

## 高功率半导体激光器评述

曹三松

(西南技术物理研究所,成都,610041)

**摘要:** 作者综合评述了高功率半导体激光器的发展现状,对高功率半导体阵列器件结构进行了分析,介绍了设计高功率半导体激光器所涉及的关键技术。

**关键词:** 半导体激光器 阵列 高功率 GaAlAs/ GaAs

## Review of high power semiconductor lasers

Cao Sansong

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, 610041)

**Abstract:** This paper reviews the high power semiconductor lasers and recent developments. The structures of the semiconductor laser arrays are analyzed. A summary of the principle which involves in the design of high power semiconductor lasers will be provided.

**Key words:** semiconductor lasers array high power GaAlAs/ GaAs

### 引 言

第一只半导体激光器是 1962 年研制成功的,从时间上说,半导体激光器的出现只比固体激光器和气体激光器晚 2~3 年,但其研究和发展路程更艰苦更漫长。1962 年由美国首先研制成功的半导体激光器是 GaAs 同质结二极管激光器,它只能在低温下脉冲工作,阈值电流非常大。直到 70 年代初才由美国贝尔实验室研制出异质结(DH)半导体激光器,它通过对光场和载流子进行限制,使半导体激光器的阈值电流密度大幅下降,从而可以在室温下连续运转,且可靠性和寿命明显提高。进入 80 年代,随着半导体外延设备和技术的发展,精密控制材料源组分和外延层厚度成为可能,出现了量子阱和超晶格等新型半导体激光器结构,使半导体激光器的阈值电流降低,电光转换效率增加,激光输出功率得到提高<sup>[1]</sup>。在泵浦固体激光器应用的推动下,高功率半导体激光器在 90 年代取得了突破性的进展,其标志是半导体激光器的输出功率显著增加<sup>[2]</sup>。以半导体二极管激光器条和二极管激光器堆为代表的高功率半导体激光器品种繁多,应有尽有,仅美国 SDL 公司在 1998 年就生产和销售了 1 万多只高功率半导体激光器。根据作者在国外短期工作了解到的一些情况,综合评述了高功率半导体激光器(主要是 GaAs/ AlGaAs 等半导体激光器)的技术特点和发展水平。

### 1 器件结构

半导体激光器的输出功率通常在几毫瓦至几十毫瓦范围,限制半导体激光器输出功率增加的主要有热损伤和端面损伤等原因。在低功率运转下,半导体激光器的发热不太严重,器件可以正常工作。但是随着注入电流的增加,热量开始在半导体激活区很小的范围内积累起来,温度迅速升高,导致阈值电流增加,量子效率下降,限制了激光输出功率随输入的增加而提高,

甚至出现热损伤烧坏半导体激光器。由于半导体激光器的发光区非常小,低功率输出时,发光区的功率密度已经很高,如果继续提高激光输出功率,势必造成发光区的功率密度超过了材料的光损伤阈值,首先使半导体激光器的端面损坏,激光器失效。为了提高半导体激光器的输出功率,人们进行了大量的探索,主要技术途径有<sup>[3]</sup>:(1)增大发光区面积(如大光腔半导体激光器);(2)端面镀增透膜和高反膜;(3)采用制冷技术提高散热能力;(4)减小材料缺陷、降低内部损耗;(5)列阵技术。实践证明,半导体激光列阵是实现高功率输出的有效技术途径,所谓列阵技术,就是采用一系列的半导体器件工艺将许多个单条的激光二极管集成在同一衬底芯片上,是一种光电集成器件。一般将半导体激光器列阵分为相干和部分相干两种类型,相干列阵半导体激光器通常采用折射率波导结构,通过刻蚀和再生长等工艺技术使每个单条发出的光与相邻单元发出的光相互交叠,整个器件发射的光束相位一致,远场为单光斑,可聚焦为达到衍射极限的焦斑。这种阵列工艺复杂,集成的条数有限,因此输出功率不高,一般为100mW至500mW<sup>[4]</sup>。部分相干列阵半导体激光器列阵一般是增益波导结构,制作工艺难度较小,集成的单条数目很大,激活区面积较大,因而可以获得功率非常高的激光输出。部分相干半导体激光器从结构上可以分为以下3种<sup>[5]</sup>。

### 1.1 单元列阵

这种结构的列阵半导体激光器是将多个单条二极管耦合起来,并联集成在同一半导体衬底上,增加有

源区的宽度,从而提高输出功率。例如,将50条单管耦合在一起,有源区宽度增加到500 $\mu\text{m}$ ,国外这种类型的单元列阵 GaAs/AlGaAs 半导体激光器产品连续输出功率为4W,准连续(150 $\mu\text{s}$ ,100Hz)输出平均功率可达8W,电-光效率45%。国内同类产品3W器件已研制成功。这种列阵器件的特点是:有源区小,可靠性高。一般为多纵模,光谱宽度2nm,相干长度0.5mm。图1是这种列阵的典型输出特性。

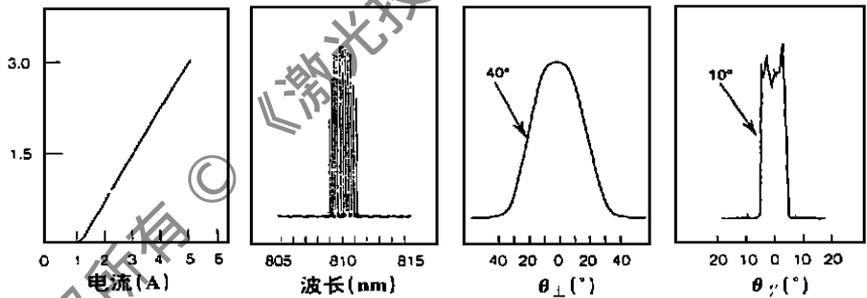


图1 单元列阵 GaAlAs/GaAs 半导体激光器的典型输出特性

的单元列阵 GaAs/AlGaAs 半导体激光器产品连续输出功率为4W,准连续(150 $\mu\text{s}$ ,100Hz)输出平均功率可达8W,电-光效率45%。国内同类产品3W器件已研制成功。这种列阵器件的特点是:有源区小,可靠性高。一般为多纵模,光谱宽度2nm,相干长度0.5mm。图1是这种列阵的典型输出特性。

### 1.2 一维线列阵

这种半导体激光器又简称为二极管激光条,它是在单元列阵的基础上发展起来的,通过在单元列阵之间增加隔离沟道,将多个单元列阵组合起来,进一步增加有源区宽度,使输出功率增加。例如,将20个单元列阵组合起来,如果每个单元列阵宽100 $\mu\text{m}$ (由10个单条耦合构成),各个单元列阵之间间隔400 $\mu\text{m}$ ,则列阵的有源区宽度一般为10mm,各单元列阵激光器发出的光彼此不相干,但由于集成了200个单条,相当于200支单管同时发射激光,因而总输出功率很高。制作工艺过程是在完成外延生长后,通过后续工艺制成单元列阵,在此基础上经过欧姆接触、引线等工艺,然后将各个单元列阵用钎膜焊接到热沉上形成一维线列阵半导体激光器。组合的单元列阵数由器件的散热能力决定。这种器件可以工作在连续和准连续两种方式下,国外产品连续输出功率达到20W,国内同类器件连续输出功率达到10W。表1是美国

SDL 公司给出的准连续运转一维线列阵(尺寸: 10mm × 1μm) AlGaAs/GaAs 激光器的性能指标。

### 1.3 二维面阵器件

这种半导体激光器又称为二极管激光器堆,它是采用层叠方式,在垂直方向上将一维线列阵器件堆积叠加起来构成。由于发光面积增大,这种器件可以获得更大功率的激光输出,例如将 13 个一维线列阵器件堆积叠加起来,层间距 0.3mm,发光面积为 10mm × 4mm,输出功率可以达到 800W。这种器件除了总输出功率这一指标外,功率密度也是一个重要指标,这涉及到每条输出功率和层与层的间距。一般是根据输出

功率和器件散热能力的大小选择层间距,美国 SDL 公司的器件层间距有 0.4mm,0.8mm,1.2mm,1.6mm,2.0mm 等多种类型。表 2 是美国 SDL 公司给出的准连续运转二维面阵 GaAs/AlGaAs 激光器的性能指标。表 3 是美国 SDL 公司给出的 InGaAs(激光波长 970 ~ 980nm)准连续高功率半导体激光器性能指标。

## 2 关键技术

研制高功率半导体激光器所涉及到的关键技术有:材料生长、列阵结构、腔面镀膜技术、冷却技术和电源技术。

### 2.1 材料生长

高功率半导体激光的有源区结构,主要采用单量子阱或多量子阱结构,除根据量子阱激光器理论合理设计各层厚度、各层组分及掺杂外,关键是从外延技术上控制大面积、高均匀性的量子阱半导体的生长过程。通过对衬底制备、生长温度、生长速率、流量控制、 $V/III$  比、掺杂、生长中断等工艺条件的试验,并配合霍尔测量、扫描电镜、X 光双晶衍射、 $C-V$  测量和荧光测量以及伏安特性、电致发光强度测量等手段,对制备的样品进行测量分析,从而优化生长条件,提高晶格质量,消除材料缺陷<sup>[6]</sup>。

### 2.2 列阵结构

采用列阵技术制作高功率半导体激光器,涉及条形隔离、欧姆接触和引线等工艺技术。高

表 1 国外一维线列阵 AlGaAs 准连续半导体激光器性能指标

型 号	峰值功率 (W)	占空比 (%)	脉冲能量 (mJ)	发散角	电光效率 (%)	工作电流 (A)
3245 - C1	50	20	10	40°×10°	40	72
3231 - A1	60	2	12	40°×10°	49	70
3251 - A1	100	1.3	20	40°×10°	46	115

表 2 国外二维面列阵 AlGaAs 准连续半导体激光器性能指标

型 号	峰值功率 (W)	占空比 (%)	脉冲能量 (mJ)	尺 寸 (mm)	电光效率 (%)	工作电流 (A)
3242 - HH	1250	8	250	10 × 19.2	40	78
3231 - HI	2880	4	576	10 × 19.6	45	75
3251 - HI	4800	2	960	10 × 19.2	46	115

表 3 国外 InGaAs 准连续高功率半导体激光器性能指标

型 号	峰值功率 (W)	占空比 (%)	尺 寸 (mm)	叠层数	电光效率 (%)	电 流 电压
6231 - A1	60	2	10 × 0.001	1	40	85A 1.7V
6231 - A2	120	2	10 × 0.4	2	40	85A 3.4V
6231 - A3	180	2	10 × 0.8	3	40	85A 5.1V
6231 - A4	240	2	10 × 1.2	4	40	85A 6.8V
6231 - A5	300	2	10 × 1.6	5	40	85A 8.5V
6231 - A6	360	2	10 × 2.0	6	40	85A 10.2V

功率半导体激光器的横向尺寸远大于光腔长度,必须通过质子轰击、氧化物隔离及光刻等技术,抑制横向光增益和光放大。侧向光隔离不好,会引发光场模式的横向耦合,降低光增益和激光输出功率<sup>[7]</sup>。高功率器件对欧姆接触和引线等工艺提出了更高的要求,工艺不好,会导致串联电阻密度分布和热阻分布不均匀,进而造成半导体激光出现不均匀激射和快速退化。

### 2.3 腔面镀膜技术

在高功率半导体激光器中,通过镀高反膜和增透膜,除了可以降低阈值电流、提高激光器的量子效率和电-光转换效率外<sup>[8]</sup>,还可以提高腔面的光损伤阈值,并保护腔面,防止氧化,提高工作的可靠性。国外的高反膜的反射率已达到 95% 以上。

### 2.4 冷却技术

半导体激光器的寿命与有源区的温度有很大的关系,在 30℃ 下工作比在 70℃ 下工作寿命长 20 倍,温度升高会导致激光波长漂移和功率下降。高功率半导体激光器如果没有有效的散热措施,大量的废热产生会使器件根本不能工作。一般的散热方法是将半导体激光器芯片键合到热沉结构上,用热电方法快速致冷散热。高功率半导体激光器通常将管芯的 P 面键合到热沉上,这是因为该面与有源区距离近(几个微米),有利于导热。近年来发展起来的微通道冷却技术,有效地解决了高功率半导体激光器的散热问题,这种微通道宽几十微米,深几百微米左右,通道内流过加压的水或其它冷却液,能够快速地传递热量。

### 2.5 电源技术

为了驱动高功率半导体激光器,必须研制大电流电源。由于高功率半导体激光器价格昂贵,因此,电源的设计上要采取有效的措施来保护激光器,例如设置多级电源滤波器和电源开关软起动电路,有效去除电源的浪涌和尖峰脉冲,确保半导体二极管激光器不受电源浪涌或尖峰脉冲的损伤。对高功率连续电源主要要求是输出电流稳定和能够限流;对准连续电源,要求有重频、脉宽和电流幅度可调等基本功能。准连续电源包括功放电路、驱动电路、信号源电路和显示电路等几个部分,其中功放电路是电源的核心,它将信号源电路产生的初始电脉冲信号放大,通过驱动电路提供功率,从而产生激光器所要求的工作电流和电压。

## 3 结 语

众所周知,半导体激光器具有体积小、重量轻、效率高、寿命长、低压工作等优点,作为小功率激光器已被广泛应用。自 90 年代以后,半导体激光器的输出功率取得了显著的提高,国外千瓦级的高功率半导体激光器已经商品化,国内样品器件输出已达到 600W。目前,高功率半导体激光器的主要市场是泵浦固体激光器、材料加工、印刷业和医学应用等领域。在需求牵引下,高功率半导体激光正在向高平均功率、高功率密度、高光束质量、高效率、低成本和长寿命方向发展。最近,美国 SDL 公司的 Opto Power 分公司在提高半导体激光器的输出功率方面又取得新进展,808nm 波长的一维线阵(1cm 宽)半导体激光器连续输出功率达到 115W,930nm 波长的一维线阵器件连续输出功率达到 240W<sup>[9]</sup>。在提高半导体激光器光束质量方面,德国科学家也取得新的结果,在一只单元列阵半导体激光器中获得 2.4W 连续功率激光输出,光束质量为  $M^2 < 2$ <sup>[10]</sup>。高功率半导体激光器的研究和开发始终与军用和民用市场紧密相联,通过采用先进的工艺和技术,新型高功率半导体激光器将层出不穷。

## CARS 在超音速燃烧研究中的应用 \*

赵建荣 杨仕润 俞刚

(中国科学院力学研究所高温气体动力学开放研究实验室,北京,100080)

**摘要:** 报道了氮、氧和水的 Q 支 CARS 谱以及氢的 S(5) 和 S(6) 纯转动 CARS 的测量结果,并用来确定超音速燃烧火焰中的温度及氢和氧的浓度;用水的 Q 支 CARS 谱得到共振与非共振谱积分面积比随浓度的变化曲线。提出并发展的同时测量氢和氧的 CARS 谱新方法,为同时测量火焰温度和氢、氧浓度提供了一条途径,特别对不含氮的燃烧系统更具重要意义。

**关键词:** 氢和氧的 CARS 谱 同时两点测量 超音速燃烧 温度和浓度分布

## Study of supersonic combustion by CARS measurement technique

Zhao Jianrong, Yang Shirun, Yu Gong

(Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080)

**Abstract:** The Q-branch CARS of  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$  and rotational CARS of  $H_2$  (S(5) and S(6)) were measured and used to determining temperatures and concentrations of  $H_2$  and  $O_2$  in a supersonic combustion flame. The Q-branch CARS of  $H_2O$  were used to obtain the curve of area ratio of resonant and non-resonant CARS versus concentration. The new method of simultaneously measuring CARS of  $H_2$  and  $O_2$ , which was developed in our laboratory, provides a way for simultaneously obtaining temperature and concentration of  $H_2$  and  $O_2$  in flame, especially for nitrogen free condition.

**Key words:**  $H_2$  and  $O_2$  CARS spectra simultaneous measurements at two points supersonic combustion distributions of temperature and concentration

\* 国家自然科学基金和 863-2-2 专题项目资助。

### 参 考 文 献

- 1 Yariv A. Circuit and Devices, 1989;5(6):25
- 2 Haden J, Endriz J, Sakamoto M *et al.* SPIE, 1995;2382:2
- 3 Figueroa L. Handbook of Solid-state Lasers. New York and Basel: Marcel Dekker Inc, 1991:113
- 4 Streifer W, Burnham R D, Paoli T L *et al.* Laser Focus, 1984;113:100
- 5 Streifer W, Scifres D R, Harnagel G L *et al.*, IEEE J Q E, 1988;24(6):883
- 6 Schaus C F, Shealy J R, Eastman L F. J Crystal Growth, 1985;73:37
- 7 Botez D, Scifres D R. Diode Laser Arrays. Cambridge: Cambridge University Press, 1994
- 8 Derry P L, Yariv A. A P L, 1987;50(25):1773
- 9 L F World, 1999; August:11
- 10 L F World, 1999; June:59

作者简介:曹三松,男,1959年7月出生。副研究员。现主要从事激光器件和技术的研究。

收稿日期:1999-09-21 收到修改稿日期:1999-10-14