

文章编号: 0258-7025(2009)07-1693-07

# 角抽运全固态激光器的研究进展

刘欢 巩马理 高松

(清华大学精密仪器与机械学系光子与电子技术研究中心, 北京 100084)

**摘要** 报道了清华大学光子与电子技术研究中心近年来在角抽运全固态激光器方面的研究成果, 其中包括大功率全固态角抽运 Yb:YAG 激光器的研制, 全固态角抽运 Yb:YAG 绿光激光器的研制以及中小功率全固态角抽运 Nd:YAG 基模激光器的研制。

**关键词** 激光器; 角抽运; Yb:YAG 晶体; Nd:YAG 晶体; 复合晶体; 全固态激光器

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093607.1693

## Progress in Corner-Pumped All-Solid-State Lasers

Liu Huan Gong Mali Gao Song

(Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instruments and Mechanology,  
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** The research productions of the corner-pumped all-solid-state lasers gained by Tsinghua University in the recent years are reported. The primary contents include the developments of all-solid-state corner-pumped Yb:YAG lasers with high output powers, all-solid-state corner-pumped Yb:YAG LBO external cavity frequency doubling green lasers, and all-solid-state corner-pumped Nd:YAG fundamental mode lasers with small and medium output powers.

**Key words** lasers; corner-pumped; Yb:YAG crystal; Nd:YAG crystal; composite crystal; all-solid-state laser

### 1 引言

半导体抽运的固体激光器因其固有的高效率、长寿命、小体积、高光束质量等优点获得了广泛的应用。随着半导体激光技术的发展, 单个激光二极管的性能得到很大提高, 尤其是半导体阵列的迅速发展, 使固体激光器在工业和军事等领域已经处于主导地位。自 20 世纪 90 年代以来, 半导体抽运的板条激光器一直是世界各国研究的热点, 被认为是获得大功率高光束质量激光输出的有效途径之一。近些年来, 科技工作者在对传统板条激光器的研究基础上, 不断研制出各种新型的板条激光器。大功率高光束质量的板条激光器已经在工业加工、切割、热处理、军事、航天等领域发挥着重要的应用。

常见的板条激光器一般采用之字形光路, 可以克服圆棒激光器热效应太强的缺点, 同时具有功率扩展性好的特点。Eggleston 等<sup>[1,2]</sup>研究了之字形光路板条激光器的热特性, 在厚度方向走之字形光

路克服了该方向的一阶热透镜效应, 有利于获得高平均功率高光束质量激光输出。2002 年美国 TRW 公司研制出 2.4 倍衍射极限 5.4 kW 输出的激光二极管抽运 Nd:YAG 激光器<sup>[3]</sup>; 2003 年日本 Fanuc 公司采用高功率激光二极管抽运 Zigzag 光路的板条激光器, 实现了从单块 Nd:YAG 晶体获得 6.1 kW 激光输出, 用两个 Nd:YAG 板条, 成功获得平均功率为 10.2 kW 的激光<sup>[4]</sup>; 2005 年美国诺格公司通过端面抽运板条放大系统, 获得 25 kW 的高功率激光输出<sup>[5]</sup>; 2006 年美国诺格公司通过将两路相位调制的放大链进行相干合束, 成功地实现 19 kW 的高光束质量激光输出, 光束质量因子  $M^2$  为 1.73<sup>[6]</sup>。

国内开展高平均功率板条激光器研究的单位主要有中国科学院上海光学精密机械研究所、华北光电所、中国工程物理研究院电子工程研究所、清华大学、北京理工大学等<sup>[7]</sup>。2003 年, Peng Shi 等<sup>[8]</sup>利用波导耦合结构对抽运光进行整形, 端面抽运一块

收稿日期: 2009-04-07; 收到修改稿日期: 2009-04-17

作者简介: 刘欢(1980-), 女, 博士后, 主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: lh@mail.tsinghua.edu.cn

导师简介: 巩马理(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电子与激光技术等方面的研究。

E-mail: gongml@mail.tsinghua.edu.cn(通信联系人)

尺寸为  $12\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 1\text{ mm}$  的带有微型增益区的  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  板条晶体,在抽运功率为  $247\text{ W}$  时,获得了输出功率  $110\text{ W}$ ,  $M^2$  小于 1.3 和 1.5 的激光输出;2006 年, Liu Qiang 等<sup>[9]</sup> 采用角抽运  $\text{Yb}:\text{YAG}$  复合板条,获得了千瓦级连续激光输出,最大输出功率  $1050\text{ W}$ , 光-光转换效率  $42.8\%$ 。

角抽运方式是 2002 年清华大学光子与电子技术研究中心提出的一种全新的抽运方式,具有自主知识产权,已申请多项专利<sup>[10,11]</sup>。其基本原理是在板条状激光介质的角部切出一个倒角,抽运光通过这个倒角耦合到激光介质内部,利用抽运光在介质内的全反射来实现多程吸收,大大增加了吸收路程,在较低的掺杂浓度下也能获得高的抽运效率和较好的抽运均匀性,有利于抽运光能量的提取和激光介质的散热。角抽运方法结构简单、效率高,提供了均匀的高功率密度,还可以进一步与热键合技术结合起来,利用中间掺杂,两边不掺杂的复合板条激光介质,把抽运光的吸收区域限制在激光介质的中间,有利于抽运光和激光的模式匹配,并得到高的抽运功率密度。近年来,作者所在研究小组已经成功实现了千瓦级连续输出的激光二极管角抽运  $\text{Yb}:\text{YAG}$  激光器稳定运转<sup>[9]</sup>, 激光二极管角抽运  $\text{Yb}:\text{YAG}$  LBO 外腔倍频  $515\text{ nm}$  连续绿光激光器稳定运转<sup>[12]</sup>, 以及中小功率连续输出的激光二极管角抽运  $\text{Nd}:\text{YAG}$   $1064\text{ nm}$  基模激光器稳定运转<sup>[13]</sup>。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或中小功率激光器的基本可行性。

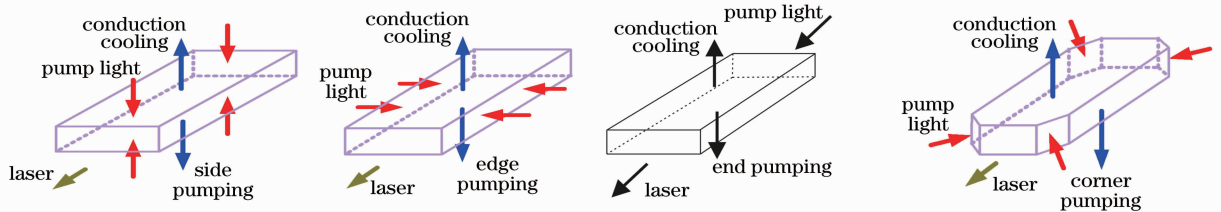


图 1 板条激光器的 4 种抽运方式

Fig. 1 Four kinds of pumping types of slab lasers

### 3 大功率输出的角抽运 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 激光器

目前实现高功率输出的激光二极管抽运固体激光器的主要工作介质是以四能级运转的  $\text{Nd}:\text{YAG}$  和准三能级运转的  $\text{Yb}:\text{YAG}$  为代表。与  $\text{Nd}:\text{YAG}$  相比,  $\text{Yb}:\text{YAG}$  由于具有上能级寿命长、能级结构简单、量子亏损小等优点,已经发展成为高功率固体激光领域的优秀晶体材料之一<sup>[18~20]</sup>。  $\text{Yb}:\text{YAG}$  激光器作为准三能级系统,除了要求系统具备良好的

## 2 各种抽运方式的比较

目前,对于板条激光器采用的主要有 4 种抽运方式:端面抽运、侧面抽运、边缘抽运、角抽运,如图 1 所示。端面抽运方式<sup>[14,15]</sup>利用板条晶体的两个端面来耦合抽运光,有利于提高抽运效率。由于板条晶体的端面面积比较小,而抽运光在慢轴方向的尺寸比较大,因此需要对抽运光进行整形,很难实现大功率抽运。另外,在板条晶体的入射端面需要镀制对应激光波长和抽运光波长的增透膜,从而提高了晶体加工的难度和成本。侧面抽运方式<sup>[16]</sup>利用板条晶体较大的侧面来耦合抽运光,耦合系统简单,容易实现大功率抽运,抽运光在晶体内分布较均匀。板条晶体的厚度方向为抽运光的吸收方向,抽运效率不高。由于面积大的侧面用来耦合抽运光,只能采用对流冷却或其他冷却方式,因此冷却系统较复杂。边缘抽运方式<sup>[17]</sup>利用板条晶体两个细长的侧面耦合抽运光,利用两个面积较大的侧面传导冷却。细长侧面的尺寸和抽运光的尺寸匹配,因此耦合系统简单。板条晶体的宽度方向为抽运光的吸收方向,吸收长度较大,但抽运光在晶体内分布不均匀。角抽运方式同端面抽运方式一样,板条晶体两个面积较大的侧面用来传导冷却,能实现更高功率的抽运和更好的抽运均匀性。角抽运技术还可以和热键合技术结合起来,利用中间掺杂,两边不掺杂的复合板条激光介质,把抽运光的吸收区域限制在激光介质中间,有利于抽运光和激光的模式匹配。

热管理外,对抽运功率密度也提出了很高的要求。传统的端面抽运、侧面抽运和边缘抽运很难满足低掺杂准三能级激光晶体高效高密度均匀抽运要求,因此本研究小组提出了崭新的角抽运方法,解决了准三能级  $\text{Yb}:\text{YAG}$  激光材料要求高抽运功率密度与低吸收系数之间的矛盾<sup>[20~23]</sup>。

角抽运方法的特点在于:在板条的 4 个角部切出 4 个倒角面,抽运光从这 4 个倒角面入射到板条内,由于激光介质的折射率较高,大部分抽运光被内

表面全反射限制在板条内部而实现了多程吸收,在相同的板条尺寸下大大增加了吸收路程,可以在掺杂浓度较低的情况下获得较高的吸收效率和较均匀的抽运吸收分布。角抽运同边缘抽运一样,将抽运面和冷却面分开,使用传导冷却方式,无需复杂的封水装置,冷却水与激光材料没有直接接触,避免了冷却水对激光介质的污染。该方法具有效率高、功率可扩展性好等优点,能够提供均匀的高功率密度抽

运,特别适用于吸收系数较低的准三能级 Yb:YAG 材料。角抽运方法需要结合热键合技术才能发挥其优点,采用中间掺杂、四周(或者两侧)不掺杂的复合板条,将抽运光的吸收区域限制在板条的中间部分,一方面可以提高振荡激光与抽运光的模式匹配,获得更高的抽运功率密度和更好的抽运均匀性,另一方面也减小了端面效应对激光输出的影响。复合板条的结构如图 2 所示。

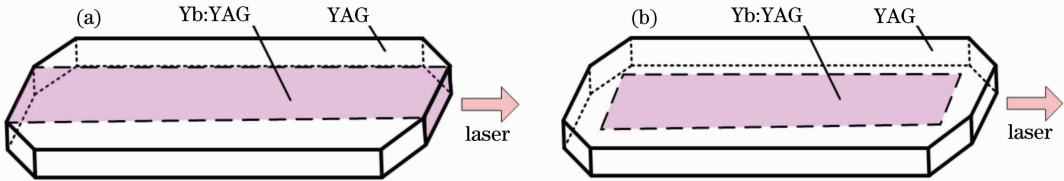


图 2 角抽运复合板条的结构。(a) 四周键合的复合板条;(b) 两侧键合的复合板条

Fig. 2 Configuration of corner-pumped composite slab. (a) A composite slab with all-around undoped YAG thermally bonded to Nd:YAG; (b) a composite slab with two pieces of undoped YAG thermally bonded to two sides of Nd:YAG, respectively

在高功率板条激光器中,通常希望降低 Yb:YAG 的掺杂浓度以降低透明阈值,但 Yb:YAG 的抽运吸收截面较小,浓度越低,其吸收系数就越小,从而需要较长的吸收光程才能实现对抽运光的充分吸收。侧面抽运和边缘抽运由于吸收长度短,为了保证较高的吸收效率,晶体的掺杂浓度就要相应提高,因此透明阈值随之提高,抽运均匀性随之变差。在角抽运复合板条激光器中,抽运光从复合板条的 4 个角部注入,在晶体内部由于全反射而多次经过复合晶体的掺杂部分,吸收路径较长,激光晶体的掺杂浓度可以选取得较低,能够在保证吸收效率的前提下提高抽运均匀性。抽运光在 Yb:YAG 复合板条内的传输过程如图 3 所示。采用角抽运方法,使得抽运面和激光振荡面分开,避免了镀制双色膜,降低了激光器成本。

性、腔模尺寸、模间耦合效率、输出光束质量等。对角抽运方式而言,激光晶体的热透镜效应由两部分组成,一部分是由于温度不均匀性引起折射率的非均匀分布导致的热聚焦;另一部分是由于应力引起的折射率变化导致的热聚焦,在宽度和厚度方向都不同程度上存在这种聚焦效应。因此在设计谐振腔时,要考虑到补偿这种热透镜效应。

### 3.1 实验装置

经过研究和实验,本研究小组设计了如图 4 所示的千瓦级角抽运 Yb:YAG 复合板条激光器<sup>[8]</sup>。Yb:YAG 复合板条的掺杂原子数分数为 0.5%,掺杂区域的尺寸为 42 mm×4 mm×1 mm,两条非掺杂区域的尺寸为 42 mm×2 mm×1 mm,两块板条在 4 个角部均沿 45° 方向倒角,4 个倒角面大小 2.8 mm×1 mm。D 形光纤准直的二维 LD 阵列发射的抽运光,经过导光锥耦合,从板条的 4 个角部的倒角面注入到 Yb:YAG 复合板条内部,抽运光在板条内部发生全反射而被约束在板条内部,不断被 Yb:YAG 吸收。板条的前后两个面镀 1030 nm 增透膜,降低激光的损耗;两个侧面镀 940 nm 的高反膜,进一步约束抽运光,在上下两个大面镀 SiO<sub>2</sub> 膜,减少全反射中倏逝波的能量损失。考虑到板条晶体在宽度和厚度方向不同的热透镜焦距,设计并搭建了一种由平凹球面全反镜(M<sub>1</sub>)和平凸柱面镜(M<sub>2</sub>)构成的在厚度方向的平-凹稳定腔,在宽度方向的凸-凹稳定腔。晶体冷却装置采用自主设计的微通道热沉,微通道的总热阻抗小于 0.34 K/(W·cm<sup>2</sup>),获得了高功率连续 1030 nm 激光稳定输出。

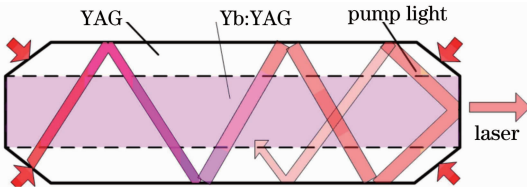


图 3 抽运光在 Yb:YAG/YAG 复合板条内的传输过程示意图

Fig. 3 Pump light propagation in the composite Yb:YAG/YAG slab by total internal reflection

激光晶体吸收激光二极管的抽运光能量,产生激光振荡的同时,有相当一部分抽运光能量会转变为激光晶体的热量并耗散在晶体中。随着抽运功率的提高,晶体的热透镜效应会影响到谐振腔的稳定

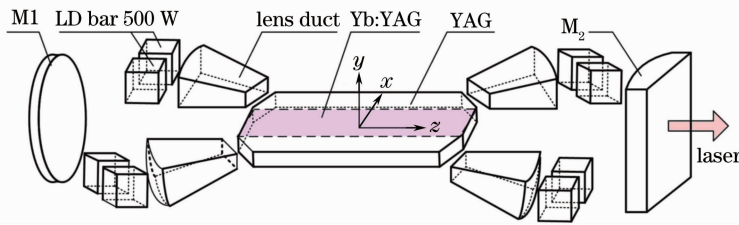


图4 角抽运 Yb:YAG 复合板条激光器

Fig. 4 Experimental setup of a corner-pumped composite Yb:YAG slab laser

### 3.2 实验结果

2004年, Gong Mali 等<sup>[20]</sup>首次从实验上验证了角抽运原理应用于大功率 Yb:YAG 板条激光器的可行性, 报道了一台最大输出功率 202 W 的角抽运 Yb:YAG 复合板条连续激光器, 斜率效率为 22.7%。由于早期的角抽运实验缺乏经验, 激光晶体的加工还不成熟, 腔型设计也不完善, 晶体的热沉在高功率抽运时散热不佳, 因此 1030 nm 激光连续输出功率不高。通过采取一系列的改进措施, 2005年, Liu Qiang 等<sup>[22]</sup>实现了 520 W 连续波输出的角抽运 Yb:YAG 复合板条激光器, 光-光转换效率达到 32%, 斜率效率达到 25%。2006年, 在增加抽运功率的基础上, Liu Qiang 等<sup>[9]</sup>研制出角抽运千瓦级连续输出的 Yb:YAG 复合板条激光器, 采用平凹球面全反镜和平凸柱面镜构成的混合线性稳定腔, 平凹镜曲率半径为

1 m ( $R > 99\%$ , 1030 nm), 柱面镜凸面曲率半径为 -1.5 m ( $R = 39\%$ , 1030 nm), 母线垂直于板条厚度方向, 腔长为 102 mm, 获得了最大 1050 W, 1030 nm 连续激光输出, 光-光转换效率达到 33.6%, 斜率效率达到 42.8%。角抽运 Yb:YAG 复合板条激光器的输出特性如图5所示。由于板条晶体的厚度方向尺寸很小, 因此在高功率抽运下, 1030 nm 激光的  $M^2$  因子在厚度方向上比在宽度方向上小很多, 当输出功率 500 W 时, 1030 nm 激光的  $M^2$  因子在厚度和宽度方向上分别为 5 和 20<sup>[9]</sup>。

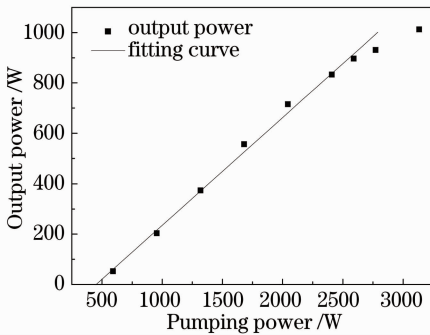


图5 1030 nm 激光连续输出功率与抽运功率的关系

Fig. 5 1030 nm laser continuous-wave output power as a function of pumping power

### 4 角抽运 Yb:YAG 复合板条 LBO 外腔倍频 515 nm 绿光激光器

近年来, 全固态 LD 抽运 Yb:YAG 倍频激光器因其输出波长 515 nm 接近 Ar 离子激光器的输出波长 514.5 nm, 并有望代替 Ar 离子激光器而受到越来越多的关注。Ar 离子激光器输出功率高, 被广泛应用于激光电视、全息照相、信息处理、光谱分析、医疗、工业加工等领域, 但气体激光器的缺点十分明显, 体积大, 耗电量高, 严重制约着 Ar 离子激光器的发展。因此, 开展全固态角抽运 Yb:YAG 倍频激光器的实验研究十分必要。

本研究小组在已实现千瓦级角抽运 Yb:YAG 复合板条激光器连续稳定输出的基础上, 于 2007 年报道了一台 15 W 输出的角抽运 Yb:YAG 声光 (AO) 调 Q LBO 外腔倍频 515 nm 绿光激光器<sup>[12]</sup>, 激光器结构示意图如图 6 所示。LBO 晶体采用 I

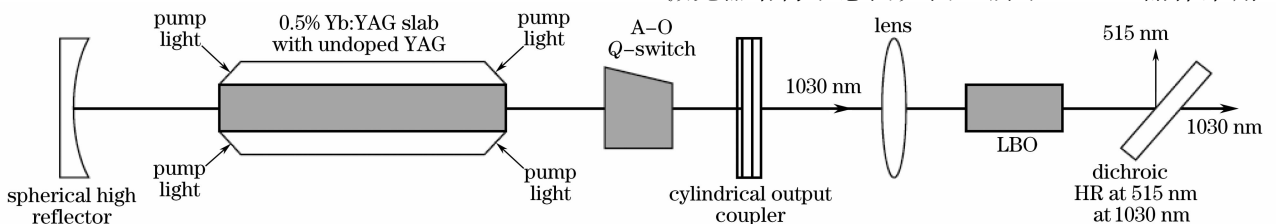


图6 角抽运 Yb:YAG 复合板条声光调 Q LBO 外腔倍频 515 nm 绿光激光器结构示意图

Fig. 6 Experimental setup of a corner-pumped composite Yb:YAG acousto-optic Q-switched LBO frequency doubling 515 nm green laser



类非临界相位匹配,相位匹配角为 $\theta=0^\circ$ , $\varphi=90^\circ$ ,尺寸为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 。图 7 所示的是 1030 nm 激光平均输出功率与 515 nm 激光平均输出功率和转换效率的关系曲线,随着 1030 nm 激光输出功率的增加,515 nm 绿光输出功率和光-光转换效率均随之增加。在重复频率 10 kHz 下,515 nm 绿光的最大输出功率 15 W,从基频光到倍频光的转换效率达到 30%,脉冲宽度约 150 ns<sup>[12]</sup>。

将频率变换技术应用于角抽运方式下的全固态激光器,可以扩展角抽运全固态激光器的输出波长范围。利用角抽运方式的优点,有望进一步提高频率转换效率,改善输出光束质量,缩小激光器的体积,降低激光器成本,有利于角抽运倍频激光器的广泛应用。

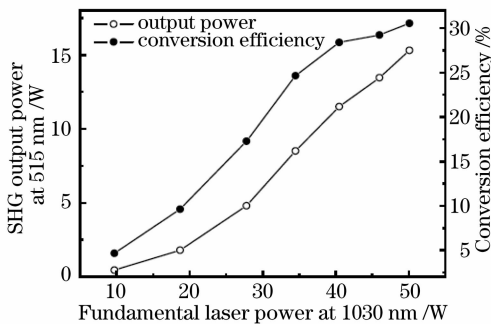


图 7 1030 nm 激光平均输出功率与 515 nm 激光平均输出功率和转换效率的关系

Fig. 7 1030 nm laser average output power as a function of 515 nm laser average output power and conversion efficiency

## 5 中小功率输出的角抽运 Nd:YAG 基模激光器

角抽运方式在大功率准三能级固体激光器中已经取得了一定的进展,实现了千瓦级的输出,光-光转换效率高,但光束质量不高,难以实现基横模输出,像散现象比较严重,这限制了它的应用。目前,中小功率输出的全固态基模激光器有着更加广阔的应用前景。LD 端面抽运 Nd:YAG 基模激光器近些年来发展迅速<sup>[24,25]</sup>,其优势是输出光束质量高,光-光转换效率高,缺点是功率扩展局限性大,激光器成本较高。LD 侧面抽运 Nd:YAG 基模激光器也有报道<sup>[26,27]</sup>,其优势是输出功率较高,缺点是不易得到基模输出,光-光转换效率较低,激光器成本高。角抽运方式作为一种新的抽运形式,既具有端面抽运效率高、激光晶体冷却方法简单的优点,同时也具有侧面抽运抽运均匀性高、功率扩展性强的优点,因此利用角抽运方式,开展中小功率全固态基模

激光器的实验研究具有十分重要的应用价值。从原理上分析,角抽运中小功率输出的复合板条固体激光器是完全可行的,但是其耦合系统、激光介质、腔型结构、输出功率特性等与大功率时存在一些差异,需要进行深入细致的理论计算和实验研究。

在中小功率固体激光器的发展过程中,通常使用 Nd:YAG 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 作为增益介质,两者都实现了较好的激光输出。Nd:YAG 的主要优点是热机械性能好,而 Nd:YVO<sub>4</sub> 的主要优点是有效受激发射截面大,偏振输出,有利于消除热致双折射带来的影响。对于角抽运方式,由于其吸收光程比较长,因此对掺杂浓度和有效发射截面要求不高。Nd:YVO<sub>4</sub> 的优点得不到充分发挥,所以在中小功率激光器增益介质的选择中,采用 Nd:YAG 材料作为增益介质更为合适<sup>[13]</sup>。理论研究了单角抽运的情况下,复合板条激光介质的几何结构参数和掺杂浓度等因素对抽运效率和抽运均匀性的影响,激光二极管温度漂移对抽运特性的影响,中小功率角抽运方式的耦合系统、谐振腔设计等<sup>[13, 28~31]</sup>。

### 5.1 实验装置

角抽运 Nd:YAG 复合板条激光器结构如图 8 所示<sup>[13]</sup>。LD bar 的最大连续输出功率为 50 W,发光面积为  $10\text{ mm}\times 0.7\text{ mm}$ ,有一定的发散角,而激光介质角面的尺寸为  $3\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ ,因此实验中使用由柱面透镜组成的耦合系统对抽运光进行压缩整形。在快轴方向使用一个焦距为 12.7 mm 的柱面透镜,在慢轴方向使用两个焦距为 30 mm 的柱面透镜,通过调整各个柱面透镜的位置,可以把抽运光完全耦合到激光介质中。Nd:YAG 复合板条的掺杂原子数分数为 1.0%。掺杂区域的尺寸为  $14\text{ mm}\times 1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ ,两条非掺杂区域的尺寸为  $14\text{ mm}\times 3.5\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ ,在复合板条的一角沿  $45^\circ$  切一个倒角作为抽运光的入射面。实验中使用了平平直腔,反射镜对 1064 nm 激光

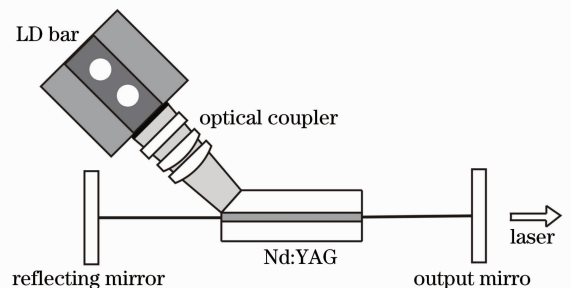


图 8 角抽运 Nd:YAG 复合板条激光器

Fig. 8 Experimental setup of a corner-pumped composite Nd:YAG slab laser

高反,输出镜对 1064 nm 激光的透过率为 30%。

## 5.2 实验结果

稳态条件下的 1064 nm 基模激光功率输出特性如图 9 所示,在抽运功率 45.9 W 时,输出功率为 11.94 W,光-光转换效率为 26%,斜率效率为 31.2%。采用 Spiricon 公司的  $M^2$  激光-光束分析仪对输出激光在不同抽运功率下的光束质量进行了测量,测量结果如表 1 所示。随着抽运功率的增大,1064 nm 激光的光束质量逐渐变差。抽运功率 45.9 W 时的光束质量测量曲线如图 10 所示, $M_x^2 = 1.39$ , $M_y^2 = 1.42$ ,此时,1064 nm 激光的远场光斑接近理想高斯分布,如图 10 左下角所示。从测量结果可知,角抽运 Nd:YAG 复合板条激光器在整个抽运过程中保持基模输出,在最大抽运功率时输出激光依然具有很好的光束质量。由文献[30,31]的理论分析可知,随着抽运功率的增加,在激光介质厚度和宽度两个方向上的热透镜焦距均逐渐减小,热聚焦效应明显。由于在厚度方向采用了通有循环水的紫铜进行冷却,导致热量几乎都从厚度方向流出,因此厚度方向的温度梯度变化要比宽度方向大得多,厚度方向的热透镜效应比宽度方向更严重一些,这导致输出光束质量的非对称性,进而影响光束质量。理论分析和实验结果相吻合,从图 10 的  $M^2$  测量曲线可知 1064 nm 激光输出光斑的非对称性是比较明显的。因此,如何改善光束质量的对称性和进一步提高光-光转换效率将是对中小功率角抽运 Nd:YAG 基模激光器研究的重点内容。

表 1 不同抽运功率条件下的输出激光-光束质量

Table 1 Laser beam quality at different pumping powers

Pumping power /W	$M_x^2$	$M_y^2$
13.77	1.08	1.07
25.23	1.11	1.15
36.1	1.23	1.37
45.9	1.39	1.42

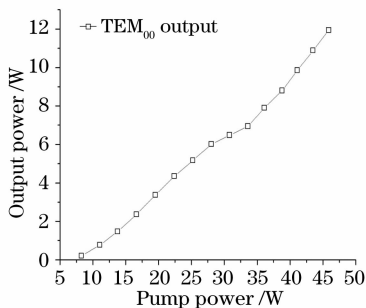


图 9 1064 nm 激光输出功率与抽运功率的关系

Fig. 9 1064 nm laser output power as a function of pumping power

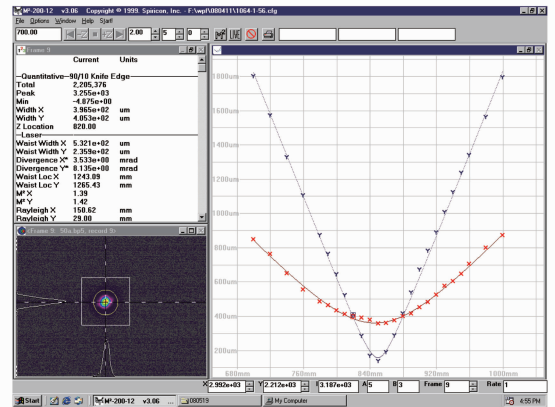


图 10 抽运功率 45.9 W 时的光束质量测量曲线和输出光斑远场分布

Fig. 10 Measuring curve for the beam quality at a pumping power of 45.9 W and far field cross section shape of the 1064 nm laser

## 6 总结与展望

角抽运方式是清华大学光子与电子技术研究中心提出的一种新型抽运方式。经过几年的摸索与研究,已成功研制出千瓦级角抽运 Yb:YAG 复合板条高功率激光器,采用自主设计的微通道冷却装置对板条进行冷却,1030 nm 激光最高连续输出功率 1050 W,光-光转换效率 33.6%,斜率效率 42.8%;研制出角抽运 Yb:YAG 复合板条 LBO 外腔倍频 515 nm 绿光激光器,采用声光调 Q 技术,515 nm 绿光在重复频率 10 kHz 下平均输出功率最高达到 15 W,从基频光到倍频光的转换效率为 30%,脉冲宽度约 150 ns;研制出中小功率角抽运 Nd:YAG 复合板条基模激光器,1064 nm 基模激光连续输出功率最高 11.9 W,光-光转换效率约 26%,45.9 W 抽运时光束质量因子为  $M_x^2 = 1.39$ , $M_y^2 = 1.42$ 。

利用角抽运方式已经可以实现连续千瓦级输出,但此方式也存在一定的弱点,主要是抽运入射面较小,需要对抽运光的快轴和慢轴进行大比例压缩,而抽运光在慢轴方向的光束质量很差,很难实现高效率、大比例压缩,因而采用角抽运方式难以把数万瓦以上的抽运光耦合到板条内部。为了实现数千瓦甚至万瓦级连续激光输出,设计出一种新型的棱边抽运方式,将板条的 4 条棱边进行倒角,得到 4 个抽运面,设计合理的抽运面大小,可以省去繁琐的透镜耦合系统将 LD bar 输出的 808nm 激光直接抽运到板条内。棱边抽运板条激光器保持了角抽运板条激光器的优点,同时具有较大面积的抽运面,有利于进一步扩展功率和降低激光器成本,有望成为获得大

功率高密度激光输出的重要手段之一。

与传统的板条激光器相比,角抽运固体激光器采用复合板条晶体,仅在晶体厚度方向进行了传导冷却,在宽度方向未进行绝热设计,因此两个方向热梯度变化的非对称性导致输出光束质量的非对称性。这是角抽运方式有待解决的问题之一。

在中小功率角抽运全固态激光器方面,如何改善光束质量的对称性和进一步提高光-光转换效率是十分关键的问题。我们将设计一种带有绝热槽的热沉结构,通过在增益介质与热沉接触的局部挖空气槽,使得热量主要通过增益介质角部进行传导,以缓解厚度方向的热透镜效应。在谐振腔设计方面,V型腔或Z型腔等折叠腔可以利用本身产生的像散来补偿增益介质的热透镜效应带来的光斑色散,有利于改善光束质量的对称性,实现较理想的TEM<sub>00</sub>模输出。相比传统的808 nm抽运技术,采用直接抽运可以将离子直接从材料的基态激发到激光上能级,有效降低抽运阈值,减少Stokes频移和量子亏损,有利于获得更高的光-光转换效率。同时直接抽运可以大幅减少热积累造成的不良影响,显著改善光束质量<sup>[32]</sup>。我们还将角抽运全固态激光器中利用频率变换技术开展各项实验研究,有望研制出具有更高光-光转换效率、更小体积、更低成本的新一代激光显示主流产品。

## 参 考 文 献

- 1 J. Eggleston, T. Kane, K. Kuhn *et al.*. The slab geometry laser—Part I: Theory [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1984, **QE-20**(3): 289~301
- 2 T. Kane, J. Eggleston, R. Byer. The slab geometry laser—Part II: Thermal effects in a finite slab [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1985, **QE-21**(8): 1195~1210
- 3 J. P. Machan, W. H. Long, J. J. Zamel *et al.*. 5.4 kW diode-pumped, 2.4 × diffraction-limited Nd:YAG laser for material processing [C]. Advanced Solid-State Lasers, Conference, 2002 Technical Digest, 549~551
- 4 Y. Nishikawa. Slab-shaped 10 kW all-solid-state laser [J]. *Rev. Laser Eng.*, 2003, **31**(8): 513~518
- 5 G. Goodno, H. Komine, S. McNaught *et al.*. Multi-kW near-diffraction-limited single-frequency Nd:YAG laser [C]. Lasers and Electro-Optics Europe CLEO/Europe, 2005, 25
- 6 G. D. Goodno, H. Komine, S. J. McNught *et al.*. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(9): 1247~1249
- 7 Li Jinmin. Development, trend and application of high average power diode pumped lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(7): 16~29  
李晋闽. 高平均功率全固态激光器发展现状、趋势及应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(7): 16~29
- 8 P. Shi, D. J. Li, H. L. Zhang *et al.*. An 110 W Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser with high beam quality output [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **229**: 349~354
- 9 Liu Qiang, Gong Mali, Lu Fuyuan *et al.*. Corner-pumped Yb:yttrium aluminum garnet slab laser emitted up to 1 kW [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**: 101113
- 10 巩马理,李 晨,柳 强等. 一种用于板条的角抽运方法及其固体激光增益模块 [P]. 中国:发明专利,专利申请号:02129485. 2; 专利公开号:CN 1398028A
- 11 Mali Gong, Chen Li, Qiang Liu *et al.*. Corner-pumping method and gain module for high power slab laser [P]. 2008, U. S. Patent, Patent No.: US 7,388,895 B2
- 12 Q. Liu, F. Lu, M. Gong *et al.*. 15 W output power diode-pumped solid-state lasers at 515 nm [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2007, **4**(1): 30~32
- 13 Gong Mali, Zhang Zhipan, Gao Song *et al.*. Diode corner-pumped TEM<sub>00</sub> Nd:YAG lasers [J]. *Laser Technology*, 2009, **33**(1): 1~4  
巩马理,张志攀,高 松. 二极管角部抽运 Nd:YAG 基模激光器 [J]. *激光技术*, 2009, **33**(1): 1~4
- 14 G. D. Goodno, S. Palese, J. Harkenrider. Yb:YAG power oscillator with high brightness and linear polarization [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(21): 1672~1674
- 15 K. Du, N. Wu, J. D. Xu *et al.*. Partially end-pumped Nd:YAG slab laser with a hybrid resonator [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(5): 370~372
- 16 W. S. Martin, J. P. Chernoch. Multiple internal reflection face pumped laser [P]. 1972, U. S. Patent, Patent No.: US 3633126
- 17 T. S. Rutherford, W. M. Tulloch, S. Sinha *et al.*. Yb:YAG and Nd:YAG edge-pumped slab lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(13): 986~988
- 18 Gong Mali, Lu Fuyuan, Liu Qiang *et al.*. Progress in the diode pumped quasi-three level solid state lasers [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2005, **22**(4): 516~524  
巩马理,陆富源,柳 强等. 二极管抽运准三能级固体激光器的新进展 [J]. *量子电子学报*, 2005, **22**(4): 516~524
- 19 Wang Zhimin, Xu Jianqiu, Chen Weibiao. Progress of high-power solid-state lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(2): 48~53  
王志敏,徐剑秋,陈卫标. 新一代大功率固体板条激光器的技术进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(2): 48~53
- 20 M. Gong, C. Li, Q. Liu *et al.*. 200-W corner-pumped Yb:YAG slab laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **79**: 265~267
- 21 Liu Qiang, Gong Mali, Li Chen *et al.*. Corner-pumped Yb:YAG lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(2): 721~725  
柳 强,巩马理,李 晨等. 角抽运 Yb:YAG 激光器 [J]. *物理学报*, 2005, **54**(2): 721~725
- 22 Liu Qiang, Gong Mali, Lu Fuyuan *et al.*. 520-W continuous-wave diode corner-pumped composite Yb:YAG slab laser [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(7): 726~728
- 23 Gong Mali, Lu Fuyuan, Liu Qiang *et al.*. Efficient corner-pumped Yb:YAG/YAG composite slab laser [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(16): 3806~3810
- 24 W. A. Clarkson, D. C. Hanna. Efficient Nd:YAG laser end pumped by a 20-W diode-laser bar [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(12): 869~871
- 25 Maik Frede, Ralf Wilhelm, Martina Brendel *et al.*. High power fundamental mode Nd:YAG laser with efficient birefringence compensation [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(15): 3581~3589
- 26 D. Golla, M. Bode, S. Knoke *et al.*. 62-W cw TEM<sub>00</sub> Nd:YAG laser side-pumped by fiber-coupled diode lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(3): 210~212
- 27 Y. Hirano, Y. Koyata, S. Yamamoto *et al.*. 208-W TEM<sub>00</sub> operation of a diode-pumped Nd:YAG rod laser [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(10): 679~681
- 28 Lu Fuyuan, Gong Mali, Xue Haizhong *et al.*. Analysis on the temperature distribution and thermal effects in corner-pumped slab lasers [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, **45**: 43~48
- 29 Lu Fuyuan, Gong Mali, Xue Haizhong *et al.*. Optimizing the composite slab sizes in corner-pumped lasers [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**: 949~952
- 30 Xue Haizhong, Lu Fuyuan, Xue Mei *et al.*. Resonator design and beam quality measurement in Yb:YAG slab lasers [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(6): 585~588  
薛海中,陆富源,薛 梅等. Yb:YAG 板条激光器谐振腔设计与光束质量测量 [J]. *激光技术*, 2006, **30**(6): 585~588
- 31 Sheng Dacheng, Gong Mali, Liu Qiang *et al.*. Analysis of thermal effects in corner-pumped slab-state lasers [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(1): 86~89  
盛大成,巩马理,柳 强等. 角抽运板条固体激光器热效应的分析 [J]. *激光技术*, 2006, **30**(1): 86~89
- 32 M. Frede, R. Wilhelm, D. Kracht. 250 W end-pumped Nd:YAG laser with direct pumping into the upper laser level [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(24): 3618~3619