

# 第 13 章 激光晶体材料

徐学珍 桂尤喜 袁 桐

## 13.1 概述

激光晶体材料用于制作固体激光器的工作介质，是固体激光技术及产业的基础支撑材料。在激光产品中，激光晶体产品所占的比例虽然小，但对推动以激光器为基础的激光技术发展所起的作用不可低估。固体激光技术发展非常迅速，近年来固体激光器的输出平均功率达到 30kW，正在向 100kW 迈进，激光波长覆盖范围扩展到紫外 0.2 $\mu\text{m}$  和中红外 3~5 $\mu\text{m}$ ，超短脉冲宽度压窄到几个飞秒。大功率半导体激光二极管 (LD) 泵浦的全固体激光器 (DPSSL) 发展迅速，固体激光技术在工业、军事、医疗、科研等领域的应用越来越广泛，2004 年世界商用固体激光器销售额达到 10.3 亿美元<sup>[1]</sup>。固体激光技术及产业所取得的这些进展，离不开激光晶体材料技术的发展和激光晶体产品的性能提高、品种增加和生产规模扩大的支持。激光晶体材料技术的发展和應用也是衡量一个国家或地区高科技发展水平的重要标志之一，美国、英国、法国、日本、俄罗斯等发达国家都非常重视它的发展和應用，其水平代表当前国际先进水平。先进的军用激光晶材料还是重要的战略资源，美国国防部制定的 2000 年“军用关键技术发展计划”和美国空军制定的 2005 年“联合高能固体激光器 (JHPSSL) 发展计划”中，强调研制、发展高性能激光晶体材料，其军用高端产品对我国实行封锁和禁运。

激光晶体材料的研究与发展最终要落实到它的生产、銷售和应用上，固体激光器是它的直接銷售和应用市场。世界固体激光器市场在 20 世纪 90 年代，平均以高于 20% 的年增长率高速发展<sup>[1]</sup>，进入 21 世纪，由于受全球经济不景气和国际 IT 业市场的影响，2002 年、2003 年连续下降，2004 年开始上升，世界固体激光器市场的复苏，为激光晶体材料行业的发展提供空间。

我国固体激光器市场受世界经济下滑的影响不大，2001~2003 年我国 YAG 激光器及应用銷售额并未出现下降，而是快速上升<sup>[2]</sup>；2001~2003 年我国激光晶体銷售形势也很好，尽管 2001 年出现了一 43.8% 的严重下降，但 2002 年和 2003 年恢复高速上升，两年平均年增长 47.2%，表明我国激光晶体材料行业的生产已经恢复快速发展。

## 13.2 国外激光晶体材料及行业现状与发展趋势

### 13.2.1 国外行业现状及市场

全球激光晶体材料行业的地区分布主要在北美，其次是欧洲和亚洲。20世纪90年代末，全球经济滑坡和IT业过热发展影响到整个激光和光电子产业，激光晶体材料行业经历了企业收购、兼并和重组，如美国Litton Airtron公司Synoptics部和Union Carbide公司Crystal products部分则被Northrop Grumman公司和Saint-Gobain公司收购，到2004年全球激光晶体材料行业生产销售商约有40余家<sup>[3]</sup>。

北美的行业分布主要在美国，美国的生产销售商数量最多（约20家），生产规模最大，生产销售的激光晶体产品约占全球总数的一半。目前主要的生产销售商有VLOC公司、Northrop Grumman公司、Saint-Gobain公司、Onyx Optics公司、Scientific Materials公司、Super Optronics公司、Crystal Optics Research公司、Marktech International公司、Kentek公司等。

欧洲的行业主要分布在德国、英国、法国、捷克、俄罗斯、立陶宛等国，主要的生产销售商约10多家，如Alphas GmbH公司、FEE GmbH公司、MolTech GmbH公司、Ingrycs Laser Systems公司、Photox Optical Systems公司、EKSPLA公司等。

亚洲的行业主要分布在日本和中国，主要的生产销售商约10余家，日本有Oxide公司、NEC TOKIN公司等，中国的行业近年来发展较快，生产销售单位有显著增加，生产规模也有所扩大。

根据Laser Focus World报道统计，世界商用固体激光器市场在经历2002年、2003年低谷后，2004年开始上升，2004年世界固体激光器（包括灯泵浦、激光泵浦和LD泵浦固体激光器）销售额9.4亿美元，比2003年增长19%（见表13-1）。最近美国商业通讯公司进行市场分析后预测，到2008年世界市场商用固体激光器销售额将达到14.7亿美元，平均年增长约10%。固体激光器市场恢复快速发展为激光晶体材料行业的生产和销售提供市场和发展空间。

按国际惯用分类方法，激光器应用通常分为加工、医疗、仪器、科研等12类。在2004年固体激光器的9.45亿美元总销售额中，激光加工5亿美元，占总额的一半以上（53%），其次是激光医疗2.28亿美元，占24%，科研1.24亿美元，占13%，这三项共计90%（见表13-2），占总销售额中的绝大部分，反映出激光加工、激光医疗和科研是激光晶体材料的主要应用领域和主要市场，其中激光加工所占比例最大。

表 13-1 2001~2004 年世界固体激光器销售额和年增长率 (单位: 万美元)

项 目	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年
灯泵浦固体激光器	75 205	61 812	58 309	64 465
激光泵浦固体激光器	3760	2890	3038	3128
LD 泵浦固体激光器	13 940	19 232	18 151	26 983
合计	92 905	83 934	79 498	94 576
年增长率	4.4%	-9.6%	-5.3%	19.0%

表 13-2 2004 年固体激光器销售额按应用分类的统计 (单位: 万美元)

项 目	激光加工	激光医疗	仪器	科研	图像记录	传感	其他	合计
销售额	50 534	22 800	3266	12 421	1040	1100	3414	94 576
所占比例	53%	24%	3%	13%	1%	1%	4%	100%

### 13.2.2 国外材料发展现状

从组成上看, 激光晶体一般包含激活离子和基质晶体两部分, 发射激光及激光的波长主要决定于掺入晶体中的少量激活离子及其与基质晶体的相互作用。常见的激活离子有稀土、过渡金属离子, 常见的基质晶体有氧化物、氟化物和含氧酸盐化合物晶体。表 13-3 示出常用的激活离子和基质晶体。

表 13-3 常用的激活离子和基质晶体

激活离子	稀土离子	$\text{Nd}^{3+}$ 、 $\text{Yb}^{3+}$ 、 $\text{Ho}^{3+}$ 、 $\text{Er}^{3+}$ 、 $\text{Tm}^{3+}$ 、 $\text{Ce}^{3+}$ 等
	过渡金属离子	$\text{Cr}^{3+}$ 、 $\text{Ti}^{3+}$ 、 $\text{Cr}^{4+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 等
基质晶体	氧化物晶体	钇铝石榴石 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (YAG)、钆镱石榴石 $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (GGG)、钆钪镱石榴石 $\text{Gd}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ (GSGG)、蓝宝石 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 等
	氟化物晶体	氟化钇锂 $\text{YLiF}_4$ (YLF)、氟铝铈锂 $\text{LiSrAlF}_6$ (LiSAF)、氟铝钙锂 $\text{LiCaAlF}_6$ (LiCAF) 等
基质晶体	含氧酸盐晶体	铝酸钇 $\text{YAlO}_3$ (YAP)、钽酸钇 $\text{YVO}_4$ 、钽酸钆 $\text{GdVO}_4$ 、铝酸铍 $\text{BeAl}_2\text{O}_4$ 、氟磷酸铈 $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ (S-FAP)、钨酸钆钾 $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ (KGW)、硼酸铝钇 $\text{YAl}(\text{BO}_3)_4$ (YAB)、硼酸氧钇钙 $\text{CaY}_4(\text{BO}_3)_3\text{O}$ (YCOB) 等

已经研制出几百种激光晶体实现了激光运转, 但获得实际应用的只有其中的几十种, 目前国外商品化的实用激光晶体近 20 种<sup>[3]</sup>, 按材料的特性和用途分类, 其分类及生产状况如下。

#### (1) 高功率激光晶体

高功率激光晶体是指用于输出平均功率达到数百瓦以上高功率激光器的晶体。国外商品化的高功率激光晶体主要有掺钕钇铝石榴石 ( $\text{Nd}:\text{YAG}$ )、掺钕铝酸钇 ( $\text{Nd}:$

YAP)、掺钕铬钒钕石榴石(Nd: Cr: GSGG)、红宝石(Cr: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)等。高功率激光晶体广泛应用于工业、军事、医疗、科研等领域。在高功率激光晶体中, Nd: YAG 晶体最重要, 它既是重要的高功率激光晶体, 又是应用最广泛的激光晶体, 既适合灯泵浦, 又适合 LD 泵浦, 适用于各种脉冲、连续激光器, 军用激光系统中绝大部分是 Nd: YAG 激光器。国外 Nd: YAG 晶体生产销售商超过 30 家, 规模化生产, 产量占激光晶体总量的 50%~65%。美国 VLOC 公司、Northrop Grumman 公司生产的 Nd: YAG 晶体, 直径  $\phi 90\sim 100\text{mm}$ , 长度 200~300mm。

### (2) LD 泵浦激光晶体

LD 泵浦激光晶体用于 LD 泵浦的全固体激光器, 是一类应用广泛的激光晶体。多数激光晶体既可用灯泵浦, 也可用 LD 泵浦, 但有些晶体由于具有吸收谱线宽、荧光寿命长、发射截面大等特点, 采用 LD 泵浦可以获得高效率低阈值激光运转。国外商品化的 LD 泵浦晶体主要有: 掺钕钒酸钇(Nd: YVO<sub>4</sub>)、掺钕氟化钇锂(Nd: YLF)等。LD 泵浦激光器输出功率高、光束质量好、寿命长、结构更紧凑, 在军事、工业、医疗、科研等领域应用越来越广泛, 是固体激光器发展的主要方向。Nd: YVO<sub>4</sub> 是目前大量应用的 LD 泵浦激光晶体, 主要用于 1.06 $\mu\text{m}$  和 0.53 $\mu\text{m}$  微片激光器。国外 Nd: YVO<sub>4</sub> 晶体生产销售商超过 20 家, 规模化生产, 生产规模仅次于 Nd: YAG 晶体, 产量约占激光晶体总量的 10%。Nd: YLF 是另一种很有特色应用普遍的 LD 泵浦激光晶体, 主要用于超短脉冲和单模、单频激光器。国外生产销售商超过 17 家, 规模化生产, 生产规模仅次于 Nd: YAG 和 Nd: YVO<sub>4</sub> 晶体, 产量约占激光晶体总量的 10%, 美国 VLOC 公司和 Northrop Grumman 公司生产的晶体尺寸达到  $\phi (40\sim 50)\times(150\sim 200)\text{mm}$ 。

### (3) 可调谐激光晶体

可调谐激光晶体是指主要用于可调谐激光器的晶体, 其激光器中介入色散元件后, 输出的激光波长可在较宽的频率范围内连续可调。国外商品化的可调谐晶体主要有: 掺钛蓝宝石(Ti: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)、金绿宝石(Cr: BeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)、掺铬氟铝铈锂(Cr: LiSAF)、掺铬氟铝钙锂(Cr: LiCAF)、掺铈氟铝铈锂(Ce: LiSAF)、掺铥钕铝石榴石(Tm: YAG)等, 可调谐激光晶体广泛应用于科研、军事和医疗。Ti: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 是应用最广泛的室温工作宽带可调谐激光晶体, 可调谐的波长范围 660~1180nm, 主要用于脉冲、连续可调谐激光器和飞秒级超短脉冲、太瓦级超强脉冲激光器。Ti: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体采用提拉法(CZ)、热交换法(HEM)等方法生长, 国外约有 16 家公司生产销售, 其中美国约有 9 家, 规模化生产, 美国 Northrop Grumman 公司采用 CZ 法生长, 最大晶体尺寸  $\phi (100\times 300)\text{mm}$ , Crystal Systems 公司用 HEM 法生长, 晶体直径  $\phi 100\text{mm}$ 。

### (4) 新波长激光晶体

新波长一般是指除 1 $\mu\text{m}$  以外的其他激光波长。目前国外商品化的新波长激光晶

体主要有： $2\mu\text{m}$  掺钕铬铈钇铝石榴石 (CHT: YAG, 即 Ho: Cr: Tm: YAG)、掺钕铈钇铝石榴石 (Ho: Tm: YAG)、掺钕铈氟化钇锂 (Ho: Tm: YLF) 和  $3\mu\text{m}$  的掺铒钇铝石榴石 (Er: YAG) 晶体等。 $2\mu\text{m}$  和  $3\mu\text{m}$  激光晶体主要用于脉冲和 Q 开关激光器, 广泛应用于激光医疗、军事和科研, 由于医疗应用发展迅速, 生产规模很快得到扩大, 国外约有 10 家公司生产销售, 批量生产。表 13-4 示出国外商品激光晶体及其主要应用和生产状况。

表 13-4 国外商品激光晶体及其主要应用和生产状况

晶体名称	主要波长	用于激光器	主要应用领域	生产状况
Nd: YAG	$1.064\mu\text{m}$	各种脉冲、连续	加工、军事、医疗、科研	规模化
Nd: YAP	$1.079\mu\text{m}$	各种脉冲、连续	加工、军事、科研	批量
Nd: Cr: GSGG	$1.061\mu\text{m}$	高平均功率脉冲	加工、军事、科研	批量
Cr: $\text{Al}_2\text{O}_3$	$0.6943\mu\text{m}$	高平均功率脉冲	加工、医疗、军事、科研	批量
Nd: $\text{YVO}_4$	$1.064\mu\text{m}$	脉冲、连续	科研、军事、仪器、测量	规模化
Nd: YLF	$1.047\mu\text{m}/1.053\mu\text{m}$	脉冲、连续、超短脉冲	军事、科研	规模化
Ti: $\text{Al}_2\text{O}_3$	$660\sim 1180\text{nm}$	可调谐、超短脉冲	军事、科研、医疗、仪器	规模化
Cr: $\text{BeAl}_2\text{O}_4$	$700\sim 830\text{nm}$	可调谐	军事、科研、医疗、仪器	小批量
Cr: LiSAF	$760\sim 920\text{nm}$	可调谐, 超短脉冲	科研、军事	小批量
Cr: LiCAF	$720\sim 840\text{nm}$	可调谐, 超短脉冲	科研、军事	小批量
Ce: LiSAF	$280\sim 310\text{nm}$	可调谐	科研、军事	小批量
Tm: YAG	$1870\sim 2180\text{nm}$	脉冲、连续可调谐	科研、军事	小批量
CHT: YAG	$2.097\mu\text{m}$	脉冲	医疗、科研、军事	批量
Ho: Tm: YAG	$2.097\mu\text{m}$	脉冲、连续	医疗、科研、军事	批量
Ho: Tm: YLF	$2.06\mu\text{m}$	脉冲、连续	医疗、科研、军事	批量
Er: YAG	$2.94\mu\text{m}$	脉冲	医疗、科研、军事	批量

### 13.2.3 国外材料发展趋势

从材料技术发展上看, 材料的发展需要进一步挖掘现有实用晶体的潜能, 提高性能和质量, 发展生产; 与此同时研制出性能优秀新的激光晶体材料, 以满足日益扩大的应用需求; 发展晶体制备新技术新工艺, 以适应材料技术和产业发展的需要。

从器件发展上看, 固体激光技术的发展方向有高功率、全固体化、高光束质量、高稳定性、长寿命、可调谐、多波段、短脉冲等许多方面, 为满足器件应用需求, 激光晶体材料发展的主要方面有高功率、LD 泵浦、可调谐、新波长及复合功能激光晶体等。

① 高功率激光晶体方面。继续大力发展大尺寸高质量 Nd: YAG 晶体及其规模化生产, 研发大尺寸高均匀性 Nd: GGG 晶体, 研制掺 (Nd, Yb) 的高功率激光新晶体, 如掺 (Nd, Yb) 的 S-FAP 晶体等。

② LD 泵浦激光晶体方面。继续发展 Nd:  $\text{YVO}_4$  晶体、Nd: YLF 晶体规模化生产, 大力研发新的高效率低阈值 LD 泵浦激光晶体, 如掺 (Nd, Yb) 的  $\text{GdVO}_4$ 、KGW 晶体等。

③ 可调谐激光晶体方面。继续发展 Ti: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体、Cr: BeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 晶体、Cr: LCAF 晶体、Cr: LSAF 晶体规模化生产, 研制新的紫外、可见、中红外波段可调谐激光晶体, 如掺 Ce<sup>3+</sup>、Tm<sup>3+</sup>、过渡金属离子的可调谐新晶体。

④ 新波长激光晶体方面。继续发展 2μm 和 3μm 掺 (Ho、Er、Tm) 的 YAG、YLF 晶体及其规模化生产, 研发实用的人眼安全波段、3~5μm、紫外和蓝绿光波段激光新晶体。

⑤ 复合功能激光晶体方面。发展激光晶体扩散键合技术和复合激光晶体规模生产, 同时研发自倍频、自调 Q 激光晶体, 如 Nd: YCOB 晶体、Nd: YAB 晶体等。

### 13.3 国内激光晶体材料及行业发展现状与趋势

#### 13.3.1 国内材料发展现状与趋势

我国激光晶体材料研究始于 20 世纪 60 年代初, 1961 年研制成功红宝石晶体并制成我国的第一台激光器。经过 40 余年的努力, 激光晶体材料科研、开发和生产在我国取得了很大发展。Nd: YAG 晶体已形成批量生产能力, 质量达到国外产品的先进水平; Nd: YVO<sub>4</sub> 晶体实现批量生产, 质量得到国外认可, 福建物构所、山大晶体材料所及其依托公司生产的产品销售到国外市场; 西南技术物理所与长春应化所合作研制开发的高效低阈值 Nd: Ce: YAG 晶体已批量生产, 产品在军用激光测距系统中获得广泛应用; 上海光机所用感应加热温场上移法 (IFSM) 和温度梯度法 (TGT) 生长的 Ti: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体, 掺 Ti 浓度达到国际领先水平; 华北光电所研制的 Nd: YLF 晶体在我国惯性约束聚变 (ICF) 激光驱动器——“神光 II”装置中获得应用, 打破了外国这种晶体对我国封锁和禁运; 军事、国民经济和科研领域使用的大量激光晶体材料靠自己研制、生产, 并有部分产品进入国际市场。

自 1961 年以来, 我国研制过几十种激光晶体, 已获得商品生产的约 20 余种<sup>[4]</sup>, 主要的有: Nd: YAG、Nd: YAP、Yb: YAG、Tm: YAG、Nd: Ce: YAG、Ho: Cr: Tm: YAG、Er: YAG、Cr: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Nd: YVO<sub>4</sub>、Nd: YLF、Ho: Er: Tm: YLF (HET: YLF)、Cr: LiSAF、Cr: LiCAF、Ti: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Cr: BeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、键合激光晶体等。

在商品生产的晶体中, 目前具有批量生产能力、年产值超过 1000 万元的晶体有 Nd: YAG、Nd: YVO<sub>4</sub>、Nd: Ce: YAG。其中生产规模最大的是 Nd: YAG 晶体, 全国生产单位十几家, 批量生产, 稳定供货, 年产值超过 4000 万元, 晶体采用熔体提拉法生长, 目前晶体直径 60~80mm, 等径长度 150~230mm。其次是 Nd: YVO<sub>4</sub> 晶体, 生产单位近 10 家, 批量生产, 正常供货, 年产值超过 1500 万元, 晶体采用熔体提拉法生长, 晶体尺寸  $\phi$  (20~30) × (30~40) mm。再有 Nd: Ce: YAG 晶体,

生产单位 3~4 家, 批量生产, 正常供货, 年产值超过 1000 万元, 晶体采用电阻加热和感应加热提拉法生长, 晶体尺寸  $\phi(20\sim50) \times (100\sim150)$  mm。其余晶体少量或小批量生产, 其中有的由于产业化能力较差, 有的由于国内相应激光器件及应用开发迟缓, 目前没有实现批量生产。表 13-5 示出我国商品激光晶体及其生产状况。

表 13-5 我国商品激光晶体及其生产状况

晶体名称	生长方法和晶体尺寸/mm	生产状况	年产值/万元
Nd:YAG	感应 CZ 法, $\phi(50\sim65) \times (150\sim230)$ 电阻 CZ 法, $\phi(20\sim30) \times (100\sim150)$	大批量, 十几家生产, 稳定供货	约 4000
Nd:Ce:YAG	感应 CZ 法, $\phi(40\sim50) \times (100\sim150)$ 电阻 CZ 法, $\phi(20\sim30) \times (100\sim150)$	批量, 3~4 家生产, 供货稳定	约 1000
Yb:YAG	感应 CZ 法, $\phi(50\sim65) \times (150\sim200)$	小量, 5 家生产	
Nd:YAP	电阻 CZ 法, $\phi(20\sim30) \times (100\sim150)$	小量, 3 家生产	
Nd:GGG	感应 CZ 法, $\phi(50\sim70) \times (50\sim60)$	小量, 2 家生产	
Cr:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	感应 CZ 法, $\phi(20\sim30) \times (100\sim150)$	小量, 1 家生产	
Nd:YVO <sub>4</sub>	感应 CZ 法, $\phi(20\sim30) \times (30\sim40)$	批量, 近 10 家生产, 供货稳定	约 1500
Nd:GdVO <sub>4</sub>	感应 CZ 法, $\phi(30\sim35) \times (30\sim50)$	小量, 4 家生产	
Nd:YLF	电阻 CZ 法, $\phi(25\sim35) \times (100\sim150)$	小量, 2 家生产	
Ti:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	感应 CZ 法, $\phi(30\sim40) \times (100\sim150)$ TGT 法, IFSM 法, $\phi(50\sim100) \times (50\sim60)$	小量, 4 家生产	
Cr:BeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	感应 CZ 法, $\phi(30\sim35) \times (100\sim150)$	小量, 1 家生产	
Cr:LiSAF	电阻 CZ 法, $\phi(25\sim35) \times (100\sim150)$	小量, 2 家生产	
Cr:LiCAF	电阻 CZ 法, $\phi(25\sim35) \times (100\sim150)$	小量, 2 家生产	
CHT:YAG	感应 CZ 法, $\phi(50\sim60) \times (100\sim150)$	小批量, 4 家生产	
HET:YLF	电阻 CZ 法, $\phi(25\sim35) \times (100\sim150)$	小量, 1 家生产	
Tm:YAG	感应 CZ 法, $\phi(50\sim60) \times (100\sim150)$	小量, 3 家生产	
Er:YAG	感应 CZ 法, $\phi(50\sim60) \times (100\sim150)$	小批量, 5 家生产	
键合激光晶体		小批量, 2 家生产	

我国激光晶体材料发展趋势与国外基本一致, 重点是发展大尺寸高质量 Nd:YAG 晶体及其规模生产, 增大晶体尺寸, 发展晶体生长自动控制技术及自动化生长设备, 提高产品质量一致性和工艺稳定性; 发展 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体、Nd:Ce:YAG 晶体、Nd:YLF 晶体、Nd:YAP 晶体、Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体、CHT:YAG 晶体、Cr:LiSAF 晶体、Cr:LiCAF 晶体批量生产, 推动应用; 加速研制开发大尺寸高均匀性 Nd:GGG 晶体及其他掺 (Nd、Yb) 的高功率激光晶体; 大力研制开发新的 LD 泵浦、可调谐、新波长及复合功能激光晶体; 发展晶体生长、扩散键合、光学加工和镀膜的高新技术新工艺。

### 13.3.2 国内行业发展现状及市场

我国激光晶体材料行业已有 40 年历史, 逐步发展壮大。在发展的初期 (20 世纪 60~70 年代), 由中科院和工业部门研究院所、高等院校、工厂等十多家单位开展研究和开发工作, 取得了大量科技成果, 为我国在这一领域的发展打下了良好基础。据

统计, 1999 年全国生产单位 13 家<sup>[5]</sup>, 商品生产的晶体约 15 种。进入 21 世纪, 在改革开放和国有制单位体制改革的形势之下, 一些研发、生产单位吸收内资或外资, 整合资源, 成立股份制公司或民营公司, 改变生产经营管理模式, 几年内, 生产单位由十几家增加到二十几家, 生产规模也得到扩大, 到 2004 年可以实现产品生产的晶体 20 余种, 生产销售单位 24 家从业人数 600 余人, 年产值超过 7000 万元。

目前, 我国行业的地区分布在北京、上海、四川、福建、山东、安徽、吉林、湖北、广东、浙江、河北、河南等省市。研发实力强、有一定生产规模的骨干单位主要分布在北京、上海、四川、福建、山东、安徽、吉林等地。

行业的骨干单位是较早从事本行业研发、生产的科研院所、高等院校和工厂以及后来依托这些骨干单位成立的公司, 如华北光电所、西南技术物理所、上海光机所、福州物质结构所、山东大学晶体材料所、安徽光机所、中科院物理所、北京人工晶体研究院、长春应化所、华侨大学、成都光明器材厂、重庆华光仪器厂、吉林激光材料厂等, 及其依托公司。骨干单位一般同时从事科研、开发和生产, 大多数从 20 世纪 60 年代起从事本领域的科研开发工作, 科研开发能力强, 并取得了大量的科研成果。

YAG 晶体在我国是最主要的产品, 销售额占激光晶体总数的 70%~80%, YAG 激光器及应用市场基本能反映我国激光晶体材料市场及应用情况。根据中国光学光电子行业协会激光专业分会的统计, 2001~2003 年我国 YAG 激光器及应用市场销售形势很好, 2001 年销售额增长 33.5%, 2002 年增长 36.4%, 2003 年增长 8.6%, 三年平均年增长 26.1% (见表 13-6)。2003 年 98 255.6 万元总销售额中, 激光加工 57 132.02 万元, 占总数的 58%, 表明目前我国 YAG 晶体用于工业加工所占的比例最大。

表 13-6 2001~2003 年我国 YAG 激光器及应用销售额和年增长率

(单位: 万元人民币)

2001 年		2002 年		2003 年	
销售额	年增长率/%	销售额	年增长率/%	销售额	年增长率/%
66 288.6	33.5	90 447.5	36.4	98 255.6	8.6

2001~2003 年我国激光晶体销售形势也很好, 虽然 2001 年销售额下降 43.8% (表 13-7), 但三年平均还是快速上升, 2002 年销售额 3969.11 万元, 增长 56.6%, 2003 年销售额 5476.6 万元, 增长 37.9%, 三年平均年增长 16.9%。2004 年总产值超过 7000 万元, 但由于国内 YAG 晶体市场销售价格竞争激烈, YAG 晶体元件的销售价格比几年前下降较多, 因此, 尽管销售数量有较大幅度增长, 但总销售额增幅不会太高, 估计 2004 年总销售额可超过 6000 万元, 年增长约 10%。预计 2005 年销售数量和销售额会有较大幅度增加, 销售额将超过 7000 万元, 年增长高于 16%。

近两年, 我国激光晶体材料销售额增长较快, 实际上是 YAG 晶体增长较快。原



因有供求两方面，在需求方面，得益于我国 YAG 激光器及应用市场几年来快速增长，如 2001~2003 年 YAG 激光器销售额平均年增长高达 212.6%，YAG 激光打标机、焊接机市场需求旺盛，几乎供不应求；在晶体生产方面，得益于国有制单位体制改革带来的资源整合和扩大规模，如华北光电所 YAG 晶体的生产规模扩大了一倍多。

表 13-7 2001~2003 年我国激光晶体产品销售额和年增长率

(单位：万元人民币)

2001 年		2002 年		2003 年	
销售额	年增长率/%	销售额	年增长率/%	销售额	年增长率/%
2536.82	-43.8	3969.11	56.6	5476.6	37.9

## 13.4 产业化前景

目前，我国激光晶体材料年产值不到 1 亿元，还处于产业化进程之中，但是发展前景看好。产业的形成和发展，首要条件是日益增大的市场需求，固体激光技术在军事、工业、医疗、科研领域的应用越来越广泛，在其他领域的应用也将随着技术的发展不断地拓宽，日益增大的应用孕育着巨大的需求市场，主要表现在以下方面。

### (1) 军用需求快速增长

固体激光在军事上已广泛应用于激光测距、目标指示、跟踪制导、激光照明、激光雷达、激光干扰、光电对抗等，目前武器装备中使用的各种激光系统绝大部分是晶体激光器。光电武器装备的研制、生产和更新换代，必然需求大量的激光晶体材料。在发展人眼安全激光测距、多波长激光雷达、空间和水下通信、激光制导武器、红外定向干扰、战术战略高能激光武器等新型武器装备方面，对激光晶体材料又提出大量需求，因此，随着国防现代化进程，军用需求的快速增长成为材料产业发展的一个重要方面。

### (2) 工业应用需求迅速增长

激光加工已成为改造传统加工工业的一条重要途径，也是目前固体激光技术应用发展最迅速的领域，国内外激光加工已形成高速发展的高新技术产业，例如 2001~2003 年我国 YAG 激光加工设备销售额平均年增长达到 37.5%。随着汽车、电子、航空、钢铁、机械等工业的迅速发展，输出平均功率大到数千瓦、小到几十瓦的固体激光切割机、标记机、焊接机、微加工机等激光加工设备大量用于各种工业生产，发展速度很快，成为推动材料产业发展的巨大需求市场。

### (3) 医疗应用需求高速增长

固体激光治疗仪已广泛应用于几乎所有医学专科,成为提高医疗技术和人类健康水平的一条重要途径。激光医疗已逐步形成独立的产业,国内外固体激光医疗设备生产发展很快,例如2001~2003年我国仅YAG激光医疗设备销售额平均年增长达到43.6%。近年来国外 $2.1\mu\text{mHo:YAG}$ 激光治疗仪、 $2.94\mu\text{mEr:YAG}$ 激光治疗仪、多波长激光治疗仪、全固体激光治疗仪等新型激光医疗设备大量用于医学治疗,大大拓宽了固体激光在医疗中的应用范围。目前我国生产的激光治疗仪仍然是以 $1.06\mu\text{mNd:YAG}$ 激光治疗仪为主,今后激光治疗应用发展空间很大,对激光晶体材料的需求量将有大量增加。

#### (4) 科研应用需求稳步增长

固体激光器作为光源或手段广泛用于科学研究和文化教育领域,如激光核聚变、激光等离子体、激光分离同位素、激光测量、激光光谱、激光化学、激光生物学等,在科研院所、高等院校等研究机构获得广泛应用,2001~2004年世界固体激光器科研应用销售额平均年增长12.2%。随着科技、教育的发展,这方面应用越来越普遍,对激光晶体材料的需求将稳定增长。

#### (5) 其他应用需求逐步增长

激光技术渗透性很强,随着技术的发展,应用领域将不断地拓展,逐步应用于通信、环保、能源等领域,固体激光拓宽应用领域成为材料需求的新增长点。

产业的发展除了要有巨大的需求市场外,还要有日益壮大的产业群体。目前我国激光晶体材料行业在北京、上海、四川、福建、山东、安徽、吉林等地已有集科研、开发、生产于一体的骨干单位,在国家的扶持下,以这些骨干单位为基础,建立若干各具强项和特色的研发平台和生产基地,并带动本行业和地区其他企业的技术和生产发展,辐射至全国,逐步形成规模巨大的材料产业群体,推动产业的形成和发展。

从全球行业的发展趋势看,由于我国改革开放,经济高速发展,孕育着我国有全球最大的激光和光电子产品市场,未来世界激光晶体行业的地域和研发生产将逐步转向中国,促使我国的产业群体不断壮大,从而加速我国产业化的进程。

## 13.5 存在问题、对策与发展战略、建议

### 13.5.1 存在问题

我国激光晶体材料及行业近年来虽然发展较快,但也存在不适应产业发展的种种问题,主要表现在以下几方面。

#### (1) 晶体生产设备自动化技术条件差

晶体生长和生产设备控制技术比较落后,自动化程度低,晶体的质量一致性和工

艺稳定性较差。目前发达国家采用晶体直径自动控制技术和自动化程度高的设备生长晶体,这方面我国与发达国家差距很大。

#### (2) 晶体尺寸及质量与国际水平有差距

Nd: YAG、Nd: YLF、提拉法 Ti: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等产品的晶坯尺寸与国际先进水平有一定差距,光学质量和光学均匀性有改进的余地,优质产品和高端产品少,产品在国际市场中竞争力不强。

#### (3) 晶体光学加工、镀膜条件差

我国激光晶体元件生产中,光学加工、镀膜是薄弱环节。光学加工和镀膜设备不先进,加工和镀膜的质量与国际先进水平有差距,影响我国激光晶体元件产品大量进入国际市场。

#### (4) 产品生产批量能力差

Nd: YAG 晶体是我国主要产品,全国生产单位十几家,除少数几家生产规模较大外,其余规模都较小,未形成规模生产,在正常供货时间内,一般难以满足批量大的订货要求,失去了大宗订货客户。

#### (5) 投资少、科研成果产业化转化慢

我国激光晶体材料科研水平较高,高水平的研究成果也很多,但由于研究成果与产业化衔接不力,经费投资不足,科研成果向产业转化慢,不少成果通过鉴定后未能进入中试生产阶段,经济效益不能实现。

#### (6) 科技创新能力差

我国激光晶体材料研究科技创新能力不足,有独立知识产权的创新性成果和产品少,专利产品和名牌产品少,技术储备和产业发展后劲有待提高。

### 13.5.2 发展战略

(1) 统筹规划,建设激光晶体材料研发平台和产业化基地,形成完整的科研、开发、生产体系。选择对国民经济影响大和军民应用前景看好的晶体项目,发展规模生产和规模经济,推动产业化进程,满足市场和国民经济发展的需求。

(2) 加强基础研究、应用研究和条件建设,增加技术储备和发展后劲,加大科技创新和成果向产业转化力度,发展名优品牌产品,全面提高我国激光晶体材料及元件的技术、质量水平和国际竞争实力,逐渐增大我国激光晶体材料产业在全球所占份额。

具体措施如下。

(1) 在北京、上海、四川、福建、山东、安徽、吉林等地区建立各具强项和特色的激光晶体材料研发平台和产业化基地,形成较完善的科研、开发、生产体系和较大规模的生产能力。发展 Nd: YAG、Nd: YVO<sub>4</sub>、Nd: Ce: YAG、Ho: Cr: Tm:

YAG、Nd: YLF、Nd: YAP、Ti: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等晶体批量生产, 产品的数量和质量满足军、民用激光器件使用要求。

(2) 在已有产品基础上, 加速开发 Yb: YAG、Nd: GGG、Nd: GdVO<sub>4</sub>、Ho: Tm: YAG、Ho: Tm: YLF 等晶体, 形成批量生产能力, 投入市场推动应用。

(3) 有独立知识产权的创新性成果占 20% 以上, 科技成果转化率达到 50%, 主要产品的技术、质量水平与国际先进水平接轨, 产品出口数量有较大幅度增加, 国际市场占有率达 20% 以上。

### 13.5.3 对策建议

提出以下一些对策和建议。

(1) 完善科技开发、产业化协调机制和政策, 提高研发和产业化资金投入, 促进激光晶体材料科研成果快速产业化。

(2) 设立青年科技人员创新基金, 鼓励创新和积极承担新材料应用试验。

(3) 加强激光晶体材料技术标准的修订和制定工作, 建立与国际接轨的行业或国家标准体系。

(4) 建立知识产权专利数据库, 研究部署专利战略, 通过立法保护知识产权(限制性、原创性专利的申请), 促进自主知识产权的创新和发展。

(5) 加强激光晶体材料技术研发平台的建设, 开展战略性新材料创新研究, 支撑国防、国家重点工程, 并满足新产品市场的需求。

(6) 整合资源, 建立几个激光晶体材料研发、生产基地, 支持高品位材料的发展和基地建设。

### 参 考 文 献

- 1 KATHY KINCADE et al. Consumer applications boost laser sales 10%. Laser Focus World. 2005 (1): 83~99
- 2 中国光学光电子行业协会激光分会秘书处. 2003 年中国激光产业的发展. 激光集锦. 2004, 14 (2, 3): 36~40
- 3 Frank T. Lauinger. Laser crystals/Rods. Laser Focus World 2005 buyers Guide. Volume 41 Issue 2: 170~172
- 4 张万鲲. 电子信息材料手册. 北京: 化学出版社, 2001. 38~44
- 5 电子信息材料咨询研究组. 电子信息材料咨询报告. 北京: 电子工业出版社, 2000, 6

### 作者简介

**徐学珍** 硕士, 高级工程师, 电子十一所激光材料研究部主任。主要从事激光晶体生长和性能研究工作, 已取得的成果主要有“高均匀性低损耗大尺寸 Nd: YAG 晶体”、“大尺寸高质量 Nd: YAG 晶体”和“激光晶体单程损耗测量”, 已通过部级技术鉴定, 达到国际先进和国内领先水平。在国外学术会议和刊物上发表论文 1 篇, 在国内刊物上发表论文 3 篇。

**桂尤喜** 教授级高级工程师，20 世纪 70 年代起从事 Nd: YAG 等激光晶体生长和性能研究工作，从“六五”开始主持和参加了国家“863”计划项目和国防科工委科研项目多项，取得多项成果，获得科技进步奖国家三等奖 1 项，部级特等奖 1 项、一等奖 3 项和二等奖 1 项，中国发明专利 2 项。发表论文 20 余篇。

**袁桐女**，高级工程师，1962 ~ 1987 年在原电子工业部第 12 研究所从事电真空材料的应用研究、试验及技术管理工作。曾在电真空用纯铁、玻璃、陶瓷、电子焊料、低膨胀合金、微波吸收材料等科研中获得国防科工委、电子部科技成果一、二、三等奖。撰写、翻译论文 30 多篇。参加《集成电路全书》、《电真空器件生产技术手册·材料篇》、《电子工业年鉴·材料篇》等书的编写工作。现在中国电子材料行业协会工作任副秘书长。