

文章编号: 1000-324X(2006)05-1025-06

# 激光晶体的现状及发展趋势

徐 军, 苏良碧, 徐晓东, 赵志伟, 赵广军

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要:** 在分析激光晶体的研究现状的基础上, 指出其未来应用及主要发展趋势: 面向先进制造技术、激光武器等应用的 ( $1\mu\text{m}$  波段) 高功率、大能量激光晶体; 面向人眼安全、遥感、光通讯、医疗等应用的红外激光晶体; 面向全色显示、光刻等应用的蓝绿紫和可见光激光晶体; LD 泵浦超快激光增益和放大介质材料。

**关 键 词:** 激光晶体; 激光二极管泵浦; 全固态激光器; 超快激光

**中图分类号:** O78      **文献标识码:** A

## 1 引言

激光材料是激光技术发展的核心和基础, 具有里程碑的意义和作用: 20 世纪 60 年代第一台红宝石晶体激光器问世, 激光诞生<sup>[1]</sup>; 70 年代掺钕钇铝石榴石 (Nd:YAG)<sup>[2]</sup>, 固体激光开始大力发展; 80 年代钛宝石晶体 ( $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ )<sup>[3]</sup>, 超短、超快和超强激光已成为可能, 飞秒 (fs) 激光科学技术蓬勃发展、并渗透到各个基础研究和应用学科领域; 90 年代碲酸钕晶体 ( $\text{Nd:YVO}_4$ )<sup>[4]</sup>, 固体激光的发展进入新时期—全固态激光科学技术 (SSDPL, Solid-state LD Pumped Laser); …… 进入新世纪, 上世纪 60 年代初出现的激光和激光科学技术, 正以其强大的生命力推动着光电子技术和产业的发展, 激光材料也在单晶、玻璃、光纤和陶瓷等四方面全方位迅猛展开, 如微-纳米级晶界, 完整性好、制作工艺简单的微晶激光陶瓷和结构紧凑、散热好、成本低的激光光纤, 正在向占据激光晶体首席达 40 年之久的 Nd:YAG 发出强有力的挑战, 激光材料也已从最初的几种基质材料发展到数十种<sup>[5]</sup>, 受到各国政府、科学界乃至企业界的高度重视。

## 2 国内外现状和研究进展

### 2.1 高功率激光晶体

Nd:YAG 的出现使得固体激光器真正开始大力发展, 并实现商业化, 因其增益高、热性能和机械性能良好而成为当前科研、工业、医学和军事应用中最重要、最重要的固体激光器。特别是在高功率连续和高平均功率固态激光器方面, 20 世纪 90 年代前, 闪光灯泵浦的 Nd:YAG 激光晶体独占鳌头, 单根棒的输出功率可达 kW 量级。随着激光二极管 (LD) 的迅速发展, 大功率激光器的泵浦方式也有重大发展。LD 泵浦激光器的高效率、高质量、长寿命、高可靠性、小型化以及全固化等优越性是灯泵无法相比的。1993 年, LD 泵浦的 Nd:YAG 板条已获得 1.05kW 的平均输出功率<sup>[6]</sup>。

收稿日期: 2005-09-12, 收到修改稿日期: 2005-11-07

基金项目: 国家高技术 863 计划 (2002AA311030); 国家杰出青年基金 (60245516)

作者简介: 徐 军 (1965-), 男, 博士, 研究员。 E-mail: xujun@mail.shcnc.ac.cn

通过基质晶体中阳离子置换形成的 Nd:GGG 激光晶体, 与 Nd:YAG 比较具有如下优点: (1)Nd<sup>3+</sup> 在 GGG 中的分凝系数为 0.5, 是 YAG(0.18) 的近三倍; (2)Nd:GGG 的平界面生长较 Nd:YAG 的凸界面更容易获得大尺寸、高质量的单晶体. 而且, 由于 Nd:GGG 具有好的热机械性能、化学稳定性、高的热导率, 是新一代战略武器级高功率固体热容激光器的优选工作物质<sup>[7]</sup>. 2003 年, 美国利弗莫尔国家实验室 LD 泵浦的 Nd:GGG 激光器的平均输出功率已经达到 10kW, 在 2004 年又突破 30kW, 预期到 2007 达到一个脉冲 100kW, 每秒 200 个脉冲. 作为战略武器级的 Nd:GGG 热容激光器, 其功率必须达到 100kW 以上<sup>[8]</sup>. 目前所生长的晶体尺寸还没有达到战略武器级的需要. 按照美国利弗莫尔国家实验室 Nd:GGG 热容激光器方案, 晶体的直径至少在  $\phi 160\text{mm}$  以上. 所以, 大直径优质激光晶体是发展固体强激光的前提和基础.

作为轻便型的激光器, 必须实现 LD 泵浦下的全固化. 但是, Nd:YAG 和 Nd:GGG 在 808nm 的吸收峰线宽仅 1nm, 而典型 LD 输出线宽达 3nm, 且发射波长存在  $0.2\sim 0.3\text{nm}/^\circ\text{C}$  的温度系数. 因此, 采用 LD 泵浦 Nd:YAG 时, 为了提高泵浦效率, 使 LD 的输出波长正好对准 Nd:YAG 的吸收峰, 需要使用额外的制冷装置控制 LD 的工作温度. 为此, 国际上掀起了探索适于 LD 泵浦的高效率、宽吸收带激光晶体的研究热潮. Yb<sup>3+</sup> 与 Nd<sup>3+</sup> 相比具有如下优点<sup>[9]</sup>: (1)能级结构简单, 高浓度掺杂不产生荧光猝灭; (2)与晶场耦合作用强, 具有宽得多的吸收峰线宽, LD 泵浦下无需要温度控制系统; (3)前者的荧光寿命一般为后者的 4 倍, 更有利于储能; (4)量子缺陷较低, 无辐射弛豫引起的材料中的热负荷低, 仅为掺 Nd<sup>3+</sup> 同种激光材料的三分之一. 因此, LD 泵浦的 Yb:YAG 固体激光器的输出功率很快就赶上了在固体激光器领域一直占垄断地位的 Nd:YAG, 从最初的 23mW 增加到千瓦量级<sup>[10]</sup>. 从上世纪 90 年代初, 许多国际著名研究机构如美国的 Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)、林肯实验室 (MIT)、德国斯图加特大学和 JENA 大学、瑞士联邦工学院、英国南安普敦大学、法国 LULI 实验室、日本大阪大学和 HOYA 公司等纷纷开展了 Yb 激光器件的研究, 将其视为发展高功率激光的一个主要途径. 国外, 1991 年, 美国林肯实验室 (MIT) 首次在室温下采用 InGaAs 二极管泵浦 Yb:YAG 晶体获得 23mW 连续激光输出<sup>[9]</sup>. 2004 年, Yb:YAG 圆盘激光器的输出功率已经达到 4kW<sup>[11]</sup>. 国内, 上海光机所于 1997 年在国内首次获得了 400mW 的连续激光输出<sup>[12,13]</sup>, 并与法国 LULI 实验室联合正在发展 LD 泵浦 Yb:YAG 平均输出 kW 级、100J(ns) 的 LUCIA 激光系统<sup>[14]</sup>. 2005 年, 清华大学采用 2000W 的 LD 泵浦 Yb:YAG 晶体获得了 520W 的连续激光输出<sup>[15]</sup>. 最近, 又首次在国内获得了 1000W 的激光输出, 基本达到国际同等水平.

但是, Yb:YAG 晶体是一种准三能级激光系统, 室温下激光下能级 ( $\sim 612\text{cm}^{-1}$ ) 的热布居比例为 4.2%<sup>[16]</sup>. 因此, Yb:YAG 具有较高的泵浦阈值功率, 且激光性能受温度的影响很大, 必须通过冷却晶体获得高效率的激光运转. 为此, 寻找新的基质晶体或通过结构、组成设计获得低阈值、高效率的掺 Yb 激光介质是一个主要的研究方向.

## 2.2 中、小功率激光晶体

与 Nd:YAG 比较, Nd:YVO<sub>4</sub> 具有两个突出的特点<sup>[4]</sup>: 受激发射截面大, 比 Nd:YAG 大 5 倍; 808nm 具有相对宽的吸收带. 因此, Nd:YVO<sub>4</sub> 具有低的泵浦阈值, 特别适合用 LD 泵浦, 从而实现了商品化的全固态激光器. 对于 LD 泵浦掺 Nd 介质腔内倍频实现 532nm 的激光输出, Nd:YVO<sub>4</sub> 是一种最重要的材料. 这是因为在端面泵浦的系统中, 泵浦光束通常是高度聚焦的, 很难在超过几毫米的距离内维持小的束腰, 而吸收截面和增益都很高的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体就具有很大的优势. 例如, 中国科学院北京物理所和福建物构所等采用 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体

为激光增益介质, LBO 为倍频材料, 通过腔内倍频, 在泵浦功率为 21.1W 时, 获得输出功率为 5.25W 的连续绿色激光。

但是, Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的物化性能差, 大尺寸晶体生长有一定的困难. 美国曾尝试采用 Nd:Sr<sub>5</sub>(VO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>F(SVAP) 取代 Nd:YVO<sub>4</sub>. Nd:SVAP 是在 Nd:FAP 晶体的基础上, 经离子置换发展起来的一种新晶体, 它保留了 FAP 的增益截面大、泵浦阈值低的优点, 而机械性能有较大改进<sup>[17]</sup>.

### 2.3 超快激光晶体

20 世纪 70~80 年代, 超快激光主要是采用被动锁模的染料激光器, 可以产生亚 ps 级的短脉冲激光. 80 年代末期, 发现了可调谐范围为 660~1100nm 的钛宝石 (Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 其带宽非常有利于实现 fs 激光脉冲, 而且具有受激发射截面大、激光损伤阈值高等优点. 2001 年, 采用 Kerr 透镜被动锁模, 获得了平均功率为 100mW, 脉宽为 5~6fs 的激光脉冲, 并且首次实现了 fs 脉冲运转下的波长宽带 (400nm) 调谐<sup>[18]</sup>. 钛宝石激光器基本上取代了染料激光器在超短脉冲激光领域中的位置, 成为了最主要的超短脉冲激光振荡源。

太瓦、飞秒 (注: 太瓦即 TW, 10<sup>12</sup>W; 飞秒即 fs, 10<sup>-15</sup>s) 超快高功率激光在物理、化学以及生命科学等领域的强场物理研究、激光惯性约束核聚变 (ICF) 等方面具有广阔的应用前景<sup>[19]</sup>. 自 1991 年世界上第一台自锁模钛蓝宝石激光器研制成功以来, 在短短的 10 多年里, 钛蓝宝石激光器的脉宽从最初的皮秒 (ps) 发展到现在的几飞秒 (6.5fs), 峰值功率由瓦提高到太瓦甚至拍瓦 (即 PW, 10<sup>15</sup>W), 受到了世界各国的极大关注最为典型的是美国劳伦斯·里弗莫尔实验室 (LLNL) 获得了 430fs、1.3PW、10<sup>21</sup>W/cm<sup>2</sup> 的激光辐照强度, 这一强度超过产生等离子体要求阈值的 1000 倍, 该系统采用了 3 块大尺寸片状钛宝石晶体 (两块  $\phi$ 100mm, 一块  $\phi$ 80mm) 作为放大器. 因此研制出高光学均匀性、高浓度均匀性、大直径的钛宝石激光晶体, 对于发展超短、超快、超强 (“三超”) 激光器具有重要意义。

美国 Crystal System 公司 F.Schmid 等人采用热交换法 (HEM) 可以生长出大尺寸 (直径 >80mm)、高质量的 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光晶体. 该方法是目前世界上生产优质 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体的主要方法之一, 但它难于在零双折射方向 (0001) 上生长单晶, 因此晶体利用率低. 上海光机所的导向温度梯度法是生长大尺寸、高掺钛浓度 (0.45wt%)、高峰值吸收系数 (490nm 处达 7.0cm<sup>-1</sup>) 和高完整性 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体的有效技术<sup>[5]</sup>. 自 1996 年起, 先后生长并提供优质的 10mm×10mm×15mm、15mm×15mm×15mm、 $\phi$ 20mm×15mm、 $\phi$ 25mm×20mm 和  $\phi$ 30mm×15mm 器件晶体, 并继 1996 年在国内首先建成了 2.8TW/43fs 小型化 CPA (啁啾脉冲放大) 钛宝石超短超强激光装置, 于 1998、2001 和 2002 年, 先后将该激光系统升级到 5.4、16 和 23TW. 2004 年, 采用 55×40×23mm<sup>3</sup> 激光晶片, 在国内突破 100TW 大关 (120TW/36fs). 更大尺寸如  $\phi$ 80mm、 $\phi$ 100mm 的钛宝石激光晶片和 500TW、1PW 钛宝石超短超强激光输出正在进一步的发展之中。

随着高性能 LD 的快速发展, 具有高效率、小型化、集成化的 LD 泵浦全固态超快激光器成为这一领域的另一主要研究方向. 由于钛宝石的吸收带位于 400~600nm, 无法采用 LD 直接泵浦. 而适合高性能 InGaAs 二极管泵浦的掺镱 (Yb<sup>3+</sup>) 激光介质成为了这一领域研究的焦点. 与 Nd<sup>3+</sup> 等其他稀土离子相比, 由于 Yb<sup>3+</sup> 离子在晶场中具有强的电-声子耦合效应, 掺 Yb 激光介质普遍具有较宽的吸收和发射带, 有利于产生超短脉冲. 通过选择或设计合适的基质晶体, 可以获得更短的激光脉冲. 例如, 最初采用 Yb:YAG, 产生的激光脉宽为 340fs<sup>[20]</sup>. 之后开展了大量具有宽带发射特性的掺 Yb 激光介质的研究工作, 并获得了很大的进展. 例如, 2004 年, Yb:SYS 晶体在 1066nm 处获得了平均功率为 156mW 的 70fs 的激光

脉冲,其工作波长可以在 1055~1072nm 范围内连续调谐<sup>[21]</sup>.可以预测,随着具有更加优异综合性能基质晶体的出现<sup>[22]</sup>,以及超快激光器在加工、医疗等方面应用的独特优势,LD 泵浦全固态超快激光器不仅在科研,而且在实现工业化的技术上将有重大突破.

## 2.4 可见光激光晶体

目前,采用激光晶体产生可见光激光的主要途径有:(1)LD 泵浦的腔内倍频 1 $\mu$ m 波段激光;(2)自倍频激光;(3)近红外 LD 泵浦上转换可见光激光等. LD 泵浦腔内倍频 Nd<sup>3+</sup>激光是目前最成熟的一种技术,一般采用 Nd:YLF 或 Nd:YVO<sub>4</sub> 等晶体作为激光介质, KTP 或 LBO 为倍频材料,产生 532nm 绿色激光. Nd:YAB, Yb:YAB 自倍频绿光激光器也是广泛应用的激光光源,用自倍频激光器实现绿光输出比腔内倍频激光器在原理上简单,是一种比较实用和经济的方法.与 Nd:YAB 相比, Yb:YAB 由于在倍频波段没有自吸收,是有希望获得实用化的自倍频晶体.当前存在的主要问题是晶体质量较差.以 Er<sup>3+</sup>, Ho<sup>3+</sup>, Tm<sup>3+</sup> 为激活离子的红外泵浦上转换可见光激光具有良好的应用前景,一直是人们努力研究的一个方向.早在 1971 年, Bell 实验室的 Johnson 等采用 960nm 泵浦 Yb<sup>3+</sup>, Er<sup>3+</sup>:BaY<sub>2</sub>F<sub>8</sub> 和 Yb<sup>3+</sup>, Ho<sup>3+</sup>:BaY<sub>2</sub>F<sub>8</sub> 晶体分别获得了 670.0 和 551.5nm 的可见光激光发射<sup>[23]</sup>. 1997 年,采用钛宝石泵浦 Er<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>:LiYF<sub>4</sub> 获得了 37mW 的 551nm 激光输出<sup>[24]</sup>. 2002 年,采用钛宝石泵浦 Er<sup>3+</sup>:LiLuF<sub>4</sub> 获得了 213mW 的绿色激光输出,斜效率为 35%<sup>[25]</sup>.根据基质声子能量越低越有利于能量上转换发光的原理,在 Ba<sub>2</sub>ErCl<sub>7</sub> 和 Cs<sub>3</sub>Er<sub>2</sub>Cl<sub>9</sub> 等新晶体中获得了强度比 Er:LiYF<sub>4</sub> 大两个数量级的上转换绿光<sup>[26]</sup>.

## 2.5 中红外激光晶体

2~5 $\mu$ m 的中红外波段覆盖 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 等几个重要的分子吸收带,在医学、遥感、激光雷达和光通讯等方面有着重要的应用.激光波长位于这一波段的激活离子主要有 Tm<sup>3+</sup>、Er<sup>3+</sup>、Ho<sup>3+</sup> 等,通常采用的基质晶体主要有 YAG、YAP 和 LiYF<sub>4</sub> 等.

早在 1965 年, Johnson 等人在 Bell 实验室就实现了钨灯泵浦 Tm:YAG 晶体产生激光振荡<sup>[27]</sup>,由于当时振荡是在低温条件下(77 和 85K)进行的,阈值很高,为 200~500J, Tm:YAG 激光器的进一步研究没有引起重视. 1997 年,美国利弗莫尔国家实验室采用 805nm 的 LD 端面泵浦 Tm:YAG 获得了 115W 的 2 $\mu$ m 连续激光输出,斜效率高达 40%<sup>[28]</sup>.但 Tm:YAG 晶体的各吸收带都很窄(~4nm), LD 泵浦需要很好的冷却系统.同时, Tm:YAG 晶体的激光性能受温度影响很大,温度猝灭现象较严重,对激光晶体也需要采用良好的冷却方式.

Ho<sup>3+</sup>:YAG 性质类似于 Tm<sup>3+</sup>:YAG,但无法采用高亮度的 LD 进行泵浦.位于 Ho<sup>3+</sup> 吸收带内发射波长为 1.9 $\mu$ m 的 LD,具有非常宽的发射带(>12nm)和低的亮度,因此不能与 Ho:YAG 有效耦合.采用 Tm<sup>3+</sup> 为敏化剂的 Tm, Ho:YAG 在 LD 泵浦作用下 2.1 $\mu$ m 平均输出功率达 10W,但存在严重的热透镜效应. 2000 年, Budni 等采用 LD 泵浦的输出功率为 36W 的 Tm:YLF 激光器共振泵浦 Ho:YAG 获得 19W 的连续激光输出<sup>[29]</sup>.采用合适的离子组合或基质晶体实现 LD 泵浦的高效率 Ho<sup>3+</sup> 激光运转存在很大的发展空间.

Er<sup>3+</sup> 除了 1.5 $\mu$ m 激光外, 3 $\mu$ m 激光也被广泛应用. 1996 年, LD 泵浦 Er(15%):YLF 获得了 1.1W 的 2.8 $\mu$ m 的激光输出,斜效率为 35%<sup>[30]</sup>. LD 泵浦 Er(50%):YAG 也获得了 1.15W 的 2.94 $\mu$ m 激光<sup>[31]</sup>.为了获得 Er<sup>3+</sup> 的 3 $\mu$ m 激光,一个必要的条件是必须高浓度掺杂(一般>10at%).这是因为低浓度掺杂, Er<sup>3+</sup> 离子 3 $\mu$ m 激光的上能级 <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 寿命小于下能级 <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>,激光发射是自终止的.当掺杂浓度增加时,由于 Er<sup>3+</sup> 离子之间的交叉弛豫作用,激光上、下能级的寿命均下降,而后的下降速率大于前者.因此,当 Er 离子的浓度增加到一定程度时,下能级寿命变得小于上能级,从而有利于 3 $\mu$ m 激光运转.众所周知, Er 离子高浓度

掺杂条件下存在强烈的能量上转换, 因此激光效率必然受到限制. 可以设想, 采用合适的去激发离子如  $\text{Ce}^{3+}$  共掺, 与 Er 离子的  $^4I_{13/2}$  能级形成共振能量转移, 可以大幅度地降低该能级的寿命, 从而在适中的掺杂浓度下实现 Er 离子  $3\mu\text{m}$  高效的激光运转.

### 3 激光晶体的主要发展趋势和优先发展方向

纵观固体激光器的应用现状和发展前景, 现阶段激光晶体的主要发展趋势是迫切发展如下 4 个方面, 并将取得突破和实际应用: (1) High-power & energy solid state laser materials ( $1\mu\text{m}$ ) 面向先进制造技术、激光武器等应用的高功率、大能量激光晶体 ( $1\mu\text{m}$  波段), 如 Yb:YAG、Nd:GGG 等; (2) Mid- & far-IR solid state laser materials 面向人眼安全、遥感、光通讯、医疗等应用的红外激光晶体; (3) Visible & UV solid state laser materials 面向全色显示、光刻等应用的蓝绿紫和可见光激光晶体; (4) Super-fast solid state laser materials LD 泵浦超快激光增益和放大介质材料.

### 4 需要解决的重要科学问题

在激光材料的基础研究和应用基础研究方面, 中长期主要研究趋势和目标将会集中在如下几方面:

1. 发展在原子、分子和基团尺度上, 激光材料 (单晶、玻璃、光纤、陶瓷) 的组成、结构设计和制备的科学研究.

2. 研究过渡金属离子 ( $\text{Cr}^{3+}$ 、 $\text{Cr}^{4+}$ 、Ti)、重金属离子 (Bi、Mn、V)、稀土离子 (Yb、Nd、Er、Tm、Pr、Ho、Ce、Eu) 等重要激活离子在单晶、玻璃态、纳米晶等基质中的价态、发光规律、能量传递转移 (重点合作发光) 及其与晶格相互作用的机理; 全量子理论、Judd-Ofelt、Forster 和 Dexter 理论的光谱分析和数据处理.

3. 重点开展复合功能 (如自调 Q、自倍频、自拉曼 Raman 频移和敏化、上转换、退激活) 和复合结构 (如 “Sandwich” 三明治、“Glass-Ceramic” 玻璃陶瓷、有机-无机复合结构、光-电集成微结构) 激光材料的研究, 这是激光材料的一个重要发展方向——全固化、集成化、小型化和多功能化.

4. 发展新一代宽波段高功率可调谐、超快 (ps、fs、as)、超强 (TW、PW) 激光增益材料和光放大材料. 解决当前和今后 CPA 和 OPCPA 技术、光孤子通讯技术等发展中的关键技术瓶颈问题, 并为未来紫外-可见光、 $1\mu\text{m}$ 、 $1.55\mu\text{m}$ 、中红外和远红外等宽波段高功率可调谐、超快、超强激光打下物质基础.

5. 发展新一代高功率激光材料. 面向未来先进激光制造、激光显示等民用、工业领域.

6. 发展新一代大能量固态热容激光材料. 瞄准未来 “新概念” 武器, 即激光武器.

7. 关于微-纳结构激光波导、光子晶体激光光纤材料的理论与应用的交叉基础研究.

8. 晶态 (单晶、陶瓷) 和非晶态 (玻璃、光纤) 激光材料的生长、制备技术的突破, 特别是大尺寸高浓度激光晶体的生长、复合激光材料的制备.

9. 晶态 (单晶、陶瓷) 和非晶态 (玻璃、光纤) 激光材料的微观缺陷 (包括点缺陷) 及其形成机理, 以及在 LD 高泵浦功率密度下 (有别于以往灯泵) 对材料热性能、发光性能和激光性能的影响.

10. 与器件紧密结合, 研究其激光性能和激活损伤的微观机理.

## 参考文献

- [1] Maiman T H. *Nature*, 1960, **(187)**: 493–494.
- [2] Danielmeyer H G, Ostermayer F W. *J. Appl. Phys.*, 1972, **(43)**: 2911–2913.
- [3] Moulton P F. *opt. News*, 1982, **(8)**: 9–13.
- [4] Shazer L De. *Laser Focus World*, 1994, February: 88–90.
- [5] 干福熹 (Gan Fuxi), *Laser Materials*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 1995.
- [6] Comaskey B. *CLEO'93 Technical Digest Series*, 1993, **(11)**: 276.
- [7] Yoshida Kunio, *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **(24)**: 1–6.
- [8] Parker A. S & TR, *April*, 2002. 19–21.
- [9] Lacovara P, Choi H K, Wang C A, *et al.*, *Opt. Lett.*, 1991, **(16)**: 1089–1091.
- [10] Sumida D S, Betin A A, Bruesselbach H, *et al.* *Laser Focus World*, 1999, June: 63–68.
- [11] Wallace J. *Laser Focus World*, 2004, September: 19–20.
- [12] Yin Hongbin, Deng Peizhen, Gan Fuxi. *J. Appl. Phys.*, 1998, **(830)**: 3825–3828.
- [13] Zhao Guangjun, Si Jiliang, Xu Xiaodong, *et al.* *J. Crystal Growth*, 2003, **(252)**: 355–359.
- [14] Fulop A, Bourdet G, Chanteloup J C, *et al.* *Proc. SPIE*, 2005, **5708**: 20–31.
- [15] Liu Q, Gong M, Lu F, *et al.* *Opt. Lett.*, 2005, **30**: 726–728.
- [16] Krupke W F. *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, 2000, **(6)**: 1287–1296.
- [17] Shen D, Wang C, Shao Z, *et al.* *Appl. Opt.*, 1996, **(35)**: 3203–3206.
- [18] Ell R, *et al.* *Opt. Lett.*, 2001, **(26)**: 373–375.
- [19] Keller U. *Nature*, 2003, **(424)**: 831–838.
- [20] Honninger C, Paschotta R, Graf M, *et al.* *Appl. Phys. B*, 1999, **(69)**: 3–17.
- [21] Drouin F, Chacutenaïs S, Raybaut P. *Opt. Lett.*, 2002, **(27)**: 1914–1917.
- [22] Su L B, Xu J, Li H J, *Opt. Lett.*, 2005, **30**: 1003–1005.
- [23] Johnson L F, Guggenheim H J. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, **19**: 44–47.
- [24] Mober P E-A, Heumann E, Huber G. *Opt. Lett.*, 1997, **22**: 1412–1414.
- [25] Heumann E, Bär S, Kretschmann H, *et al.* *Opt. Lett.*, 2002, **27**: 1699–1701.
- [26] Egger P, Rogin P, Riedener T, *et al.*, *Adv. Mater.*, 1996, **8**: 668–672.
- [27] Johnson L F, Geusic J E, Uitert L G Van. *Appl. Phys. Lett.*, 1965, **7**: 127–129.
- [28] Honea E C, Beach R J, Sutton S B, *et al.* *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**: 1592–1600.
- [29] Budni P A, Lemons M L, Mosto J R, *et al.* *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, 2000, **6**: 629–635.
- [30] Jensen T, Dening A, Huber G, *et al.* *Opt. Lett.*, 1996, **21**: 585–587.
- [31] Chen Da-Wun, Fincher Curt L, Rose Todd S, *et al.* *Opt. Lett.*, 1999, **24**: 385–387.

## Recent Developments and Research Frontier of Laser Crystals

XU Jun, SU Liang-Bi, XU Xiao-Dong, ZHAO Zhi-Wei, ZHAO Guang-Jun

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** Recent developments and research status of laser crystals were reviewed. In the authors' points, the main developing trends and research frontier in this field should be focused in the following four directions. First, high-power and large-energy laser crystals at 1  $\mu\text{m}$  for advanced fabricating techniques and novel laser weapons. Second, practical mid-infrared laser crystals for eye-safety, remote sensing, optical communications, medical treatment, etc. Third, laser crystals emitting at UV and visible regions for color displaying and optical lithography. Fourth, super-fast laser gain and amplifier media suitable for LD pumping.

**Key words** laser crystals; LD pumping; all-solid-state lasers; super-fast laser