

大能量窄线宽全固态钛宝石激光器的研究进展

戎善奎 余婷 陈卫标

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 主要介绍了用于差分吸收激光雷达系统和蓝绿激光通信的大能量、窄线宽全固态脉冲钛宝石($\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$)激光器的应用及其在国内外的研究历史和现状。阐述了目前获得大能量、窄线宽全固态钛宝石激光器的几种典型方法,比较了其优缺点,并对这种激光器的发展前景进行了展望。

关键词 钛宝石激光器; 全固态激光器; 种子注入; 窄线宽

中图分类号: TN248

Research Progress on High Energy, Narrow Linewidth, All Solid-state Ti:Sapphire Lasers

RONG Shankui YU Ting CHEN Weibiao

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract The applications, research history and present status of all solid state Ti:Sapphire lasers, used in Differential Absorption Lidar(DIAL) and satellite laser communication(SLC) are overviewed. The typical methods of achieving high energy, narrow linewidth, all solid-state Ti:sapphire lasers are introduced, and their advantages and disadvantages are discussed and compared. The development prospect of this kind of lasers is also presented.

Key words Ti:Sapphire laser; all solid-state laser; injection seeding; narrow linewidth

1 引言

自从1982年Moulton P F^[1]发现了掺钛蓝宝石晶体($\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$)的激光作用后,人们对其研究日益深入,以其作为工作物质的各类激光器迅速发展起来。钛宝石(Ti:Sapphire)是一种室温下调谐范围较宽的激光晶体,具有较宽的吸收带和较大的增益,吸收峰值在490nm处,可用多种抽运源抽运,如闪光灯、氙离子激光、铜蒸汽激光和倍频Nd:YAG激光等。

目前,钛宝石激光器在光电干扰、测距、致盲武器等军事领域和

大气污染监测方面有很好的应用,尤其是在测量大气中各种污染气体指标的差分吸收激光雷达(DIAL)系统中,全固态钛宝石激光器的应用十分广泛。钛宝石激光器的可调谐范围为700~1050nm,经非线性光学频率变换过程后可以获得最佳的蓝绿激光输出。蓝绿波段是海水窗口,因此蓝绿激光在水下激光通信、海洋探测中应用潜力大。由于钛宝石晶体上能级寿命仅为3.2 μs ,适合于使用激光抽运,因此可研制成全固态。

本文重点回顾国内外脉冲激

光抽运的钛宝石激光器及其线宽控制技术的历史及研究现状,并介绍了该类激光器将来的发展趋势,为从事相关研究的科研人员提供参考。

2 国外研究状况

钛宝石晶体出现不久,人们便开始了使用闪光灯或者气体激光器等对其抽运产生激光的研究。开始阶段的大部分研究工作是使用闪光灯或者气体激光器抽运钛宝石,产生的是脉宽为微秒量级的脉冲,单脉冲能量可达到几个焦耳。

收稿日期: 2005-08-23; 收到修改稿日期: 2005-12-11

作者简介: 戎善奎(1978-),男,山东人。中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事固态激光技术的研究。

E-mail: yasonky@163.com

但是, 这种激光器的脉宽太宽, 不能满足差分吸收激光雷达以及激光通信的应用。与此同时, 调Q脉冲激光抽运的钛宝石激光器件的研究已经开展, 使用调Q脉冲激光抽运可以产生脉宽为几个或者十几个纳秒的激光脉冲。较早的如1985年, Albretch G F^[2]等就开始采用Q开关的Nd:YAG激光倍频后抽运钛宝石晶体。1986年, Moulton P F^[3]在研究钛宝石的光谱和激光特性的过程中, 也使用重复频率为10Hz的Nd:YAG激光的倍频光来抽运钛宝石晶体。在平凸非稳腔情况下, 可以获得大约3mJ的单脉冲能量输出, 对应斜效率为86%。通过实验, 作者认为, 非稳腔情况下, 抽运光引起的平面腔镜的破坏限制了系统的能量输出。他指出, 在高能量钛宝石激光器件的研究中, 为了避免高能量密度的抽运光引起腔镜的光学损坏, 应该避免抽运光通过谐振腔镜。

上述激光谐振腔中, 由于腔内光学元件的损坏, 不能输出超过几十焦耳的短脉冲能量, 人们便开始研究其他方式获得大能量短脉冲的钛宝石激光输出。1990年, Rines G A和Moulton P F^[4]采用10Hz Q开关的Nd:YLF脉冲激光倍频后抽运钛宝石激光器。结果表明, 使用渐变反射率镜(GRM)作为输出耦合镜的驻波正分支聚焦非稳腔可以获得单脉冲能量输出430mJ, 脉宽约10ns, 此时的抽运光为1000mJ, 由抽运绿光到输出钛宝石激光的能量转换效率大约43%。这是目前我们看到的脉宽纳秒量级的钛宝石激光器脉冲输出中能量最高的报道。值得注意的是, 实验中, 为避免光学损坏, 抽运光未通过输入腔镜。其实验系统示意图如图1。

1992年, Francois Salin^[5]等提出将增益波导的理论应用于固体激

光器件, 并且通过实验得到较好的验证。在增益波导理论中, 考虑了谐振腔中激光增益介质的作用, 而不只是考虑腔的结构。这是一种新型谐振腔, 能用传统光学方法产生大基模体积的高斯光束, 特别是在全固态激光器里这是一个很重要的方法。使用工作频率为20Hz的Nd:YAG激光的倍频光来抽运钛宝石晶体, 利用增益波导效应, 使用平-平腔, 在绿光为70mJ时, 获得了25mJ、800nm的钛宝石激光输出, 抽运阈值为20mJ, 斜效率达到62%。1993年, Frederick Estable^[6]等根据增益波导效应, 设计了平-平腔的钛宝石激光器。使用重复频率为10Hz的倍频Q开关Nd:YAG激光对钛宝石晶体进行双向抽运, 在抽运光脉冲能量为410mJ时可以获得150mJ的能量输出, 斜效率大约50%。这种方法的光学元件不需要特殊的计算和设计, 而且对于抽运光的光束质量要求不高, 输出光束质量较好($M^2 < 1.3$)。

1995年, Osamu Uchino^[7]等通过模拟计算设计了适合于空间差分吸收激光雷达测量水蒸气系统的全固态激光系统。1998年, Edwards W C^[8]等人在激光雷达大气研究实验中使用了钛宝石激光器, 使用重复频率为5Hz的倍频Nd:YAG激光对钛宝石晶体进行抽运, 获得波长为813nm和819nm的双脉冲输出, 单脉冲能量达到150mJ。1999年, Shoji Y^[9]等人根据Osamu Uchino^[7]的设计和计算, 研制了一台Ti:Al₂O₃激光系统, 采

用行波腔, 在200mJ的抽运功率时, 获得的单脉冲输出能量为45mJ, 重复频率为50Hz。2001年, CHEN Songsheng^[10]等使用重复频率为30Hz的倍频Nd:YAG激光对两块Ti:Sapphire晶体进行抽运, 采用两个平镜组成的增益波导谐振腔, 获得了大于100mJ的单脉冲能量输出, 激光脉宽在25~30ns之间, 能量转换效率大约为22%。在此基础上, 2002年, Elsayed^[11]等研制了同样应用于机载臭氧差分吸收雷达系统的钛宝石激光器, 获得重复频率为20Hz, 单脉冲能量130mJ的900nm激光输出。2003年, Khaled A^[12]使用重复频率为30Hz的倍频Nd:YAG激光对两块钛宝石晶体进行抽运, 采用两个平镜组成的折叠谐振腔, 使用单频867nm和900nm LD进行种子注入, 获得了115mJ的867nm和105mJ的900nm激光输出。与此类似的还有2002年Elsayed K A等^[13]的报道。

另外, 值得注意的是, 目前实际应用的钛宝石激光系统大多要求其输出线宽较窄, 但由于钛宝石发射光谱的带宽较宽, 要想获得窄线宽或者可调谐的输出就必须采取选频措施。通常采用的选频措施包括在激光器内使用棱镜、可调谐光栅、腔内标准具, 使用一个或多个双折射倾斜布儒斯特角的薄片或者采用自种子注入或外腔种子注入的方式等。

光栅、双折射滤光片等波长控制元件都有相当高的损耗, 并且其光学损伤阈值都相当低。在高能量

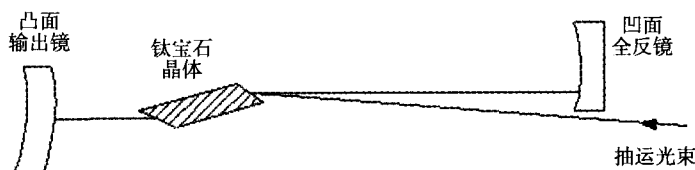


图1 获得高能激光输出的实验示意图^[4]

输出激光器中采用腔内波长控制元件,效率较低而且容易产生光学损伤问题,从而限制了激光器输出能量的提高。例如,1989年 Kangas K W^[14], Merriam A J^[15]等使用类似 Littman 腔形首次获得了脉冲钛宝石激光器单纵模输出,这种方式可以获得单纵模激光输出,但是受到腔本身结构的限制,难以获得大能量脉冲激光输出。目前所见的大能量钛宝石激光器没有使用这种腔型的。

在腔内插入棱镜等元件对激光模式进行粗选,限制线宽,也是经常被采用的一种方法,但是效果并不明显,只有在对输出激光线宽要求不是很高的时候可以采用。

采用外腔种子注入的方式来控制输出光束可解决上述的一系列问题^[16]。最早的对于 Ti:Sapphire 激光器的种子注入的研究是 1986 年 Brockman P^[17]等人开展的。使用窄线宽的 727nm 波长染料激光器对调 Q 脉冲钛宝石激光器进行种子注入,获得了带宽 2.5pm 的激光输出。文献[4]、[8]、[9]、[10]、[12]中,采取了外腔种子注入措施后, Ti:Sapphire 激光器输出线宽可以压缩到满足差分吸收激光雷达系统的要求。

随着钛宝石激光在差分吸收雷达、光通信等方面的应用日益拓展,人们对其输出激光能量的要求也不断提高。目前在国外很多大能量脉冲钛宝石激光器已经商品化,并且随着研究的深入,其性能会不断提高,应用也会越来越广泛。可以预计,在相当长的时间内,这仍将是研究的热点。

3 国内研究状况

国内对钛宝石激光器的研究开展得也比较早。1994 年张强^[18]等对两块不同尺寸的 Ti:Sapphire 晶

体分别进行单向抽运和双向抽运实验,在 $\lambda=788\text{nm}$ 中心波长附近最大的输出能量分别为 77.3mJ(单向抽运)和 157.8mJ(双向抽运),重复频率 1~10Hz,总的转换效率(输出能量/输入能量)大于 42%。在接下来的几年,吴路生^[19]、宋峰^[20]、王丽^[21]、裴博^[22]等均在实验中获得了大能量钛宝石激光输出。

2005 年,上海光机所的余婷^[23]等报道了如图 2 所示的一种全固态种子注入式钛宝石激光器,抽运源为调 Q Nd:YAG 激光器的倍频光。这是国内首次使用外腔种子注入方式获得钛宝石激光输出。钛宝石晶体置于三镜环形腔内,使用 LD 为种子源进行种子注入,控制输出激光模式和波长。532nm 抽运光能量为 60 mJ,脉宽为 7ns,重复频率为 10Hz,可获得接近 20 mJ 的单频输出。同时也进行了线性腔的实验,结果表明,环形腔在种子注入后,其效率可以和线性腔相比。输出激光经过非线性光学频率变换后,可以应用于差分吸收雷达系统,用来测量大气中某些污染气体的浓度等。

目前我国在这方面的研究与国际上还有很大的差距,可喜的是已经有越来越多的科研工作者投入到全固态钛宝石激光器件的研究中,并且已经取得了很多成果。要达到国际先进水平,还有很多的工作要做。

4 发展展望

目前,用于差分吸收激光雷达系统和水下激光通信系统中的钛宝石激光器亟需提高的是脉冲能量、重复频率,并保证具有较窄的线宽和频率稳定性。

就激光输出能量来说,短脉冲(<20 ns)的钛宝石激光器的最高输出指标是文献[4]报道的使用渐变反射率镜(GRM)作为输出耦合镜的驻波正分支聚焦非稳腔获得的最大单脉冲能量输出 430mJ,脉宽约 10ns。但是,这种类型的谐振腔,使用的输出腔镜是变反射率镜,特定的腔镜对应特定的抽运功率,如要改变抽运功率,需要重新计算设计腔镜。这使得这种谐振腔的设计十分复杂,限制了其应用。文献[5]分析了将增益波导效应应用于固体激光器的优点,增大抽运光束的尺寸,就可以在不损坏晶体和光学元件的基础上获得大能量激光输出。文献[10]~[13]报道的钛宝石激光器均采用了增益波导技术。使用增益波导腔可以比较容易地获得大能量钛宝石激光输出,在目前报道的指标上,输出能量仍有进一步提高的空间。

在各种线宽压缩的方法中,使用外腔种子注入要比自种子注入、光栅、双折射滤光片等具有优势。采用这种方法,既不增加腔内损耗,腔内也不增加低破坏阈值的光学元件,不会限制输出激光的能

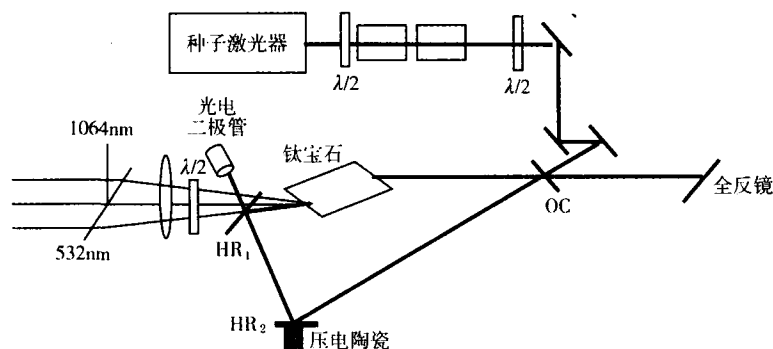


图2 环形腔钛宝石激光器示意图^[23]

量。同时,这种方法可以有效地压窄线宽,使得输出激光满足应用的要求。唯一的缺点是对种子激光器的频率稳定性要求较高。

实际应用中要求窄线宽全固态钛宝石激光器的重复频率尽可能提高,而目前报道的最高指标为

50Hz^[9]。但是,钛宝石晶体热导率非常高(超过了Nd:YAG晶体),化学性质稳定,结构坚固,因此其重复频率主要受抽运全固态激光器的限制。

综合分析,可以使用增益波导谐振腔,结合外腔种子注入的

方式来获得大能量、窄线宽、高光束质量的高重复频率钛宝石激光输出。这种激光器腔型设计简单、实用性强,对抽运激光器的要求低。目前这种结构的激光器已经广泛应用于激光雷达系统和激光通信领域。

参考文献

- 1 Moulton P F. Ti doped sapphire: a tunable solid-state laser. *Opt. News*, 1982, 8(6):9~13
- 2 Albretch G F, Eggleston J M, Ewing J J. Measurements of $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ as a lasing material. *Opt. Comm.*, 1985, 52:401~404
- 3 Moulton P F. Spectroscopic and laser characteristics of $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$. *J. Opt. Soc. Am.*, 1986, B3:125~133
- 4 Rines G A, Moulton P F. Performance of gain-switched $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ unstable-resonator lasers. *Opt. Lett.*, 1990, 15(8):434~436
- 5 Francois Salin, Jeff Squier. Gain guiding in solid-state lasers. *Opt. Lett.*, 1992, 17(19):1352~1354
- 6 Frederick Estable, Eric Mottay, Francois Salin. High-energy gain-guide $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ oscillator. *Opt. Lett.*, 1993, 18(9):711~713
- 7 Osamu Uchino, Tomohiro Nagai, Toshifumi Fujimoto. Diode-pumped solid state laser for spaceborne water vapor DIAL. *Proc. SPIE*, 1995, 2531:154~160
- 8 Edwards W C, Petway L P, Antill C W Jr. Performance Improvements to the Lidar Atmospheric Sensing Experiment (LASE), NASA no. 19980236786. Nineteenth International Laser Radar Conference; UNITED STATES, 1998
- 9 Shoji Y, Imaki M, Yanagisawa T. Development of Ti:Sapphire laser for airborne water vapor DIAL. *CLEO'99*:550~551
- 10 Chen Songsheng, Petway L B, Meadows B L. 30mJ, 30Hz, and 300nm ultraviolet lasersource generated by a frequency-tripled Ti:Sapphire laser. *CLEO'2001*, 506
- 11 Elsayed K A, Chen Songsheng. High pulse energy 300 nm Ti:Sapphire laser for airborne ozone lidar measurements. *Proc. SPIE*, 2002, 4630:89~93
- 12 Elsayed K A, DeYoung R J, Petway L B. Compact high-pulse-energy ultraviolet laser source for ozone lidar measurements. *Appl. Opt.*, 2003, 42:6650~6660
- 13 Elsayed K A, Chen Songsheng, Petway L B. High -energy efficient , 30-Hz ultraviolet laser source for ozone lidar systems. *Appl. Opt.*, 2002, 41:2734~2739
- 14 Kangas K W, Lowenthal D D, Muller C H III. Single-longitudinal-mode, tunable, pulsed Ti:sapphire laser oscillator. *Opt. Lett.*, 1989, 14(1):21~23
- 15 Merriam A J, Yin G Y. Efficient self-seeding of a pulsed $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ laser. *Opt. Lett.*, 1998, 23(13):1034~1036
- 16 Barnes J C, Barnes N P, Wang L G. Injection seeding II : $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ experiments. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1993, 29:2684~2692
- 17 Philip Brockman, Bair C H, James C. Pulsed injection control of a titanium-doped sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1986, 11(11):712~714
- 18 张强, 乔景文, 邓佩珍 等. 高能掺钛蓝宝石脉冲激光器输出能量超过 150mJ. *中国激光*, 1994, 21(11):922
- 19 吴路生, 韦丽, 周东方 等. 双向抽运的高功率高效率钛宝石激光器. *中国激光*, 1995, 22(2):168~170
- 20 宋峰, 乔金元, 李喜福 等. 小型化脉冲钛宝石激光器的研究. *量子电子学报*, 1995, (12):341~346
- 21 王丽, 黄骝, 赵宇. 脉冲钛宝石激光器的能量转换效率分析与实验. *应用激光*, 1998, 18(5):211~214
- 22 裴博, 周寿桓, 沈柯. 变反射率镜非稳腔可调谐 $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 激光器. *光学学报*, 2001, 21(7):804~807
- 23 Yu Ting, Chen Weibiao, Zhou Jun *et al.*. All solid-state injection-seeded $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ ring laser. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, 3(2):92~93