半导体激光端面泵浦固体激光器

Research of The Diode End-pumped Solid State Laser

半导体激光端面泵浦固体激光器

陆璇辉 黄慧琴 浙江大学光学研究所; 蒋晓崎 杭州师范学院

Xuanhui Lu Huiqin Huang ; Institute of Optics, Zhejiang University

摘要：本文主要介绍了端面泵浦固体激光器的基本原理和结构，并列举了国内外的几种高功率端面泵浦固体激光器,简述了高功率端面泵浦固体激光器的应用发展状况。

关键词：激光二极管泵浦固体激光器；端面泵浦

Abstract: In this paper we mainly introduce the basic principle and structure for the end-pumped solid state laser, and we also enumerate several design of the high-power end-pumped solid state lasers .In the end of this paper we simply introduce the international application and development of the high-power end-pumped solid state lasers.

Key words: Diode Pumped Solid state Laser; end-pumped

1.引言

激光是近代科学技术中的重大发明之一。随着半导体激光二极管技术的重大突破，固体激光器得到强劲的发展，其应用领域不断地扩展。其中最为重要的是用半导体激光器和半导体列阵激光器泵浦固体激光器技术的发展，这是一种高效率、长寿命、光束质量高、稳定性好、结构紧凑小型化的第二代新型固体激光器，目前在空间通讯，光纤通信，大气研究，环境科学，医疗器械，光学图象处理，激光打印机等高科技领域有着独具特色的应用前景。

激光二极管泵浦固体激光器（Diode Pumped Solid state Laser－DPSSL）的种类很多，可以是连续的、脉冲的、调 Q 的，以及加倍频混频等非线性转换的。工作物质的形状有圆柱和板条状的。而泵浦的耦合方式可分为端面泵浦和侧面泵浦，其中端面泵浦又可分为直接端面泵浦和光纤耦合端面泵浦两种结构。

相对于侧面泵浦方式，端面泵浦的效率较高。这是因为,在泵浦激光模式不太差的情况下，泵浦光都能由会聚光学系统耦合到工作物质中，耦合损失较少；另一方面，泵浦光也有一定的模式，而产生的振荡光的模式与泵浦光模式有密切关系，匹配的效果好，因此，工作物质对泵浦光的利用率也相对高一些。

正是由于端面泵浦方式效率高、模式匹配好、波长匹配的优点近年来在国际上发展极为迅速，已成为激光学科的重点发展方向之一。它在激光打标、激光微加工、激光印刷、激光显示技术、激光医学和科研等领域都有广泛的用途，具有很大的市场潜力。

2.端面泵浦固体激光器的泵浦耦合方式

2.1 直接端面泵浦

如图 1 所示的直接端面泵浦的结构示意图。它包括三个部分：激光二极管泵浦源(由激光二极管阵列、驱动源和致冷器组成) ,光学耦合系统和激光棒和谐振腔。泵浦所用的激光二极管阵列出射的泵浦光，经由会聚光学系统将泵浦光耦合到晶体棒上，在晶体棒左端面镀有多层介质膜,对泵浦光的相应波长为高透、而对产生的激光束的相应波长为高反,腔的输出镜为镀有多层介质膜的凹面镜。

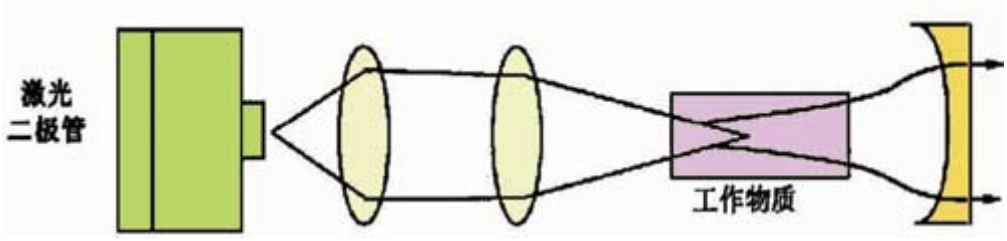


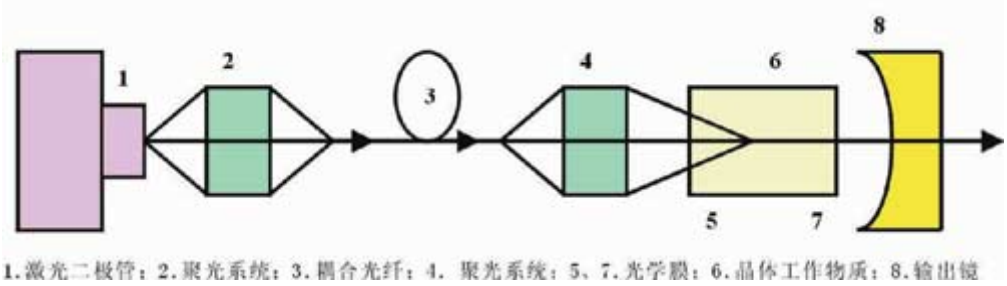
图 1 直接端面泵浦

然而，直接端面泵浦的激光器虽然结构型式紧凑,转换效率高,基模光强分布较好，但固体激光的输出功率受端面限制，因为端面较小时只能采用单元的激光二极管，最多只能相对两只激光二极管泵浦。这就限制了泵浦光的最大功率。如果采用功率较大的激光二极管阵列作泵浦源，则由于阵列型二极管输出的泵浦光模式不好，因而不易将泵浦光有效地耦合到工作物质中，实际上降低了效率。另一方面由于泵浦光的模式较为复杂，泵浦后输出的激光光束质量也不易保证。而且这种结构散热效果差,故一般只适合低功率激光器情况工作。

2.2 光纤耦合端面泵浦

针对直接端面泵浦方式的弱点，人们又进一步发展了光纤耦合的端面泵浦。端面泵浦激光器由激光二极管、两个聚焦系统、耦合光纤、工作物质和输出反射镜组成，如图 2 所示。与直接端面泵浦不同，这种结构首先把激光二极管发射的光束质量很差的激光耦合到光纤中，经过一段光纤传输后，从光纤中出射的光束变成发散角较小的、圆对称的、中间部分光强最大的泵浦光束。用这一输出的泵浦光去泵浦工作物质，由于它和振荡激光在空间上匹配得很好，因此泵浦效率很

高。由于激光二极管或二极管阵列与光纤间的耦合较与工作物质的耦合容易，从而降低了对器件调整的要求。而且最重要的是这种耦合方式能使固体激光器输出模式好、效率高的激光束。



1.激光二极管；2.聚光系统；3.耦合光纤；4. 聚光系统；5、7.光学膜；6.晶体工作物质；8.输出镜

图 2　光纤耦合端面泵浦

3.高功率端面泵浦固体激光器

3.1 高功率端面泵浦固体激光器存在的问题

在高功率端面泵浦固体激光器中，激光晶体吸收泵浦光而产生的热效应，对于激光器的稳定性、输出功率及效率、光束质量等有着直接影响，这使得端面泵浦设计存在高功率扩展问题。但是热效应所产生的直接后果--热透镜效应和退偏，在很大程度上可通过优化腔设计加以消除。近年来就发展了很多用于提高输出功率的技术，如两路耦合，高功率泵浦源，多个泵浦源光纤捆匝，多个增益介质的多端面泵浦等等。这些技术相结合促进了端面泵浦固体激光器的发展。

3.2 几种高功率端面泵浦固体激光器的介绍

3.2.1 目前国内的高功率端面泵浦固体激光器

双端泵浦双 Nd：YVO4 激光器：

在适于激光二极管泵浦的众多激光晶体中，Nd：YVO4 晶体因在 1064nm 处的受激发射截面大,在 808nm 处的吸收系数高,以及吸收谱线宽等参数均优于其它现有的晶体材料,而倍受人们的关注[1]。

为了提高固体激光器的输出功率可以利用多个激光晶体串接的方式。多棒串接实际上是光束相干合成的一种技术方案,其优点是输出功率可与棒数成比例的增加[2]，获得更大的模体积[3,4]和高的光－光转换效率。研究也同时表明,采用平行平面腔结构,整个系统可以得到与棒数成比例的激光输出,且不会降低光束质量,将两根或多根 Nd:YAG 晶体串接起来使用,增加了工作物质的长度,获得了更大的模体积,从而得到了高功率的输出[5]。

双 Nd：YVO4 晶体激光器,将晶体的端面镀膜作为谐振腔的端面镜,构成了平行平面谐振

腔。对平行平面谐振腔等效腔进行理论分析后得出激光晶体吸收泵浦光产生的热透镜效应对保持腔的稳定性起到了重要的作用，使得等效腔迅速达到其几何的稳定腔[6]，在发展输出功率为数百瓦至数千瓦量级的高功率固体激光器中,常采用多棒串接的技术方案。

在国内首次进行了双端泵浦双 Nd：YVO4 激光器的实验研究,在抽运功率为 20.74W 时获得了 11W 的 1064nm TEM00 模激光输出,其光-光转化效率约为 53% 。图 3 为双端泵浦双棒串接 Nd：YVO4 实验装置图[7]。

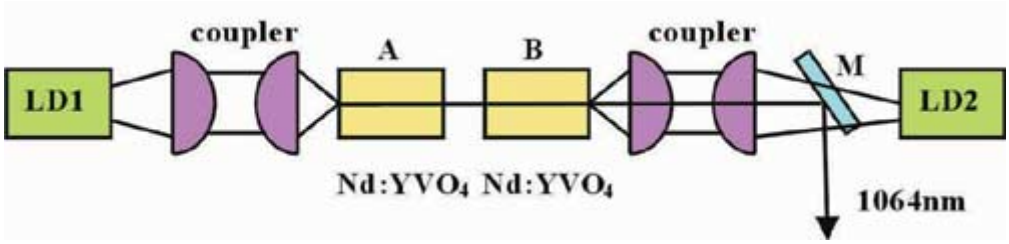


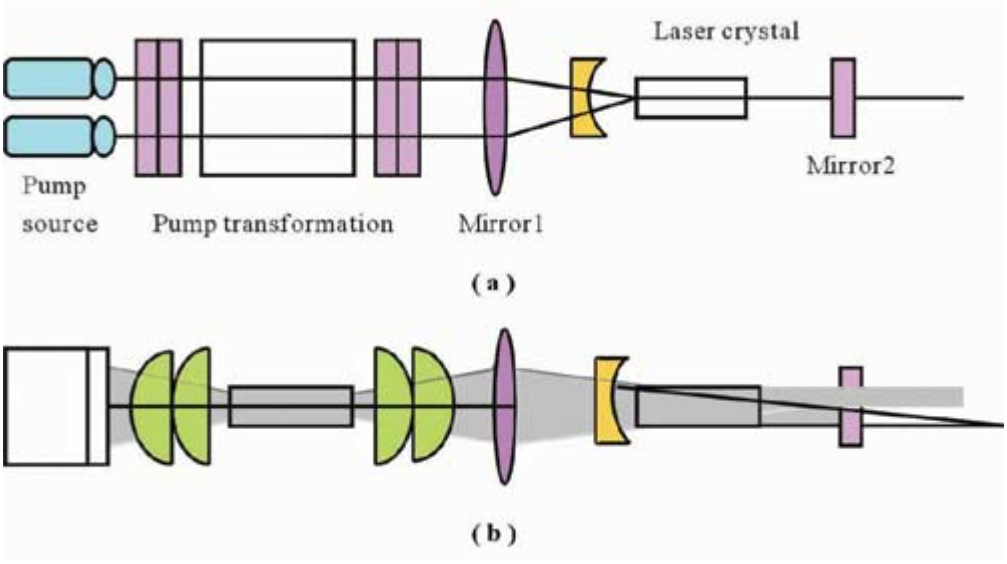
图 3　双端泵浦双 Nd：YVO4 激光器

二极管端面泵浦混合腔 Nd:YVO4 板条激光器：

近年来关于端面泵浦固体激光器的研究热点之一，是如何有效地对激光晶体进行冷却，降低热效应的影响，从而在得到高功率的激光输出的同时，又保证好的光束质量。在众多的研究工作中，采用了板条或者薄片状的激光晶体，由于对其进行大面积的冷却的方法，取得了令人瞩目的成就。

新型的混合腔板条激光器不但具备板条激光器高效冷却的优点,更具有传统板条激光器所不具备的优势。它利用薄的片状晶体（1mm）来做激光器的增益介质，片状晶体的两个表面都被紧贴在热沉上，结合混合腔，使其输出光束的远场近似为高斯分布，具备很好的光束质量[8]。

目前采用这种新型的板条激光器结构，在国内实现了此类激光器的连续运转，得到了波长为



1064nm 稳定的连续激光输出，当泵浦功率为 60.5W 时，输出功率达到 16.2W 。

该激光器的装置原理图如图 4 所示[9]。

板条激光器谐振腔由一个凹面镜和一个柱面镜组成，其中凹面镜为后腔镜，曲率半径 250mm ，镀有 808nm 的增透膜和 1064nm 的全反膜；柱面镜为前腔镜，并耦合输出激光，曲率半径 150mm ，镀有 1064nm 的全反膜，两腔镜如图 4b 所示，放于共焦位置，腔长为 50mm 。[9]

3.2.2 近年来国外的高功率端面泵浦固体激光器

端面泵浦高功率运转固体激光器：

图 5 所示的美国加州大学端面泵浦高功率运转固体激光器[10]是美国加州大学和美国 Lawrence Livermore 国家实验室合作，在 1999 年，进一步提高光束质量之后，采用 LD 端泵 Yb:YAG 棒获得 200W 连续波和重复频率 5kHz、195W 调 Q 输出，在光束质量 M2=2.4 时获得 183W 调 Q 输出。同时增加了谐振腔设计的灵活性，运用腔内双折射补偿得到偏振光输出，提高了效率，得到光束质量 M2=3.2 的 112W 连续波偏振光输出。[11]

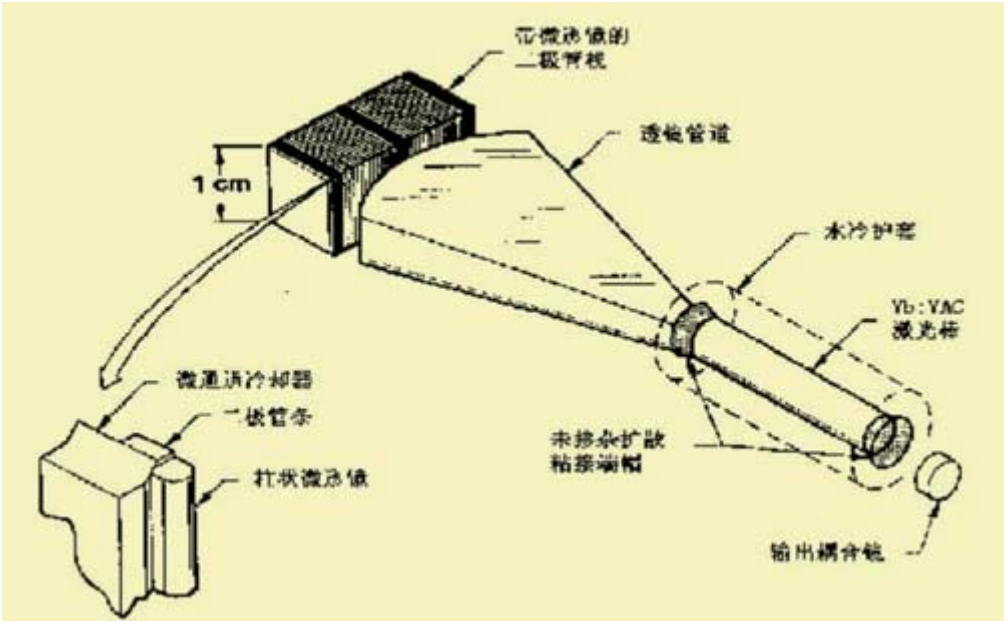


图 5　美国加州大学端面泵浦高功率运转固体激光器

二极管列阵端面泵浦 Yb:TAG 固体激光器：

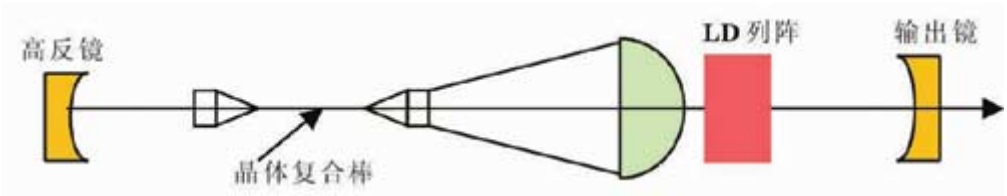


图 6　二极管列阵端面泵浦 Yb:TAG 的实验装置图

图 6 是 LLNL 实验室用二极管列阵端面泵浦 Yb:TAG 的示意图[12]。实验中的泵浦源是由 36 个带微柱透镜的 LD bars 构成，每个 bar 的长度为 15mm，采用硅基质的微沟道制冷。泵浦模块分为上下两部分，激光由中间的一个直径为 6mm 的圆孔通过。半导体列阵发出的泵浦光通过一个耦合透镜，进入晶体。耦合透镜是由熔融石英制成的柱面透镜与中间掏空的锲形铝光传导管组成。在石英透镜的中间开有一个小孔，允许激光顺利通过。铝管内表面呈四棱台状，且镀有薄薄的一层银用来反射泵浦光。该耦合透镜可以将两束 50×15mm2 的泵浦光会聚成 4.6×2.6mm2 的长形光斑，压缩比为 63。为了减少装置设计带来的损耗，该实验中的晶体为复合棒结构，即在晶体棒的两端有两个长为 15mm 端帽，端帽中没有掺杂激活离子，端帽的一端为与泵浦光的形状相匹配的矩形，一端为与晶体棒相粘接的圆形。此外，晶体四周被抛光，

且晶体棒中心处的直径为 2mm ，长为 50mm，由中心向两端，直径逐渐增加，与两个端帽衔接处的直径为 2.2mm。此设计可以有效地减少由于抛光所引起的放大的自发辐射损耗以及寄生振荡损耗。当采用了可以进行热致双折射补偿的双棒泵浦腔结构之后，便获得了 1080W 的基频输出,光光效率为 27.5% ，电光效率为 12.3%。

4.国内外高功率端面泵浦固体激光器的应用

在应用上，端面泵浦固体激光器以材料加工为主，包括了常规的激光加工：主要是材料加工，如激光标记、激光焊接、激光切割和打孔等。结构紧凑、性能良好、工作可靠的端面泵浦固体激光打标机产品系列已经在国内得到了规模应用,激光微加工、激光精密加工也都有广泛推广的趋势。在国外,千瓦级的二极管端面泵浦固体激光器已有产品,目前主要受限于成本和市场需求的限制。除材料加工外，大功率二极管端面泵浦固体激光器还可以用于激光核聚变、科学研究、医疗、检测、分析、通讯、投影显示以及军事国防等领域，因而具有极其重要的应用价值。

5.结束语

我国在低功率端面泵浦固体激光器(< 200mw)技术比较成熟，产业化(光通讯应用较多)也蓬勃发展。但是目前国外端面泵浦固体激光器市场化水平已经达到数百瓦，实验室水平已经达到千瓦级。而国内的大功率端面泵浦固体激光器发展一直具有局限性，应该积极进行这方面的研究,如果能实现产业化的发展,则必将带来巨大的经济效益和社会效益。

参考文献

[1] Kuwano Y, Saito S. Nd: YVO4 single crystal for LD pumped solid state laser1Laser Tes , 1990 ,16 (5) : 616～621.

[2] L 麴 Da1Solid-state-lasers1Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunication Press , 2002 ,1123～132

[3] Driedger K P, Ifflander R M,Weber H. Multi2rod , resonators for high-power solid-state lasers with improved beam quality. IEEE J Quantum Electronics ,1988 ,24 (4) : 665～6742

[4] Yang S Y, Wang ZJa , Hou YB , et al . Laser Journal , 1999 ,20 (4) :50～52

[5] Li ZJ , Xia WJ , Zhu C H , et al . Laser Technology , 1998 ,22(5) :284～286

[6] Chen Y F , Lan Y P ,Wang S C. Efficient high-power diode-end-pumped TEM00 Nd:YVO4 laser with a planar cavity. Optics Letters , 2000 ,25 (14) :1016～1018

[7] Long Li,Wei Zhang,Laike Tian,Baijing Tao,Xun hou. Influence Cavity Stability of Thermal Effect in End-pumped Double Nd:YVO4 Laser. Acta Photonica Sinica ,

2004, 33(1) :4～5

[8] Shi Peng,et al.A 110W Nd:YVO4 slab laser with high beam quality output [J].Opt.Commun,2004,229(1-6):349～354.

[9] Qiang Jin,Xiaoyu Wei,Jiancun Gao,Nianle Wu.Diode end pumped hybrid cavity Nd:YVO4 slab laser.Chinese Journal Of Quantum Electronics,2005,22(4):528～529

[10] C.Bibeau, R.J.Beach, et al, High-average-power performance and frequency conversion of a diode-end-pumped Yb:YAG laser, IEEE J. Quantum Electron. Vol. 34, No.10, p.2010～2019, 1998

[11] E.C.Honea, R.J.Beach, S.C.Mitchell et al, 183-W, M2=2.4 Yb:YAG Q-switched laser, Opt. Lett. Vol. 24, No.3, p.154～156, 1999

[12] R J Beach,et al.High-Average-Power Diode-Pumped Yb:YAG Laser[A].SPIE 2000,Vol.3889:246～260.