

文章编号: 0258-7025(2009)07-1635-08

全固态单频激光器研究进展

郑耀辉 李凤琴 张宽收 彭堃堃*

(山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要 简要介绍了全固态单频激光器在提高输出功率、发展选模和调谐技术、拓展激光波段范围和改善激光器性能等方面的研究进展。

关键词 激光技术; 全固态; 单频; 环形腔

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093607.1635

Progress of All-Solid-State Single-Frequency Lasers

Zheng Yaohui Li Fengqin Zhang Kuanshou Peng Kunchi*

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract The research progresses of all-solid-state single-frequency lasers, such as the increasing of output power, new mode-selecting and wavelength tuning techniques, spectrum range expanding and the improvement of laser property, are introduced briefly.

Key words laser technique; all-solid-state; single-frequency; ring cavity

1 引言

以激光器为核心的激光技术,对先进制造业、科学技术、医疗技术和国防科技的进步与发展起到越来越重要的作用。特别是单频运转的激光器以其噪声小、相干长度长等优点,广泛应用在非线性过程、量子光学、量子信息、冷原子物理、光学测量、光谱和国防科学技术等领域。许多研究人员在这个领域进行了大量的研究工作并取得可喜结果。目前在相对成熟的中小功率全固态单频激光器的研究中,一般采用扭转模谐振腔^[1]、短谐振腔^[2,3]、谐振腔中插入标准具^[4]或双折射滤光片^[5,6]等方法使激光器以单纵模方式运转。但在高功率激光运转、特别是要实现稳定单频运转情况下,最佳方案仍是利用环形激光谐振腔^[7~13],通过在谐振腔内插入光学单向器迫使激光器单向运转、消除空间烧孔效应,来实现单频激光的输出。

随着科学技术的发展,对单频激光器的性能和指标也提出了更高要求,优质的钛宝石激光器和光学参量振荡器(OPO)需要高输出功率和低噪声的单频激光器作为抽运源;而量子信息及冷原子物理的发展,则需要频率可调的各种特定波长的激光器,以满足与不同原子的激发及通信波段的匹配;在高精度光学测量、光谱和频标等领域,频率稳定的窄线宽激光器的应用起到非常重要的作用。因此,提高输出功率,发展选模和调谐技术,拓展激光波段范围,改善激光器整体性能和主要指标,就成为发展现有单频激光器的主要研究内容。

本文结合本课题组的具体工作,对全固态单频激光器的进展作一简要介绍。

2 需解决的关键问题

1) 在激光材料的光抽运过程中,由于量子亏损

收稿日期: 2009-03-23; 收到修改稿日期: 2009-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(60608012, 60736040, 10674088)、国家自然科学基金创新研究群体科学基金(60821004)和山西省归国留学基金资助课题。

作者简介: 郑耀辉(1979—),男,讲师,主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: yzhzheng@sxu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: kcpeng@sxu.edu.cn

发热而产生热梯度和热致应力^[14],严重影响激光器输出功率的提高和光束质量的改善。因此,采取有效的散热技术是提高激光器输出功率和光束质量的关键。2)在高功率内腔倍频激光器中,非线性转换效率较高,因此非线性损耗对基频光是很大的损耗。而这种损耗对基频光的偏振方向和波长具有选择性,并对模式选择造成影响,需采取措施克服非线性损耗对激光器选模带来的影响。3)在调谐激光器中,调谐范围和调谐速度、调谐精度是相互矛盾的,怎样同时获得宽调谐范围、高调谐速度和高调谐精度是一个重要的研究课题。4)量子信息及冷原子物理的发展,需要发展多种波段的激光源来对应不同的原子吸收线。5)随着激光器在测量和频标方面的广泛应用,噪声和线宽(考虑频率漂移)是愈来愈重要的指标。对高灵敏度光学测量来说,噪声的大小直接影响测量的精度。而在高精度光谱和光学测量方面,激光器的线宽也是影响测量精度的重要指标。如何降低激光器的噪声和压窄线宽是研究工作的关键。

3 研究进展

3.1 提高输出功率

激光材料因吸收了抽运辐射而发热,而散热又要求对其表面进行冷却,这两者使激光材料内部产生不均匀的温度分布。由于温度和应力的改变使折射率发生变化,而导致激光束的畸变。当应力超过晶体的抗张强度时,会出现应力裂纹。因此研究有效地减小热效应的方法是发展高功率激光器的关键技术。R. Weber等^[15]用有限元分析方法得到了激光材料内的等温线和等压线,如图1所示。从图1可以看到温度和应力的最大值都出现在晶体抽运端面的中心,而随着晶体对抽运光的吸收,抽运光的强度越来越弱,离抽运端面越远,晶体内的温度和应力越小,因此减小激光晶体热效应的关键是减小抽运端面的热效应。

热透镜效应是由晶体的热效应产生的,根据P. J. Hardman等^[16]的分析,在端面抽运激光器中,热透镜效应主要包括两部分:1)折射率效应,即温度分布不均匀引起折射率分布不均匀,导致的热透镜效应。2)端面效应,即抽运端面局部温度较高,由于热膨胀导致晶体端面由平面变为凸面,而引起热透镜效应。鉴于此,许多研究人员用键合晶体来减小端面效应,键合晶体就是在普通晶体的抽运端面键合一块无掺杂晶体。晶体端面无掺杂的部分相当于一个热沉,可降低掺杂端面的温度,在这种情

况下,抽运吸收最强的地方在键合晶体内部。不但消除了热透镜效应中的端面效应,而且降低了激光晶体内部的温度^[17]和应力。图2是键合晶体内的等温线和等压线,与图1中示出的普通晶体相比,晶体内的温度和应力有明显改善。普通晶体内的温度梯度为59.5 K,而键合晶体仅为39 K;普通晶体承受的应力为29 MPa,而键合晶体仅为13.5 MPa^[15]。

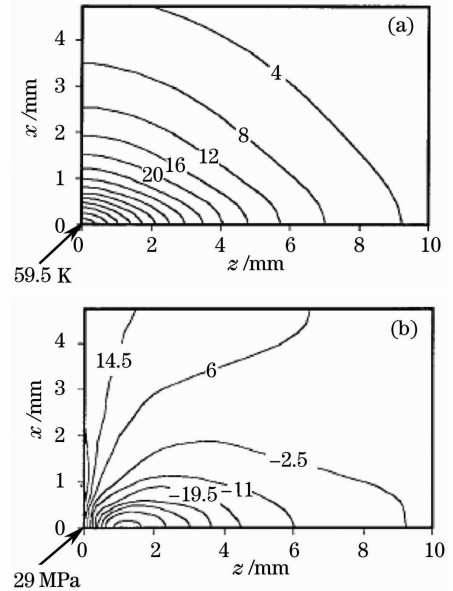


图1 端面抽运晶体中的温度(a)和应力(b)分布
Fig.1 Temperature (a) and stress (b) distributions for the conventional crystal

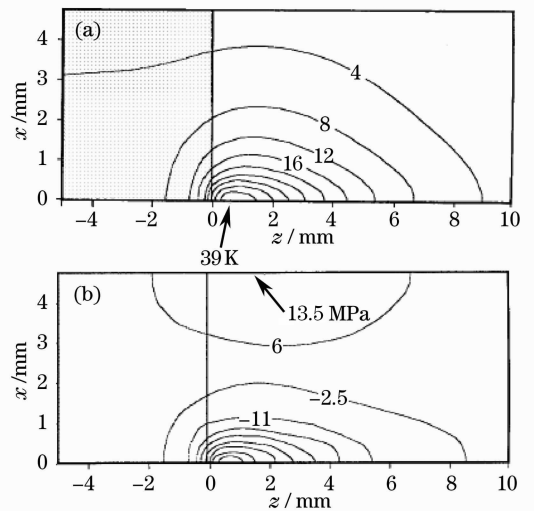


图2 端面抽运键合晶体中的温度(a)和应力(b)分布
Fig.2 Temperature (a) and stress (b) distributions for the composite crystal

但是,键合晶体并不能减少由折射率梯度引起的热透镜效应。于是人们又通过降低晶体掺杂浓度

(例如 Nd:YVO₄ 晶体对 808 nm 光的吸收系数可表达为 $a \times \rho^b$ (cm⁻¹), 式中 a 和 b 是常数, ρ 是晶体的掺杂浓度^[18]), 从而减小晶体对抽运光的吸收系数的办法来减轻热效应^[19]。这种方法虽然减轻了晶体抽运端面对抽运光的强烈吸收, 但是会对抽运光的吸收效率产生影响。为了克服这种影响, 需要使用更长的激光晶体来尽可能多地吸收抽运功率。更长的晶体相当于晶体与散热器的接触面积增大, 这样更有利于散热。但是, 晶体长度过长不仅增加激光器的成本, 而且使设计的灵活性降低, 它需要抽运光有较小的发散角来保证晶体内部抽运光的光斑不会太大。一些小组提出在晶体后端面(与抽运端面相对的端面)镀抽运光高反膜的方法, 使未被吸收的抽运光进行二次吸收, 但这也面临着抽运发散导致光斑太大的问题。于是, L. McDonagh 等^[20,21] 设计了如图 3 所示的实验装置。他们在与抽运光相对的位置放置了一面反射镜, 在反射镜的前面放置一个聚焦透镜, 剩余的抽运光经反射镜和聚焦透镜后被晶体二次吸收。这种方法不仅提高了吸收效率, 而且使吸收沿晶体轴线分布更加均匀。图 3 所示的谐振腔还可以被周期串联扩张, 可根据输出功率的需求来设计晶体和抽运源的组数, 研究人员采用两组谐振腔串联获得最大单横模绿光输出 62 W, 输出光的光束质量因子为 1.05。

当然, 为了降低晶体对抽运光的吸收, 也可以用晶体的弱吸收谱线。例如对于 Nd:YVO₄ 晶体, 它的吸收峰在 808 nm, 可以采用波长为 819 nm, 880 nm, 888 nm^[20,21] 的半导体激光器作为抽运源, 既能减少吸收, 又能减少量子亏损发热。

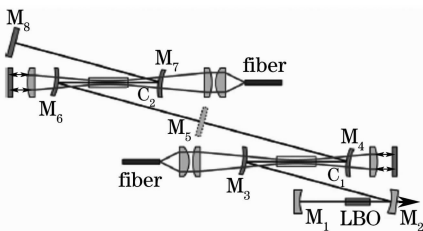


图 3 采用低吸收晶体的激光器装置

Fig. 3 Oscillator setup of laser by using low-doped crystal

上述 3 种方法都能减轻热效应, 但是它们都是使用中心发热, 表面冷却的块状晶体, 这种方式的缺陷驱使研究工作者设计了更有效的散热方法——薄片式激光器。薄片式激光器最早由德国斯图加特大学研制成功, 后由德国 ELS 公司生产, 图 4 是 ELS 公司 VersaDisk-515 的光路图^[22]。激光器采用前表面抽运技术, 半导体激光器从晶体薄片的一端抽运,

晶体薄片的另一端放置热沉, 用于冷却。抽运光束可以多次穿过激光晶体, 从而产生很强的激光辐射。热传导的方向与激光光束传播方向平行, 因此径向温度梯度非常小, 从而避免了传统块状晶体在激光器处于高功率运转下的热透镜效应、晶体变形等。可以获得高输出功率而并不影响它的光学性能。目前, 薄片式激光器的最大输出功率已达 500 W, 光束质量因子小于 1.55^[23]。由于薄片式激光器优良的性能, 又进一步推动了薄片激光器更深入的研究^[24,25]。但是, 薄片激光器的输出功率的进一步提高也受自发辐射和表面损耗等因素的制约^[26]。

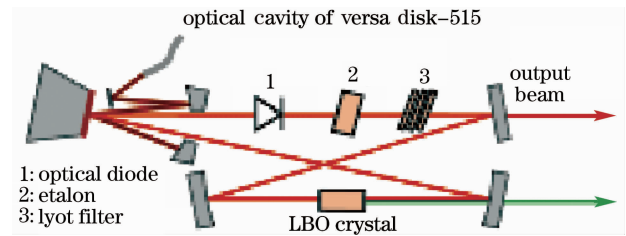


图 4 薄片式激光器实验装置

Fig. 4 Schematic diagram of the thin disk laser

3.2 内腔倍频激光器选模技术

到目前为止, 环形腔是选取单纵模的最佳方案。但是它也有如下局限: 1) 像散影响。由于环形谐振腔通常包括离轴放置的球面反射镜, 一般情况下在子午面和弧矢面内光束的模参数不同, 合成后为一椭圆高斯光束。在非临界相位匹配的情况下, 像散椭圆光束将不利于倍频效率的提高, 一般采用在腔内插入像散补偿片的方法来提高倍频转换效率^[27]。而在临界相位匹配情况下, 选择合适的基频光偏振方向, 像散椭圆光束才能利于倍频效率的提高^[13]。2) 当非线性晶体的光谱接收带宽与增益介质的受激发射带宽的比值(γ)较小时, 和频引起的非线性损耗不足以抑制腔内的非激活模振荡^[28], 容易引发激光器多纵模振荡或者模式跳变; 当倍频转换效率较高时, 由于非线性转换对基频光的损耗有偏振选择性(对满足相位匹配的偏振方向来说, 损耗最大, 随着基频光的偏振方向远离相位匹配方向, 非线性损耗也逐渐减小), 因此基频光的偏振方向可能随损耗改变而不能获得稳定的单向工作状态。在上述两种情况下, 仅用环形腔并不能有效选模。

3.2.1 非线性光谱接收带宽对选模的影响

在高功率环形内腔倍频激光器中, 腔内功率密度及倍频转换效率较高, 非线性转换过程对基频光有较大损耗。当 γ 值较小时, 和频引起的非线性损耗不足以抑制腔内的非激活模振荡, 容易引发激光

器多纵模振荡或者模式跳变,因此,在 γ 值较小的高功率内腔倍频激光器中只用光学单向器不能获得稳定的单纵模振荡。本研究组从单纵模振荡的条件出发,分别考虑了增益介质的受激发射带宽和非线性晶体的光谱接收带宽对增益和非线性损耗的影响,得到最小比值 γ 与抽运功率的关系曲线,如图5所示。为了提高 γ 值,选取在腔内插入标准具的办法来压窄增益带宽。根据图5的结果,在选取合适的标准具和环形腔联合选模,在抽运功率为23.5 W时,获得了4 W稳定的单频绿光输出,3 h的功率稳定性为 $\pm 1.2\%$ 。

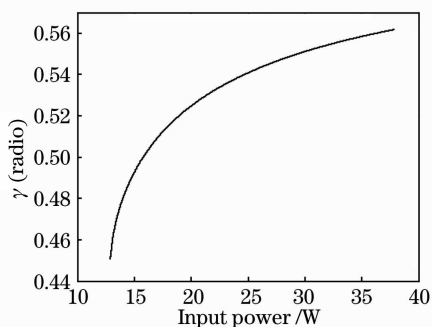


图5 激光器稳定单频工作的条件,最小 γ 值与抽运功率的关系

Fig. 5 Phase diagram of the ratio between the nonlinear spectral bandwidth and the gain bandwidth versus input power

3.2.2 偏振选择损耗对选模的影响

在用环形腔选模的单频激光器中,偏振方向稳定的线偏振激发是获得稳定单频激光的前提条件。由于布氏片对p偏振光没有损耗,而对s偏振光的损耗为15%,Martin等^[11]利用布氏片对不同偏振具有不同损耗的原理,在谐振腔内插入布氏片进行选偏。而在用Nd:YVO₄晶体作为增益介质的激光器中,Nd:YVO₄晶体在 π 偏振方向的受激发射截面为 σ 偏振方向的4倍,因此无需插入额外的起偏元件就能获得 π 偏振激发^[12,13]。在高效内腔倍频情况下,对基频光来说,非线性转换过程是主要的损耗,而且非线性转换对基频光的损耗有偏振选择性,对满足相位匹配的偏振方向来说,损耗最大,随着基频光的偏振方向远离相位匹配方向,非线性损耗也逐渐减小。这样,当激光器的状态改变,如非线性晶体温度或抽运功率等,p或 π 偏振方向的净增益就可能小于其他方向的净增益,受激发射光可能发生在s或 σ 偏振方向。这种变化严重影响激光器的单向状态,进而影响激光器的单频工作状态和稳定性。在以前的激光器中,这种问题通常靠高精度的温度

控制和高稳定的电流驱动来弥补。

为此,本研究组设计了一种简单有效的办法来阻止激光器输出光偏振方向的改变。采用一块楔形Nd:YVO₄晶体作为单频激光器的增益介质,根据双折射原理,偏振方向不同的光在谐振腔内的传播路径不同,这样相互正交的两个偏振方向的光只有一个能在腔内振荡,而另一个会因几何偏折损耗而不能起振。几何偏折损耗的大小与楔角的大小有关,我们从理论上模拟了最佳倍频转换条件下最小允许的楔角与抽运功率的关系,当楔角大于理论上的最小值时,几何偏折损耗足以抑制s或 σ 偏振方向的光振荡。用楔形晶体辅助选择偏振,设计了如图6所示的激光器。从而获得偏振方向、单向、状态稳定的激光输出。当抽运功率为27 W时,激光器的输出功率为6.5 W,3 h的功率稳定性优于 $\pm 0.3\%$ 。

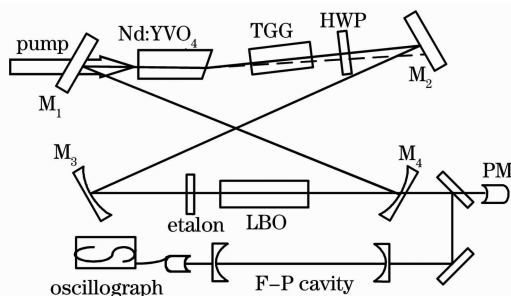


图6 楔形Nd:YVO₄晶体激光器实验装置

Fig. 6 Experimental schematic of single-frequency green laser using a wedge Nd:YVO₄ crystal

3.3 调谐技术

可调谐激光器在高分辨率激光光谱学、激光雷达、量子光学和频标等领域有着重要的应用,因而受到了广泛的关注。目前获得窄调谐范围可调谐激光器的方法主要有:电光效应调谐、压电效应调谐、温度调谐和旋转标准具调谐等。而在宽调谐范围激光器中,一般采用双折射滤光片组来实现宽调谐。

全固态激光器可以通过电光效应^[29]获得高速调谐,具体的实验装置如图7所示,这种调谐方法的调谐速度为0.6 ns,调谐精度为12 MHz/V,但最大

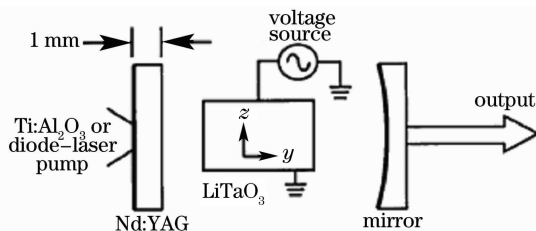


图7 电光效应调谐激光器实验装置

Fig. 7 Schematic of the electro-optic modulated laser

调谐范围仅为谐振腔的一个自由光谱范围。图 8 是一个典型的用压电效应调谐^[30~32]的激光器装置图，它的调谐速度为微秒量级，调谐精度为 1 MHz/V。但压电效应调谐也面临着和电光调谐同样的问题。由于最大调谐范围仅为一个自由光谱范围，因此要获得较大调谐范围，这两种调谐方式只适用于微片激光器。而微片激光器的输出功率又有很大局限性，也不能在腔内插入其他光学元件。后来，Okhapkin 等^[33,34]报道了一种温度调谐方法，他们设计了一个激光器，采用 II 类相位匹配的 KTP 晶体为倍频晶体。利用寻常光线和非常光线的折射率随温度变化量的差异实现调谐，这种方式可以获得 283 GHz 的宽调谐范围，但不可能获得高速调谐。几乎同时，Harrison 等^[35]设计了一种标准具辅助调谐方法，如图 9 所示。通过改变标准具的倾角获得宽范围、非连续调谐，而在谐振腔的一个自由光谱范围内，由压电效应实现调谐。它采用两种方式结合调谐的方法，既具有了标准具调谐范围宽的优点，又兼有压电效应调谐精度高的长处，而且谐振腔的设计灵活，不受调谐限制。随后，本研究组也用相似的方法设计了激光器^[36]。上述两种设计都是把标准具装在可旋转的电流计上，激光腔的一个腔镜装在压电陶瓷上，通过旋转标准具和控制压电陶瓷的伸长来调谐，这种调谐方式的调谐范围可达 100 GHz。但是，运动物体固有的惯性使这种激光器的调谐速度仅为毫秒量级。为了进一步提高这种激光器的调谐速度，我们采用两块电光调制晶体作为调谐元件^[37]，设计的电光调谐可调谐激光器如图 10 所示。其中一块加工成通光面相互平行的薄片，利用晶体的标准具效应实现宽范围、非连续调谐。另一块是通光面相互不平行的电光晶体，晶体电极上电压的改变引起晶体折射率的变化，从而使光线在谐振腔内的光程发生改变，来达到连续调谐的目的。这种激光器的调谐速度达到 10 ns，输出功率为 480 mW。受调谐电压

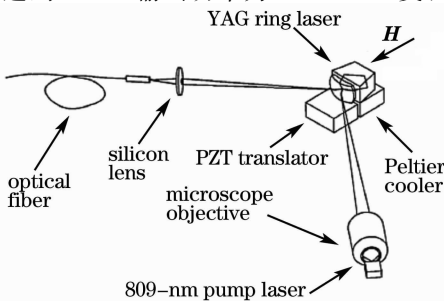


图 8 压电效应调谐激光器实验装置

Fig. 8 Schematic of the piezo-electric tuning laser

的限制，它的调谐范围为 17.2 GHz，选取更大的调制电压，可以获得 100 GHz 量级的调谐范围。

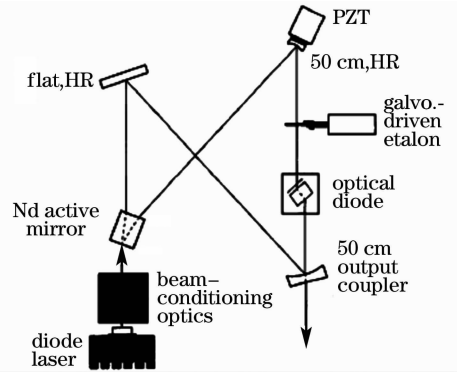


图 9 标准具辅助调谐激光器

Fig. 9 Broadband tuning laser by using etalon

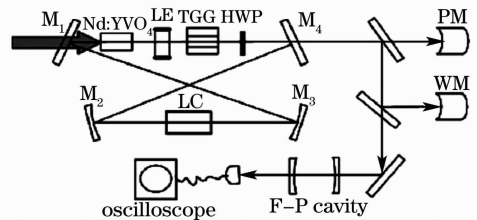


图 10 宽带电光调谐激光器实验装置

Fig. 10 Broadband electro-optic tuning laser

在宽调谐激光器-钛宝石激光器中，一般采用双折射滤光片作为调谐元件^[27,38,39]，通过调整滤光片中 o 光传播方向与光轴的夹角来调谐。双折射滤光片越厚，调谐精度越高，调谐范围越小；双折射滤光片越薄，调谐精度越低，调谐范围越大。因此一般的钛宝石激光器都采用若干片复合石英双折射滤光片调谐。美国相干公司生产的钛宝石激光器 MBR 系列就是采用这种调谐结构。我们也开展了这方面的研究工作，并研制成功 700 mW 钛宝石激光器样机。

3.4 拓展激光波段

Nd:YAG 和 Nd:YVO₄ 晶体是最常用的激光晶体，用它们作为增益介质获得的单频 1064 nm 激光器和经内腔倍频获得的单频 532 nm 绿光激光器是最常用的光源。本课题组自行研制的 1064 nm 激光器样机^[40]已经应用于远失谐偶极力阱俘获冷原子和参量下转换获得中红外光的实验研究，自行研制的 532 nm 激光器样机也应用于抽运钛宝石激光器、光场压缩态的产生和量子信息等研究领域。

同时，采用沿 b 轴拉伸的 Nd:YAP 晶体作为增益介质；利用 Nd:YAP 晶体在 1080 nm 的受激发射；在腔内插入 λ/4 波片以减小退偏损耗；以 II 类非临界匹配的 KTP 晶体作为倍频晶体；获得瓦级 540 nm 激光输出^[41]。随后，为了克服上面激光器中

像散过大和基频光输出过小的缺点,我们选用 5 镜环形谐振腔,通过减小光束在凹面腔镜的入射角,减小了环形腔的像散;选用对基频光透射率为 0.6% 的输出镜,获得双波长激光输出^[42],利用上述激光器,完成了量子光学中的连续变量两组分纠缠、三组分纠缠和纠缠交换等重要实验。

为了探索量子信息实用化,也利用 Nd:YVO₄ 晶体的 1342 nm 谱线,经 I 类临界相位匹配的 LBO 晶体倍频,环形腔选模,获得 671 nm 单频红光激光输出^[43]。由于 1342 nm 激发时,激光器的量子亏损较大,为了减小量子亏损发热对激光器的影响,在设计中改进了激光晶体的冷却控温系统,并选取掺杂浓度较低的 Nd:YVO₄ 晶体,很好地解决了这一问题。由于 1342 nm 激光在硅光纤的一个传输窗口上,而且经倍频获得的 671 nm 激光正好与锂原子的吸收线相匹配,这将为锂原子的量子态传输和存储研究提供重要光源。

此外,利用 Nd:YLF 晶体的 1053 nm 跃迁,经 LBO 晶体内腔倍频,环形腔选模,可以得到波长为 526.5 nm 的单频绿光^[16]。这个波长的光经参量下转换可得到 1560 nm 和 795 nm 光,1560 nm 激光在硅光纤的另一个传输窗口上,而 795 nm 激光正好与铷原子的吸收线相匹配,这样的光源为进行铷原子的量子存储提供手段。

随着冷原子物理和量子信息科学的快速发展,对单频激光器的波长提出了越来越多的要求,不仅需要具有不同波长激光器,也需要同一个激光器发出两个或更多波长的光(所谓多色光源),可以预料激光器向更宽波段和多色方面拓展将会是大家十分关注的内容。

3.5 提高激光器性能

全固态单频激光器由于噪声小、线宽窄等优点,广泛应用在高精度光学测量、高灵敏度光学测量、光谱和频标等领域。对于高灵敏度光学测量、高精度光学测量和光谱学等领域的应用,噪声和线宽(考虑频率漂移)的大小直接影响测量的精度,而在光通信领域,线宽的大小也影响传输线路的信道容量。因此,主要从降低噪声和压窄线宽两个方面介绍激光器性能的提高。

3.5.1 降低噪声

本研究组用全量子模型分析了用电-光反馈的方法来控制激光二极管驱动源的电流对激光器强度噪声的减小。通过加一个电反馈项到一个自由运转激光器的量子朗之万方程,得到电光反馈单频激光

器的强度噪声的解析表达式,理论上分析了电光反馈对强度噪声的影响^[44,45]。在实验上用光电反馈电路,经激光器输出的光采样误差信号,得到的误差信号反馈到激光二极管驱动源上,用光信号的变化来控制驱动电流,很好地降低了内腔倍频激光器低频端的噪声^[46]。同时也设计了由 3 镜环形腔构成的模清洁剂,利用它过滤振幅和相位噪声的特性使单频 Nd:YVO₄ 激光器的强度噪声降低,通过模清洁剂之前激光在 30 MHz 才能达到散粒噪声极限,通过模清洁剂之后在 7 MHz 处便达到散粒噪声基准^[47]。

3.5.2 压窄线宽

广义上激光器的线宽包括两个概念,即激光器的瞬时线宽和一定时间内的漂移。瞬时线宽可以通过减小激光器内腔损耗和在激光腔内插入标准具的方法压窄,而稳频过程能有效减小激光器的频率漂移。

激光器自身的稳定运转是稳频的基础,只有稳定运转的激光器才能通过稳频进一步减小频率漂移。采用整体腔结构并通过给激光腔进行温度控制的方法获得稳定运转的单频激光器。激光器自由运转时,1 min 的频率漂移在 10 MHz 量级。随后,采用控温 F-P 腔作为频率基准的方法,用主动稳频过程稳定激光器的频率,得到激光器 1 min 的频率漂移为 10 kHz 量级,而 1 h 的频率漂移为 100 kHz 量级^[48]。

除了上述的无源腔(F-P 腔)作为基准的主动稳频方法,饱和吸收稳频方法具有很高的频率稳定性^[49],但是它的稳定范围受物质吸收的限制,即不是所有波长的激光都能用饱和吸收的方法进行稳频。无源腔稳频可以不受激光波长的限制^[7,39,43~45],但是,由于无源腔受外界环境的变化对稳定效果有影响,于是许多研究工作者采用把 F-P 腔放入真空系统、加防震措施和使腔垂直放置等方法提高激光器的频率稳定性^[50~53]。早在 1988 年,J. L. Hall 小组^[50]就用无源腔稳频的方法得到 8 s 漂移 50 mHz 的结果。1999 年,Young 等^[51]也用无源腔的方法将染料激光器 32 s 的频率漂移稳定到 0.6 Hz 水平。2008 年,Alnis 等^[52]更是成功稳定了半导体激光器的频率,得到 1 s 的频率漂移为 63 mHz,16 h 的频率漂移为 20 Hz。Y. Y. Tiang^[53]用垂直放置的无源腔作为频率标准,将线宽为 2 Hz 的 Nd:YAG 激光器的频率漂移稳定到 1 s, 1 Hz 水平。

4 结 论

全固态单频激光器及其稳频工作长期以来一直是一个活跃的研究领域。随着科学技术的发展,对

激光器相关指标、性能的提高和改善显得愈加重要。由于单频激光器噪声低、相干性好,适于作为钛宝石激光器和 OPO 的抽运源,因此提高全固态单频激光器输出功率成为目前及将来一段时间大家关注的问题。运转在高输出功率下的全固态单频激光器,纵模稳定性、调谐技术改进、热效应克服、谐振腔优化等都是需要认真考虑和解决的技术问题。

在量子信息科学研究和应用中,需要制备、传输和存储高质量的量子态。因此,利用全固态单频激光器去产生波长分别满足与不同原子的激发和通信波段相匹配的多色多组分纠缠光,是量子信息科学实用化必须解决的重要技术问题,此问题已经引起该领域研究工作者很大的兴趣。频率稳定的窄线宽激光器将随着高精度光学测量、冷原子物理和频标等方面研究的深入,得到愈来愈重要的应用。要获得指标和性能优良的全固态单频激光器,激光器本身机械结构稳定性、材料选取、散热方式等细节问题也不可忽略。

本文结合我们研究组工作简要综述了全固态单频激光器在提高输出功率、发展选模技术和调谐技术、拓展激光波段范围和改善激光器性能等方面的研究进展。由于此领域涉及的科学和技术问题较多,本文对全固态单频激光器本身内容讨论较多,而对其他内容的介绍就比较简略,特别是对激光器稳频这一重要研究内容介绍较少。幸好我国科学工作者在这个领域做了许多重要工作,也有许多成果报道,可弥补本文的不足。

参 考 文 献

- 1 V. Evtuhov, A. E. Siegman. A. "Twisted-Mode" technique for obtaining axially uniform energy density in a laser cavity[J]. *Appl. Opt.*, 1965, **4**(1): 142~143
- 2 Z. Lin, C. Gao, M. Gao *et al.*. Diode-pumped single-frequency microchip CTH:YAG lasers using different pump spot diameters[J]. *Appl. Phys. B*, 2009, **94**(1): 81~84
- 3 J. J. Zayhowski, A. Mooradian. Single-frequency microchip Nd lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(1): 24~26
- 4 T. Baer. Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG lasers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**: 1175~1180
- 5 Xue Qinghua, Zheng Quan, Ye Ziqing *et al.*. Analysis of eigenstates on LD-pumped Nd:YVO₄/KTP intracavity-doubled green laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(10): 877~880
薛庆华,郑 权,叶子青等. LD 抽运腔内倍频 Nd:YVO₄/KTP 绿光激光器的本征态分析[J]. *中国激光*, 2003, **30**(10): 877~880
- 6 Wang Junying, Zheng Quan, Xue Qinghua *et al.*. 1.12 W single-frequency green laser adopting birefringent filter technique[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 321~324
王军营,郑 权,薛庆华等. 利用双折射滤光片技术获得瓦级单频绿光输出[J]. *光子学报*, 2005, **34**(3): 321~324

- 7 Wang Haibo, Ma Yan, Zhai Zehui *et al.*. 1.5 W cw frequency-stabilized and intracavity frequency-doubled ring laser end-pumped by diode laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(2): 119~122
王海波,马 艳,翟泽辉等. LD 端面抽运 1.5 W 单频稳频绿光激光器[J]. *中国激光*, 2002, **29**(2): 119~122
- 8 Y. F. Chen, T. M. Huang, C. L. Wang *et al.*. Theoretical and experimental studies of single-mode operation in diode pumped Nd:YVO₄/KTP green laser: influence of KTP length[J]. *Opt. Commun.*, 1998, **152**: 319~322
- 9 G. T. Maker, P. A. Malcolm, A. I. Ferguson. Single-frequency diode-pumped Nd:YAG ring laser with no intracavity elements[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(21): 1813~1815
- 10 Zhang Jing, Zhang Kuanshou, Wang Runlin *et al.*. All-solid-state Nd:YVO₄ ring laser of single-frequency operation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(8): 694~696
张 靖,张宽收,王润林等. 全固态环形单频 Nd:YVO₄ 激光器[J]. *中国激光*, 2000, **A27**: 694~696
- 11 K. I. Martin, W. A. Clarkson, D. C. Hanna. 3 W of single-frequency output at 532 nm by intracavity frequency doubling of a diode-bar-pumped Nd:YAG ring laser[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(12): 875~877
- 12 Y. H. Zheng, H. D. Lu, F. Q. Li *et al.*. Four watt long-term stable intracavity frequency-doubling Nd:YVO₄ laser of single-frequency operation pumped by a fiber-coupled laser diode[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22): 5336~5339
- 13 Zheng Yaohui, Lu Huadong, Li Fengqin *et al.*. All-solid-state high-efficiency high-power Nd:YVO₄/KTP laser of single-frequency operation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 739~742
郑耀辉,卢华东,李凤琴等. 全固态高输出功率单频 Nd:YVO₄/KTP 激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 739~742
- 14 W. Koehchner. Solid-State Laser Engineering[M]. Sun Wen *et al.* transl., Beijing: Science Press, 2002. 366~367
W. 克希耐尔著. 固体激光工程[J]. 孙 文等译,北京:科学出版社,2002. 366~367
- 15 R. Weber, B. Neuenschwander, M. M. Donald *et al.*. Cooling schemes for longitudinally diode laser-pumped Nd:YAG rods[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(6): 1046~1053
- 16 P. J. Hardman, W. A. Clarkson, D. C. Hanna. High-power diode-bar-pumped intracavity-frequency-doubled Nd:YLF laser[J]. *Opt. Commun.*, 1998, **156**(1~3): 49~52
- 17 Z. Zhuo, T. Li, X. M. Li *et al.*. Investigation of Nd:YVO₄/YVO₄ composite crystal and its laser performance pumped by a fiber coupled diode laser[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **274**(1): 176~181
- 18 X. Y. Peng, L. Xu, A. Asundi. Power scaling of diode-pumped Nd:YVO₄ lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(9): 1291~1299
- 19 E. Cheng, D. R. Dudley, W. L. Nighan *et al.*. Laser with low doped gain medium[P]. US. Patent, Patent No. US6185235. 2001
- 20 L. McDonagh, R. Wallenstein. High-efficiency 60 W TEM₀₀ Nd:YVO₄ oscillator pumped at 888 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(22): 3297~3299
- 21 L. McDonagh, R. Wallenstein. Low-noise 62 W CW intracavity-doubled TEM₀₀ Nd:YVO₄ green laser pumped at 888 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(7): 802~804
- 22 <http://www.bjlaser.com/lasers/ELS/ELS%20products.doc>
- 23 J. Mende, E. Schmid, J. Speiser. Thin disk laser: Power scaling to the kW regime in fundamental mode operation[C]. *SPIE*, 2009, **7193**: 71931V
- 24 X. J. Guo, W. Hou, H. B. Peng *et al.*. 4.44 W of CW 515 nm green light generated by intracavity doubling Yb:YAG thin disk laser with LBO[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **267**(2): 451~454
- 25 A. Baum, D. Grebner, W. Paa *et al.*. Axial mode tuning of a single frequency Yb:YAG thin disk laser[J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**(8): 1091~1096

- 26 D. Kouznetsov, J. F. Bisson, J. Dong *et al.*. Surface loss limit of the power scaling of a thin-disk laser[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(6): 1074~1082
- 27 <http://www.coherent.com.cn/>
- 28 S. Greenstein, M. Rosenbluh. The influence of nonlinear spectral bandwidth on single longitudinal mode intracavity second harmonic generation[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **248**(1~3): 241~248
- 29 P. A. Schulz, S. R. Henion. Frequency-modulated Nd:YAG laser[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(8): 578~580
- 30 W. R. Trutna, Jr, D. K. Donald. Two-piece, piezoelectrically tuned, single-mode Nd:YAG ring laser[J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(7): 369~371
- 31 T. J. Kane, E. A. P. Cheng. Fast frequency tuning and phase locking of diode-pumped Nd:YAG ring lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(11): 970~972
- 32 A. Owyong, P. Esherick. Stress-induced tuning of a diode-laser-excited monolithic Nd:YAG laser[J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(12): 999~1001
- 33 M. V. Okhapkin, M. N. Skvortsov, A. M. Belkin *et al.*. Tunable single-frequency diode-pumped Nd:YAG ring laser at 1064 nm/532 nm for optical frequency standard applications[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **203**(3~6): 359~362
- 34 M. V. Okhapkin, M. N. Skvortsov, N. L. Kvashnin *et al.*. Single-frequency intracavity doubled Yb:YAG ring laser[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **256**(4~6): 347~351
- 35 J. Harrison, A. Finch, J. H. Flint *et al.*. Broad-band rapid tuning of a single-frequency diode-pumped neodymium laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4): 1123~1130
- 36 Zhang Jing, Ma Hongliang, Wang Runlin *et al.*. All-solid-state single-frequency ring Nd:YVO₄ tunable lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(7): 577~579
张靖,马红亮,王润林等.全固化环形单频Nd:YVO₄可调谐激光器[J].中国激光,2002,**A29**(7):577~579
- 37 Y. H. Zheng, H. D. Lu, Y. M. Li *et al.*. Broadband and rapid tuning of an all-solid-state single-frequency Nd:YVO₄ laser[J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **90**(3~4): 485~488
- 38 Wang Junmin, Liang Xiaoyan, Li Li Ruining *et al.*. CW frequency-stabilized ring Ti:sapphire laser with four mirrors[J]. *Chinese J. Lasers*, 1994, **A21**(10): 773~777
王军民,梁晓燕,李瑞宁等.四镜环形腔连续稳频钛宝石激光器[J].中国激光,1994,**A21**(10):773~777
- 39 J. Harrison, A. Finch, D. M. Rines *et al.*. Low-threshold, cw, all-solid-state Ti:Al₂O₃ laser[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(8): 581~583
- 40 W. Q. Xi, J. Y. Zhao, K. S. Zhang. A high-power continuous-wave laser-diode end-pumped Nd:YVO₄ laser of single-frequency operation[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**(5): 1144~1147
- 41 X. Y. Li, Q. Pan, J. T. Jing *et al.*. LD pumped intracavity frequency-doubled and frequency-stabilized Nd:YAP/KTP laser with 1.1 W output at 540 nm[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **201**(1~3): 165~171
- 42 Yan Ying, Luo Yu, Pan Qing *et al.*. Watt level CW frequency-stabilized Nd:YAP/KTP laser with dual wavelength outputs[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5): 513~517
延英,罗玉,潘庆等.瓦级连续双波长输出Nd:YAP/KTP稳频激光器[J].中国激光,2004,**31**(5):513~517
- 43 Chang Dongxia, Liu Xia, Wang Yu *et al.*. All-solid-state CW intracavity frequency-doubled and frequency-stabilized Nd:YVO₄/LBO red laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 323~327
常冬霞,刘侠,王宇等.连续波Nd:YVO₄/LBO稳频倍频红光全固态激光器[J].中国激光,2008,**35**(3):323~327
- 44 J. Zhang, C. D. Xie, K. C. Peng. Electronic feedback control of the intensity noise of a single-frequency intracavity-doubled laser[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(8): 1910~1916
- 45 Zhang Jing, Zhang Kuashou, Chen Yanli *et al.*. Intensity noise properties of LD pumped single-frequency ring lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1311~1316
张靖,张宽收,陈艳丽等.激光二极管抽运的环形单频激光器的强度噪声特性研究[J].光学学报,2000,**20**(10):1311~1316
- 46 J. Zhang, H. Chang, X. J. Jia *et al.*. Suppression of the intensity noise of a laser-diode-pumped single-frequency ring Nd:YVO₄-KTP green laser by optoelectronic feedback[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(10): 695~697
- 47 Chen Yanli, Zhang Jing, Li Yongmin *et al.*. Reduction of intensity noise of single-frequency Nd:YVO₄ laser using mode cleaner[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(3): 197~200
陈艳丽,张靖,李永民等.利用模清洁剂降低单频Nd:YVO₄激光器的强度噪声[J].中国激光,2001,**A28**(3):197~200
- 48 Zhao Fagang, Pan Qing, Peng Kunchi. Improving frequency stability of laser by means of temperature-controlled fabry-perot cavity[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(6): 334~336
- 49 Yan Shubin, Wang Yanhua, Liu Tao *et al.*. Modulation-free laser frequency locking by AOM shifted cesium sub-Doppler spectra[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1335~1338
闫树斌,王彦华,刘涛等.声光偏频亚多普勒光谱无调制激光频率锁定[J].光学学报,2004,**24**(10):1335~1338
- 50 C. Salomon, D. Hils, J. L. Hall. Laser stabilization at the millihertz level[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1988, **5**(8): 1576~1587
- 51 B. C. Young, F. C. Cruz, J. C. Bergquist *et al.*. Visible lasers with subhertz linewidths[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**(19): 3799~3782
- 52 J. Alnis, A. Matveev, N. Kolachevsky *et al.*. Subhertz linewidth diode lasers by stabilization to vibrationally and thermally compensated ultralow-expansion glass Fabry-Perot cavities[J]. *Phys. Rev. A*, 2008, **77**(5): 053809
- 53 Y. Y. Jiang, Z. Y. Bi, L. S. Ma *et al.*. Two-Hertz-linewidth Nd:YAG lasers at 1064 nm stabilized to vertically mounted ultra-stable cavities[J]. *Chin. Phys. B*, 2008, **17**(6): 2152~2155