

文章编号: 1007-6654(2010)03-0230-10

全固态高功率单频激光器

王雅君, 郑耀辉[†], 李凤琴, 彭堃堃

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

摘要: 我们的研究工作从减少增益介质无用热、有效的散热方法、减轻非线性晶体热效应和有效的选模技术四个方面概述了高功率单频激光器研究中需解决的技术问题, 并比较了各种技术的优缺点。

关键词: 激光技术; 高功率; 单频; 全固态

中图分类号: O431 文献标识码: A

0 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。目前, 关于中小功率全固态单频激光器的研究相对成熟。近几年量子信息、量子网络和有关研究领域对作为抽运源的单频绿光激光器的功率和光束质量提出愈来愈高的要求, 因而全固态高功率单频激光器在相当长一段时间已成为激光技术领域的研究热点。

但是, 激光器的输出功率并不是简单地随着抽运功率的增大而增大, 由于激光晶体和倍频晶体的热效应, 以及不同纵模之间增益竞争的影响, 高功率激光器的运转特性相对复杂。热效应导致的热透镜焦距取决于激光器的工作条件, 并随着抽运功率的变化而变化^[1,2], 激光谐振腔的状态随热焦距的变化而变化, 且可能使谐振腔工作在稳区范围之外; 不均匀抽运导致非球面像差的产生, 在很多端面抽运激光器中, 激光材料中

心的抽运辐射比边缘的强, 在激光材料中, 指定区域的焦距与所吸收的抽运辐射强度成反比, 因此, 热致透镜效应的分布含有大于二次方的项, 它将使激光的光束质量下降^[3]、热致衍射损耗增大; 激光材料内部受热而产生的机械应力可能使晶体损伤^[4,5], 因此, 高功率激光器的一个重要问题是减轻激光材料的热效应; 由于高功率内腔倍频激光器中, 腔内功率密度很高, 倍频晶体对基频光的吸收导致的热效应也影响激光器的稳定工作范围、光束质量等参数^[6]; 而且高功率抽运带来高增益, 不同纵模之间的增益竞争加剧, 维持稳定的单纵模工作也较中小功率困难, 采取有效的选模措施亦是研制高功率单频激光器的重要方面。因此, 减轻激光晶体和倍频晶体的热效应、采取有效的选模措施是高功率单频激光器研制的

关键问题。
本文从高功率单频激光器研究现状出发, 并结合我们的研究工作, 在减少增益介质无用热、有效的散热方法、减轻非线性晶体热效应和有效的选模技术四个方面作一介绍。

①收稿日期: 2010-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(60736040); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(60821004)

作者简介: 王雅君(1983), 男, 博士研究生, 主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: 200822609004@mail.sxu.cn

[†]通信联系人: E-mail: yzhzheng@sxu.edu.cn

1 研究进展

1.1 减少增益介质无用热的产生

激光器的热效应主要由下述原因而产生^[7]:

a) 激光材料的量子缺陷; b) 激光跃迁的荧光过程的量子效率小于1; c) 抽运源光谱分布较宽, 而激光材料的吸收带宽较窄时引入的额外热。而要带走这些无用的热又需要对激光材料侧面进行冷却, 这两者使激光材料内部产生不均匀的温度分布。温度和应力的改变又使激光器的折射率发生变化, 而导致激光束的畸变。从而使激光光束质量下降、输出功率受限。减轻热效应对激光器的影响可以从以下两个方面着手: a) 减少无用热的产生; b) 采取最有效的散热方法^[8]。

1.1.1 半导体激光器抽运

弧光灯或闪光灯的光谱分布宽, 使得基质材料对光能有大的吸收而产生热, 吸收主要发生在紫外带和红外带。半导体抽运的使用极大地减少了激光材料吸收的热量。因为抽运光的波长更接近于发射激光的波长, 所以量子亏损发热减少了。激活离子吸收大范围之外的抽运辐射造成的基质材料的发热也完全消除了。因而极大地减少了无用热的产生。

1.1.2 端面抽运方式

半导体激光器抽运固体激光器的抽运方式可分为端面抽运和侧面抽运。侧面抽运的模式覆盖度差, 激光阈值高, 效率低。而端面抽运中, 抽运光沿着谐振腔的轴向抽运, 聚焦在激光材料内, 谐振腔的参数设计可保证抽运光束和谐振腔模很好地交叠在一起, 即容易获得最佳模式匹配。因而采用端面抽运方式容易获得较高的量子效率, 从而减少了无用热的产生。但是, 端面抽运的缺点是激光晶体轴向上的温度分布不均匀, 为此, 研究工作者设计了双端抽运、剩余抽运光二次抽运、键合晶体、降低晶体掺杂浓度、渐变掺杂等方法来均匀化激光晶体轴向上的温度分布。

1.1.3 直接抽运

直接抽运, 顾名思义就是将激光材料基态的离子直接抽运到激光上能级上, 消除了泵浦带与上激光能级之间的无辐射跃迁造成的量子亏损发热。在常规的激光器中, 为了实现对抽运光的有效吸收, 一般采用吸收系数较大波段的半导体激

光器作为抽运源。例如, 在输出波长为 1064 nm 的 Nd: YVO₄ 激光器中, 采用波长为 808 nm 的半导体激光器作为抽运源, 由于抽运光子的能量与激光光子的能量相差较大, 即使激光器的量子效率等于 1, 由能级缺陷导致的无用热约占吸收抽运功率的 24%。随着高功率半导体激光器的商业应用, 研究工作的重点已经发生转移, 减轻热效应以取代吸收效率成为激光器设计的关键问题。而采用波长为 914 nm 的半导体激光器直接抽运, 将离子从基态直接抽运到激光的上能级 4F_{3/2} 上^[9], 消除了泵浦带与上激光能级之间的无辐射跃迁造成的量子亏损发热。具体的能级结构如图 1 所示, 与波长为 808 nm 的抽运源相比, 由能级缺陷导致的无用热仅占吸收抽运功率的 14%, 极大地减少了抽运过程中无用热的产生。同理, 波长为 888 nm^[6,10] 和 880 nm^[11-13] 的半导体激光器也是 Nd: YVO₄ 激光器常用的抽运源。与波长 808 nm 的半导体激光器相比, 885 nm 激光器也有效减轻了 Nd: YAG 激光器的量子亏损发热, 是新型的 Nd: YAG 激光器抽运源^[14]。随着晶体生长技术和半导体激光制造技术的进步, 直接抽运吸收系数小的缺点可通过延长晶体的长度、提高晶体的掺杂浓度、提高半导体激光器亮度等方法来弥补。

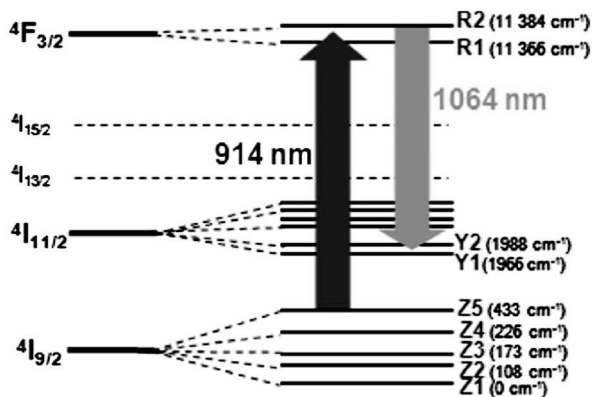


图 1 Nd: YVO₄ 晶体吸收波长为 914 nm 泵浦光发射 1064 nm 激光能级图

Fig. 1 Energy level of Nd: YVO₄, absorption at 914 nm, emission at 1064 nm

1.1.4 准三能级系统

与直接抽运方式相类似, 也可以采用准三能级系统的方式来消除因下激光能级与基态之间的

能差而产生的无用热。四能级系统中,激光的下能级在激光上能级和基态之间,原子经受激发射从激光上能级跃迁到下能级之后,快速无辐射跃迁到基态,无辐射跃迁过程产生无用热。而准三能级系统中,激光跃迁发生在激光上能级和基态之间,消除了激光下能级与基态之间无辐射跃迁产生的无用热。因而,极大地减少了抽运过程中产生的无用热。例如,典型的准三能级系统是如图2所示的 Yb: YAG 晶体,它的吸收带在 940 nm,而激光跃迁在 1030 nm 和 1050 nm 附近。从图中还可以看出,激光的上能级与泵浦带均在 $^2F_{5/2}$ 能级上,发射光的下能级在基态能级 $^2F_{7/2}$ 上,量子缺陷小,产生的无用热小于 10%^[15,16]; Nd: YVO₄ 晶体的最强吸收带在 809 nm,如果选用它的准三能级跃迁 914 nm,产生的无用热约 11.5%^[17,18];而 Nd: YAG 激光器工作在 946 nm 时(能级结构如图3所示),激光的下能级在基态能级 $4I_{9/2}$ 上,消除了激光下能级与基态之间无辐射跃迁产生的无用热,对应的量子亏损发热仅为 14.5%^[19,20]。但是,采用准三能级系统激光的下能级在基态上,不易实现粒子数反转,室温下的再吸收损耗不容忽视,激光器的阈值较高。上述缺点可通过冷却激光晶体、提高抽运功率密度等手段来弥补。

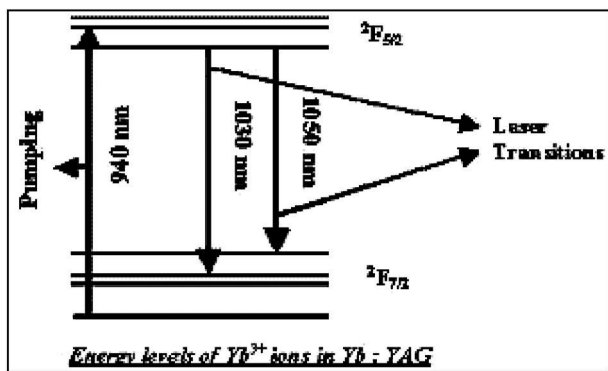


图2 掺 Yb³⁺ 离子的 Yb: YAG 晶体能级图
Fig. 2 Energy levels of Yb³⁺ in Yb: YAG

1.1.5 光泵半导体材料

常规的激光器一般采用晶体作为增益介质,它的缺点是激发波长相对确定,而且晶体材料的散热能力差。因此,使用晶体不易获得高功率、各种波长的激光输出。1965年,美国麻省理工学院的林肯实验室首次提出了光泵半导体激光器

(OPSL)的设计思想^[21],典型的激光器设计如图4所示,抽运光从半导体薄片的一端抽运,半导体薄片的另一端放置热沉,用于冷却。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,避免了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激光器的光学性能,为高功率单频激光器提供了一种增益介质选择。半导体芯片的结构如图5所示,由 InGaAs 量子阱层与 GaAs 交替排列构成。GaAs 层吸收泵浦辐射, InGaAs 量子阱的发射波长由量子阱尺度以及铟和镓的相对配比决定,激光器的波长比较灵活,可以根据需要设计出各种波长的激光器。许多研究小组已经开展了这方面的研究工作^[22-23]。2003年德国 GmbH 公司发明了光泵半导体材料的生产方法^[24],将光泵半导体材料进一步推向商品化。美国相干公司已经用光泵半导体技术开发出发射波长在 355-577 nm 的系列商用激光器产品^[25]。目前,光泵半导体激光器的最高输出功率已达 70 W。

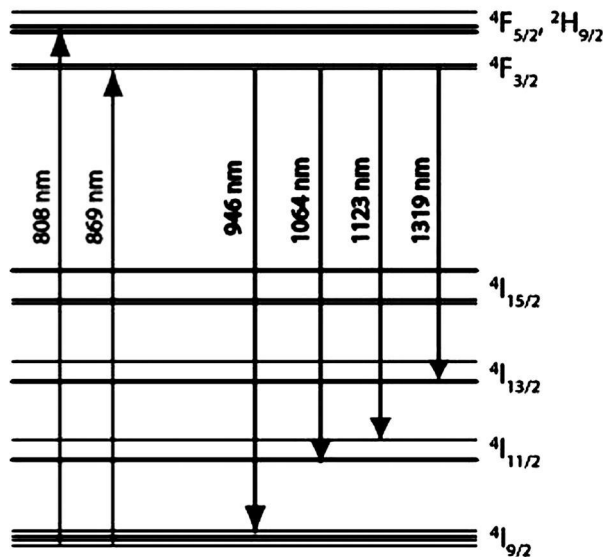


图3 掺 Nd³⁺ 离子的 Nd: YAG 晶体能级图
Fig. 3 Energy levels of Nd³⁺ in Nd: YAG

1.2 有效的散热方法

1.2.1 键合晶体

在端面抽运激光器中,沿激光晶体轴向的温度分布不均匀,靠近抽运端面的部分,吸收的抽运光最多,晶体内的温度越高;而在晶体的非抽运端面,吸收的抽运光最少,晶体内的温度最低,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。

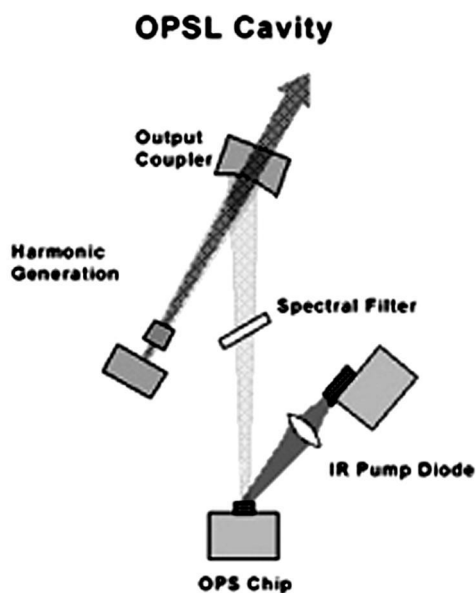


图 4 光泵半导体激光器

Fig. 4 Optically pumped semiconductor laser

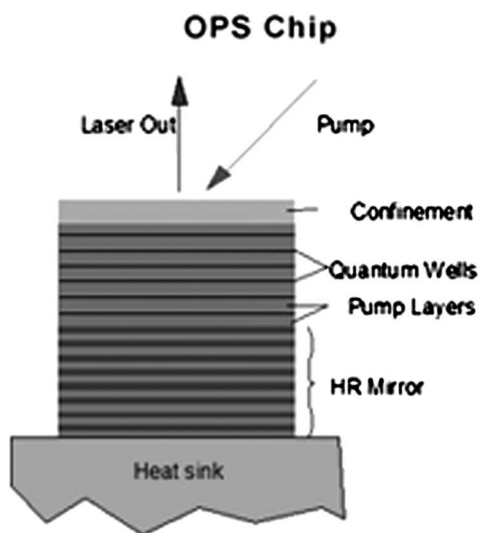


图 5 光泵半导体材料

Fig. 5 Optically pumped semiconductor material

根据 P. J. Hardman 等人的分析,在端面抽运激光中,热透镜效应主要包括两部分^[26]: 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,这种情况下,抽运吸收

最强的地方在键合晶体内部。键合晶体散热技术的采用,消除了热透镜效应中的端面效应,降低了激光晶体内部局部的温度,减轻了温度梯度引起的热致球差,提高了输出光的光束质量。同时,这种设计减小了因晶体局部温度过高而引起晶体损坏的可能,为更高功率的激光抽运创造了条件。

1. 2. 2 降低晶体掺杂浓度

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^[27]), 从而减小晶体对抽运光的吸收系数的办法来减轻热效应^[28]。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的吸收抽运功率。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,晶体长度过长会引入较多的吸收损耗,不利于提高转换效率。为此,一些研究小组提出剩余抽运光二次抽运的方法来提高激光晶体对抽运光的吸收效率^[6]。图 6 是一个典型的实验装置图,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,而且使吸收沿轴线分布更加均匀。图 6 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。

但是,剩余抽运光二次抽运的方法也提高了激光系统的复杂性,为此,一些研究组提出了渐变掺杂的设计思想^[29,30]。在单一掺杂浓度的晶体作为增益介质的端面抽运激光器中,抽运光沿增益介质的轴向传播,在晶体的抽运端面,抽运光功率最高;随着抽运光在增益介质中传播、吸收,抽运光的功率越来越小。因此在端面抽运激光器中,抽运端面的热效应最严重,离抽运端面越远,热效应越轻,非抽运端面的热效应最轻。增益介质对抽运光的吸收系数与掺杂浓度有关,

掺杂浓度越高, 吸收系数越大; 掺杂浓度越低, 吸收系数越小。如果降低增益介质的掺杂浓度, 会改善晶体端面的热效应, 但又导致增益介质对抽运光的吸收系数变小, 影响增益介质对抽运光的吸收效率。由于渐变式掺杂的晶体各部分的掺杂浓度不同, 对抽运光的吸收系数也不相等, 我们设计了一个沿晶体轴向掺杂浓度单调增加或减小的渐变晶体作为增益介质, 使增益介质的抽运端面上, 晶体的掺杂浓度最低; 随着在增益介质中的位置远离抽运端面, 晶体的掺杂浓度越来越高; 在增益介质的非抽运端面, 晶体的掺杂浓度最高。这种设计既减轻了增益介质抽运端面的热效应又提高了增益介质其它部分对抽运光的吸收, 有效克服了热效应严重和吸收效率低这一对矛盾。渐变式掺杂的晶体缺点是不容易生长, 且价格昂贵。

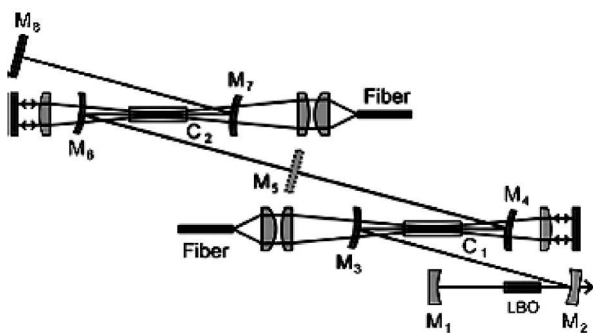


图 6 采用低掺杂晶体的激光谐振腔装置
Fig. 6 The oscillator setup of laser by using low-doped crystal

1. 2. 3 薄片激光器

常规的激光器都是采用中心发热, 表面冷却的块状晶体, 这两者使激光材料内部产生不均匀的温度分布。块状晶体的缺陷驱使研究工作者设计了更有效的散热方法——薄片激光器。薄片激光器最早由德国斯图加特大学研制成功, 后由德国 ELS 公司利用此技术开发出商用化的单频激光器产品。薄片式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。典型的薄片激光器装置如图 7 所示, 抽运光束经抛物面镜反射, 16 次通过晶体, 可使抽运光被有效吸收, 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, 薄片激光器的最大输出功率已达 500 W, 光束质量因子小于 1.55^[31]。由于薄片激光器优良的性能, 又进一步推动了薄片激光器更深入的研究^[32]。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^[33]。

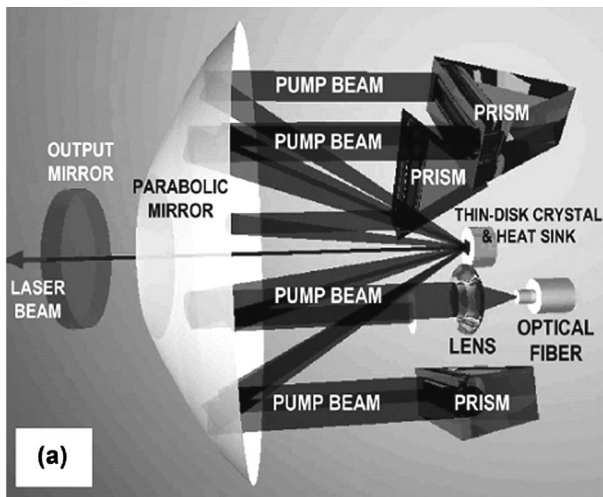


图 7 薄片式激光器实验装置
Fig. 7 Experimental setup of a thin disk laser

1. 2. 4 扩大抽运光光斑

除了上述结构上的改进, 扩大抽运光光斑能减少增益介质中单位体积中吸收的热^[34], 它也是一种减轻增益介质的热效应方法^[35]。Innocenzi 等人对比了不同抽运光尺寸下, 激光晶体内部的温度分布(图 8), 分析结果表明, 大的抽运光斑减小了增益介质内部的温度梯度。毫无疑问, 为了实现最佳模式匹配, 可以通过合理的谐振腔设计扩大增益介质中的基模光斑, 最终增大增益介质中基模场的模体积。但是扩大抽运光斑会带来激光器阈值提高、斜效率降低等缺点, 在实际激光器设计中应综合考虑, 找到热效应和激光器效率的最佳平衡点。

1. 3 减轻非线性晶体的热效应

在高功率内腔倍频激光器中, 内腔功率密度较高, 对基波的吸收造成非线性晶体内部局部温度升高。热梯度对非线性晶体的影响有以下几个方面: a) 最佳相位匹配温度; b) 热致球面像差; c) 热致衍射损耗。为了减轻非线性晶体热效应

对高功率内腔倍频激光器的影响, McDonagh 等人通过降低谐振腔镜对基波反射率的方法, 有效减小了基波的腔内功率密度, 获得最高 62 W 基横模内腔倍频激光输出, 光束质量因子仅 1.05^[6]。当然, 选用对基波吸收较小非线性晶体作为内腔倍频晶体也能减轻非线性晶体热效应对激光器的影响。例如, 在 1064 nm 倍频 532 nm 时, KTP 晶体的对基频光的吸收为 $0.01/\text{cm}^{-1}$, 而 LBO 晶体对基频光的吸收为 $0.005/\text{cm}^{-1}$ ^[25]。因此, 高功率 532 nm 激光器中, 选用 LBO 晶体能有效减轻非线性晶体热效应对激光器的影响。另外, 热梯度使非线性晶体不能在处处实现良好相位匹配, 从而影响非线性转换效率, 通过选用温度接受范围较宽的非线性晶体能对非线性转换效率有一定弥补作用。在实际激光器设计中应综合考虑非线性系数、损伤阈值、吸收、走离、容限参量等参数对激光器的影响, 抓住主要矛盾, 是解决问题的最佳途径。

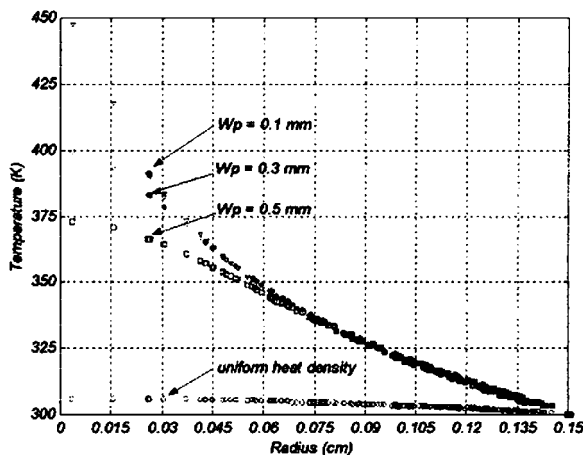


图 8 激光晶体内部温度分布与抽运光束尺寸的关系

Fig. 8 Temperature distribution as a function of radius with pump beam size

1.4 选模技术

单频激光器是通过采用特殊技术手段使激光器实现连续单频运转, 因此, 与其它激光器相比, 单频激光器需采取可靠的选模技术, 以便实现稳定的单频运转。目前在相对成熟的中小功率全固单频激光器的研究中, 一般采用扭转模谐振腔^[36]、短谐振腔^[37]、谐振腔中插入标准具^[38]或双折射滤光片^[39]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^[40-41], 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。

在这里, 我们概括一下环形腔选模的局限, 以及应对的办法:

1.4.1 像散影响^[42]

由于环形谐振腔通常包括离轴放置的球面反射镜, 它在子午面和弧矢面内的焦距不同。由于像散, 会产生如下影响: a) 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; b) 在倍频晶体内部, 子午面和弧矢面内束腰不相等, 位置也不重合, 在非临界位相匹配的情况下, 像散椭圆光束将不利于倍频效率的提高; c) 在子午面和弧矢面内稳定区的交叉部分才是系统的稳定区, 因而像散使环形腔稳定工作区缩小。

克服像散影响的一种方法是在腔内插入像散补偿板, 补偿板一般以布氏角放置在谐振腔内, 基本原理是补偿板对子午面和弧矢面的有效长度不相等。需要补偿激光谐振腔某一臂上的像散时, 只需将合适的像散补偿板插入该臂就可以了。美国相干公司 Verdi 系列产品都是采用这种方法进行像散补偿的, 它既补偿了倍频晶体处光束模参数的不同, 提高了倍频转换效率, 又扩大了激光器的稳定工作范围, 最大单频绿光功率为 18 W^[25]。某些特定情形下(利用临界位相匹配晶体进行非线性相互作用), 利用像散椭圆光束不仅有利于倍频效率的提高, 同时也能减小晶体发生损伤的危险。关于像散椭圆高斯光束的倍频理论, Steinbach 和 Freearde 分别进行了系统研究^[43-44]。我们研究组在上述理论的基础上, 考虑到通过选取合适的基频光偏振方向, 使椭圆高斯光束横截面椭圆的长轴位于 KTP 晶体的走离平面内, 设计了高效率单频 Nd:YVO₄/KTP 绿光激光器, 相应的光-光转化效率为 25.5%^[41]。

1.4.2 非线性光谱接受带宽对环形腔选模的影响

在高功率环形内腔倍频激光器中, 腔内功率密度及倍频转化效率较高, 非线性转化过程对基频光有较大损耗。当非线性晶体的光谱接受带宽较小时, 和频引起的非线性损耗不足以抑制腔内

的非激活模振荡^[45,46] (self suppression), 容易引发激光器多纵模振荡或者模式跳变。因此, 在非线性晶体的光谱接受带宽较小的高功率激光器中, 仅仅用环形谐振腔选模, 并不能获得稳定的单频激光输出, 需要其它的辅助选模手段与环形腔复合选模。

关于非线性光谱接受带宽对单频激光器的影响, Greenstein 等人根据激光器的模式竞争理论建立了单频激光器稳定运转的理论模型, 分析了激光器的线性损耗、非线性损耗、小信号增益(抽运功率)以及非线性光谱接受带宽与增益带宽的比值(γ)等因素对激光器单频工作状态的影响^[47]。我们研究组应用上述理论模型, 从具体的单频激光器出发, 分析了特定激光器中比值 γ 与抽运功率应满足的关系。激光器稳定单频工作时, 最小比值 γ 与抽运功率应满足如图9所示的曲线。在曲线以上的区域, 激光器工作在稳定的单纵模状态; 在曲线以下的区域, 激光器不能工作在稳定的单纵模状态; 且最小允许比值 γ 应随抽运功率的增大而增大。为了提高 γ 值, 我们选取在腔内插入标准具的办法来压窄增益带宽。利用标准具和环形腔复合选模, 在抽运功率为 23.5 W 时, 获得了 4 W 稳定的单频绿光输出^[39]。在具体激光器设计中, 可以选择增益带宽较窄的激光晶体或光谱接受带宽较宽的倍频晶体, 也能获得同样的结果。

1.4.3 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。在高效内腔倍频情况下, 对基频光来说, 非线性转化过程是主要的损耗, 而且非线性转化对基频光的损耗有偏振选择性, 对满足位相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位相匹配方向, 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, 受激发射光的偏振方向可能发生改变。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的稳定性。

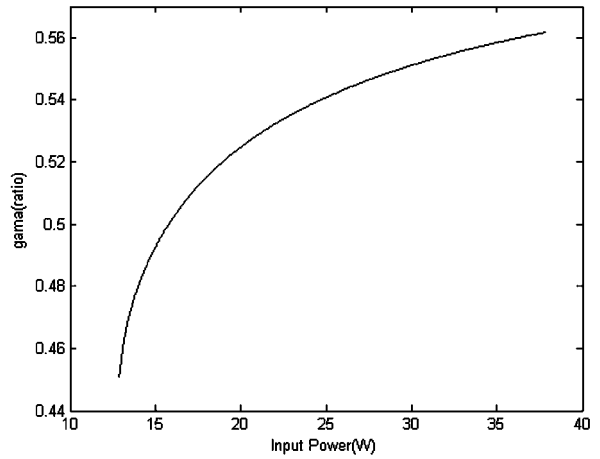


图9 非线性光谱带宽与增益介质带宽之间比例与抽运功率的关系

Fig. 9 Phase diagram of the ratio between the nonlinear spectral bandwidth and the gain bandwidth versus input power

关于偏振选择, 可以在腔内插入布氏片、自然双折射晶体等方法来实现。但是在高功率激光器中, 上述方法并不能有效克服非线性损耗对偏振的影响。随后, 一些研究工作者采用离轴切割的 Nd: YVO₄ 晶体选偏(利用 Nd: YVO₄ 晶体的双折射特性, 选取某一偏振方向的光准直, 另一偏振方向的光因几何偏折损耗而不能起振)^[48]。但是离轴切割的晶体不能利用其最大受激发射截面。我们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, 既有效克服了非线性损耗对激光器偏振态的影响, 又利用了增益介质的最大受激发射截面^[49]。为

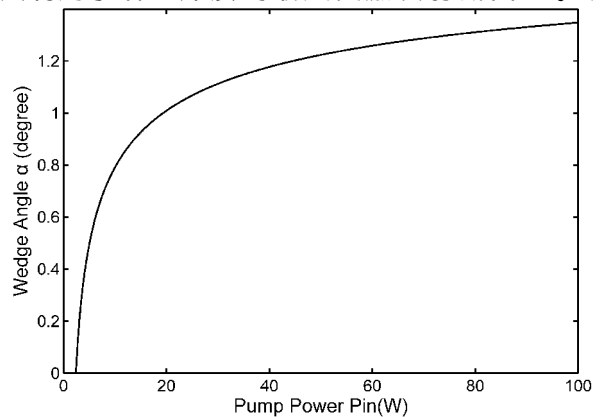


图10 楔角 α 与抽运功率的关系

Fig. 10 Phase diagram of the wedge angle α and the gain bandwidth versus input power

为了更好地理解楔形 Nd:YVO₄ 晶体的设计原理,我们从模式竞争的理论出发,分析了最佳倍频转化条件下最小允许的楔角与抽运功率的关系。如图 10 所示,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。我们组采用楔形晶体辅助选择偏振,设计了如图 11 所示的激光器。当抽运功率为 27 W 时,激光器的输出功率为 6.5 W^[50],且 3 小时功率稳定性优于 $\pm 0.3\%$,达同类激光器最好水平。

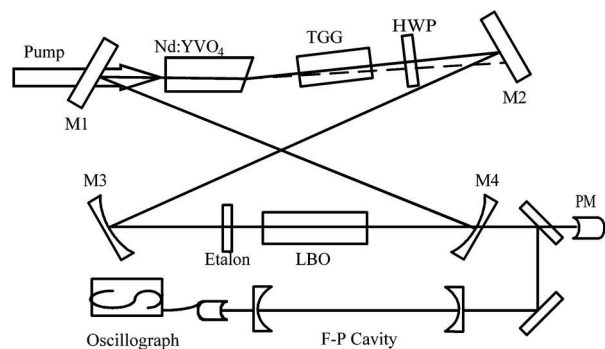


图 11 采用楔形 Nd:YVO₄ 晶体的单频绿光激光器实验装置

Fig. 11 Experimental schematic of single frequency green laser using a wedge Nd:YVO₄ crystal

在全固态高功率单频激光器研制方面,走在最前面的是美国相干公司,他们已获得单频输出功率为 18 W 的绿光激光器商用化产品。德国 ELS 公司利用专利的薄片激光器技术也获得 10 W 级单频激光器产品。国内关于单频激光器的研究较少。目前,山西大学光电研究所综合运用半导体激光器端面抽运、直接抽运、键合低掺杂晶体、扩大抽运光尺寸、标准具和光学单向器复合选模、楔形晶体限偏等多种技术手段,获得最大输出功率达 10 W 的 532 nm 单频激光器样机。

2 总结

全固态单频激光器是一种重要的光源,它广泛应用在科学研究、仪器科学、精密测量、光学全息等领域。随着各领域对单频激光器需求的深入,对激光器的输出功率也提出愈来愈高的要求。本文从减少增益介质无用热、有效的散热方法、减轻非线性晶体热效应和有效的选模技术四个方面概括了高功率单频激光器研究现状。

随着各个应用领域的需求牵引和支撑领域的技术进步,关于高功率单频激光器研究必然还有新的突破。

参考文献:

- [1] FRAUCHIGER J, ALBERS P, WEBER P. Modeling of Thermal Lensing and Higher Order Ring Mode Oscillation in End pumped CW Nd:YAG Lasers [J]. *IEEE Quantum Electron*, 1992, **28**: 1046-1056.
- [2] COUSINS A K. Temperature and Thermal Stress Scaling in Finite length End pumped Laser Rods [J]. *IEEE Quantum Electron*, 1992, **28**: 1057-1069.
- [3] SIEGMAN A E. Analysis of Laser Beam Quality Degradation Caused by Quartic Phase Aberrations [J]. *Appl Opt*, 1993, **32**: 5894-5902.
- [4] PENG X Y, XU L, ASUNDI A. Power Scaling of Diode pumped Nd:YVO₄ Lasers [J]. *IEEE Quantum Electron*, 2002, **38**: 1291-1300.
- [5] CHEN Y F. Design Criteria for Concentration Optimization in Scaling Diode End pumped Lasers to High powers: Influence of Thermal Fracture [J]. *IEEE Quantum Electron*, 1999, **35**: 234-239.
- [6] MCDONAGH L, WALLENSTEIN R. Low-noise 62W CW intracavity-doubled TEM₀₀ Nd:YVO₄ green laser pumped at 888 nm [J]. *Opt Lett*, 2007, **32**: 802-804.
- [7] KOECHNER W. Solid state Laser Engineering [M]. Beijing: Science Press. 2002.
- [8] ZHOU S H, ZHAO H, TANG X J. High Average Power Laser Diode Pumped Solid state Laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, **36**: 1605-1618.
- [9] SANGLA D, CASTAING M, BALEMBOIS F, et al. Highly Efficient Nd:YVO₄ Laser by Direct in-band Diode Pumping at 914 nm [J]. *Opt Lett*, 2009, **34**: 2159-2161.
- [10] MCDONAGH L, WALLENSTEIN R. High efficiency 60W TEM₀₀ Nd:YVO₄ Oscillator Pumped at 888 nm [J].

Opt Lett, 2006, **31**: 3297-3299.

- [11] SATO Y, TAIRA T. Laser Operation with Near Quantum defect Slope Efficiency in Nd: YVO₄ Under Direct Pumping Into the Emitting Level [J]. *Appl Phys Lett*, 2003, **82**: 844-846.
- [12] LUPEI V, PAVEL N, TAIRA T. Efficient Laser Emission in Concentrated Nd Laser Materials Under Pumping Into the Emitting Level [J]. *Quan Electron Lett*, 2002, **38**: 240-245.
- [13] LI X, YU X, PENG J, *et al.* Laser Operation of LD End pumped Growth together Nd: YVO₄/ YVO₄ Composite Crystal [J]. *Laser Phys Lett*, 2008, **5**: 429-432.
- [14] PAVEL N, LUPEI V. High power Continuous wave Nd Lasers Under Diode Pumping Directly Into the 4F_{3/2} Emitting Level [J]. *Proc of SPIE*, **7007**: 700705.
- [15] OSTERMEYER M, STRASSESSER A. Theoretical Investigation of Feasibility of Yb: YAG as Laser Material for Nanosecond Pulse Emission with Large Energies in the Joule Range [J]. *Opt Commun*, 2007, **274**: 422-428.
- [16] XU X D, ZHAO Z W, XU J, *et al.* Crystal Growth and Spectral Properties of Yb₃Al₅O₁₂ [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2003, **257**: 272-275.
- [17] CHEN F, XU X, GAO J, *et al.* 8.9W Continuous wave, Diode end pumped All solid state Nd: YVO₄ laser Operating at 914 nm [J]. *Laser Phys*, 2009, **19**: 389-391.
- [18] SATO A, NITSUMA T, TERASAKI T, *et al.* Development of a High energy, Quasi three level Nd: YVO₄ Laser at 914 nm for Deep blue Light Generation [J]. *Proc SPIE*, 2008, **7153**: 715316.
- [19] ZHOU R, LI E B, LI H F. Continuous wave, 15.2W Diode end pumped Nd: YAG Laser Operating at 946 nm [J]. *Opt Lett*, 2006, **31**: 1869-1871.
- [20] CHEN Y, PENG H, HOU W, *et al.* 3.8W of Cw Blue Light Generated by Intracavity Frequency Doubling of a 946 nm Nd: YAG laser with LBO [J]. *Appl Phys B*, 2006, **83**: 241-243.
- [21] PHELAN R J, CONCORD J, REDIKER R H, *et al.* Optically Pumped Semiconductor Laser [P] US Patent. Patent no. 3568087.
- [22] MCCANN P J, KAMAT P, LI Y, *et al.* Optical Pumping of IV- VI Semiconductor Multiple Quantum Well Materials Using a GaSB based Laser with Emission at $\lambda = 2.5 \mu\text{m}$ [J]. *J Appl Phys*, 2005, **97**: 053103.
- [23] KOZLOV V G, PARTHASARATHY G, BURROWS P E, *et al.* Optically Pumped Blue Organic Semiconductor Lasers [J]. *Appl Phys Lett*, 1998, **72**: 144-146.
- [24] KARNUTSCH C, LINDER N, LUFT J, *et al.* Semiconductor Optical Pumping Device for Radiation Emission and the Production Method Thereof [P]. US Patent. Patent no. 7529284 B2.
- [25] <http://www.coherent.com.cn/>.
- [26] HARDMAN P J, CLARKSON W A, HANNA D C. High power Diode bar pumped Intracavity frequency doubled Nd: YLF Laser [J]. *Opt Commun*, 1998, **156**: 49-52.
- [27] PENG X Y, XU L, ASUNDI A. Power Scaling of Diode pumped Nd: : YVO₄ Lasers [J]. *IEEE Quantum Electron*, 2002, **38**: 1291-1299.
- [28] CHENG E, DUDLEY D R, NIGHAN W L, *et al.* Laser with Low Doped Gain Medium [P]. US. Patent, Patent No. US6185235. 2001.
- [29] WILHELM R, FREDE M, KRACHT D. Power Scaling of End Pumped Solid State Rod Lasers by Longitudinal Dopant Concentration Gradients [J]. *IEEE Quantum Electron*, 2008, **44**: 232-244.
- [30] 郑耀辉, 王雅君, 彭堃堃, 等. 端面泵浦的高功率激光器 [P]. 中国发明专利, 申请号: ZL200910083540.3.
- [31] MENDE J, SCHMID E, SPEISER J. Thin Disk Laser: Power Scaling to the kW Regime in Fundamental Mode Operation [C]//Proc SPIE, 27 February 2009.
- [32] BAUM A, GREBNER D, PAA W, *et al.* Axial Mode Tuning of a Single Frequency Yb: YAG Thin Disk Laser [J]. *Appl Phys B*, 2005, **81**: 1091-1096.
- [33] KOUZNETSOV D, BISSON J F, DONG J, *et al.* Surface Loss Limit of the Power Scaling of a Thin disk Laser [J]. *J Opt Soc Am B*, 2006, **23**: 1074-1082.

- [34] INNOCENZI M E, YURA H T, FINCHER C L, *et al.* Thermal Modelling of Continuous wave End pumped Solid state Lasers [J]. *Appl Phys Lett*, 1990, **56**: 1831-1833.
- [35] XIE W J, TAM S C, LAM Y L, *et al.* Influence of Pump Beam Size on Laser Diode End pumped Solid State Lasers [J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, **31**: 555-558.
- [36] EVTUHOV V, SIEGMAN A E. A Twisted Mode Technique for Obtaining Axially Uniform Energy Density in a Laser Cavity [J]. *Appl Opt*, 1965, **4**: 142-143.
- [37] ZAYHOWSKI J J, MOORADIAN A. Single frequency Microchip Nd lasers [J]. *Opt Lett*, 1989, **14**: 24-26.
- [38] BAER T. 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.
- [39] WANG J Y, ZHENG Q, XUE Q U, *et al.* 1.12W Single frequency Green Laser Adopting Birefringent Filter Technique [J]. *Acta Phot Sini*, 2005, **34**: 321-324.
- [40] ZHENG Y H, LU H D, LI F Q, *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**: 5336-5339.
- [41] ZHENG Y H, LU H D, LI F Q, *et al.* All solid state High efficiency High power Nd: YVO₄/KTP Laser of Single frequency Operation [J]. *Chinese J Lasers*, 2007, **34**: 739-743.
- [42] LU B D. Laser optics [M]. the third edition. Higher Education Press. 2003.
- [43] STEINBACH A, RAUNER M, CRUZ F C, *et al.* CW Second Harmonic Generation with Elliptical Gaussian Beams [J]. *Opt Commun*, 1996, **123**: 207-214.
- [44] FREEGARDE T, COUTTS J. General Analysis of type I Second harmonic Generation with Elliptical Gaussian Beams [J]. *J Opt Soc Am B*, 1997, **14**: 2010-2016.
- [45] MARTIN K I, CLARKSON W A, HANNA D C. Self suppression of Axial Mode Hopping by Intracavity Second harmonic Generation [J]. *Opt Lett*, 1997, **22**: 375-377.
- [46] ZHENG Y H, LI F Q, PENG K C, *et al.* Progress of All solid state Single frequency Lasers [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, **36**: 1635-1642.
- [47] GREENSTEIN S, ROSENBLUH M. The Influence of Nonlinear Spectral Bandwidth on Single Longitudinal Mode Intracavity Second Harmonic Generation [J]. *Opt Commun*, 2005, **248**: 241-248.
- [48] XUZUKI K, SHIMOMURA K, EDA A, *et al.* Low noise Diode pumped Intracavity Doubled Laser with Off axially Cut Nd: YVO₄ [J]. *Opt Lett*, 1994, **19**: 1624-1625.
- [49] 张宽收, 郑耀辉, 彭堃堃. 单频内腔倍频激光器 [P]. 中国发明专利, 申请号: ZL200810079204.3.
- [50] ZHENG Y H, LI F Q, PENG K C. High stability Single frequency Green Laser with a Wedge Nd: YVO₄ as a Polarizing Beam Splitter [J]. *Opt Commun*, 2010, **283**: 309-312.

High Power All-Solid State Single-Frequency Lasers

WANG Ya-jun, ZHENG Yao-hui, LI Feng-qin, PENG Kur-chi

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

Abstract: On the basis of the research work of our group, we briefly explained the technological problems which need to be solved during the research of high power, all-solid-state single-frequency lasers. The problems were explained through four aspects, including the decrease of useless heat, the effective heat emission, the mitigation of heat effect of nonlinear crystals and the new mode-selecting techniques. At the same time the advantages and disadvantages of all kinds of methods are compared.

Key words: laser technology; high power; single frequency; all-solid-state