



大功率全固化固体激光器的研究

摘要：大功率全固化固体激光器正逐步取代传统的灯泵浦固体激光器，已广泛应用于工业领域。本文报道了侧面泵浦输出功率高达 60W 的 Nd:YAG 激光器，并对激光器结构和输出特性进行了详细的研究。用户使用表明，该激光器转换效率高、使用寿命长、结构紧凑、整机性能可靠。

关键词：激光二极管，侧面泵浦，Nd:YAG 激光器

Study of High-power Diode-Pumped Solid-state Lasers

Abstract: Diode-pumped solid-state lasers are replacing flashlamp-pumped solid-state lasers and are widely used in industries. A side-pumped 60W Nd:YAG laser is reported in this paper and the structure and output characteristics of the laser are studied in detail. It is shown that the laser is compact, long-time and reliable.

Keywords: laser diode, side pump, Nd:YAG laser

一、引言

第一台连续 YAG 激光器于 1964 年实现运转，近 40 年来 YAG 激光器一直与 CO₂ 激光器同受重视，是第二类最重要的工业激光器，目前世界范围内销售的商品 YAG 激光器已有 500 种，但从 1998 年开始，Nd:YAG 激光器的市场占有率和销售额已升为第一位。

传统的固体 YAG 激光器，通常由掺钕钇铝石榴石晶体棒，泵浦灯、聚光腔、光学谐振腔、电源及制冷系统组成，其转换效率为 2%到 3%。由于泵浦灯发射的光谱只有极小部分被晶体棒所吸收并转换成激光能量，大部分注入电功率转换成热能，其直接害处一方面表现为大量的热能造成激光晶体不可消除的热透镜效应，使激光光束质量变差；另一方面整个激光器需要庞大的制冷系统，体积很大。泵浦灯的寿命约为 300 到 1000 小时，操作人员需花很多时间频繁的换灯，中断系统工作，使自动化生产线的效率大大降低。有关专家认为，灯泵浦固体激光器的发展已到尽头，技术上没有大的发展空间，二极管泵浦固体激光器（全固化固体激光器）将取代灯泵浦固体激光器。

二极管泵浦固体激光器的技术核心包括光束耦合、光束质量、电源技术、控制系统及系统集成。二极管泵浦技术的出现，为固体激光器注入了新的生机和活力，使固体激光器的一场革命，这是固体激光器的发展方向。近年来由于大功率激光二极管制造工艺的成熟和生产成本的降低，使二极管泵浦固体激光器的研究得到了飞快的发展，且已正式进入商品化。世界著名的激光公司 Rofin-Sinar 所销售的激光工业加工设备中 60% 已是二极管泵浦的固体激光器。

与传统灯泵浦固体激光器比较，二极管泵浦固体激光器具有以下优点：

- (1) 转换效率高：正如图 1 所示，由于半导体激光的发射波长与固体激光工作物质的吸收峰相吻合，加之泵浦光模式可以很好地与激光振荡模式相匹配，从而光光转换效率很高，已达 50% 以上^[1]，整机效率也可以与二氧化碳激光器相当，比灯泵固体激光器高出一个量级，因而二极管泵浦激光器可省去笨重的水冷系统，体积小、重量轻，结构紧凑。

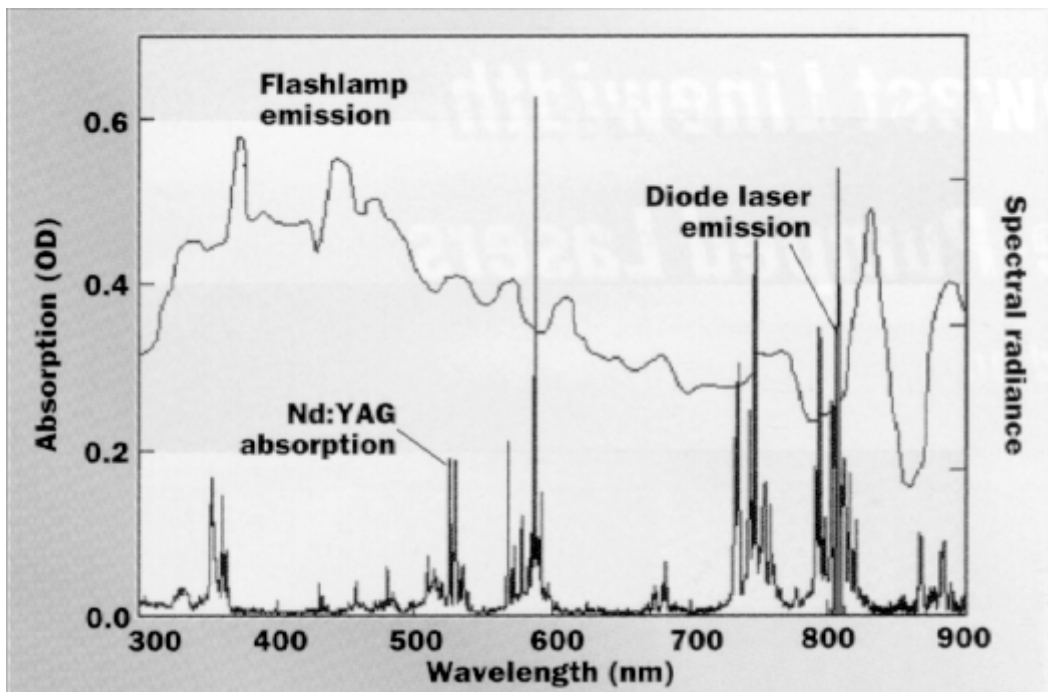


图 1 激光二极管和泵浦灯的发射谱及 Nd:YAG 晶体的吸收谱

Fig. 1 Emission spectrum of laser diode and lamp and absorption spectrum of Nd:YAG crystal

- (2) 性能可靠、寿命长：激光二极管的寿命大大长于闪光灯，达 15000 小时以上，而闪光灯的寿命只有 300-1000 小时。激光二极管的泵浦能量稳定性好，比闪光灯泵浦优一个数量级，性能可靠，可制成全固化器件。运行寿命长，成为至今为止唯一无需维护的激光器，尤其适用于大规模生产线。
- (3) 输出光束质量好：由于二极管泵浦激光的高转换效率，减少了激光工作物质的热透镜效应，大大改善了激光器的输出光束质量，激光光束质量已接近理论极限 $M^2 = 1$ 。激光二极管阵列的功率虽然已可以达到很大，但本身输出光束发散角大，且发射波长有限，而用二极管泵浦激光则可以大大改善其光束质量，并且可扩展发射波长。这就是用二极管泵浦激光器，而不是直接将激光二极管应用于工业上的原因。

二、激光器结构

1. 基本结构

为了获得大功率的激光输出，将三个大功率激光二极管阵列排在激光晶体周围，在侧面将二极管激光能量耦合到激光晶体上，其结构见图 2。由于二极管激光束的发散角很大，达 40° ，激光束需经柱面镜聚焦到激光晶体上，激光晶体用导流管包围，冷却水在导流管及激光晶体表面间流动，使晶体冷却。导流管的另一作用是防治冷却水污染激光二极管。合理的设计使二极管激光能量有效地耦合到激光晶体上，并有效地为 Nd:YAG 激光束振荡放大所利用。

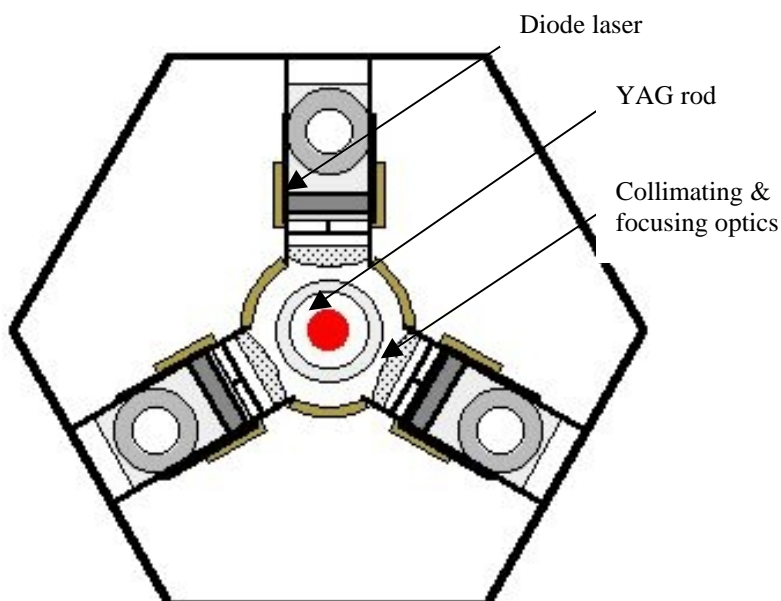


图 2 侧面泵浦结构

Fig. 2 Structure of side-pumped lasers

2. 激光二极管驱动电源

激光二极管驱动电源以单片机为核心，由电源模块、控制电路、保护电路、通信模块、状态指示与电流显示电路组成。该系统最高连续输出电流可达 50A，二极管偏置电压可达 500VDC。在该全固化固体激光器中，电流设计为 40A，二极管偏置电压 20VDC，是为连续输出 60W 激光功率的激光器提供驱动和控制的专用系统。

3. 激光器冷却系统

冷却系统由压缩机、膨胀阀、冷凝器、热交换器、水泵、水箱、流量开关、水流计等组成。根据激光器的冷却要求选择水流量及并设定水温。一般情况下，激光二极管的冷却水温设定在 25℃。最大制冷量要求应为注入到激光二极管的电功率减去激光功率再加上水泵的发热量。

4. 激光谐振腔

标准的激光谐振腔由一个全反镜和一个输出耦合镜组成。考虑激光晶体的热透镜效应，将激光晶体等效成一个焦距为 f_0 的透镜^[2]。根据有关文献，我们可以设定 $f_0=300\text{mm}$ ，将激光谐振腔设计成一个稳定腔。为了得到小的发散角，则通过增加谐振腔长度来实现，其代价为激光功率的减少。

三、激光器的输出特性

在我们的激光器中，激光器的谐振腔长为 160—200mm，使用平面全反镜。既有平面输出镜，也用凹面输出镜，输出透过率在 10%—20%，水温设定在 25℃。图 3 表示 Nd:YAG 激光输出功率与驱动电流的关系，图 4 表示光光转换效率与驱动电流的关系。由图可知，Nd:YAG 激光功率为 60W，光光转换效率高达 36.4%。

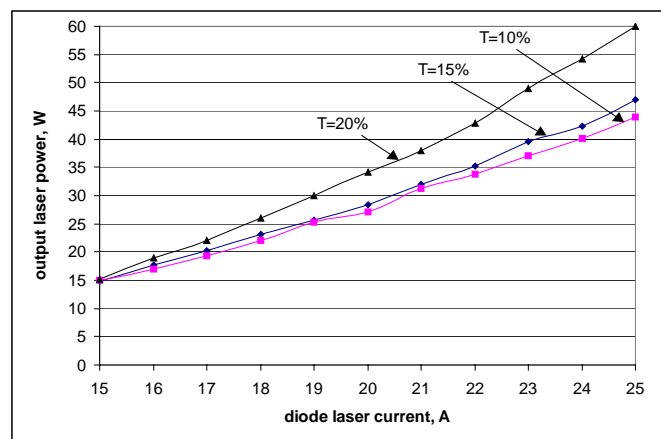


图 3 Nd:YAG 激光输出功率与驱动电流的关系

Fig. 3 Nd:YAG laser power vs driving current

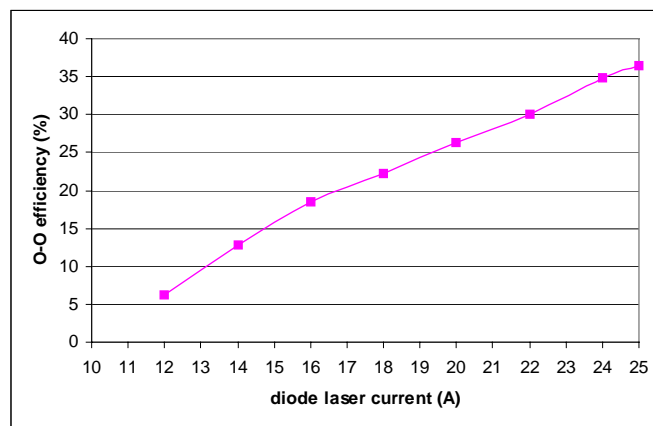


图 4 光光转换效率与驱动电流的关系

Fig. 4 O-O conversion efficiency vs driving current

为了考验激光的长时间工作稳定性，让激光器连续工作 8 小时，其输出功率亦十分稳定，功率计显示激光功率变化值小于 0.1W，表明激光输出稳定度优于±0.1%。

四、结束语

设计制造了 60W 全固化固体激光器，其功率稳定度优于±0.1%。目前，该产品已批量生产并投放市场，并逐步取代传统的灯泵浦固体激光器。

参考文献

1. JH Liu, GM Li, CQ Wang, ZS Shao and MH Jiang, Thermal lens stabilized flat-flat resonator 15W CW Nd:YVO₄ laser end-pumped by a diode laser array, 1999 International Conference in Industrial Lasers (IL'99), p.297
2. W. Koechner, Solid-state Laser Engineering, 3rd edition, Springer-Verlag, Berlin (1992), pp.352-362



作者简介：陈义红博士，1979 年至 1986 年就读于华中科技大学激光技术专业；1986 年至 1993 年为华中科技大学激光技术国家重点实验室副教授；1994 年至 2000 年新加坡精迪制造技术研究院研究员，1998 年获新加坡南洋理工大学博士；1998 年至 2000 年，受聘为南洋理工大学博导。在国内外重要刊物上发表论文 32 篇。为中国光学学会和美国工程光学学会会员，中国《激光技术》杂志编委。