

钬激光应用与进展

欣云¹ 叶兵¹ 方万里²

(¹ 合肥工业大学电子科学与应用物理学院, 安徽 合肥 230009)
(² 云南民族大学电气与信息工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要 钬激光是高相干辐射光,在雷达、测距以及医疗等多方面有着广泛的应用。根据钬激光的发展历程,总结出提高其输出功率及效率所需改进的几个方向,包括晶体材料的选择、掺入杂质及浓度的研究。进一步阐述了钬激光在各领域的应用与前景,并重点讨论了 Ho:YAG 激光在医疗领域的应用。

关键词 激光器; 钬激光; 应用; 效率

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.040003

Application and Development of Holmium Laser

Xin Yun¹ Ye Bing¹ Fang Wanli²

(¹ School of Electronic Science and Physics, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)
(² College of Electronic-Electrical Information Engineering, Yunnan Nationalities University, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract As holmium laser is a highly coherent radiation light source, it has wide applications in laser radar, range and medical care. According to the development history of holmium laser, we summarize the methods to improve the output power and efficiency of holmium laser, including the choice of crystal material and the study of concentration of doped impurities. Furthermore, the application details and prospects are described, and the medical applications of Ho:YAG laser are emphasized.

Key words lasers; Ho laser; application; efficiency

OCIS codes 140.3460; 140.0140; 260.1180; 350.4600

1 引言

钬激光是指在晶体中掺入激活离子 Ho 产生的波长为 $2\ \mu\text{m}$ 的近红外激光。Ho 离子主要的受激跃迁是由亚稳态的 5I_7 向基态 5I_8 的分裂能级的跃迁,其荧光寿命为 8 ms。它的输出波长在大气窗口、水的吸收峰值附近以及人眼安全区,并且在大气中衰减较低,因而高功率的 $2\ \mu\text{m}$ 钬激光器被广泛地应用于激光雷达、激光测距、光学参量振荡器、光电对抗以及医疗等方面。本文根据钬激光的发展历史,总结出提高其输出功率及效率所需改进的几个方向,阐述了钬激光在各领域的应用及前景。

2 钬激光器发展历史

从 20 世纪 60 年代开始,人们对 $2\ \mu\text{m}$ 波段激光器输出功率及效率进行了多方位的探索研究。1965 年,Johnson 等^[1] 分别用氙灯和钨灯在液氮条件(77 K 低温)下实现了 Ho:YAG 晶体输出 $2.01\ \mu\text{m}$ 的脉冲和连续激光,此条件下阈值很高。1966 年,其又在液氮条件下把 Er^{3+} 、 Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 同时掺入 YAG 晶体, Er^{3+} 吸收光能通过 Tm^{3+} 转移给 Ho^{3+} ,实现了 Er,Tm,Ho:YAG 激光输出,斜率效率为 5%,输出功率 15 W^[2]。

20 世纪 70 年代,Chicklas 等^[3] 提出了 $2\ \mu\text{m}$ Ho:YAG 和 Ho:YLF 激光器的构想。随后 Weber 等^[4] 利用闪光灯作为抽运源在液氮条件下实现了 Er,Tm,Ho:YAP 激光器的运行,得到的激光波长为 2123 nm 且

收稿日期: 2011-09-21; 收到修改稿日期: 2011-11-01; 网络出版日期: 2012-02-24

作者简介: 欣云(1987—),女,硕士研究生,主要从事激光器及其应用等方面的研究。E-mail: xinpeiheng@sina.com

导师简介: 叶兵(1961—),男,教授,硕士生导师,主要从事激光技术应用方面的研究。E-mail: yb0430@hfut.edu.cn

最大输出能量为 136 mJ。但当时由于闪光灯抽运的转换效率低、体积庞大等原因,钬激光器发展比较缓慢。

20 世纪 80 年代,由于大功率半导体激光器的迅速发展,钬激光器可以用大功率激光二极管作为抽运源,从而再次得到广泛研究。1986 年,首次使用 GaAlAs 激光二极管阵列(LDA)抽运的 Ho:YAG 激光器由美国海军研究室研制成功,在 77 K 低温条件下,其输出波长为 2.1 μm ,斜率效率达到 19%^[5],激光器的结构如图 1 所示。

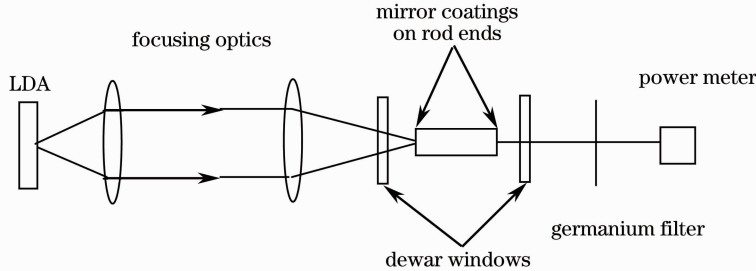


图 1 激光二极管阵列端面抽运的 Ho:YAG 激光器原理图

Fig. 1 Diagram of LDA end-pumped Ho:YAG laser

同时, Lotem 等^[6]也使用多掺杂方式得到 2 μm 的 Ho 激光器,对 YLF 和 YAG 两种晶体分别实验,并比较得出两种晶体在 110 K 以下阈值不变,而当温度超过 110 K 时,阈值随温度升高而增大。对于 YAG 晶体,斜率效率在 150 K 以下保持恒定,然后随着温度升高而降低;然而对于 YLF 晶体,斜率效率在 130 K 时达到最大值。1989 年,研究人员用 LDA 端面抽运 10 mm 的 Tm, Ho:YLF 晶体,在液氮条件下其转换效率达 68%;随后不久,在室温条件下做出了 LDA 抽运的 Tm, Ho:YLF 薄片激光器,但在室温条件下转换效率仅为 9%^[7]。在这一发展过程中,1988 年,美国 SEO 公司开发出了医用 Ho:YAG 激光器^[8]。

至此,人们经历了钬激光研究的初始阶段,Er, Tm, Ho:YAG 激光的研究阶段, Cr, Tm, Ho:YAG 激光研究开发阶段,医用钬激光器的研究开发阶段以及大功率半导体激光器作为抽运源的钬激光器初始研究阶段。医用钬激光的构造此时就已基本成型。随后,人们对掺钬激光器的研究更加广泛深入。

1992 年, Bowman 等^[9]首先利用闪光灯抽运 Cr, Tm:YAG 产生 1.91 μm 的激光,然后再利用 1.91 μm 的激光抽运 Ho:YAG 晶体,从而得到 2.1 μm 的激光。1996 年, Barnes 等^[10]又用二极管激光器从侧面抽运 42 mm 长、仅在中间 20 mm 处掺有 Tm、Ho 离子的晶体棒,激光器吸收抽运光 2.526 J,输出脉冲能量 130 mJ,光转换效率为 5.14%。1998 年, Kornev 等^[11]利用调 Q 的 LiF:F²激光抽运 Ho:YLF 晶体,其中 Ho 的原子数分数为 50%。得到 4 mJ 的基模输出,阈值为 12 mJ,脉宽为 8 ns。几乎与此同时, Elder 等^[12,13]对双掺杂晶体进行了研究,具体是对 YAP 和 YLF 分别都掺杂 Tm、Ho 两种离子,并对其性质进行比较,实验结果显示 YAP 晶体最大输出功率为 270 mW,而 YLF 为 660 mW;而且 YLF 晶体的斜率效率为 38.9%,高于 YAP 的 19.3%。国内研究机构也在此时开展了相关研究:中国科学院上海光学精密机械研究所研制了用激光二极管抽运的掺 Tm、Ho 的激光器,输出波长为 2.0 μm ;中国科学院安徽光学精密机械研究所研究了闪光灯抽运的脉冲式单纵模 Cr, Tm, Ho:YAG 激光器。

2000 年, Budni 等^[14]在前人的研究基础上,运用二极管抽运 Tm:YLF 激光棒,输出 1.9 μm 的激光,再抽运 Ho:YAG 晶体,得到 2.1 μm 波长的激光。当钬激光器连续运转时,斜率效率达 61%,光转换效率为 18%,而当 Ho 激光器中加入声光调 Q 晶体后,激光器的斜率效率为 55%,其调制频率范围为 9~50 Hz。

2003 年, Budni 等^[15]运用 Tm:YLF 激光器抽运 Ho:YAG 晶体,同时将声光调制频率提升到 60 Hz,得到了大于 50 mJ 的脉冲能量,且脉冲宽度为 14 ns,峰值功率到 3.6 MW,抽运效率为 64%,光束质量因子约为 1.2。随后 Kieleck 等^[16]又在室温下进行了上述实验,声光调制频率设为 5~15 kHz,二极管激光到 Ho 激光的斜率效率为 21.4%,光转换效率为 11%。哈尔滨工业大学的研究人员对 Tm, Ho:YLF 进行了研究,利用 2.5 mm 长的 Tm, Ho:YLF 微片在常温下实现了 388 mW 的多模输出和 113 mW 的单纵模输出,同时用声光调 Q 方式在不同频率下进行实验,实现了 2.049~2.081 μm 的连续可调谐激光输出^[17,18]。

2006 年, Espen 等^[19]用掺 Tm 光纤激光器抽运 Ho:YAG,声光调制频率为 20 kHz 时,输出脉宽为 22 ns,斜率效率为 74%。而哈尔滨工业大学的研究人员用 803 nm 的 LD 抽运 Tm(5%), Ho(0.5%):GdVO₄ 晶体(原子数分数),其斜率效率为 50%,光转换效率为 46%^[17]。

2008年, So等^[20]使用 Tm:YLF 激光器抽运 Ho:YAG 晶体棒, 其中 Ho 掺杂原子数分数为 0.25%, 连续工作时斜率效率为 60%, 脉冲工作时输出单脉冲能量为 14 mJ, 脉宽为 18 ns, 设定重复频率为 20 kHz。

3 晶体的选择与比较

通过上述实验研究可以看出, 目前适合掺钬离子的晶体主要有 YAG、YLF、YAP、GdVO₄ 等, 但由于材料的光学特性差异大, 所以获得的激光输出性能也存在明显的差异。

YAG 属于立方晶系, 光学各向同性, 没有自然双折射以及偏振吸收问题。它具有优良的物理化学性质, 适合于各种激活粒子的掺杂, 是较好的激光基质晶体。唯一的缺点是立方晶体结构在高功率激光运转时的热致双折射效应会产生退偏损耗, 影响最终的激光输出功率。

YLF 属于四方晶系, 它有两个等价的 *a* 轴和一个 *c* 轴。*a* 轴晶体可随偏振的选择获得两种波长的激光, 一种是电矢量方向平行于 *c* 轴的 π 偏振光, 另一种是电矢量方向垂直于 *c* 轴的 σ 偏振光。*a* 轴晶体的热膨胀系数大于 *c* 轴晶体。这种晶体的特点是在紫外光谱区吸收损耗小, 非线性折射系数小, 适合于三价稀土金属离子(Tm³⁺、Ho³⁺ 等)的掺杂。与 YAG 相比, YLF 有较高的斜率效率和较低的阈值, 并且在相同抽运条件下 YLF 的热透镜效应只有 YAG 的 1/10。Ho:YLF 的上能级寿命为 12 ms, 比 Ho:YAG 的长, 更有利于储能。但 YLF 晶体是各向异性的, 应力系数也不是各向同性, 热畸变不规则。

YAP 具有正交晶系结构, 它是 Y₂O₃-Al₂O₃ 系统中的另一个化合物。它具有的双折射性可以抑制热致双折射效应。材料的各向异性使其受激发射截面也呈各向异性, 导致不同取向的掺杂 YAP 晶体具有不同的激光功能和输出波长及运转形式。并且晶体生长速度快, 输出功率不易饱和。其缺点是在高温下晶相不稳定, 热膨胀系数各向异性, 可致使晶体在生长过程中易于出现开裂、色心和散射颗粒等。

GdVO₄ 是正方对称, 也属于四方晶系, 单轴晶体, 密度为 5.48 g/cm³, 熔点为 1800 °C, 晶格常数为 $a=0.72126$ nm, $c=0.63483$ nm, 每个单胞中有 4 个 GdVO₄ 分子。该晶体一般作为二极管抽运激光材料, 具有较大的受激发射截面, 在抽运波段有宽吸收带, 对抽运波长和二极管温度控制的依赖低, 激光振荡阈值低, 热传导率大, 约为 $12.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 因而易于实现晶体的有效冷却, 降低热效应对输出功率的影响。其上能级寿命在掺杂原子数分数为 2.5% 时约为 1 ms。在 1 μm 波段, GdVO₄ 的发射截面比 YLF、YAG 都大。据研究, 原子数分数为 5% 1 mm 长的 Tm:GdVO₄ 晶体可吸收高达 90% 的抽运能量^[21]。

这几种晶体都具有产生 2 μm 激光输出的能力, 先使用掺 Tm 离子的晶体, 如 Tm:YAG、Tm:YLF 等产生 1.9 μm 的激光, 再抽运 Ho:YAG 或 Ho:YLF 等来产生 2 μm 的激光。或者使用双掺杂 Tm、Ho 的方式, 但是双掺杂的基质激光输出容易达到饱和, 不利于效率的提高。

4 钬激光应用

激光雷达通常采用波长为 10.6 μm 的 CO₂ 激光器进行探测, 但是, 由于 2 μm 的 Ho 激光器波长是 CO₂ 激光器的 1/5, 所以线宽窄, 测量精度比 CO₂ 激光雷达高 1 个数量级。同时, 利用 2 μm 的水吸收谱线测量远距离环境的温度和湿度的精度分别可达 1 °C 和 1%。1997 年, 日本成功研制出二极管抽运的 Tm, Ho:YLF 机载防撞激光雷达^[22]。可见采用波长为 2 μm 的掺 Ho 固体激光器作为发射机是激光雷达的首选。

激光测距, 主要应用于国家军事部门。近年来, 军用二极管抽运激光器能量达到 1 J, 连续输出功率可达 10 W, 且运行时间达 10000 h。二极管的光转换效率是闪光灯的 10 倍, 所以能源和冷却系统都大大简化。但是二极管抽运的激光测距仪成本太高, 每瓦功率需花费 20~25 美元, 大大高于之前使用的 CO₂ 激光器, 所以, 如何降低成本是其在广泛实际应用前需要解决的首要问题。

光学参量振荡器。利用光学参量振荡器可以使波长偏移, 使用 ZnGeP₂ 和 AgGaSe₂ 光学参量振荡器可以得到波长范围为 2~12 μm 的光谱^[23]。

光电对抗。在现代高科技局部战争中, 红外寻地跟踪系统运用的主要就是光电对抗技术, 而光电对抗技术主要利用 3~5 μm 的致盲激光束使尾追制导红外探测器饱和、致盲直至失效。而 2 μm 波段的连续大功率激光输出是获得光学参量振荡器输出 3~5 μm 中红外激光的基础^[24]。有研究指出, 有效干扰热寻踪导弹

所需的中红外脉冲激光必须是高重复频率调制的,中红外连续波是理想的干扰源^[25]。

医疗诊断。Ho:YAG 激光组织穿透深度仅 0.4 mm,以其热损伤小、出血少等优点而作为手术工具广泛应用于整形外科手术。其工作原理是以水作为吸收媒介,产生的能量使组织之间的水气化,形成微小的空泡,并将能量传至组织,使病变组织粉碎成粉末状。软组织的热恢复时间是 310 ms,钬激光的脉冲持续时间短,仅 250 μ s,所以热量扩散小。因此,钬激光对组织的切割和消融都非常安全有效。1990 年,它被美国食品药品监督管理局批准可使用在普通外科^[26]。1992 年,Johnson 等^[27]报道了钬激光在泌尿外科应用的实验研究,开创了钬激光在这方面应用的先河。1993 年,首次使用钬激光施行的犬前列腺切除术获得成功,1994 年起钬激光前列腺切除术被广泛应用于临床实践中。第一例用钬激光进行人体前列腺切除术的报道是在 1995 年,新西兰 Tauranga 医院的 Gilling 等^[28]报道了联合激光技术(Ho:YAG, Nd:YAG)前列腺切除术,术后证明 Nd:YAG 激光是基本多余和不必要的。2000 年, Gilling 等^[29]又报道了 43 个病例,实行前列腺钬激光切除术,证实钬激光能像开放式前列腺切除术一样剝除肥大的前列腺,因而产生了前列腺钬激光剝除术(HoLEP)。1995 年, Bagley 等^[30]首次报道了以钬激光腔内碎石器治疗上尿路结石。因其瞬时功率可达 10 kW,可以粉碎各种成分和密度的结石。近年来,钬激光在泌尿外科除了 HoLEP 比较盛行外,还发展了其他方面的用途,包括治疗体表及体积较大易出血的尖锐湿疣、腔内型尖锐湿疣、上尿路移行细胞癌等。

传统的钬激光都是单棒设计,输出功率在 30 W 左右,基本能满足一般手术的需要,但实际手术过程中较容易出现故障。双路钬激光器的研发有效地解决了这一缺陷。最新研究出的 100 W 钬激光器由 4 个独立的激光器组成,可单独工作或组合工作,形成不同的功率输出。当其中一个激光器出现故障时,可停止其抽运和输出,或由其他激光器替代工作,降低术中风险。平面四路钬激光器的设计方案如图 2 所示^[31]。该设计方案是在总结等光程四路 Cr, Tm, Ho:YAG 激光器合光路设计方案以及四路光线耦合器合光路设计方案的优缺点之后设计出的结构,与低 OH⁻ 的石英光纤连接输出能量测量,其耦合效率达到 71%。其中等光程四路 Cr, Tm, Ho:YAG 激光器合光路设计方案对机械结构精度要求高,国内没有满足要求的伺服电机,光路调节比较困难。四路光线耦合器合光路设计方案中需要用到四进一出的光纤耦合器,对于 2.1 μ m 的钬激光而言,此种耦合器制造技术不太成熟,且研发成本高。

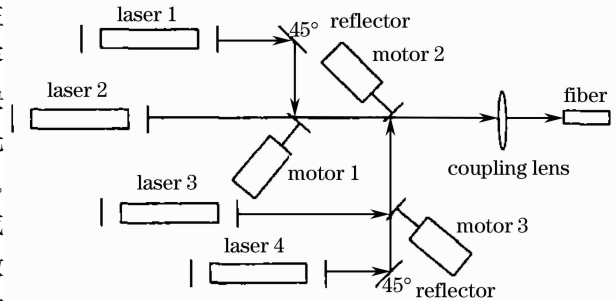


图 2 平面四路激光器光路示意图

Fig. 2 Scheme of planar four-route laser

5 总结与展望

钬激光属于高相干的辐射光源,有着广阔的应用前景。但是其在低温条件下工作效率较高,实际应用中使用液氮等制冷设备比较不方便。从 Ho 激光的发展历史来看,闪光灯抽运的转换效率太低,从而出现了二极管抽运源,这一改进减化了冷却系统,减小了激光器结构,使产品小型化成为可能。目前正在研究的小型化固体 Ho 激光器主要有单块非平面环形腔结构(利用激光介质声光效应)以及微片激光器。由于 Ho 离子能量上转换比较严重,所以要输出 2.1 μ m 的激光较少,效率也就非常低。因此,后来普遍使用掺 Tm 产生的 1.9 μ m 激光抽运掺 Ho 晶体,降低了钬的能量上转换,有效地提高了转换效率。

适合掺钬离子的晶体主要有 YAG、YLF、YAP、GdVO₄。但目前具有实用价值的只有 Ho:YAG 和 Ho:YLF,其中 Ho:YAG 被广泛应用于医疗领域。

钬激光器的研究从最初用闪光灯抽运到后来的二极管抽运,从单掺 Ho 到多杂质掺入晶体,从脉冲式到调 Q 方式以及晶体棒的选择,这些实验研究都是为了提高激光器输出功率、增大转换效率。如何在常温条件下得到高功率、高效率的 Ho 激光是一直以来以及今后研究的主要方向。

参 考 文 献

- 1 L. F. Johnson, J. E. Geusic, L. G. Van Uitert. Coherent oscillations from Tm³⁺, Ho³⁺, Yb³⁺ and Er³⁺ ions in yttrium

- aluminum garnet[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1965, **7**(5): 127~129
- 2 L. F. Johnson. Efficient, high-power coherent emission from Ho^{3+} ions in yttrium aluminum garnet, assisted by energy transfer[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1966, **8**(8): 200~201
- 3 E. P. Chicklis, C. S. Naiman. Stimulated Emission at 0.85 μm in $\text{Er}^{3+}:\text{YLF}$ [R]. Seventh Int. Quantum Electronics Conf., 1972
- 4 Marvin J. Weber, Michael Bass, Thomas E. Varitimos *et al.*. Laser action from Ho^{3+} , Er^{3+} and Tm^{3+} in YAlO_3 [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1973, **QE-9**(11): 1079~1086
- 5 Huang Xiude, Liu Xuefeng. Semiconductor Laser and Applications[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999
黄修德, 刘雪峰. 半导体激光器及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999
- 6 Haim Lotem, Yehoshua Kalisky, Jacob Kagan *et al.*. A 2 μm holmium laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(6): 1193~1200
- 7 T. Y. Fan, G. Huber, R. L. Byer. Spectroscopy and diode laser-pumped operation of Tm, Ho:YAG[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **24**(6): 924~933
- 8 P. Moulton. Holmium laser cuts into medical applications[J]. *Laser Focus World*, 1992, **28**(3): 65
- 9 S. R. Bowman, B. J. Feldman. Demonstration and analysis of a holmium quasi-two level laser[C]. *SPIE*, 1992, **1627**: 46~54
- 10 N. P. Barnes, W. J. Rodriguez, B. M. Walsh. Ho, Tm:YLF laser amplifiers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(12): 2872~2882
- 11 A. F. Kornev, A. A. Nikitichev, V. P. Pokrovskiy *et al.*. 8 ns Ho:YLF 3 micron laser[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, 1998. 56~64
- 12 I. F. Elder, M. J. Payne. Comparison of diode-pumped Tm:YAP with Tm:YAG[C]. Advanced Solid State Lasers, OSA Trends in Optics and Photonics Series, 1998. 19: ML6
- 13 I. F. Elder, M. J. Payne. Lasing in diode-pumped Tm:YAP, Tm:Ho:YAP and Tm:Ho:YLF[J]. *Opt. Commun.*, 1997, **145**(1-6): 329~339
- 14 P. A. Budni, M. L. Lemons, J. R. Mosto *et al.*. High-power/high-brightness diode-pumped 1.9 μm thulium and resonantly pumped 2.1 μm holmium lasers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(4): 629~634
- 15 P. A. Budni, C. R. Ibach, S. D. Setzler *et al.*. 5 mJ Q-switched 2.09 μm holmium laser resonantly pumped by a diode-pumped 1.9 μm thulium laser[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(12): 1016~1018
- 16 C. Kieleck, A. Hirth. Investigations of a Q-switched Ho:YAG laser intracavity pumped by a diode-pumped Tm:YLF laser [C]. *SPIE*, 2004, **5460**: 56~63
- 17 W. J. He, Baoquan Yao, Y. Ju *et al.*. Diode-pumped efficiency Tm:Ho:GdVO₄ laser with near-diffraction limited beam quality[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(24): 11653~11659
- 18 Baoquan Yao, L. J. Li, L. L. Zheng *et al.*. Diode-pumped continuous wave and Q-switched operation of a c-cut Tm:Ho:YAlO₃ laser[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(7): 5075~5081
- 19 L. Espen, N. Stephane, A. Gunnar *et al.*. High-power fiber-laser-pumped mid-infrared laser source[C]. *SPIE*, 2006, **6397**: 639704
- 20 S. So, J. I. Mackenzie, D. P. Sheperd *et al.*. High-power slab-based Tm:YLF laser for in-band pumping of Ho:YAG [C]. *SPIE*, 2008, **6871**: 68710R
- 21 Fang Zhou. Study of Monolithic Nonplanar Ring Laser Using Ho:YAG Crystal at 2 μm [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007
方舟. 2 μm 掺钬 YAG 晶体的单块非平面环形腔激光器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007
- 22 Yang Xiaotao. Experimental Study on Resonantly Pumped Ho:YAP Laser at Room Temperature[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009
杨晓涛. 常温谐振抽运 Ho:YAP 激光的实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009
- 23 P. A. Budni, C. A. Miller, M. L. Lemons *et al.*. High power/energy thulium pumped holmium lasers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(4): 609~610
- 24 S. Chandra, M. E. Wager, T. H. Allik. 8-12 micron OPO pumped by a 2.09 micron holmium laser[C]. *CLEO*, 2000, 496~497
- 25 Ke Liang. Investigation of 2 μm Single Longitudinal Mode Laser at Room Temperature[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010
柯亮. 常温 2 μm 单纵模激光器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010

- 26 Edward Reed. Holmium-YAG lasers expand surgical scope[J]. *IEEE Circuits and Devices Mag.*, 1993, **9**(3): 43~48
- 27 D. E. Johson, D. M. Gromeens, R. E. Price. Use of the holmium:YAG laser in urology[J]. *Laser Surg. Med.*, 1992, **12**(4): 355~363
- 28 P. J. Gilling, C. B. Cass, A. R. Malcolm *et al.*. Combination holmium and Nd:YAG laser ablation of the prostate: initial clinical experience[J]. *J. Endourol.*, 1995, **9**(2): 151~153
- 29 P. J. Gilling, K. M. Kennett, M. R. Fraundorfer. Holmium laser enucleation of the prostate for glands larger than 100 g: all endourologic alternative to open prostatectomy[J]. *J. Endourol.*, 2000, **14**(6): 529~531
- 30 D. Bagley, M. Erhard. Use of holmium laser in the upper urinary tract[J]. *Tech. Urol.*, 1995, **1**(1): 25~30
- 31 Chen Huimin, Li Ping. The design of high power Cr, Tm, Ho:YAG laser using multi-route techniques[J]. *Laser Journal*, 2006, **27**(5): 30~31
- 陈慧敏, 栗 苹. 多路 Cr, Tm, Ho:YAG 激光器合光路的设计[J]. *激光杂志*, 2006, **27**(5): 30~31