

# 高平均功率全固态激光器发展现状、趋势及应用

## Development, Trend and Application of High Average Power Diode Pumped Lasers

李晋闽

(中国科学院半导体研究所 全固态光源实验室, 北京 100083)

Li Jinmin

(Laboratory of All Solid State Laser Sources, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**摘要** 综述了目前获得高平均功率全固态激光(DPL)输出的圆棒、板条、薄片和光纤激光器,以及热容激光和相干合成等主要方式的特点、发展历史及国内外最新进展,分析评述了高平均功率全固态激光器的发展趋势,并展望了其在工业和国防领域的应用前景。

**关键词** 全固态激光; 高平均功率; 圆棒激光器; 板条激光器; 薄片激光器; 光纤激光器

**Abstract** The characteristics, development, and the present research status of high average power laser diode pumped solid state lasers (DPL) such as rod laser, slab laser, disk laser, fiber laser, heat capacity laser technology, and laser coherent combination technology are introduced in details. The future trend of high average power DPL is summarized. The application in industry and national defense of high average power all solid state lasers is introduced.

**Key words** all solid state laser; high average power; rod laser; slab laser; thin disk laser; fiber laser

中图分类号 TN248

## 1 引言

激光的发明是二十世纪最伟大的成就之一。从1960年休斯研究实验室的科学家 T. H. Maiman<sup>[1]</sup>发明世界上第一台激光器以来,激光技术的发展日新月异,逐步渗透到科研、娱乐、医疗、工业和国防等众多领域并产生巨大影响。以激光高技术为核心的相关产业已成为信息时代的重要驱动力量,并带动了整个高技术产业链的发展。激光高技术在国民经济建设、国防安全和科研领域发挥着不可替代的关键作用,是一项具有战略性、全局性和带动性的战略高技术。

全固态激光器(DPL)集半导体激光器(LD)和固体激光器的优势于一体,具有体积小、重量轻、效率高、光束质量好、可靠性高、寿命长、运转灵便(连续/重复率/长/短脉冲)等一系列优点,已成为激光发展中最具前景的方向之一。且它可通过变频获得宽波段输出

(红外、可见、紫外甚至深紫外激光)、便于模块化和电激励等应用优势,已经广泛应用于科研、医疗、工业加工、军事等领域,成为新一代性能卓越的绿色、节能光源。

近年来,随着半导体激光技术的日臻完善和半导体激光器件性能的大幅增长,高功率全固态激光器获得了飞速发展,特别在输出功率和光束质量方面,美国已报道实现了光束质量小于2倍衍射极限的万瓦激光输出,并计划进一步提高其功率至 $10^6$  W,用于机载战术激光武器。针对传统激光器实现高平均功率、高光束质量激光面临的重大障碍之一的热管理技术,还衍生出多种新型结构的激光器而且均取得了显著进展,使得目前全固态激光器领域呈现百花齐放的景象。

本文综述了近年来高平均功率全固态激光器的发展现状,介绍了目前获得高平均功率全固态激光的主要方式及最新进展,分析评述了高平均功率全固态

激光器的发展趋势,展望了其在工业和军事领域的应用前景。

## 2 高平均功率全固态激光器发展现状

鉴于高平均功率 DPL 具有独特优势以及广阔的应用前景,美、俄、日、德等发达国家都投入了大量的人力和财力进行研究并取得了重大进展,目前输出平均功率均已超过千瓦,并分别用于工业和军事领域。高功率 DPL 实现的途径也是多种多样,按增益介质形状主要有圆棒激光器 (Rod Laser)、板条激光器 (Slab Laser)、薄片激光器 (Thin disk Laser) 和光纤激光器 (Fiber Laser) 等,另外,热容技术和相干合成技术也成为目前获得高功率输出的有效技术手段。国内由于受到大功率半导体激光器抽运源禁运的限制,在高平均功率全固态激光器方面的研究起步较晚,与国际尚有较大差距,但发展迅速,已逐步接近国际水平。

### 2.1 圆棒激光器

圆棒激光器是目前发展最成熟、应用最广泛的固体激光器构造。其中圆棒增益介质主要有 Nd:YAG 和 Yb:YAG,按抽运方式不同可分为端面抽运和侧面抽运两种方式。端面抽运又称纵向抽运,是指抽运光从晶体棒的端面入射,激光沿晶体棒长度方向振荡的抽运方式。采用这种抽运方式能使抽运光和振荡光较好地模式匹配,有利于获得高效率近衍射极限激光输

出。因而采用 LD 端面抽运结构的 DPL 转换效率一般较高,输出光束质量也较好。目前端面抽运已获得光光转换效率大于 76% 的单横模激光输出<sup>[2]</sup>。然而,端面抽运方式受到谐振腔基模体积的约束,即要实现抽运光和基模空间较好的匹配,需要抽运光入射在激光介质的端面面积较小,这样不仅限制了注入抽运光功率,同时还在激光介质内产生较大的局部温度梯度和复杂的热光效应,影响了光束质量。而且,由于温度梯度导致晶体棒内的热应力必须小于晶体自身碎裂应力,以及端面镀制的抽运光和振荡光的双色膜的抗激光损伤阈值一般较低等因素,限制了注入的抽运光功率,因此很难获得千瓦级高平均功率输出,目前获得的高平均功率端面抽运 DPL 输出功率多在百瓦级<sup>[3]</sup>。

尽管大功率固体激光器大多采用侧面抽运,但是端面抽运带来的高光束质量及高效率等优点,一直是科学家们孜孜不倦追求的目标,为了获得高功率输出,科学家们提出了许多极富创造力的新思想和新方案,其中 2000 年美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室 (LLNL) 的 R.J.Beach 等<sup>[4]</sup>提出利用透镜导光锥 (Lens Duct) 端面抽运三明治 Yb:YAG 晶体棒获得千瓦级输出的新型结构,堪称端面抽运领域的经典之作(如图 1,2),在注入总抽运功率为 3930 W 时,获得了 1080 W 的连续波激光输出,光束质量因子  $M^2$  约为 14。

侧面抽运又称为横向抽运,是指将 LD 阵列

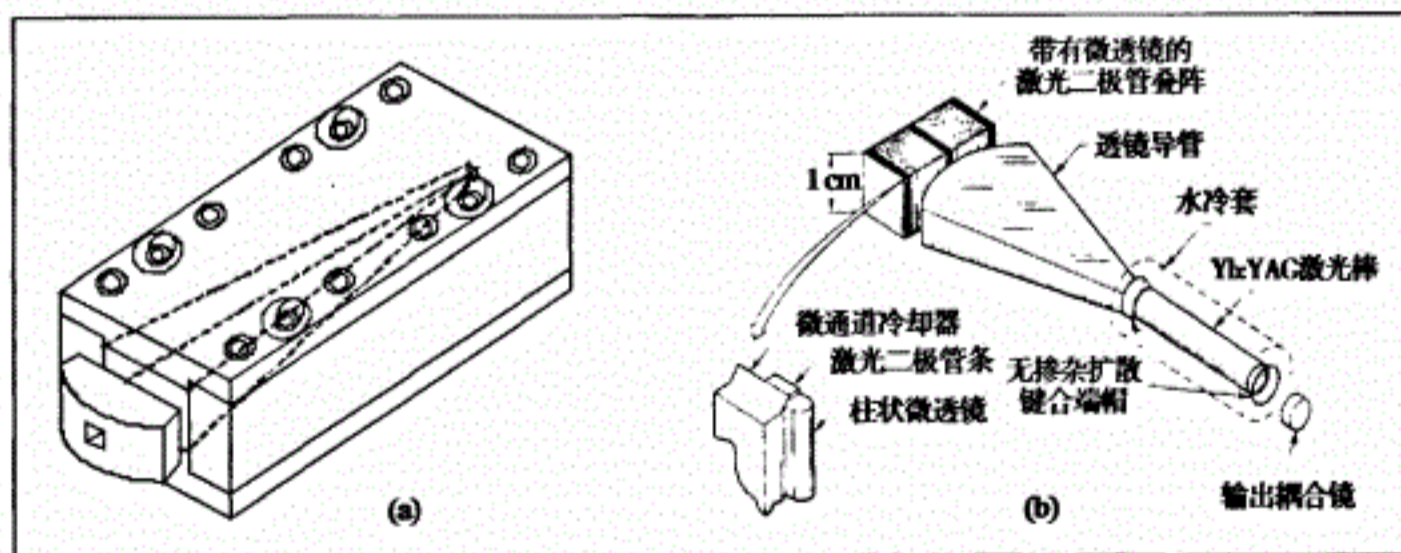


图 1 楔形透镜导光锥结构示意图

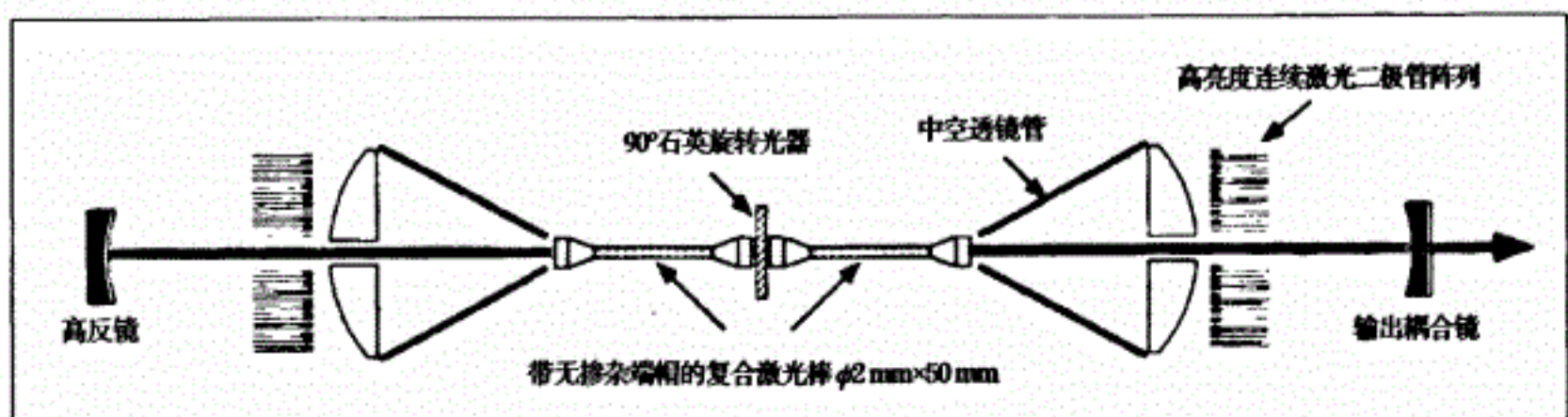


图 2 LLNL 千瓦级端抽运激光器

(LDA) 发出的抽运光从晶体棒的侧面注入到晶体棒中,激光沿晶体棒长度方向振荡的抽运方式。侧面抽运方式结构简单、性能稳定、成本低,采用单个激光模块就能很容易输出百瓦级甚至千瓦。然而,在侧面抽运结构中,晶体棒中的增益分布很难与谐振腔本征基模很好地匹配,而且由于晶体棒中心的温度比表面高得多,导致较严重的热透镜效应和热退偏,降低了输出激光的光束质量。而且,抽运光要经过隔离冷却液的管道(一般为石英管)和冷却液(一般为水)才能到达晶体棒,其中石英管的内外表面和晶体棒表面的对抽运光的反射,冷却液对抽运光的吸收都会影响抽运效率,因此侧面抽运的光光转换效率普遍比端面抽运要低,一般为40%左右。不过由于侧面抽运很容易将高功率泵光注入到晶体棒中,因此较容易获得高功率输出,而且通过改进设计,也能获得百瓦以上的近衍射极限的基模输出<sup>[9]</sup>。

2003年日本 Toshiba 公司采用6个激光头串接定标放大,获得了12 kW的1064 nm激光输出(如图3所示)<sup>[9]</sup>,这是目前报道的棒状激光器的最高输出功率。图4为LD抽运模块的示意图,实验中采用三围环绕抽运方式,每维的叠阵由36个输出功率为40 W的LDA构成。LDA叠阵发出的抽运光经柱面透镜准直后入射到晶体棒上。石英管外表面未抽运的区域镀有高反膜,以增加其反射吸收,当注入电功率为52.5 kW时,获得12 kW的1064 nm连续波激光输出,电光转换效率为23%。

2005年美国 H. Bruesselbach 等<sup>[10]</sup>报道单根 Yb:YAG 激光棒(如图5所示)输出2.65 kW的实验结果,这是目前单根激光棒所能达到的最大输出功率。实验中所用的冷却液为 D<sub>2</sub>O (因为 D<sub>2</sub>O 对 941 nm 抽运光的吸收较少)。激光介质为扩散键合的 Yb:YAG/YAG 晶体,中间是尺寸为  $\Phi 4 \times 80$  mm,掺杂原子数分数为0.6%的 Yb:YAG,两端键合  $\Phi 6$  mm 的白 YAG,晶体



图3 12 kW 激光器实验装置图

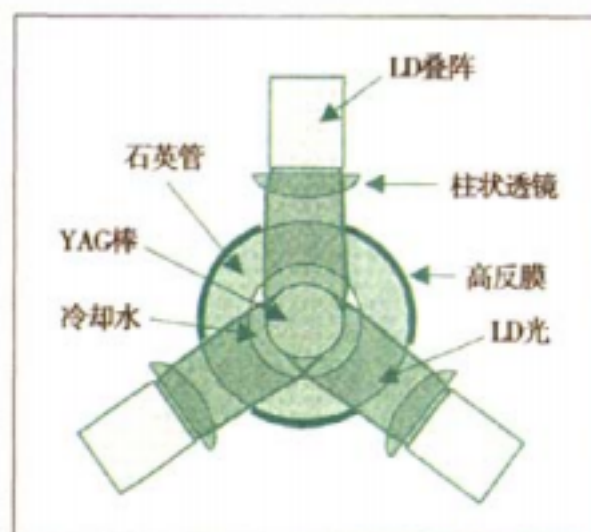


图4 LD 抽运模块示意图

总长度为128 mm,端面切一小楔角以防止寄生振荡。当抽运功率为9 kW时,得到2.65 kW激光输出,光光转换效率为28%。当抽运功率为6 kW时,得到高光束质量( $M^2=2.1$ )的860 W激光输出。

国内研究棒状高功率全固态激光器的单位主要集中在中科院物理所、中科院福建物构所、华北光电所、华中科技大学、中科院半导体所等单位。其中2006年4月中科院半导体所采用自行研制的高功率激光头,通过双棒串接获得超过3 kW的全固态激光输出<sup>[8]</sup>;10月,中科院物理所通过多棒串接方式,获得3.8 kW高功率激光输出<sup>[9]</sup>;11月中科院半导体所全固态光源实验室对激光头进行了多项技术改进,获得了超过4 kW的激光输出,光光转换效率超过50%<sup>[10]</sup>。2007年6

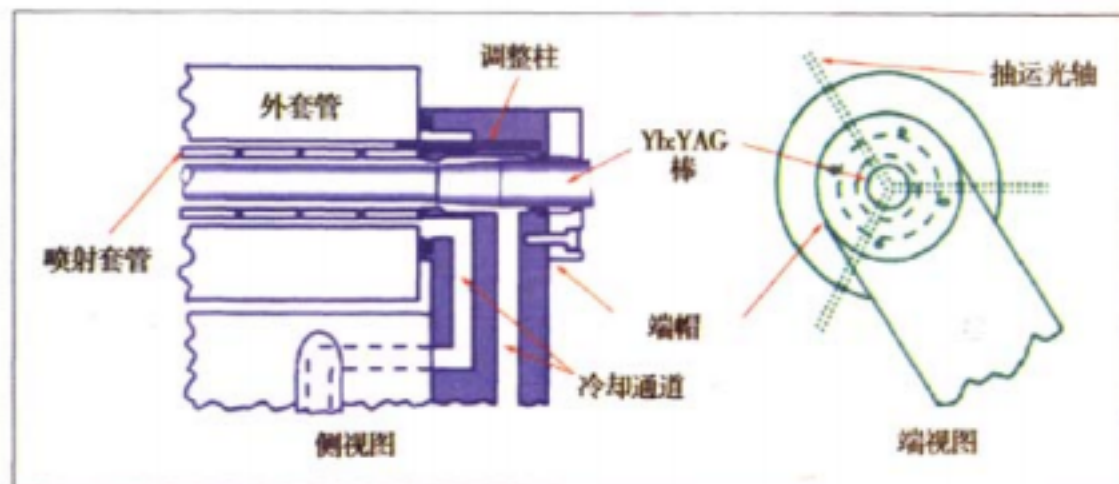


图5 Yb:YAG 激光头的抽运和冷却示意图

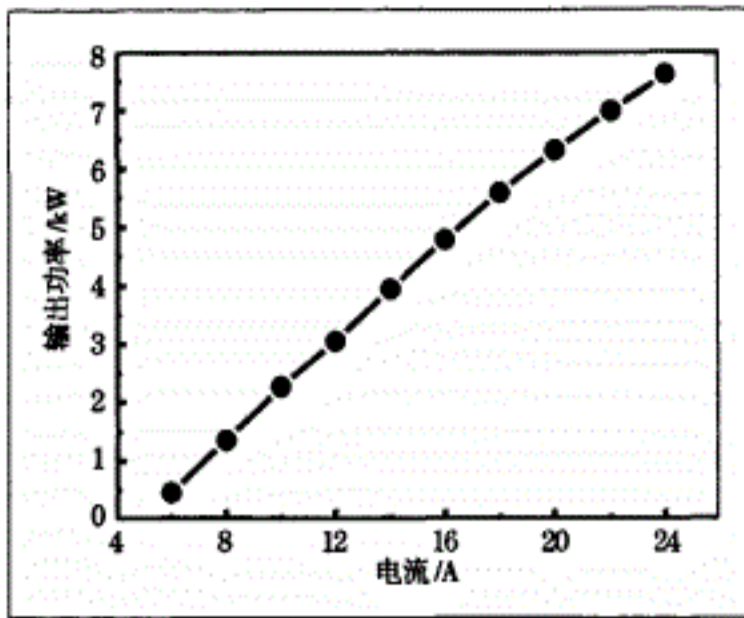


图 6 中科院半导体所 7.6 kW 激光输出曲线

月中科院半导体所采用三棒串接方式，获得 6 kW 高功率全固态激光输出<sup>[11]</sup>，光光转换效率超过 50%。目前已获得超过 7.6 kW 的全固态激光输出(图 6)。

## 2.2 板条激光器

板条激光器始于 1972 年<sup>[12]</sup>，该结构(图 7)将激光晶体切割成长方体(口香糖结构)，板条激光晶体由于具有三组对称面，因此有面抽运、边抽运和端面抽运三种抽运方式。面抽运由于抽运面积较大，因而相应抽运功率密度较低，增益介质内增益分布较均匀，热梯度较小，不足之处是冷却面与抽运面重合，冷却介质容易污染抽运面，降低抽运效率。边抽运具有抽运效率高，抽运面与冷却面相分离，有利于保持系统长期工作稳定性等优点，但是却有着较为严重的热光效应，而且抽运面较小，难以注入高功率抽运光。端面抽运板条与端面抽运圆棒类似，将抽运光从晶体的端面入射，由于板条激光器的端面面积通常更小而且为矩形，这对其耦合是一项具有挑战性的工作。此外，还可将板条切割成其他形状，采用更灵巧的方式来抽运<sup>[13-14]</sup>。

板条激光器的厚度或宽度与抽运吸收长度相匹配，一般通过“之”字形光路以补偿厚度方向上的热畸

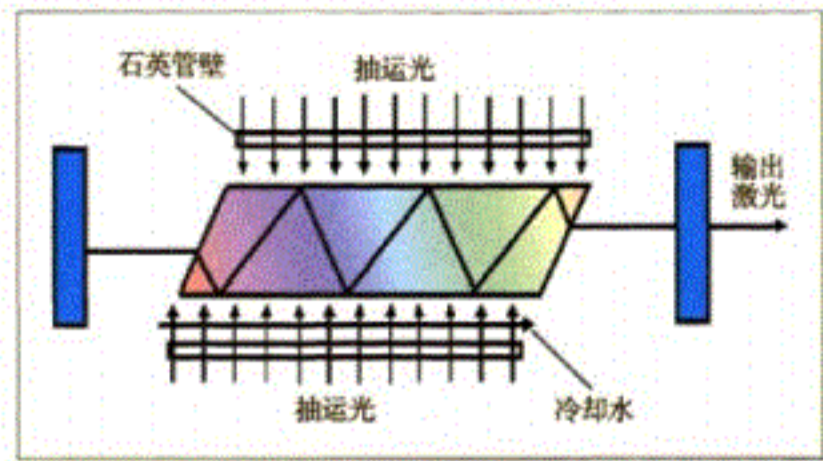


图 7 面抽运板条激光器的结构图

变。宽度方向尺寸根据激光输出功率要求设计，并采用边缘绝热技术控制该方向的热流，减小温度梯度，从而实现高光束质量激光输出。但板条侧效应、端效应会影响光束质量并且要求的调节精度较高。2002 年美国 TRW 公司<sup>[15]</sup>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；2003 年日本 Fanuc 公司<sup>[16]</sup>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；2005 年美国诺格公司<sup>[17]</sup>通过端面抽运板条放大系统，获得 25 kW 的高功率激光输出。

2006 年美国诺格公司<sup>[18]</sup>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。实验装置如图 8 所示。由单频种子源的激光经过 Yb 掺杂的光纤放大器(YDFA)，通过分束分成三束 1 W 的激光。其中一束作为相干相位的参考光。其他两束先预放到 200 W 后进入主振荡功率放大器(MOPA)链进一步放大。每个 MOPA 链由 4 块传导冷却、端面抽运的键合 Nd:YAG 板条组成(如图 9 所示)。从 LDA 输出的抽运光经整形后，入射到板条两端进行抽运，板条的两端进行 45°切割，将抽运光和振

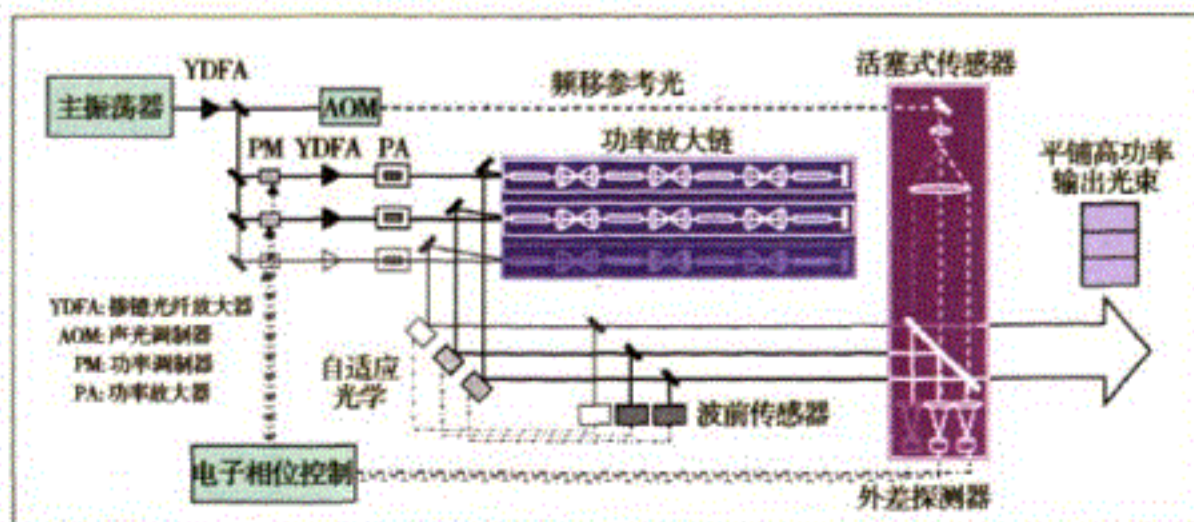


图 8 19 kW 高功率 Zigzag 板条激光器

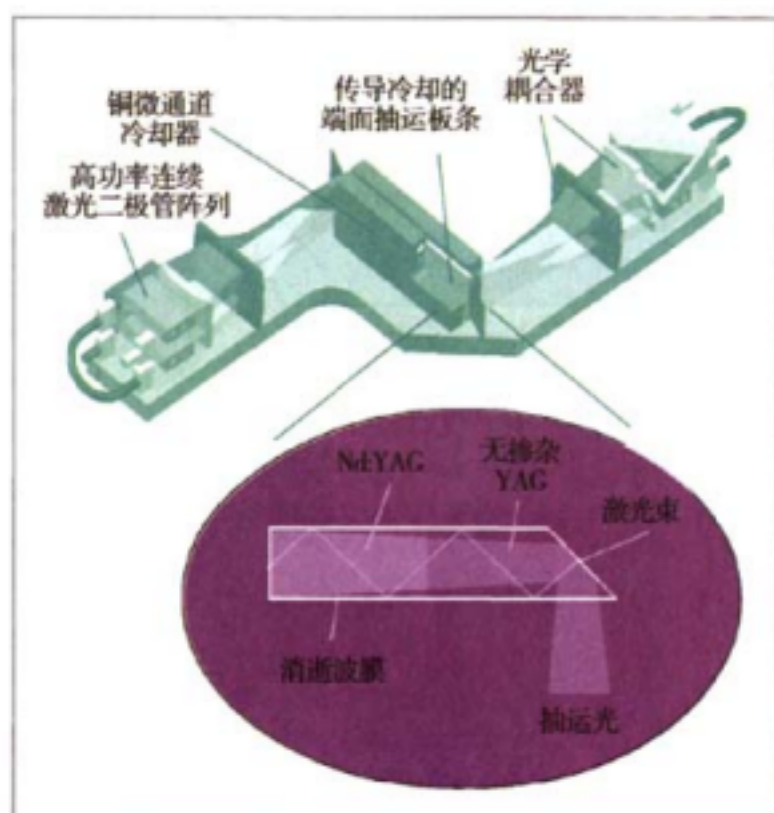


图9 传导冷却、端面抽运的 Zigzag 板条放大器

荡光分开,板条产生的热由铜微通道冷却器带走,通过4块板条放大后,每路入射光被放大到9~10 kW,最后将两路相位相干光进行合束,获得19 kW的激光输出,光束质量  $M^2$  因子为1.73。

院技术物理所的研究人员提出来的<sup>[21]</sup>,是全固态激光器历史上的一个里程碑,其结构特点是:激光介质具有大的口径/厚度比[(10~50):1];采用面抽运、面冷却;通过精密光学系统设计使光纤耦合输出的抽运光在晶体薄片(100~400 μm)中多次(8~32次)通过,增加对其吸收(达到90%以上)。

这种结构的热梯度分布方向与激光束传播方向相同,避免了热透镜效应引起的不利影响(如图11所示)<sup>[22]</sup>,而且,薄的晶体明显降低了 Yb:YAG 的重吸收损耗,从而提高了转换效率。因此,薄片激光十分适合高亮、高平均功率发展的需要。其不足之处在于:光学设计非常复杂,元器件多,不利于系统的稳定性;高功率抽运时要求在很小的面积(约几十平方毫米)内将千瓦级的热带走,其散热系统设计十分困难。

薄片激光器通过设计可实现端面多通抽运、侧面抽运以及混合抽运。端面抽运的结构如图12所示<sup>[23]</sup>,将薄片增益介质采用某种方式焊接在微通道冷却的热沉上,这个过程应设法避免薄片介质在焊接过程中引入的应力。薄片增益介质的后端面作为腔镜镀抽运光和激光的高反膜,前端面镀二者的增透膜,输出镜

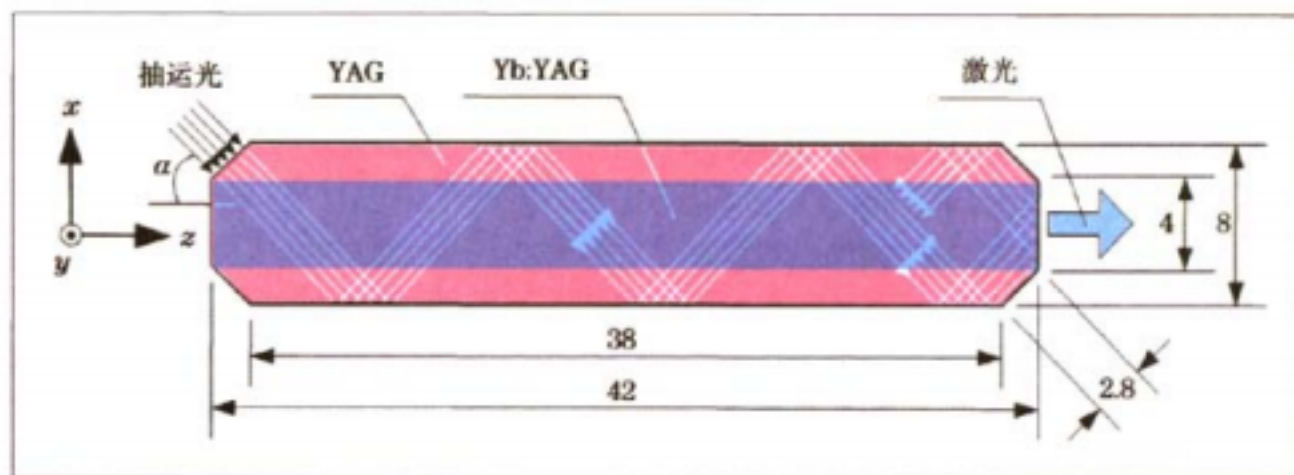


图10 角抽运Yb:YAG板条示意图

国内开展高平均功率板条激光器研究的单位主要有华北光电所、中科院上海光机所和清华大学,其中清华大学采用的角抽运 Yb:YAG/YAG 复合板条结构,获得千瓦级激光输出。该结构如图10所示,其中 Yb:YAG 晶体尺寸为42 mm(长)×4 mm(宽)×1 mm(厚),两侧各键合一块42 mm(长)×2 mm(宽)×1 mm(厚)的白 YAG,并将复合晶体的四个角切割成45°以注入抽运光,为保证抽运光能多次通过晶体介质以达到均匀抽运的目的,将 Yb:YAG 晶体的掺杂原子数分数降低至0.5%。利用该板条成功获得1016 W 激光输出,光光转换效率达到34%<sup>[19,20]</sup>。

### 2.3 薄片激光器

薄片激光器的概念是1994年德国航空航天研究

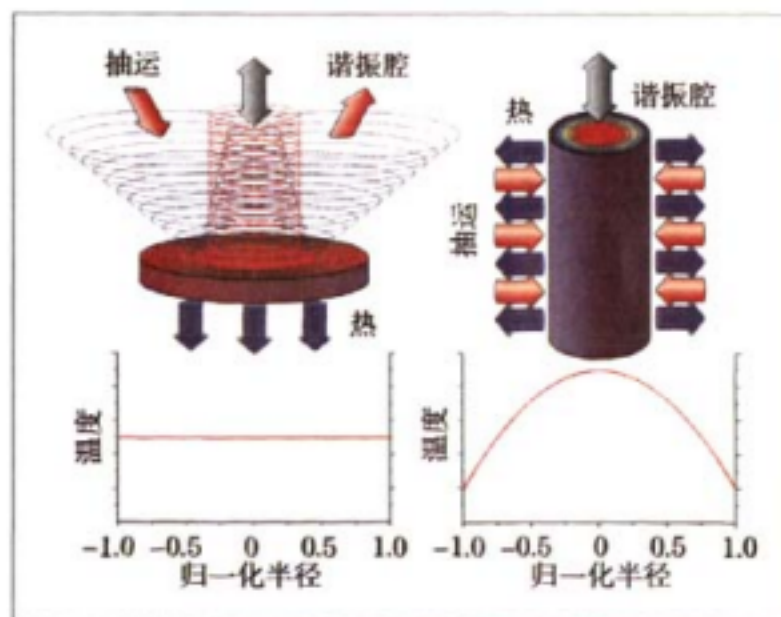


图11 薄片和棒状增益介质在横截面上的温度分布

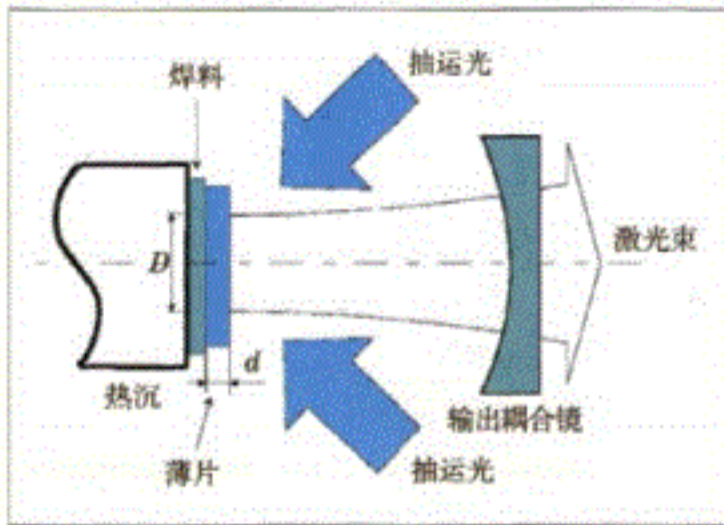


图 12 端面抽运薄片激光器

一般采用球面镜。抽运光以一定的角度入射在增益介质上,两处通过增益介质后,出射的剩余抽运光再次被反射回增益介质,如此反复,抽运光多次通过薄片介质最后达到很高的吸收值,整个过程要求抽运尽量均匀化,如图 13 所示<sup>[24]</sup>。

德国 Trumpf-Laser 公司<sup>[24]</sup>采用多通耦合单个 Yb:YAG 薄片获得 5.3 kW 的激光连续输出,光光转

杂晶体的边缘复合非掺杂的晶体,其厚度为 2.5 mm 左右,直径为 50~150 mm,这种复合结构有利于抽运激光与掺杂晶体的高效率耦合,同时掺杂晶体的边缘被冷却,利于抑制热透镜效应和寄生振荡。热沉表面开有微通道,利用环境气压与微通道冷却液之间的压力差将晶体压到热沉上,冷却液直接将晶体的热量带走。这种结构的主要困难在于晶体的曲面复合和高效率微通道热沉的设计,当抽运功率很大时晶体易产生较大的形变。

无论是端面抽运还是侧面抽运都要求抽运均匀,端面抽运利用多通耦合实现均匀抽运,CAMIL 则利用半导体激光的发散角来实现均匀抽运。增益介质内各点的抽运功率密度取决于半导体激光阵列的输出功率、发散角、排布方式以及增益介质的掺杂浓度,可以通过调整增益介质对抽运光的吸收强弱来实现抽运的均匀性。快轴平行于薄片表面和快轴垂直于薄片表面的抽运方式均能实现均匀抽运,在应用方面各有优缺点,前者不需要对抽运光进行快轴准直并且容易实

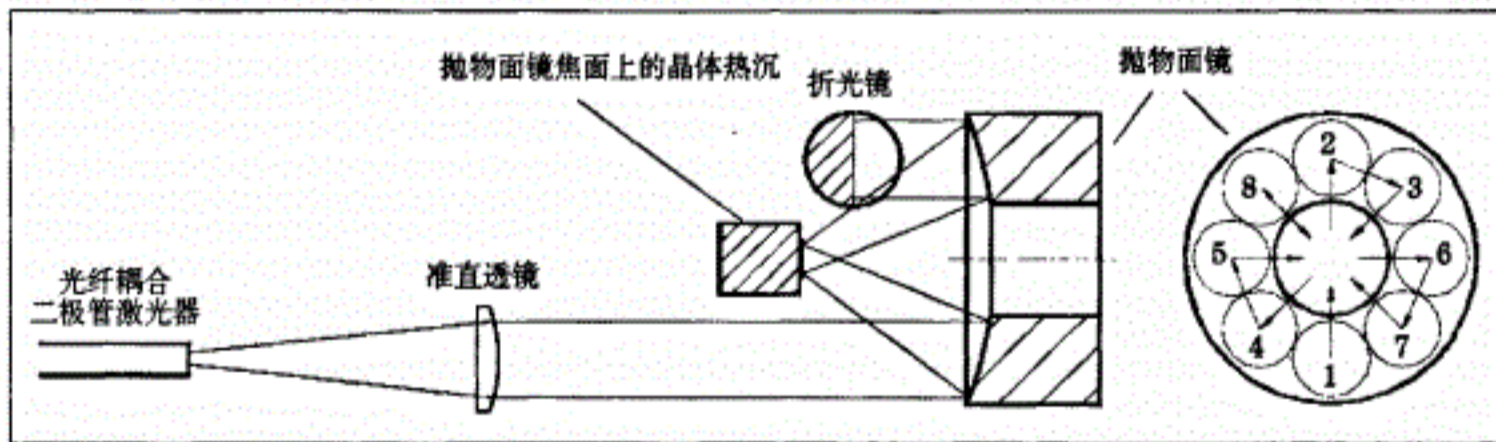


图 13 多通耦合抽运结构图(16通)

换效率达到 65%,是目前在单个薄片上获得的最高的输出功率。将多个薄片置于同一谐振腔进行定标放大是获得高功率激光输出的有效途径,Trumpf-Laser 公司<sup>[24]</sup>采用 4 个 Yb:YAG 薄片获得超过 9 kW 的激光输出, $M^2$  因子小于 24,图 14 是 4 个薄片串接的结构图。Rofin-Sinar 公司<sup>[25]</sup>也采用 4 个 Yb:YAG 薄片获得 4 kW 的激光输出。国内中国工程物理研究院<sup>[26]</sup>于 2007 年报道了采用 4 通耦合获得 1.5kW 的薄片激光输出。

侧面抽运的薄片激光器一般采用复合的增益介质,相比端面抽运最大的优点是吸收路径长,缺点是复合晶体的厚度一般在毫米量级,薄片两端面的温差较端面抽运大。一种著名的概念设计称作紧凑型有源镜激光器(compact active mirror laser,简称 CAMIL)是由美国波音公司提出来的,结构如图 15 所示<sup>[27]</sup>。掺

现均匀抽运,但水电排布导致其结构较为复杂;后者结构相对简单但是抽运的均匀性更依赖于半导体激光阵列排布、慢轴发散角及掺杂浓度。两种抽运结构

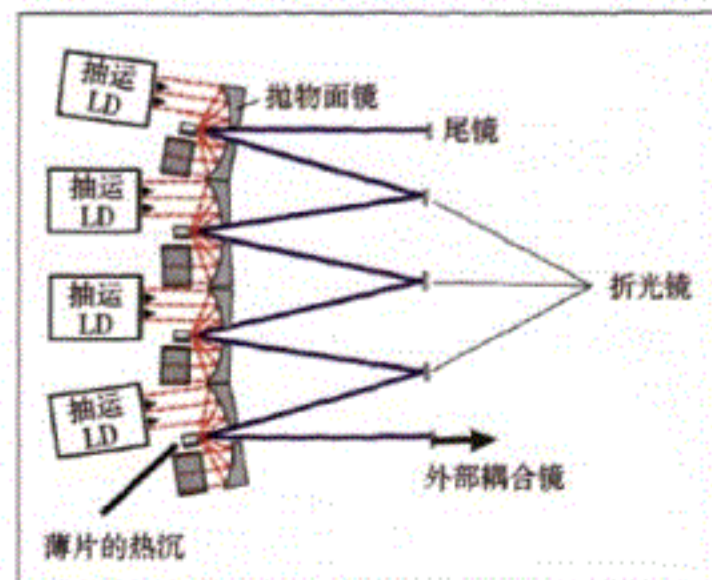


图 14 多薄片定标放大结构

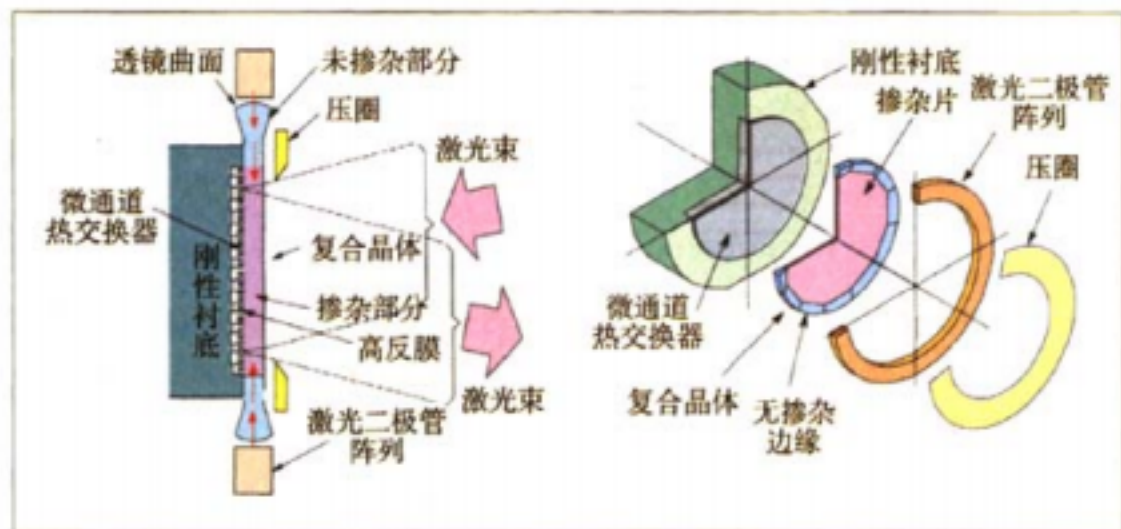


图 15 边缘抽运的 CAMIL 薄片激光器

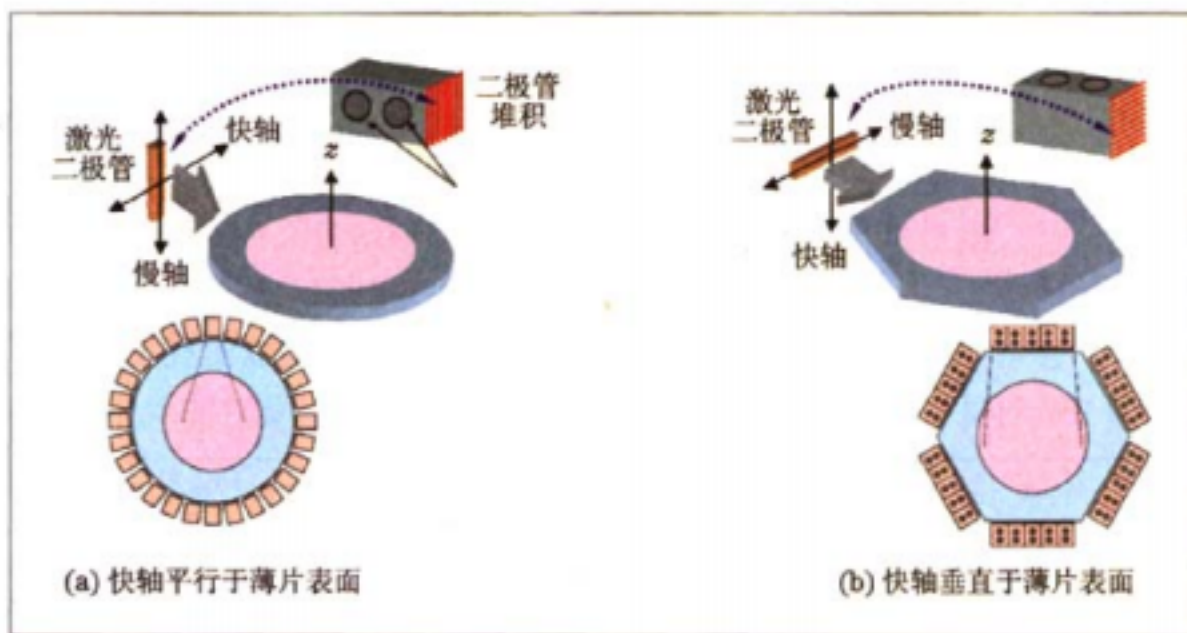


图 16 边缘侧面抽运半导体激光抽运源的结构

如图 16 所示<sup>[27]</sup>。

2006 年,日本冈崎分子科学研究所激光研究中心的科学家<sup>[28]</sup>采用激光二极管侧抽运单块复合晶体(Yb:YAG/YAG)薄片上获得了 230 W 的激光输出。2007 年清华大学报道了一种激光二极管侧面抽运的 Nd:YAG 薄片激光器,获得 123 W 的激光输出。由于掺杂 Yb:YAG 复合在 YAG 的一个端面,从抽运结构讲是侧泵,但从抽运光通过掺杂 Yb:YAG 的方式看是端面抽运的,既具有角抽运板条激光器的特点,又有端面抽运

薄片激光器的特点,实际是一种混合的抽运方式,其抽运结构如图 17 所示<sup>[29]</sup>。

### 2.4 光纤激光器

光纤激光器是近年来激光领域关注的热点之一,也是目前实现高平均功率、高光束质量激光的重要手段之一。它最初在 20 世纪 60 年代由 E. Snitzer<sup>[30]</sup>提出,但由于光纤工艺、抽运技术及半导体激光器的发展等因素限制,一直进展缓慢,输出功率不高,直到 1988 年 E.Snitzer 等<sup>[31]</sup>提出了双包层光纤以后,使得高平均功率光纤激光器技术取得了重大突破,输出功率很快达到百瓦<sup>[32]</sup>,2004 年前后突破千瓦量级<sup>[33-36]</sup>。目前美国的 IPG 公司<sup>[36]</sup>已可提供单模 3 kW,多模 50 kW 的光纤激光器产品。

双包层光纤是一种具有特殊结构的光纤,它由纤芯、内包层和外包层组成,比常规的光纤增加了一个内包层。其中,纤芯一般掺有稀土离子,如:Nd<sup>3+</sup>,Yb<sup>3+</sup>或 Er<sup>3+</sup>等,其直径在微米至几十微米量级,是单模激光的传输波导;内包层包绕在纤芯的外围,是抽运光的传输波导,其直径和数值孔径(NA)都比较大,多为百微米,因此与传统光纤激光器需要将抽运光耦合到

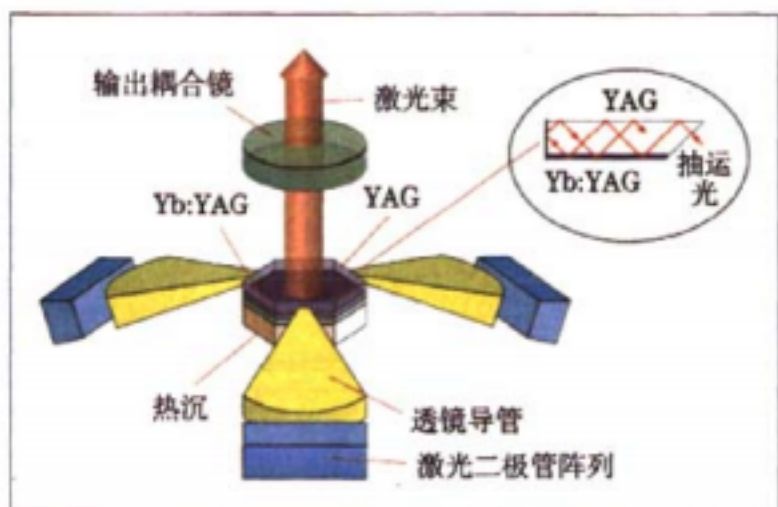


图 17 清华大学端面抽运薄片结构

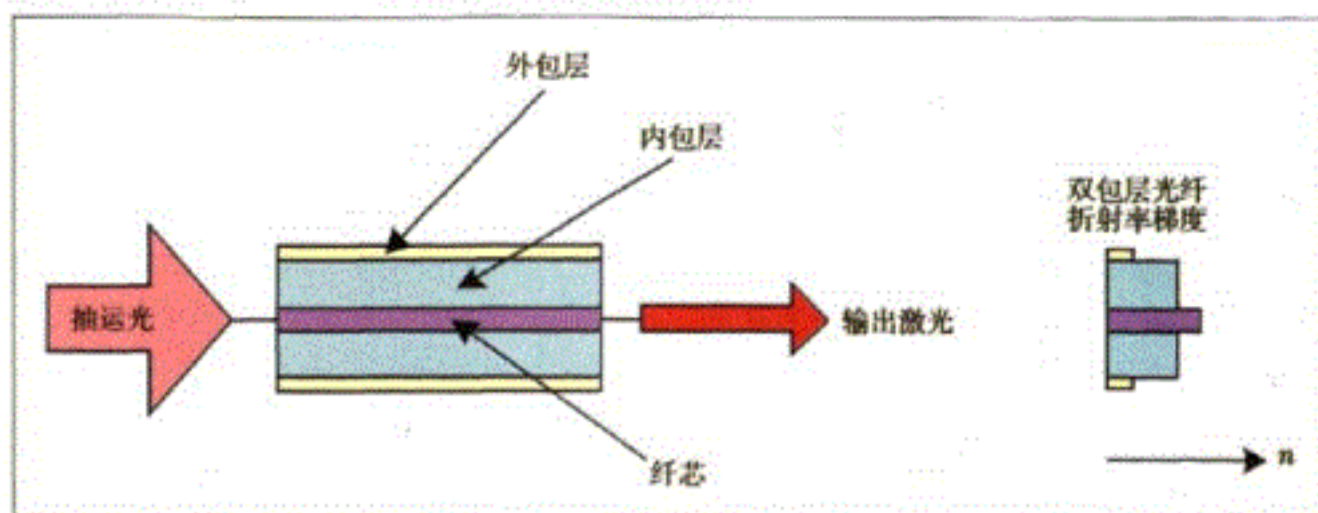


图 18 双包层光纤示意图

纤芯相比,双包层光纤激光器只需要将抽运光耦合到双包层中即可,其耦合效率很高。抽运光在内包层传输时,以全反射方式反复穿越纤芯,被纤芯内的稀土离子吸收,从而产生单模激光,并具有很高的转换效率,如掺 Yb(镱)光纤的光-光转换效率可达 80% 以上。近年来,随着双包层光纤制造技术、高功率 LD 抽运源技术以及先进的光束整形技术等迅速发展,高功率光纤激光器技术也在日新月异,其关键技术包括包层抽运技术、谐振腔技术和调制技术等都获得了重大突破。

包层抽运技术主要有端面抽运和侧面抽运两种方式<sup>[37-40]</sup>。端面抽运又可以分为透镜直接耦合、光纤端面熔接耦合和多个小功率 LD 端面耦合等方式,它具有结构简单优点,但存在输出功率有限,不容易扩展的缺点,目前实现千瓦级的高功率激光输出大都采用端面抽运或双端抽运的结构;侧面抽运主要有 V 形槽法、狭缝法、角度磨抛法、二元衍射光栅嵌入镜法、熔接法、分布式包层和集中抽运等方式,功率容易扩展,但工艺非常复杂,目前国际上采用侧面抽运能实现高功率输出的还不多,处于研究状态。其中日本采用集中抽运方式获得了 1 kW 的光纤激光输出<sup>[41]</sup>,是采用侧泵方式实现的最高功率输出,但其制作工艺非常复杂。在研究抽运技术的同时,还发现抽运光的吸收效率与内包层的几何形状以及纤芯在包层中的位置也有非常重要的关系,典型的内包层结构有同心

圆、偏心圆、方形、矩形、D 形以及梅花形等形状, Anping Liu 等<sup>[42]</sup>对此进行了研究,对各种内包层形状的吸收特性进行了计算。结果表明:同心圆形结构的吸收效率最低,而非圆形的内包层结构对抽运光的吸收效率很高,目前实现大功率输出的双包层光纤多采用 D 形结构,既比较容易实现光纤制备,又具有比较高的吸收效率。

双包层光纤激光器的谐振腔主要有两种方式,一是利用双色镜作为腔镜,与传统的固体激光器类似,实现起来比较容易,但无法实现全光封装,可靠性稍差,且不利于光纤激光器的实用化和产品化。另一种方式是采用光纤光栅作为谐振腔镜,光纤光栅具有非常好的波长选择特性,损耗低,并且可以和光纤熔接在一起,使抽运光耦合变得比较容易而且效率很高,整体的可靠性提高很多,易于实现全光结构,利于实用化和产品化。目前两种方式均被采用,但高功率的光纤激光器对光纤光栅的工艺要求很高,国内目前尚难以实现。

从双包层光纤概念的提出以来,光纤激光器发展非常迅速,1999 年 V. Dominic 等<sup>[39]</sup>用掺 Yb 双包层光纤作增益介质,利用 4 个 45 W 的 LD 进行双端抽运,采用法布里-珀罗 (F-P) 腔结构实现了输出功率为 110 W 的单模光纤激光输出,波长为 1120 nm,斜率效率为 58%,到 2004 年前后,随着双包层光纤技术、

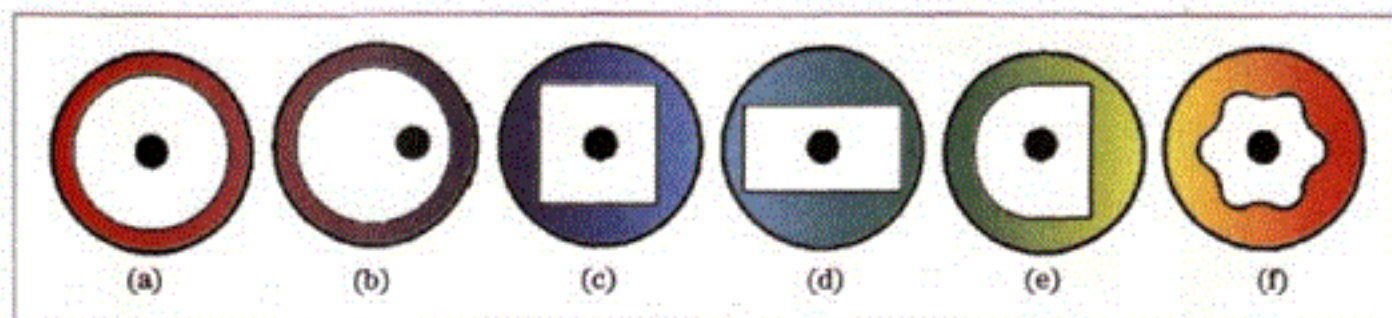


图 19 双包层光纤内包层形状示意图

(a) 同心圆形;(b) 偏心圆形;(c) 方形;(d) 矩形;(e) D 形;(f) 梅花形



高功率抽运源技术和抽运技术的发展,单根光纤激光器的连续输出功率很快从百瓦量级发展到千瓦量级。英国 SPI 的 Y. Jeong 等<sup>[33,34]</sup>在 2004 年利用两个半导体激光器叠阵通过透镜耦合双端面抽运芯径为 40  $\mu\text{m}$ , 内包层为 600  $\mu\text{m}$  的双包层光纤获得 1.01 kW, 波长为 1090 nm, 光束质量因子  $M^2=3$  的光纤激光输出<sup>[35]</sup>, 并于同年年底研制成功 1.36 kW 连续光纤激光器, 如图 20 所示, 该激光器采用双端抽运 12 m 长的双包层光纤, 其纤芯为 40  $\mu\text{m}$ , 数值孔径低于 0.05, 内包层直径为 600  $\mu\text{m}$ , 采用两个 975 nm LD 模块的抽运源, 总抽运功率为 1.8 kW, 获得 1.36 kW 激光输出, 斜率效率达 83%, 输出激光的波长为 1.1  $\mu\text{m}$ , 光束质量因子  $M^2=1.4$ 。美国 IPG 公司采用多个单管分布式耦合的模块化结构使光纤激光器功率迅速提高到万瓦以上, 其单模连续光纤的最大输出功率已达 3 kW<sup>[36]</sup>, 目前已可提供 50 kW 的光纤激光系统(如图 21)<sup>[36]</sup>。另外, 光子晶体光纤也是近年发展起来的一种大模体积光纤, 目前, 德国 Jena 大学<sup>[40]</sup>利用单纤已得到 1530 W 的高光束质量的激光输出。

国内高功率双包层光纤激光器的研究起步较晚, 1999 年南开大学和电子 46 所<sup>[41]</sup>合作成功研制出国内第一根双包层掺 Yb 光纤。2000 年中国科学院上海光机所<sup>[42]</sup>首次报道了输出功率 3.84 W, 斜效率为 55% 的双包层光纤激光器, 它采用端面抽运结构, 输出波长

1037 nm。最近两年发展有很大的突破, 多家单位实现千瓦级的激光输出, 2006 年, 清华大学<sup>[43]</sup>采用烽火通信提供的新型掺 Yb 双包层光纤(内包层直径为 600  $\mu\text{m}$ , D 形结构), 采用双端面抽运结构, 在总抽运功率约为 1020 W 时, 获得 714 W 激光输出, 总光-光转换效率达到 70%, 斜率效率接近 72%; 2006 年 5 月, 中国兵器装备研究院<sup>[44]</sup>研制成功的单根光纤激光器输出功率达到 1049 W, 光-光转换效率大于 60%, 电-光转换效率大于 30%。2006 年 8 月, 华北光电技术研究所<sup>[45]</sup>采用新型掺镱光纤(D 形内包层, 直径 700  $\mu\text{m}$ ), 研制出平均功率达 1.2 kW 的光纤激光输出<sup>[46]</sup>。该激光器对光纤两端面进行高精度抛磨处理, 利用光纤端面的非涅耳反射作输出腔镜, 通过双色镜耦合输出激光。采用双端面抽运方案, 当抽运光功率为 1550 W 时, 光纤激光输出功率为 1207 W, 斜率效率为 78.6%, 输出功率波动约为 1%。同年, 中科院上海光机所报道他们采用国产光纤, 也实现 1 kW 输出<sup>[47]</sup>。

## 2.5 热容激光技术

DPL 热容运转 (SSHCL) 技术最早是由美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室 1998 年提出的<sup>[50]</sup>, 即激光器先在不冷却的条件下发射激光, 当激光发射停止时再对晶体进行冷却。该运转模式突破性地从时间上将激光发射和晶体冷却分为两个交替发生、相辅相成的阶段, 大大降低了传统冷却方式中由于晶体表面及其内

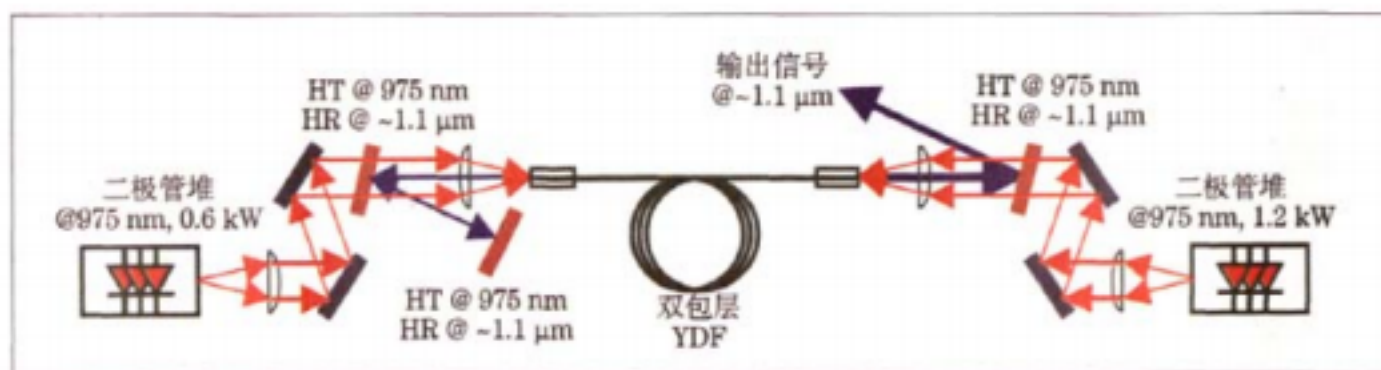


图 20 南安普顿大学光纤激光器实验光路示意图

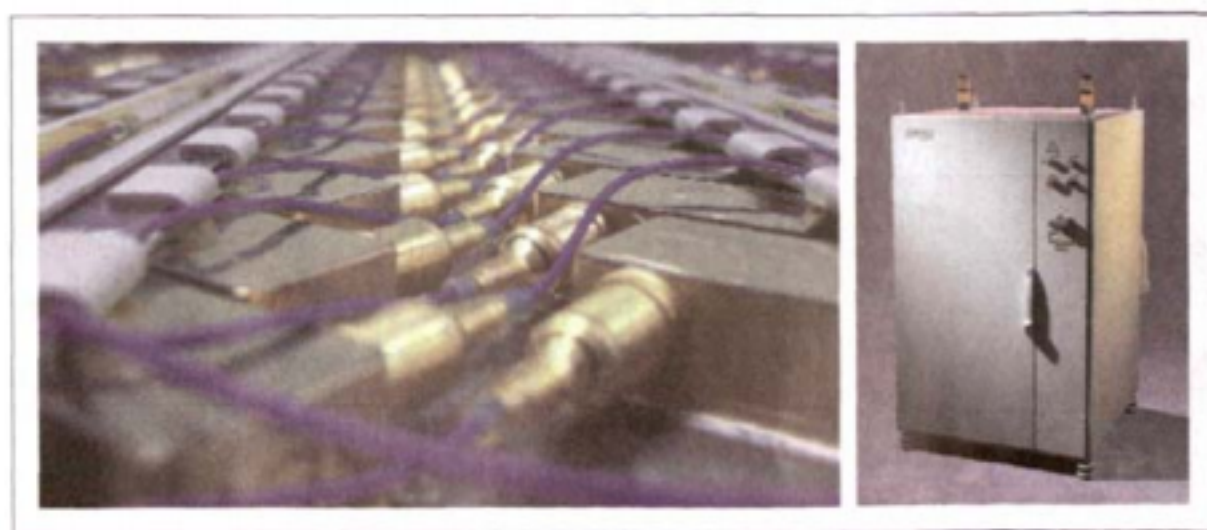


图 21 IPG 公司多单管耦合模块结构及整机示意图

部温度梯度过大而导致的光学畸变和物理变形等不利影响,因此发射的激光能同时具有高的输出功率和光束质量,而且可以使用大尺寸激光晶体以提高输出功率。该运转方式利用固体激光介质的热容存储废热,以减小温度梯度造成的热畸变,所以需要使用热容较大的增益介质材料,发射激光时废热存储在增益介质里,所以发射激光时间不能过长,只能间歇式工作,通常在秒级。热容激光器最常用的激光晶体是掺钕钐石榴石 Nd:GGG,近年来也逐步开始采用 Nd:YAG,尤其是大尺寸的陶瓷 Nd:YAG。

LLNL 一直引领着固体热容激光的发展。1996 年 6 月,由 LLNL 的 G. Albrecht 等<sup>[61]</sup>成功申请了“高能量猝发固体热容激光器”专利;1997 年,LLNL 利用灯泵钎玻璃的方法,实现了 1.4 kW(140 J×10 Hz)的激光输出,并获得美国陆军空间与导弹防御司令部(SMDC)的研究合同;2001 年,LLNL<sup>[62]</sup>成功研制出体积仅为其他激光器 1/5~1/10,输出功率 12.8 kW,单脉冲能量 639 J,光束质量小于 3 倍衍射极限的样机(如图 22),并在白沙导弹靶场进行了试验;同年,LLNL<sup>[63]</sup>又和通用等 5 家单位共同与 SMDC 签署了研制紧凑型高功率固体热容激光器的合同,计划将该技术应用于车载战术激光武器;2002 年,样机运回实验室进行谐振腔和变形镜方面的技术改进,将光束质量提高到 2 倍衍射极限(持续时间小于 10 s)<sup>[64]</sup>;同年底,LLNL 将热容技术应用于激光二极管抽运的 Nd:GGG 板条激光器,获得了重复频率 200 Hz 时平均功率为 2.7 kW 的激光输出<sup>[65]</sup>;2003 年 3 月,经过对抽运源和晶体的技术改进,将平均功率提高到 10 kW<sup>[66]</sup>;2004 年,平均功率提高到 30 kW;2006 年,LLNL 采用 Sm<sup>3+</sup>包边 Nd:YAG 复合结构陶瓷热容激光器实现了 67 kW 的激光输出,持续时间 10 s<sup>[67]</sup>,该激光器中激光工作物质采用 10 cm×10 cm×2 cm 的 Nd:YAG 陶瓷。这种陶瓷材料不仅具有单晶的光学性能,而且由于陶瓷材料的制备工艺与单晶生长完全不同,不受坩锅和晶体应变限制,可制备大尺寸陶瓷激光材料,而且制备周期短,仅为单晶生长周期的几分之一;费用低,有利于大规模生产;易于掺杂等优点,成为最受关注的激光晶体之一。每个储能模块利用 4 组重复频率 200 Hz,占空比为 20%的 75 kW 激光二极管阵列进行对称抽运,抽运区域为 9.6 cm×9.6 cm。LLNL 利用 5 个这样的模块实现了 5 Hz,67 kW 的输出,平均单脉冲能量达 335 J。这也是目前报道的最高全固态激光输出。

国内在固体热容激光器的研究方面也取得了一



图 22 美国 LLNL 实验室的高功率热容板条激光器

定的成绩。华北光电技术研究所<sup>[68]</sup>采用激光二极管阵列抽运 Nd:GGG 晶体腔内串联的方式,得到平均功率 8.7 kW 的激光输出,光-光转换效率 20%;中科院上海光机所<sup>[69]</sup>采用 LD 抽运 Nd:YAG 双板条串接的方式,获得最大能量为 2.06 J 的激光单脉冲;中国工程物理研究院应用电子学研究所<sup>[70]</sup>采用激光二极管抽运 Nd:GGG 晶体、微透镜准直加正交柱透镜组的方式,得到平均功率 1385 W 的激光输出,光-光转换效率约 17%;中科院物理研究所<sup>[71]</sup>采用 LD 抽运双激光头串接的方式,得到平均功率 2277 W 的激光输出,光光效率 53.1%。

## 2.6 激光相干合成技术

单台 DPL 虽然可以通过定标放大提高输出功率,由于受到稳定性、热效应、激光介质本身特性等结构因素的限制,目前很难获得超过万瓦的高光束质量输出。近年来,为了获得更高平均功率的激光输出,激光相干合成技术逐渐成为科学家们研究的热点。

激光束的相干合成是一种通过对多束波长相同的激光进行精密的相位控制,使它们的输出相位保持一致,实现多束激光的相干叠加的技术。它能在保持良好光束质量的前提下,将多束中小功率激光的功率进行叠加,为获得高功率高亮度激光提供了一条有效的途径。

目前应用较为广泛的主要有有源相位控制技术和自适应锁相技术,均取得了较为理想的实验结果。

有源相位控制技术,是一种主动式的闭环有源相位校正技术,即利用反馈系统与相位控制元件实现对各个激光束相位的控制。它的典型代表是 2003 年由美国诺格公司提出的 MOPA 结构。2006 年,该研究所采用这种结构成功地将 2 个激光放大链输出的激光锁相相干合成,得到功率 19 kW,光束质量小于 2 倍衍射极限的激光输出<sup>[72]</sup>。美国雷神公司(Raytheon)太

空与空用系统部 (Raytheon Space and Airborne Systems)<sup>[60]</sup> 利用相位共轭主振荡功率放大 (PC-MOPA) 技术, 得到平均功率 2 kW, 20 倍衍射极限的激光输出; 当功率降至 1.65 kW 时, 光束质量提高为 1.3 倍衍射极限。

自适应锁相技术, 是一种被动式的无源自适应相位校正技术, 即将多个激光器组成一个自适应复合腔, 通过引入新的选模机制, 实现各个激光器间输出能量的相互影响, 并最终达到相位锁定。据 2005 年美国光学学会报道<sup>[61]</sup>, 美国 HRL 实验室利用这种技术将 10 束 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光相干合成, 得到 200 W 的激光输出, 并验证了复合腔的自适应锁相特性。

国内在这方面的研究还处于起步阶段, 但是已经取得了一定的进展。目前主要的研究机构有中科院西安光机所、中科院物理研究所和中科院上海光机所。中科院物理研究所<sup>[62]</sup>于 2006 年采用改良的迈克耳逊腔的方法, 将两台小功率的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器发出的激光相干合成, 得到了 1.6 W 的激光输出, 合成效率约 88%; 据 2007 年中科院上海光机所报道<sup>[63]</sup>, 该所采用 4 束光纤激光构成二维阵列通过共用外腔技术, 成功得到了 26 W 的相干耦合激光输出。

### 3 高平均功率全固态激光器应用

鉴于全固态激光器的全面优势, 高平均功率全固态激光器在工业加工和军事领域的作用越来越显著。发达国家的加工行业已经逐步进入了激光加工时代。比如德国的激光加工装备居于世界领先地位, 尤其是在汽车制造和汽车配件行业中, 激光加工技术被广泛采用。日本激光加工占到整个加工制造业的 10% 以上。

#### 3.1 在工业加工中的应用

高平均功率全固态激光器在激光加工领域的应用主要有激光切割、焊接、表面处理和快速成型等。目前高功率激光加工中多采用 CO<sub>2</sub> 激光器和灯泵固体激光器, 高功率全固态激光器由于价格因素的限制, 应用明显晚于气体激光器, 不过由于其在稳定性、寿命、功耗等方面的显著优势, 目前已经大量进入工业加工领域, 相信随着成本的进一步降低, 必将会抢占更大的市场份额。国内高功率激光应用于工业加工刚刚起步, 但发展很快, 大功率全固态激光器用于工业加工将带来巨大的经济和社会效益, 大幅度提升我国工业加工的国际竞争力。

在潜艇、军舰、航母等船舶的制造过程中, 需要对复杂形状的厚钢板进行焊接、切割、表面处理等加工。

近年来, 欧美等发达国家将固体激光加工技术引入航母、潜艇、军舰等船舶的制造过程中, 船体分段制造、拼接总装而成。此外, 采用激光焊接的精密网状合金钢结构来加强船体并减轻重量的技术也被广泛采用。美国的航空母舰采用该技术, 使航母的重量降低约 200 t<sup>[64]</sup>。同时, 为了在变化多样的海洋激流中保持较高的航速, 船体都被设计成具有复杂的三维曲率形状以减小阻力, 这样的船体采用传统的机械加工不仅费时、费力, 而且相当的困难。如采用激光加工技术则能大幅度提高制造精度、加工强度和生产效率。

#### 3.2 在军事领域的应用

高平均功率全固态激光器直接应用于军事领域也显示出了越来越旺盛的生命力。20 世纪 80 年代末, 美国军方便开始研究大功率全固态激光在定向能武器方面的应用。2002 年美国成功地将 0.5 kW 全固态激光装载在机动战车上, 作为光源用于军事扫雷<sup>[65]</sup>。以希腊神话中众神之神宙斯命名的该扫雷战车凭借其体积小、扫雷速度快、高安全性、可快速移动性受到美国士兵们的一致好评。该激光扫雷战车在阿富汗战场上初露锋芒, 为美军的胜利立下了汗马功劳。

高功率激光炮具有速度快、射击时无需提前量; 机动灵活、拦击目标多; 精度高、可专打目标要害部位; 无污染; 效费比高; 不受电磁干扰等显著优点, 在激光致盲、光电对抗、激光软硬杀伤、激光点火核聚变、同位素分离等领域有广泛的应用前景。目前在激光制导、激光战术干扰和激光测距方面已经广泛采用全固态激光器, 激光武器作为未来最主要的战略性武器之一将遍及海陆空, 在战场上的全局性作用不可替代。

### 4 发展趋势

近年来尽管高功率 DPL 已取得了世界瞩目的成就, 千瓦级 DPL 已大量进入工业加工领域, 并已在实验室获得数万瓦的 DPL 输出, 但是离硬杀伤激光武器的需求(高亮度兆瓦级)还相距甚远, 而且因为可靠性、机动性和激光光束传输、控制等技术的限制, 目前国际上尚无成熟的 DPL 硬杀伤武器。热容技术和相干合成技术为高功率激光输出提供了一条可行的方案, 但技术还不够成熟, 长期可靠性也有待进一步验证。

薄片激光器和光纤激光器是固体激光热管理技术史上的重大革新, 将来通过材料或结构(如光子晶体光纤激光器)的改进, 有望获高亮度的高功率输出。此外, 端面抽运和侧面抽运相结合的混合抽运技术也越来越受到重视, 多色耦合抽运也为其提供了新思

路,有望成倍提高输出功率。液体 DPL(采用特殊工艺将固体增益介质做成液体状)比较完美地解决了增益介质的热问题,但材料目前还不够成熟,相信随着材料性能的不断改善,液体 DPL 有望成为高功率固体激光器的重要发展方向之一。

## 5 结束语

同时获得高功率、高效率、高光束质量的连续/脉冲全固态激光器长期以来一直是科学家们坚持不懈的追求。达到该目标需要同时解决研究高效率、高功率抽运技术、高密度热管理技术、光束质量控制技术、谐振腔优化设计技术、高提取效率放大技术、激光运转新概念等一系列复杂的科学技术问题。

高功率平均全固态激光器及其工业装备已经进入产业化的高速发展期,带动了激光乃至整个光电子行业高速发展。在不远的将来,以全固态激光技术为核心的激光加工技术很可能取代传统工业加工的地位,并推动人类科学技术革命和进步。

致谢 林学春研究员、侯玮副研究员、张玲助理研究员、刘燕楠助理研究员、赵鹏飞助理研究员等参加了本文的工作和讨论、整理。

收稿日期:2008-02-28;收到修改稿日期:2008-04-30

作者简介:李晋闯,男,1957 年出生,山西人,研究员、博士生导师,现任中国科学院半导体研究所所长、全国态光源实验室主任,同时兼职“国家半导体照明工程”研发及产业联盟执行主席,“十一五”863 重大项目“半导体照明工程”总体专家组组长等职务。承担并负责多项国家重点科技攻关项目,863 重大、重点项目,国家自然科学基金重点项目。在国内外学术刊物上发表论文 120 余篇,出版专著一部,申请和授权发明专利二十余项(其中三项国际专利)。



## — 参考文献 —

- 1 T. H. Maiman. Stimulated optical radiation in ruby[J]. *Nature*, 1960, 187:493
- 2 D. J. Ripin, J. R. Ochoa, R. L. Aggarwal *et al.*. 165 W cryogenically cooled Yb:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 2004, 29(18): 2154~2156
- 3 D. Kracht, R. Wilhelm, M. Frede *et al.*. 407 W end-pumped multi-segmented Nd:YAG laser [J]. *Opt. Exp.*, 2005, 13 (25):10140~10144
- 4 R. J. Beach, E. C. Honea, S. B. Sutton *et al.*. High-average-power diode-pumped Yb:YAG lasers [C]. *SPIE*, 2000, 3889:246~260
- 5 Y. Koyata, S. Yamamoto, Y. Hirano. Burst-mode Q-switching operation of a Nd:YAG rod laser [C]. *SPIE*, 2000, 3889: 224~230
- 6 Y. Akiyama, H. Takada, M. Sasaki *et al.*. Efficient 10 kW diode-pumped Nd:YAG rod laser [C]. *SPIE*, 2003, 4831:96~100
- 7 H. Bruesselbach, D. S. Sumida. A 2.65 kW Yb:YAG single-rod laser [J]. *IEEE J. Selet. Top. Quant. Eletron.*, 2005, 11 (3):600~603
- 8 林学春, 方高瞻, 马晓宇 等. 3 kW 高效、高功率全固态连续波激光器 [J]. *中国激光*, 2006, 33(6):831
- 9 全固态激光器研制取得重要进展—准连续输出 3799 W. <http://optics.iphy.ac.cn/new/L06-2006-10-31.htm>
- 10 林学春, 张玲, 马晓宇 等. 4 kW 高功率全固态连续波激光器 [J]. *中国激光*, 2006, 33(12):1647
- 11 林学春, 侯玮, 张玲 等. 6 kW 高效、高功率全固态连续波激光器 [J]. *中国激光*, 2007, 34(7):900
- 12 W. S. Martin, J. P. Chernoch. Multiple Internal Reflection Face Pumped Laser. U.S. Patent 3633126, 1972
- 13 J. Richards, A. McInnes. Versatile, efficient, diode-pumped miniature slab laser [J]. *Opt. Lett.*, 1995, 20:371~373
- 14 巩马理, 李晨, 柳强 等. 一种用于板条的角泵浦方法及固体激光增益模块[P]. 中国发明专利 CN 1398028A
- 15 J. P. Machan, W. H. Long, J. J. Zamel *et al.*. 5.4 kW diode-pumped, 2.4 $\times$  diffraction-limited Nd:YAG laser for material processing [C]. *SPIE*, 2002, 549~551
- 16 Y. Nishikawa. Slab-shaped 10 kW all-solid-state laser [J]. *The Review of Laser Engineering*, 2003, 31(8):513
- 17 G. Goodno, H. Komine, S. Mcnaught *et al.*. Multi-kW near-diffraction-limited single-frequency Nd:YAG laser [C]. *Lasers and Electro-Optics Europe*, 2005, 25
- 18 G. D. Goodno, H. Komine *et al.*. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2006, 31(9): 1247~1249

- 19 柳强, 巩马理, 陆富源等. 高功率二极管角抽运 Yb:YAG 板条激光器 [J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(12):13
- 20 M. Gong, F. Lu, Q. Liu *et al.*. Efficient corner-pumped Yb:YAG/YAG composite slab laser [J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45(16):3806-3810
- 21 A. Giesen, H. Hügel, A. Voss *et al.*. Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers [J]. *Appl. Phys. B, Photophys. Laser Chem.*, 1994, 58:365-372
- 22 Nodya Anscombe. A new spin: thin-disc Yb: YAG lasers, Nadya Anscombe, *Photonics Spectra*, 2002, 36(11):54-58
- 23 Alan J. Kemp, Gareth J. Valentine, David Burns. Progress towards high-power, high-brightness neodymium-based thin disk lasers[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2004, 28:305-344
- 24 Adolf Giesen, Jochen Speiser. Fifteen years of work on thin-disk lasers: Results and scaling laws[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13:598-609
- 25 Adolf Giesen. High-power thin-disc laser. *Opt. I Soci. Amer.*, 2007, MA1
- 26 姚震宇, 蒋建峰, 涂波等. 1.5 kW 激光二极管抽运 Nd:YAG 薄片激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(1):37-40
- 27 John Vetrovec. Progress in the development of solid-state disk laser[C]. *SPIE*, 2004, 25-30
- 28 Masaki Tsunekane, Traian Dascalu, Takunori Taira. High-power, diode edge-pumped, single-crystal Yb:YAG ceramic YAG composite microchip Yb:YAG laser for material processing [C]. *Optical Society of America, Conference on Lasers & Electro-Optics (CLEO)*, 2005, 1088-1090
- 29 Q. Liu, X. Fu, D. Ma, *et al.*. Edge-pumped asymmetric Yb:YAG/YAG thin disk laser [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2007, 4(10):719-712
- 30 E. Snitzer. Optical maser action of Nd<sup>3+</sup> in a barium grown glass[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1961, 7(12):444-446
- 31 E. Snitzer, P. H. Hakimi, F. Tumminelli *et al.*. Double-clad, offset core Nd fiber laser [C]. Digest of Conference on Optical Fibre Sensors, Washington DC: Optical Society of America, 1988, Postdeadline paper PD5
- 32 V. Dominic, S. Maccormack, R. Waarts *et al.*. 110 W fiber laser[J]. *Electron. Lett.*, 1999, 35(14):1158-1160
- 33 Jeong Y., Sahu JH. K., Payne D.K. *et al.*. Ytterbium-doped large-Core fiber laser with 1 kW of continuous-wave output power[J]. *Electron. Lett.*, 2004, 40(8):470-471
- 34 Jeong Y. *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW of continuous-wave output power[J]. *Opt. Exp.*, 2004, 12(25):6088-6092
- 35 V. Fomin, A. Mashkin, M. Abramov *et al.*. 3 kW Yb fibre lasers with a single-mode output [C]. 3rd International Symposium on High-Power Fiber Lasers and Their Applications, 2006, session HPFL-3
- 36 [http://www.ipgphotonics.com/products\\_1micron\\_lasers\\_cw\\_ylr-hpseries.htm](http://www.ipgphotonics.com/products_1micron_lasers_cw_ylr-hpseries.htm)
- 37 赵楚军, 陈光辉, 蔡伟等. 高功率光纤激光器抽运耦合技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(3):35-42
- 38 胡贵军, 白冰, 张亮等. 高功率光纤激光器研究[J]. 吉林大学学报, 2003, 21(4):338-342
- 39 楼祺洪, 周军, 朱健强等. 高功率光纤激光器研究进展[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2):135-138
- 40 陈苗海. 高功率光纤激光器的研究进展[J]. 激光与红外, 2007, 37(7):589-592
- 41 Hamamatsu Photonics K. K. The fiber disk laser explained [M]. *Nature Photonics*, 2006, Volume sample (Issue sample):14-15
- 42 Anping Liu, Kenichi Ueda The absorption characteristics of circular, offset, and rectangular double-clad fibers[J]. *Opt. Comm.*, 1996, 132(5,6):511-518
- 43 G. Bonati, H. Voelckel, T. Gabler *et al.*. 1.53 kW from a single Yb-doped photonic crystal fiber laser [M]. *Photonics West, San Jose, Late Breaking Developments*, 2005, Session 5709-2a
- 44 宁鼎, 王文涛, 阮灵等. 掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层石英光纤的研制及其激光特性[J]. 中国激光, 2000, A27(11):987-991
- 45 陈柏, 陈兰荣, 林尊琪. LD 抽运的掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器[J]. 中国激光, 2000, A27(2):101-104
- 46 李晨, 闫平, 陈刚等. 采用国产掺 Yb 双包层光纤的光纤激光器连续输出功率突破 700 W[J]. 中国激光, 2006, 33(6):738
- 47 李伟, 武子淳, 陈曦等. 大功率光纤激光器输出功率突破 1 kW[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(6):890
- 48 赵鸿, 周寿桓, 朱辰等. 大功率光纤激光器输出功率超过 1.2 kW[J]. 激光与红外, 2006, 36(10):930
- 49 高功率光纤激光器与放大器, 上海激光通讯, 2007, 308, 摘编自“光子科技创新与产业化”论坛论文
- 50 G. F. Albrecht, S. B. Sutton, E. V. George *et al.*. Solid state heat capacity disk laser, *Laser and particle beams*[J]. 1998, 16(4): 605-625
- 51 G. Albrecht, V. E. Geoge, W. F. Krupke *et al.*. High Energy Bursts from a Solid State Laser Operated in the Heat Capacity Limited Regime [P]. U S Patent:5526372, 1996-06-11

- 52 E. Marquardt, J. Richer. Digital image holography [J]. *Opt. Engng.*, 1998, **37**(5):1514-1519
- 53 LLNL and U.S. Army Space and Missile Defense Command to Unveil Solid State Heat Capacity Laser, [https://publicaffairs.llnl.gov/news/news\\_releases/2001/NR-01-09-12.html](https://publicaffairs.llnl.gov/news/news_releases/2001/NR-01-09-12.html)
- 54 R. Marker, C. D. Brent. A 10 kW solid-state heat-capacity laser system installed at HELSTF, White sands missile rang[EB/OL]. <http://www.unl.gov,2001-12-10>
- 55 E. Cucho, F. Bevilacqua, C. Depeursing. Digital holography for quantitative phase contrast imaging [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(5):291-293
- 56 E. Cucho, P. Marquet, C. Depeursing. Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(23):4070-4075
- 57 R. Yamamoto, K. Allen, R. Allmon *et al.*. A Solid State Laser for the Battlefield [C]. 25th Army Science Conference, Orlando, FL, USA
- 58 王超, 周寿桓, 唐晓军等. LD泵浦 8.7 kW 固体热容激光器实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, **2**:77-78
- 59 郭明秀, 李劲东, 付文强等. 千瓦级半导体抽运的固体热容板条激光器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2):280-286
- 60 蔡震, 胡浩, 蒋建锋等. 千瓦级激光二极管抽运热容固体激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2):153-156
- 61 Xiaodong Yang, Yong Bo, Qinjun Peng *et al.*. 2277-W continuous-wave diode-pumped heat capacity laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, **5**:226-228
- 62 D. G. Goodno, H. Komine, J. S. Mcnaught *et al.*. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**:1247-1249
- 63 A. Y. Zakharenkov, O. T. Clatterbuck, V. V. Shkunov *et al.*. 2-kW average power-conjugate master oscillator power amplifier[C]. *SPIE*, 2007, **6454**:6454OF
- 64 刘洋, 程勇, 王小兵等. 光纤激光合成技术研究新进展[J]. *量子电子学报*, 2007, **24**(3):283-288
- 65 Qinjun Peng, Dafu Cui, Zuyan Xu. 1.6 W-Class Coherent addition of two Nd:YVO<sub>4</sub> lasers by use of a modified Michelson cavity[C]. *SPIE*, 2007, **6344**:6344Y
- 66 上海光机所知识创新工程工作简报(第二零四期)[http://210.72.9.5:8081/info\\_www/news/detailnewsb.asp?infoNo=7568](http://210.72.9.5:8081/info_www/news/detailnewsb.asp?infoNo=7568)
- 67 王又良. 激光加工的最新应用领域 [J]. *应用激光*, 2005, **25**(5):329-332
- 68 <http://www.smdc.army.mil>

## “名家讲坛”栏目约稿

本刊品牌栏目“名家讲坛”邀请国内外知名光学专家撰写前沿综述,讲述激光与光电子发展过程中关键技术、重要突破以及目前的研究热点,为读者提供最有参考价值的文章。本栏目自从2006年栏目开办以来受到读者的热烈欢迎,网站单篇浏览量超过1000次,并被多次引用。本栏目长期公开征稿,要求如下:

- 1) 执笔人(第一作者)应在激光与光电子应用领域具有一定造诣,在某一方面有较深入的研究或者能够纵观全局;
- 2) 文章主要内容涉及理论探讨、技术突破、和市场开拓等相关领域,内容在激光、光电子领域具有重要地位,具有客观的总结性或者高度的前瞻性;
- 3) 文章要求通俗易懂,行文生动,并配有一定数量的彩色图表,字数不少于6000,最多不超过20000;
- 4) 投稿时请作者提供作者简介(包括研究领域、主要研究成果和一张照片);
- 5) 论文一经录用,本刊将优先发表,并支付丰厚稿酬。
- 6) 投稿方式:在线投稿:[www.opticsjournal.net/lop.htm](http://www.opticsjournal.net/lop.htm) 或 E-mail: [lop@siom.ac.cn](mailto:lop@siom.ac.cn); 垂询电话: 021-69918166

《激光与光电子学进展》编辑部  
2008-6-23