

# 用于激光标准具中的宽带膜

杨本祺 金林法 章宏芬

(中国科学院上海光机所)

**提要:** 用  $\lambda/4$  膜系设计了激光标准具中的宽带膜, 在波长 410~710 nm 范围内膜系的反射率为  $95 \pm 3\%$ 。

## Broadband coatings in etalon used for laser beams

Yang Benqi, Jin Linfa, Zhang Hongfen

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

**Abstract:** Broadband coatings in etalon used for laser beams is designed with  $\lambda/4$  coatings. The dispersion of refractive indices for coating materials are considered. Reflectance is  $95 \pm 3\%$  in-the wavelength region from 410 nm to 710 nm.

### 一、引言

在光谱研究中 F-P 干涉仪曾得到广泛的应用, 不过, 也只有几种光源的单色性较好, 能较充分地利用干涉仪的高分辨本领。随着激光的问世, 研究激光光谱的精细结构, 频率稳定性及激光中的选模等应用, 对 F-P 干涉仪又感到兴趣, 使干涉仪获得了新的应用。

F-P 干涉仪有不同的型式, 在激光应用中常采用稳定、牢固、简单的固定式小型干涉仪, 又称固定式标准具。为了能够适用于多种激光波长, 要求标准具两反射镜的反射膜是宽带的, 并具有一定的抗激光强度, 因此膜层必须选用硬膜。对要求一定反射率的宽带膜, 往往是每层膜厚不相等<sup>[1]</sup>, 因此不易制

备。尤其是采用了折射率不稳定的硬膜, 制备就更困难了。

### 二、标准具宽带膜的设计

#### 1. 反射率的要求

理想的标准具有三个重要特性参量<sup>[2]</sup>, 即细度  $F$ , 峰值透射率  $T$  及衬比因子  $B$ :

$$F = \frac{\pi \sqrt{R}}{1-R}$$

$$T = \left(1 - \frac{A}{1-R}\right)^2$$

$$B = 1 + 4F^2/\pi^2$$

式中  $R$  为反射膜的反射率,  $A$  为反射膜的损耗。标准具要求  $F$ 、 $T$ 、 $B$  愈大愈好, 故要求反射率  $R$  以大为好。但当反射率增大时, 要

求膜层层数也相应增加,使膜系的损耗增加,结果使  $T$  减小。在实际工作中二者之间应有所取舍,但用在激光时,因激光的亮度较高,适当减少透射率尚不致有很大影响,故反射率宜高。

以上是考虑一个理想标准具的情况,但实际上是不可能的。设若二个平面有球面误差,其平面度均为  $\lambda/M$ , 则平面度细度为  $F_f = M/2$ , 总的细度  $F$  为:

$$1/F^2 = 1/F_k^2 + 1/F_f^2$$

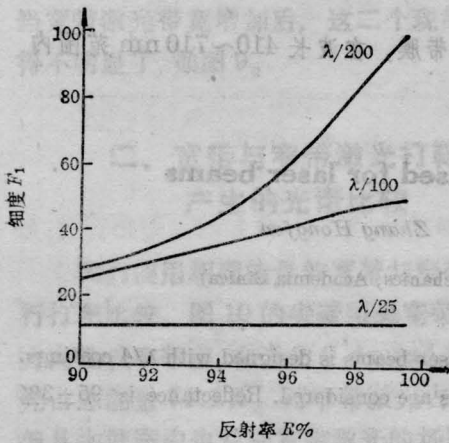


图1 反射率对细度的影响

图1表示当反射面有不同的平面度时细度和反射率的关系。由图可知,随着反射率增加,细度也增加,但如果反射面的平面度不高(图1中  $\lambda/25$  曲线),则增加反射率,细度的增加很少,反而有可能使标准具的透射率下降。

曾以不同的反射率试验与细度及透射率的影响,认为反射率在95%左右为宜。

## 2. 膜层材料

一般选用的宽带膜材料如铝膜,由于其吸收很大,反射率低,且易被激光所损坏,显然是不能采用的。而软膜材料如  $ZnS$ 、 $MgF_2$  等,机械牢固性差,又有不耐潮的缺点,同时,它的抗激光强度较差,所以需选用硬膜。考虑到制备简单,拟选用两种材料,以及为了使宽带膜的层数少,带宽较宽,这两种材料的折射率差别要大一些,故选用  $TiO_2$  及  $SiO_2$ 。

## 3. 膜系

在要求的光谱范围内都具有一定的高反射率(如95%)的膜系设计,已有不少报道<sup>[1,3]</sup>,但优化后多为非  $\lambda/4$  膜系。现考虑到硬膜难于监控,故拟采用  $\lambda/4$  膜系,并希望用少数的几个监控波长监控膜厚,因此参照“双层法”的设计<sup>[1]</sup>,但用多层膜堆代替双层,即如  $A(L_1H_1)^m(L_2H_2)^m \dots G$ 。膜堆的光学厚度仍按几何级数增加,即在对数坐标中均匀分布,因而在接近入射介质的膜堆1为最薄。要求在波长410nm到758nm范围内反射率均在95%,则膜堆1中各层的光波厚度应小于  $\frac{410}{4}$  nm。具体的计算如下:设膜堆1中的各层膜的光学厚度为  $\lambda_1/4$ ,  $\lambda_1 = 380$  nm,并已知长波限为758nm,则取  $\ln \frac{758}{380} = 0.69$ ,然后在该范围内等分,作为膜堆数  $L$ 。由计算机优选  $L$  及  $m$  的值,同时要求  $L$  的值为最小,经计算,得到  $m = 3$ ,  $L = 4$ ,则膜系即为:

$$A(L_1H_1)^3(L_2H_2)^3(L_3H_3)^3(L_4H_4)^3G$$

$\lambda_1$  为380nm,  $\lambda_2$  为478nm,  $\lambda_3$  为602nm,  $\lambda_4$  为758nm。若不考虑色散,则  $n_H = 2.35$ ,  $n_L = 1.46$ ,其反射率曲线如图2所示。

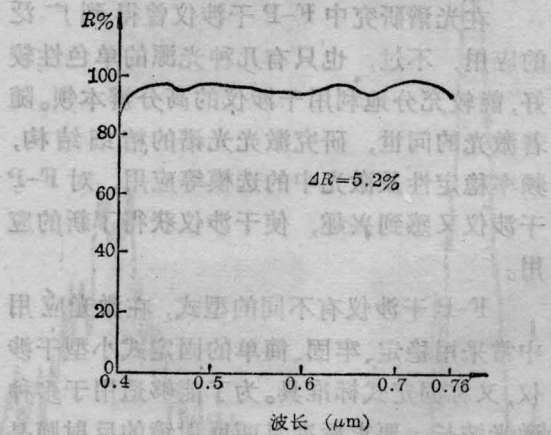


图2 标准具的理论反射曲线(不考虑色散)

$$\text{膜系: } A(L_1H_1)^3(L_2H_2)^3(L_3H_3)^3(L_4H_4)^3G$$

$$\lambda_1 = 0.38 \mu\text{m}, \lambda_2 = 0.478 \mu\text{m},$$

$$\lambda_3 = 0.602 \mu\text{m}, \lambda_4 = 0.758 \mu\text{m}$$

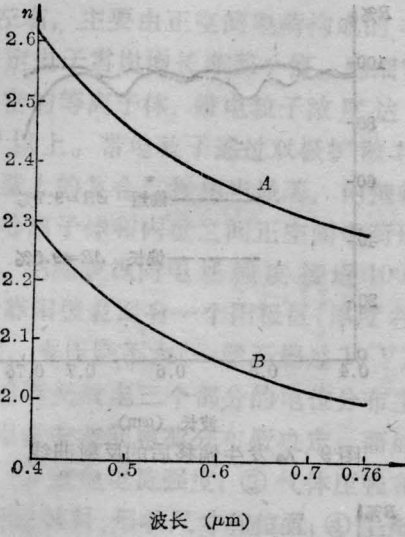


图3 TiO<sub>2</sub>薄膜的色散曲线  
A、B是在不同的制备条件下所得

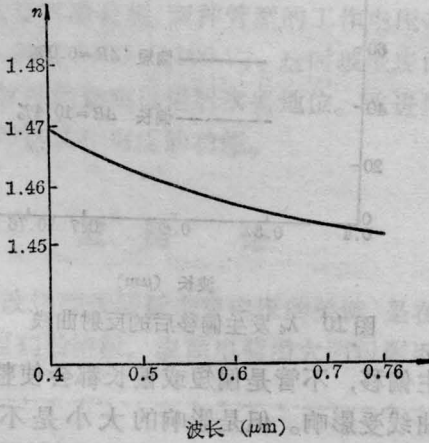


图4 SiO<sub>2</sub>薄膜的色散曲线

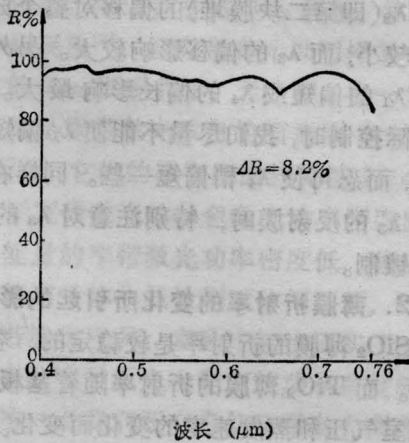


图5 标准具的理论反射曲线(考虑色散)

从图中可以看到在0.41至0.75 $\mu\text{m}$ 波长范围内,反射率的最大值 $R_{\text{max}}$ 为98.3%,最小值 $R_{\text{min}}$ 为93.1%,两者之差 $\Delta R$ 为5.2%。实际上TiO<sub>2</sub>及SiO<sub>2</sub>均存在着色散,我们利用布儒斯特角方法测量了在可见光区的色散曲线,再把它延伸到0.76 $\mu\text{m}$ 波长处得到图3和图4。

如果考虑色散以后,再按照图2的参数进行计算,曲线就显得不平滑了,见图5。在0.41至0.75 $\mu\text{m}$ 波长范围内, $\Delta R$ 为8.2%,显然不满足设计要求。为此,我们结合TiO<sub>2</sub>的实际情况,调整各个膜堆的折射率来进行优选。修正后的膜系为:

$$A(L_1H_1)^3(L_2H_2)^3(L_3H_3)^3(L_4H_4)^3G$$

$$\lambda_1=380\text{nm}, \lambda_2=478\text{nm}$$

$$\lambda_3=602\text{nm}, \lambda_4=758\text{nm}$$

各个膜堆的折射率 $n_{H1}$ 满足图3中B曲线,即在0.55 $\mu\text{m}$ 处折射率为2.1, $n_{H2}=n_{H3}=n_{H4}$ 满足图3中A曲线,即在0.55 $\mu\text{m}$ 处折射率为2.4。 $n_L$ 全部用图4中曲线。优化后的理论计算曲线见图6所示,这时 $\Delta R$ 为5%。

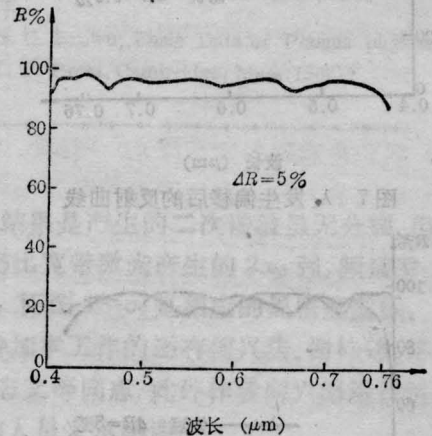


图6 优化后的反射曲线

### 三、宽带标准具薄膜的镀制

膜系设计好后,要正式实现它还是有一定难度的。上述膜系有四个控制波长,三种

折射率，这么多参数要控制正确需要做很多次试验。为了减少试验的次数，以及可以对每次试验结果进行分析，我们在正式镀制以前，首先分析和计算了各膜堆的膜厚偏移以及薄膜折射率的变化对整个薄膜特性的影响。为了简单起见，我们只假定一个参数与理论值有差异，而其它参数仍满足理论设计的要求。

### 1. 膜厚偏移所引起的影响

设计的膜系实际上是四块不同中心波长的反射膜的叠加，其中若有一块反射膜的中心波长不符合设计要求，即膜厚有偏差，则会使整个膜系的反射率曲线受影响。为了便于参考，下面我们分别画出了每一组中心波长偏长和偏短各  $300 \text{ \AA}$  时的反射曲线。

从图 7~10 中可以看到，任何一个波长

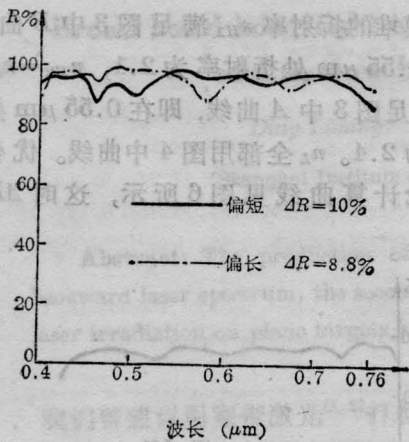


图 7  $\lambda_1$  发生偏移后的反射曲线

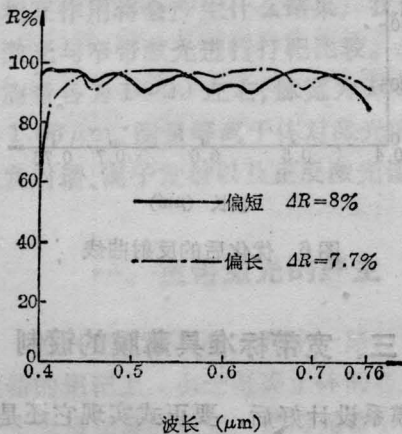


图 8  $\lambda_2$  发生偏移后的反射曲线

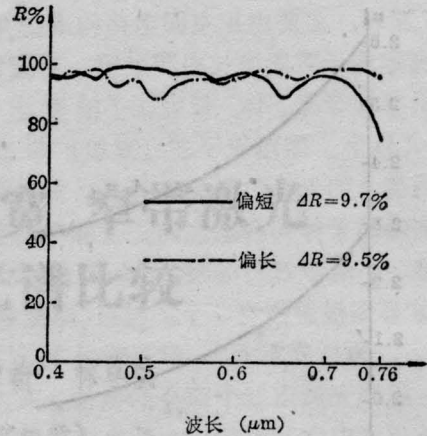


图 9  $\lambda_3$  发生偏移后的反射曲线

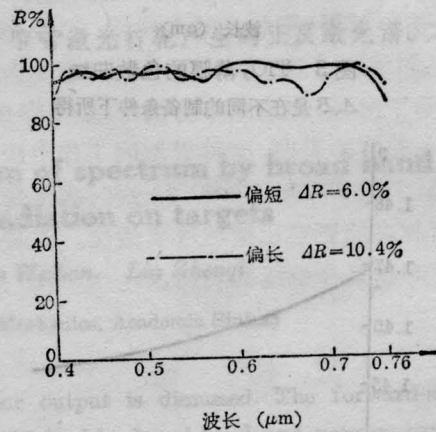


图 10  $\lambda_4$  发生偏移后的反射曲线

发生偏移，不管是偏短或偏长都会使整个反射曲线受影响。但是影响的大小是不一样的， $\Delta R$  可以从 6% 变化到 10.4%。由曲线可知  $\lambda_2$  (即第二块膜堆) 的偏移对整个曲线的影响较小，而  $\lambda_3$  的偏移影响较大。另外可以看到  $\lambda_1$  的偏短或  $\lambda_4$  的偏长影响最大。所以在实际控制时，我们尽量不能使  $\lambda_1$  偏短和  $\lambda_4$  偏长，而忍可使  $\lambda_4$  稍偏短一些。同样在控制  $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  的反射膜时，特别注意对  $\lambda_3$  的反射膜的镀制。

### 2. 薄膜折射率的变化所引起的影响

$\text{SiO}_2$  薄膜的折射率是较稳定的，容易控制好。而  $\text{TiO}_2$  薄膜的折射率随着基板温度、真空室气压和蒸发速率的变化而变化。在文献 [4] 中指出，对 630 nm 波长它可以在 2.05

表 1 折射率的变化对宽带反射膜的影响

		$R_{max}\%$	$R_{min}\%$	$\Delta R\%$
$n_{H_1}^*$	2.4	98.8	92.4	6.4
	2.3	98.5	92.5	6.0
	2.2	98.0	92.6	5.4
	2.1	97.7	92.7	5.0
	2.0	97.5	91.2	6.3
$n_{H_2}$	2.5	98.0	92.7	5.3
	2.4	97.7	92.7	5.0
	2.3	97.8	91.0	6.8
	2.2	97.9	88.4	9.5
$n_{H_3}$	2.5	98.2	92.9	5.3
	2.4	97.7	92.7	5.0
	2.3	97.6	90.6	7.0
	2.2	97.6	88.0	9.6
$n_{H_4}$	2.5	98.2	92.9	5.3
	2.4	97.7	92.7	5.0
	2.3	97.5	90.6	6.9
	2.2	97.5	88.0	9.5

\* 这里的折射率都是指在 550nm 波长处的折射率。

至 2.38 之间变化。考虑到色散, 对 550 nm 波长也相当于在 2.10~2.46 之间变化。我们计算了折射率的变化对整个反射曲线的影响。在计算时也假定只有一组反射膜的折射率发生变化, 其它仍满足设计要求, 结果见表 1。

表 1 中列出的是膜系在 410 nm 至 750 nm 的波长范围内, 反射率的最大值和最小值及两者之间的差值。从表中可以看到, 高折射率材料易向高处偏,  $\Delta R$  的值就小。对  $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  和  $\lambda_4$  反射膜中,  $TiO_2$  的折射率已接近最高值, 所以在制备时, 只要想法提高折射率即可。对第一膜堆中的  $TiO_2$  折射率要求为 2.1, 这是一般工艺下  $TiO_2$  薄膜的最低折射率。因此,  $TiO_2$  折射率的控制也就较为方便。

### 3. 镀制

我们使用偏转电子枪蒸发  $TiO_2$  和  $SiO_2$ 。基板温度为 300°C, 镀制时把烘烤关掉, 在蒸发  $TiO_2$  时充入一定量的氧气, 以减少薄膜的吸收。具体镀制时先镀  $\lambda_4$  的膜堆, 镀好后调换一块比较片再镀  $\lambda_3$  的膜堆, 以此类推, 直到镀好为止。在镀  $\lambda_1$  膜堆时, 保持  $4 \times 10^{-4}$  Torr 的真空度, 其余都保持  $2 \times 10^{-4}$  Torr, 镀好后应立即充入大量的氧气。

标准具两面需要镀一样反射率的膜, 所以镀好一面后, 把样品翻过来再照此镀一次, 待两面镀好后, 再经过 350°C 八小时的烘烤。

### 四、结 果

把镀好一个面的样品放在分光光度计上测量透过曲线, 见图 11。

从图中可知在 410 nm 至 710 nm 整个波长内, 透过率在 2% 到 6%。

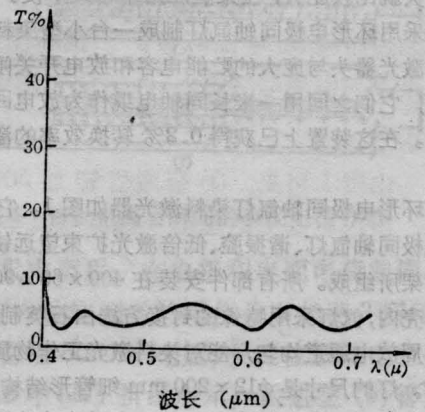


图 11 宽带反射膜实测透过曲线

利用“GFS 高反射率测量仪”测量反射率, 数据见表 2。

镀制的 2 mm 厚的宽带标准具试用结果如下: 在染料激光器中, 波长从 0.57~0.6 μm 变化, 波长稳定在  $\pm 0.01 \text{ \AA}$ 。线宽约 20 MHz 时, 用扫描 F-P, 看到染料激光有相隔 600 MHz 的两个纵模, 我们试制的标准具可看

(下转第 236 页)

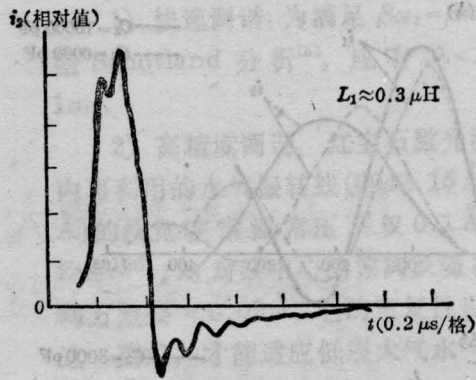
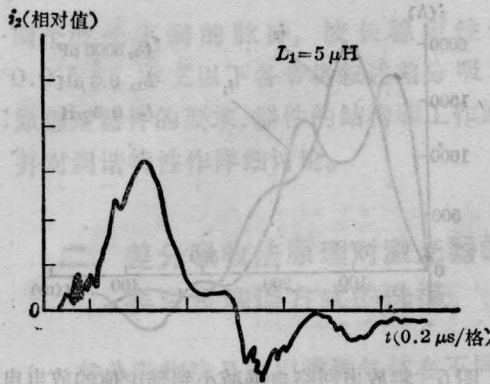


图6 用儒柯夫斯基线圈测得的放电电流  $i_2$  的波形

$C_1=8000\text{ pF}$ ,  $C_2=3000\text{ pF}$ ,  $L_2\approx 0.3\text{ }\mu\text{H}$ ,  $R=10\text{ }\Omega$ ,  $V_c=13\text{ kV}$ ,  $f=5\text{ kHz}$

许, 应向这个方向努力。

图6是儒柯夫斯基线圈实测的放电电流波形。可以看出回路电感增加, 通过激光器的电流  $i_2$  将大幅度下降, 脉宽也大大增加。

### 参 考 文 献

[1] Z. Karny *et al.*; *Rev. Sci. Instrum.*, 1980, **51**, No. 10, 1426.

[2] *Laser Focus*, 1982, June, 34.  
 [3] 1980 Laser Program Annual Report (Lawrence Livermore National Lab.), III-(10~18).  
 [4] I. Smilanski *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **40**, No. 7, 547.  
 [5] М. Л. Мучник; *ПТЭ*, 1983, №3, 93.  
 [6] В. В. Зубов; *Кван. электр.*, 1983, **10**, №9, 1908.  
 [7] Д. Е. Кирилов; *ПТЭ*, 1981, №4, 165.  
 [8] М. J. Kushner *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**, No. 6, 2970.

(上接第241页)

表2 宽带反射膜的实测反射率

波长(nm)	420	530	633	700
反射率 %	97.97	94.33	93.89	96.69

到相应的二个干涉圈。由此估计至少可分辨  $0.01\text{ \AA}$ 。这种标准具在  $\text{Ar}^+$  激光、 $\text{He-Ne}$  激

光、倍频激光中均可使用。

### 参 考 文 献

[1] Z. Lés; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, No. 1, 61.  
 [2] M. Born, E. Wolf; 《光学原理》, 1975.  
 [3] A. Kozid, Z. Lés; *Thin Solid Films*, 1982, **91**, No. 4, 375.  
 [4] 金林法等; 《中国激光》, 1984, **11** No. 4, 735.

## 可调谐金绿宝石激光器获巨脉冲输出

金绿宝石激光器是近几年发展起来的新型可调谐固体激光器。它的优点是可用闪光灯泵浦, 能连续或脉冲运转, 器件结构紧凑, 能在室温下连续调谐输出, 输出能量大, 功率高。其输出能量和调谐波段是目前其他各类调谐激光器不能比拟的, 因此具有很大的应用发展前景。

在今年初我们已实现自由振荡大能量连续调谐输出。波长调谐范围  $720\sim 780\text{ nm}$ 。在输入能量  $196\text{ J}$  时最大输出能量达  $560\text{ mJ}$ , 输出线宽  $6\sim 8\text{ \AA}$ 。在此基础上, 近期我们又顺利实现了调  $Q$  巨脉冲输出。实验条件是: 金绿宝石棒  $\phi 6.9\times 65\text{ mm}$ ,  $C$  轴通

光, 用  $\phi 7\times 60\text{ mm}$  的直管氙灯泵浦,  $\text{KD}^*\text{P}$  电光调  $Q$ , 共振腔长  $450\text{ mm}$ , 输出激光为单脉冲, 峰值波长最大输出能量近  $200\text{ mJ}$ , 脉宽约  $100\text{ ns}$ , 输出稳定。由于采取了一些特殊技术措施, 使调  $Q$  元件的插入损耗降至最低, 动态振荡阈值仅略高于静态阈值。

由于实现了调  $Q$  巨脉冲输出, 使得这种激光器具有更大的实用意义。有关详细实验结果正在整理中。

(中国科学院安徽光机所 张邦星 郭行安  
 吴路生 陈梅玲 赵梅荣  
 1984年11月18日收稿)