

# Nd:YAG 调波长锁模

唐贵琛 裘佩霞

(中国科学院上海光机所)

**提要:** 利用棱镜作色散元件, 实现了 Nd:YAG 1.052、1.061、1.064 和 1.073 微米等四条谱线的锁模输出, 输出波长稳定性的计算和实验结果一致。

## Frequency-selection and mode-locking of Nd:YAG laser

Tang Guisheng, Qiu Peixia

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

**Abstract:** Mode-locking of Nd:YAG laser has been achieved at four spectral lines (1.052  $\mu\text{m}$ , 1.061  $\mu\text{m}$ , 1.064  $\mu\text{m}$  and 1.073  $\mu\text{m}$ ) by inserting prisms as dispersion elements in the cavity. The calculations on prisms are consistent with the experimental results. The stable output wavelength of the laser has been obtained.

### 引 言

Nd:YAG 晶体在  ${}^4F_{3/2}$  和  ${}^4I_{11/2}$  之间有 1.05205、1.06152、1.06414 和 1.0738 微米等十条跃迁谱线<sup>[1]</sup>。其中 1.05205 微米很接近磷酸盐钕玻璃的峰值波长 (1.054 微米)。如果能稳定地实现这条谱振荡, Nd:YAG 可能成为磷酸盐钕玻璃激光系统的主振荡器。但 1.052 微米的受激发射截面与 1.061、1.064 和 1.073 微米的相比是小的<sup>[2]</sup> (它们的相对受激发射截面分别是  $3 \times 10^{-19}$ 、 $6.65 \times 10^{-19}$ 、 $8.8 \times 10^{-19}$  和  $4 \times 10^{-19}$  厘米<sup>2</sup>)。因此在一般情况下必须使用色散元件限制其他波长振荡, 才可以获得 1.052 微米振荡。我们采用色散棱镜, 辅以小孔光阑和特殊反射

膜, 成功地解决了这个问题。与偏光滤波器方法<sup>[3]</sup>相比, 这种选频方法结构简单, 稳定可靠。能连续地选择任意一条单独谱线振荡, 甚至让两条谱线同时振荡。

### 色散棱镜参数计算

已知 ZF<sub>6</sub> 重火石玻璃在 1.05 微米的折射率是 1.72791, 在 1.06 微米的折射率是 1.72759, 用内插法求得 1.052 微米的折射率是 1.72785。已知 ZF<sub>7</sub> 在 1.05 微米的折射率是 1.77520, 在 1.06 微米的折射率是 1.77476, 用内插法求得 1.052 微米的折射率是 1.77511。为了使腔内损耗极小, 光束应以布鲁斯特角  $\theta_B$  入射到棱镜上。

收稿日期: 1984 年 1 月 23 日。

对于 ZF<sub>6</sub>  $\theta_B = \arctan n = 59.94^\circ$

对于 ZF<sub>7</sub>  $\theta_B = \arctan n = 60.60^\circ$

由折射定律算得折射角分别是  $30.06^\circ$  和  $29.40^\circ$ 。根据这些计算, 色散棱镜可设计成图 1 的形式。

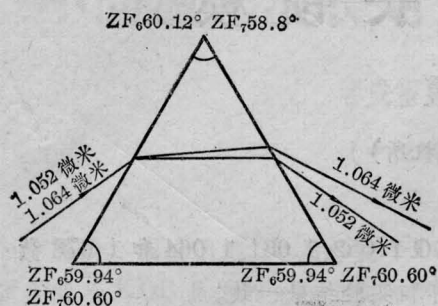


图 1 以 1.052 微米为主光束的色散棱镜设计示意图

关于棱镜损耗的计算, 可用下述公式<sup>[3]</sup>:

$$\left(\frac{W'_1}{W_1}\right)_\perp = \frac{\operatorname{tg}^2(i_1 - i_2)}{\operatorname{tg}^2(i_1 + i_2)}$$

式中  $W'_1$  和  $W_1$  分别表示反射波和入射波中的能量流,  $i_1$  和  $i_2$  分别表示入射角和折射角。计算结果列于表 1。

从表 1 看出, 当入射角偏离布鲁斯特角  $\pm 1^\circ$  时, 损耗是不大的。因此, 为加工方便起见, 不论 ZF<sub>6</sub> 还是 ZF<sub>7</sub>, 均可加工成  $60^\circ$  等角棱镜。从表 1 还可以看出, 从偏离  $\pm 1^\circ$  到偏离  $\pm 3^\circ$ , 损耗有数量级增加; 到偏离  $\pm 5^\circ$  时损耗可达 6% 的量级, 这时的损耗是不可忽视的。从表 1 中还可以看到, 偏离布鲁斯特角向着大的方向, 比偏离向着小的方向损耗似乎大一些, 因此, 在调腔的时候可能故意向小的方向调。其实这是没有必要的, 因为光束要通过棱镜两个面, 入射角和出射

表 1 入射光束偏离布鲁斯特角引入的损耗

棱镜型号	偏 离 度 数					
	+1	+3	+5	-1	-3	-5
损 耗 $\times 10^{-3}$						
ZF <sub>6</sub>	0.189	1.87	6.00	0.170	1.40	3.50
ZF <sub>7</sub>	0.199	1.95	6.15	0.180	1.52	3.90

角是互易的。入射角大出射角小, 反之亦然。调腔时应尽量接近布鲁斯特角, 以便减少损耗。

关于角分辨的计算。单块棱镜色散角差可表示为<sup>[4]</sup>

$$\Delta\delta_{\min} = \frac{2}{\sqrt{4 - \bar{n}^2}} \Delta n$$

多块色散棱镜组合的色散角差为

$$\Delta\delta = \sum_i^N \Delta\delta_i$$

式中  $\bar{n}$  表示两个波长的折射率平均值,  $\Delta n$  表示两个波长的折射率差,  $\Delta\delta_i \equiv \Delta\delta_{\min}$ 。

把 1.052 微米、1.061 微米和 1.064 微米的折射率值代入上述公式, 得到的结果列于表 2 中。

具有色散棱镜的激光器能否将两个波长分开, 即一个波长振荡, 另一个波长受到抑制而不能振荡, 这由棱镜的色散角差、腔长和选模光阑的孔径, 以及激光的发散角决定。

实验装置如图 2 所示, 小孔选模光阑直径为  $D$ , 腔长为  $L$ , 后腔镜对小孔光阑的张角为  $\theta_1 = D/L$ 。设光束发散角为  $\theta_2$ , 那末色散角差  $\Delta\delta \geq \frac{1}{2}(\theta_1 + \theta_2) = \frac{1}{2}\left(\theta_2 + \frac{D}{L}\right)$ , 即能将两个相应的波长分开。如果  $D = 2.5$  毫米,  $L = 1.5$  米,  $\theta_2 = 1$  毫弧度, 则要求  $\Delta\delta \geq 2.7'$ 。由表 2 看出, 欲将 1.061 微米和 1.064 微米分开, 不论是 ZF<sub>6</sub> 还是 ZF<sub>7</sub>, 单块棱镜总是不够的。

考虑到反射镜对反射角的加倍作用, 欲将 1.061 微米和 1.064 微米分开, 用两块

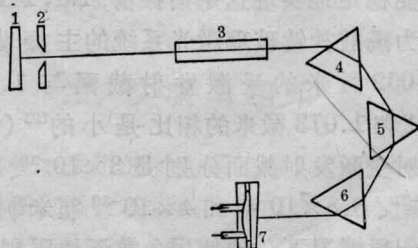


图 2 实验装置示意图

1—楔形半透镜; 2—选模小孔光阑; 3—Nd:YAG 棒; 4, 6—ZF<sub>7</sub> 色散棱镜; 5—ZF<sub>6</sub> 色散棱镜; 7—流动染料盒

表2 色散角差计算结果

波长区间	单块 ZF <sub>6</sub> 棱镜	单块 ZF <sub>7</sub> 棱镜	2块 ZF <sub>7</sub> 和 1块 ZF <sub>6</sub>
1.061 和 1.064 微米	0.6'	0.9'	2.4'
1.052 和 1.064 微米	2.68'	4.2'	11.08'
0.6238 和 1.064 微米	2.595°	3.191°	8.977°

ZF<sub>7</sub> 棱镜, 或三块 ZF<sub>6</sub> 棱镜即可。为了波长稳定起见, 实验中用了二块 ZF<sub>7</sub> 和一块 ZF<sub>6</sub>, 结果表明这能稳定地将这两个波长分开。

### 激光器光路调整

激光谐振腔的调整多用 He-Ne 激光准直法。但是, 光路有三块色散棱镜, 6328 Å 和 1.052 微米色散差别很大, 应先计算二者的色散角差, 用 He-Ne 激光调好光路之后, 根据计算的色散角差, 再将腔镜修正到 1.052 微米振荡位置。因为 1.064 微米的增益最大, 实验时是先令 1.064 微米振荡, 然后调节腔镜的角位置, 令 1.052 微米和其他波长振荡。ZF<sub>6</sub> 和 ZF<sub>7</sub> 对 6328 Å 的折射率分别是 1.74972 和 1.79992。相应的色散角差的计算结果分别是 2.595° 和 3.191°。

由计算结果可见, 用 He-Ne 激光调整光路, 色散角的修正量很大。所以在实际工作中, 这种调整方法困难, 我们用这种方法, 没有取得成功。后来是用一台重复率 Nd:YAG 激光来调整光路的, 这样就避免了色散角差的问题。

### 激光选频和锁模

在实验装置中用了两块 ZF<sub>7</sub> 和一块 ZF<sub>6</sub> 棱镜, 根据上述公式可知,

$$\Delta\delta = 4.2' \times 2 + 2.68' = 11.08'$$

对 1.052 微米和 1.064 微米

$$\Delta\delta = 0.9' \times 2 + 0.6 = 2.4'$$

对 1.061 微米和 1.064 微米

φ2.5 毫米小孔光阑放在输出腔镜附近, 考虑到反射对入射角的加倍作用, 足以将靠得最近的 1.061 微米和 1.064 微米分开, 即使小孔向腔中间移动一段距离, 角分辨也是足够的。

采用双灯双椭圆泵浦腔, 棒的尺寸是 φ5.1×94 毫米。被动锁模用五甲川二氯乙烷溶液, 染料盒与全反射凹面镜是一体化的, 液层厚 1 毫米。

激光经过 KDP 倍频之后, 用 1 米光栅光谱仪分析各条谱线的发射情况。光栅光谱仪色散 7.5 Å/毫米, 用 Hg 灯的 5461 Å 作标定谱线。

转动后腔镜的方位角, 实现调频和选频, 分别得到了 1.052、1.061、1.064 和 1.073 微米的选频锁模输出。

图 3 是激光通过 KDP 晶体之后的倍频光谱照片, 从左至右分别是 1.052、1.061、1.064 和 1.073 微米, 最左边的是 Hg 5461 Å 标定谱线。

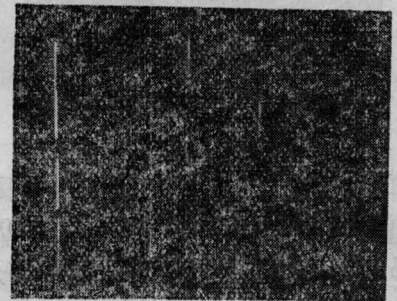


图3 Nd:YAG 选频锁模倍频光谱照片

图 4 是 1.052 微米和 1.073 微米锁模序列脉冲示波器照片。对 1.061 微米和 1.064 微米的锁模脉冲序列, 也得到类似的照片。

实验表明这种调频和选频激光器件的波长输出是足够稳定的。一周之内输出波长不变, 故意将腔失调 ±1.7', 仍然只发射 1.052 微米, 不发射其他波长。从阈值情况看, 当光源能量超过阈值能量 100% 或更高时, 仍然





图4 1.052微米锁模序列脉冲照片

只发射1.052微米,不会发射其他波长。

将后腔镜的转角调到一个合适的位置,就实现双波长输出。例如将转角调到1.064和1.073微米之间的时候,就会出现1.064微米和1.073微米同时振荡的情况,如图5所示。当调到某个合适的位置时,也会出现1.061微米和1.064微米同时振荡的情况,但是没有得到三条谱线同时振荡的情况。由于1.052微米离1.064微米比较远,增益差的也比较多,我们也没观察到1.052微米和1.061微米或1.064微米同时振荡的情况。

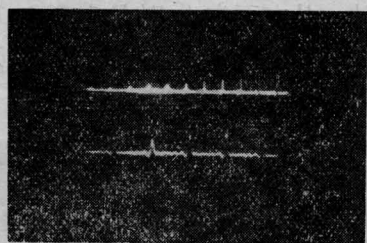


图5 1.073微米锁模序列脉冲照片

值得强调的是由于1.052微米的受激发射截面比1.064微米的小一倍多,1.052微米不易振荡,为了使各条谱线均匀振荡,采用特殊的镀膜方法是十分有效的。起初我们用普通1.06微米宽带反射膜作为输出膜,选波长实验没有成功。后来用了新设计的反射率波长分布介质膜,选波长实验就很容易进行。各个波长的反射率可根据阈值条件推导出来,我们推导出下面公式以求出各波长反射率:

$$\frac{\ln R_{1.064}}{\ln R_{\lambda}} = \frac{\sigma_{1.064}}{\sigma_{\lambda}}$$

表3 在阈值相同时的反射率波长分布关系

$\lambda$ (微米)	1.064	1.052	1.061	1.073
$\sigma (\times 10^{-19}$ 厘米 <sup>2</sup> )	8.8	3	6.65	4
$R$	0.5	0.79	0.59	0.73
$R$	0.8	0.93	0.84	0.89

表4 对应各波长的阈值及阈值比( $C=150$  微法)

$\lambda$ (微米)	1.064	1.052	1.061	1.073
$V_{th}$ (伏)	1050	1300	1200	1100
$E_h$ (焦耳)	82	123	106	98
$E_{th}^{1.064}/E_{th}^{\lambda_i}$	1	1.5	1.3	1.2

式中 $R$ 代表反射率,角标表示波长, $\lambda_i=1.052$ 、 $1.061$ 和 $1.073$ 。表3是以 $R_{1.064}$ 为参数的计算结果。当然,在实际镀膜时不可能完全达到表3的理论要求,使各波长阈值完全相同,只能尽量接近表3的要求,使各波长的振荡阈值大体相同。表4列出了用反射率波长分布介质膜(点测 $R_{1.064}=0.8$ , $R_{1.052}=0.88$ )的实验结果。由表4可见,各波长的阈值是比较接近的。锁模之后,脉冲序列没有显著差异,能量均为几个毫焦耳的量级。

最后还要指出,在实验过程中,腔镜转鼓每转1格,相当于转角 $30''$ ,1.061微米和1.064微米相隔4格,恰好是 $120''$ ,即 $2'$ 。按前面的计算是 $2.4'$ ,这说明计算和实验结果是很符合的,设计是合理的。

### 参 考 文 献

- [1] Jack, Marling; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1980, **QE-16**, No. 1, 56.
- [2] G. C. Reali; *Appl. Opt.*, 1979, **18**, No. 23, 3975.
- [3] C. 〇. 福里斯, A. B. 季米特洛娃; “普通物理学”, 高等教育出版社, 第三册第一分册, 第93页。
- [4] 吴国安; “光学仪器设计”, 科学出版社, 第71页。