spectrograph; 8—the TPF setup; 9—oscillograph; 10—colorimeter

盒一体化 1，染料盒透射窗镀增透膜，减少反射损耗，同时抑制卫星脉冲出现。染料盒液层厚度 1 mm。Nd:YLF 的尺寸是 $\phi 6 \times 47 \text{ mm}$ ，一个端面磨成 $30'$ 角度 2。腔内加 $\phi 2.5 \text{ mm}$ 选横模光栏 3。主动锁模用声光调制器 4，铌酸锂换能器和融石英声光介质均用恒温水冷却。被动锁模时，用五甲川二氯乙烷溶液作饱和吸收体。

用光栅光谱仪 7 测量光谱，用双光子荧光法和快速扫描装置 8 测量脉

宽。用快响应强流管和快响应示波器 9 观察锁模脉冲序列，用卡计 10 接收激光能量。（其中 5 是半透镜； 6_1 、 6_2 、 6_3 是分束器。）

1. 主动锁模

由于 C 轴 Nd:YLF 的光学质量还不够理想，阈值较高，我们主要研究了脉冲主动锁模。其关键问题仍然是确定最佳匹配腔长。确定最佳腔长（调制器频率 50 MHz）的第一个办法是锁模脉冲波形观察法，一边调节腔长，一边观察锁模波形，直到波形理想为止，如图 3 所示。实际上，在实验过程中我们看到，当腔长偏离最佳位置 3 mm 时，波形很不稳定，几乎是正弦波。另一个方法是能量测试法，测量输出能量与腔长的关系，即作所谓失调曲线，如图 4 所示。结合两种方法，能把腔长确定到 $500 \mu\text{m}$ 的范围内。

2. 被动锁模

C 轴 Nd:YLF 被动锁模的重要问题，是确定可饱和吸收体的初始透过率。当透过率

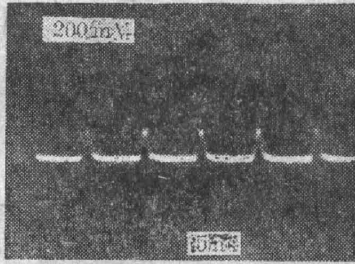


图 3 C 轴 Nd:YLF 主动锁模脉冲序列波形照片, 5 ns/cm

Fig. 3 The active mode-locked pulse train waveform 5 ns/cm

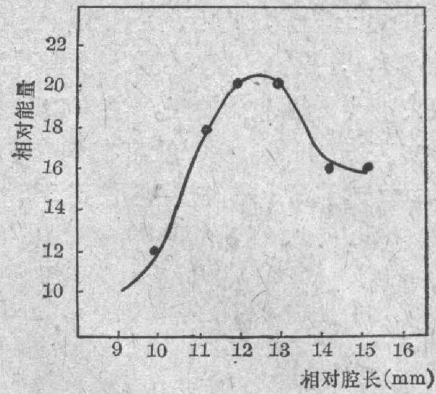


图 4 腔长失谐曲线

Fig. 4 Output energy from the active mode-locked laser as a function of cavity length detuning

$T=62\%$ 时, 获得了稳定的锁模。被动锁模可观察到的序列脉冲, 比主动锁模的少 10 倍, 约有 10 个, 如图 5 所示。锁模稳定性相当好, 这跟 D. Le Goff 等人的结果是一致的, YLF 的非线性折射率 n_2 小 [$n_2 = (0.59 \pm 0.07) \times 10^{-13}$ esu], 比 YAG 的 n_2 小 6 倍 [$n_2 = 4.09 \times 10^{-13}$ esu], 这可能是 YLF 被动锁模比较稳定的重要原因。此外, 我们发现自由运转激光器的稳定性, 对被动锁模有直接影响, 欲使被动锁模稳定, 首先要使自由运转激光器稳定。

3. 主-被动锁模

主-被动锁模是我们的工作重点所在, 因为我们的目的不在于获得如何短的脉冲, 而是在于获得 100 ps 左右脉宽的激光等离子体实验用的高功率激光系统的主振荡器。主-被动锁模提供一个时间窗口, 窗口内的初始脉冲才可能形成主-被动锁模脉冲, 因此能有效地提高信噪比。

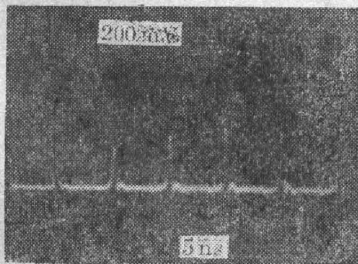


图 5 C 轴 Nd:YLF 被动锁模脉冲序列波形照片, 5 ns/cm

Fig. 5 The passive mode-locked pulse train waveform 5 ns/cm

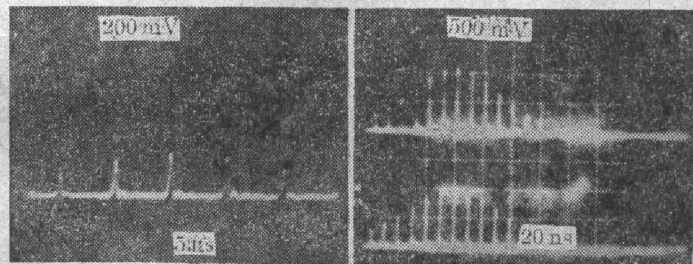


图 6 C 轴 Nd:YLF 主-被动锁模脉冲序列波形照片

Fig. 6 The active-passive mode-locked pulse train waveform

实验结果表明, 主-被动锁模的阈值一般低于纯被动锁模的阈值, 这可能是因为调制器的时间窗口有效地抑制了一些噪声脉冲起振的可能性, 减少了对反转粒子数的竞争。锁模波形比被动锁模的略显平缓, 比主动锁模的陡峭, 如图 6 所示 [其中, (b) 为相继两次发射]。脉冲序列峰值稳定性是很好的, 起伏小于 $\pm 5\%$ 。脉冲序列的能量起伏小于 $\pm 4\%$ 。脉宽 88 ps,

起伏不大于 $\pm 10\%$ ，双光子荧光法和快速扫描装置的测试结果是吻合的。倍频脉冲的光谱宽度约 0.2 \AA ，是接近带宽限制的。脉冲比较宽的原因，可能是染料的弛豫时间比较长，特别是腔内有弱的标准具效应。将窗口和前腔板磨斜会减少这种效应，因为我们的目的是获得 100 ps 左右的脉冲，所以没有在窄脉冲方面下很多功夫。在腔内另外再加一块 0.47 反射率 0.5 mm 厚的标准具，脉宽增加到 132 ps ，如图 7 所示，起伏也在 $\pm 10\%$ 以内。

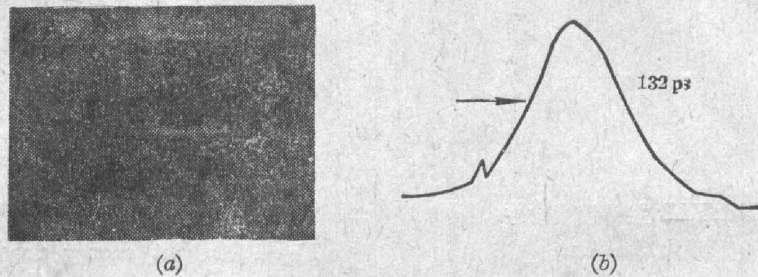


图 7 TPF 照片(a)和相应的黑密度轨曲线(b)

Fig. 7 TPF (a) photograph and (b) micrometer trace

表 1 总结了上述各种装置的实验结果，从表很容易看出，C 轴 Nd:YLF 激光器的锁模稳定性是良好的。主被动锁模 C 轴 Nd:YLF 激光器作为高功率磷酸盐激光系统的主振荡器，截至八三年年底已运转八个多月，发射万次以上，促进和推动了我国高功率激光系统的发展。

表 1 C 轴 Nd:YLF 锁模激光稳定性一览表

Table 1 The C axis YLF mode-locked laser stability

	输入(J)	输出(mJ)	阈值(J)	效 率	起 伏
自由运转	38.5	24.5		0.06%	$\pm 4\%$
主动锁模	38.5	11.4	20.5	0.03%	$\pm 3.6\%$
被动锁模	51	9.6	34.5	0.02%	$\pm 4\%$
主-被动锁模	51	9.6	34.5	0.02%	$\pm 4\%$

感谢邓锡铭和余文炎同志对该项研究工作的支持，汤瑾、林伟平和范滇元同志对该工作的具体帮助。

特别感谢华北光电技术研究所 YLF 晶体生长组为我们提供实验晶体。

参 考 文 献

- [1] D. LeGoff, A. Bettinger and Labadens; *Optics Commun.*, 1978, **26**, No. 1 (Jul), 108.
- [2] C. Loth and D. Bruineau; *Appl. Opt.*, 1982, **21**, No. 12 (Jun), 2091.
- [3] T. M. Pollar, E. P. Chielis and H. P. Jenssen; *IEEE Journal of Quantum. Electronics*, 1982, **QE-18**, No. 2 (Feb), 159.
- [4] 唐贵琛, 支婷婷, 谢梓铭, 袁佩霞; 《激光》, 1979, **6**, No. 9 (Sep), 31.
- [5] A. L. Harmer, A. Linz and D. R. Gabbe; *J. Phys. Chem. Solids*, 1969, **30**, 1483.

Properties of C-axis Nd:YLF laser emission spectra and mode-locked laser

TANG GUI SHEN AND QIU PEIXIA

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 16 January 1984; revised 18 April 1984)

Abstract

A new kind of crystal, the C-axis Nd:YLF, is used to obtain the active, passive and active-passive mode-locking. The C-axis Nd:YLF emits at $1.053 \mu\text{m}$ without inserting any polarizing elements in the cavity. The fluctuation of the energy in a pulse train of the active-passive mode-locked laser is less than $\pm 4\%$. The fluctuation of the pulse width is no more than $\pm 10\%$.