

我国激光晶体的研究进展

张英侠

(华北光电研究所)

提要: 对我国激光晶体的研究进展做了概括的回顾和展望。为开创激光晶体发展的新局面,提出几点建议。

The research progress of laser crystals in China

Zhang Yinxia

(North China Research Institute of Electro-Optics)

Abstract: A general review is made on the past and future of the research progress of laser crystals in China. Some proposals are offered in order to open up a new prospect to the development of laser crystals.

在纪念《中国激光》创刊十周年的时候,我们兴奋地回顾我国激光科学与技术的发展历程。国产的激光晶体为保证中国激光于1961年诞生和以后的发展起了重要作用,当时的长春光机所和苏州宝石厂等单位为中国激光晶体的奠基做出了贡献。现在,我国的激光晶体研究已具有一定的规模,全国有30多个单位,近1000名科技干部和工人,研制20多种激光晶体。掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)、红宝石(Cr:Al₂O₃)已经生产并获得广泛应用。一批有前途的新晶体正在深入研究,即将进入应用。基础研究和探索研究已有所开展。

一、稀土离子激光晶体

1. Nd:YAG

我国YAG晶体生长始于1965年。首先用熔盐法生长的晶体获得激光运转。用熔盐法曾生长出50毫米的Nd:YAG晶体。1967年提拉法Nd:YAG晶体产生激光。采用石墨或钨加热器,钼坩埚的电阻加热提拉法很快在国内几十个单位推广。西南技术物理所在控制平界面生长无核心、无位错Nd:YAG晶体研究中,建立了一套工艺技术。四川华光仪器厂最近通过鉴定,可以较稳定地生长均匀性良好的晶体(干涉条纹达0.25条/25毫米)。石墨电阻法晶体存在的问题是晶体含有大量散射颗粒。上海交通大学采用控制生长气氛,能在一定程度上降低散射颗粒。钨坩埚感应加热提拉法经过多年工艺改进,已能生长 $\phi 25\sim 30$ 毫米凸界面无散射颗粒

收稿日期:1984年4月6日

晶体。华北光电所近来已生长出 $\phi 35\sim 40$ 毫米晶体。可选取激光放大用的 $\phi 9\times 75$ 毫米激光棒,干涉条纹达 0.3 条/25 毫米。吉林激光材料厂是目前我国产量最大的 YAG 专业厂。成都黎明机械厂正大力发展 YAG 生产。

不论电阻或感应法生长的晶体,经高温退火后激光性能都有显著提高,这说明氧化物晶体在还原性或惰性气氛中生长,容易产生氧离子缺位或存在 OH^- 。个别晶体受有害杂质污染或存在严重晶体缺陷,经退火处理后晶体变色,光吸收和散射损耗显著增大。退火处理进一步暴露出晶体原已存在的问题,防止了这类晶体流入应用。

全国性的 Nd:YAG 激光棒统一测试进行过两次,对推动技术交流,提高晶体质量,统一测试方法和标准起了良好的作用。对激光棒的择优选取、光学加工和端面镀增透介质膜等项技术也不断改进。晶坯的超声取棒和多根棒共同加工端面的新技术即将实际应用。

华北光电所通过对双掺 Nd:Cr:YAG 晶体的深入研究,进一步发现 Cr^{3+} 在 Nd:YAG 晶体中不仅确有一定的敏化作用,而且能降低晶体畸变,增加 Nd^{3+} 的荧光寿命以及改善晶体抗紫外辐照的特性。Nd:Cr:YAG 已在宝石轴承的激光快速打孔、测距、医疗等多方面获得应用。

2. YAlO_3

1971 年生长晶体,1972 年获得激光运转。由于 YAlO_3 晶体对原料质量和杂质更加敏感,生长气氛、退火气氛也有显著影响,石墨-钼生长系统逐渐被淘汰。上海光机所对 YAlO_3 晶体的热-光性能、跃迁截面性质和在激光器中的应用做过基础研究。70 年代后期大都转向 YAG 研制,只有福建物质结构所坚持这项研究,在晶体生长、原料提纯和 YAlO_3 晶体的热效应以及在激光器的特殊设计方面,做了大量有成效的工作。 b 轴 Nd:Cr: YAlO_3 在 1.079 微米的连续激光输

出达 162 瓦。1.34 微米的连续激光输出达 20 瓦,居于国际先进水平。还生长出 Er: YAlO_3 晶体,进行了光谱研究。

3. LiYF_4 (YLF)

针对某些新波长激光应用的需要,华北光电所于 1977 年生长 YLF。发展了一套用惰性气氛、石墨生长装置的提拉法生长技术。克服了原料含氧,晶体出现失透、孪晶和散射颗粒多等技术质量关键。Nd:YLF(1.047 微米、1.053 微米和 1.32 微米),Er:YLF(0.85 微米)和 $\alpha\beta$ -YLF(2.06 微米)等已获得室温激光运转。Nd:YLF 脉冲激光输出达 838 毫焦耳,斜率效率 1.51% (最高 1.73%)。用 Nd:YLF 做振荡器已获得锁模激光运转。

4. 自激活激光晶体

山东大学等单位采用熔盐法通过改进助熔剂和用籽晶转动法生长出 $\text{NdP}_5\text{O}_{14}$ 、(Nd, La) P_5O_{14} 和 $\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ 等透明晶体。晶体尺寸达 4 厘米,居于国际领先水平。用氩灯泵浦的 $\text{NdP}_5\text{O}_{14}$ 已于 1979 年实现激光运转并用于小型激光测距机。(Nd, La) P_5O_{14} 和 $\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ 也已获得激光运转,性能优于 $\text{NdP}_5\text{O}_{14}$ 。福建物构所生长出 Nd: $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ 小晶体,1980 年实现室温脉冲激光运转。

上海光机所和上海硅酸盐所为光纤通讯光源生长了 $\text{NdLiP}_4\text{O}_{12}$ 晶体,已获得激光运转。上海硅酸盐所为降低这种晶体的谐振损耗,生长出 $\text{Nd}_{0.5}\text{La}_{0.5}\text{LiP}_4\text{O}_{12}$ 晶体,可望降低激光阈值。

北京人工晶体所制成 $\text{NdP}_5\text{O}_{14}$ 玻璃体激光棒,已获重复频率 15~20 次/秒脉冲激光运转。可望在激光测距和医疗中获得实际应用。

二、过渡金属离子激光晶体

1. 红宝石 ($\text{Cr}:\text{Al}_2\text{O}_3$)

在 60 年代初期的熔熔法研究热潮过后,红宝石曾出现一段研究中断期。70 年代中,

安徽光机所和苏州晶体元件厂用提拉法生长, 获得均匀性较好的晶体。焦作激光所在上海硅酸盐所和上海光机所协助下, 改进熔熔法工艺, 晶体质量有提高, 激光效率达 1.7%, 是国内应用的主要供应者。安徽光机所和焦作激光所等正在进行提拉法攻关, 研制全息用的红宝石。

2. 金绿宝石($\text{Cr}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$)

这是一种颇受国内外重视的终端声子可谐振激光晶体。由于 BeO 剧毒的限制, 只在上海光机所和安徽光机所开展生长研究。上海光机所于 1981 年开始晶体生长并于当年获得激光输出, 最近又观察到可调谐激光输出。安徽光机所生长出各种轴向的晶体。

3. $\text{Ni}:\text{MgF}_2$

上海光机所、上海交通大学、北京玻璃所等单位先后用密封式石墨坩埚温梯法生长出 $\phi 24\sim 30\times 30$ 毫米的 $\text{Ni}:\text{MgF}_2$ 单晶。选取不同取向的籽晶生长晶体, 研究晶体开裂和应力特性。测试了光谱、位错和生长条纹。上海光机所还生长出 $\text{Co}:\text{MgF}_2$ 。上海交通大学生长出 $\text{Ni}:\text{MgO}$ 并制造了低温激光器。

三、色心激光晶体

80 年代初我国已有近 10 个单位开展色心激光晶体研究。生长出不掺杂和掺杂的 LiF 、 KCl 和 NaF 色心晶体。对色心的形成、色心类型的分析、色心转型处理以及色心的稳定性等进行了初步研究。用 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 倍频激光泵浦 LiF , 已于 1981 年获得室温脉冲可调谐色心激光。掺杂 KCl 将用于频标计量和光化学。这项任务涉及材料、器件和应用的密切配合, 又能带动有关基础研究, 因此已由华侨大学等有关单位组织协作攻关。

四、激光新材料研究

为了适应固体激光多样化发展的需要,

70 年代以来, 我国一些科研单位着手激光新材料研究。华北光电所曾先后生长过 $\text{Nd}:\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ 、 $\text{Nd}:\text{CaY}_4(\text{SiO}_4)_3\text{O}$ 、 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 和各种稀土离子掺杂的 $\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$ 、 $\text{Ca}_5\text{Y}_{13}\text{F}_{49}$ 等激光新材料。近来正在研究具有自调 Q 、自锁模等作用的多功能激光晶体, 并与北京玻璃所等单位合作, 探索新的终端声子激光晶体。福建物构所研究结构与性能的关系规律, 提出从晶格动力学与晶格场理论相结合的途径寻找新的终端声子跃迁激光晶体。根据结构特点探索生长了一种新晶体 $\text{Cr}:\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ 。光谱研究观察到 R 线位于 684 毫微米, 在 690~750 毫微米有很强的声子边带。上海光机所对一些稀土和过渡金属离子掺杂的氧化物和氟化物进行了光谱研究。安徽光机所用熔盐法开展新的终端声子激光晶体的探索研究。长春应化所生长出一系列具有新波长荧光特性的小尺寸自激活激光晶体, 例如 $\text{KNdP}_4\text{O}_{12}$ 、 $\text{Mn}:\text{CeP}_5\text{O}_{14}$ 、 $\text{Tb}_x\text{Dy}_{1-x}\text{P}_5\text{O}_{14}$ 等。上海硅酸盐所生长出同成分熔化的 $\text{K}_5\text{Bi}_{0.9}\text{Er}_{0.1}(\text{MoO}_4)_4$ 单晶, 进行了结构和光谱研究。北京物理所对 $\text{Eu}:\text{GGG}$ 、 $\text{Tb}:\text{GGG}$ 等进行了生长和性能研究。几所高等院校为开发新材料也在进行基础研究。

五、激光晶体研制的条件建设

60 年代以前我国晶体生长与性能测试研究的基础十分薄弱, 大多数条件都是空白。激光问世以来极大地推动了晶体研制条件的建设。为了适应高熔点氧化物激光晶体生长的需要, 上海光机所、陕西机械学院、华北光电所、天津大学、重庆大学等单位先后设计制造了几种传动精度和稳定度较高的提拉法单晶炉。一些单位发展了半自动温度程序控制仪、浮秤自动控径系统、电子秤自动控径系统, 以及传动系统的程序修正仪。多数控制系统的可靠性尚待提高, 电子秤系统工作尚不稳定。用微处理机进行自动控制的实验正

在进行。

昆明贵金属所于 60 年代末建立起铌制品的加工技术, 为国内开展感应法生长高熔点氧化物晶体提供了各种铌制品。

华北光电所于 70 年代中设计制造成长期工作稳定的可控硅中频逆变器电源, 应用于提拉法晶体生长。由于频率选择与铌坩埚集肤层厚度相匹配, 中频对弱电控制线路无干扰, 对人身影响也小等优点, 已在国内推广应用。该所还研制了激光光谱仪, 定量分析晶体中激活离子的分布。

上海光机所研究成功改进的定向温梯法晶体生长技术, 除用来生长白宝石单晶外, 还与长春光机所分别研究大直径的 Nd:YAG 晶体生长。

在晶体测试仪器方面, 华东工程学院定型生产泰曼干涉仪, 国内已广泛采用。其他测试装置, 例如: 散射系数、吸收系数、消光比、激光性能测试等, 大都是由各单位自行研制的非标准装置。我国激光晶体的分析测试条件仍然很落后, 有些还是空白(例如量子效率测试等)。

六、展望与建议

过去的二十几年我国激光晶体发展速度较快, 已经建立起可观的基础和实力。综合估计我国激光晶体的研究生产水平较之美、苏仍有很大差距; 但与其他国家相比, 某些方面尚属前列。展望今后 10~15 年, 几种常用品种不仅可充分供应国内需要, 还将组织出口。我国将创制几种有实用价值、性能优良的激光新材料。激光晶体的专用设备和成套技术有可能组织对外转让。

在回顾我们取得的进步时, 也应冷静地看清我们的不足和薄弱环节。

为了开创我国激光晶体发展的新局面, 建议抓好以下几点:

1. 继续深入开展晶体缺陷研究。结合晶体生长技术和性能, 抓紧突破常用激光晶体的技术质量关。今后五年应解决优质大尺寸 YAG、红宝石、YLF、金绿宝石以及混合石榴石(例如 Nd:Cr:GSGG、Cr:GSGG) 的晶体生长和性能质量关。组织定点工业生产。

2. 加强光谱、结构与性能的基础研究。探索新的激活离子和新的基质材料。开发新的跃迁机制和功能效应研究。今后十年新材料的重点选题可能是: (1) 终端声子及其他跃迁体系的可调谐激光晶体。(2) 稀土离子开发新的波长。充分运用敏化、去激活、级联等能量运动机制, 开发高效率的新波长激光晶体。(3) 色心激光晶体。改进现有晶体或发展新晶体, 深入研究色心的物理化学过程, 解决热光稳定性问题, 使其早日进入实际应用。(4) 具有多功能效应的激光晶体。(5) 凝聚态激光新材料。

3. 重视晶体生长及相关技术的基础条件建设。全国应有几个晶体生长、光学加工设备和分析测试仪器的专业化研究生产中心。为改变落后状况, 下决心有选择地引进几种先进的设备、仪器或成套项目。

4. 加强专业科技人员技术素质的培养提高。建议有关高校恢复招收晶体专业学生。扩大招收晶体专业研究生。增加晶体材料专业出国留学生和访问学者名额。支持各学会举办在职人员短期培训。

5. 进一步贯彻调整方针, 从体制上解决现有分散、重复、混乱的科研生产状况。