

高功率半导体二极管阵列激光器

黄裕年

(北京应用物理与计算数学研究所,北京,100088)

摘要: 半导体二极管阵列激光器是高效、小型、全固态源。本文论述高功率二极管阵列激光器的性能和关键技术,并给出了它最新的进展和未来的应用。

High power semiconductor diode array lasers

Huang Yunnan

(Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics)

Abstract: The semiconductor diode array lasers are efficient, compact, all solid-state sources. The performance and key technologies of high power diode array lasers are reviewed in this paper. Finally its recent progress and future application are given out.

一、引言

激光技术的发展,使世界科学与工业发生了新的飞跃。而半导体二极管激光器是整个激光器领域中发展最快、品种最多、应用最广的一类激光器,比芝麻粒还小的二极管激光器,以其优异的性能越来越受到人们的青睐。80年代以来它在高速、单频可调谐和波长复盖等方面有很大进展,已广泛应用于光存储、光通信、科研、医疗、娱乐等领域。但是这类激光器的能量储存能力和输出功率较低,它们受器件结构、散热和激光腔表面损伤的限制。一般单个腔二极管激光器只能发射几十至几百毫瓦光。为提高输出功率发展了二极管阵列激光器。有一维的线阵列和二维的面阵列。这些阵列中的二极管在电气上并联耦合,它们的发射很一致,形成了部分相干的光束。近年来由于采用了先进的制作工艺和冷却技术,高功率二极管阵列激光器的发展极快,用二极管激光器泵浦的固体激光器也出现了新的转机,它比传统的灯泵固体激光器效率大大提高,装置紧凑可靠,使用方便。目前半导体二极管线阵列连续输出功率已达120W,二极管面阵列泵浦的固体激光器平均输出功率超过千瓦,因而高功率的二极管阵列激光器及其泵浦的固体激光器,今后在许多应用领域将会是十分吸引人的,前途不可估量。本文将扼要介绍二极管阵列激光器的结构与性能,论述高功率阵列激光器的关键技术,发展水平和未来的前途。

二、一维线阵列激光器

常见的一维线阵列激光器(或称为激光条)是由许多平行排列的增益导引二极管组成,多个量子阱和面发射的二极管也可组成这种阵列。阵列中单个二极管腔有微米宽,两腔中心到中心的间距是 $10\mu\text{m}$ 。每个线阵列一般有10至几百个腔,其长度为 $100\mu\text{m}\sim 1\text{cm}$,图1示出了一个线阵列的结构。线阵列可以工作在连续或准连续状态,一个较长阵列的波长分散一般为

2~3nm。在较长的线阵列中激光器往往是分簇的。一个10W的线阵列,它可由10簇20个腔的子阵列组成,簇间空隙是800μm,每簇200μm长,一起平行排列在1cm长的条块上。一个典型的1cm长阵列连续工作时,阈电流2.5A,微分效率1W/A,输出可超过12W。10W输出时的电-光转换效率为42%,在较高功率工作时有一点反热。阵列在低重复频率长脉冲(例如100Hz,200μs脉冲)工作时称为准连续工作。一个多个量子阱结构的1cm长阵列,准连续工作时脉冲宽度为150μs,重复频率40Hz,峰值光-电效率为50%,靠近失效时的最大输出功率为100W。

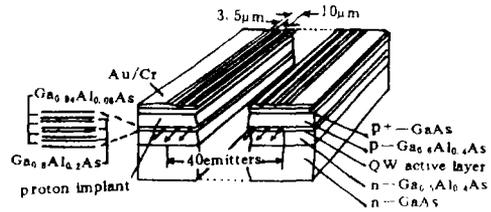


Fig. 1 Schematics of quantum well array (A 40 stripe multiple quantum well laser)

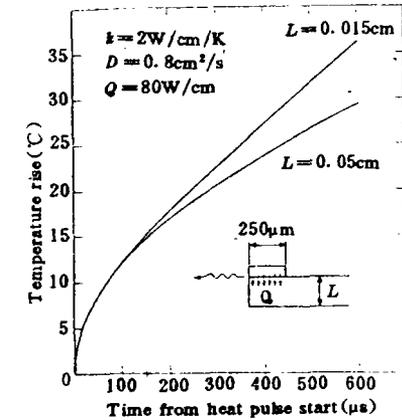


Fig. 2 Laser temperature time relationship under quasicw operation

阵列激光器产生最大功率主要取决于它的热效应。工作时产生的热量很大程度局限在最靠近它的安装板或热沉上。图2示出了两种1cm长线阵列激光器准连续工作时的温升,它们分别安装在150μm和550μm厚度的板上,板的热导率和扩散率分别是2W/cm·K和0.8cm²/s。图中的激光器工作区温升曲线是按热负荷为3200W/cm²计算出的,这个热负荷相当于250μm×1cm线阵列发出80W的废热,输出50W的光束,其效率为38%。由两个连着不同厚度安装板的线阵列温升曲线中看到,在脉冲刚开始时第一个200μs里温升较快,且与板的厚度几乎无关。说明此时废热作用仅局限于板的局部。超过这段时间安装薄板的阵列温度线性上升,此时热传导的作用大于热沉;而安装较厚板的阵列温度上升是次线性的。另外,温度上升后阵列的发射波长要改变,增长率约为0.3nm/K。

三、二维面阵列激光器

把多个二极管线阵列垂直相叠可组成二维面阵列激光器。由三个多量子阱激光条组成的面阵列,如果在150μm脉宽、40Hz重复频率下工作,输出准连续功率300W,电-光效率为40%。如果由13个激光条组成一个大面阵列,发射面积是0.4cm²。工作在同样条件下,在效率接近40%时,可输出准连续功率800W或功密2kW/cm²。

二极管面阵列激光器的发热问题比单条二极管线阵列更加严重。焊接到安装板上的阵列是靠与它相接触的热沉来萃取热量的。实验证明,如果把250μm×1cm的线阵列装在150μm厚的大铜片上,铜热沉的热导率和扩散率分别为2W/cm·K和0.8cm²/s。线阵列工作在准连续状态,脉宽250μs、重复频率为50~500Hz。从实验中看到随着重复频率的增加,阵列温度上升,输出光功率-电流曲线的斜率降低,即输出功率下降。若要维持每个脉冲输出功率就必须提高工作电流,这样就促使激光器温度进一步上升,这种激光条在500Hz下,输出功率要达到25W是困难的。若用这种器件组成二维阵列,则二极管的安装板彼此十分靠近,此时大部分

热量只能从后面沿着有限的安装板流动,因而除少数面阵列外,大多数面阵列激光器只能在较低的重复频率或较低的发射功率下工作。

四、激光器的温升与冷却办法

激光器工作时产生的废热要使作用区温度上升,增益下降,阈电流增高,以致不能正常工作。另外,因为半导体和空气界面上载流子复合速度很快,光吸收大大增加,使腔面受损而降低工作寿命。所以,解决二极管工作时的温升问题是提高这类激光器输出功率的关键。解决这个问题一般来说有两个途径,一是改善二极管激光器内部结构使其尽量减少产生的废热,二是在激光器外部采取有效的散热办法。

提高二极管工作效率应是减少产生废热的首要方法,尽管有各种理由都希望激光器在高效率下工作,但从减少废热来看它是最重要的。前节图 2 中所述两种 1cm 长的阵列,在输出 50W 时废热为 80W,若把效率从 38% 提高到 50%,则废热减少到 50W,图 2 中曲线值下降,阵列的温升可降低到原数值的 5/8。二极管激光器的效率主要受晶体中的欧姆电损耗和接触电阻、阈电流及注入载流子的百分数等因素影响,故而在设计二极管激光器结构时往往顶层选用 n 型,衬底用 p 型,使顶层导电率来降低接触电阻。为减少高功率输出时对腔面损伤,可选用高临界光强材料或在腔面镀膜提高损伤阈值;也可采用增大光束尺寸的办法来降低腔面功率。由图 2 的特性中看到,在二极管激光器和安装板之间使用热沉是达到外部散热简单而有效的办法。热沉材料要有高的导热率和扩散率,一般可使用 Cu(导热率为 $4.0\text{W}/\text{cm}\cdot\text{K}$)、CeO 和 Si,而性能最好的是人造金刚石,它的导热率比 Cu 高 5 倍多。这些材料热沉虽然稍稍增加了激光器组件的热电阻(它决定了稳态热传递和温度),但准连续工作时在相当短的脉冲时间里产生的热量可被热沉传导到更大面积的安装板上,短期的温升可以降低。

上述一些冷却措施仅仅对较低功率器件和在较低的工作周期时是有效的。以往单个线阵列在室温下连续工作输出一般为 10W 左右,二维阵列可以获得每平方厘米千瓦的峰值功率,但工作因子只能限制在百分之几。对于如 YAG 和 GGG 类的板条固体激光器,它们能承受大于 $100\text{W}/\text{cm}^2$ 的热负荷,说明在不损坏固体激光器基质条件下,二极管激光器可泵浦输出连续或长脉冲功率为每平方厘米几百瓦。如果二极管激光器的效率是 25%,意味着阵列会产生每平方厘米千瓦的废热。1982 年斯坦福大学发明了一种二极管阵列激光器冷却技术,它由大规模集成电路和高能激光反射镜的冷却概念发展而来。这种技术称为微沟道热沉,至今已有多形式^[1]。微沟道热沉材料大多用 Si 或 Cu,一般沟道宽几十微米、深 $200\mu\text{m}$,其中要考虑到阵列各处温度的一致性。热沉表面抛光,要求有很高的平面度,用标准的钢压模连接技术把阵列固定在顶部,沟道里流过加压的水或其它冷却液,可以带走每平方厘米千瓦的热量(在机载激光武器中,使用机翼中储存的低温燃料,可带走 $1.8\text{kW}/\text{cm}^2$ 的热量),可使二极管阵列在连续的或百分之几十占空因子的准连续状态下工作。它的结构与二极管的一维和二维阵列的装

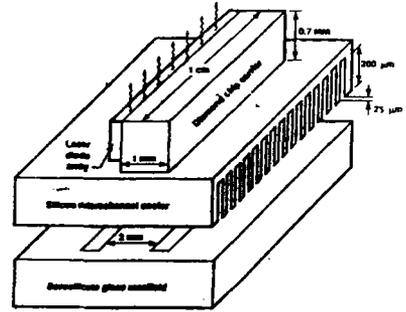


Fig. 3 Schematic diagram of a 1 cm long diode bar on a silicon microchannel cooler

架相容,可应用于边发射的解理阵列,也可用于面发射的阵列。图3是一个具有微沟道热沉的二极管激光条元件示意图。1cm长线阵列冷却面积为 $2\text{mm} \times 10\text{mm}$ 。当外加压力 50Pa ,水流速度为 $4.6\text{cm}^3/\text{s}$ 时,元件连续工作输出 22W ,电-光效率为 20% 。如果元件是由三个 4mm 长的线阵列组成的面阵列,冷却面积是 $10\text{mm} \times 4\text{mm}$,沟道宽 $50\mu\text{m}$,则热阻抗是 $0.094^\circ\text{Ccm}^2/\text{W}$ 。在相同水压下,水流速度是 $6.2\text{cm}^3/\text{s}$ 。组件在 $50\mu\text{s}$ 宽脉冲、重复频率 8kHz 时,平均输出功率 15.7W ,电-光效率为 25% ^[2]。类似的Si微沟道结构也已用于面发射二极管激光器阵列, 3×10 单元的二维阵列,在 $200\mu\text{s}$ 脉宽、 1kHz 重复频率下输出功率为 6.8W ^[3]。

五、高功率阵列激光器的发展水平

近年来二极管阵列激光器技术飞速发展,输出功率逐年提高。连续状态工作的激光器推出的产品有1988~1989年的 5W , 10W ;1990~1991年的 15W , 20W ;1993年可买到 30W 的阵列。前三年实验室单条线阵列曾达到连续输出功率 76W 。现在光谱二极管公司研制的 1cm 长线阵列,使用金刚石做热沉,输出功率已达 120W ^[4]。麦道公司也正在制造准直大功率一维阵列,连续输出 100W ^[5]。准连续状态工作的激光器,峰值功率为 50W , 120W , 1500W 和 $3\text{kW}/\text{cm}^2$ 的阵列已商品化。实验室阵列的最大功率密度达 $40\text{kW}/\text{cm}^2$ ^[6]。美国麦道公司和利弗莫尔实验室一直致力于研究高功率阵列激光器,近两年他们研究阵列堆叠技术和微沟道热沉有很大进展。1991年麦道公司演示一个 $4.5\text{cm} \times 9\text{cm}$ 的面阵列,它由900多个二极管激光条组成,峰值功率超过 45kW ,脉宽为 $240\mu\text{s}$ 时能量达 10J 以上。最近该公司为钽玻璃板条激光器制造了一个大泵浦源,阵列组件包含6500个激光条,输出峰值功率为 350kW ^[5]。现在他们正准备将此类组件发展成为 600kW 的阵列,这种组件将能产生两倍于目前钽激光器最高的平均功率^[7]。

利弗莫尔长期进行能源部最大的激光聚变和激光同位素分离计划工作,半导体二极管激光器及其泵浦的固体激光器最终将影响这两项计划,并有许多商业和防御应用。从80年代中期他们就开展了二极管泵浦固体激光器及关键单元技术的研究。商业上的二极管组件太贵,且不能产生高重复频率、高平均功率和高通量。所以他们的目标在于开发低成本和超高功率微沟道冷却阵列和集成微型透镜元件。

经过几年来对二极管激光器制造中各工序的仔细研究,利弗莫尔现已能在可以承受的成本下生产高功率大阵列,他们用极好的工艺把激光条长度扩大为 $1\sim 2\text{cm}$,激光条与微沟道热沉连接良好。并把微沟道的直径减小到 $15\mu\text{m}$,通过这些极窄通道的层流把冷却剂厚度减至最小,使微沟道热沉阻抗进一步降低,作用区温度仅上升 10°C ;封装堆叠密度相对提高。前两年他们制造的激光条峰值功率为 90W ,脉宽 $200\mu\text{s}$,重复频率 1000Hz ,平均功率为 20W 。每天约可生产8个阵列单元,价格是每瓦峰值功率 $5\sim 7$ 美元^[8]。目前制造的激光条长 1.8cm ,峰值功率 180W ,脉宽 $100\mu\text{s}$,驱动电流 200A 。连续工作时可产生平均功率 100W ,激光条的均匀性是半峰全宽 1nm ,连续工作寿命接近 1000h 。准连续工作时重复频率从 10Hz ~几千赫(占空因子为 50%),当工作为 10^7 次时功率下降 5% ,电流要增加 3% ,封装堆叠密度为 10 条/ cm 。

一般光学元件准直二极管阵列输出的光只能在板条上产生放大的图象。为了减少束的发散并以较高的通量成象,要求发展一种微型透镜阵列来准直每个二极管激光器发射的光。这种集成微型透镜元件应具有 $f^{\#}/1$ 的性能,在衍射极限情况下其尺寸为 $100\mu\text{m}$ 。为此利弗莫尔已研制了一种成形的纤维透镜光学元件,它允许二极管阵列通量达到几十千瓦,以漂白的波泵浦

固体激光器,并在有损耗材料中能获得足够大的增益/损耗比,也能允许设计近任意泵浦封装要求的各类固体激光器^[9]。

1990 年利弗莫尔用两个堆叠 41 个 1.9cm 长激光条的面阵列组件,泵浦 Nd:YAG 板条激光器,其结构如图 4 所示。当脉宽为 100 μ s,重复频率 2.5kHz(占空因子 25%)时,获得平均输出功率 275W^[10]。1992 年仍然采用两个结构相同的面阵列组件泵浦 Nd:YAG 板条,但面阵列组件中激光条每厘米堆叠密度从 5 条增加到 10 条,两个组件共 160 条。微沟道冷却系统能带走 1.2kW/cm² 热量,占空因子提高到 35%,使总的二极管阵列峰值泵浦功率达 8kW,相当于每个组件输出平均功率 1.4kW。板条固体激光器在 1.06 μ m 输出平均功率达 1050W,创世界最高纪录^[11]。它们准备今年秋天演示平均功率为 2~3kW 的二极管泵浦的固体激光器。

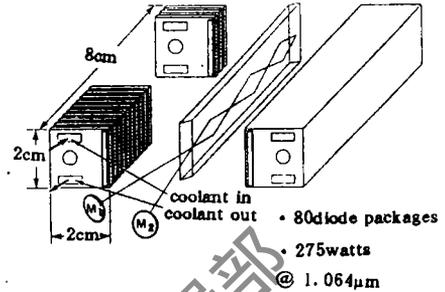


Fig. 4 High average power total internal reflection face pumped zig-zag Nd:YAG slab laser

六、小 结

半导体二极管激光器的发展推动着它在各个领域的应用,而实际应用的需要又促进了它的发展。目前二极管激光器的电-光效率最高已达 60%,工作波长从最初的 0.87 μ m 向两边延伸到蓝光和 2 μ m,连续工作寿命可达 10⁵h,脉冲工作为 10¹¹次,单个激光器连续输出超过百毫瓦。线阵列激光器连续输出功率超过百瓦,面阵列激光器准连续工作时平均输出功率超过千瓦。90 年代以来全世界激光器销售金额约 10 亿美元,而二极管激光器的销售金额每年超过 2.5 亿美元,销售总量均居各类激光器之首。

近年来由于半导体二极管阵列激光器输出功率不断提高,由它泵浦的固体激光器的输出也迈上了新的台阶。相信随着面发射二极管阵列制作工艺的日趋成熟,冷却和封装技术的不断完善,必将产生更为廉价、性能更为理想的高功率阵列激光器。二极管激光器及其泵浦的固体激光器的应用也将一改过去面貌,它们将在材料加工、激光聚变等领域与 CO₂ 激光器、传统的固体激光器媲美。一台千瓦级灯泵固体激光器,其束质是 40~60 倍衍射极限,而同等功率的二极管泵浦固体激光器束质为 2 倍衍射极限,并可用光纤传输光束,使加工更为方便。二极管激光器与其泵浦的固体激光器体积小、重量轻、供能简便和全固化的特点,更是其它类型激光器所望尘莫及的,它们定在今后的军事与空间领域大有作为,例如,战区防御中的机载激光武器,以及军用激光装备及系统中的测距与目标指示、通信与传感等。尽管眼下二极管激光器的价格较昂,但总的趋向是很快在下降。到半导体工业能数以百万计地生产微型芯片式的新一代二极管激光器时,这类激光器的价格会像集成电路块一样便宜。就像氢弹之父泰勒说的那样,“二极管激光器能级结构简单,造价低廉,大有发展前途。”

参 考 文 献

- [1] Bland T J, Niggemann R E, Parekh M B. SAE paper 831127 13th Intersociety Conference on Environmental Systems 1988

旋转波片法在低应力测量中的应用

胡德敬

(同济大学,上海,200092)

摘要: 本文提出用旋转 $\lambda/2$ 波片和分析片来代替转动物体的新方法,解决了用电光调制法测定某些物体低应力值时,物体很难转动的难题。

Application of rotating wave plate method in stress measurement

Hu Dejing

(Tongji University)

Abstract: A new method to substitute rotating wave plate and polarization analyzer method for rotating object method is proposed in this paper. A troublesome problem, that the object cannot be rotated in the stress measurement with electro-optic modulation method has been solved.

一、引言

各种玻璃材料和制品,一般在出厂前总要对产品的残余应力进行抽样检测。玻璃的残余应力包括热应力和结构应力两个方面。热应力是由于玻璃烧制过程中,各部分热胀冷缩的不均匀形成;结构应力则是由于玻璃中的结石、条纹和不匀质所造成。残余应力大到一定程度,将对玻璃制品的质量和安全使用带来很大影响。几十年来常用各种偏光应力仪对玻璃制品的应力进行定性或精度不高的定量检测。近几年已有人用电光调制法对玻璃应力进行定量测定^[1],在用这种方法测量时,为了确定测点的两个主应力方向,必须转动被测物体。对某些测试工作,如测

- [2] Munding D, Beach R, Bennett W *et al.* A P L, 1990; 57(21):2172
- [3] Mott J S, Macomber S H. IEEE Photonics Technology Lett, 1989; 1(8):202
- [4] Sakanoto M, Endriz J G, Scifres D R. Electron Lett, 1992; 28(2):197
- [5] Messenger H W. L F World, 1992; 28(12):61
- [6] Yamanaka M, Naito K, Nakatsuka M *et al.* Proc SPIE, 1991; 1501:30
- [7] Photonics Spectra, 1991; (10):50
- [8] Manes K R, Zapata L E. Proc SPIE, 1992; 1601:160
- [9] Solarz R W, Frupke W F. Signal, 1993; (1):45
- [10] L F World, 1991; 27(7):11
- [11] L F World, 1992; 28(8):9

*

*

*

作者简介:黄裕年,女,1937年2月出生。高级工程师。现从事强激光技术研究工作。

收稿日期:1993年6月23日。