

角抽运 Yb :YAG 激光器

柳 强[†] 巩马理 李 晨 宫武鹏 陆富源 陈 刚

(清华大学精密仪器与机械学系光子与电子技术研究中心, 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

(2004 年 8 月 4 日收到, 2004 年 9 月 6 日收到修改稿)

报道了一种高功率准三能级激光器角抽运方法, 抽运光从板条激光器结构中的板条工作介质的角注入, 综合考虑抽运吸收、抽运亮度、晶体的掺杂浓度以及晶体尺寸等因素, 进行了角抽运复合 Yb :YAG 激光器设计, 实验上获得了最大连续输出功率 400W, 斜效率 28% 的输出, 实验结果充分证明了角抽运原理的正确性和应用于高功率激光器方面的可行性.

关键词: Yb :YAG, 角抽运, 复合晶体

PACC: 4260, 4260D

1. 引 言

目前实现高功率输出的二极管抽运的固体激光器工作介质主要以四能级运转的 Nd :YAG 和准三能级运转的 Yb :YAG 为代表. Yb :YAG 与 Nd :YAG 相比, Yb :YAG 的饱和通量较 Nd :YAG 高十余倍, 故可获得更高亮度的激光输出, 同时 Yb :YAG 荧光寿命 (950 μ s) 约为 Nd :YAG (230 μ s) 的 4 倍, 在存储相同能量时可使用更少的二极管抽运源, 降低系统造价, Yb :YAG 的吸收谱宽也约为 Nd :YAG 的 6 倍, 降低了对热控系统的要求, 另外, 相对于 Nd³⁺, Yb³⁺ 与 Y³⁺ 晶格常数相近, 适于高浓度掺杂^[1,2]. 但是 Yb :YAG 激光运转是准三能级系统, 晶体的温度越低下能级满足波尔兹曼分布的粒子数就越少, 就更容易实现粒子数的反转, 因此良好的热控管理也是高功率的 Yb :YAG 激光器的挑战, 同时高性能 Yb :YAG 激光器需要高出几倍的阈值功率抽运, 对二极管抽运源的亮度也提出了更高的要求, 如果没有很好的结构设计和实施方案, 其储能时间长以及潜在的成本利用率高的特点很难发挥. 基于以上原因才出现了边缘抽运^[3-5], 特殊的端面抽运^[6,7]和多通抽运^[8]等新颖的结构. 本文采用了一种新型的角抽运方法, 抽运光经过耦合系统从晶体的四角注入到晶体内部, 具有结构简单、效率高、功率可扩展性强等显著

优点, 能够提供均匀的高功率密度抽运, 特别适用于准三能级激光材料(Yb :YAG)和“热助推”抽运的 Nd :YAG 材料.

2. 角抽运激光器的设计

根据德国 Dilas 公司的产品, 每个二极管阵列由 11 条组成, 条与条之间的距离为 1.68mm, 整个发光面的尺寸为 18.2mm × 10mm. 每个二极管条用 D 型非球面光纤对快轴进行准直, 准直后的发散角为 10mrad (快轴) × 10° (慢轴). 二极管阵列的总输出功率达到 500W, 二极管阵列的中心发射波长为 940nm ± 4nm, 线宽小于 3nm. 采用透镜导管耦合会聚系统的方式获得高抽运功率面密度, 透镜导管的传输效率与出口大小有很大的关系, 而透镜导管的出口大小决定了抽运光进入激光工作介质角面的大小. 利用光线追迹的方法计算了透镜导管对抽运光的传输效率. 结果表明当出口为 2.7mm × 0.9mm 时, 大约 83.3% 的抽运光能够被透镜导管传输到板条的角面, 理论计算结果和实际测量结果非常接近, 如图 1 所示.

为了获得较高的抽运功率密度和较好的抽运均匀性, 角抽运方案中工作介质采用中间掺杂、四周不掺杂的复合板条, 因此激光板条的设计包括掺杂部分(Yb :YAG)和不掺杂部分(YAG)的尺寸以及掺杂

[†]E-mail: qiangliu@mail.tsinghua.edu.cn

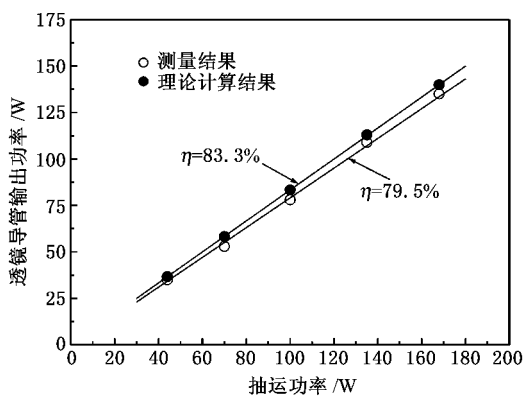
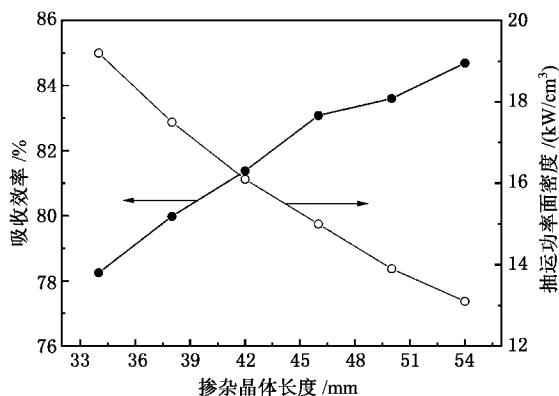


图 1 透镜导管的耦合效率

图 3 掺杂晶体长度 l_d 与吸收效率和抽运功率面密度的关系

部分的掺杂浓度. 图 2 表示了设计时需要优化的几个参数, 包括掺杂部分长度 l_d 、宽度 w_d 、总体长度 l 以及掺杂浓度 D . 根据透镜导管的出口大小, 非掺杂部分的宽度 a 取为 2mm, 板条厚度 t 取为 1mm, 导角 θ_0 取为 45° , 角抽运板条工作时只有中间掺杂部分产生增益, 为了最大限度的利用抽运能量, 总体宽度 w 和掺杂部分宽度 w_d 应该相等.

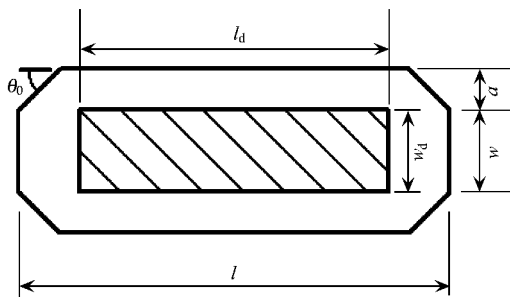


图 2 角抽运激光板条的几何结构

从图 3 掺杂晶体长度 l_d 与吸收效率和抽运功率面密度的关系可以看出, 随着板条长度 l_d 的增大, 吸收效率 η_{abs} 也随之增加, 但是增加的趋势越来越慢. 从整体上看, 随着板条长度的增加, 抽运光的吸收长度也相应增加, 因而吸收效率得到提高, 但是由于抽运光的指数衰减, 吸收长度的增加对吸收效率的影响将逐渐变小. 与此同时平均抽运功率密度 $\bar{\rho}$ 也逐渐减小. 这说明虽然板条吸收的抽运功率增加了, 但由于体积的增大, 单位体积内的抽运功率密度却呈下降趋势. 综合考虑吸收效率 η_{abs} 和平均抽运功率密度 $\bar{\rho}$ 的因素, 则板条长度 l_d 应取中间值 (约为 42mm). 同样的道理, 板条宽度 w_d 的选取与长度 l_d 的选取相类似, 也会出现 w_d 越大, 吸收效率越高, 但抽运功率密度越低的情况, 这里就不再详细

讨论了.

图 4 为不同掺杂浓度下的吸收效率, 由于只有吸收抽运功率与阈值抽运功率的差值最终对激光输出有贡献, 因此为了更加清楚的表示这一变化趋势, 我们计算了该差值随掺杂浓度的变化, 这里定义的吸收效率为吸收抽运功率与阈值抽运功率的差值对抽运功率的贡献. 吸收抽运功率随掺杂浓度的增大而逐渐增大, 并且呈饱和趋势, 当掺杂浓度取 0.5at.%—1.5at.% 时, 吸收抽运功率与阈值抽运功率的差值较大, 所以能获得较高的激光输出, 掺杂浓度也应该选择在 0.5at.%—1.5at.% 之间.

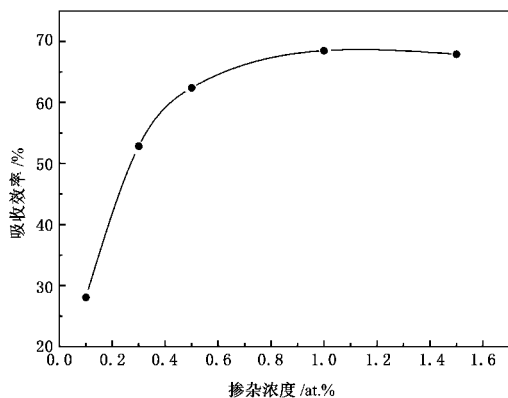


图 4 不同掺杂浓度下的吸收效率

在激光板条的设计中还需要考虑的问题就是抽运功率分布的均匀性. 对此, 图 5 为掺杂浓度为 0.5at.%、1.0at.%、1.5at.% 时的抽运功率分布情况, 从图中可以看出掺杂浓度 0.5at.% 时的抽运均匀性最好. 当掺杂浓度进一步加大时, 板条的两端将吸收越来越多的功率, 中间部分则得不到有效的抽运. 对于角抽运板条激光器, 由于吸收长度足够长, 掺杂浓度可以选取得较低, 在保证吸收效率的前提下, 使得抽运均匀性有所提高.

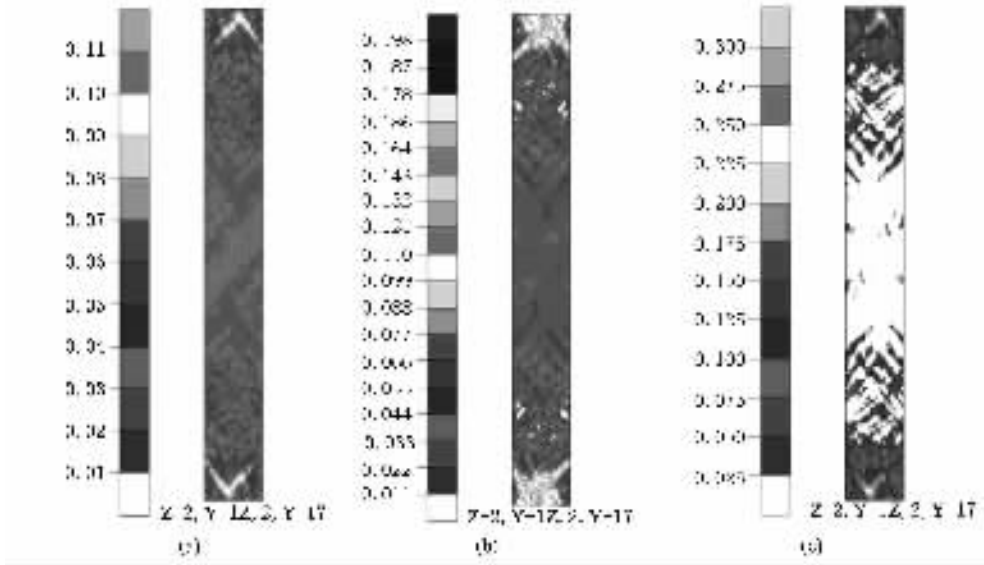


图 5 不同掺杂浓度时的抽运功率分布 (a)(b)(c)分别为 0.5at.% ,1at.% ,1.5at.%

3. 角抽运激光器实验

为了验证我们提出的角抽运方法,我们只在掺杂浓度仍为 0.5at.% Yb :YAG 晶体两边键合了非掺杂的 YAG.掺杂区域 (Yb :YAG) 的尺寸为 42mm(长) × 4mm(宽) × 1mm(厚),两条非掺杂区域 (YAG) 的尺寸为 42mm(长) × 2mm(宽) × 1mm(厚).两块板条均在四个角部沿 45°方向导角,导角宽度为 2mm.4 个角面的尺寸约为 2.8mm × 1mm.实验装置如图 6 所示.抽运光经过透镜导管压缩会聚之后入射到图中所示的 4 个角面,进入板条后被多次吸收.板条的前后两个面(4mm × 1mm)镀 1030nm 的增透膜,降低激光的损耗;两个侧面(38mm × 1mm)镀 940nm 的高反膜,进一步约束抽运光.在上下两个大面(42mm × 8mm)镀 SiO₂ 膜,减少全反射中倏逝波的能量损失.热沉为 0.3mm 宽的微通道层、导流层和散热层组成的微通道结构,流量为 8L/min,循环水的温度控制在 6°C.热沉与晶体之间放置一层厚度为 200μm 的铜层过渡,减小由于硬接触产生的应力和接触热阻.

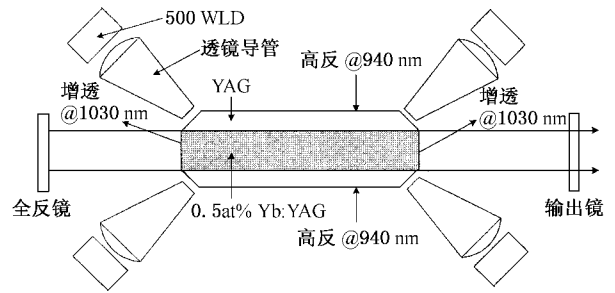


图 6 角抽运实验装置图

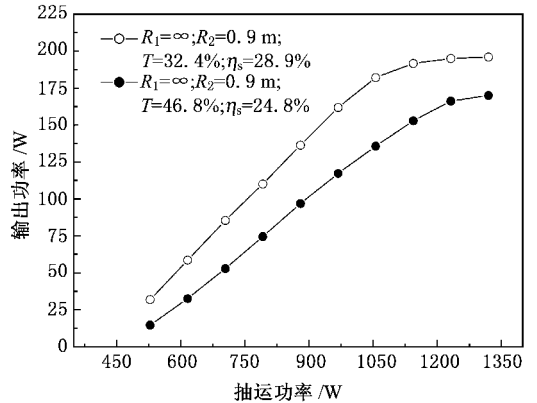


图 7 在厚度方向和宽度方向均为平-凹稳定腔结构抽运功率和输出功率的关系

图 7 为在厚度方向和宽度方向均采用平-凹稳定腔结构抽运功率和输出功率的关系,全反镜采用平面镜,输出耦合镜的曲率半径为 0.9m,透过率为 32.4%时,最大输出为 191W,斜效率达到了 28.9%;当输出镜的透过率增加到 46.8%时,最大输出功率下降到 162W,斜效率下降为 24.8%;抽运功率超过 1200W 以后,输出功率呈现饱和的趋势.通过测量热透镜效应发现,由于晶体的散热还不理想,热效应比

较严重,导致了稳定腔结构偏离了稳定区,引起功率饱和甚至下降.图 8 为在厚度方向平-凹稳定腔,宽度方向凸-凹稳定腔结构抽运功率和输出功率的关系曲线,全反镜的曲率半径为 1m,输出镜的曲率半径为 1.5m,比较了透过率为 39.2%和 54.5%两种情况下输出结果,我们发现,随着抽运功率的增加,输

输出功率呈线性增长,当抽运功率达到 1850W 时,最大输出功率达到了 400W,也没有出现饱和的趋势,此时的斜效率约为 28%,光光转换效率约为 22%。这种腔型大大改散了激光谐振腔对热的敏感性,适合在高功率抽运时使用。通过以上的实验,充分说明了角抽运原理的正确性和应用于高功率激光器方面的可行性。

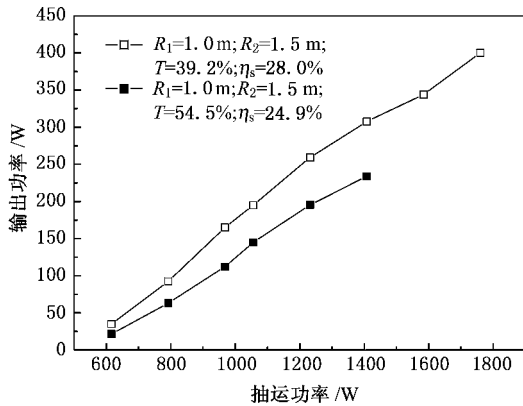


图 8 在厚度方向平-凹稳定腔,宽度方向凸-凹稳定腔结构抽运功率和输出功率的关系

4. 结 论

角抽运方法的基本思想是抽运光从板条的角部入射,由于激光介质较高的折射率,大部分抽运光被全内反射限制在板条内部多次吸收,可以在掺杂浓度较低的情况下获得较高的吸收效率。由于抽运光在板条内部是经过多次反射之后被吸收的,因此抽运光的分布也较为均匀。角抽运同边缘抽运一样,将抽运面和冷却面分开,具有结构简单、效率高,能够提供均匀的高功率密度抽运的特点,特别适用于吸收系数较低的准三能级材料。实验上采用角抽运方式,复合 Yb:YAG/YAG 板条晶体,一维平凹、一维凹凸稳定腔结构,实现了高效率连续激光运转,当抽运功率约 1850W 时,最大连续输出功率达到了 400W,斜效率为 28%,光光转换效率约为 22%,实验结果充分证明了角抽运原理的正确性和应用于高功率激光器方面的可行性。

- [1] Fan T Y 1993 *IEEE J. Quantum Electron* **29** 1457
- [2] Fan T Y 1992 *IEEE J. Quantum Electron* **28** 2692
- [3] Liu Q, Gong M L, Pan Y Y and Li C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2159 (in Chinese) [柳 强、巩马理、潘圆圆、李 晨 2004 物理学报 **53** 2159]
- [4] Dascalu T, Pavel N and Taira T 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 4086
- [5] Rutherford T S, Tulloch W M, Sinha S and Byer R L 2001 *Opt. Lett.* **26** 986
- [6] Liu Q, Wu H Sh, Gong M L, Yan P, Shi B and Wang D Sh. 2003 *Opt. Commun.* **222** 355
- [7] Goodno G D, Palese S and Harkenrider J 2001 *Opt. Lett.* **26** 1672
- [8] Honea E C, Beach R J, Mitchell S C, Skidmore J A, Emanuel M A, Sutton S B, Payne S A, Avizonis P V, Monroe R S and Harris D G 2000 *Opt. Lett.* **25** 805
- [9] Stewen C, Contag K, Larionov M, Giesen A and Hugel H 2000 *IEEE J. Quantum Electron.* **6** 650

Corner-pumped Yb :YAG lasers

Liu Qiang[†] Gong Ma-Li Li Chen Gong Wu-Peng Lu Fu-Yuan Chen Gang

(*Center for Photonics and Electronics , The State Key Laboratory of Tribology , Department of Precision Instruments and Mechanology ,
Tsinghua University , Beijing , 100084 ,China*)

(Received 4 August 2004 ; revised manuscript received 6 September 2004)

Abstract

A corner-pump method for high-power quasi-three-level lasers is reported. The design uses a slab laser configuration with the incident pump light from the slab corner. We present an analytic description of pumping absorption , pumping brightness , doping concentration and crystal dimension for the corner-pumped composite Yb :YAG laser. In the experiments a maximum continuous - wave output power of 400 W with slope efficiency 28% was achieved. This result shows the validity of corner-pumping concept and its feasibility in the development of high-power solid-state lasers.

Keywords : Yb :YAG , diode corner-pumping , composite crystal

PACC : 4260 , 4260D

[†]E-mail : qiangliu@mail.tsinghua.edu.cn