

文章编号: 0258-7025(2005)05-0585-05

千瓦级连续激光二极管面阵及微沟道冷却组件

戴特力, 梁一平, 罗於静

(重庆师范大学物理学与信息技术学院, 重庆 400047)

摘要 千瓦级连续激光二极管面阵由 30 个 40 W 的 808 nm 连续激光二极管条组成, 按要求排列成 5×6 矩阵, 发光孔径 $12 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 。每个激光二极管条安装在微沟道冷却封装组件上, 依靠高压冷却水通过微沟道维持连续运行。面阵的 30 个二极管条的电路串联, 冷却水道并联, 恒流电流 50 A 时, 发射连续 1060 W, 808 nm 波长的激光, 平均功率密度 126 W/cm^2 。5 个 K 型热电偶安装在面阵不同位置测量激光二极管底部附近硅热沉的温度随耗散热功率的增加, 面阵整体热阻的测量值为 $0.009 \text{ }^\circ\text{C/W}$ 。千瓦级连续面阵可用于抽运大功率固体激光器, 也可用于材料表面热处理。

关键词 激光技术; 大功率连续激光二极管面阵; 硅微沟道冷却封装组件; 热阻系数

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A

1000 W Continuous Laser Diode Planar Array and the Silicon Micro-Channel Cooling Module

DAI Te-li, LIANG Yi-ping, LUO Yu-jing

(Physics and Info-Technic College, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China)

Abstract The 1000 W continuous laser diode planar array is made up of 30 diode bars at the wavelength of 808 nm with each power of 40 W and forms a rectangle luminescence aperture of $12 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$. These bars was mounted on modular microchannel cooled headsinks (MCC) and can continuously emit the laser by the coolant passing through MCC under 0.5 MPa pressure. The total continuous power is 1060 W and the average power density is 126 W/cm^2 at wavelength of 808 nm when the current is fixed 50 A. Five uniformity K-type thermoelectric couples are placed on the different five silicon headsinks of the planar array and used to measure the temperature increase with the loss thermal power. The measuring result of thermal impedance of the planar array is about $0.009 \text{ }^\circ\text{C/W}$.

Key words laser technique; high power continuous laser diode planar array; modular silicon microchannel cooled headsinks; thermal impedance

1 引言

自超晶格量子阱激光材料发明以来, 大功率激光二极管条的发射功率越来越大。2003 年, 美国加州大学利弗莫尔实验室(LLNL)已用大功率激光二极管条装配出准连续功率 40 kW 的激光二极管面阵^[1]。准备用来作为车载激光武器的核心部件, 或新型激光产业加工机械的能源。这个面阵就是用硅微沟冷却热沉组件(MCC)装配的。

重庆师范大学于 1998 年 12 月, 在国家自然科学基金委员会的主持下, 对用于大功率激光二极管

条冷却封装的硅微沟道冷却组件进行了技术鉴定。该成果已于 2003 年获得发明专利证书^[2]。

近年来, 国内大功率准连续激光二极管面阵的研制^[3,4]及其应用^[5]已取得进展。利用硅微沟道冷却封装组件封装的二极管条, 装配千瓦级连续激光二极管面阵就是这方面研究工作的一个继续与补充, 也是有自主知识产权的技术成果^[2]的一个应用。

2 硅微沟道冷却封装组件的结构与运行

硅微沟道是指用各向异性腐蚀方法在硅衬底上

收稿日期: 2004-08-09; 收到修改稿日期: 2004-11-11

基金项目: 重庆市科委攻关项目资助。

作者简介: 戴特力(1940—), 男, 重庆丰都人, 教授, 主要从事激光二极管抽运固体激光器、物质与强激光的相互作用方面的研究。E-mail: daiteli@public.cta.cq.cn

刻出的数百条平行深沟,如图 1 所示。沟道深 140 μm ,宽 25 μm ,间距 50 μm ,长 1400 μm 。根据扫描电镜照片,可以把它看作散热翅片的三维微缩构形。硅微沟道冷却封装组件是用两个刻有微沟道的硅片夹一光学玻璃片,用发明专利^[2]公布的方法粘结起来的。大功率激光二极管线阵焊接在微沟道背面。当二极管条高占空比或连续工作时,数十安培电流通过许多并联的激光二极管的 pn 结。这些 pn 结发射激光束时,产生相当于光功率 2 倍多的耗散热。这些耗散热全部集中在 pn 结中约 1000 $\mu\text{m} \times 7 \mu\text{m} \times 0.5 \mu\text{m}$ 的空间电荷区内。耗散热密度高到足以在一瞬间烧毁二极管的 pn 结。如果让冷却水在高压下通过微沟道,冷却水就可以及时带走二极管条释放到硅衬底中的热量。

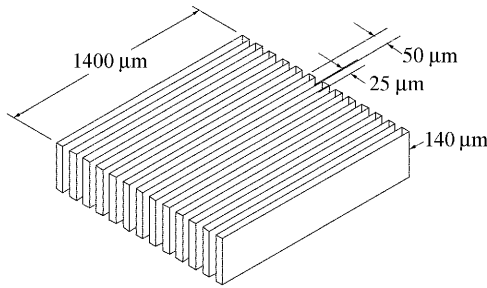


图 1 微沟道尺寸图

Fig. 1 Measurement of the microchannel cooler

从图 2 可看出,二极管条 pn 结的热量通过约 3 μm 厚的欧姆层,3 μm 厚的焊料层和 9 μm 厚的金层,传导至硅微沟道衬底。微沟道壁与二极管条底面的最短导热路径小于 0.5 mm,此传导热阻小于冷却液与微沟道边界形成的热阻。在稳定层流的情况下,冷却液的粘滞系数在微沟道内侧形成约几微米厚的静止不动的冷却液,称为边界层。硅体从二极管条获得的热量迅速越过边界层,传给高速流动的冷却液,被强制排出。文献^[6]采用流体的边界层理论对微沟道边界层的热阻作出了理论分析和数值计算,得到了与实际测量一致的结果。图 3 是封装在

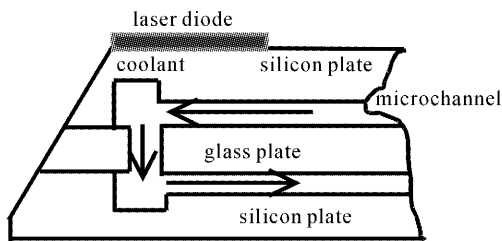


图 2 微沟道散热原理示意图

Fig. 2 Principle of heat exchange in the microchannel cooler

微沟道组件上的单个二极管条的示意图。

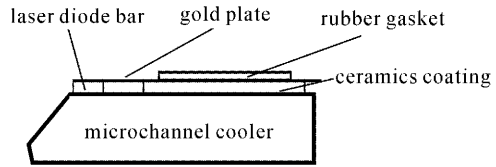


图 3 微沟道封装的单个二极管条的结构

Fig. 3 A diode bar mounted on the microchannel cooler

器件粘好后,在磁控溅射台内依次镀上钛、铂、金,作为二极管条的阳极。二极管条和作为阴极的金箔焊接在微沟道表面,如图 3 所示。陶瓷薄片用于阴极和阳极的隔离,导电硅橡胶圈用于组装成面阵时与相邻单元连接。

用专门的电极封装后,以 0.5 MPa 的压力供给单个二极管条的微沟道温度 10 $^{\circ}\text{C}$ 的冷却水,流量为 12 L/h。在这种情况下,电流与激光连续输出功率的关系如图 4 所示。

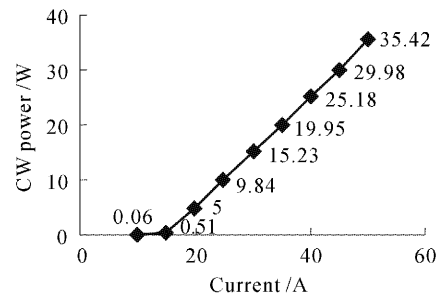


图 4 单个激光二极管条的连续输出功率-电流曲线

Fig. 4 CW power-current curve of a diode bar mounted on the microchannel cooler

测试中使用的电源是北京大华公司制造的 50 A-18V 稳压恒流直流电源,功率计是中国科学院物科公司制造的 200W 的功率计。

3 激光二极管面阵的结构和性能测试

图 5 表示千瓦级连续激光二极管面阵是由 30 个微沟道封装的激光二极管条按 6 \times 5 结构装配成的,发光区为 12 mm \times 70 mm 的矩形。每 6 个元件叠成 1 组,电路串联,中间用导电硅橡胶垫圈作欧姆连接。两个椭圆孔为进出冷却水用,当 6 个微沟道上下叠好后,两椭圆孔也对齐。这相当于每个单元的进出水道分别并联。图 6 为整个面阵的电路和冷却水道。30 个封装好的二极管条分成 5 组,每组 6 个,并排安装在一个绝缘材料做的矩形框内。每组

上下各有一个铜电极,用 M3 不锈钢螺杆压紧连接。铜电极内也有两椭圆孔对准微沟道的两椭圆孔,且另有两通道分别与两个水嘴连通。5 个组并排安装后,共有 20 个水嘴整齐地排列在面阵后面。用 10 根外径 6mm 的进水管和 10 根出水管分别与总进、出水管的分水快插接头连接。冷却液专门配方,以减少粘滞系数。5 个组的电路用银导线串联,引出正负电极如图 6。

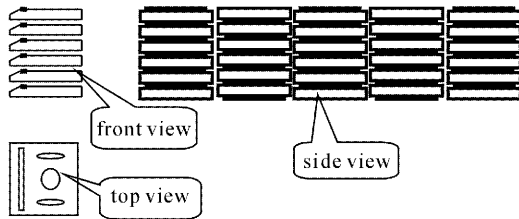


图 5 由 30 个微沟道封装的连续激光二极管条组成的千瓦级面阵按 6×5 结构装配的 12 mm×70 mm 矩形发光区

Fig. 5 1000 W continuous laser diode planar array is made up of 30 diode bars as 6×5 manner and a rectangle of 12 mm×70 mm luminescence area

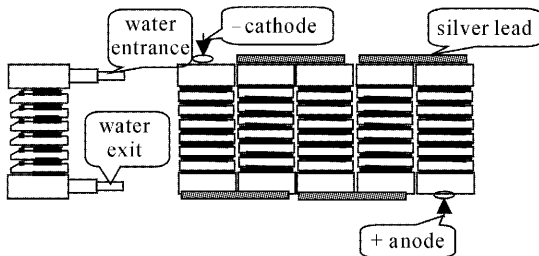


图 6 千瓦级面阵的电路和冷却水通道

Fig. 6 Current circuit and the cooling fluid channel of the 1000 W continuous laser diode planar array

中国测试技术研究院光学所辐射测量室的专业人员和重庆市科委指定的专家共同对千瓦级连续二

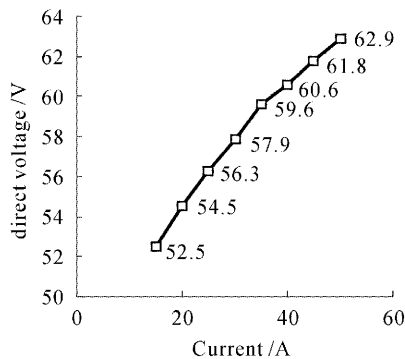


图 7 千瓦级连续激光二极管面阵的电压-电流曲线
Fig. 7 Volt-current curve of the 1000 W continuous laser diode planar array

极管面阵进行了测试^[7,8]。先分别测量单个二极管的连续发射功率对电流的关系(图 4)和面阵在连续运行时的电压-电流关系(图 7)。再计算面阵在相同电流下的输出总功率(图 8)。

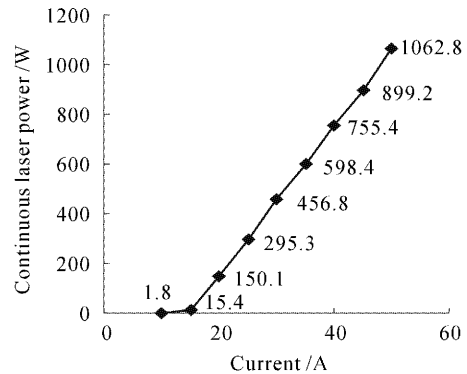


图 8 千瓦级连续激光二极管面阵的连续功率-电流曲线
Fig. 8 CW power-current curve of the 1000 W continuous laser diode planar array

4 激光二极管面阵的热阻和热阻系数

面阵的热阻从宏观上讲是指构成面阵的 30 个二极管条的 pn 结温度对其耗散热功率的导数,即 $\partial T/\partial P_{th}$, 其单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。T 表示 pn 结的温度, P_{th} 表示面阵的耗散热功率。热阻系数在数值上等于热阻与热流面积的乘积。

文献[6]详细分析了微沟道热阻的构成,推出了单个微沟道热阻的理论表达式。其热阻系数为

$$R_{total} = \frac{1}{h \cdot 400 \cdot S_{McSide}} + \frac{1}{h_{12} \cdot A} + R_{In-Au-Si} + R_L, \quad (1)$$

(1)式右边依次为微沟道边界层、冷却水、焊接层、硅体的热阻。在 0.4 MPa 压力,流量为 2.21 cm^3/s ,耗散热功率 48 W 时,单个微沟道热阻的理论计算值为 0.31 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$,实验测量值为 0.27 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$,两者基本符合。

1992 年,美国里弗莫尔实验室的微沟道小组测量出来的单个微沟道组件的热阻系数随冷却液的水力学功 P_{hyd} 的变化关系为^[9]

$$Z_{th} = (0.01188) ^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}^2/\text{W} + (0.00624/\sqrt{p_{hyd}}) ^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}^2/\sqrt{\text{W}}, \quad (2)$$

这里 $p_{hyd} = p \times v$ 是指冷却水压力与流量的乘积。如果压力以 MPa 为单位,流量以 cm^3/s 为单位,水力学功的单位为 W。

为了测量面阵热阻,用 5 个直径 0.5 mm 的 K 型热电偶分布在面阵的中央和 4 个角上。探头安放

在二极管条附近,用弹簧丝压在微沟道端头磨角斜面上。实验在不同的水压下,即不同的流量下进行。对同一水压,测量不同电流,即不同发光功率时冷却水进出面阵的温度和 5 个热电偶的温度。可以近似假设,在小范围内,pn 结的温度与硅微沟道硅体在 pn 结附近的温度相差一个固定值。因此,随着面阵电流的增加,5 个测温点的平均温度的变化可以代表 pn 结的温升。而某电流下,面阵的耗散热功率近似等于电功率减去该电流下的光功率。图 9 表示不同压力下 pn 结温升对耗散热功率测量数据的最小二乘法拟合直线。

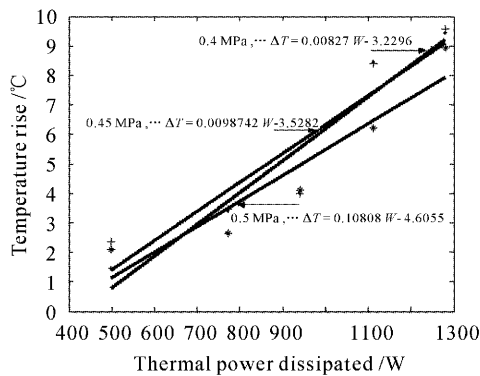


图 9 不同压力下 pn 结温升对耗散热功率测量数据的最小二乘法拟合直线

Fig. 9 Lines of the least-squares linear fit to measured data for the temperature rise versus the thermal power dissipated under different pressure

根据图 9 的数据求出热阻对压力倒数的拟合直线关系。

$$R_{th} = 0.0036567/p + 0.0016928, \quad (3)$$

当冷却水压力为 0.5 MPa 时,面阵的热阻为 0.009 °C/W。如果考虑到面阵冷却水压力与流量的关系

$$\nu = 728.8535p + 0.7898, \quad (4)$$

压力用水力学功表示

$$P_{hyd} = p\nu \approx 729p^2, \quad p \approx \sqrt{P_{hyd}}/27, \quad (5)$$

得到

$$R_{th} \approx 0.098/\sqrt{P_{hyd}} + 0.0016928, \quad (6)$$

乘上 30 个二极管条的底面积,即耗散热运输总截面积 $30 \times 0.09 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$,得到面阵的热阻系数随冷却液的水力学功的变化为

$$Z_{th} \approx 0.2646/\sqrt{P_{hyd}} + 0.00457$$

P_{hyd} 为面阵的水力学功,其中流量为 30 个微沟道的流量,以 cm^3/s 为单位。如果与(2)式比较,都以单

个微沟道流量计算水力学功,则

$$Z_{th} = 0.04831/\sqrt{p_{hyd}} + 0.00457, \quad (7)$$

图 10 比较了面阵热阻系数与单个硅微沟道热阻系数测量结果。实线是由重庆师范大学光学工程重点实验室用自己制作的微沟道装配的,虚线是美国里弗莫尔实验室制作的硅微沟道。曲线显示了面阵的热阻随冷却液的水力学功增大而热阻趋于一个稳定值。但在稳定的情况下,热阻较大。(7)式的第二项表示与冷却液的水力学功无关的热阻,它是二极管条运行时,耗散热从 pn 结通过焊接层、硅体到达微沟道内冷却液边界层的传导热阻。它与硅材料的热导率、微沟道的光刻图形尺寸有关。由于硅热沉直接与环境空气接触,所以这一项的大小受到测量时环境温度的影响。此外,温度探头的安放位置不容易受到冷却液的强冷效果的影响,测量出的热阻比对于二极管条的实际热阻偏大。

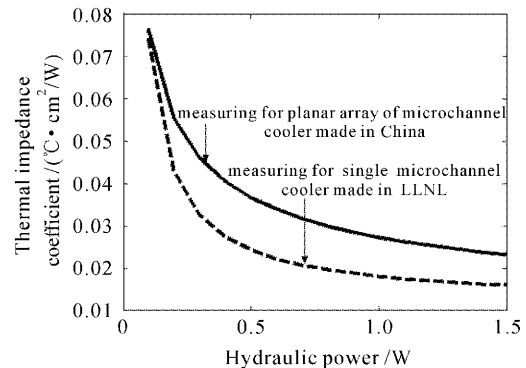


图 10 热阻系数对水力学功的变化

Fig. 10 Thermal impedance coefficient versus the hydraulic power

5 结 论

从实际测量和用于抽运的过程中,对于构成微沟道热沉的平面阵或柱面阵有几个值得注意的问题。根据二极管条出厂时标称的室温发射波长,冷却液的温度不宜太低。二极管条发射光谱的测试结果表明,进入微沟道的冷却液为 26 °C 时,二极管条的中心发射波长是 808 nm,正好在 Nd:YAG 的吸收带宽内。同时也可避免二极管条发光表面结雾,短路损坏。在可能的条件下,发光面用氮气密封。阵列的最外层要隔热保护。硅微沟道面阵的电路和水路的优化设计十分重要,因为微沟道要求高压冷却水。进出面阵的管道要大口径,内壁光滑。与面阵接口的水路要特别设计制造,构成一个整体,确保光滑不漏。一般面阵的电极和水接头共用金属块,用

磁控溅射镀金可以增加可靠性。

致谢 感谢研究生范嗣强、熊玲玲、王莉、朱仁江的帮助。

参 考 文 献

- 1 C. Brent Dane. Bright Future for Compact Tactical Laser Weapons [R]. UCRL-52000-02-4. April 2002
- 2 Dai Teli. Modular microchannel cooled heatsinks for high average power laser diode array[P]. China, invent patent HOIS 5/024, ZL 98 1 024664.5 (licence 105047), 2003-03-19
戴特力. 高功率激光二极管阵列的微通道冷却封装组件[P]. 中国, 发明专利 HOIS 5/024, ZL 98 1 024664.5 (证书号 105047), 2003-03-19
- 3 Fang Gao-zhan, Ma Xiao-yu, Wang Guo-hong *et al.*. Quasi-CW 17 kW 808 nm GaAs/AlGaAs stack laser diode arrays [J]. *Chinese J. Laser*, 2004, **31**(6): 649~653
方高瞻, 马晓宇, 王国宏等. 准连续 17 kW 808 nm GaAs/AlGaAs 叠层激光二极管阵列 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 649~653
- 4 Xin Guo-feng, Chen Guo-ying, Feng Rong-zhu *et al.*. InGaAs/AlGaAs semiconductor laser 2-D arrays [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8): 684~686

- 辛国锋, 陈国鹰, 冯荣珠等. InGaAs/AlGaAs 半导体激光器二维阵列 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(8): 684~686
- 5 Liu Yuan-yuan, Fang Gao-zhan, Liu Bin *et al.*. Laser diode side-pumped CW Nd:YAG lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7): 577~580
刘媛媛, 方高瞻, 刘斌等. 侧面抽运 Nd:YAG 连续激光器 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(7): 577~580
- 6 Dai Teli. The thermal resistance and its surveying for modular micro-channel cooler [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **B9**(4): 330~336
- 7 Jiang Wei. The Testing Report in Specialty of the 1000 W Continuous LD Planar Array [R]. Chengdu: The testing technology academy of China, 2004. 1~4
姜薇. 千瓦级连续激光二极管面阵专业测试报告 [R]. 成都: 中国测试技术研究院, 2004. 1~4
- 8 Yuan Xianghui, Liu Deseng, Jiang Wei. The testing report finished item of the 1000 W continuous LD planar array [R]. Chongqing: The Science and Technology Committee of Chongqing, 2004. 1~3
袁祥辉, 刘德森, 姜薇. 千瓦级连续激光二极管面阵项目测试报告 [R]. 重庆: 重庆市科委, 2004. 1~3
- 9 Ray Beach, William J. Benett, Barry L. Freitas *et al.*. Modular microchannel cooled heatsinks for high average power laser diode array [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4): 966~976



征 订 启 事

《光学手册》

顾问: 龚祖同 主编: 李景镇 陕西科学技术出版社 16 开, 1541 页, 定价: 100.00 元

本手册是我国编写的第一本基础性大型光学手册。全书有 2700 多个公式, 1400 余幅插图和 400 多个数据表格, 230 万字。手册包括 25 个光学学科, 5 个附录, 2 个索引。由 20 多位光学专家编撰完成, 在编写过程中得到了龚祖同、王大珩、侯洵、薛鸣球等著名光学专家的指导和帮助, 保证了该手册的编写质量和权威性。资料丰富, 表达方式详细得当, 是“一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书”(引自王大珩院士为本书的题词)。

《第十六届全国激光会议论文集》

第十六届全国激光学术会议于 2003 年 10 月 19~22 日在上海举行, 会议论文集由《中国激光》编辑部以增刊形式出版。增刊定价为每册 100 元, 光盘版为每张 50 元。

本期增刊共收录了 170 多篇论文, 约 600 多页。出版时间为 2004 年 3 月。论文集较全面地反映了近年来我国激光科学技术研究、应用和产业化的最新成果, 显示了激光科学技术对国家 863 计划、重大项目、国家基金和产业发展等方面的重要作用与贡献。

《第八届国际光电子和光通信学术会议(OECC'2003)论文集》

第八届国际光电子和光通信学术会议于 2003 年 10 月 13~16 日在上海举行, 会议论文集由《光学学报》编辑部以增刊形式出版。增刊定价为每套 100 元, 光盘版为每张 50 元。

论文集共收录论文 436 篇, 800 多页, 分上下两册。对该论文集 OECC 会议节目委员会的评价是: 质量之高, 可与国际上知名的优秀论文集媲美。

如需购买, 请与光学期刊联合编辑部葛晓红联系。

电话: 021-69918427

请从邮局汇款 地址: 上海 800-211 信箱, 光学期刊联合编辑部 邮编: 201800

光学期刊联合编辑部

2004 年 4 月