

大功率二极管泵浦固体激光器的应用和发展

郑权¹, 赵岭², 钱龙生¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

(2. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要:从二极管泵浦固体激光器(DPSSL)的优势出发,指出了DPSSL向大功率方向发展并在某些领域取代其他类型激光器的趋势;概括介绍了大功率DPSSL的诸多应用领域和广阔的市场前景;并深入分析了实现大功率DPSSL输出的几种成功方案;指出了国内及早进行大功率DPSSL研究的紧迫性。

关键词:二极管泵浦; 固体激光器; 大功率

中图分类号: TN248.34 **文献标识码:** A

1 引言

自从1960年第一台红宝石激光器问世以来,固体激光器一直就处于研究工作的中心地位。进入20世纪80年代,半导体激光器(LD; Laser Diode)及其列阵(LDA; Laser Diode Array)研究工作的巨大进展极大地推动着固体激光器件、技术及应用的发展。在此基础上出现的二极管泵浦的固体激光器(DPSSL; Diode Pumped Solid-state Laser)因具有效率高、热效应小、器件结构紧凑、能获得高功率和高光束质量输出等优点,日益成熟,成为光电子行业增长最快,最令人瞩目的领域之一。特别是大功率的DPSSL在军事、医疗、科研等诸多领域有重要的用途,近年来成为国际上竞相研究开发的热点。

2 DPSSL 的优势

与传统的闪光灯相比,采用LD/LDA作泵浦源的最主要的优点是效率高。以掺钕(Nd^{3+})激光器为例,由于泵浦灯很宽的辐射光谱与钕离子吸收带匹配不好,通常灯泵浦的Nd:YAG激光器总效率低于3%,并且大功率下热效应明显,光束质量和稳定性差。而LD/LDA的发射谱线要窄许多(仅约1.5nm),还可以通过温度调谐来改变其

发射波长,使其峰值发射波长与激活粒子的吸收带理想地匹配,因而泵浦效率比灯泵浦高许多。一般来说,LD/LDA的电光转换效率为30—50%,至Nd:YAG上的光光转换效率为40%左右。这样,LD/LDA泵浦的Nd:YAG激光器总体效率在10%以上。

其次,LD/LDA泵浦的固体激光器的噪声特性好、频率稳定。由于不存在液体或气体工作物质的流动起伏噪声和泵浦灯的等离子体波动噪声,使得DPSSL的辐射噪声特性比灯泵浦优一阶以上。

另外,DPSSL具有的热光畸变小、光束质量好、稳定性好、寿命长(达10000—20000小时)、结构简单、体积小等特点,也是其它类型激光器所不能比拟的。

德国著名的工业激光公司Rofin-Sinar认为,在未来的2—5年内,DPSSL将取代灯泵浦的固体激光器。但也有专家认为,灯泵浦的高功率固体激光器比DPSSL更可靠。

现在的实际情况是:在中小功率范围内,DPSSL已在逐步取代灯泵的固体激光器、可见和紫外 Ar^+ 激光器、He-Cd激光器;在大功率范围内,kW级的DPSSL正在逐步拓展应用领域,向大功率的灯泵固体激光器和横流/轴流 CO_2 激光器提出挑战。

3 DPSSL 的发展方向

目前,DPSSL 的发展方向主要有三个:

一是高功率输出。文献[1]报道了 LDA 泵浦 Nd:YAG 激光器在 1064nm 连续输出达 3.3kW, 532nm 连续输出达 400 W,基模运转可达 200W 以上。根据按比例放大原则,其输出功率可超过 5kW 达到万瓦量级,并有可能成为激光核聚变的驱动器能源。

二是可见波段输出。经过倍频、混频和参量振荡等技术,DPSSL 在红、黄、绿、蓝、紫(如波长为 670nm、660nm、656nm、627nm、594nm、532nm、473nm、457nm、454nm、451nm、430nm)等各波段均已获得激光输出,而且多数连续波输出功率都在瓦级以上[2]。

三是紫外波段输出。DPSSL 经过三倍频、四倍频后已经获得功率数瓦的紫外激光。例如,日本三菱电子公司最近研制出波长为 266nm、平均功率达 20.5W、重复频率为 10kHz 的全固体紫外激光器。其中绿光注入功率为 105.8W、转换效率为 19.4%,没有出现饱和及光损伤现象[3],提高绿光注入将得到更高的紫外输出。

总观三个方面,高功率输出是关键,它也是获得大功率可见波段和紫外波段激光输出的前提。

应该说,高功率 DPSSL 的出现是与高功率的 LDA 飞速发展相伴的。目前,美国光谱二极管实验室公司已经有 QCW 6000W(尺寸:10×19.6mm²)的 LDA 出售。LDA 实现了高功率密度(达 2.5kW/cm²)、高电光转换效率(达 50%)和长寿命(大于 4×10⁹ 次发射)。另外,由于 2.5kW 的二极管激光阵列的孔径只有 1×1cm²,因此,可以在 10×40cm² 的口径上堆迭起 1MW 功率的 LDA,用以泵浦钕玻璃圆盘;也可以多条 LDA 在周围泵浦激光棒。而且,高功率的 LDA 价格日渐下降,为高功率 DPSSL 的进一步发展和普及应用创造了条件。

4 大功率 DPSSL 的应用

大功率的 DPSSL 有着广阔的应用前景,主要包括:

(1)材料加工:包括常规的激光加工、微加工、精密加工等。

目前,德美等发达国家已经将 2kW 和

2.6kW 大功率 DPSSL 应用于汽车部件焊接。它比同功率的 CO₂ 激光焊接机的体积小、速度快。

在微电子领域,输出为 10W 以下的单模 DPSS Nd:YAG 激光器已广泛用于激光微调机中。二倍频的 DPSSL 在微电子工业中也有许多的应用。

三倍频的 DPSS Nd:YVO₄ 激光器输出功率 1W(TEM₀₀模),光束发散角小于 0.5mrad,峰值不稳定性低于 5%,目前已取代紫外 Ar⁺和 He—Cd 激光器用于激光快速成型。

(2)同位素分离

高功率二倍频 DPSSL(绿光)可取代 Ar⁺激光器和 Cu 蒸气激光器进行同位素分离,体积小,难度低。

(3)激光核聚变

高功率的 DPSSL 预计可成为工业电力激光器,也是激光核聚变电厂驱动器的可行候选者[4]。日本已完成利用大功率 DPSSL 建立高阳激光核聚变发电厂的可行性研究工作,认为从原理上讲已经没有障碍,仅仅有待于技术上的改进和成本下降。

(4)科学研究

大功率的 DPSSL 在科学研究中有很多用户,例如作为锁模掺钛蓝宝石激光器的泵浦源,已基本取代 Ar⁺激光器。

(5)另外,大功率的 DPSSL 在医疗、检测、分析、通讯、投影显示以及军事国防等领域也有极其重要的应用价值。

5 大功率 DPSSL 的实现方案

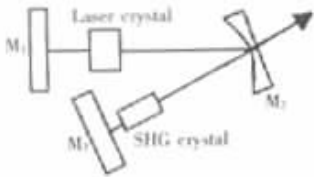
目前,较为成功的大功率 DPSSL 的实现方案有以下几种:

5.1 端面泵浦瓦级连续波输出的 DPSSL 方案:

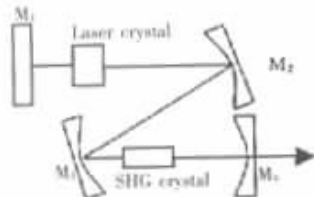
实验证明,采用折迭腔结构较直腔要好[5]。这种腔的优点是将基频光与倍频光分开,从而避免了激光晶体对倍频光的吸收。同时可产生两个束腰,将激光晶体与倍频晶体分别放在两束腰处,可获得较大的泵浦光功率密度和较高的倍频转换效率。

折迭腔一般还包括两种:一种是三镜腔结构,或称作 V 形腔结构(如图 1A),这种腔存在像散,输出的激光光斑是椭圆的,一般可以用布儒斯特角放置的波片进行像散补偿,兼有选模的作用。另一种是四镜腔结构,又称为 Z 形腔结构(如图

1B),该结构可以输出圆光斑,但调整较为复杂。



(a)V-shaped cavity



(b)Z-shaped cavity

Fig.1 Schematic of folded cavity

折迭腔装置同样也适用于侧泵浦情形。例如,美国 LLNL 国家实验室在 1992 年曾采用折迭腔方式,用微通道冷却高功率 LDA 双侧泵浦,实现了大于 1kW、占空比为 35%、光光转换效率 25% 的激光输出^[6]。

5.2 侧面泵浦的百瓦—千瓦级准连续输出的 DPSSL 方案

近年,国外研究人员曾非常完善地安排研究过许多结构。最成功的高平均功率效率装置有^[7]:

- (1)用光纤耦合 LDA 泵浦 Yb:YAG 圆盘;
- (2)用光纤耦合 LDA 泵浦 Nd:YAG 棒;
- (3)用堆迭 LDA 直接泵浦 Nd:YAG 棒。

其中,第三种结构是可按比例放大到 5kW 以上功率输出的较好结构。其激光器系统如图 2 示。

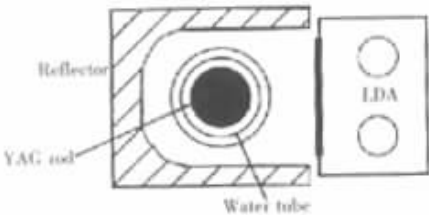


Fig.2 YAG rod pumped directly by piled LDA

一般采用对称平平谐振腔结构,Nd:YAG 棒置于陶瓷腔内,用水冷却,堆迭式 LDA 直接对称地安装于陶瓷腔一侧。

与第三种结构类似的,可以采用多个 LDA 对称分布放置于 Nd:YAG 周围的方法,也可获得高功率输出(如图 3)。

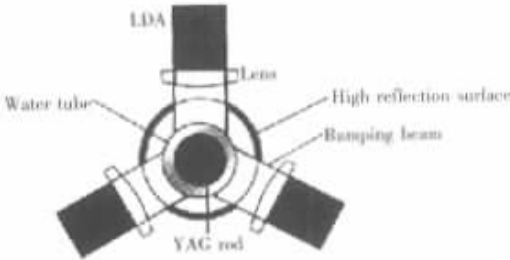


Fig.3 Many LDAs placed around the YAG rod

当然,也可以采用级联放大的方法(如图 4)。除功率大以外,其优点还包括激光晶体中产生的热应力双折射可通过在对称光路位置上引入 90 度石英旋转器而补偿。有实验证明^[8],在玻璃棒之间使用 90 度石英旋转器,原先约为 10% 的热感应双折射损耗已被补偿,降低到 1%。这种补偿技术对大功率二极管泵浦的激光器是有益的。

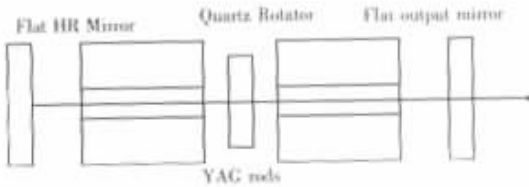


Fig.4 High power gained by serial YAG rods

6 展 望

目前,国外千瓦级的大功率 DPSSL 已进入工业和国防等领域的实用阶段,正在形成产业,更高功率的 DPSSL 的科研成果和产品源源不断地涌现。

相比之下,我国在低功率 DPSSL ($P < 200\text{mW}$) 技术比较成熟,在产业化方面也正蓬勃发展,因产品售价低廉,已占领了国际市场的大半份额。瓦级 DPSSL 实验室成果近几年国内也有少量报道,但未能形成产品,离产业化还有很大差距。至于百瓦和千瓦级的 DPSSL 器件,由于缺少高功率的 LDA 等原因,国内尚未开展这方面的研究工作。

至 1999 年 6 月,国内的北京半导体所、上海

光机所和石家庄电子 13 所等单位先后研制成功 10—1200W 的连续和准连续二极管阵列,为以后国内开展大功率 DPSSL 的研究工作奠定了基础。

面对国际上千瓦级 DPSSL 器件性能的不断提高和我国的国情,及早进行大功率 DPSSL 的研究有着重大的理论和应用价值,早日实现其产业化也将带来巨大的经济和社会效益。

参考文献:

[1] 从征. 两种输出 3.3kW 的二极管抽运固体激光器[J]. 激光与光电子学进展,2000,(2):46—47.

[2] 友清. 可见光固体激光器的新进展[J]. 激光与光电子学进展,1999,(3):11—15.

[3] 於祖兰. 输出功率 20.5W 的紫外全固态激光器[J]. 激光技术,2000,24(2):89.

[4] 从征. 二极管泵浦固体激光器的发展及其在激光核聚变和工业上的应用[J]. 激光与光电子学进展,1999,(3):1—7.

[5] 何京良,王建明,侯玮,赵宗源. 激光二极管泵浦 Nd:YVO4/LBO 腔内倍频瓦级连续波绿激光器[J]. 光学学报,1998,18(7):862—865.

[6] 吕百达,邵怀宗,林菊平,代明. 高功率二极管泵浦固体谐振腔的进展和分析[J]. 激光技术,1997,21(6):360—364.

[7] 友清. 二极管泵浦的千瓦级固体激光器[J]. 激光与光电子学进展,1999,(3):7—11.

[8] Hirano Y, Koyata Y, Yamamoto S, Kasahara K, Tajime T. 208-W TEM₀₀ operation of a diode-pumped Nd:YAG rod laser[J]. OPTICS LETTERS,1999,24(10): 679—681.

[9] 刘伟仁,钱龙生,余锦. LD 泵浦的紧贴式产业化固体绿激光器的研究[J]. 光学 精密工程,1999,7(2):21—25.

[10] Golla D, Knoke S, Schone W, Ernst G, Bode M. 300W cw diode-laser side-pumped Nd:YAG rod laser. OPTICS LETTERS,1995,20(10):1148—1150.

[11] Sumida David S, Betin Alexander A, Bruesselbach Hans, Byren Robert. Diode-pumped Yb:YAG catches up with Nd:YAG[J]. Laser Focus World,1999,(7):63—70.

[12] Tei K, Kato M, Niwa Y, Harayama S. Diode-pumped 250W zigzag slab Nd:YAG oscillator-amplifier system[J]. OPTICS LETTERS,1998,23(7):514—516.

[13] 刘伟仁,钱龙生,余锦. LD 泵浦的 473nm 全固体蓝激光器[J]. 光学 精密工程,2000,8(2):133—135.

[14] Honea Eric C, Ebbers C A, Beach R J, Speth J A, Skidmore J A. Analysis of an intracavity-doubled diode-pumped Q-switched Nd:YAG laser producing more than 100W of power at 532nm[J]. OPTICS LETTERS,1998,23(15): 1203—1205.

Application and development of high power diode-pumped solid-state laser

ZHENG Quan¹, ZHAO Ling², QIAN Long-sheng¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China;
2. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract:Based on the advantages of diode-pumped solid-state laser(DPSSL) over others, the trends that DPSSL advances towards high power and would take over other lasers were pointed out. The wide application fields, as well as the bright market future of high power DPSSL were also introduced. Some successful schemes for obtaining high power output were analyzed in detail. It's very important to do research on high power DPSSL as soon as possible for our country.

Key words:diode-pumped; solid-state laser; high power

作者简介:郑权(1973—),男,现在中国科学院长春光机所攻读博士学位,主要从事大功率及高性能全固体激光器的研究。