

# 大功率射频板条 CO<sub>2</sub>激光器电极波导介质膜研究

杨卫红 袁金坤 王 度 陈一峰 唐霞辉

华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074

**摘要** 针对大功率射频板条 CO<sub>2</sub>激光器铜电极表面放电氧化、受射频放电的电子溅射,致使电极表面不光滑,辉光放电不均匀,光波导损耗严重等问题。利用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>波导介质膜具有的反常色散效应、耐高温能力强的特点,采用磁控溅射镀膜技术对激光器电极表面先镀 Al,而后阳极氧化获得 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>波导介质膜。分析了磁控溅射工艺对膜层结构的影响,测量了镀膜电极对 CO<sub>2</sub>激光的反射率,并进行了放电实验检测。结果表明,溅射功率为 250 W 时可得到致密的镀膜层结构;厚度 6 μm 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜,对波长 10.6 μm 的 CO<sub>2</sub>激光波导反射率最高达 75%;电极镀膜后激光器输出功率在占空比为 30% 时为 700 W,占空比为 60% 时达到了 1300 W。

**关键词** 薄膜; 射频板条 CO<sub>2</sub>激光器; 镀膜技术; 磁控溅射; 光波导; 反常色散

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0107001

## Study on Electrode Waveguide Dielectric Film for High Power Radio Frequency Slab CO<sub>2</sub> Laser

Yang Weihong Yuan Jinkun Wang Du Chen Yifeng Tang Xiahui

*School of Optics and Electronics Information, Huazhong University of Science and Technology,  
Wuhan, Hubei 430074, China*

**Abstract** To solve the problems of the high power radio frequency (RF) slab CO<sub>2</sub> laser surface oxidation by copper electrode discharge and RF discharge electronic sputtering which leads to rough electrode surface, an uniform glow discharge and serious optical loss and so on. The magnetron sputtering coating technology is used for laser electrode surface plating Al, and then anodic oxidation into Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> waveguide dielectric film, based on the effect of anomalous dispersion and high temperature resistant ability of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> waveguide dielectric film. The influence of magnetron sputtering process on the film structure is analyzed; the reflectivity of the electrode coating to CO<sub>2</sub> laser is measured and the discharge experiment is tested. The results show that when the sputtering power is 250 W, the compact film structure can be obtained; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films with thickness of 6 μm, have the highest reflectance peak of 75% to CO<sub>2</sub> waveguide laser wavelength of 10.6 μm; The laser output power at a 30% duty cycle is 700 W, in the duty cycle of 60% reaches 1300 W after electrode coating.

**Key words** thin films; radio frequency-excited CO<sub>2</sub> laser; coating technology; magnetron sputtering; planar waveguide; anomalous dispersion

**OCIS codes** 310.6860; 310.3840; 140.3470

## 1 引 言

大功率射频(RF)板条 CO<sub>2</sub>激光器是将传统的波导 CO<sub>2</sub>激光技术和射频放电相结合,并在横向采用非稳腔实现大面积功率提取而形成的产品。其扩散冷却技术替代了对流冷却,不需要气体热交换器,没有气体流动,气体消耗很低,谐振腔光学器件不会污染,具有维护周期长,光束质量好,结构紧凑等优点。在中厚板切

收稿日期: 2014-05-20; 收到修改稿日期: 2014-09-14

基金项目: 湖北省 2014 年支撑计划项目(2014AAA02)

作者简介: 杨卫红(1974—),女,博士研究生,主要从事大功率激光器及其应用等方面的研究。E-mail: rose7636@163.com

导师简介: 唐霞辉(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事大功率工业激光器及其应用等方面的研究工作。

E-mail: txh1116@hust.edu.cn(通信联系人)

割和焊接应用领域具有重要的应用<sup>[1-2]</sup>。

早期的高功率板条激光器多采用铝电极<sup>[3]</sup>,铝电极表面对波长为 10.6 μm 光波的反射率不够理想,不利于提高激光输出功率。因为除了考虑能否高功率输出的问题,射频板条 CO<sub>2</sub>激光器中电极的工作环境还需要考虑高温、气体、射频以及光波导等条件对电极的特殊要求。1981年,Hidaka等首次提出了全反射空芯光纤的思想,为 CO<sub>2</sub>激光传输用光波导的研究开辟了新的途径。板条电极的取材研究中,俄罗斯学者在铜表面镀光学介质膜的材料,如氧化铈(CeO)和二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)<sup>[4-5]</sup>,其对 10.6 μm 波长光波的反射率达 99.2%以上。氧化铝由于其耐高温、热稳定性好、强度高、化学性质稳定、易清洁等诸多优点,近年来,氧化铝膜层光纤波导领域的研究发展迅速,有潜力成为板条 CO<sub>2</sub>激光器金属波导膜层的选择。Kozodoy 和 Harrington 研究了氧化铝薄膜对 10.6 μm 的 CO<sub>2</sub>激光的波导特性,分析了不同温度、膜层厚度与波长条件下的表现,认为氧化铝薄膜完全适用于 CO<sub>2</sub>激光的波导传输<sup>[4]</sup>。

华中科技大学研制的 2 kW 射频板条 CO<sub>2</sub>激光器,采用紫铜电极,虽然紫铜做电极材料具有其优点:导电率高、扩散冷却能力强。但是,电极上没有镀波导介质膜,波导损耗大,而且无氧铜在放电过程中容易氧化,以及电子溅射等,影响了激光的出光效率和功率稳定性。一般情况是激光器使用时间达到一年左右,激光器输出功率将减弱很多,2 kW 的激光输出变为 1.5 kW 左右。因此需要在铜电极表面镀一层耐腐蚀、抗电子溅射的膜层,来保证激光器射频放电的均匀性,同时膜层对 CO<sub>2</sub>激光要有较小的波导损耗<sup>[6]</sup>。本文利用磁控溅射镀膜技术,对紫铜电极进行镀 Al 膜,而后通过膜层表面阳极氧化成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>波导介质膜。利用 NEXUS 670 型傅里叶红外光谱仪对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>波导介质膜进行红外反射率的测试,确定 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>波导介质膜的反射率是否能够达到板条电极对于光学波导膜反射率的要求。研究了电极镀膜后射频板条激光器功率输出稳定性。

## 2 板条电极波导介质膜的光学特性

$\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>原子系统固有振动频率正好在 CO<sub>2</sub>激光波长附近,因此, $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>在 CO<sub>2</sub>激光波长处发生反常色散,折射率小于 1。当 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜材料的厚度大于 4 μm 时能获得较好的 CO<sub>2</sub>光反射效果<sup>[7]</sup>。射频板条电极矩形光波导示意图如图 1 所示,板条电极长度为  $L$ ,所构成的矩形光波导长为  $2a$ ,入射角为  $\theta$ , $e$ 、 $f$  为波导的左右侧面。CO<sub>2</sub>激光波长为 10.6 μm,它处在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的反常色散区域,在这一区域,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>对入射光的折射率随着入射光频率的增大而减小。

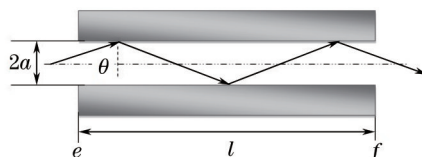


图 1 平板电极波导示意图

Fig.1 Schematic diagram of the plate electrode waveguide

根据复折射率的概念公式(1)以及气体介质色散公式(2):

$$N' = n - ik, \tag{1}$$

$$N'^2 = 1 + \frac{Nq^2}{\epsilon_0 m(\omega_0 - \omega^2 - i\gamma\omega)}, \tag{2}$$

式中  $n$  为材料的实折射率,它决定于光在介质中传播的速度, $k$  为吸收或衰减系数,它决定于光在吸收性介质中传播时的衰减。(2)式中, $N'$  为介质复折射率, $N$  为单位体积介质内的电子数, $m$  是电子质量, $q$  是电子的电荷, $\omega_0$  为电子固有振动的角频率, $\omega$  为入射光的角频率, $\gamma$  为阻尼系数。

由色散的经典理论对(2)式的解析,反常色散时复折射率与入射光角频率的关系曲线<sup>[6]</sup>,如图 2 所示。其中  $a$  点为折射率  $n$  的极大值, $b$  为折射率的极小值。在角频率远小于  $\omega_0$  的范围属于正常色散区域,这一区域内,折射率  $n$  随角频率  $\omega$  的增大而增大, $k$  值很小;当角频率接近于  $\omega_0$  时,折射率  $n$  随角频率增大而减小,在  $\omega = \omega_0$  时, $n=1$ , $k$  也取得最大值。

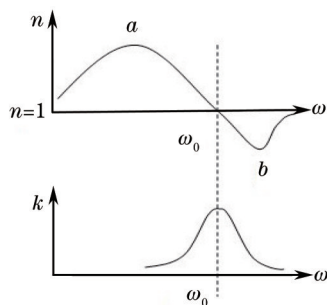


图2 反常色散时复折射率与入射光角频率的关系曲线

Fig.2 Relation curves of the complex refractive index and the incident angle frequency in the region of anomalous dispersion

根据介质的电子可以有若干个不同的固有振动频率  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots$ , 而且每一个  $\omega$  附近都对应存在一个吸收峰和反常色散区。在反常色散区, 介质对入射光的折射率随着入射光频率的增大而减小,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  晶体对  $\text{CO}_2$  激光的折射率为 0.67。其频率处于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  晶体的反常色散区。这样, 当  $10.6 \mu\text{m}$  波长的  $\text{CO}_2$  激光从空气中入射到  $\text{Al}_2\text{O}_3$  介质表面时, 入射角只要大于发生全反射的临界角, 就能够产生全反射现象。全反射现象避免了  $\text{CO}_2$  激光在介质内的折射损耗, 从而降低波导对  $\text{CO}_2$  激光的损耗<sup>[6]</sup>。

### 3 电极表面镀膜实验及结果分析

#### 3.1 实验方法

实验采用磁控溅射方法在紫铜基体表面镀 Al 而后阳极氧化成  $\text{Al}_2\text{O}_3$  介质膜, 镀膜实验照片如图 3 所示。实验中选用铝靶材的纯度为 99.995%, 直径为 60 mm, 厚度为 5 mm。铜基体为  $1150 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$  无氧铜板, 实验前用质量分数为 5% 的 HF 清洗 Cu 基体表面, 除去其表面的氧化层, 然后再用酒精和丙酮进行超声清洗。镀膜时间为 15 h, 其中包括: 1) 预热 1 h (预热炉体加温至  $230 \text{ }^\circ\text{C}$  及空炉抽真空, 真空度为  $8.7 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ ); 2) 放进铜板, 抽真空, 加温炉体 (炉体温度为  $280 \text{ }^\circ\text{C}$ , 因铜板里有水分) 30 min; 3) 放气, 冷却, 用丙酮清洗铜板 30 min; 4) 放入铜板, 抽真空, 炉体加温至  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , 负偏压 700 V 工作 13 min; 5) 镀膜开始, 镀膜偏压 196 V; 电源 475 V; 光栅阀 60; 氩气 115 Pa; 真空度  $8.7 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ , 镀膜时间 8 h; 6) 镀铝膜完成后, 炉内再次抽真空, 之后保持炉内  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  通氧气 5 h, 实现铝表面氧化生成  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜。

#### 3.2 镀膜表面宏观形貌

在射频板条  $\text{CO}_2$  激光器电极上镀  $\text{Al}_2\text{O}_3$  波导介质膜要考虑的问题是: 1) 对  $10.6 \mu\text{m}$  波段的  $\text{CO}_2$  激光器起波导作用, 即对掠入射的  $\text{CO}_2$  激光有很高的反射率; 2) 与电极有较好的结合强度, 在放电过程中 (电极表面温度约  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 不会出现脱落, 同时提高表面抗电子溅射、耐高温、耐摩擦的能力; 3) 膜层也不能太厚, 不能使放电气体热量通过电极的传递<sup>[6]</sup>。因此需要对镀膜铜板进行膜层成分、与基体结合强度以及光学测试。图 4 为电极表面镀膜形貌照片。

从图 4 的照片中可以看出, 膜层表面基本平整, 偶有凹凸。这是由于磁控溅射中磁场的不均匀分布, 形成磁控溅射所特有的一种沟槽效应<sup>[8]</sup>。不同的磁场分布会形成不同的沟槽效应, 平面靶经过一段时间的溅射后, 会形成凹凸状的起伏。正是由于磁控溅射的这种特征, 造成基片上沉积薄膜的不均匀分布。这种膜



图3 镀膜实验及镀膜结果

Fig.3 Coating experiments and the coating results

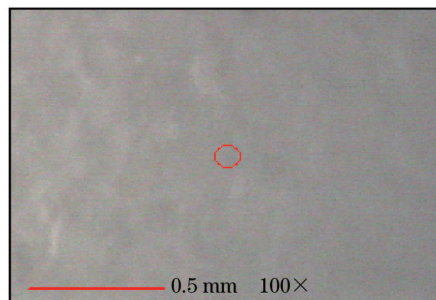


图4 镀膜层表面扫描电子显微镜(SEM)照片

Fig.4 Coating layer's scanning electron microscope (SEM) photo



层的非均匀分布,将造成膜层表面粗糙度增大,从而增大光波导的损耗。目前,由磁控溅射沟槽效应引起的薄膜沉积不均匀,对膜基结合力的影响尚不明确。据文献[9]的报道,提高溅射速率的方法有利于减小薄膜的表面粗糙度。文中板条CO<sub>2</sub>激光器电极镀膜层通过划痕测试测得膜基结合强度达30 N。

### 3.3 膜层微观结构与镀膜工艺分析

#### 3.3.1 微观结构与成分分析

图5为镀膜电极试样横断面不同放大倍数下的扫描SEM照片,膜层内成分并非均匀分布,偶有团聚包块出现。膜层与基体的界面清晰可见,由于射频板条激光器电极镀膜属于大面积(1150 mm×250 mm)大厚度(6 μm)镀膜,膜层内部的应力远非纳米级镀膜应力可比拟。因此使得膜层与基体有较好的结合力,是电极镀膜成功与否的关键之一。

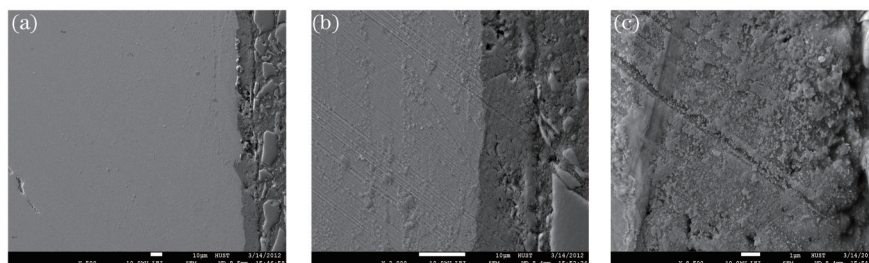


图5 镀膜层横截面不同放大倍数下的SEM照片。(a) 500×; (b) 2500×; (c) 8500×

Fig.5 Coating layer's SEM photos under different magnifications. (a) 500×; (b) 2500×; (c) 8500×

从SEM图中可以看出随着膜厚的增加,膜层内部出现包块样的结构以及一些疏松空隙。这是由于膜层沉积速率与靶材的溅射功率有着密切的关系,一般来说,膜层的沉积速率随着溅射功率密度的增大而增大,沉积速率的增大导致了所沉积的Al原子不能充分扩散,易形成包块样的结构。而且溅射功率密度只能在一定的临界值才能使镀膜开始,如果溅射功率密度小于临界值则溅射原子是无法到达基体的。对随机选定的膜层区域进行能谱分析,如图6所示,其中图(b)为图(a)标线处的能谱分析图。

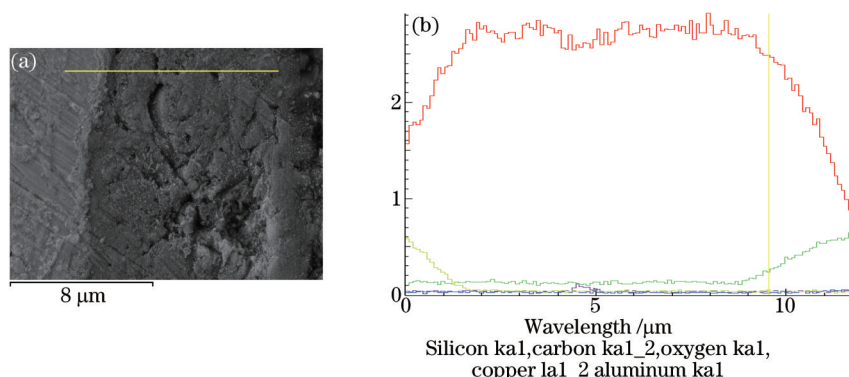


图6 膜层SEM照片和选定区域的能谱图。(a) 膜层SEM照片; (b) 选定区域的能谱图

Fig.6 SEM photo of the film and selected area energy spectrum. (a) SEM photo of the film; (b) selected area energy spectrum

如图6(b),膜层主要成分主要为Al原子、O原子,还有少量的Cu、Si、C元素。其中Si、C元素来自镀膜前铜基体清洗不彻底的残留物,Cu元素来自铜基体。膜层厚度接近表面时O元素含量才开始升高,这是来自镀完铝之后通O<sub>2</sub>发生的氧化反应生成Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜结果。

#### 3.3.2 溅射功率对镀膜层表面粗糙度影响

对于大面积(1150 mm×250 mm)镀膜,膜层内成分存在不均匀性,这是因为镀膜初始采用最大偏压有利于溅射原子迅速到达基片,并快速结晶成膜。之后又逐渐减小偏压,以便减小结晶速率控制膜层内部应力。溅射开始后,从靶材表面溅射出来的原子与Ar<sup>+</sup>相互碰撞的频率是不同的,粒子在薄膜表面的迁移速率也不同,导致溅射下来的粒子不能够均匀地扩散,因此薄膜的表面粗糙度随着溅射功率的增加而增大<sup>[8-9]</sup>。溅射原子(Al原子)与气体粒子的碰撞几率增加时,Al原子能量在碰撞过程中有所损失,原子的扩散减少,有颗粒团聚的现象。图7为不同溅射功率下膜层表面形貌SEM图片,放大倍数均为2000倍。

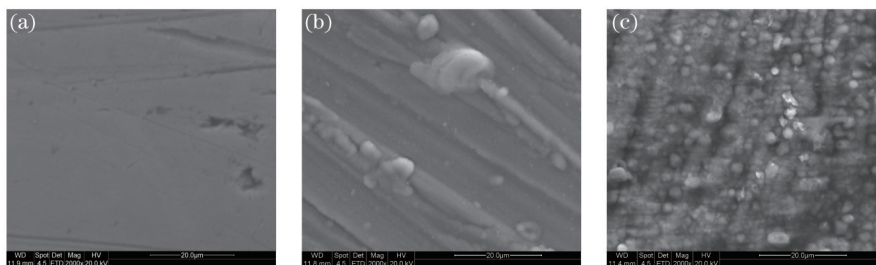


图7 不同功率下制备 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜的 SEM 图。(a) 250 W; (b) 280 W; (C) 300 W

Fig.7 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films SEM diagram under different powers. (a) 250 W; (b) 280 W; (C) 300 W

图7分别是溅射功率为250、280和300W时制备的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜SEM照片。在图7(a)中可以看到,制备的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜表面平滑、致密。随着溅射功率的增加,如图7(b)和(c)所示,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜的表面变得不再平滑。而是由大的团块颗粒出现,并且是由图(b)的少量团块到图(c)的表面布满团块。这说明当功率达到可溅射功率后,随着溅射功率的升高,溅射出来的Al原子增多。与气体原子碰撞机会增多,消耗了能量,阻碍了Al原子在基体表面的扩散,致使膜层内团块增多<sup>[10]</sup>。通过划痕实验检测可得图7中(a)、(b)、(c)试样的膜基结合强度分别为30、26和21N。

### 3.4 镀膜层光学性能分析

表1列出了几种常见材料的波导中最低模横向电场(TE<sub>01</sub>)和纵向磁场(TM<sub>01</sub>)的传输损耗系数,表中 $\gamma_{TE}$ 为横电模损耗, $\gamma_{TM}$ 为横磁模损耗。其中各种金属材料对波长10.6 $\mu\text{m}$ 的远红外波的复折射率来自文献[11-14]。放电时电极间距取为 $d=1.5\text{mm}$ ,波导内的掠入射角约为3.53mrad。

表1 材料的传输损耗系数

Table 1 Transmission loss coefficient of material

	Au	Cu	Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
Complex refractive index	7.41+53.4i	1.16+49.0i	31.2+10.4i	0.67+0.04i	2.184+2.205i
$\gamma_{TE}$	$3.03 \times 10^{-6}$	$1.68 \times 10^{-6}$	$1.28 \times 10^{-6}$	$1.74 \times 10^{-6}$	$9.0301 \times 10^{-6}$
$\gamma_{TM}$	$9.30 \times 10^{-5}$	$8.42 \times 10^{-5}$	$1.40 \times 10^{-4}$	$2.32 \times 10^{-6}$	$3.1631 \times 10^{-5}$

使用NEXUS 670型傅里叶红外光谱仪对膜层进行测试,以确定膜层表面的反射率,得到在一定波长范围内的红外反射率光谱图。由表中的数据可以看出,在10.6 $\mu\text{m}$ 波长附近,TE波和TM波在金属材料的波导内的传输损耗系数的差异较大,其中铝电极的差异在100倍左右,这表明铝对TM波存在强烈的吸收作用;而TE波和TM波在电极镀有氧化铝膜和二氧化硅膜的情况下,两者的损耗差异相对较小,但这并不影响最终激光输出的模式。但从能量损耗的角度来看,则镀氧化铝膜是波导传输的最佳选择<sup>[8]</sup>。

如图8所示为连续光谱不同入射角入射到镀膜电极试样表面所得到的反射率曲线。图中曲线为镀膜表面经打磨后的反射率。

从图8的反射率曲线可以看出,除了掠入射角在30°时未出现高反射峰外,其他入射角电极镀膜层表面对波长为10.6 $\mu\text{m}$ 波段的光线均出现高反射率峰值,最高峰值反射率达75%。这说明电极镀膜表面对CO<sub>2</sub>分子发出的光线具有高反射效果,能够满足射频板条激光器工作状态下对电极表面反射率的要求。掠入射角在30°时未出现高反射峰的原因是,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜对CO<sub>2</sub>激光实现反常色散的临界入射角为41.5°。

## 4 射频板条激光器镀膜电极放电实验

2kW射频板条的平板电极尺寸为1150mm×250mm,属于大面积平板放电,其放电均匀性与稳定性是影响射频注入功率提高的关键因素。平板波导结构CO<sub>2</sub>激光器,在合理的极间距的条件下,激光器的输出功率与放电面积成正比,与极间距成反比,在较小的极间距下(一般为几个mm),可得到较大的单位面积输出功率。矩形电极一方面可以大大缩小激光器体积、提高激光输出功率。在确定的工作气体、极板温度和气体升温情况下,为实现高功率激光器件提供了可行性。同时也作为激光器的反射腔镜,因此,平板电极能否均匀放电,是射频板条CO<sub>2</sub>激光器正常稳定工作的一个重要条件。本节针对镀有氧化铝薄膜电极的2kW射频

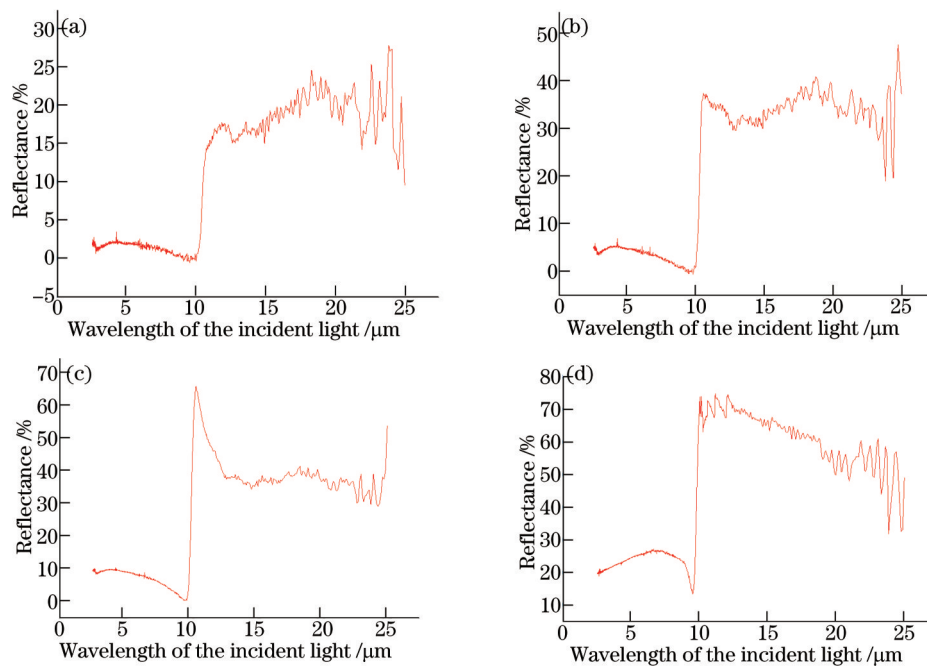


图 8 不同入射角度下膜层反射率曲线。(a) 30°; (b) 45°; (c) 60°; (d) 80°

Fig.8 Film reflectivity curves under different incidence angles. (a) 30°; (b) 45°; (c) 60°; (d) 80°

板条 CO<sub>2</sub>激光器进行了放电稳定性实验,对板条电极波导介质膜是否具提高射频板条激光器功率稳定性,做进一步分析。

实验中反应气体的气压设定为  $166 \times 10^4$  Pa,调节输出激光功率的占空比从 1%增加到 60%,拷机时间为 8 h。放电照片及占空比与激光功率的关系曲线如图 9 所示。

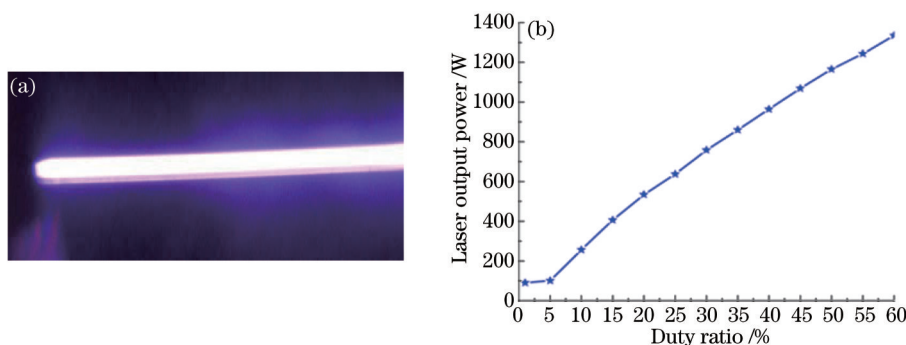


图 9 2 kW 射频板条激光器放电实验。(a) 放电照片; (b) 激光器输出功率与占空比关系曲线

Fig.9 Discharge experiment of 2kW RF slab laser. (a) Discharge photos; (b) relation curve of laser output power and duty ratio

通过 8 h 拷机实验,电极镀膜后激光器一直处于稳定的辉光放电状态如图 9(a),从图 9(b)激光器输出功率与占空比的关系曲线图中可以看到,电极镀膜后激光器输出功率在占空比为 30%时为 700 W,在占空比 60%时达到了 1300 W。这是因为激光器工作过程中铝膜被放电氧化,随着电极使用时间的增加,在电极表面生成更多的氧化铝膜。能减小波导损耗并保护板条电极,因此,激光器输出功率能得到进一步提高,输出功率也能更加稳定。

## 5 结 论

对高功率射频板条激光器电极微米级镀膜进行了研究,并对镀膜层做了微观分析,考察了镀膜层表面的平板波导特性得到如下结论:

1) 平板电极微米级镀膜实验开始时溅射功率密度大,有助于溅射原子快速结晶生长但膜内组织不均匀;随着溅射功率密度的减小,膜层内部应力减小,有助于膜层内部结合力的增强。通过划痕实验检测,镀

膜层与基体结合强度值达到 30 N;

2) 通过连续光谱在镀有  $\text{Al}_2\text{O}_3$  波导介质膜的电极小样上的反射率实验可知: 镀膜电极对波长  $10.6\ \mu\text{m}$  的远红外光谱有高于其他谱线的反射率峰值, 最高峰值达 75%; 说明射频板条  $\text{CO}_2$  激光器平板电极镀  $\text{Al}_2\text{O}_3$  波导介质膜对减少光腔内部光损耗, 防止铜电极高温溅射损坏有很好的防御功能;

3) 镀膜电极拷机实验发现, 电极镀膜后激光器输出功率在占空比为 30% 时为 700 W, 占空比 60% 时达到了 1300 W。

### 参 考 文 献

- 1 Tang Xiahui. High Power Transverse Flow  $\text{CO}_2$  Laser and Its Applications[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2008. 23-26.  
唐霞辉. 高功率横流  $\text{CO}_2$  激光器及其应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2008. 23-26.
- 2 Xu Qiyang, Wang Xinbing. Continuous-Wave High Power  $\text{CO}_2$  Lasers[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000. 147-149.  
徐启阳, 王新兵. 高功率连续  $\text{CO}_2$  激光器[M]. 北京: 国防科技出版社, 2000. 147-149.
- 3 A D Colley, H J Baker, D R Hall. Planar waveguide, 1 kW cw, carbon dioxide laser excited by a single transverse rf discharge[J]. Appl Phys Lett, 1992, 61(2): 136-138.
- 4 A I Dutov, V N Ivanova, N A Novoselov, *et al.*. Experimental and computer investigations of slab waveguide rf-excited  $\text{CO}_2$  laser[C]. SPIE, 1996, 2773: 23-30.
- 5 M A V Eijkelenborg, M P V Exter, J P Woerdman, *et al.*. Threshold characteristics and intensity fluctuations of lasers with excess quantum noise[J]. Phys Rev A, 1998, 57(1): 571-579.
- 6 Yuan Jinkun. RF Slab  $\text{CO}_2$  Laser Surface Coating of Electrode and Discharge Control Research[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013. 20-25.  
袁金坤. 射频板条  $\text{CO}_2$  激光器电极表面镀膜及放电控制的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013. 20-25.
- 7 Wang Zhou, Zhao Jianxiu, Han Jianjun, *et al.*. Study of hollow waveguide of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thin films[J]. China Science Paper Online, 2011, 1(1): 1-7.  
汪舟, 赵修建, 韩建军, 等. 空芯光波导  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的研究[J]. 中国科技论文在线, 2011, 1(1): 1-7.
- 8 Liu Hongfei, Cheng Xiaonong, Xu Guifang, *et al.*. Study on dielectric properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thin films prepared by RF magnetron sputtering[J]. Development and Application of Materials, 2011, 22(1): 5-8.  
刘红飞, 程晓农, 徐桂芳, 等. RF 磁控溅射制备  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜及其介电性能研究[J]. 材料开发与应用, 2011, 22(1): 5-8.
- 9 Xu Xiaohong, Wu Haishun, Zhang Fuqiang, *et al.*. Study on reaction sputtering deposition rate of AlN thin films[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2002, 31(3): 209-212.  
许小红, 武海顺, 张富强, 等. 反应溅射制备 AlN 薄膜中沉积速率的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2002, 31(3): 209-212.
- 10 Zuo Wenxiang, Lai Zhenquan, Liu Wenxing. Direct-current magnetism controls the sputtering to prepare the AlN thin films the structure and the surface roughness[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(1): 9-12.  
邹文祥, 赖珍荃, 刘文兴. 直流磁控溅射制备 AlN 薄膜的结构和表面粗糙度[J]. 光子学报, 2011, 40(1): 9-12.
- 11 Li Gen. Study on Characteristics of Optical Field in Off-Axis Unstable-Waveguide Hybrid Resonators[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. 90-93.  
李根. 离轴非稳-波导混合腔内光场特性研究[D]. 武汉: 华中科技学. 2012. 90-93.
- 12 M A Ordal, L L Long, R J Bell, *et al.*. Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared[J]. Appl Opt, 1983, 22(7): 1099-1120.
- 13 R L Kozodoy, J A Harrington. Solgel alumina coating for hollow waveguide delivery of  $\text{CO}_2$  laser radiation[J]. Appl Opt, 1995, 34(34): 7840-7849.
- 14 E D Palik. Handbook of Optical Constants of Solids[M]. New York: Academic Press, 1985, 733.

栏目编辑: 张浩佳