

掺钛宝石可调谐激光器及其进展

邬承就

(中国科学院安徽光学精密机械研究所)

摘 要

1982年掺钛宝石($Ti^{3+}:Al_2O_3$)晶体第一次产生可调谐激光,该晶体性能优异,晶体的物理和化学性质与红宝石相似。 Ti^{3+} 离子能级结构有利于产生具有宽吸收和宽荧光谱的激光。晶体生长的关键是提高掺钛浓度和克服钛离子变价。美国、苏联、中国已生长出这种激光晶体。掺钛宝石可调谐激光器可调范围为670—1000 nm,光泵连续输出已达1.6 W,脉冲输出为100 mJ,总效率为40%,灯泵阈值为20 J,输出为300 mJ,预期效率可望达5%。将其倍频,可实现单一系统全可见区可调谐。中国科学院安徽光学精密机械研究所已实现677—987 nm可调谐激光。

为了得到结构紧凑的从可见到近红外的激光器,八十年代以来,国际科技界和工业界对可调谐固体激光器加强了研究和开发。重点是对掺过渡族金属离子(Cr^{3+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , V^{2+} 等)的晶体进行研究。在这些晶体中以掺 Cr^{3+} 的金绿宝石($BeAl_2O_4$, alexandrite)和GSGG($Gd_3Sc_2Ga_3O_{12}$, 钆铝镓石榴石)的激光性能为最好。二者于八十年代初先后在室温下实现了脉冲^[1,2]和连续^[3,4]激光运转。

掺钛宝石($Ti^{3+}:Al_2O_3$, Ti:sapphire)的光谱性质在八十年代前有过研究^[5]。1982年美国MIT(麻省理工学院)林肯实验室的P. F. Moulton^[6]第一次报道了掺钛宝石产生可调谐激光。几年来这种激光器的进展很快。目前,掺钛宝石激光器已成为近红外区性能最好的固体可调谐激光器,它已开始由实验室逐步进入实际应用。

一、掺钛宝石的物理、化学性质和光谱特性

掺钛宝石是掺有钛离子的氧化铝单晶(六角晶系,空间群, $R\bar{3}C-D_{3d}^6$),呈红色。其物理、化学性质与熟悉的红宝石相似,熔点高(2050℃),硬度大(9级),导热性好,折射率为1.77。 Ti^{3+}

离子在 $\alpha-Al_2O_3$ 晶体内置换具有三角对称的C位上的 Al^{3+} 离子。 Ti^{3+} 离子仅有一个不配对的3d电子,在这种晶场环境中,它的能级发生分裂^[5,7],见图1。第一级近似,下能级解除三重简并,上能级解除二重简并。由于很强的声子耦合,利用两个d电子能级进行四能级激光运转成为可能。而电子从低能级到更高的d电子能级的跃迁(即激发态吸收)却受到限制;到更高的非d电子态的激发态吸收可能性也不大。这是对激光非常有利的特点。

在300K测得的d电子的吸收光谱和荧光光谱^[8]如图2所示。 3E 上能级的Jahn-Teller分裂是吸收带形成的原因。晶体吸收光谱的吸收峰在500nm附近。这种接近于200nm宽的可见吸收特性,有利于用多种光源来泵浦晶体。从红光到近红外的荧光,其峰值吸收截面为 $(3.2-9.3) \times 10^{-20} cm^2$,荧光寿命为3.2 μs 。

$Ti:Al_2O_3$ 在紫外有强的吸收,虽然原因还不很清楚,但是,已经知道至少有一部分是由于点缺陷色心引起的。紫外吸收峰分别在250nm和315nm附近。分别用不同吸收波长的紫外光激发,可以产生很强的荧光带,峰值在425nm和575nm^[9]附近。强而宽的425nm荧光带,荧光寿命约为35 μs ^[10]。

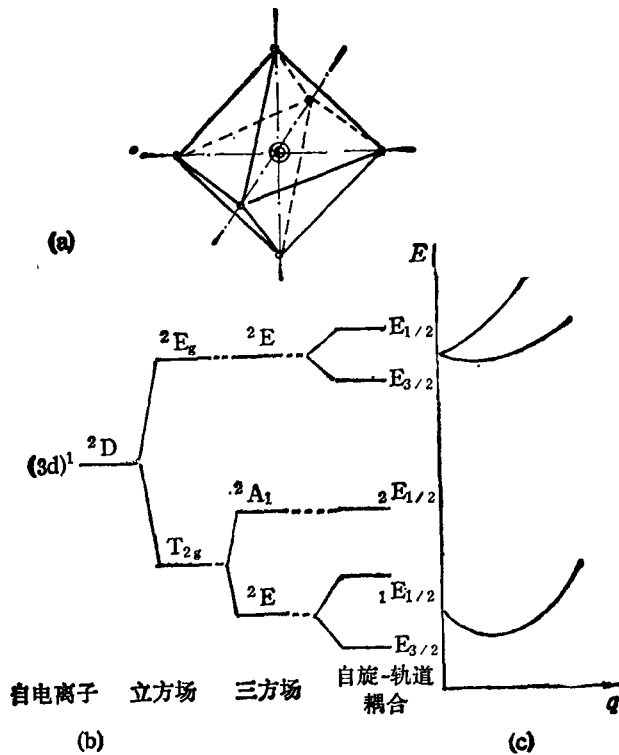


图1 钛离子在宝石中的位置及其能级示意图^[7]

(a) 钛离子的理想八面体位置,周围为六个氧原子;
 (b) 能级分裂情况;(c) ${}^2T_{2g}$ 和 2E_g 态的绝热
 势曲线

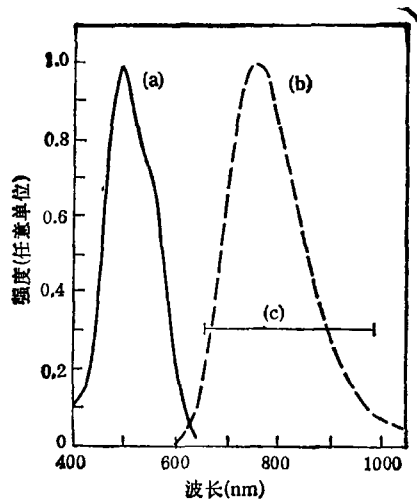
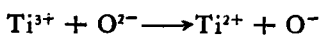


图2 Ti:Al₂O₃ 的吸收光谱和荧光光谱

(a) 吸收光谱;(b) 荧光光谱;
 (c) 激光可调谐范围

二、掺钛宝石的生长

生长刚玉的传统 Verneuil (火焰法) 方法可以用来生长掺钛宝石,但此法所得的晶体光学质量不高,不适于作激光应用。目前多用提拉法^[10],也有人用热交换法 (HET),垂直梯度凝固法^[11]以及所谓的熔体垂直固化法 (VSOM)^[12] 生长掺钛宝石。生长这种晶体的问题之一是难以生长高质量的高掺钛晶体。Ti₂O₃ 在熔融 Al₂O₃ 中的可溶性很小,溶解度在 1 wt% 以下。目前一般所得晶体钛离子浓度为 0.1—0.2 wt%。掺钛宝石的另一个问题是 Ti 离子变价,即存在 Ti²⁺, Ti³⁺, Ti⁴⁺ 同氧离子之间的电荷转移:



和



物理

Ti³⁺ → Ti²⁺ 引起紫外吸收; Ti⁴⁺ → Ti³⁺ 则可能是在红外激光波段出现吸收的重要原因。生长工艺和热处理技术的关键是,使晶体的三价离子 Ti³⁺ 的浓度尽可能提高,而且稳定,减少四价离子 Ti⁴⁺。

目前,美国是由联合碳化物公司和晶体系统公司开始半商业性供应掺钛宝石给研究部门,苏联是由晶体学研究所研制这种晶体。在我国,中国科学院安徽光学精密机械研究所已经生长出质量很高的掺钛宝石激光晶体。

三、掺钛宝石可调谐激光器

掺钛宝石可调谐激光器除了具有结构紧凑、性能稳定、可以长时间可靠运转等一般固体激光器的特点外,还具有若干突出的优点:(1) 可调谐波段宽,从红光至近红外,一般为 670—1000nm。最近 A. Pinto^[13] 已将调谐波长扩展

到1200nm。在这一波段,掺钛宝石激光器是迄今调谐范围最宽的晶体激光器。这一点同染料激光器比较,显示出优越性。为了实现同样宽的波段的调谐,用染料激光器至少需换三种染料,而且泵浦源可能也得两种以上。(2)能在室温下运转。(3)晶体吸收带宽,并且适合于用 Ar^+ 、铜蒸气、倍频钕激光(YAG、钕玻璃等)或特别制作的闪光灯泵浦,以连续或脉冲方式工作。(4)具有大的增益截面和不存在高激发态吸收,使激光阈值低,效率高。

A. Sanchez 等^[16]用 Ar^+ 激光泵浦(约12W),获得最大输出功率1.6W的连续波可调谐激光,内量子效率为64%。美国通用电气公司和美国 Los Alamos 国家实验室等^[14]用倍频YAG激光泵浦,获得的最大脉冲输出能量为100mJ,脉宽为4ns,重复频率为1—10Hz,斜率效率达64%,总效率为40%。C. Bair 采用窄带染料激光注入的办法,获得0.025Å这样非常窄的线宽。振荡-放大可调谐激光系统正在进行研究,以获得大能量可调谐激光。P. Laco-
vara 等^[10]用闪光灯加上染料转换荧光进行泵浦,初步获得的激光器的阈值为20J,输出为300mJ,斜率效率为0.5%。他们预期,通过改进晶体质量并且采用更合适的灯和染料,这种掺钛宝石激光器的阈值可望降至1J,总效率可超过5%。目前效率最高的激光晶体Nd, Cr:GSGG的闪光灯泵浦总效率为6%。此外, A. Pinto^[13]进行了掺钛宝石可调谐激光的倍频实验。用单个双倍频(Nd:YAG-倍频-Ti:Al₂O₃-倍频)光学系统,仅用一组腔片,就实现了跨越整个可见区(400—700nm)的可调谐激光输出,输出能量为0.1—3.5mJ,脉宽为10ns,重复频率为1Hz,光谱线宽为1nm。通过改进系统,还可提高调谐范围等性能。这一实验结果把固体可调谐激光器的调谐波段从通常的红外扩大到可见区,甚至有可能扩大到紫外区域。在我国,中国科学院安徽光学精密机械研究所^[17]用倍频YAG激光作泵浦源,采用近轴泵浦方式,用本单位生长的掺钛宝石进行实验,不换腔片,实现了677—987nm可调谐激光,在国

内首次成功地实现了掺钛宝石可调谐激光。

四、掺钛宝石激光器的应用前景

在众多的激光应用中,有一类应用,如空间技术、遥感技术、光雷达等,要求激光器放在空间或地面移动的设备之中。这就迫切需要使用一种结构紧凑、耐用、高效率的可调谐激光器。最合适的是全固体化器件。在目前条件下,一种全固体化可调谐激光系统的方案是:激光二极管阵列-Nd:YAG-倍频-可调谐激光晶体。掺钛宝石由于具有上述优良特性,它是全固体化可调谐激光系统的关键部件——可调谐晶体的主要候选材料。美国NASA(国家宇航局)正在进行这方面的应用研究。固体可调谐激光器用于地面,如化工厂和油田的环境监测,工厂生产线上实时控制,医学上研究激光与组织的相互作用等^[16],不但可以弥补目前气体激光器、染料激光器等的不足之处,而且可以避免它们的缺点,使激光应用范围更加扩大。在科学技术应用方面,如激光光谱、激光化学等领域,掺钛宝石激光器可能会部分取代染料激光器。

掺钛宝石激光晶体,在基质性能方面具有红宝石的优点,在光谱和激光性能方面却远远胜于它。自1960年第一台红宝石激光器问世以来,红宝石生长方法和工艺研究获得了迅速发展,人们已经可以获得大尺寸、高质量的红宝石激光棒。这为掺钛宝石的生长打下了良好的基础。预期不需太长的时间,即可使生长掺钛宝石的工艺成熟,使人们可以获得大尺寸、高质量的掺钛宝石激光棒或块。染料可调谐激光器和金绿宝石等固体可调谐激光器的发展,则为可调谐掺钛宝石激光器的发展提供了许多技术基础。成熟的红宝石生长工艺和可调谐激光技术,这两方面的因素可以说是掺钛宝石激光器得到迅速发展的原因。可以预料,新的可调谐晶体和激光器将会继续出现,但是,掺钛宝石在庞大的激光领域中将占有一席之地,并且将不断发展。

(下转第552页)