

## 可调谐激光器的固体化趋势

张 国 威

(北京理工大学工程光学系, 北京)

**摘要:** 本文综合性地评述了由于掺钛蓝宝石等固体可调谐激光器的问世, 在可调谐激光技术领域出现的由液体(染料)可调谐激光器向固体(过渡金属离子, 光参量振荡)可调谐激光器转变的发展趋势, 以及全固化的发展方向。

### The solidified tendency of tuned laser

Zhang Guowei

(Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology)

**Abstract:** Based on the development of the solid tuned lasers, such as Ti doped sapphire etc, in this area of tuned laser, there recently appears the developmental tendency to transfer from liquid (dye) laser to solid (transition or optical parameter oscillation) tuned laser. This paper appraises the tendency and the developmental direction of all-solidified tuned laser.

### 一、引 言

1966年P. P. Sorokin等人发明了染料激光器, 开创了波长可连续调谐激光技术发展的历史。20多年来虽也曾出现过像色心激光器等多种可调谐的激光器, 但从未动摇染料激光器对可调谐激光器领域的霸主地位。80年代初问世的掺钛蓝宝石激光器的发展, 开始动摇了染料激光器独霸的局面, 标志着可调谐激光技术进入了由液体工作介质转向固体工作介质和全固体化的发展新阶段, 可以预见, 90年代将是固体可调谐激光技术大发展的年代。

一般激光器多为固定波长输出的激光器, 如氩离子激光器输出490和514nm的绿光, 红宝石激光器为694nm的红光, 掺钕YAG激光器工作在1.06 $\mu$ m近红外等。而可调谐激光器则可在一定波长范围内实现激光波长的连续变化。图1给出了几类可调谐激光器的波长复盖范围, 其中准分子和CO<sub>2</sub>激光器为气体激光器, 染料激光器为液体激光器, 其它均属固体激光器。

可调谐激光器除具有可调谐性外, 还具有其它的十分重要的特性, 如能获得极窄线宽的激光而具有很高的光谱分辨率和能产生超短光脉冲而实现高时间分辨的研究等等。因此, 它的出现大大促进了光谱技术的发展, 已发展成一门新科学——激光光谱学。激光光谱技术不仅是一门实验科学, 其应用也十分广泛, 已在化工、能源、生物、医学、环境科学等领域得到重要的应用。如用于分离同位素铀<sup>235</sup>, 诊治癌肿瘤和大气环境监测等。特别是它具有引人注目的潜在的国防军事应用前景, 在对目标进行探测、识别、制导、仿真和隐身等光电子

对抗战略战术应用中将发挥重要作用。因此，固体可调谐激光器从发展一开始就受到军方的重视，在美国对这种激光器的研究工作，基本上都是由国防部或有关军种支持的。

## 二、染料激光器对可调谐激光技术发展的贡献

染料激光由于具有调谐范围宽、阈值低、增益高等特性，在过去25年可调谐激光技术的发展中一直占据着显著的位置，无论在技术上，还是在市场占有率上都处于领先的地位。

染料激光器它可在330~1300nm由紫外、可见到近红外的宽阔谱区内实现连续调谐，并可通过各种效应拓宽到真空紫外和几微米红外区，可满足各种光谱研究的要求。

当采用一定的线宽压窄技术时，可使激光的线宽达到 $10^{-4}$ nm（脉冲工作）或 $10^{-6}$ nm（连续工作），具有极高的单色性，它比传统光谱仪器的分辨率提高了3~4个量级。从而有可能对原子的超精细结构进行分辨。

在超短脉冲产生上，锁模的掺钕YAG或玻璃激光器，只能产生皮秒级（ $10^{-12}$ s）的脉冲，而染料激光器通过同步锁模、碰撞锁模以及腔外脉宽压窄等技术，已实现了10fs（ $10^{-14}$ s）级的超短脉冲，使物质内部各种超快现象的研究成为可能。

正因为染料激光器具有如此优越和独特的性能，因而在可调谐激光技术领域一直占据着统治地位。其各项单元技术，如调谐、线宽压窄、锁模、多频运转等技术，都已十分成熟。为其它可调谐激光器的研究和发展打下了良好的基础，这是染料激光器对整个可调谐激光技术发展的重要贡献。但是，染料激光器也存在一些固有缺点和局限性，如必须液态工作，每种染料的调谐范围至多为几十纳米(nm)，不能调Q工作等，从而在一定程度上限制了染料激光器的进一步发展。

## 三、固体可调谐激光器的挑战

可调谐激光器的固体化一直是物理学家和光电子技术工程师的理想，20多年来人们曾在染料激光器固体化方面做过探索，如把染料分子掺到透明的有机基质中，或渗入到微孔玻璃体中，但收效甚微，希望很小。70年代出现的色心激光器和半导体激光器，其调谐范围分别可达0.85~3.6 $\mu$ m和0.8~40 $\mu$ m很宽的红外区，曾引起人们很大的关注。但由于多数色心晶体必须低温工作，且不稳定。可调谐半导体激光器也有低温工作、跳模等问题。因此都未得到发展。

70年代末美国Morris等人首次发表了能室温工作的顺磁离子激光器——紫翠宝石激光器<sup>[1]</sup>，它是基于过渡金属离子的电子振动态跃迁的一种固体可调谐激光器，调谐范围为690~820nm，稍后又出现了一种掺铬的石榴石GSGG，把调谐范围拓宽到700~900nm。这两种激光器的问世，标志着可调谐激光器技术开始进入了一个固体化的发展阶段(图2)。

特别是1982年美国麻省理工学院林肯实验室的Moulton研制成了掺钛蓝宝石激光晶体<sup>[2]</sup>，把调谐范围拓宽到650~1100nm（最近已有人达到1200nm），且有效率高、导热性好等优点，是80年代激光领域的一项重大进展，被誉为可调谐激光器的一颗明星，从而掀起了一股研究固体可调谐激光技术的热潮。到80年代末，就相继出现了一批有实用价值的掺过渡金

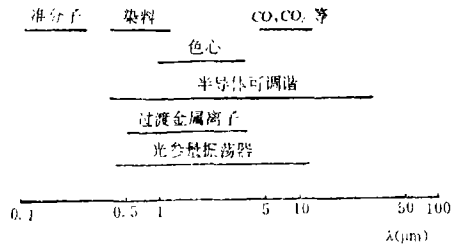


图1 各类可调谐激光器的波长复盖范围

属离子的激光晶体。如美国利弗莫尔实验室已研制成多种室温工作的掺铬氟化物晶体<sup>[3,4]</sup>, 比较成熟的有LiCAF (Cr<sup>3+</sup>:LiCaAlF<sub>6</sub>, 700~900nm), LiSAF (Cr<sup>3+</sup>:LiSrAlF<sub>6</sub>, 800~1010nm) 和LiSGF(Cr<sup>3+</sup>:LiSrGaF<sub>6</sub>, 800~950 nm), 又如掺铬的镁橄榄石 (Cr<sup>4+</sup>:Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) 则可在1167~1345nm范围实现调谐<sup>[5]</sup>。1988年Moulton对Co<sup>2+</sup>:

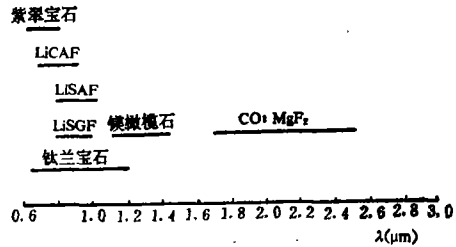


图2 各种过渡金属离子激光复盖的谱区

MgF<sub>2</sub>又实现了1750~2500nm的室温可调谐运转(1985年曾进行低温运转)<sup>[6]</sup>。至此, 这类激光器已基本复盖了由650nm到2.5μm的宽阔谱区, 预计不久的将来有可能拓宽到3μm。

#### 四、掺钛蓝宝石激光器的迅猛发展

作为固体可调谐激光器的优秀代表——掺钛蓝宝石激光器, 刚一问世就受到了普遍的重视, 1987年就推出了第一台Ar<sup>+</sup>激光泵浦的商品钛宝石激光器, 四年后(1991年)发展到20多家公司生产50多种规格、型号。1990年的销售额已达910万美元, 1991年猛增到1400万美元, 其增长率为55%。这种发展速度在激光技术领域是极罕见的, 其发展势头十分迅猛, 1992年可能突破2000万美元。表1列出了几家公司产品性能的典型数据。连续运转的激光器的输出功率已达3.5W, 其调谐范围可达670~1100nm, 这相当于4~5种染料加起来才能实

表1 几种钛宝石激光器的性能

公 司	型 号	波 长 (nm)	输 出	泵 浦 源
Spectra-Physics	3900S-1	700~1050	0.7~0.75W	5 W Ar <sup>+</sup>
	3900S-2		2.5~3.0W	20 W Ar <sup>+</sup>
Lexel Laser	479	690~990	0.8 W	5 W Ar <sup>+</sup>
		680~1060	3.25W	20 W Ar <sup>+</sup>
Coherent Inc.	890	670~1100	3.5 W	20 W Ar <sup>+</sup>
Spectra Tech.	HRL-100	730~910	100 mJ	532 nm YAG
Continuum	TS-60	700~900	120 mJ	532nm YAG
Schwartz Electro-Optics	Titan-P	680~940	100 mJ	532 nm YAG
Elight Lasre Systems	TiFlash-410TS	700~900	400 mJ	氙 灯
Cynosure	CRD-3	700~1000	1 J	氙 灯
Spectra-Physics	Tsuunami	720~900 (1000)	450 mW (100 fs)	(锁模激光)
Coherent Inc.	Mira-900	720~990	500 mW (130 fs)	(锁模激光)

现的调谐范围。脉冲运转的激光器由早期只有几毫焦输出, 提高到100mJ以上, 而实验室的器件现已达430mJ<sup>[7]</sup>。灯泵的激光器也已有1J的商品上市, 实验室则已达到10J。产生超短

脉冲的商品锁模激光器的脉宽已达100fs, 实验已实现27fs<sup>[8]</sup>。可以看出, 钛宝石激光器的主要性能都已达到染料激光器的水平, 而在调谐范围和使用方便等方面远优于染料激光, 且价格相当, 因此很受用户的青睐。图3为Continuum公司TS60型脉冲钛宝石激光器的光路图, 两块激光晶体按消色散形式放置, 采用双向纵向泵浦, 掠入射光栅和反射镜组成选频组合部件, 用六块棱镜的扩束系统使激光线宽压窄到 $<0.1\text{cm}^{-1}$ 。图4为 Spectra-Physics公司的3900型连续钛宝石激光器, 为Z形四镜腔结构, 线宽 $<40\text{GHz}$  ( $\sim 1.35\text{cm}^{-1}$ )。

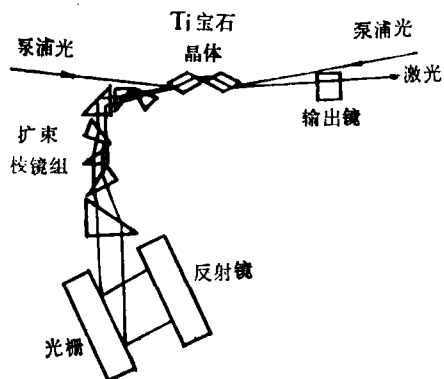


图3 Continuum的脉冲钛宝石激光器

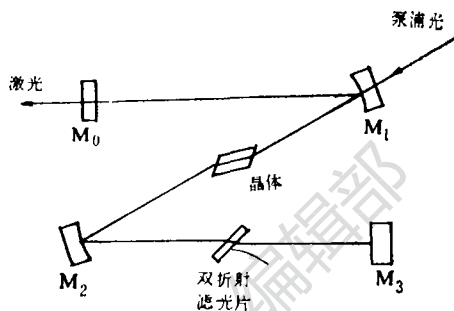


图4 Spectra-Physics的连续钛宝石激光器

掺钛蓝宝石激光器的迅速发展, 开始动摇了染料激光器长期以来对可调谐激光器领域的垄断, 可调谐激光器技术的发展进入了一个由固体代替液体的新阶段。如1990年的市场销售额, 钛宝石激光器/染料激光器为1:5, 而1991年已达1:4, 预计1992年可能接近1:3。过不了几年, 就会出现平起平坐的局面。如果90年代再出现几个有实用价值的固体可调谐激光器, 这种关系(地位)的转变将大大加快。

### 五、光参量器件的前景喜人

由图1看出, 通过光学非线性效应的光参量过程, 也可获得由可见光到中红外的可调谐激光。光参量振荡过程可表示为 $\omega_p = \omega_s + \omega_i$ , 即当输入一固定波长(频率为 $\omega_p$ )的激光时, 可获得两可调谐激光 $\omega_s$ (信号光)和 $\omega_i$ (闲置光), 不过两个波长是相关的( $\omega_s + \omega_i = \omega_p$ )。光参量振荡器由光学非线性晶体和腔组成, 因此也是一种固体可调谐激光器件。

这种可调谐器件发展很早, 但由于当时缺乏性能优良的非线性晶体, 长期处于停滞状态, 至80年代末也未见有商品器件问世。近年来我国研制出了多种性能优良的非线性晶体材料, 如KTP, BBO, MgO:LiNbO<sub>3</sub>等(见表2)<sup>[9]</sup>。它们不仅非线性系数大、抗破坏阈值高, 而且透过范围和相位匹配范围也宽, 是研制光参量振荡器的理想材料, 并已取得了令人鼓舞的进展。表3给出了用YAG激光器各种倍频光泵浦时, 采用角度调谐的BBO光参量振荡器的相位匹配角范围 $\theta$ , 以及信号光 $\lambda_s$ 和闲置光 $\lambda_i$ 的相应调谐范围<sup>[10]</sup>。并已实验实现了由302nm至3036nm ( $>3\mu\text{m}$ )的调谐(比金属过渡离子激光器宽)。最近STI Optronics公司已推出了商品器件, 用15mm的KTP晶体做成的光参量振荡器。用YAG激光的倍频光(532nm)泵浦时, 得到了1.4~2.0 $\mu\text{m}$ 的调谐; 用1.06 $\mu\text{m}$ 基波泵浦, 可实现2.0~4.5 $\mu\text{m}$ 的调谐。在4.0 $\mu\text{m}$ 处尚可输出 $>4\text{mJ}$ 的激光。另外, 有人用KTP光参量振荡器实现人眼安全波长1.61 $\mu\text{m}$ 也获得了成功, 对1.06 $\mu\text{m}$ 的转换效率达25%<sup>[11]</sup>。可以看出, 它与过渡金属离子激光器相比

表2 几种非线性材料的性能

材 料	透过范围(nm)	相位匹配范围(类型)(nm)	破坏阈值(GW/cm <sup>2</sup> )
KDP	200~1500	517~1500 (I)	0.20
BBO	198~3300	400~3300 (I) 526~3300 (II)	5.00
KTP	350~4500	1000~2500 (II)	1.00
MgO:LiNbO <sub>3</sub>	400~5000	800~5000 (I)	0.05

表3 BBO 光参量振荡器的调谐性能

$\lambda_p$ (nm)	理 论		实 验		
	$\theta$ (deg)	$\lambda_s$ (nm)	$\lambda_i$ (nm)	$\lambda_s$ (nm)	$\lambda_i$ (nm)
532	20.7~22.8	647~1064	1064~3000	667~1064	1064~2628
355	23.1~33.1	403~710	710~3000	402~710	710~3036
266	26.7~47.6	292~532	532~3000	302~532	532~2248

较, 在调谐范围上占有优势, 而在窄线宽和短脉冲产生上则相形见绌。因而在只有波长和强度要求的应用场合, 光参量振荡器无疑具有十分广阔的发展前景。

## 六、全固化可调谐激光器已出现

全固化激光器是指二极管激光泵浦的激光器, 它具有转换效率高、结构紧凑、工作可靠等优点, 特别是在航空航天、军事装备、野外作业、水下探测等应用中, 更具有无可比拟的优越性。随着大功率二极管激光器的问世, 由二极管激光泵浦的YAG (或YLF) 激光器的研究已成为激光技术发展的热点之一。80年代后期并已开始商品化, 1990年销售额已突破1000万美元, 1991年增加到1330万美元, 是固体激光器中发展最快的领域之一。

最近, 在可调谐激光器领域, 也开始出现了这种全固化的发展趋势。但为了泵浦掺钛蓝宝石要求用490nm左右的绿光大功率二极管激光器, 而为了泵浦LiSAF也需要670nm的红光大功率二极管激光器。因此当前二极管激光器的发展形成了一股短波长、大功率的趋势。现在SDL公司室温工作AlGaInP激光器(670~680nm), 连续输出已达8.5W。但是475~525nm波段的绿光二极管激光器(ZnSe), 还处于实验研究阶段。

最近美国佛罗利达中央大学Zhang等用42mW的AlGaInP激光器(670nm)泵浦LiSAF(晶体仅厚1mm), 在870nm处获得了4.3mW的输出, 并可在858~920nm范围调谐<sup>[12]</sup>。而对于掺钛蓝宝石激光器, 由于绿光二极管激光器尚不成熟, 还未见用绿光二极管激光直接泵浦的报导, 但有人用全固化的YAG激光的倍频光泵浦, 不过其总转换效率很低, 没有实用价值。展望未来十年, 可见光二极管激光器将日趋成熟, 这势必促进全固化可调谐激光器的发展。那时, 可调谐激光技术领域将会出现一个崭新的局面。

## 参 考 文 献

- [1] Morris R C, O' Dell E W, Jenssen H P *et al.* J Mater Sci, 1979,

14, 941

- [2] Moulton P F. Solid State Res Rep Lincoln Lab MIT. 1982; 15
- [3] Payne S A, Chase L L, Newkirk H W *et al.* IEEE J Q E, 1988, QE-24; 2243
- [4] Payne S A, Chase L L, Wilke G D *et al.* J Lumin, 1989; 44; 167
- [5] Petricevic V, Gagen S K, Alfano R R *et al.* A P L, 1988; 52; 1040
- [6] Welford D, Moulton P F. Opt Lett, 1988; 13; 975
- [7] Rines G A, Moulton P F. Opt Lett, 1990; 15; 434
- [8] Likforman J P, Grillon G, Joffre M *et al.* A P L, 1991; 58; 2061
- [9] Lin J T, Chen C. Laser & Opt, 1987 Nor; 59
- [10] Schröder A, Fix T, Wallenstein R. Laser und Opt, 1991; 23; 106
- [11] Marshall L R, Kasinski J, Burnham R L. Opt Lett, 1991; 16; 1680
- [12] Zhang Qi, Dixon G J. Opt Lett, 1992; 17; 43

收稿日期: 1992年6月12日。

· 简 讯 ·

### 用铁作为新的敏化剂的 $2\mu\text{m}$ 钛激光器

最近, 电-光学和激光器研究中心 (CREOL, 佛罗里达州罗兰多) 的工作人员, 用实验证实了工作在 $920\text{nm}$ 与 $980\text{nm}$ 之间的掺钛蓝宝石激光泵浦 Fe, Ho: YAG 晶体时, 在近 $2\mu\text{m}$ 处有连续激光产生。这种激光能提供一种可替代铥敏化的材料, 例如二极管泵浦 Tm, Ho: YAG 激光器件。二极管泵浦 $2\mu\text{m}$ 钛激光器对于医学、遥感和光雷达应用是非常重要的。

G. J. Dixon 和 Laser Consulting 公司的 L. F. Johnson 合作, 用实验演示了在 YAG 晶体中铁与钛之间的能量传递能有效地激发 $2\mu\text{m}$ 激光。最初的实验在 $77\text{K}$ 下进行, 当泵浦波长在 $920\text{nm}$ 和 $980\text{nm}$ 之间与铁吸收带匹配时, 观测到连续阈值功率在 $4\text{mW}$ 和 $5\text{mW}$ 之间。虽然 Johnson 在1970年首次报导了铁与钛之间的有效能量传递, 但是这次是在此基础上第一次演示连续波 $2\mu\text{m}$ 激光。

译自 L F World, 1992; 28 (5); 9 邹福清 译 邹声荣 校

### Ciba-Geigy 和 Plasmon 共同开发 CD 技术

瑞士巴塞尔的 Ciba-Geigy 公司和英国剑桥的 Plasmon 数据系统公司签订了协议共同开发新一代可录的 CD 盘。该方案得到 Ciba-Geigy, LN, RV 和 GVM 等公司超过 250 万美元的风险投资。该方案第一阶段是开发用于可录的 CD 专用薄膜涂层, 以增加数据记录寿命。

Plasmon 公司总经理 P. Helfet 说, “我们相信对于可录的 CD 盘数据记录寿命的方案, 在应用潜力方面有重大的效果”。“我们同 Ciba-Geigy 公司共同开发的可录 CD 保证耐用 50 年 (高于大多数其它光盘 5 倍)。采用我们在光盘制造工艺的经验以及 Ciba-Geigy 公司表面涂层化学的专长, 在涌现的可录 CD 市场上, 我们认为这是利用极好机会的完美伙伴关系”。

译自 L F World, 1992; 28(5); 45 卢中尧 译 巩马理 校