

文章编号:1001-5078(2007)04-0295-05

优质大尺寸激光晶体研究进展

徐学珍, 桂尤喜, 王永国

(北京雷生强式科技有限责任公司, 华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 文章综述了国内外大尺寸 Nd:YAG, Nd:GGG, Yb:YAG 晶体的发展概况, 指出了我国优质大尺寸激光晶体研究进展及主要差距, 展望了发展前景。

关键词: 优质大尺寸; 激光晶体; Nd:YAG; Nd:GGG; Yb:YAG

中图分类号: O734 **文献标识码:** A

Research Progress of High Quality and Large Size Laser Crystals

XU Xue-zhen, GUI You-xi, WANG Yong-guo

(Beijing Opto-Electronics Technology Co. Ltd., North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The development status of large size Nd:YAG, Nd:GGG and Yb:YAG crystals has been summarized. The research progress and the main problems to develop high quality and large size laser crystals in china are described. Finally, the development prospect is previewed.

Key words: high quality and large size; laser crystal; Nd:YAG; Nd:GGG; Yb:YAG

1 引言

激光晶体是固体激光器工作介质的主要材料。从1960年激光诞生以来,研制了红宝石($\text{Cr}:\text{Al}_2\text{O}_3$)、掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)、掺钕钇镓石榴石(Nd:GGG)、掺钕氟化钇锂(Nd:YLF)、掺钛蓝宝石($\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$)、掺钕钇酸钕(Nd:YVO₄)、掺镱钇铝石榴石(Yb:YAG)等优良实用的晶体,推动了高功率、波长可调谐、新波长、超短脉冲和激光二极管(LD)泵浦固体激光器技术及其应用的发展。近十年来,固体激光器输出平均功率突破1kW、10kW,向100kW迈进^[1],高功率固体激光器技术的迅速发展带动了优质大尺寸激光晶体成为研究热点。

目前实现千瓦平均功率固体激光的晶体主要以Nd:YAG, Nd:GGG, Yb:YAG为代表。Nd:YAG增益高,热导和机械性能好,是常用的高功率固体激光材料;Nd:GGG可实现较高浓度掺杂,平界面生长可以获得大尺寸工作介质,是高平均功率固体激光器的优选材料;Yb:YAG由于Yb³⁺电子能级简单,吸收线宽宽,量子效率高,无辐射引起的热损耗低,特别适合用于LD泵浦高功率固体激光器,在优质大尺

寸激光晶体中占有首要地位。

2 需求

高功率固体激光器工作介质除了传统的圆棒外,发展了板条和盘片。激光盘片的最大输出平均功率与盘片的尺寸和材料的光谱、机械性质等因素有关,在盘片的热应力极限范围内,对于四能级运转由盘片可提取的最大输出平均功率为:

$$P_{\text{avaril, avg, max}} = (\pi/4) (3Rb\eta_u I_{\text{sat}} \psi_d \phi d^3 f_h^{-1})^{1/2}$$

式中, R 为热应力参数; b 为应力因子; η_u 为上能级量子效率; I_{sat} 为饱和强度; ψ_d 为泵浦占空比; ϕ 为放大自发辐射(ASE)参数; d 为盘片直径; f_h 为热分数。可见,由盘片可提取的最大输出平均功率与盘片直径的1.5次方成正比。因此,高功率板条和盘片激光器需用优质大尺寸激光材料。

LD泵浦固体激光器结构紧凑、体积小,成为发展车载、机载等高机动平台高能激光武器的最佳选

作者简介: 徐学珍(1970-),女,硕士,研究员级高级工程师,北京雷生强式科技有限责任公司总经理,主要从事激光晶体生长研究。
E-mail: xuxuezhen@oet.com.cn

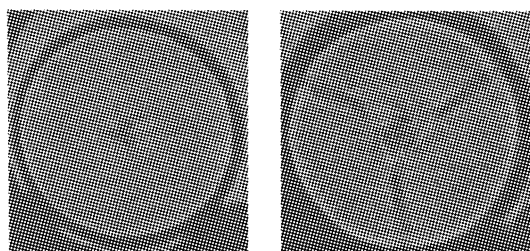
收稿日期: 2006-12-30; **修订日期:** 2007-01-25

择。杀伤性激光武器的激光输出平均功率需要达到100kW以上,100kW固体激光器的技术途径有多种,如热容激光器、紧凑有源反射镜激光器等^[1]。热容激光器的输出能量正比于工作介质的质量与温升的乘积,单位体积工作介质的输出能量最大值为:

$$\frac{E_{\text{out}}}{V} = \eta_{\text{extr}} \left(\frac{\rho C_p}{X} \right) \Delta T$$

式中, E_{out} 为1个工作周期输出的最大能量; V 为工作介质的体积; η_{extr} 为激光腔提取效率; ρ 为材料密度; C_p 为材料比热容; X 为与光谱特性有关的比热参数; ΔT 为工作周期内工作介质的平均温升。由此看出,密度高、比热容大、热损耗低、容许温升高的材料激光输出能量大。若允许温升为100K, Nd:YAG和Nd:GGG晶体的 E_{out}/V 达到400~500J/cm³,表明二者适合用于高能热容激光器。按照美国的设计,100kW热容激光器需用9块有效口径130mm×130mm盘片,平界面生长的大尺寸Nd:GGG是实现这一目标的优选材料。100kW紧凑有源反射镜激光器需用多组放大模块耦合定标放大,每组模块盘片的厚度~2.5mm、直径50~150mm,若用Nd:GGG,盘片直径150mm;若用Nd:YAG,盘片直径至少大于50mm。可见发展高能固体激光武器需要优质大尺寸激光材料。

目前,提拉(CZ)法Nd:YAG主要采用凸界面生长,晶体有核心(见图1(a)),通常情况下还有侧心(见图1(b)),核心和侧心是应力集中区。由于存在核心和侧心,能得到的激光板条和盘片的最大尺寸受到很大限制,如直径100mm晶体获得激光盘片的最大直径为40~50mm。Nd:GGG采用平界面生长,晶体没有核心和侧心,在理想情况下得到激光板条和盘片的最大尺寸可接近于晶坯的尺寸,如我们用直径75mm晶坯获得了直径70mm激光盘片(如图2所示)。大尺寸晶体既可获得大尺寸激光元件(圆棒、板条和盘片等),同时还能有效提高激光元件的产量、光学均匀性和质量一致性。

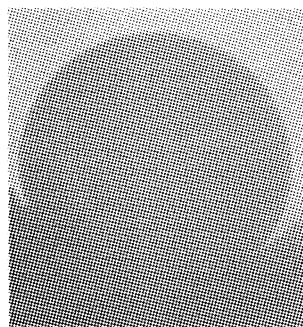


(a)有核心

(b)有核心和侧心

图1 凸界面生长的Nd:YAG晶体(φ60mm×120mm晶坯)

平行光投影图



无核心、无侧心

图2 平界面生长的Nd:GGG晶体(φ70mm×10mm盘片)

平行光投影图

3 国外发展概况

(1) Nd:YAG 晶体

CZ法Nd:YAG于1964年由美国R. C. Linares等人首先研制成功^[2],同年由J. E. Geusic等人实现室温1.06μm脉冲和连续激光运转,次年由联合碳化物公司Linde晶体部生产。不久之后,晶体大量用于军用激光测距机和目标指示器。到1972年, Litton Systems公司Airtron Synoptics晶体部研制出φ40mm×200mm晶体^[3],并且用近百台单晶炉生产。为了提高生产效率,1979年美国陆军出资,再由Airtron Synoptics研制直径50mm晶体^[4]。20世纪80~90年代,由于LD泵浦高功率固体激光器技术迅速发展的带动和电子称称重法自动直径控制技术应用于CZ法生长,大大加快了直径75~90mm晶体的研制,并实现了商品化^[5]。进入21世纪, Northrop Grumman Synoptics(原Litton Airtron Synoptics)、Saint-Gobain Crystals & Defectors(原联合碳化物公司晶体部)和II-VI光学VLOC子公司实验室的晶体已达到直径100~120mm、长250~300mm。除美国外,德、英、日、俄大尺寸晶体研发和生产也达到了一定水平和规模。

大尺寸Nd:YAG广泛用于高功率连续和高平均功率脉冲固体激光器,如德国Rofin-Sinar公司推出用于激光加工的LD泵浦8棒串接6kW连续激光器,2004年日本东芝公司开发用于激光加工的LD泵浦6组件串接12kW连续激光器,2005年Northrop Grumman公司研制的平均功率大于27kW板条激光器。

(2) Nd:GGG 晶体

CZ法Nd:GGG与Nd:YAG同时于1964年由R. C. Linares等人研制^[2],由J. E. Geusic等人实现室温1.06μm脉冲激光运转。20世纪80~90年代,美、英、德、日、俄研究CZ法平界面生长^[6-8],晶体

直径 60 ~ 80mm、长 120 ~ 200mm,并实现了商品化。20 世纪 90 年代末到 21 世纪初,固体热容激光器出现并迅速发展,CZ 法平界面生长大尺寸 Nd:GGG 成为高能热容激光器的首选材料。Northrop Grumman Synoptics 得到军方联合高功率固体激光器(J-HPSSL)发展计划的支持,研制出直径 125 ~ 150mm 平界面晶体,他们的发展目标为直径 200mm 晶体。

大尺寸 Nd:GGG 主要用于高平均功率固体激光器,如日本研发的 LD 泵浦平均功率 830W 板条激光器,板条尺寸 9.5mm × 55mm × 200mm,2004 年 LLNL 研制的平均功率 30kW 热容激光器,盘片口径 100mm × 100mm。

(3) Yb:YAG 晶体

Yb:YAG 晶体于 1965 年由美国 L. F. Johnson 等人首次实现 1.03μm 脉冲激光运转^[9]。由于它的吸收波长与闪光灯发射波长不匹配,不适合灯泵浦的激光器使用,因此很长一段时间没有获得应用。直到 20 世纪 90 年代初,LD 泵浦固体激光器技术迅速发展,适合泵浦 Yb:YAG 的 InGaAs 激光二极管实现商品化,Yb:YAG 成为研究热点并得到快速发展。Yb³⁺ 在 YAG 中分凝系数接近 1,CZ 法生长可以获得优质大尺寸晶体,美、德、英、日、俄实现了商业生产。

LD 泵浦高功率 Yb:YAG 激光器发展很迅速,如 2004 年德国推出用于工业加工的 LD 泵浦 4kW 盘片激光器,美国休斯实验室研制的 4.4kW 盘片激光器。

4 国内研究进展及差距

我国开展的各种激光晶体研究开始的时间一般比国外晚 1 ~ 2 年。在激光晶体发展的早期(20 世纪 60 ~ 70 年代),参加研究的单位较多,主要是科研院所、高校和工厂。大尺寸 Nd:YAG 从 20 世纪 70 年代中期开始研制,大尺寸 Nd:GGG、Yb:YAG 的研制是在近十年内开始,主要的研制单位有上海光机所、西南技物所、安徽光机所和华北光电所等。

(1) Nd:YAG 晶体

1965 年开始研制,次年获得激光输出。上海光机所采用 CZ 法和温梯法(TGT)生长,CZ 法晶体 1977 年直径 35 ~ 40mm^[10],1987 年直径 43 ~ 45mm^[11];TGT 法晶体 1987 年直径 60 ~ 80mm,1994 年最大直径 117mm^[12]。2006 年姜本学等人用 TGT 法晶体 59mm × 38mm × 5.7mm 板条获得 LD 泵浦热

容方式激光输出平均功率 1200W。西南技物所(成都东骏激光公司)采用 CZ 法电阻加热钼坩埚和感应加热铌坩埚生长,20 世纪 80 年代研究成功电阻加热平界面生长无核心、无侧心晶体,直径 30 ~ 40mm;近年来感应加热生长晶体直径 50 ~ 60mm。两种晶体均实现批量生产。华北光电所(北京雷生强式科技公司)采用 CZ 法中频感应加热铌坩埚生长,1981 年尺寸 $\phi 40\text{mm} \times 120\text{mm}$ ^[13],1991 年 $\phi 50\text{mm} \times 150\text{mm}$ ^[14],2001 年 $\phi 60\text{mm} \times 180\text{mm}$ 晶体批量生产;2003 年研制出 $\phi 80\text{mm} \times 200\text{mm}$ 晶体, $\phi 12\text{mm} \times 180\text{mm}$ 激光棒干涉条纹 ≤ 0.25 条/25mm,消光比 $\geq 25\text{dB}$,单程损耗 $\leq 2.5 \times 10^{-3}/\text{cm}$ 。2006 年王伟力等人用直径 10 ~ 15mm 棒制成 LD 泵浦高重频大能量激光器,单脉冲输出能量 6.1J,重复频率 100Hz。中科院物理所用两根 $\phi 7\text{mm} \times 180\text{mm}$ 棒串接获得 LD 泵浦热容方式激光输出平均功率 3.8 kW。中科院半导体所用两棒串接获得 LD 泵浦连续激光输出功率 4kW。Nd:YAG 是应用广泛、用量最大的激光材料,除上述外,还有近十家单位采用 CZ 法研发和生产直径 30 ~ 50mm 晶体^[15]。

(2) Nd:GGG 晶体

20 世纪 80 年代中科院物理所和华北光电所开展 Nd:GGG 系列晶体生长和性能研究^[16-17],大尺寸晶体近几年开始研制。上海光机所采用 CZ 法和 TGT 法生长,CZ 法晶体直径 25 ~ 30mm,TGT 法晶体直径 ~ 70mm^[18]。安徽光机所采用 CZ 法铌坩埚生长^[19],晶体直径达 50mm 以上。2006 年中物院应用电子所用 2 片 $\phi 50\text{mm} \times 18\text{mm}$ 晶体串接获得 LD 泵浦热容方式激光输出平均功率 3.5kW。华北光电所(北京雷生强式科技公司)采用 CZ 法自动控制平界面生长,2005 年直径 75mm,Nd 浓度 0.8at% ~ 2.0at%^[20]。2006 年唐晓军等人用 3 片 $\phi 70\text{mm} \times 10\text{mm}$ 晶体串接获得 LD 泵浦热容方式激光输出平均功率 5.2kW。此外,长春理工大学 2004 年开展 CZ 法生长研究^[21]。

(3) Yb:YAG 晶体

上海光机所 1995 年在国内率先采用 CZ 法生长,尺寸 $\phi 30\text{mm} \times 100\text{mm}$ ^[22],2003 年采用 TGT 法生长,直径 75mm^[23]。西南技物所(成都东骏激光公司)采用感应加热 CZ 法生长,实现了产品生产。华北光电所(北京雷生强式科技公司)从 2001 年采用感应加热 CZ 法生长,2004 年实现 $\phi 60\text{mm} \times 200\text{mm}$

晶体生产, $\phi 5\text{mm} \times 100\text{mm}$ 激光棒干涉条纹 ≤ 0.15 条/25mm, 消光比 $\geq 30\text{dB}$, 单程损耗 $\leq 1.5 \times 10^{-3}/\text{cm}$ ^[24]。2004 年清华大学用 $1\text{mm} \times 4\text{mm} \times 42\text{mm}$ 板条获得 LD 泵浦连续波激光输出功率 1169W。此外, 近年来长春理工大学等几家单位开展 CZ 法生长和晶体性能的研究^[25]。

经过多年努力, 我国优质大尺寸激光晶体研究取得了很大进展, 晶体直径达到 80mm (TGT 法最大直径超过 100mm), 激光输出平均功率达到数千瓦; 直径 50 ~ 60mm Nd:YAG 实现了规模生产, 基本满足了国内市场需求, 部分产品销售国外; 平界面和 TGT 法生长取得突破性进展, 为优质大尺寸晶体进一步发展打下了基础。

我国大尺寸激光晶体研究与国际先进水平相比, 主要差距是: ①晶体尺寸偏小。美国实验室 Nd:YAG 直径 100 ~ 120mm、长 250 ~ 300mm, 我国最大尺寸 $\phi 80\text{mm} \times 200\text{mm}$; 美国实验室 Nd:GGG 直径 125 ~ 150mm, 我国最大直径 75mm。由于晶体尺寸偏小, 能提供的激光盘片和板条的最大尺寸也偏小。②最大尺寸晶体未实现批量生产。直径 ~ 80mm Nd:YAG, Nd:GGG 还处于实验室水平, 主要是配套条件或工艺稳定性达不到批量生产要求。③基础技术研究薄弱, 设备条件差。CZ 法生长自动直径控制、晶体生长数值模拟、生长界面形状及界面稳定性控制等基础技术研究薄弱。大尺寸晶体的生长、加工、镀膜、测试设备条件差。④资金投入严重不足。优质大尺寸激光晶体军用背景很强, 发达国家主要由军方和政府投资研发, 资金投入数额大。我国这项研究资金投入严重不足, 造成基础技术研究乏力, 先进设备和关键条件得不到保障。

5 展望

随着高功率固体激光器输出平均功率和光束质量的提高, 要求激光盘片和板条的尺寸越来越大。在这种需求背景牵引下, 优质大尺寸晶体需要加快发展速度, 在继续发展传统 CZ 法生长的同时, 大力发展其他制备技术, 增大晶体尺寸和提高晶体质量, 全面推进优质大尺寸晶体技术及产品的快速发展。技术的发展主要有以下方面:

(1) 继续发展 CZ 法生长。CZ 法是生长应力低、缺陷少、均匀性好高质量激光晶体的常用方法。尤其是研发和生产 Nd:YAG, 从 1964 年起 CZ 法铍坩埚就成为传统的和主要的方法。继续发展 CZ 法

生长, 采用大型自动控径生长设备和大尺寸铍坩埚, 增大晶体尺寸, 提高均匀性, 实现规模化生产。

(2) 发展平界面和连续加料生长。平界面生长是获得大尺寸激光盘片和板条的有效方法。Nd:GGG 平界面生长技术成熟, 继续增大晶体尺寸和发展生产。Nd:YAG、Yb:YAG 由于熔体的密度、热导率、热膨胀系数、运动粘滞系数等物性参数与 Nd:GGG 有差别, 稳定的平界面生长难度相对加大。1990 年, 美国联合信号公司和 LLNL 研究连续加料方法平界面生长 Nd:YAG, 晶体尺寸达到 $\phi 52\text{mm} \times 220\text{mm}$ ^[26]。连续加料使晶体生长过程中固液界面位置(高度)保持恒定, 既有利于实现稳定的平界面生长, 又能实现晶体掺杂浓度均匀, 是获得优质大尺寸晶体极具发展潜力的技术。由于连续加料时容易干扰熔体, 影响稳定性, 以往很少采用, 今后有望得到大力发展。

(3) 发展 TGT 法、热交换法(HET)生长。早在 1979 年美国陆军材料机械研究中心采用 HET 法生长 Nd:YAG, 获得了当时最大尺寸 ($\phi 76\text{mm} \times 105\text{mm}$) Nd:YAG^[27]。上海光机所从 20 世纪 80 年代开始研究 TGT 法生长 Nd:YAG, Ti:Al₂O₃, 晶体最大直径 117mm^[12]。TGT 法和 HET 法生长, 固液界面(等温面)易于做到接近于平面, 晶体无核心, 是获得大尺寸激光盘片和板条的重要技术途径, 将会得到快速发展。

(4) 采用扩散键合技术。1998 年美国 TRW 公司用三块 Nd:YAG 晶体键合成大尺寸 (Nd:YAG/Nd:YAG) 板条, 制成了平均功率 1kW 全固体激光器, 光束质量 1.2 倍衍射极限^[28], 这表明在没有大尺寸晶体情况下, 可以采用键合技术用小尺寸材料制作大尺寸工作介质。扩散键合已普遍应用于激光晶体, 但目前主要用于激活介质与非激活介质的键合, 如键合 Nd:YAG/YAG, Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 等。我国研究键合激光晶体有很大发展^[29-30], 键合 Yb:YAG/YAG 板条已获得连续激光输出功率超过 1kW^[31]。扩散键合机械强度高、应力低、均匀性好, 采用键合技术制作大尺寸工作介质以往比较少, 今后会得到大量运用。

随着高功率固体激光器技术在先进制造业、军事国防、能源和科研等领域中应用的发展, 对优质大尺寸激光材料的需求越来越大, 其发展前景广阔。2005 年 11 月, 在上海召开的《晶态和非晶态激光材

料及应用战略》研讨会一致呼吁:把激光材料的基础和应用研究作为国家科技发展战略目标之一,国家和地方加大科技投入,发挥我国在人工晶体生长等方面的优势,联合起来,以期在若干前沿和关键领域取得突破^[32-33]。在专家呼吁、有关方面及广大从业人员的共同努力下,我国激光材料和优质大尺寸晶体一定能取得更大更快发展。

参考文献:

- [1] 梅遂生. 向 100kW 进军的固体激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(10): 2-8.
- [2] R C Linares. Growth of garnet laser crystals[J]. Solid State Communications, 1964(2): 229.
- [3] R F Belt, et al. Crystal growth and perfection of large Nd:YAG single crystals[J]. J. Crystal growth, 1972, 13/14: 268-271.
- [4] Robert Uhrin, et al. Manufacturing methods and technology engineering for "Growth of large diameter Nd:YAG laser crystals" [R]. 1982, AD A118748/1980, AD A113614.
- [5] 张振亚. 激光晶体的研究与进展[J]. 激光与红外, 1996, 26(5): 303-305.
- [6] 横山武, 等. 近期固体激光材料的发展[J]. 激光与红外, 1987, 17(4): 12-15.
- [7] Hirohik Hayakawa, et al. High average power Nd:GGG Slab laser[J]. Japan J. Applied Physics, 1987(10): 648-650.
- [8] M E Doroshenko. Large single crystals of neodymium and chromium co-doped gadolinium gallium garnet for efficient solid state lasers [C]. Proc., SPIE, 1991, 1839: 12-23.
- [9] L F Johnson, et al. Coherent oscillation from Tm Ho Yb and Er ions in yttrium aluminum garnet[J]. Appl. Phys. Lett., 1965, 7(5): 127-129.
- [10] 我国试制钇铝石榴石大晶体[J]. 激光与红外, 1977, 7(8): 74.
- [11] 白凤周, 等. 感应加热引上法生长大直径 Nd:YAG 晶体[J]. 激光与红外, 1986, 16(9): 2.
- [12] 周永宗, 黄智宪, 陆民华, 等. 大尺寸高温氧化物晶体生长[J]. 人工晶体学报, 1994, 23(增刊): 104.
- [13] 姜腾雨, 等. $\phi 35 \sim 40\text{mm}$ 优质 Nd:YAG 晶体生长研究[J]. 激光与光学, 1984(1): 45-48.
- [14] T Jiang, X Xu, et al. Elimination of lateral core and reduction of central core for Nd:YAG crystal[C]. Proc., SPIE, 1997, 2897: 231-234.
- [15] 尤荣金, 冯宏, 殷玉嘉, 等. $\phi 50\text{mm} \times 150\text{mm}$ Nd:YAG 激光晶体的生长[J]. 人工晶体学报, 1994, 23(增刊): 132.
- [16] 张乐惠, 等. 掺钕钷钆石榴石单晶生长与测试[C]. 1981 年中国硅酸盐学会论文摘要汇编, 1981: 339.
- [17] 张英, 等. GSGG 系列激光晶体生长和性能[J]. 激光与红外, 1986, 16(9): 25.
- [18] 姜本学, 赵志伟, 等. 高功率激光晶体 Nd:GGG 晶体和光谱性能的研究[J]. 中国激光, 2004, 33(12): 59-62.
- [19] 张庆礼, 邵涉芳, 苏静, 等. Nd:GSGG 原料制备、生长及结构研究[J]. 量子电子学报, 2005, 22(4): 559-561.
- [20] 王永国, 莫小刚, 徐学珍, 等. 自动直径控制平界面生长大尺寸 Nd:GGG 晶体[J]. 中国激光, 2006, 33(增刊): 313-315.
- [21] 曾繁明, 孙晶, 李建利, 等. Nd:GGG 晶体的生长与开裂研究[J]. 人工晶体学报, 2005, 34(2): 332-335.
- [22] 杨培志, 徐军, 邓佩珍, 等. Yb:YAG 晶体的生长和激光性能[J]. 人工晶体学报, 1998, 27(3): 229.
- [23] 徐晓东, 赵志伟, 赵广军, 等. 温梯法生长大尺寸 Yb:YAG 晶体[J]. 人工晶体学报, 2003, 32(3): 185-188.
- [24] 王永国, 徐学珍, 常米, 等. 掺 Yb 钇铝石榴石晶体生长和性能研究[J]. 人工晶体学报, 2003, 32(5): 442-445.
- [25] 卢利平, 李建立, 曾繁明, 等. 提拉法生长 Yb:YAG 晶体及其性能表征[J]. 长春理工大学学报, 2004, 7(4): 17-18.
- [26] E W Odeli, et al. Development of a large scale Nd:YAG growth process[A]. Proc., SPIE, 1990, 1223: 94-102.
- [27] J L Caslavsky, et al. Melt growth of Nd:YAG using the heat exchange method[J]. J. Crystal growth, 1979, 46(5): 601-606.
- [28] 杜祥琬. 高技术要览——激光卷[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.
- [29] 徐军, 赵广军, 等. 掺钕钷钆石榴石和钷铝石榴石复合激光晶体的制备方法: 中国, 02155050. 6[P]. 2003.
- [30] 常米, 徐学珍, 刘安汉, 等. 立式上施重制造键合激光晶体的方法: 中国, 03146147. 6[P]. 2003-7-24.
- [31] 柳强, 巩马理, 等. 高功率二极管角抽运 Yb:YAG 板条激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(12): 13.
- [32] 东方科技论坛: 上海. 晶态和非晶态激光材料及其应用战略[EB/OL]. [2005]. <http://efst.sh.cn>.
- [33] 徐军. 激光晶体材料发展和思考[J]. 激光和光电子学进展, 2006, 43(9): 17-24.