

大功率射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器唐霞辉<sup>1</sup>, 秦应雄<sup>1</sup>, 彭浩<sup>1\*</sup>, 李玉洁<sup>1</sup>, 吴洋<sup>1</sup>, 肖龙胜<sup>2</sup>, 肖瑜<sup>1</sup>, 柳娟<sup>3</sup><sup>1</sup>华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074;<sup>2</sup>湖北第二师范学院物理与机电工程学院, 湖北 武汉 430205;<sup>3</sup>厦门大学航空航天学院, 福建 厦门 361005

**摘要** 大功率射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器曾经是深熔焊接、切割的主力光源,目前主要用于超大规模集成电路晶圆退火。华中科技大学于 2007 年就开始了大功率射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器的研发,并进行大量的理论研究和产业化工作。本文介绍了射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器的国内外发展动态;重点分析了激光器的结构设计、(板条)面积放大、扩散冷却、激励电源、射频传输、阻抗匹配、射频气体放电等离子体、放电均匀性、电极热效应、非稳-波导混合腔、激光功率提取、输出光束特性、光束整形等核心技术;展望了射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器在超大规模集成电路晶圆激光退火中的重要创新应用。

**关键词** 激光器; 大功率射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器; 扩散冷却; 非稳-波导混合腔; 光束整形; 射频激励; 气体放电

**中图分类号** TN248.2

**文献标识码** A

**DOI:** 10.3788/CJL202249.1201005

## 1 引言

大功率 CO<sub>2</sub> 激光器曾经是国际上激光切割、焊接、表面处理等的主力光源,主要包括横流 CO<sub>2</sub> 激光器、轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器和射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器。其中,射频激励扩散冷却板条 CO<sub>2</sub> 激光器具有结构紧凑小巧、光束质量高的特点,曾是所有千瓦级及以上气体激光器无法媲美的,在中厚板切割和焊接领域被广泛应用,代表了 CO<sub>2</sub> 气体激光器的发展方向。随着光纤激光器的快速发展,CO<sub>2</sub> 激光金属加工市场几乎被其取代,但超大规模集成电路晶圆激光退火只能采用射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器,目前尚不能被其他激光器替代。数控激光刻型是近几年发展起来的一种新的刻型加工方法,它基于多轴联动数控机床,以激光束作为刻型加工的“刀具”,按照基于化学铣削几何图案(或数模)和工艺参数预先编制的数控加工程序,在光机电协同控制系统的控制下,用激光烧蚀的方法在保护层上刻划出几何图案,去除胶层,完成刻型加工<sup>[1]</sup>。本文主要介绍射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器的国内外发展动态、光腔结构、光束整形、射频电源、射频气体放电等主要关键技术。

2 大功率射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器的发展历史

在大功率光纤激光器出现之前,全世界 75% 左右的中厚板切割均采用高功率 CO<sub>2</sub> 激光器。10 年前,高功率射频激励扩散型冷却 CO<sub>2</sub> 激光器的生产厂家只有德国 Rofin(罗芬)一家公司,当时我国的年进口量超过了 500 台。德国 Rofin 公司于 1993 年生产出了第一台千瓦级射频激励扩散型冷却 CO<sub>2</sub> 激光器,于 1995 年将该激光器的稳定输出功率提高到了 2 kW,于 2004 年获得了 6 kW 输出。图 1 为 Rofin-DC 系列激光器。

德国 Rofin 公司可以生产 1~8 kW 的射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器,这些产品稳定性较好,光束质量因子  $K=0.95$ ,有连续和脉冲两种工作方式。表 1 为 Rofin-DC 系列激光器的主要参数。Rofin-DC 系列激光器中的离轴非稳-波导混合腔具有较高的热稳定性和较低的光学损耗,基于腔外光束整形系统能将非稳-波导混合腔输出椭圆光斑整形为圆形光斑,实现远场基模高斯分布,功率稳定度在 -2%~2% 之间。

收稿日期: 2022-01-11; 修回日期: 2022-02-22; 录用日期: 2022-04-14

通信作者: \*penghao0716@yeah.net

图 1 德国 Rofin 射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器产品Fig. 1 German Rofin radio frequency (RF) slab CO<sub>2</sub> laser products表 1 Rofin 射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器的主要参数Table 1 Main parameters of Rofin RF slab CO<sub>2</sub> laser

Slab	Power / kW	Radio frequency power / kW	Radio frequency tube	Laser head air pressure / hPa	Total output power after filter / W	Beam size / mm	Total output photoelectric efficiency / %	Beam quality (K)
DC025	45	24	CTK 15-2	200	3000	22	11.0	0.94
DC030n	45	27	CTK 15-2	>200	3300	22	11.0	>0.9
DC035	45	29	CTK 15-2	190	4000	22	11	0.93
DC045n	85	37	CTK 25-4	≥200	4800	22	11.0	>0.9
DC045	85	37	CTK 25-4	200	4800	22	10.1	0.94
DC050n	85	42	CTK 25-4	>200	5300	22	10.1	>0.9
DC050	85	42	CTK 25-4	200	5230	22	9.1	>0.9
DC060	85	51	CTK 25-4	200	6500	24	8.2	0.9
DC080	140	65	CTK 35-2	200	8400	27	9.0	0.9

在国内,北京理工大学的辛建国教授最早开展了射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器的研究。湖北省是全国唯一同时拥有横流、轴快流、射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器生产技术的省份。2007 年,华中科技大学激光加工国家工程研究中心对射频板条激光器的各个单元技术进行了深入研究,2011 年实现了 2 kW 输出,2021 年实现 3.5 kW 输出。同时,该单位取得了如下科研成果:深入研究了大面积射频板条电极技术,实现了超过 30 kW 射频注入功率的大面积均匀稳定放电;提出了一种高精度计算远距离传输角谱的方法,建立了大菲涅耳谐振腔计算模型;设计了高功率高光束质量激光谐振腔、非稳-波导混合腔和外光路整形系统,获得了近似基模的激光输出<sup>[2-3]</sup>。

### 3 大功率射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器整体技术

射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器具有以下特点:在两个放电上极板和两个接地下极板中输入射频功率信号,形成了两个板条状增益区间,在保持放电极板长度的同时实现了激光增益区有效长度的成倍增加;通过光学谐振腔实现增益的有效提取;采用非稳-波导

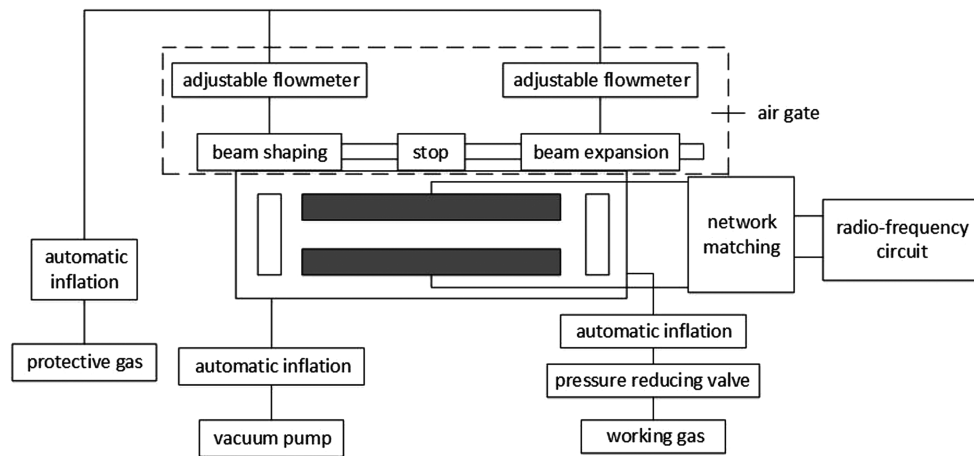
混合谐振腔,非稳腔最佳能量耦合输出为 15%。接下来主要介绍射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器的主要结构及核心技术。

#### 3.1 射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器的结构组成

大功率射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器主要由真空箱体及水气系统、平板电极、非稳-波导混合腔、光束整形系统、射频电源、匹配网络、集成控制系统等组成,组成框图如图 2 所示。射频电源由电子管振荡放大电路及其外围 11 kV 高压屏极供电、栅极驱动、灯丝供电、阻抗匹配网络组成;谐振腔采用非稳-波导混合腔,内表面镀膜的板条电极作为光学波导;外光路整形系统由球面镜、平面转折镜、柱面镜和空间滤波器等组成;冷却系统通过板条内部的特殊流道进行热交换,以保证激光功率及模式稳定性;脉宽调制器(PWM)调节激光器的输出功率及脉冲波形<sup>[2,4]</sup>。

#### 3.2 射频板条电极结构

射频板条电极内部采用高效热交换水冷流道,分段板条便于放电馈入,但需要解决大面积射频板条电极加工工艺、表面镀膜等关键技术。激光器真空箱体内安装有放电极板、底板、固定滑板、匹配电感和水冷通道。超过 30 kW 射频电源注入大面积

图 2 射频板条 CO<sub>2</sub> 气体激光器组成框图Fig. 2 Schematic of RF slab CO<sub>2</sub> gas laser

电极,必须确保均匀稳定放电。因为放电电极面积大,放电间距小,因此电极形变会严重影响放电功率注入和激光功率提取。激光器工作时,气体热量通过扩散传给电极,再由极板内循环冷却水带走。2.5 kW 激光器电极的长、宽、高分别约为 1000、200、40 mm。在上极板长度方向外侧的两端插装匹配电感,目的是实现阻抗匹配,保证放电均匀稳定。

### 3.3 非稳波导-混合腔及外光路整形

射频板条激光器的增益区为条状,传统的球面镜谐振腔无法提取出足够的功率,也无法获得高光束质量激光输出。射频板条激光器采用的是负支非稳-波导混合腔<sup>[5-6]</sup>(根据激光谐振腔原理,非稳腔适合于高功率、大增益、大菲涅耳数与大模体积激光器)。横向大尺寸增益区采用的是非对称非稳腔设计,可在侧边获得接近衍射极限的准直激光输出;在两极板间的高度方向上,窄间隙形成波导腔,实现腔内增益介质体积与波导腔最低阶模的良好匹配,从而获得高效率、高光束质量的激光振荡。

采用非稳-波导混合腔后,原始输出光束近场为长条形分布的像散光束,初始光束非稳方向上的光束宽度大于波导方向上的光束宽度,非稳方向上的发散角远小于波导方向上的发散角,而且非稳方向上的光强分布带有大量高阶振荡,必须进行光束整形。整形系统的基本原理<sup>[5-6]</sup>为:光腔侧边的输出光束经 90°转折后透过箱体壁上的金刚石窗口,再转折射到一个球面尾镜上进行第一次发散角压缩;经球面尾镜再次压缩后,光束穿过一个空间滤波器,然后由柱面镜进行第二次压缩;最后由一片球面镜反射输出,获得近似基模光束。

### 3.4 高功率射频电源及射频放电

激光器工作时,必须合理选择工作气体的成分、

比例和气压,并保证足够的激励能量,射频电源输出功率在 30 kW 以上,射频放电频率为 81.36 MHz。射频电源采用电子管自激式、电容三点式振荡回路。匹配网络决定着射频能量的有效传输,为了将射频功率有效馈入工作气体,需设计合理匹配的阻抗电路,使放电气体负载与传输线的阻抗匹配,避免射频波反射。

射频板条放电的必要条件为:合理设计电极结构和冷却结构,沿电极方向的放电电压均匀分布<sup>[7]</sup>。随着放电电极面积增加,沿极板分布的电压的不均匀性逐渐明显,并对放电均匀性带来严重影响。解决这种电压分布不均匀的方法主要有多点馈入法、并联谐振分布电感法和终端并联电抗元件法。

## 4 射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器的扩散冷却技术

射频激励板条 CO<sub>2</sub> 激光器由于采取大面积均匀放电,极间距小,气体热量可快速扩散到大面积电极上。扩散冷却是将气体热量直接传递给极板或管壁,再由极板或管壁传递给冷却液,冷却液带走多余热量,不需要风机。射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器均采用扩散冷却方式。

### 4.1 射频板条电极扩散冷却机理

气体激光器中的高温放电气体通过对流形式将热量传递到电极表面,电极通过热传导方式将热量传递到电极水道表面,再通过水道中的循环流动冷却水与极板间的热传导和对流将热量带走。扩散冷却热传导过程包括工作气体和金属电极的传热以及冷却液的对流传热,如图 3 所示。其中, $T_w$  为冷却水温度, $T_1$  为电极板与气体接触面温度, $T_2$  为电极



板与冷却水接触面温度,  $T_g$  为放电区气体温度, 极板厚度为  $\Delta d$ 。

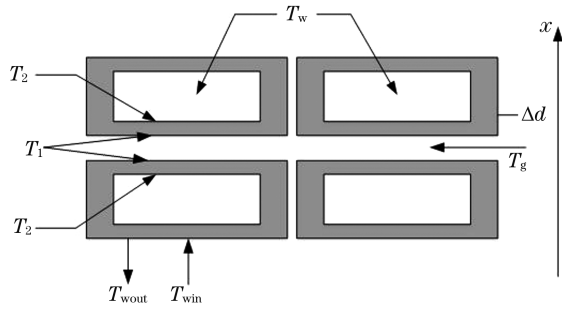


图 3 放电电极温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of discharge electrode

放电区气体温度分布可近似为一个含内热源的一维稳态传热问题, 联合热传导方程和边界条件, 可解得电极板内气体温度场分布为

$$T_g(x) = \left( -\frac{Bx^2}{2} + \frac{Bdx}{2} + T_1^{\alpha+1} \right)^{\frac{1}{\alpha+1}}, \quad (1)$$

其中,

$$B = \frac{\omega_{in}(1-\eta)(\alpha+1)T_1^\alpha}{k_1}, \quad (2)$$

式中:  $d$  为极板的极间距;  $\alpha$  为约等于 0.7;  $\eta$  为激光器的光电转换效率;  $k_1$  为气体的热导率;  $\omega_{in}$  为注入功率密度。气体温升为

$$\Delta T_g = \left[ T_1^{\alpha+1} + \frac{Bd^2}{8} \right]^{\frac{1}{\alpha+1}} - T_1. \quad (3)$$

#### 4.2 射频板条电极结构参数计算

在高功率板条 CO<sub>2</sub> 激光器中, 平板电极同时也作为激光器的波导电极。平板电极冷却不充分或不均匀都会导致电极表面出现热变形, 进而改变光束波导, 这间接等效于改变反射镜的曲率半径, 从而大大降低激光光束的质量。过高的电极温度会对激光的光电转换效率和输出功率产生不利影响。激光器中的热问题一直是制约激光器朝高功率、高光束质量与高稳定性方向发展的重要因素。

##### 4.2.1 极板电极面积

$$\text{面积放大定理为 } P_0 = \xi_y P_L \left( \frac{W}{d} \right) L = \xi_y P_L \left( \frac{A}{d} \right),$$

其中  $\xi_y$  为常数(一般在 0.4~0.7 之间取值),  $P_L$  为传统扩散冷却方波导 CO<sub>2</sub> 激光器单位长度上的输出功率,  $W$  为金属板宽,  $L$  为金属板长。由这一定理可知, 从放电体积中提取的总功率  $P_0$  与放电面积  $A$  成正比关系。为了获得较大的输出功率, 必须增大板条面积。

由输出功率与输入功率的关系可知

$$P_{in} = \omega_{in} \times A \times d = \omega_{in} \times V, \quad (4)$$

$$P_o = P_{in} \times \eta = \eta \times \omega_{in} \times V, \quad (5)$$

式中:  $A$  为极板放电面积;  $d$  为放电极间距;  $V$  为放电空间体积;  $\omega_{in}$  为注入功率密度;  $\eta$  为激光器的光电转换效率。若  $\omega_{in}$  取值为 50 W/cm<sup>3</sup>,  $\eta$  为 10%, 则在确定激光输出功率后, 可得到放电空间体积, 从而, 在选定了放电极间距后, 可得到极板放电面积<sup>[8]</sup>。当极间距取 2 mm 时, 若激光输出功率为 1 kW, 则计算可得极板放电体积为 200 cm<sup>3</sup>, 极板放电面积约为 1000 cm<sup>2</sup>; 若激光输出功率为 2.5 kW, 则可得极板放电体积为 500 cm<sup>3</sup>, 放电面积约为 2500 cm<sup>2</sup>。

##### 4.2.2 电极长宽的确定

射频电磁波在电极之间形成驻波电压分布, 为获得均匀的射频放电, 要求电极不得过长, 同时需要满足一定的纵向匹配。而且, 较长的极板也难以加工, 且易于变形, 无法保证较高的加工精度, 一般极板的长度要求小于 1 m。板条实物图如图 4 所示。由耦合损耗理论可知<sup>[9]</sup>, 当菲涅耳系数  $N_F = d^2/(\lambda z) \gg 1$  时 ( $z$  为波导端口与反射镜之间的距离, 其大小与谐振腔曲率半径有关;  $\lambda$  为波长), 耦合系数可以表示为

$$C_{pq} = |x_{pq}|^2 \approx 1 - p^2/(6N_F^{3/2}) - q^2/(6r_m^3 N_F^{3/2}), \quad (6)$$

式中:  $r_m$  为纵横比,  $r_m = b/d$ , 其中  $b$  为波导宽度;  $p, q$  分别为波导窄方向和波导宽度方向的模数。耦合系数  $C_{pq}$  随着  $r_m, N_F$  的增大而增大, 并逐渐达到一渐近值。而  $r_m$  增大, 则意味着在确定的极间距下, 波导宽度增大, 从而导致光束输出口径增大, 激光谐振腔直径增大, 其结果是激光器输出光束趋向于多模, 光束质量变差。因此, 纵横比  $r_m$  的增大是有限的, 即极板宽度的增大是有限的。



图 4 板条实际结构图

Fig. 4 Actual structure drawing of lath

##### 4.2.3 电极冷却流道设计

研究表明, 当冷却液流量增加至一定值时, 增益



介质的最高温度不再明显下降,此时,微通道冷却结构的内部流动阻力不会对冷却系统的运行造成明显影响,但冷却结构的进出口位置及水冷方向会对增益介质内部的热分布产生较大影响<sup>[10]</sup>。

射频板条电极的三通道并联蛇形冷却水道使电极在工作过程中的整体温度较低,温度分布较为

均匀,激光输出功率稳定,满足电极散热要求。图 5 为三通并联类蛇形流道结构示意图,冷却水水道几乎覆盖了整个电极。平板电极的最大温差约为 8 °C,满足散热要求,如图 6 所示。高功率板条 CO<sub>2</sub> 激光器电极冷却水道设计成三通道并联蛇形结构,具有散热效率高、散热均匀的特点<sup>[11-12]</sup>。

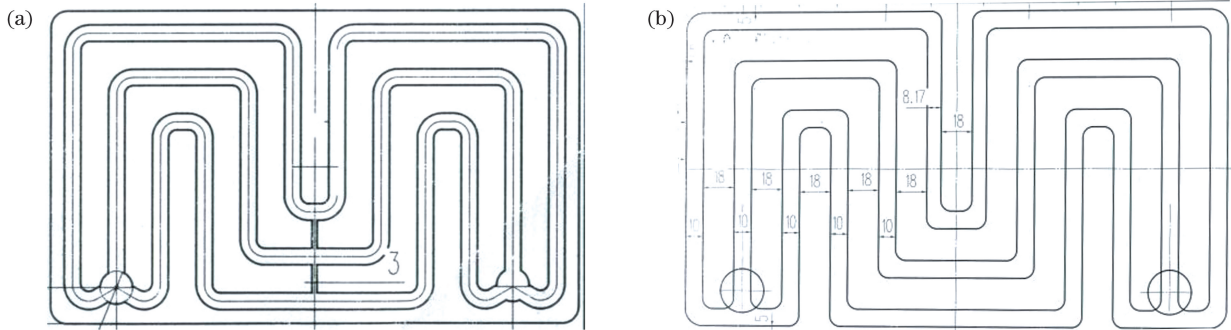


图 5 三通道并联类蛇形流道结构示意图及其加工图样。(a)结构示意图;(b)加工图样

Fig. 5 Schematic of three-channel parallel serpentine-like runner structure and its machining pattern. (a) Structural diagram; (b) machining pattern

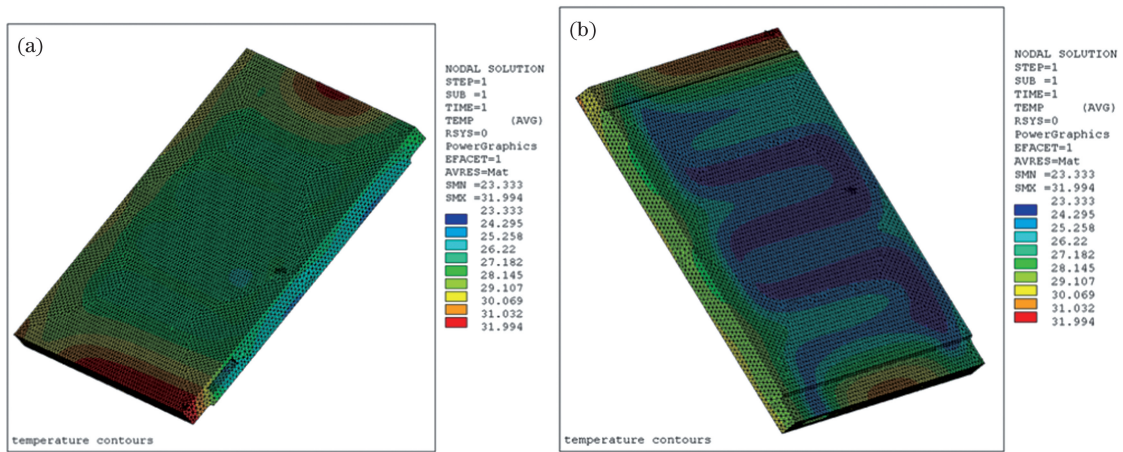


图 6 温度场分布图。(a)正面轴侧温度场分布图;(b)反面轴侧温度场分布图

Fig. 6 Temperature field distribution maps. (a) Temperature field distribution diagram of front shaft side; (b) temperature field distribution diagram of opposite shaft side

## 5 射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器的光学谐振腔

平行平面结构谐振腔虽然具有较高的功率提取能力,但激光输出模式较差。与稳腔相比,非稳腔具有以下特点:1)大且可控的模体积。通过选择合适的反射镜尺寸,总能使模式充满整个激光工作物质,获得最大的模体积。2)衍射耦合输出容易控制。非稳腔具有很高的鉴模能力,低次模和高阶模之间的损耗差别很大,所以容易获得接近衍射极限的单一模式,光束质量较好。

### 5.1 负支离轴非稳-波导混合腔结构参数设计

射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器采用非稳-波导混合腔结

构,其中:一个方向为波导腔方向,光束在该方向呈类高斯基模光束分布,没有旁瓣,在后续光束整形过程中,空间滤波器狭缝对波导方向的光束无滤波作用,光束全部通过空间滤波器;另一个方向为负支离轴非稳腔方向,该方向对后续整形的影响最大。如图 7 所示,非稳-波导混合腔由输出镜 M1、反射镜 M2 以及放电平板波导构成。平板电极的几何尺寸为  $l \times w = 480 \text{ mm} \times 52 \text{ mm}$ ,平板电极间距  $d = 2 \text{ mm}$ ,平板与两反射镜 M1、M2 之间的距离分别为  $l_1$ 、 $l_2$ ,输出镜 M1 的曲率半径为  $R_1$ ,反射镜 M2 的曲率半径为  $R_2$ ,腔长  $L = l + l_1 + l_2$ 。M1 与 M2 在  $x$  方向上构成一维负支离轴共焦非稳腔,在  $y$  方向构成一

维波导腔, 激光束从反射镜 M1 侧边边缘输出。

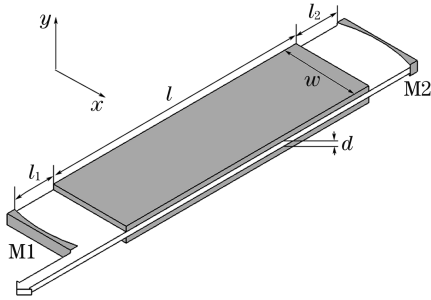


图 7 非稳-波导混合腔结构图

Fig. 7 Structural diagram of waveguide unstable mixing cavity

负支离轴共焦非稳腔一方面利用其自身能够有效抑制高阶模的能力, 在大尺寸增益介质  $x$  方向上获得了接近衍射极限的光束输出, 另一方面利用小尺寸范围内的增益体积与波导腔的最低阶模体积的良好匹配, 在小尺寸  $y$  方向上实现了高效、高光束质量的激光振荡。

一维负支离轴共焦非稳腔示意图如图 8 所示。由图中的几何关系可得

$$\frac{a}{b} = \frac{R_1}{R_2}, \frac{c}{b} = \frac{R_2}{R_1}, R_1 + R_2 = 2L, b + c = w. \quad (7)$$

非稳腔模式结构及本征值由非稳腔放大率  $M = \frac{R_2}{R_1}$  和等价菲涅耳数  $N_{eq} = \frac{1+M}{2} \times \frac{a^2}{\lambda L}$  决定。当  $M, L, N_{eq}$  已知时, 可以计算出负支离轴共焦非稳腔的几何结构参数。为方便表述, 将腔几何参数用  $M, L, w$  表示为

$$R_1 = \frac{2L}{M+1}, R_2 = \frac{M}{M+1} \times 2L, \quad (8)$$

$$a = \frac{w}{M(M+1)}, b = \frac{w}{M+1}, c = \frac{M \times w}{M+1}. \quad (9)$$

根据后面的计算, 取  $l_1 = 10 \text{ mm}, l_2 = 10 \text{ mm}$ ,

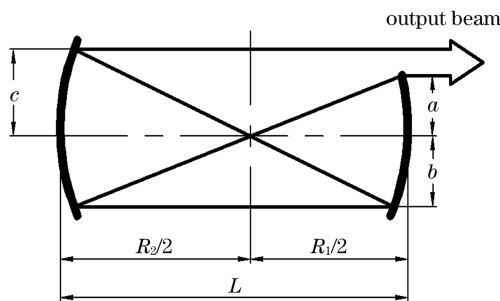


图 8 一维负支离轴共焦非稳腔示意图

Fig. 8 Schematic of one-dimensional negative branch axis confocal unstable resonator

因此  $L = 480 \text{ mm} + l_1 + l_2 = 500 \text{ mm}$ 。当  $M = 1.1$  时,  $R_1 = 476 \text{ mm}, R_2 = 524 \text{ mm}, a = 22.50 \text{ mm}, b = 24.76 \text{ mm}, c = 27.24 \text{ mm}$ 。

负支共焦非稳腔具有独特的优点: 由于共焦面在腔内, 光束在腔内来回振荡一次, 负支共焦腔的模场就发生两次变化, 因此只需要在共焦面上或远场对光束的高频分量进行滤波就能保证光束质量; 负支非稳腔具有很强的鉴模能力, 总是工作在单模状态 (这是因为其基模本征值比高阶模大两个量级, 这种特性是孔径与反射镜 M1 联合作用的结果); 稳态的建立速度很快, 如果几何放大率  $|M| > 1$ , 对于小孔来说, 放大后的光束仅渡越几次就可以认为是平面波。

### 5.2 非稳-波导混合腔光场分布

非稳-波导混合腔在非稳与波导两个方向上的二维结构存在差异, 因此, 一般采用分离变量法求解混合谐振腔的光场分布。混合腔在电极放电高度方向上构成一维波导腔; 电极水平方向为非稳方向, 采用一维共焦非稳腔分析。设腔内的光场分布为  $E(x, y)$ , 在直角坐标系下对  $E(x, y)$  分离变量, 即

$$E(x, y) = u(x)v(y), \quad (10)$$

式中:  $u(x)$  是在非稳方向上的光场分布函数;  $v(y)$  是在波导方向上的光场分布函数。低阶模在波导方向传输, 波导口的衍射损耗、远场发散角与电极间距  $d$  的取值密切相关。

#### 5.2.1 光场在垂直平板波导方向 ( $y$ 方向) 上的分布特性

光场在  $y$  方向上的分布特性直接由电极的几何结构决定, 如图 9 所示<sup>[13]</sup>。在波导平板电极结构中, 球面 (柱面) 腔镜 M1 和 M2 在  $y$  方向上的曲率半径分别为  $R_1$  和  $R_2$  ( $+\infty$  和  $+\infty$ )。考虑到腔镜的曲率半径远远大于  $l_1$  和  $l_2$ , 可将不同  $x$  坐标腔镜到波导口的距离都视为  $l_1$  (或  $l_2$ )。光场在谐振腔内的往返过程为: 由全反镜 M2 反射入射到波导口, 在介质波导内传输后由另一波导口耦合输出, 然后入

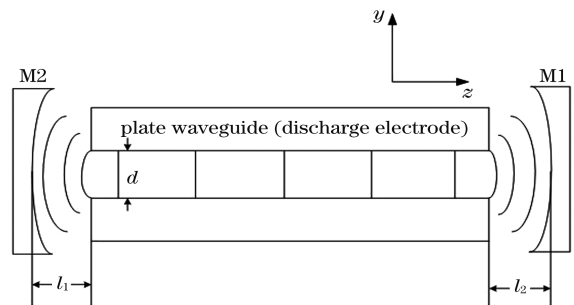


图 9 板条电极波导方向光场示意图

Fig. 9 Schematic of light field in slab waveguide direction

射到输出镜 M1 表面,再由 M1 表面反射传输回到波导口,在介质波导内传输,最后由波导口传输到全反射镜 M2 表面。光场的传输模式分为反射镜与板条波导之间的自由空间传输以及电极间波导的本征

模式传输。

在一维平板波导腔分析方面,文献[14]分析了矩形波导 CO<sub>2</sub> 激光器,其腔内只存在 EH<sub>mn</sub> 混合模,其光场分布表达式是

$$A_{mn}(x, y) = \begin{cases} A_0 \sin\left(\frac{m\pi x}{a_1}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b_1}\right) \exp[j(\gamma_{nm}z - \omega t)] , m \text{ and } n \text{ are even number} \\ A_0 \cos\left(\frac{m\pi x}{a_1}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b_1}\right) \exp[j(\gamma_{nm}z - \omega t)] , m \text{ and } n \text{ are odd number} \end{cases} \quad (11)$$

其中,

$$\gamma_{nm} = \beta_{nm} + i\alpha_{nm} \quad (12)$$

式中: $a_1, b_1$  分别为  $x$  和  $y$  方向上的波导宽度; $\gamma_{nm}$  为矩形波导的传播常数。传播常数中的  $\alpha_{nm}$  反映了一个衰减过程, $\beta_{nm}$  则表示的是光波传播中的相位移动。对于电场沿  $x$  和  $y$  方向振动的 EH<sub>mn</sub> 模, $\alpha_{nm}$  的表达式分别为

$$\alpha_{nm}^x = \frac{m^2}{16} \cdot \frac{\lambda_0^2}{a_1^3} \operatorname{Re}\left(\frac{\eta_r^2}{\sqrt{\eta_r^2 - 1}}\right) + \frac{n^2}{16} \cdot \frac{\lambda_0^2}{b_1^3} \operatorname{Re}\left(\frac{1}{\sqrt{\eta_r^2 - 1}}\right) \quad (13)$$

$$\alpha_{nm}^y = \frac{m^2}{16} \cdot \frac{\lambda_0^2}{a_1^3} \operatorname{Re}\left(\frac{1}{\sqrt{\eta_r^2 - 1}}\right) + \frac{n^2}{16} \cdot \frac{\lambda_0^2}{b_1^3} \operatorname{Re}\left(\frac{\eta_r^2}{\sqrt{\eta_r^2 - 1}}\right) \quad (14)$$

式中: $\lambda_0$  为波长; $\eta_r$  为波导壁介质的相对折射率, $\eta_r = \sqrt{\epsilon/\epsilon_0}$ ,其中  $\epsilon$  和  $\epsilon_0$  分别表示介质和真空中的介电常数。一维平板波导可以看作是这种矩形波导在一个方向上的尺寸趋于无穷大时的简化情形,在非稳-波导混合腔中,即  $a_1 \rightarrow \infty$ ,这样式(13)与式(14)中的第一项均为 0。因此, $\alpha_{nm}^y$  将远大于  $\alpha_{nm}^x$ ,即沿  $y$  方向振动的电场分量具有较大的损耗。这表明平板波导有着很强的偏振选择特性,输出光束接近于线偏振光,偏振方向平行于电极平面。

增加损耗可以抑制高阶波导模的振荡,这主要是因为波导损耗和耦合损耗。波导损耗取决于平面波导的光学性能以及波导材料和表面加工质量。对于铝电极,当波导间距为 1.5 mm 时,得到的波导损耗小于 0.12%,此时 1、2、3 阶模均可振荡。

### 5.2.2 板条 $x-z$ 方向非稳腔的光场分布

在离轴非稳-波导混合腔中,光场的轴向分布特性主要由腔镜 M1、M2 的横向尺寸和曲率半径决定。由 M1、M2 构成的一维离轴共焦非稳腔结构如图 10 所示<sup>[15-18]</sup>。

开式共焦非稳腔的轴向距离往往远大于其横向

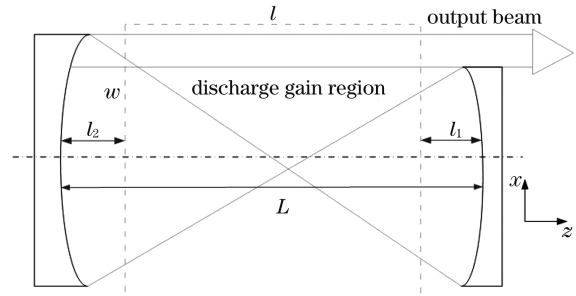


图 10 负支离轴共焦非稳腔内光束示意图  
Fig. 10 Schematic of negative axis confocal unstable intracavity beam

尺寸,由于输出镜 M1 侧边和直边的衍射作用,腔内光场标量模式特性要比稳定腔中的更复杂。但几何均匀球面波可以很好地近似腔内最低阶损耗模,腔内任意位置的模式可以看作是沿  $z$  轴正向传播的均匀平面波(波源在无穷远处)和沿  $z$  轴负向传播的球面波的叠加,球面波波源坐标为  $(0, 0, -R_1/2)$  ( $z$  轴原点设为 M1 与光轴的交点)<sup>[19]</sup>。

用 ABCD 矩阵描述腔内光线的往返几何传输,用参数  $m$  表示 ABCD 矩阵迹的 1/2,即  $m = (A + D)/2$ ,则当  $|m| > 1$  时,该激光谐振腔为几何非稳腔。

对于非稳腔,光场模式的菲涅耳-基尔霍夫衍射积分公式为

$$\bar{u}_2(x_2) = \sqrt{\frac{j}{B\lambda_0}} \int_{-a}^a \bar{\rho}(x_0) \bar{u}_0(x_0) \cdot \exp\left[-j \frac{\pi}{B\lambda_0} (Ax_0^2 - 2x_2x_0 + Dx_2^2)\right] dx_0 \quad (15)$$

式中: $\bar{u}_0(x_0)$  和  $\bar{u}_2(x_2)$  分别代表初始面和衍射面的光场; $\bar{\rho}(x_0)$  为传递函数; $\lambda_0$  为波长。文献[20]计算了放大率  $M=1.25$  和  $M=1.14$  的两个非稳腔的光场模式,计算结果与实验测量的光斑较为一致。图 11(a)、(b)分别为  $M=1.25$  的非稳腔光场模式的计算结果与实验结果,图 11(c)、(d)分别为  $M=1.14$  的非稳腔光场模式的计算结果与实验结果。可以看出,由于硬边衍射效应的存在,非稳腔内本征



模的光强呈锯齿状分布。腔的非涅耳数越大,这一特征就越显著。尽管共焦非稳腔基本以等相位面输出,但不同的几何结构设计会导致不同的“锯齿”分

布形状,因此输出口处的强度分布会有较大差异,如图 11(b)、(d)中输出口处的光强分布分别为 3 个峰值和 1 个峰值。

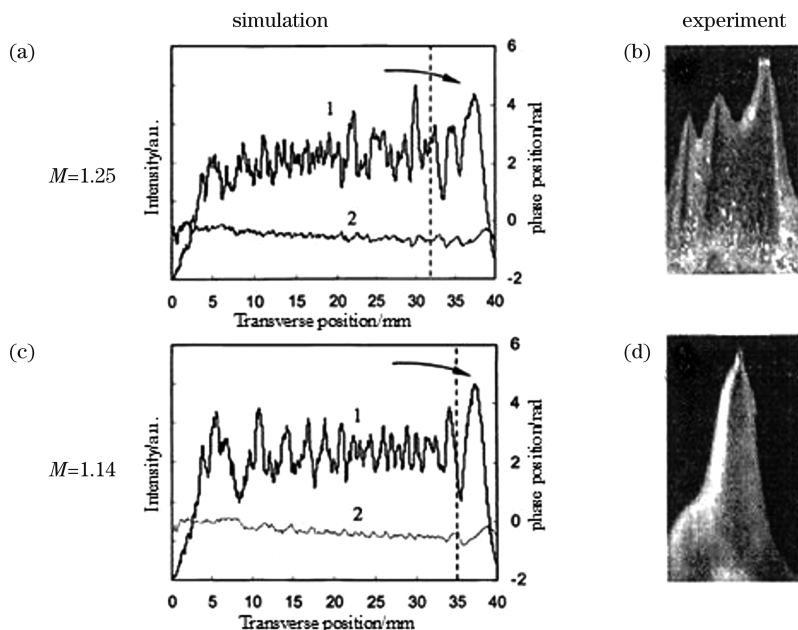


图 11 两个非稳腔光场模式的数值模拟结果与实验结果对照<sup>[20]</sup>

Fig. 11 Comparison between numerical simulation and experimental results of two unstable cavity light field modes<sup>[20]</sup>

## 6 射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器光束整形

### 6.1 整形结构的基本组成

输出光路的光束整形系统是射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器重要的子系统。在图 12 中,1 为板条电极,2 为腔镜,3 为传输光束,4 为平面反射镜,5 为球面镜,6 为光束滤波器,7 为凸柱面镜,8 为球面准直镜。整形系统的光束传输过程为:谐振腔输出光束经过平面反射镜 4 到达球面镜 5,波导方向的光束被会聚准直,输出的非稳方向光束经过滤波器 6 滤除旁瓣,再经过柱面镜 7 对波导方向的光束进行扩束,目的是与非稳方向光束的大小匹配,最后准直镜 8 对非稳方向和波导方向光束的发散角同时进行压缩。光束整形的核心是获得各方向发散角均匀的光束。需要选用一个参数合适的柱面镜,因为柱面镜只会减小经过球面镜之后的光束在非稳方向上的发散角,使其与波导方向的发散角相等,然后光束再经过一个球面镜聚焦即可得到能量分布呈高斯型的圆形光斑。然而,这样的方案不能滤除非稳方向光束在远场的二次旁瓣。为达到滤除旁瓣的目的,在光束经过整形系统凸柱面镜 7 之前,需要在非稳方向聚焦得到非稳方向光束的远场分布,然后再通过空间滤波器滤除光束在非稳方向的旁瓣。

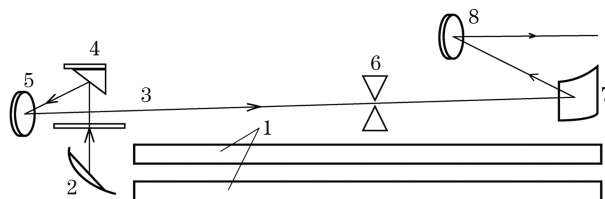


图 12 外光路整形原理图

Fig. 12 Schematic of external light path shaping

初始光束在非稳方向上的发散角非常小,要实现聚焦,应选择凸透镜或者凹面反射镜。根据激光器光路安装的实际空间约束,本课题组决定选择凹面反射镜。波导方向光束的束腰较小,但发散角很大,该光束由金刚石隔离窗口输出,经过凹面反射镜会聚后,其在焦线前变成类准直光束。在整个光束传输过程中,保持光束的光束参量乘积不变。根据凹面反射镜的半径可以准确计算出光束会聚焦线的位置。在焦线位置处放置空间滤波器,空间滤波器由两片金属反射镜组成,滤波器的狭缝宽度由两金属反射镜的间距决定。为满足不同的滤波需要,两金属反射镜的间距可进行手动调节。反射镜与光束入射方向成一定角度。空间滤波器的调节过程是寻找光束主瓣的过程,保证光束主瓣正好通过空间滤波器的狭缝,主瓣两侧的旁瓣则入射到狭缝两侧的反射镜上,然后反射到整形系统管壁损耗掉。

光束经过空间滤波器后,在非稳方向上只保留一个主瓣,而在波导方向上为类高斯基模光束分布,没有旁瓣。空间滤波器狭缝对波导方向的光束无滤波作用,光束全部通过空间滤波器。经过空间滤波器后,光束在非稳方向上的发散角较大,在波导方向上的发散角较小。为了得到各方向发散角均匀的正方形光束,需要在合适的位置处对光束的非稳方向进行准直,使非稳方向上的发散角与波导方向上的发散角近似相等。根据此分析,本课题组最终选择了凹柱面反射镜。柱面镜圆柱体的轴线平行于波导方向,该柱面镜可实现非稳方向光束的准直,对波导方向的光束基本不起作用。经柱面镜整形后,可以得到各方向均匀发散的正方形光束。

### 6.2 柱面镜整形之后光束的变化

图 13 所示为整形光束在柱面镜 M2 之后非稳方向与波导方向上的光束半径变化图,其中虚线表示非稳方向光束,实线表示波导方向光束。以柱面镜所在位置为起点,光束传输了 50 mm 的距离。可以看到,经过柱面镜变换后,整形光束在两个方向上的束宽近似相等,两者差值不超过 1 mm。同时还可以看到,在 500 mm 的光束传输距离内,两个方向上的发散角近似相等,两条光束的半径变化曲线近似为平行线。

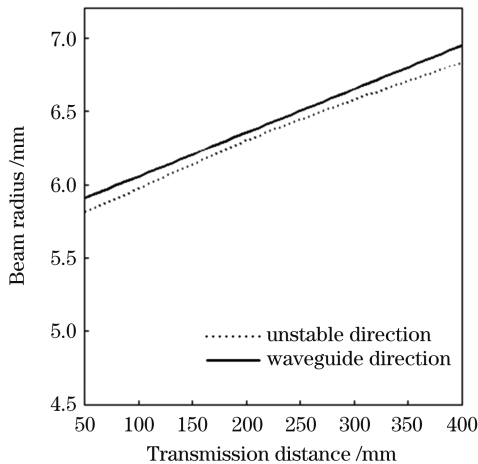


图 13 输出光束在柱面镜 M2 后两个方向上的光束变化规律

Fig. 13 Change rule of output beam in two directions behind the cylindrical mirror M2

图 14 是输出光束经过空间滤波器消除旁瓣后到达球面镜 8 处的光强分布图,其中图 14(a)是整形光束在非稳方向上的光强分布,图 14(b)是整形光束在波导方向上的光强分布,图 14(c)是整形光束光强分布的俯视图,图 14(d)是球面镜前光强分布的实验结果。

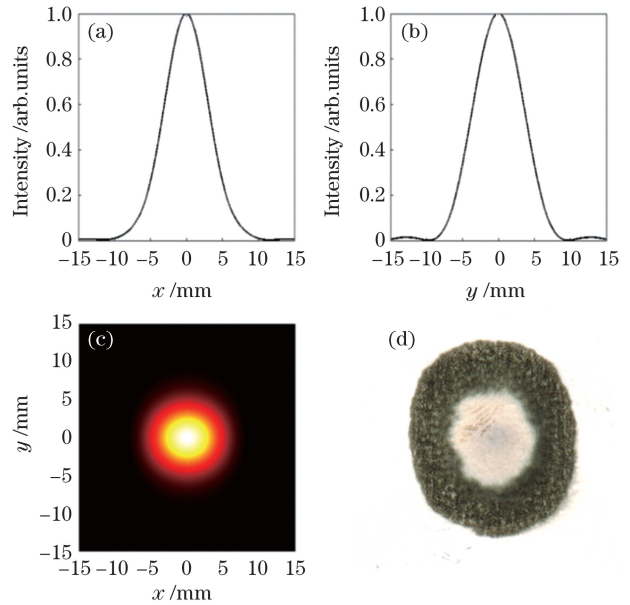


图 14 整形光束在球面镜 8 前的光强分布理论模拟图和实验结果。(a)非稳方向上的光强分布;(b)波导方向上的光强分布;(c)光强分布俯视图;(d)实验结果

Fig. 14 Theoretical simulation diagrams and experimental diagram of intensity distribution of shaped beam in front of spherical mirror 8. (a) Light intensity distribution in unstable direction; (b) light intensity distribution in waveguide direction; (c) top view of light intensity distribution; (d) experimental results

整形光束经过柱面镜后变成了如图 13~14 所示的两个方向上束宽和发散角近似相等的类高斯基模分布输出光束。但如图 13 所示,整形光束的发散角比较大,光束在传输过程中的束宽变化比较明显,随着传输距离(柱面镜 M2 之后)由 50 mm 增大到 500 mm,光束半径由 5.7 mm 左右增加到 7 mm 左右,且随着传输距离增加,光束半径将持续增加。图 15 描述了整形光束经过柱面镜 M2 后传输 200, 400, 800, 1500 mm 时的光强分布。此时,将  $z = 0$  参考平面设定在柱面镜 M2 处,可以看到,随着传输距离增加,光斑形状没有发生改变,均为近似圆形光斑。但光斑尺寸发生了明显变化。这也与图 13 描述的整形光束在柱面镜 M2 后光束半径变化的规律相符。要想得到的整形光束是束宽在两个方向上近似相等,且传输一定距离后光束半径没有明显变化的输出光束,还需要用球面镜 8 对激光光束再次进行准直。

### 6.3 整形光路影响因素分析

图 16 描述了整形光束经过球面镜 8 后在非稳方向和波导方向上的光束半径的变化规律,其中,虚

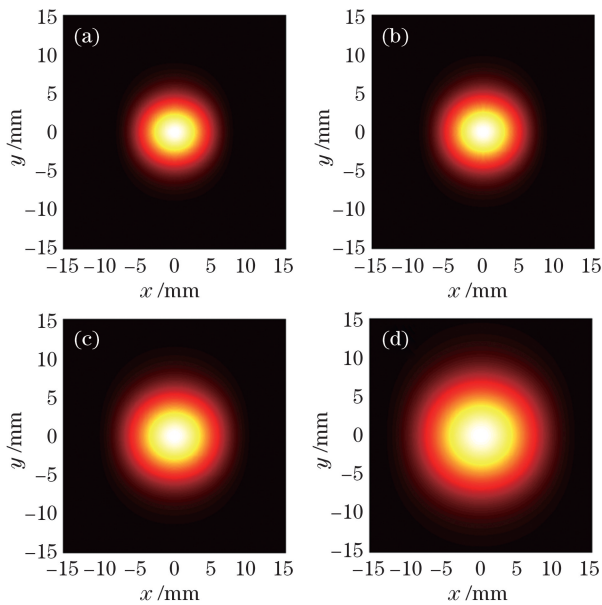


图 15 整形光束经柱面镜 M2 后传输至不同距离处的光强分布。(a) $z=200$  mm;(b) $z=400$  mm;(c) $z=800$  mm;(d) $z=1500$  mm

Fig. 15 Light intensity distributions of shaped beam transmitted to different distances after passing through cylindrical lens M2. (a)  $z=200$  mm; (b)  $z=400$  mm; (c)  $z=800$  mm; (d)  $z=1500$  mm

线是非稳方向上光束半径的变化规律,实线是波导方向上光束半径的变化规律。从图 16 中可以看到,在 8000 mm 的传输距离内,整形光束在两个方向上的束宽非常接近,两个方向上束宽的差值一直保持在 0.1 mm 以内。同时,在 8000 mm 的传输距离内,两个方向上光束束宽的变化很小,最大值与最小值相差不超过 0.6 mm,可以认为整形后的光束在

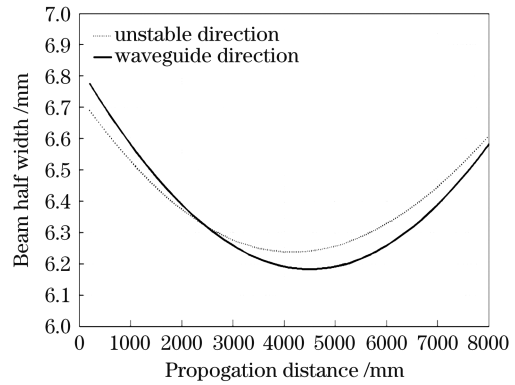


图 16 经球面镜 8 后整形光束在两个方向上的光束半径变化

Fig. 16 Beam radius changes in two directions of shaped beam after passing through spherical mirror 8

8000 mm 传输范围内是平行光束,而 8000 mm 这个范围能够满足绝大多数加工系统的需要。

图 17 为整形光束经过球面镜 8 后在  $z=2000$  mm 处光强分布的数值模拟图和实验图,将  $z=0$  参考平面定义为球面镜 8 所处的位置。图 17(a)为整形光束在  $z=2000$  mm 处数值模拟的俯视图,图 17(b)为整形光束在  $z=2000$  mm 处数值模拟的立体图。图 17(c)与图 17(d)是分别对应的实验图。从图 17(a)可以发现,整形后光束在  $z=2000$  mm 处的光斑形状近似为圆形。而从图 17(b)中可以很明显地看到整形光束的光强分布为近似高斯基模分布,没有旁瓣。对应的实验结果同数值模拟结果吻合得很好。

为了比较实际整形光束的半径与理论计算得到的光束半径是否一致,给出了图 17(c)所示的实验得到的光斑尺寸。从测量结果来看,实际光束半径在 7.5 mm 左右。在图 16 中,整形光束在 2000 mm 处

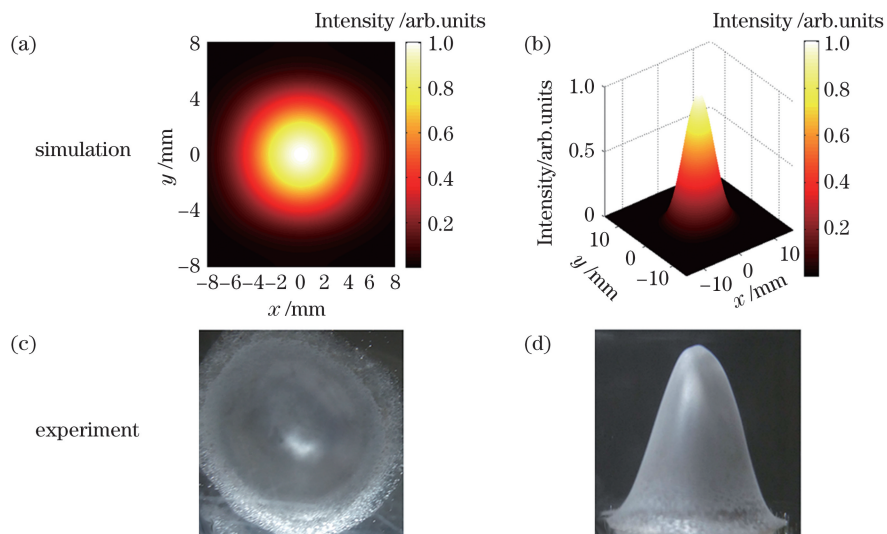


图 17 整形光束传输 2000 mm 后光强分布的数值模拟图与实验图

Fig. 17 Numerical simulation and experimental diagrams of light intensity distribution after shaped beam transmits 2000 mm



的半径大约为 6.4 mm, 两者相差不到 1 mm。这说明理论计算数据与实验数据吻合得较好, 数值模拟结果可以指导实际光束整形系统的设计工作<sup>[21-22]</sup>。

图 18 所示为传输距离  $z = 800$  mm 与  $z = 3800$  mm 处整形光束光强分布的数值模拟结果与实验结果。图 18(a) 是传输距离  $z = 800$  mm 处光强分布的数值模拟结果, 图 18(b) 是光束传输距离  $z = 3800$  mm 处光强分布的数值模拟结果, 图 18(c)

与图 18(d) 分别是  $z = 800$  mm 和  $z = 3800$  mm 处相对应的实验结果。从数值模拟结果来看, 整形光束经球面镜 8 准直后, 在近场与远场处的光强分布没有很大的变化, 两个方向上光束的差别较小。总体而言, 在传输过程中, 光斑形状和光束宽度都没有发生明显变化。如果不加入球面镜 8 进行准直, 虽然光斑形状不会变化, 都是呈近似圆形分布, 但光束半径会不断增加, 不利于后续的激光加工系统。

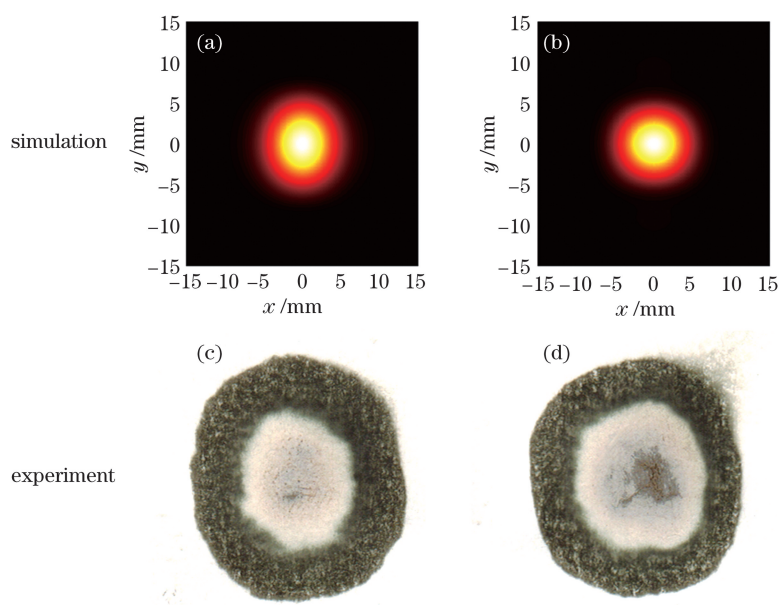


图 18 整形光束在 800 mm 与 3800 mm 处光强分布的数值模拟与实验结果。(a) 800 mm 处的数值模拟结果; (b) 3800 mm 处的数值模拟结果; (c) 800 mm 处的实验结果; (d) 3800 mm 处的实验结果

Fig. 18 Numerical simulation and experimental results of intensity distribution of shaped beam at 800 mm and 3800 mm.

(a) Numerical simulation at 800 mm; (b) numerical simulation at 3800 mm; (c) experimental result at 800 mm;

(d) experimental result at 3800 mm

## 7 射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器的最新应用展望

在集成电路芯片的制备过程中, 激光退火作为目前广泛应用的热处理技术, 既能得到更高的掺杂激活, 实现极短处理时间内的极低扩散, 又能缩短烧结周期, 降低热梯度, 得到更精细的晶粒, 具有极大优势。为了消除晶格缺陷, 得到电特性更完美的硅晶圆, 激光退火过程不仅要控制温度(不能过热), 还要保证温度的均匀性, 此时温度场仿真的重要性就彰显出来了。

快速热退火会使量子阱垒层、阱层异质界面的原子互扩散, 从而使得量子阱材料的基态跃迁能量增加, 导致量子阱样品的室温 PL 峰值发生蓝移。快速热退火温度的升高会降低材料的局域载流子发射, 说明快速热退火有利于使扩散产生的原子团簇

均匀分布, 也可以促使空穴愈合<sup>[23]</sup>。

在集成电路的激光退火过程中, 由于硅晶圆表面集成了许多微米级电路元件, 所以硅晶圆表面不同位置材料的属性参数(包括常压热容、密度和热导率等)会产生变化, 当激光对其进行扫描加热时, 不同位置发生的激光热源能量吸收、热辐射和热对流等物理过程也不同, 从而导致温度场分布不均匀, 这种现象被称为“图案效应”。图案效应的存在会导致晶圆片在退火过程中产生热应力差异, 进而发生晶体缺陷和失效。在实际实验中, 退火效应主要受掺杂剂浓度和晶片初始温度的支配, 同时, 与辐照时间相关的扫描速度和激光参数等都会对温度场分布造成影响<sup>[24]</sup>。

激光尖峰退火的主要原理是: 采用大功率 CO<sub>2</sub> 激光束以近似线光束的形式, 在一定速度下对硅晶圆表面进行反复扫描, 使硅晶圆的表面温度在

1100 °C 以上(但稍低于硅的熔点)。该方法的优势在于硅晶圆的升降温速率大,可以缩短退火时间,从而实现掺杂剂高电活化水平的同时尽可能保持离子浓度分布不变。除此之外,激光退火可以降低热梯度,得到更精细且尺寸更均匀的粒子;退火过程中衬底的温度较低,使得对衬底材料的要求降低,从而降低了制备成本<sup>[25]</sup>。

### 参 考 文 献

- [1] 刘强,王健,孙鹏鹏,等.多轴联动数控激光刻型加工关键技术及装备研发[J/OL].中国激光:1-28[2022-04-07].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.TN.20220211.1742.012.html>.  
Liu Q, Wang J, Sun P P, et al. Research and development of key technology and equipment for multi-axis linkage CNC laser engraving [J/OL]. Chinese Journal of Lasers, 1-28[2022-04-07]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.TN.20220211.1742.012.html>.
- [2] 刘继舒.大功率射频激光电源的仿真设计[D].武汉:华中科技大学,2009.  
Liu J S. Simulation and design of high power radiofrequency laser power supply [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [3] 柳娟.大功率射频 CO<sub>2</sub> 激光器激励特性研究[D].武汉:华中科技大学,2009.  
Liu J. Research on exciting characteristics of high power radio-frequency CO<sub>2</sub> laser [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [4] 钟艳红,辛建国.射频激励增益波导 CO<sub>2</sub> 激光器的光强分布[J].中国激光,2006,33(8):1030-1032.  
Zhong Y H, Xin J G. Radio frequency excited gain waveguide array CO<sub>2</sub> laser with compressed single peak intensity distribution [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(8): 1030-1032.
- [5] 王度.射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器的光束特性及其热稳定性研究[D].武汉:华中科技大学,2013.  
Wang D. Beam characteristic and its thermal stability of the radio frequency-excited slab CO<sub>2</sub> laser [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [6] Friede D, Hage H, Herzner K H, et al. Laser system with compensated optics: EP0775376B1[P]. 1998-08-26.
- [7] 丘军林.气体放电与气体激光[M].武汉:华中理工大学出版社,1995.  
Qiu J L. Gas discharge and gas laser[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1995.
- [8] 贾力,方肇洪,钱兴华.高等传热学[M].北京:高等教育出版社,2003.  
Jia L, Fang Z H, Qian X H. Advanced heat transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [9] Vaisfel'd M P, Pol'skiĭ Y E. Thermal regime in a coaxial low-pressure CO<sub>2</sub> laser[J]. Soviet Journal of Quantum Electronics, 1981, 11(10): 1360-1362.
- [10] 吕坤鹏,刘震宇,杨雪,等.高功率固体激光器微通道冷却结构的数值研究[J].中国激光,2020,47(6):0601010.  
Lü K P, Liu Z Y, Yang X, et al. Numerical research on microchannel cooling structure of high power solid-state lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0601010.
- [11] Yelden E F, Seguin H J J, Capjack C E, et al. Multichannel slab discharge for CO<sub>2</sub> laser excitation[J]. Applied Physics Letters, 1991, 58(7): 693-695.
- [12] Vitruk P P, Baker H J, Hall D R. Similarity and scaling in diffusion-cooled RF-excited carbon dioxide lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1994, 30(7): 1623-1634.
- [13] Dutov A I, Kuleshov A A. RF-excited slab CO<sub>2</sub> laser with intra-cavity mode selection[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5120: 84-86.
- [14] Shackleton C J, Abramski K M, Baker H J, et al. Lateral and transverse mode properties of CO<sub>2</sub> slab waveguide lasers[J]. Optics Communications, 1992, 89(5/6): 423-428.
- [15] Siegman A E. Stable-unstable resonator design for a wide-tuning-range free-electron laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(5): 1243-1247.
- [16] Serri L, Fantini V, de Silvestri S, et al. Theoretical and experimental study of hybrid unstable-guided resonator for diffusion-cooled CO<sub>2</sub> laser [J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2788: 24-34.
- [17] Yasui K, Takenaka Y. Advantages of negative-branch compared with positive-branch one-dimensional unstable resonators[J]. Applied Optics, 2001, 40(21): 3547-3551.
- [18] Baker H J, Hall D R, Hornby A M, et al. Propagation characteristics of coherent array beams from carbon dioxide waveguide lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1996, 32(3): 400-407.
- [19] Siegman A E. Unstable optical resonators [J]. Applied Optics, 1974, 13(2): 353-367.
- [20] Panahpour A, Soltanifard M T, Shirmahi M, et al. Output characteristics of a planar RF-excited CO<sub>2</sub> laser with unstable-waveguide hybrid resonator [J].

- Proceedings of SPIE, 2005, 5777: 460-463.
- [21] Xiao L S, Qin Y X, Tang X H, et al. Beam shaping characteristics of an unstable-waveguide hybrid resonator[J]. Applied Optics, 2014, 53(10): 2213-2219.
- [22] 肖龙胜, 唐霞辉, 秦应雄, 等. 2 kW 射频板条 CO<sub>2</sub> 激光器输出光束整形特性研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0402008.
- Xiao L S, Tang X H, Qin Y X, et al. Shaping characteristics of output beam of 2 kW radio frequency slab CO<sub>2</sub> laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(4): 0402008.
- [23] 申琳, 唐吉龙, 贾慧民, 等. 快速热退火对 InGaAsSb/AlGaAsSb 多量子阱材料发光特性的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0711001.
- Shen L, Tang J L, Jia H M, et al. Effect of rapid thermal annealing on luminescence properties of InGaAsSb/AlGaAsSb multiple quantum wells material[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): 0711001.
- [24] Abed A L, Rasheed B G. Study the effect of CO<sub>2</sub> laser annealing on silicon nanostructures[J]. Modern Applied Science, 2010, 4(12): 56-59.
- [25] 田赛. 光栅式微尺度晶圆片在激光尖峰热退火工艺中温度场与应力场分布研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
- Tian S. Study on temperature field and stress field distribution of grating micro-scale wafers in laser spike thermal annealing process [D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.

## High-Power Radio-Frequency Slab CO<sub>2</sub> Laser

Tang Xiahui<sup>1</sup>, Qin Yingxiong<sup>1</sup>, Peng Hao<sup>1\*</sup>, Li Yujie<sup>1</sup>, Wu Yang<sup>1</sup>, Xiao Longsheng<sup>2</sup>,  
Xiao Yu<sup>1</sup>, Liu Juan<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Optics and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;

<sup>2</sup> College of Physics and Electromechanical Engineering, Hubei University of Education, Wuhan 430205, Hubei, China;

<sup>3</sup> College of Aeronautics and Astronautics, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China

### Abstract

**Significance** Around the world, high-power CO<sub>2</sub> laser has been the main light source for laser cutting, welding, and surface treatment, including cross-flow CO<sub>2</sub> laser, axial fast-flow CO<sub>2</sub> laser, and radio-frequency (RF) slab CO<sub>2</sub> laser. RF-excited diffusion-cooled slab CO<sub>2</sub> laser has compact structure and high beam quality, which once could not be achieved by all gas lasers above kilowatt level. It has an important application in the field of plate cutting and welding and represents the development direction of CO<sub>2</sub> gas laser. However, with the rapid development of fiber laser, the CO<sub>2</sub> laser metal processing market has almost been replaced by fiber laser. Yet, in recent years, RF slab CO<sub>2</sub> laser has been the only one used for laser annealing of VLSI wafers, with no other laser to replace it.

Today, two types of annealing equipment are mainly used in the annealing of integrated circuit wafers. One is the traditional rapid thermal processing (RTP) equipment. The RTP equipment uses halogen tungsten lamps to heat a single wafer to 300 °C–1050 °C within 1–30 s. In addition, it has been adopted by semiconductor manufacturing industry for more than 20 years. Another novel heat treatment method is millisecond annealing (MSA), which can heat the wafer to 1100 °C–1350 °C (just below the melting point of silicon) in a few hundred microseconds to a few milliseconds.

MSA can be realized using two different methods: laser spike annealing (LSA) or flash laser annealing. LSA uses long-wavelength CO<sub>2</sub> laser beam to irradiate the semiconductor wafer at grazing angle to form a “line beam” on the wafer surface to scan the wafer back and forth. For the formation of USJ (ultra shallow junction) and nickel silicide, each method has its own challenges.

With the reduction of device size, the formation of nickel silicide is a new challenge in wafer manufacturing. Conventional formation of nickel silicide includes two low-temperature RTP steps and an optional etching step between the two steps. When the device size is reduced to 28 nm or even smaller, the nickel diffusion in the second RTP processing step will result in junction leakage and reduce the yield. A feasible solution is to replace the second RTP treatment step with MSA because the MSA treatment time is short, which can reduce the nickel diffusion. The



special laser annealing device adopts short-wavelength diode laser, high-power RF CO<sub>2</sub> laser, and two linear spots, and the incident light is close to the vertical incidence. To remove the lattice defects and obtain a silicon wafer with perfect electrical characteristics, the temperature should be controlled to avoid overheating during the laser annealing and the temperature uniformity should be ensured, which sets extremely strict requirements for laser stability.

**Progress** This paper introduced the development of RF slab CO<sub>2</sub> laser. It mainly focused on key technologies such as laser structure principle, area amplification, diffusion cooling, strip electrode, thermal effect, power extraction, output beam characteristics, unstable-waveguide hybrid cavity, beam shaping, RF transmission and impedance matching, RF discharge plasma, and uniformity of gas discharge.

For example, in the aspect of electrode cooling and diffusion, the electrode deformation seriously affected the discharge power injection and laser power extraction due to the large discharge electrode area and small discharge spacing. When the laser worked, the heat of the gas diffused to the electrode and was taken away by the circulating cooling water in the polar plate. The electrode length, width, and height of the 2.5 kW laser were about 1000, 200, and 40 mm, respectively. Matching inductors were inserted at the outer ends of the upper plate in the length direction to realize impedance matching and ensure uniform and stable discharge. According to the heat transfer theory, the finite element model of the electrode was established by using the creative serpentine water-cooling channel design, and its temperature field distribution cloud chart was obtained by loading and solving. The highest temperature of the whole electrode was 31.994 °C, and the lowest temperature was 23.333 °C, which achieved good diffusion cooling effect(Fig. 6).

**Conclusions and Prospects** The goals of developing high-power RF CO<sub>2</sub> laser were as follows: (1) to solve the problem of localization of high-power, high beam quality, and high-stability laser that restricts the laser annealing equipment of VLSI wafers in China; (2) to break through the key technologies such as RF slab electrode, diffusion cooling, optical resonator, RF discharge excitation, beam shaping, *etc.*; (3) to realize the engineering of high-power diffusion cooling slab CO<sub>2</sub> laser; (4) to improve the localization level of high-end industrial gas lasers in China; and (5) to reverse the situation that the RF slab laser needed for laser annealing of integrated circuits in China is completely dependent on imports.

**Key words** lasers; high power radio frequency (RF) slab CO<sub>2</sub> laser; diffusion cooling; unstable waveguide hybrid cavity; beam shaping; radio frequency excitation; gas discharge