

新型全固化 Nd YAG 激光器

蓝信钜 黄维玲 刘耀兰

(华中理工大学激光技术与工程研究院, 武汉, 430074)

摘要: 介绍了激光二极管泵浦 Nd YAG 激光器(DPL)的优点和近期进展情况; 还讨论了 DPL 的基本原理和不同的结构型式。

关键词: 激光二极管泵浦 Nd YAG 激光器

Novel all solid Nd YAG lasers

Lan Xinju, Huang Weiling, Liu Yaolan

(Institute of Laser Technology & Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: Starting from the point of the advantages and recent progress of laser diode pumped Nd YAG laser (DPL), this paper summarizes the fundamental principles and various structures of DPL recently developed.

Key words: laser diode pumped Nd YAG laser

一、引言

全固化 Nd YAG 激光器即是采用激光二极管(LD)取代传统的气体放电光源(闪光灯)作为泵浦源,从根本上消除了气体放电光源泵浦时热效应的影响,而且去掉了庞大的电源和水冷系统,从而实现了 Nd YAG 激光系统的全固体化。

采用激光二极管作为泵浦源有如下优点:

第一,激光二极管与非相干的闪光灯相比,主要是它的体积小、重量轻、效率高、寿命长,LD 的电光转换效率约为 25%,在 200mW 的平均输出功率情况下,耗散在管子上的功率只有瓦级,故采用自然空气冷却即可,这为激光系统小型化提供了有利条件。

第二,LD 的发射光谱与 Nd YAG 的吸收光谱基本上相重合,而且 LD 的波长可用温度调谐到固体激光的中心波长处。由于 Nd YAG 的量子效率比较高,进入激活介质的热能很少,因此无需水冷却,这就大大简化了机械装置。而且 LD 输出的光能准直和聚焦,若采用纵向端面泵浦,可与固体激光的 TEM₀₀模体积相匹配,无需腔内光阑就可以获得基模输出。

12 Roach W R, Balbexg. Solid State Commun, 1971;(9): 551~ 555

* * *

作者简介: 查子忠,男,1936年10月28日出生。教授。现从事激光防护研究。

收稿日期: 1996-05-09 收到修改稿日期: 1996-06-16



第三,由于避免了闪光灯泵浦所导致激光介质的热变形,故改善了光学质量。

由于激光二极管泵浦的固体激光器具有 LD 和 Nd:YAG 激光器的双重优点,而摒弃了两者原有的缺点,故近几年来在国际上发展极为迅速,已成为重要发展方向之一,并得到广泛的应用,诸如微细加工、空间卫星通信、集成电路修复、图象处理等。

二、激光二极管泵浦 Nd:YAG 激光器的发展概况

早在 60 年代初人们就注意到 LD 作为固体激光器泵浦源的发展前景,但是,由于当时 LD 的输出功率很低,且要在液氮温度下工作,故未能得到发展,但在 60 年代已经证明了这种泵浦方式的可行性。如 1968 年 Ross 使用了冷却到 170K 的 LD 成功地泵浦了 Nd:YAG 激光器,有激光输出但无实用价值。近几年来,由于高功率 LD 的发展,又引起人们对其研究的兴趣,世界上各工业发达国家都投入相当大的人力和财力进行研究开发。

在 1993 年美国 McDonnell Douglas 宇航公司采用 LD 阵列泵浦板条 Nd:YAG 激光器,在输入电功率 200W 情况下,产生 30W 的泵浦功率,获得 7.5W 的基模(TEM_{00})输出,总效率为 4%。Continuum 公司推出了一系列 LD 泵浦的 Nd:YAG 激光器,其中 HPG-300 型获得高能量、单模脉冲激光输出,它是用准连续 LD 阵列作泵浦源,重复频率为 300Hz,输出 1064nm,激光能量为 3mJ,用 LBO 倍频获得 532nm 的绿光,再用 β -硼酸钡倍频得到 266nm 的激光,脉冲能量为 0.3mJ,混频产生 355nm 的激光,能量为 0.6mJ^[1]。到 1995 年报导了 Spectra Physics Lasers Inc. 生产了一种用光纤耦合激光二极管叠堆(bars)技术泵浦的高功率 Nd:YAG 激光器,泵浦功率达到 40W,输出激光连续功率为 2.5W 至 9.5W, Q 开关激光输出的脉冲能量为 1.5mJ/pulse^[2]。T. M. Bear 介绍了一种新颖的 LD 阵列端面泵浦 YAG 激光器,其产品已达到 10W 输出功率,而且 LD 制造者已改进制作了一种新的“叠堆”(bars)形式,从而提高了 LD 阵列的功率^[3]。Stanford University 研制了一种高功率侧向泵浦“Z”字形板条 YAG 激光器,用 25 根光纤耦合 LD 叠堆侧向泵浦 YAG 激光器,输出连续功率为 40W,光-光转换效率达到 19%^[4]。

国内上海光机所于 1990 年用日本产的 LD 首次实现了 DPL,同年又用国产的 LD 成功地泵浦了 YAG 激光器出光。随后清华大学、浙江大学等单位也开展了 DPL 的研究,但都还处于基础研究阶段。于 1993 年西南技术物理研究所用 LD 端面泵浦 Nd:YAG 激光器,获得 1064nm 波长连续 TEM_{00} 模激光输出,输出功率为 0.65W,光学系统耦合效率为 60%,斜率效率为 51%,光-光转换效率达到 40.6%,连续稳定工作数小时^[4]。上海光机所用国产量子阱 LD 列阵(MQW-LDA)泵浦调 Q Nd:YLF 激光器,以及用声光调 Q、腔内倍频 Nd:YAG 激光器,输出倍频光的脉冲能量为 0.4 μ J,脉宽为 70ns,峰值功率为 6W^[5]。清华大学用 LD 泵浦 Nd:YAG 激光器及腔外倍频,产生 1064nm 的激光功率为 31.8mW,倍频之后的输出功率为 0.2mW,倍频效率为 2%^[6]。

激光二极管泵浦固体激光器的发展,强烈地刺激了大功率 LD 管的发展,1986 年时输出功率只有 100mW,1988 年实验室水平就提高到了 8W,商品达到 5W,1989 年达到 10W,到 1993 年已达到 30W 连续波阵列,美国光谱二极管公司研制出连续功率为 120W 的 LD 列阵。还报导已研制出准连续运转的 LD 阵列,其功率达到 1500W,功率密度为 3kW/cm² 的水平。器件的结构型式已从单条 LD 发展成一维 LD 阵列、二维 LD 阵列、二维堆叠阵列、面发展 LD 阵列。LD 的结构由较简单的增益波导结构发展为折射率波导结构,量子阱结构等等。国际市场上

LD 的价格也在逐年下降, 预测大功率 LD 的价格最终将降到 20 美分/瓦。美、日科学家预言, 闪光灯泵浦的固体激光器不久将被 DPL 所取代。

三、激光二极管泵浦 Nd:YAG 激光器的原理

1. Nd:YAG 的吸收光谱

Nd:YAG 吸收光谱的中心波长位于 810nm 处最强, 如图 1 所示。相应的能级跃迁为 $^4I_{9/2} \rightarrow ^4F_{5/2} + ^2H_{9/2}$, 吸收带的宽度约为 30nm。对 GaAs, GaAlAs 二极管的发射谱具有强烈的吸收, 它的光谱特性受温度变化影响较小, 量子效率高。

2. GaAs 激光二极管的发射光谱

当注入半导体激光二极管的电流高于阈值电流时, 发射光谱的宽度急剧变窄, 谱线中心波长的强度迅速增加而形成激光输出。它虽然比普通光的单色性好, 但因半导体的特殊电子结构, 受激复合辐射发生在由许多子能级组成的导带和价带之间, 故激光谱线宽度比固体或气体激光器的宽得多。在室温下, GaAs 激光器发射的激光谱线宽度约有几个纳米;

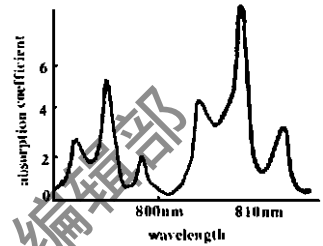


Fig.1 Absorption spectrum of Nd:YAG laser

而且激光器在超过阈值电流时, 发射光谱会出现多个峰, 如图 2 所示。而且峰值波长会随温度的不同而变化, 在低温时为 840nm, 室温时则为 902nm。实验证明: 随着温度的增加, 峰值波长向长波移动。所以还可利用改变温度来移动波长, 使之与 Nd:YAG 吸收光谱相匹配。

由于 Nd:YAG 激光介质在 808nm 附近有三个吸收峰, 其中 808nm 处的吸收系数最大, 其吸收宽度约为 1nm, 而 LD 激光波长在 810nm 处有较窄的谱线宽度(0.02nm~2nm), 与 Nd:YAG 正好匹配;

但 LD 光谱随温度及注入电流变化非常灵敏, 为了保证使光谱匹配, 必须设置调整 LD 光谱的温度控制装置。由于两者的光谱匹配较好, 所以其总体效率比闪光灯泵浦要提高 5~10 倍。

四、激光二极管泵浦 Nd:YAG 激光器的结构型式

概括起来有直接端面泵浦、光纤耦合端面泵浦和侧面泵浦三种结构型式。现分别介绍如下。

1. 直接端面泵浦

其结构型式如图 3 所示。包括三个部分: LD 泵浦源(由 LD 阵列、驱动源和致冷器组成), 光学耦合系统和 YAG 激光器。Nd:YAG 激光介质为圆柱状, 尺寸一般为 $\phi 3\text{mm} \times 5\text{mm}$ 左右, 它的左端面镀有多层介质膜, 对泵浦光 808nm 高透、对 1064nm 高反, 腔的输出镜为凹面镜, 镀有多层介质膜, 对 1064nm 部分透射(透过率为 5% 左右)。

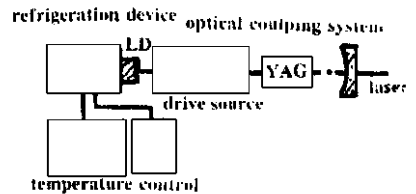


Fig.3 Direct end surface pump YAG laser

LD 阵列发射的泵浦光, 经光学耦合系统聚焦到 YAG 晶体的端面上。这种结构型式紧凑, 转换效率高, 基模光强分布较好。但这种结构散热效果差, 故一般只能在低功率情况工作。

2. 光纤耦合端面泵浦

这种结构的框图如图 4 所示。可采用多束光纤将二维 LD 阵列的每个 LD 管发出的光以不同的角度会聚到 YAG 激光介质的端面或侧面上。这种方式的优点是灵活方便,降低了对器件调整技术的要求,通过光纤耦合的泵浦光发散角小、圆对称、与振荡激光在空间上匹配好。

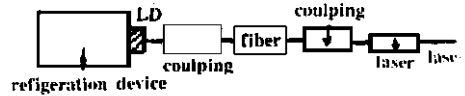


Fig. 4 Fibre coupling end-surface pump laser

3. 侧面泵浦

其结构型式如图 5 所示。LD 泵浦光投射到 YAG 激光介质的侧面;其泵浦源多采用 LD 阵列,这种方式散热效果好,激光介质尺寸可大,泵浦光可采用多个 LD 阵列。提供较强的泵浦光,故适合于大功率运转。

此外,由于 LD 的输出功率及退化机理与温度密切相关,对半导体激光器,特别是连续运转的 LD,必须采取致冷措施和温度控制,使之能在恒定温度下工作,以保持激光器工作的稳定性。

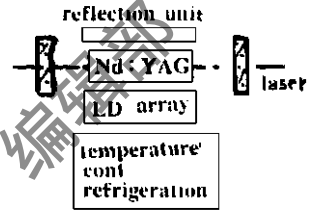


Fig. 5 Side-surface pump Nd:YAG laser

半导体致冷器通常是采用帕尔帖效应进行电-热转换的装置。当通直流电之后,由于载流子在半导体材料和金属材料中势能不同,载流子通过半导体-金属接触时势能发生变化,冷端吸收能量,热端散射能量,这样就实现了电-热转换。

同时,光学耦合系统的作用:由于 LD 发射的是椭圆形光,其椭圆度表现为垂直方向发散角 θ_{\perp} > 水平方向发散角 θ_{\parallel} ,为把椭圆象散光束整形成圆形光束,必须通过透镜系统(一般采用正交的柱面透镜系统)来校正椭圆象散光束。其次,要使泵浦光与振荡光达到有效的模式匹配,也要通过光学耦合系统。即使泵浦光经光学系统聚焦后,其功率密度超过激光器的泵浦阈值功率密度,泵浦光的光斑应和激光器的基模光斑相匹配(一般应小于或等于)。并使泵浦光聚焦后的发散角与激光器腔内发散角相匹配,使之两者交迭效率最高。

参 考 文 献

- 1 Anderson S G. L F World, 1993; 29(11): 49
- 2 L F World, 1995; 31(8): 111
- 3 Nighan Jr W L. L F World, 1995; 31(5): 97
- 4 Shine R J, Alfrey Jr A J, Byer R L. Opt Lett, 1995; (20): 459
- 5 巩马理,万作文,金 锋 *et al.* 光学学报, 1994; 14(2): 143~ 145
- 6 沈小华,周复正,朱三文 *et al.* 光学学报, 1993; 13(1): 7~ 11
- 7 霍玉晶,沈德忠,蔡金星 *et al.* 中国激光, 1993; 20(5): 387~ 388

* * *

作者简介: 蓝信钜,男,1934 年出生。教授。现主要从事固体激光器件及激光技术领域的教学和科研工作。

收稿日期: 1996-03-11 收到修改稿日期 1996-07-16