

文章编号: 1001-3806(2016)01-0141-07

全固态单频激光技术

李 慧^{1,2}, 王志敏^{2*}, 张丰丰², 王明强², 李家佳², 崔大复², 彭钦军², 许祖彦²

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081; 2. 中国科学院 理化技术研究所, 北京 100190)

摘要: 全固态单频激光器在高分辨率激光光谱学、相干通信、激光雷达、引力波探测等方面的重要应用, 成为全固态激光器研究的一个重要方向。概述了几种获得全固态单频激光器的方法, 主要有短腔法、耦合腔法、双折射滤光片法、光栅选频法、插入标准具法、单向环形腔法、扭转模腔法等。介绍了不同方法实现单频的基本原理及国内外进展, 总结比较了它们各自的优缺点和适用范围, 为不同的单频激光应用需求提供了不同的单频技术手段。

关键词: 激光技术; 单频; 全固态激光器; 窄线宽

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.01.021

Single-frequency all-solid-state laser technology

LI Hui^{1,2}, WANG Zhimin², ZHANG Fengfeng², WANG Mingqiang²,

LI Jiajia², CUI Dafu², PENG Qinjun², XU Zuyan²

(1. School of Opto-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Single-frequency all-solid-state lasers are widely used in the fields of high resolution spectroscopy, coherent communication, radars, and gravitation-wave detection and so on. Single-frequency all-solid-state laser is one of the important research fields of all-solid-state lasers. To adopt appropriate single-frequency laser technology better and meet different requirements in applications, several techniques to realize single-frequency all-solid-state lasers were summarized, such as microcavity, coupled cavity, birefringent filters, F-P etalon in cavity, unidirectional ring cavity, twisted mode cavity. Their principles and developments at home and abroad were introduced. The characteristics and application situations were also compared and summarized.

Key words: laser technique; single-frequency; all-solid-state laser; narrow linewidth

引 言

激光二极管(laser diode, LD)抽运的固体激光器, 与传统灯抽运固体激光器相比, 具有效率高、寿命长、结构紧凑、光束质量好等优点, 使其成为激光技术发展的重要方向之一。而在某些应用领域, 如高分辨率激光光谱学、相干通信、激光雷达、引力波探测等迫切需要单频激光器, 所以国内外有很多研究人员致力于全固态单频激光器的研究。全固态单频激光器凭借其优越的性能, 已成为一个重要的研究方向。目前全固态激光器实现单频输出的主要技术方法有基于增大纵模

间隔的短腔法; 基于选频原理的双折射滤光片法、耦合腔法、光栅选频法、插入标准具法; 基于消除空间烧孔效应的单向环形腔法、扭转模腔法等。本文中将对以上方法做一个较详细的介绍和总结。

1 基于增大纵模间隔的短腔法

缩短谐振腔长度, 增大相邻纵模间隔, 以致在小信号增益曲线满足振荡阈值条件的有效宽度内, 只存在一个纵模, 从而实现单纵模振荡^[1]。这就是短腔法选纵模的原理。短腔法主要包括基于高掺杂激光晶体薄片的短腔法和基于高掺杂玻璃光纤的短腔法。

1.1 基于高掺杂激光晶体薄片的短腔法

1989 年, ZAYHOWSKI 等人首先研制出了输出波长为 1.06 μm 和 1.3 μm 的 Nd:YAG 微片激光器, 线宽小于 5 kHz; 输出波长为 1.06 μm 的 NdP₅O₁₄, Nd:GSGG 微片激光器, 其腔长均为百微米级; 在抽运功率高于几倍阈值时, 均可观察到单纵模单横模输出^[2]。1991 年, 日本的 TAIRA 等人报道了 LD 抽运的 Nd:YVO₄ 微

基金项目: 国家重大科研装备研制项目资助项目(ZDYZ2012-2); 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(2012YQ120048); 国家自然科学基金资助项目(61138004)

作者简介: 李 慧(1989-), 女, 硕士研究生, 现主要从事固体激光器方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: wangzmok@163.com

收稿日期: 2014-12-17; 收到修改稿日期: 2015-03-20

片激光器,其实验装置如图 1 所示,在抽运功率为 500mW 时,得到 103mW 的 1064nm 单模激光输出,其斜效率高于 32.4%^[3]。1993 年,中国科学院上海光学精密机械研究所 SHAN 等人首先在国内实现了 LD 抽运 Nd:YAG 微片激光器室温下连续单纵模单横模输出,其腔长为 700 μm ^[4]。1994 年,GAVRILOVIC 等人在 1W 的抽运功率下,获得了最大功率 120mW 的 1.3 μm 连续单频激光输出^[5]。2000 年,北京理工大学 GAO 教授课题组以 Nd:YAG 和 Nd:YLF 晶体为工作介质,采用微片谐振腔,分别获得了 90mW 的 1.06 μm 和 10mW 的 1.053 μm 单频激光输出,线宽为 300kHz。其中,两微片的厚度均为百微米量级^[6]。2009 年,他们又研制出波长是 2 μm 的 LD 抽运单频波片 CTH:YAG 激光器,晶体长度为 1mm,单频输出功率大于 30mW^[7]。2010 年,哈尔滨工业大学的 LI 等人采用 Tm, Ho:YVO₄ 微片激光器(晶体长度 0.5mm),获得了 8mW 的 2052.6nm 单频激光输出^[8]。

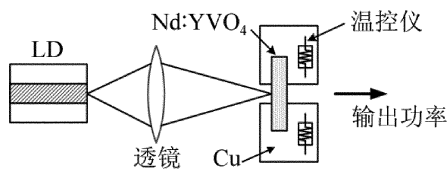


图 1 LD 抽运 Nd:YVO₄ 微片激光器的原理图

1.2 基于高掺杂玻璃光纤的短腔法

2010 年, MENG 等人报道了一种 LD 抽运的直线型短腔光纤激光器,它以钇铈共掺磷酸盐玻璃光纤为增益介质,在抽运功率为 415mW 时,获得 79mW 的 1534nm 单纵模输出,线宽为 4.5kHz^[9]。2012 年, ZHANG 等人报道了一种输出波长为 1050nm 短腔光纤激光器,增益介质为高掺 Yb³⁺ 磷酸盐玻璃光纤,两端分别刻有窄带光纤布喇格光栅(narrow-band fiber Bragg grating, NB-FBG)和宽带光纤布喇格光栅(broad-band fiber Bragg grating, BB-FBG)。在抽运功率为 275mW 时,得到 90mW 的单频输出,激光线宽小于 10kHz^[10],如图 2 所示。同年, YANG 等人采用 LD 抽运短直线腔激光器,以 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺磷酸盐玻璃为增益介质,并用压电陶瓷(piezoelectric transducer, PZT)进行调谐,在抽运功率为 360mW 时,得到 65mW 的可调谐单频输出,线宽约 3kHz^[11]。

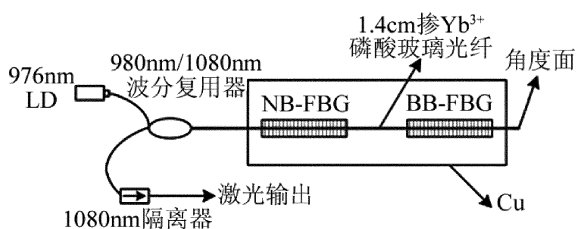


图 2 基于短腔的高掺杂玻璃光纤激光

由上述结果可知,短腔法实现单频激光输出的晶体厚度为百微米级,该厚度由激光振荡的谱宽和纵模间隔共同决定。以 Nd:YAG 为例,厚度为 500 μm 的 Nd:YAG 薄片的纵模间隔为 165GHz,对应的谱宽为 0.6nm,即当激光的谱宽大于此值时就会出现多个纵模。而 Nd:YAG 在 1064nm 处的荧光谱宽为 2nm,因此功率高时很容易出现多个纵模运转,故仅能实现低功率的单频输出。

由短腔法构成的全固态单频激光器具有体积小、结构紧凑、稳定、寿命长、且易廉价批量生产等优点,但由于腔长的缩短限制了激光晶体厚度,影响了抽运吸收效率,只能通过提高掺杂浓度来提升功率,但提高掺杂浓度的潜力非常有限,不适用于大功率输出的激光器,输出功率仅为百毫瓦量级。短腔法比较适用于荧光谱线较窄的激光器。

2 基于选频原理的单频实现方法

基于选频原理的单频实现方法主要是通过谐振腔内插入一些元器件,如双折射滤光片(包括一个布儒斯特片和一个双折射晶体)、输出耦合镜、光栅或标准具等来使特定波长的光优先起振,其它波长的光由于损耗较大无法起振,以此来获得单纵模输出。

2.1 双折射滤光片法

双折射滤光片法在实现单频中应用比较广泛。常由一个布儒斯特片和一个双折射晶体(如 KTP(KTiOPO₄)等)组成,如图 3 所示。

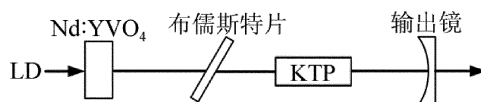


图 3 双折射滤光片法选模示意图

Nd:YVO₄ 发出的是线偏振光。当其偏振方向与布儒斯特片(Bruster plate, BP)的 p 偏振面重合、基频光通过布儒斯特片时,只有 p 偏振分量通过, p 偏振分量通过 KTP 双折射晶体时被分成寻常光 o 光和非寻常光 e 两个分量,其往返位相差为:

$$\delta = 4\pi \cdot (n_o - n_e) \cdot L/\lambda \quad (1)$$

式中, L 为 KTP 晶体的几何长度, λ 为不同纵模对应下基频光在真空中的波长, n_o 和 n_e 分别为不同纵模对应下的 o 光和 e 光在 KTP 晶体中的折射率。只有当 $\delta = m \cdot 2\pi$ (m 为整数) 时,基频光两次通过双折射晶体后的偏振状态才不会发生变化,仍为 p 偏振光,这时再通过布儒斯特片,基频光的损耗最小,可以优先起振,从而实现选频和单纵模输出。

1998 年, CHEN 等人采用 LD 端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体,经 KTP 倍频后,在抽运功率为 12.6W 时得到

3.2W 单频绿光输出,这是在当时的直腔结构单频绿光激光器中得到的最高功率^[12]。2003 年,ZHENG 和 ZHAO 利用布儒斯特片和石英晶体组合构成的双折射滤光片技术,以 Nd:YVO₄ 为工作物质,在抽运功率为 800mW 时,实现了功率为 360mW 的 1064nm 红外单频输出^[13]。2005 年,WANG 等人采用双 KTP/单 BP 的结构,在 8W 的抽运功率下获得了 1.12W 的单频绿光连续稳定输出^[14],这种双 KTP/单 BP 结构比单 KTP/单 BP 结构的选频能力更强,为实现大功率的绿光单频激光器提供了一个很好的方案。2014 年,XING 等人设计了一种 LD 抽运电光可调谐 1064nm 单频 Nd:YAG 激光器(如图 4 所示,图中 p 表示 1064nm 激光的 p 偏振分量),采用偏振分光棱镜和铌酸锂晶体组成电光双折射滤光片,高压电源(high-voltage power supply, HVPS)为铌酸锂晶体提供电信号。作为激光单纵模选择元件和频率调谐元件,实现了 1064nm 线偏振单纵模激光振荡输出和频率调谐。当抽运功率为 832mW 时,对应的输出功率为 27.6mW^[15]。

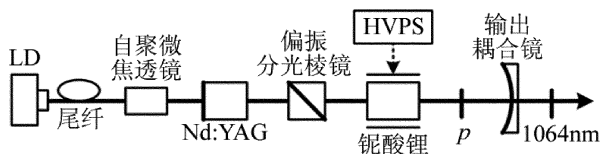


图4 电光可调谐单频 Nd:YAG 激光器

双折射滤光片技术结构简单,引入的损耗小,但其双折射的能力有限,实现单频的效果不够理想。

2.2 耦合腔法

耦合腔利用增益介质本身的两个端面及一个端面与输出镜构成的两个腔的耦合形成等效腔,如图 5 所示。其组合反射率是光波长的函数。

$$R(\varphi_{23}) = \frac{(\sqrt{R_2} - \sqrt{R_3})^2 + 4\sqrt{R_2 R_3} \sin^2 \varphi_{23}}{(1 - \sqrt{R_2 R_3})^2 + 4\sqrt{R_2 R_3} \sin^2 \varphi_{23}} \quad (2)$$

式中, $\varphi_{23} = 2\pi L_{23}/\lambda$, φ_{23} 是腔 C_{23} 的往返相移(与腔长 L_{23} 成正比), R_2 和 R_3 分别是 M_2 和 M_3 的反射系数。调节腔长 L_{23} 来改变反射率极大值间的频率间隔,从而实现模式选择^[16]。

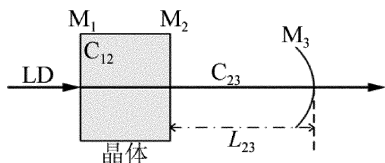


图5 耦合腔结构示意图

1990 年,英国的研究人员利用 LD 抽运半外腔结构 Nd:YAG 激光器,获得了最高功率 10mW 的 1.3μm 连续可调谐单频激光输出,线宽为 5MHz^[17]。1995

年,PEDERSEN 等人采用 Nd:YVO₄ 耦合腔,在抽运光功率为 1.2W 时,得到 350mW 的 1064nm 单频激光输出,斜效率 35%^[18]。2004 年,HARA 等人研制出一种输出频率可调的双腔式结构 Nd:YAG 激光器(如图 6 所示),在 1W 的抽运功率下,实现了 938nm ~ 946nm 的可调节连续单频输出,最大输出功率为几十毫瓦^[19]。2010 年,LI 和 YANG 等人利用耦合腔法得到 721mW 的 1991nm 单频激光输出,抽运功率为 2.4W,斜效率 46%^[20]。

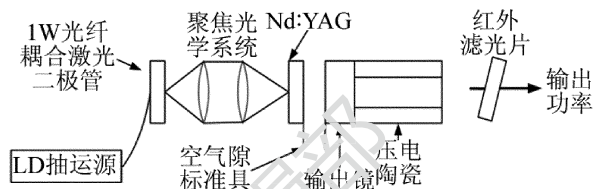


图6 双腔式结构 Nd:YAG 激光器的原理图

耦合腔法选频具有结构简单、成本小、插入损耗小、效率高的优点,但是耦合腔调节难度大,对腔体的稳定性要求较高(由(2)式可以看出,腔的调节精度为 0.5 个波长),一般需要借助微调系统对输出镜的轴向位置进行微调,因此也不适合应用到大功率激光器中。

2.3 光栅选频法

利用光栅来获得单频较经典的方法是 Littman 式光栅-反射镜谐振腔结构(如图 7 所示),它由 LITTMAN 和 METCALF 于 1978 年提出^[21]。采用染料作为激光工作物质。

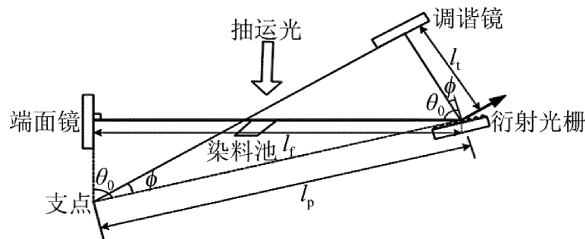


图7 Littman 型腔选单频的原理图

输出激光波长由以下两个方程决定：

$$\begin{cases} \lambda = (2/N)L(\phi) = (2/N)[l_t + l_t(\phi)] \\ \lambda = (x/m)(\sin\theta_0 + \sin\phi) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $L(\phi)$ 是光学腔长, l_t 表示光栅与固定镜片之间的光学距离, $l_t(\phi)$ 是光栅与可调谐镜片之间的光学距离, N 为模式数, x 为光栅周期, m 为衍射阶数, θ_0 为入射角, ϕ 为衍射角。在适当的条件下旋转可调谐镜片,可以使腔长和衍射角同时改变,从而获得连续单频激光输出。

1989 年,KANGAS 等人报道了一种单纵模、可调谐、脉冲的掺 Ti 蓝宝石激光振荡器,这里用到的掠入射腔型与 Littman 结构类似,只是用一块 Ti:sapphire 代替了染料池,由该振荡器输出的每个脉冲的能量比传

统的 Littman 振荡器高 2 到 3 个量级,因为不用混合或更换染料,所以它相对简便些^[22]。1994 年,SHAO 报道了由 Littman 式腔结构振荡器和 1 级单通放大器组成的高效率 Ti:sapphire 激光系统,可得到单脉冲能量为 22.5mJ 的约 800nm 单纵模输出,转换效率为 16%,激光线宽小于 2GHz^[23]。1995 年,KO 等人报道了一种双腔型脉冲的掺 Ti 蓝宝石激光振荡器,它由 Littman 型腔和部分反射的反馈镜组成,可以输出连续可调谐的窄线宽脉冲激光,线宽约为 330MHz,斜率效率约为 9%^[24]。1998 年,MERRIAM 等人采用类似的结构,获得了峰值功率为兆瓦量级的单纵模脉冲光,输出光单脉冲能量达 10mJ,脉宽 5ns,斜率效率高于 40%^[25]。2012 年,WANG 等人采用 Nd:YLF 抽运 Ti:sapphire 晶体,并采用全息光栅进行选频和调谐,当抽运功率为 4.5W 时,得到功率为 0.9W 的 790nm 激光输出,线宽 0.4pm^[26]。2013 年,WEI 等人构建了一种基于 Littman-Metcalf 结构的外腔半导体激光器,获得最大输出功率为 35mW 的 780nm 单频激光输出,线宽 200kHz^[27]。

利用光栅来获得单频除了采用 Littman 型结构外,还可以采用 Littrow 型结构,二者结构设计上的差别是波长选择机制。Littrow 型结构可以直接通过微调闪耀光栅的转角来改变激光器的谐振波长;而 Littman 结构中光栅角度是固定不变的,激光通过光栅发生衍射,然后通过反射镜再次反射回光栅发生二次衍射,耦合回增益元件。由于在这个装置中光束发生了两次衍射,该激光谐振腔结构在牺牲功率和调谐范围的情况下通常提供更窄的线宽。Littrow 结构相比 Littman 型结构更为简单,但调谐时输出光方向会发生微小变化。由以上内容可以看出,在同等条件下,Littrow 型激光器的线宽一般比 Littman 型激光器稍宽^[28],但基本在 1MHz 以内,可满足多数使用需求,故在实际应用中大都采用 Littrow 型结构。目前 Littman 和 Littrow 结构大都应用在 LD 激光器中。

2.4 插入标准具法

标准具具有选频和调谐的作用。插入标准具的固体激光器如图 8 所示。由于多光束干涉效应,只有某些特定频率的光能透过标准具在腔内往返传播,具有较小的损耗。其它频率的光因为不能透过标准具而有很大的损耗。标准具的自由光谱区:

$$\Delta\nu_{\text{FSR}} = c/(2\mu l \cos\theta) \approx c/(2\mu l) \quad (4)$$

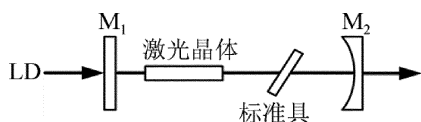


图 8 插入标准具的固体激光器的示意图

式中, μ 为标准具两镜间介质的折射率, l 为标准具厚度, θ 为标准具内光线与法线的夹角。故可以选择适当厚度和折射率的标准具,使它的自由光谱范围与激光晶体的增益线宽匹配,利用标准具对不同频率光的损耗不同来进行选频,从而实现激光单纵模输出。

插入标准具法最早出现在 1986 年 BAER 的文献中。2005 年,ZHANG 等人使用 LD 抽运 Tm:Ho:YLF 激光器,在腔内插入两个 F-P 标准具进行纵模选择,获得了 113mW 的 2 μ m 单频激光输出^[29]。2009 年,哈尔滨工业大学 YAO 等人采用腔内插两片 F-P 标准具方法,双端抽运 Tm:YLF 晶体,当抽运功率为 56.3W 时,得到 14W 的窄线宽 1907.7nm 激光输出,光谱宽度 0.15nm,斜效率为 32.2%^[30]。2011 年,该大学学者又报道了腔内插入 F-P 标准具的 Er:YAG 激光器,得到输出功率 45mW 的 1645nm 单频激光输出^[31]。同年,北京理工大学学者采用类似的方法获得了 749mW 的 1645nm 单频激光输出^[32]。随后又通过对激光谐振腔型结构的进一步优化,于 2012 年获得了 1617nm 单频输出,输出功率 640mW^[33]。2013 年,该课题组选用 Tm:LuAG 为工作物质,通过标准具选模,得到最大输出功率为 616mW 的 2021nm 单频激光输出,斜率效率为 12.8%^[34]。

由于反射率很高且很薄的标准具制作难度很大,因此,人们多用一般的标准具为辅助手段将腔模限制到几个,再利用其它方法如环形腔法来获得单频输出。

3 基于消除空间烧孔效应的单频实现方法

3.1 单向环形腔法

单向环形腔法是制作大功率单频激光器普遍采用的方法,激光在环形共振腔内单方向前进,所以不会产生如线形共振腔因驻波所造成的空间烧孔效应。基本原理是利用单向器使正反两个方向的光的损耗不同,使其中一个方向的损耗因大过一定限度而被抑制掉,从而使光沿另一方向单向运转。单向环形腔主要分为单块非平面环形腔和由分离元件构成的环形腔。

3.1.1 单块非平面环形腔 激光器集单向环形腔优良的单模特性与单块腔极好的稳定性于一身,其原理图如图 9 所示。A 点既是抽运光的入射点,又是振荡激光的输出点,光在 B,C,D 3 个点全反射。在单块晶体中沿 A,B,C,D 振荡的光线形成非平面环形腔的结构形式。A 点的介质膜不仅要使抽运光高透,还要对振荡光的 s 偏振光和 p 偏振光有不同的透射率(相当于一个检偏器),以起到选择输出单频的作用。由外加磁场(磁场方向如图 9 所示)引入的法拉第旋光效应可保证腔内只有沿某一方向的一个偏振态的光起

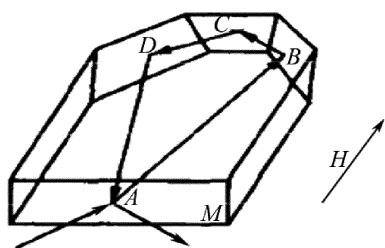


图9 单块非平面环形腔结构示意图

振,从而保证单频振荡。

1985年,斯坦福大学的KANE等人最先提出了单块非平面环行腔激光器的构想,并得以实现,他们利用LD抽运Nd:YAG单块非平面结构环形腔(non-planar ringoscillator, NPRO),在最大抽运3.1W时,获得了163mW的1064nm单频输出^[35]。2004年,ZANG等人提出了一种Nd:YAG晶体半非平面单块固体环形激光器,得到1.6W的1064nm连续单模激光输出,斜效率达50%^[36]。同年,德国ZIMER等人报道了一种新颖的单块非平面环形激光器,它在单块YAG晶体的表面粘了一块厚100 μm 的Nd:YAG薄片,最终获得1.6W单频1064nm激光连续输出,斜效率达到45%^[37]。同年,ZHAO等人采用LD抽运Nd:YAG单块非平面结构环形腔,并通过控温法实现了1319nm单频激光的宽范围调谐,调谐范围14GHz,在抽运功率为3.1W时,最大单频输出为402mW^[38]。2008年,哈尔滨工业大学YAO等人采用非平面环形腔结构,通过Tm光纤激光器抽运Ho:YAG晶体,在抽运功率为17.8W时,获得7.3W的单频激光输出,其中心波长为2090.9nm^[39]。2013年,北京理工大学GAO教授课题组通过改进Er:YAG单块非平面环形腔激光器参量,在输出耦合透过率为18%的情况下获得了单频输出功率10.5W的1645nm单频激光输出,线宽18.6kHz,斜效率为60.03%,目前这一结果是国内外所报道的各种波长单块非平面环形腔激光器单频输出功率的最高结果^[40]。同年,该课题组采用Tm:YLF激光器抽运Ho:YAG NPRO激光器,获得了8W的2122nm单频激光输出,斜效率达61.4%^[41]。

单块固体环形激光器集单块晶体谐振腔和环形腔的优点于一身,具有结构紧凑、稳定性高、效率高、线宽窄、光束质量好的优势,但其加工工艺要求高、造价昂贵、波长调节范围有限,且与分立元件环形腔相比,其输出功率仅可到瓦量级。

3.1.2 分立元件的环形腔 分立元件环形腔主要利用“光学二极管”来获得单向运转,该“光学二极管”包含3个基本元件:法拉第旋光器、半波片和偏振片。三者的组合使用使得沿相反方向传输的两束光损耗差足够大,环形腔内只有一个方向的光能够传输,因此腔内

无驻波形成,消除了空间烧孔效应,从而实现激光器单纵模运转。

采用分离元件构成环行腔的方法最早是由HARRISON于1992年提出的。2004年,ZHAO等人采用LD双端面抽运六镜环形激光谐振腔,在总抽运功率为32.3W的情况下,得到10.4W的单频1064nm红外输出,斜效率为43.7%^[42]。2009年,英国伦敦皇家学院的SHARDLOW等人利用反馈镜和环形腔的方法实现了17W的单频输出,斜效率为44%^[43]。2011年,WANG等人采用Nd:YVO₄/YVO₄环形激光器,在50W的抽运功率下,得到了20W的连续单频1064nm激光输出,光光转化效率为40%,激光的光束质量 $M^2 < 1.1$ ^[44]。

同年,XIE等人利用四镜激光环形腔(如图10所示,其中, M_1, M_2, M_3, M_4 为腔镜,LH₁和LH₂为激光头, L_x 表示腔镜 M_3 和 M_4 之间的距离),在抽运功率为358W时,得到31.9W的单频输出,线宽为80MHz,光束质量因子 $M^2 = 1.41$ ^[45]。2014年,LU等人采用888nm LD抽运四镜环形腔,增益介质为YVO₄/Nd:YVO₄晶体,在抽运功率为75W时,得到稳定的1064nm单频输出,输出功率为33.7W,光光转换效率高于44.9%,线宽达1.5MHz^[46]。同年,WANG等人采用Nd:YAG三镜环形腔,在抽运功率为247W和257W时,分别获得平均功率为61W的1064nm和21.7W的1319nm单频激光输出^[47]。

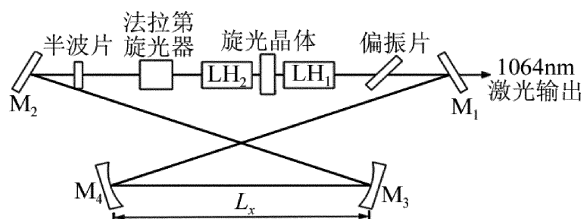


图10 LD侧面抽运Nd:YAG环形腔结构示意图

分立元件环形腔法输出稳定,可以获得高功率单频激光输出,输出功率可达几十瓦,但它使用了较多的分离光学元件,体积一般较大。

3.2 扭转膜腔法

扭转膜腔法是基于消除增益介质中的空间烧孔效应的方法。它使两个沿相反方向传播的光波具有相互垂直的偏振状态,来消除光场在增益介质中的驻波分布,从而获得单频输出。其基本原理如图11所示:光腔由 $M_1, M_2, \lambda/4$ 波片, P_1, P_2 ,增益介质Nd:YAG和起偏器组成。 P_1 和 P_2 快轴相互垂直,并与起偏器偏振方向成45°。入射线偏振光通过 P_1 后变成圆偏光,圆偏光通过 P_2 后变成线偏光,经过 M_2 反射后,再次经过 P_2 ,线偏光又变成圆偏光,因此在增益介质内两方向的圆偏光叠加后,增益介质内的光强为 $4E^2 \cos^2(\omega t - kL)$

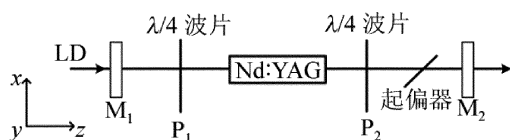


图 11 扭转膜腔法示意图

(其中, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为激光波长, L 为光学长度, E 为电场强度, ω 激光角频率, t 为时间)。从而可知在增益介质内光强在 z 方向上能量均匀分布, 因而不存在空间烧孔效应, 可以实现激光器单纵模运转。最早的扭转腔模是 1965 年由 EVTUHOV 和 SIEGMAN 提出的^[48]。随后, OKA, KUBOTA 和 ANTHON 等人使用扭转模技术解决了功率漂移的问题。2005 年, WU 等人采用扭转模腔 Nd:GdVO₄ 激光器, 当抽运功率为 11.5W 时, 得到 2.1W 的 1064nm 单频激光输出斜效率约为 20%^[49]。2009 年, HAO 等人采用扭转模腔法和三镜 V 形腔结构实现了 Nd:YAG/LBO 激光器的单频输出, 当抽运功率为 3.5W 时, 得到 105mW 的单频 473nm 蓝光输出, 转换效率为 3.5%^[50]。同年, 北京理工大学的 GAO 教授课题组报道了可调谐单频 Tm:YAG 激光器, 通过扭转模腔法获得单频, 抽运功率为 7.72W 时, 得到最大功率为 514mW 的 2 μ m 可调谐单频激光输出, 斜率效率为 9.7%^[51]。2011 年, 该课题组进一步优化 Tm:YAG 扭转模激光器, 获得了 1.46W 的单频激光输出, 斜效率为 19.2%^[52]。

扭转膜腔法适用于各向同性的增益介质。波片的插入损耗会限制激光的输出功率。在高抽运功率或热效应较严重时, 激光晶体的退偏对此方法影响较大, 因此, 扭转膜腔法适用于低功率、低热效应情况, 目前输出功率最大为瓦量级。

4 小 结

介绍了获得全固态单频激光器的几种主要方法, 其中, 短腔法激光器结构紧凑、稳定性好, 但输出功率受晶体厚度限制, 输出功率最大仅为百毫瓦级; 双折射滤光片技术结构简单, 但因双折射能力有限, 实现单频的效果不够理想; 耦合腔法对腔体的稳定性要求较高, 耦合腔调节难度大; 扭转模腔法适用于各向同性的增益介质, 在高抽运功率密度下, 各向同性的激光晶体产生热致双折射现象, 从而限制激光器的最大单频输出功率。可见, 以上 4 种方法均不适用于大功率激光器中。光栅选频法主要包括 Littman 型和 Littrow 型两种结构, 主要应用于 LD 激光器中, Ti:sapphire 激光器中也常用 Littman 结构获得单纵模输出; 该方法由于光栅损伤阈值相对较低, 一般用于低功率单频激光中; 标准具选单频的方法通常和其它方法(如单向环形腔

法)同时使用来获得更窄线宽的输出, 单向环形腔法是制作大功率单频激光器普遍采用的方法, 可获得几十瓦量级的单频输出。这些方法的适用范围各不相同, 但在获得单频方面均已比较成熟, 在实际应用中, 人们常根据需要来选择合适的方法, 有时也将多种方法相结合来获得更理想的结果。

参 考 文 献

- [1] ZHOU B K, GAO Y Z, CHEN T R, *et al.* Principles of laser [M]. 6th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 212 (in Chinese).
- [2] ZAYHOWSKI J J, MOORADIAN A. Single-frequency microchip Nd lasers[J]. Optics Letters, 1989, 14(1):24-26.
- [3] TAIRA T, MUKAI A, NOZAWA Y K, *et al.* Single-mode oscillation of laser-diode-pumped Nd:YVO₄ microchip lasers[J]. Optics Letters, 1991, 16(24): 1955-1957.
- [4] SHAN Zh G, SHEN X H, HUANG C S, *et al.* Single longitudinal mode operation of LD pumped Nd:YAG microchip laser[J]. Laser & Infrared, 1993, 23(C):22-23 (in Chinese).
- [5] GAVRILOVIC P, O'NEILL M S, ZARRABI J H, *et al.* High-power, single-frequency diode-pumped Nd:YAG microcavity lasers at 1.3 μ m[J]. Applied Physics Letters, 1994, 65(13):1620-1622.
- [6] GAO Ch Q, LI J Z, WEI G H. LD-pumped single-frequency seeding laser and the linewidth measurement[J]. Optical Technique, 2000, 26(5): 545-547 (in Chinese).
- [7] LIN Z, GAO Ch Q, GAO M, *et al.* Diode-pumped single-frequency microchip CTH:YAG lasers using different pump spot diameters[J]. Applied Physics, 2009, B94(1): 81-84.
- [8] LI G, YAO B Q, ZHANG C H, *et al.* Diode pumped operation of Tm:Ho:YVO₄ microchip laser[J]. Chinese Physics Letters, 2010, 27(3):034201.
- [9] MENG L, PAN Z Q, GENG J X, *et al.* A short-cavity phosphate glass fiber laser and its output characteristics [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(2): 362-366 (in Chinese).
- [10] ZHANG W N, LI C, FENG Z M, *et al.* Short cavity single frequency fiber laser at 1080nm based on highly Yb³⁺-doped phosphate fiber [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(10):100601 (in Chinese).
- [11] YANG F, CHEN D J, PAN Z Q, *et al.* short liner cavity single-frequency fiber laser with active frequency stabilization by fiber Bragg grating [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(9): 0902005 (in Chinese).
- [12] CHEN Y F, HUANG T M, WANG C L, *et al.* Theoretical and experimental studies of single-mode operation in diode pumped Nd:YVO₄/KTP green laser: influence of KTP length [J]. Optics Communications, 1998, 152(4/6):319-323.
- [13] ZHENG Q, ZHAO L. Study of a diode pumped single frequency Nd:YVO₄ laser at 1064nm[J]. Optical Technique, 2003, 29(6): 675-676 (in Chinese).
- [14] WANG J Y, ZHENG Q, XUE Q H, *et al.* A watt level single frequency green laser obtained by birefringent filter technique[J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(3):321-324(in Chinese).
- [15] XING J H, JIAO M X, LIU Y. Design and experimental study of electro-optically tunable single frequency Nd:YAG laser at 1064nm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(3):0302007 (in Chinese).
- [16] GAO L L, TAN H M. LD-pumped all-solid-state single-frequency

- laser technique [J]. OME Information, 2002, 9(11):8-11 (in Chinese).
- [17] ZHOU F, FERGUSON A I. Tunable single frequency operation of a diode laser pumped Nd:YAG microchip at 1.3 μ m[J]. Electronics Letters, 1990, 26(1):490-493.
- [18] PEDERSEN C, HANSEN P L, SKETTRUP T, *et al.* Diode-pumped single-frequency Nd:YVO₄ laser with a set of coupled resonators[J]. Optics Letters, 1995, 20(12):1389-1391.
- [19] HARA H, WALSH B M, BARNES N P. Tunability of a 946nm Nd:YAG microchip laser by use of a double-cavity configuration[J]. Applied Optics, 2004, 43(15):3171-3173.
- [20] LI J, YANG S H, ZHAO C M, *et al.* High efficient single-frequency output at 1991nm from a diode-pumped Tm:YAP coupled cavity[J]. Optics Express, 2010, 18(12):12161-12167.
- [21] LITTMAN M G, METCALF H J. Spectrally narrow pulsed dye laser without beam expander [J]. Applied Optics, 1978, 17(14):2224-2227.
- [22] KANGAS K W, LOWENTHAL D D, MULLER III C H. Single-longitudinal-mode, tunable, pulsed Ti:sapphire laser oscillator[J]. Optics Letters, 1989, 14(1):21-23.
- [23] SHAO Z X. High efficiency SLM Littman configuration Ti:sapphire laser system[J]. Chinese Journal of Lasers, 1994, 21(9):717-720 (in Chinese).
- [24] KO D K, LIM G, KIM S H, *et al.* Self-seeding in a dual-cavity-type pulsed Ti:sapphire laser oscillator[J]. Optics Letters, 1995, 20(7):710-712.
- [25] MERRIAM A J, YIN G Y. Efficient self-seeding of a pulsed Ti³⁺:Al₂O₃ laser [J]. Optics Letters, 1998, 23(13):1034-1036.
- [26] WANG R, WANG N, TENG H, *et al.* High-power tunable narrow-line with Ti:sapphire laser at repetition rate of 1kHz [J]. Applied Optics, 2012, 51(22):5527-5530.
- [27] WEI F, CHEN D J, XIN G F, *et al.* A compact and rugged tunable external cavity diode laser with Littman-Metcalf configuration [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(11):1102012 (in Chinese).
- [28] XU H Z, QIU Y S, XU B. Wavelength tuning characteristic improvement of external cavity diode lasers[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(6):975-977 (in Chinese).
- [29] ZHANG X L, JUY L, WANG Y Z. Diode-pumped single frequency Tm:Ho:YLF laser at room temperature[J]. Chinese Optics Letters, 2005, 3(8):463-465.
- [30] YAO B Q, KE L, DUAN X M, *et al.* Stable wavelength narrow linewidth diode pumped Tm:YLF laser with double etalons[J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(3):563-566.
- [31] YAO B Q, LIU X L, XU L X, *et al.* Resonantly pumped single frequency Er:YAG laser at 1645nm[J]. Laser Physics, 2012, 22(2):403-405.
- [32] ZHU L N, GAO Ch Q, WANG R, *et al.* Resonantly pumped 1.645 μ m single longitudinal mode Er:YAG laser with intracavity etalons[J]. Applied Optics, 2012, 51(10):1616-1618.
- [33] ZHU L N, GAO Ch Q, WANG R, *et al.* Fiber-bulk hybrid Er:YAG laser with 1617nm single frequency laser output[J]. Laser Physics Letters, 2012, 9(9):674-677.
- [34] WANG L, GAO C Q, GAO M W, *et al.* Diode-pumped 2 μ m tunable single-frequency Tm:LuAG laser with intracavity etalons[J]. Applied Optics, 2013, 52(6):1272-1275.
- [35] KANE T J, BYER R L. Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser[J]. Optics Letters, 1985, 10(2):65-67.
- [36] ZANG E J, CAO J P, LI C Y. The study of solid state monolithic semi-nonplanar ring laser[J]. Advanced Measurement and Laboratory Management, 2004, 12(1):19-22 (in Chinese).
- [37] ZIMER H, WITTROCK U. 1.6W of single-mode output power from a novel power-scaling scheme for monolithic nonplanar ring lasers[J]. Optics Letters, 2004, 29(14):1635-1637.
- [38] ZHAO Y, GAO Ch Q, CAO Y L, *et al.* Study on laser-diode-pumped 1319nm single frequency laser tuning and noise suppression[J]. Laser Technology, 2004, 28(5):466-468 (in Chinese).
- [39] YAO B Q, DUAN X M, FANG D, *et al.* 7.3W of single-frequency output power at 2.09 μ m from an Ho:YAG monolithic nonplanar ring laser[J]. Optics Letters, 2008, 33(18):216-2163.
- [40] WANG R, GAO C Q, ZHENG Y, *et al.* A resonantly pumped 1645nm Er:YAG nonplanar ring oscillator with 10.5W single frequency output [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(10):955-957.
- [41] WANG L, GAO Ch Q, GAO M W, *et al.* Resonantly pumped monolithic nonplanar Ho:YAG ring laser with high-power single-frequency laser output at 2122nm [J]. Optics Express, 2013, 21(8):9541-9546.
- [42] ZHAO J Y, ZHANG X S. LD dual-end-pumped high power CW single-frequency Nd:YVO₄ laser [J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2004, 10(2):87-92 (in Chinese).
- [43] SHARLOW P C, DAMZEN M J. High efficiency 17W single frequency ring laser with feedback mirror [C]//European Conference on Lasers and Electro-Optics 2009 and the European Quantum Electronics Conference. New York, USA:IEEE, 2009:1.
- [44] WANG Zh Y. Investigation of 880nm LD pumped high power CW single-frequency Nd:YVO₄ laser [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2011:30-35 (in Chinese).
- [45] XIE S Y, BO Y, XU J L, *et al.* A high power single frequency diode side-pumped Nd:YAG ring laser[J]. Chinese Physics Letters, 2011, 28(8):084207.
- [46] LUH D, SU J, ZHENG Y H, *et al.* Physical conditions of single-longitudinal-mode operation for high-power all-solid-state lasers[J]. Optics Letters, 2014, 39(5):1117-1120.
- [47] WANG P Y, XIE S Y, BO Y, *et al.* 33W quasi-continuous-wave narrow-band sodium D_{2a} laser by sum-frequency generation in LBO [J]. Chinese Physics, 2014, B23(9):094208.
- [48] EVTUHOV V, SIEGMAN A E. A "twisted-mode" technique for obtaining axially uniform energy density in a laser cavity[J]. Applied Optics, 1965, 4(1):142-143.
- [49] WU E, PAN H, ZHANG S, *et al.* High power single-longitudinal-mode operation in a twisted-mode-cavity laser with a c-cut Nd:GdVO₄ crystal[J]. Applied Physics, 2005, B80(4):459-462.
- [50] HAO E J, LI T, TAN H M, *et al.* Single frequency laser at 473nm by twisted mode technique[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(9):924-927 (in Chinese).
- [51] ZHANG Y, GAO Ch Q, GAO M, *et al.* A diode pumped tunable single-frequency Tm:YAG laser using twisted-mode technique[J]. Laser Physics Letters, 2010, 7(1):17-20.
- [52] GAO Ch Q, WANG R, LIN Z, *et al.* 2 μ m single-frequency Tm:YAG laser generated from a diode-pumped L-shaped twisted mode cavity[J]. Applied Physics, 2012, B107(1):67-70.