

Na₂ 近红外激光振荡用谐振腔片镀膜制

刘金成 王 骐 马祖光

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨, 150006)

摘要: 本文报导了Na₂近红外激光振荡用特殊要求的谐振腔片膜系设计和镀膜制。用此腔片1988年于国际上首次实现了Na₂第一三重态激光振荡。

Coating of resonator mirrors for near-infrared laser oscillation Na₂

Liu Jincheng, Wang Qi, Ma Zuguang

(Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology)

Abstract: In this paper, the designing and coating of special film system for near-infrared laser oscillation of Na₂ are reported. In 1988, with this film, laser oscillation of the lowest triplet transition of Na₂ was obtained for the first time.

一、引 言

Na₂近红外激光振荡探索是80年代初被各国同行普遍重视的一个前沿课题。特别是Na₂中第一三重态激光振荡于1980年被Konowalow^[1]预言为近红外可调谐的相干光源。其调谐范围为830nm~900nm, 受激发射截面为10 Å², 是很有希望做为在激光光谱技术中应用的新的近红外可调谐相干光源。

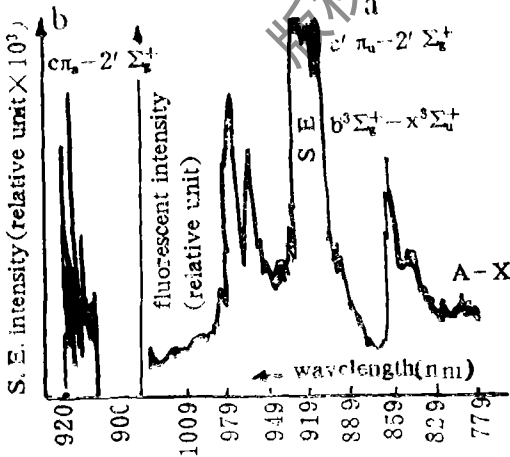


Fig. 1 Near-infrared fluorescent radiation
a—lowest-triplet transition region (830~900 nm)
b—910 nm ASE region

Na₂的第一三重态跃迁 ($b^3 \Sigma_u^+ - x^3 \Sigma_u^+$) 激光感生荧光谱于1981年首次被观察到^[2] (见图1)。寻找该谱区的激光振荡一直是很多国家, 很多小组的愿望。

二、设计考虑

从实现 Na₂ $b^3 \Sigma_u^+ - x^3 \Sigma_u^+$ 荧光谱区激发机理看, 对谐振腔有如下几个特殊要求:

1. 第一三重态谱区位于 830nm~900nm, 不同激发机理峰值有所不同。根据文献〔2〕的机理, 峰位于855.5nm, 根据文献〔3〕的机理, 峰位于892nm。但不管哪个机理在911nm处都有一个自发辐射放大

存在, 该自发辐射放大在激光振荡中的作用又有两种可能:

(1) 它可能是激励Na₂ b³Σ_g⁺←x³Σ_g⁺跃迁的间接辐射泵浦光。从而促进第一三重态激光振荡形成。

(2) 它可能是另一通道的辐射跃迁, 而与第一三重态争夺上能级粒子。这时在激光的振荡中, 它的比值将是对欲获得的第一三重态激光振荡起损耗作用。应尽量避免它的高反, 这是本工作认定的观点。

2. 实现Na₂ b³Σ_g⁺←x³Σ_g⁺跃迁比较有效的途径是紫外激励。因而腔片要能在强紫外激励下工作, 其泵浦光波长为351nm。

研究Na₂ b³Σ_g⁺←x³Σ_g⁺激光振荡用谐振腔片的适宜膜系, 正确地选择膜料, 研究腔片的镀制技术和工艺, 势必为产生激光振荡提供方便的条件。可以说, 使Na₂ b³Σ_g⁺←x³Σ_g⁺激光振荡成为现实一个满足要求的谐振腔片在实验中是不可缺少的。

腔片设计要求: (1) 855.5nm处高反, 911nm处高透。反射带宽度 Δλ<100nm (中心波长λ₀=855.5nm, ±50nm)。(2) 对泵浦光351nm处高透。(3) 抗紫外。(4) 432.5~550nm, 600~800nm两区域为通带 (在通带内应无反射峰以避免位于这两谱区的 Na₂ b-x 带、B-X 带的增益)。(5) 硬膜。全介质反射镜一般是由交替的光学厚度为λ₀/4 的高低折射率材料的膜层构成的多层膜。理论上, 随着镀层的增加反射镜的反射率可以无限接近 100%。实际上, 由于膜层的吸收散射损耗以及膜层厚度控制精度的限制, 当膜系达到一定层数时, 即反射率接近100%时, 继续加镀并不能提高其反射率, 相反由于吸收散射损耗的增加而使反射率下降。

我们设计采用熟知的氧化锆、二氧化硅作为周期交替的高低折射率镀层材料。有关它们的性质简单列表如下。

Table 1 ZrO₂ SiO₂ properties

material	refractivity	transmissive region(μm)	evaporation art	melting point(°C)
ZrO ₂	2.1 (0.55μ)	0.3~7	electron beam	2700
	2.0 (2μ)			
SiO ₂	1.92 (1μ)	0.2~8	electron beam	1750
	1.46 (0.55μ)			

从表 1^[4]可以看出透明区满足要求, 特别是满足351 nm泵浦光。而采用的蒸发方式相同又为镀制创造了方便的工艺条件。氧化锆成膜硬, 不吸湿、稍呈压应力; 二氧化硅膜性能稳定、牢固、抗化学腐蚀、呈张应力, 以及它们的熔点高这些性质决定了两种材料的成膜符合硬膜条件, 应力搭配也是适宜的。

单层ZrO₂, SiO₂ 当镀层厚度分别是中心波长的四分之一时, 承受激光的破坏阈值分别为70J/mm²和130J/mm², 而由这两种材料组合的23层多层膜, 膜系为[HL]¹¹H, 承受激光的破坏阈值为15J/mm²^[4]。

对于厚度为四分之一中心波长交替蒸镀的高反膜来说, 材料一经选定, 那么主反射带的宽度也就相应地确定了。假定在n_g=1.52的玻璃基底上交替蒸镀n_H=1.9的氧化锆和n_L=1.46的二氧化硅, 那么会立即得到用已知折射率表示的相对波数宽度为

$$\Delta g = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L} \right) = 0.084$$

而对应中心波长855.5nm的反射带波长宽度为

$$\Delta \lambda = 2 \Delta g \lambda_0 = 144 \text{ (nm)}$$

由截止区的反射率公式

$$R = \left[\frac{1 - (n_H/n_L)^{2s} (n_H^2/n_g)}{1 + (n_H/n_L)^{2s} (n_H^2/n_g)} \right]^2$$

可以很容易算出，当镀层为17层时，反射率可高达98%。式中，s为基本周期个数。

可见，满足设计要求的难点是反射带宽度及可见光区、泵浦光351nm处的高透。多个谱区同时要求，有的谱区为高透，有的谱区为高反从紫外到近红外，这对于λ/4膜系来说确实存在一定的困难（见图2^[5]）。

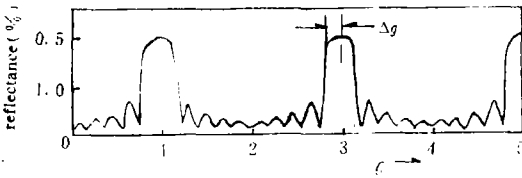


Fig. 2 Reflectivity curves of 9-layer ZeS film coated on glass (ng=1.52) and icestone

反射带宽度仅决定于膜层的高低折射率之比值，而与层数无关^[5]。除了在中心波长λ₀处出现主反射带外，在λ₀/3, λ₀/5, λ₀/7……等波长处也存在着高级次的反射带（见图2）。各反射带的相对波数宽度是相同的，而相应的波长宽度却近似地按1/9, 1/25, 1/49的比例减小。因此，当膜料选定以后，需要窄带的高反膜可考虑使用高级次来达到要求。这是窄带技术的主要措施之一。

若以855.5nm为中心波长λ₀，且使其处在第三级次位置，从而达到压缩855.5nm处反射带宽度。这相当于新的中心波长λ₀' = 3 × 855.5nm，这样在855.5nm (λ₀'/3), 513.3nm (λ₀'/5), 366.6nm (λ₀'/7)等波长处出现高级次反射带。它们对应的波长宽度分别为

$$855.5\text{nm处} \quad [\Delta \lambda]_3 = \lambda_0' / (3 - \Delta g) - \lambda_0' / (3 + \Delta g) = 47.9 \text{ (nm)}$$

$$513.3\text{nm处} \quad [\Delta \lambda]_5 = \lambda_0' / (5 - \Delta g) - \lambda_0' / (5 + \Delta g) = 17.3 \text{ (nm)}$$

$$366.6\text{nm处} \quad [\Delta \lambda]_7 = \lambda_0' / (7 - \Delta g) - \lambda_0' / (7 + \Delta g) = 8.8 \text{ (nm)}$$

即分别约为主反射带波长宽度的1/9, 1/25, 1/49……。

此外，对某一波长λ₀，厚度均为λ₀/4的高反射膜和厚度均为3λ₀/4的高反射膜，在膜层的折射率比值相同的情况下，在波长λ₀处，后者的高反射区的波长宽度约为前者的1/3。

通过上面分析看出带宽指标可以满足设计要求。

窄带技术的应用如同将控制波长奇数倍的向长波方向移。从而造成的结果虽膜层数没有增加，但每层膜的厚度却增加很多。为了弥补这一不足，我们使反射带落在第三级次位置。再则可考虑只增加一种膜料的镀层厚度，另一种膜料镀层仍为λ₀/4厚度。即采用调谐比方法来减少膜层厚度的增加，使周期膜系由〔3H3L〕改为〔H3L〕或〔3HL〕。这样做的结果相当于厚度减少三分之一。而关于调谐比膜系的各级次带宽计算与利用高级次压带宽基本相同。

采用非λ₀/4膜系设计比较理想。但仍需用窄带技术使反射带满足宽度要求。同时，用通

带展宽技术使不必要的高级次反射峰被抑制。

非 $\lambda_0/4$ 波长厚度的镀层监控方法是所谓石英晶振法。

鉴于设备条件的限制仅给出其膜系和上机后计算的理论透射率曲线(图3, 略)。

采用膜系为 $G|A(ABCBA)^s|M$

其中, $n_A = 1.46$ $n_B = 1.9$ $n_C = 2.39$

$G:n_g = 1.49$ $M:n_M = 1.0$

$$\text{厚度} \quad A \cdot B = \frac{\lambda_0'}{24} \quad C = \frac{\lambda_0'}{3} \quad s = 7$$

从图3可以看出这是理想的膜系。虽膜层数较多, 但每层膜的厚度要薄得多。在有条件时可进一步探索。

三、膜的镀制

1. 装置

(1) 实验中用的镀膜机是北京仪器厂生产的DMD-450型光学多层镀膜机, 经改装安置了磁偏转的e型电子枪。最大输出功率3kW, 高压输出0~10kV可调, 输出束流0~300mA可调。

(2) 探测器型号为9684B(英国)的光电倍增管, 灵敏区为700nm~900nm。

(3) 监控仪器为沈阳仪器仪表研究所生产的MKY型光学膜厚控制仪。

2. 材料

蒸涂材料选用北京有色金属研究总院生产的被压制成小圆柱形的白色物质, 氧化锆和二氧化硅, 它们的纯度均为99.99%。

蒸涂参数见表2。

Table 2 Evaporation art parameters

material	heater current(A)	negative voltage(kV)	beam current(mA)	power (W)	focal spot area(mm ²)	power density (W/mm ²)	evaporating time (min)
ZrO ₂	14	9	90	810	113	7.2	$\lambda_0/4$ thk 1.2
SiO ₂	11	11	60	660	113	5.8	$3\lambda_0/4$ thk 1.2

3. 膜系、工艺与说明

(1) 膜系设计为 $G|(H3L)^7H|A$ 。它的理论计算曲线见图4(略)。

(2) $3L$ 为 $\lambda_0'/4$ 厚度。若中心波长控制在855.5nm, 那么走三个极值点, 这意味着控制精度的提高。

(3) 氧化锆是高熔点材料, 蒸涂时应注意功率密度不宜过高, 以免过热分解。有条件可充氧蒸发。

(4) 基板温度为250℃左右。使ZrO₂和SiO₂的成膜效果好些。

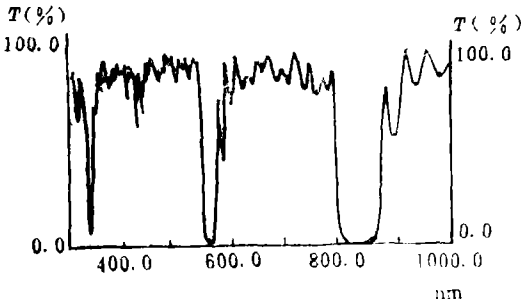


Fig. 5 Practical transmissivity curves of coated elements

(5) 成品从真空室取出后, 应放到烘箱中加热到250℃以上进行时效处理, 一般4h以上。

(6) 实镀以石英片($n_9 = 1.46$)作基底, 实镀21层。实镀层数比理论计算稍多, 这是追求反射率的结果。

(7) 从图5看到反射带右端通带的第一波纹稍低, 这是由于极值控制造成, 要求保证每一层的走值精度准确无误, 效果肯定会好。

四、结 果

实测曲线的测试是在日立U-3400分光光度计上进行的, 通过实测曲线与理论计算的比较(图5与图4(略))可以看到镀制是成功的, 满足了设计要求中各个谱区的需要:

351nm的 $T = 70\%$; 911nm的 $T = 82\%$;

432.5~550nm, 600~800nm两谱区为通带;

855.5nm处在高反带内, $R > 99\%$, $\Delta\lambda < 100\text{nm}$ 。

用上面我们自己镀制的腔片1988年于国际上首次实现了 Na_2 第一三重态激光振荡^[3]。

参 考 文 献

[1] Konowalow D D, Rosenkromtz M E, Olson M L. J Chem Phys, 1980; 72(4): 2613
 [2] 马祖光. 光学学报, 1982; 2(3): 233
 [3] Wang Oi, Lu Zhiwei, Liu Wei et al. $\text{Na}_2 1^3\Sigma_g^+ - 1^3\Sigma_u^+$ lasing with peak around 892. 0nm. AIP Conf Proc, 1989; 191: 578
 [4] 光学薄膜编写组. 光学薄膜. 上海: 人民出版社, 1976: 43~44, 104~105
 [5] 唐晋发, 顾培夫. 薄膜光学与技术. 北京: 机械工业出版社, 1989: 77, 179

* * *

作者简介: 刘金成, 男, 1945年出生。工程师。现主要从事薄膜技术, 强激光技术研究工作。

收稿日期: 1992年9月14日。

· 简 讯 ·

激光雷达摄影机

软件控制的LASAR摄像系统以每秒180000像元拍摄二维反射数据和三维距离数据, 在小于8s时间内在 $60 \times 72^\circ$ 视场内扫描达 1024×2048 像元的图象。景深为2~40m, 强度和距离信息以12bit提供4096级景深分辨率, 摄影机尺寸为5.25in \times 8.5in \times 8.5in, 重量为17lb。

译自 L F Wored, 1992; 28(11): 176 邹福清 译 邹声荣 校