

## 锗酸盐激光晶体的探索

臧竞存 邹玉林 刘燕行

(北京工业大学材料科学与工程学院, 北京, 100022)

摘要: 从晶体结构上分析了锗酸盐的单晶生长和作为激光晶体基质的特点, 并介绍了锗酸盐作为可调谐激光晶体, 自倍频晶体, 高转换效率和低泵浦阈值的激光晶体的研究及进展。

关键词: 激光晶体 锗酸盐单晶 可调谐激光

## Study on laser crystals of germanate

Zang Jincun, Zou Yulin, Liu Yanhang

(Institute of Materials Science and Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing, 100022)

**Abstract:** In view of the crystal structure, this paper reports the character of single crystal growth of germanate and the properties as medium of laser crystal. The study and progress in germanate crystals used as widely tunable laser crystal, self-doubling-frequency crystal and highly efficient and low pumping threshold laser crystal are introduced.

**Key words:** laser crystals germanate single crystal tunable

### 引 言

可调谐激光晶体的应用领域包括激光分离同位素, 激光光谱学, 非线性光学, 并且日益向生物学, 医学及材料科学领域渗透。锗酸盐作为可调谐激光晶体, 自倍频晶体, 高转换效率和低泵浦阈值的激光晶体日益受到人们重视。可调谐激光晶体借助过渡金属离子  $d-d$  跃迁易受晶体场影响的特点, 而使其激光波长在一定范围内可以调谐。1982 年, 掺钛宝石 ( $Ti^{3+} : Al_2O_3$ ) 在室温产生了极宽范围的可调谐激光, 优良的激光性能使其受到了广泛的重视, 经过多年研究, 晶体质量不断提高, 品质因数  $Q$  达到 200 以上。终于在 80 年代末开始商品化, 成为继  $Nd^{3+} : YAG$  之后影响最大的激光晶体。钛宝石的成功极大地刺激了可调谐激光晶体的探索和研究, 形成新高潮。取得较大突破和进展的主要有四类: (1) 以  $Cr^{4+} : Mg_2SiO_4$ <sup>[1]</sup> 即镁橄榄石为代表, 探索  $Cr^{4+}$  离子在不同基质材料中的激光特性。这不仅有 YAG 这样一些传统激光晶体, 也时有新的激光基质晶体出现, 如  $Cr^{4+} : LiAlO_2$ <sup>[2]</sup> 等。(2) 以  $Cr^{3+} : LiSAF$ <sup>[3]</sup> 为代表的低晶体场的  $Cr^{3+}$  离子激光晶体, 包括  $Cr^{3+} : ZnWO_4$ <sup>[4]</sup> 等。(3) 以  $Co^{2+} : MgF_2$ <sup>[5]</sup> 为代表的 +2 价过渡金属离子激活的氟化物晶体, 激活离子为  $Co^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $V^{2+}$  等。以上三类因电子跃迁终端是电子振动能极, 所以又称为终端声子激光晶体。(4) 以  $Tm^{3+} : YAG$ <sup>[6]</sup> 为代表的稀土离子宽带可调谐激光晶体。这是由于  $Tm^{3+}$  离子能级的密集而产生跃迁谱带连成一片, 造成宽的调谐范围。锗酸盐单晶主要是在镁橄榄石的研究影响下开展起来的。为了寻找替代  $Mg_2SiO_4$  的材料, 研究了掺  $Cr^{4+}$  的硅锌矿  $Cr^{4+} : Zn_2SiO_4$ <sup>[7]</sup>, 其光谱显示在光通讯波段有优良的宽带发射, 但是该晶体生长困难, 需要加助溶剂采用高温溶液法生长<sup>[8]</sup>。人们又开始把搜寻的目标转向锗酸盐单晶。

## 1 锆酸盐的结构特点

硅酸盐除了极少数高压相外,一般以四面体配位互相连接。与硅不同的是锆在常压下可以有四配位结构,也可以有六配位结构,甚至可以在同一种晶体结构中同时有四配位和六配位结构,如  $\text{GeO}_2$  可以是四配位的石英型,也可以是六配位的具有八面体结构的金红石型;在  $\text{Na}_4\text{Ge}_9\text{O}_{10}$  中则同时有四配位 Ge 和六配位  $\text{Ge}^{[9]}$ 。

锆的离子半径要比硅的离子半径大,因而在锆酸盐单晶中,掺杂的激活离子种类就会比硅酸盐有较大的灵活性,表 1 列出了 Si, Ge, Cr 和 Ti 的结晶化学参数,以供分析。从表中可以看出,4 价四配位锆和 4 价四配位锆的有效离子半径相差 2pm,这种置换晶格畸变很小。锆离子的有效半径与  $\text{Cr}^{4+}$  六配位时相当接近,如果这种置换发生,就有可能在可见光区有宽带荧光,而不是通常  $\text{Cr}^{4+}$  进入四面体场在红外区 1.1~ 1.5 $\mu\text{m}$  产生荧光,它的理论分析已经说明了这一点<sup>[10]</sup>,但是最终仍要靠实验检验。

锆酸盐熔点一般比硅酸盐低。 $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  晶体熔点较高,需要铱坩埚真空中生长,气氛中氧含量的增加会导致铱的消耗增大,而获得  $\text{Cr}^{4+}$  又必须有一定的氧分压,三价与四价铬离子的控制成为该晶体是否获得激光输出的关键。锆酸盐熔点低,有可能使用高温抗氧化性能较好的铂坩埚,在大气气氛下生长,这也是考虑生长锆酸盐调谐激光晶体的原因之一。

表 1 结晶化学参数<sup>[9]</sup>

元素	原子序数	符号	化合价	电子构型	配位数	离子半径(pm)	电负性
锆	32	Ge	+ 4	$3d^{10}$	4	39.0	2.01
					6	53.0	
硅	14	Si	+ 4	$2p^6$	4	26	1.90
					6	40.0	
					6	61.5	
铬	24	Cr	+ 4	$3d^2$	4	41	1.66
					6	55	
钛	22	Ti	+ 3	$3d^1$	6	67.0	1.54

激光晶体对晶体结构对称性并无特殊要求。非线性晶体只能在无对称中心的晶体中寻找。自倍频激光晶体的兴起证明,激光工作物质在无对称中心的材料中完全可以产生激光。事实上红宝石激光器就不具有对称中心。一般来说,有对称中心的晶体中,激光上能级寿命较长,储能效果好。荧光寿命受多种因素影响。同样是宝石( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 基质,  $\text{Cr}^{3+}$  离子荧光寿命为毫秒量级,而  $\text{Ti}^{3+}$  离子仅有 3 $\mu\text{s}$ ,相差 3 个数量级。红宝石中  $\text{Cr}^{3+}$  离子的<sup>2</sup>E 能级与基态<sup>4</sup>A<sub>2</sub> 是禁阻跃迁,形成中间态亚稳能级。在低晶体场材料中,  $\text{Cr}^{3+}$  离子的<sup>2</sup>E 能级与<sup>4</sup>T<sub>2</sub> 能级组成混合能级,造成荧光寿命降低,约在 5~ 100 $\mu\text{s}$  范围。由锆酸盐对称性低而断言不可能成为激光晶体是缺乏理论根据的,恰恰相反,激活离子进入低对称性的晶格位置,对于低阈值高效激光效应是头等重要的<sup>[11]</sup>。

锆酸盐有相变,但是比起硅酸盐相应的相变就少得多。如  $\text{SiO}_2$  通常有 7 种变体:  $\alpha$  方石英,  $\beta$  方石英,  $\alpha$  鳞石英,  $\beta$  鳞石英,  $\gamma$  鳞石英,  $\alpha$  石英,  $\beta$  石英。而  $\text{GeO}_2$  一般只有石英型和金红石型。相应的锆酸盐也不像硅酸盐有那样多的变体。

## 2 几种锆酸盐激光晶体

### 2.1 复合氧化物 $\text{Ba}_2\text{MgGe}_2\text{O}_7$ 和 $\text{Ba}_2\text{ZnGe}_2\text{O}_7$ <sup>[12]</sup>

这两种晶体的特点是阳离子的分布是无规则的,掺入的激活离子处于不同性质的格位上,

光谱线型属于非均匀加宽。它们能掺入较高浓度的稀土离子(分凝系数为 1)而不易发生浓度淬灭,所以有较高的激光效率。另外,它们还具有宽的荧光线条,故储能容量大。掺  $\text{Nd}^{3+}$  晶体波长分别为  $1.05436\mu\text{m}$  和  $1.05437\mu\text{m}$ , 室温工作阈值分别为 5.1W 和 4.5W, 辐射寿命为 0.4ms 和 0.34ms。

### 2.2 自信频晶体 $\text{LaBGeO}_5: \text{Nd}^{3+}$ [13]

$\text{LaBGeO}_5: \text{Nd}^{3+}$  晶体为三方晶系, 无对称中心, 空间群为  $L\bar{3}-P3_1$ 。  $\text{Nd}^{3+}$  的分凝系数较大, 晶体平均折射率  $n = 1.82$ , 折射率主轴符合 Sellmeier 关系。该晶体抗光损伤能力强。  $\text{Nd}^{3+}$  替代  $\text{La}^{3+}$  晶格位, 处于 Ci 对称位。最强荧光为  $\text{Nd}^{3+}$  离子的  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  跃迁的 1048.2nm, 发射截面  $\sigma_{\pi} = 2.4 \times 10^{-19} \text{cm}^2$ ,  $\sigma_{\sigma} = 1.8 \times 10^{-19} \text{cm}^2$ , 荧光寿命  $\tau = 280\mu\text{s}$ , 该晶体是一种自信频激光晶体。实验用的晶体被加工成  $1\text{mm} \times 1\text{mm} \times 4\text{mm}$  棱镜, 相位匹配沿  $c$  轴  $\theta_{\text{pm}} = 54^\circ$ , 激活离子浓度为 1.4at%, 在 210mW 泵浦功率下获得 60mW 连续激光输出, 泵浦阈值为 24mW, 斜率效率 33%。当腔调整到  $\text{TEM}_{00}$  振荡模式时, 肉眼可观察到 524nm 绿光发射 [14]。

### 2.3 光通讯波段的调谐晶体 $\text{Ca}_2\text{GeO}_4: \text{Cr}^{4+}$ [15,16]

$\text{Ca}_2\text{GeO}_4$  为一致熔融合合物, 熔点为  $1900^\circ\text{C}$ 。  $\alpha$  型  $\text{Ca}_2\text{GeO}_4$  为六方晶系,  $\gamma$  型为镁橄榄石结构, 晶型转变温度为  $1490^\circ\text{C}$ 。  $\text{Ca}_2\text{GeO}_4: \text{Cr}^{4+}$  单晶采用顶部孪晶法生长, 图 1 为  $\text{Ca}_2\text{GeO}_4: \text{Cr}^{4+}$  在室温(图中宽峰)和在液氮温度(图中锐峰)下用 670nm 激发的荧光光谱。

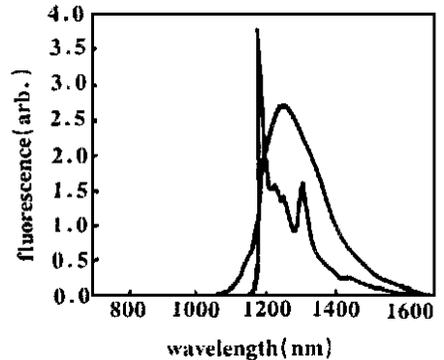


图 1 不同温度下 670nm 激发  $\text{Ca}_2\text{GeO}_4: \text{Cr}^{4+}$  荧光光谱

美国纽约州立大学 R. Alfano 等研制出室温工作的近红外可调谐激光晶体  $\text{Ca}_2\text{GeO}_4: \text{Cr}^{4+}$  (Cunyite), 它具有高增益、低损耗、无寄生振荡中心等优点, 其调谐范围  $1.3 \sim 1.6\mu\text{m}$ , 中心波

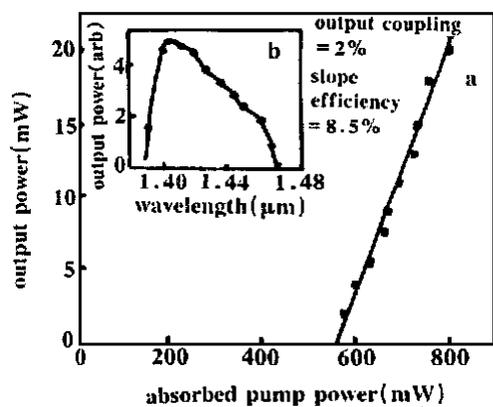


图 2  $\text{Ca}_2\text{GeO}_4: \text{Cr}^{4+}$  二极管泵浦激光输出特性  
a—斜率效率 b—调谐范围

长为  $1.410\mu\text{m}$ 。研究人员特别指出: 因为  $\text{Cr}^{4+}$  在结构中更加匹配, 不会像镁橄榄石中有  $\text{Cr}^{3+}$  杂质离子进入。直接二极管泵浦最大输出已达 20mW, 斜率效率为 8.5%, 约为  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4: \text{Cr}^{4+}$  4.5% 的 2 倍。腔镜输出耦合为 2% 时的泵浦阈值为 550mW。  $\text{Ca}_2\text{GeO}_4: \text{Cr}^{4+}$  单晶是光通讯较为理想的可调谐激光晶体。图 2 为  $\text{Ca}_2\text{GeO}_4: \text{Cr}^{4+}$  二极管泵浦激光输出特性。

### 2.4 $\text{CaZn}_2\text{Y}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}: \text{Nd}^{3+}$ 晶体 [17]

美国圣安托尼奥德克隆斯大学研制出  $\text{CaZn}_2\text{Y}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}: \text{Nd}^{3+}$  (CAZG: Nd) 晶体, 该晶体结构属石榴石型, 密度为  $5.11\text{g}/\text{cm}^3$ , 模氏硬度为 7~7.5, 热导率为  $0.058\text{W}/\text{cm}^\circ\text{C}$ , 折射率  $n = 1.83$ ,  $\text{Nd}^{3+}$  掺杂浓度为 2%, 在 805nm 有较宽的吸收峰,  $F_{3/2}$  的能级寿命为  $285\mu\text{s}$ , 因此, 比 1%  $\text{Nd}^{3+}: \text{YAG}$  (237 $\mu\text{s}$ ) 有更好的储能性,  $F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$  的发射截面  $\sigma_{\text{p}} = 3.3 \times 10^{-20} \text{cm}^2$ 。它可作为二极管泵浦产生 941nm 激光材料。

长春物理研究所研究了  $\text{Cr}^{3+}:\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  0.6%  $\text{Cr}^{3+}$  的晶体结构为立方晶系石榴石<sup>[18]</sup>, 晶格常数为  $a = 1.2105\text{nm}$ 。  $\text{Cr}^{3+}$  的吸收峰位于 634nm 和 450nm, 分别对应  ${}^4\text{A}_2 \rightarrow {}^4\text{T}_2$  和  ${}^4\text{A}_2 \rightarrow {}^4\text{T}_1$  跃迁。发射带位于 645~860nm, 在最强宽带 696nm 处有一小峰, 即 R 线, 低温时, 变得很强很锐。光谱测试可得到  $D_q = 1577.3\text{cm}^{-1}$ , Racah 参数  $B = 649.6\text{cm}^{-1}$ ,  $C = 2840\text{cm}^{-1}$ ,  $D_q/B = 2.43$ , 应属中等强度的晶体场。Stokes 位移  $\Delta E_S = 1884\text{cm}^{-1}$ 。通过 30K 低温高分辨发射光谱, 测出平均声子频率  $h\omega = 200\text{cm}^{-1}$ , 黄昆-里斯因子  $S = 5.21$ , 表明电子-声子耦合较强。零声子线位置  $E_0({}^4\text{T}_2) = 14831\text{cm}^{-1}$  及与  ${}^2\text{E}$  能级间距  $\Delta E$  为  $463\text{cm}^{-1}$ , 光谱分析表明, 有可能成为一种新型终端声子激光材料。

## 2.5 锆镓酸盐<sup>[19~21]</sup>

表 2 列出了三种锆镓酸盐的激光性能。其结构为  $\text{D}_3^2\text{P}321$ , 四方晶系, 图 3 为结构示意图。  $\text{Sr}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_4\text{O}_{14}:\text{Nd}^{3+}$  的泵浦阈值最低, 效率最高, 该晶体熔点为  $1370^\circ\text{C}$ , 一致共融, 可采用中频感应引上法, Pt-Rh 坩埚生长, 生长气氛为空气。

除了掺  $\text{Nd}^{3+}$  离子外, 我国上海光机所还研究了  $\text{Sr}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_4\text{O}_{14}$  晶体中  $\text{Cr}^{3+}$  和  $\text{Cr}^{4+}$  的光谱特性<sup>[20]</sup>。  $\text{Cr}^{3+}$  的  ${}^4\text{A}_2 \rightarrow {}^4\text{T}_2$  (中心波长为 620nm) 和  ${}^4\text{A}_2 \rightarrow {}^4\text{T}_1$  (中心波长为 433.6nm) 吸收带均比 ( $\text{Cr}^{3+}:\text{YAG}$ ) 晶体更偏红光方向。  $\text{Cr}^{3+}$  在八面体场强中的晶体场分裂能  $10D_q = 1612.9\text{cm}^{-1}$ , 电子相互作用参数即 Racah 参数  $B = 712.3\text{cm}^{-1}$ ,  $D_q/B = 2.26$ , 属低场。从吸收光谱分析, 可能有  $\text{Cr}^{4+}$  离子存在, 这可以从 1056.8nm 的吸收峰得到证明, 它相应于  $\text{Cr}^{4+}$  的  ${}^3\text{A}_2 \rightarrow {}^3\text{T}_2$  跃迁。这种晶体的晶格场低于金绿宝石, 发光调谐范围达 0.81~1.2 $\mu\text{m}$ , 与  $\text{ZnWO}_4:\text{Cr}$  相近, 是一种新型可调谐激光晶体。

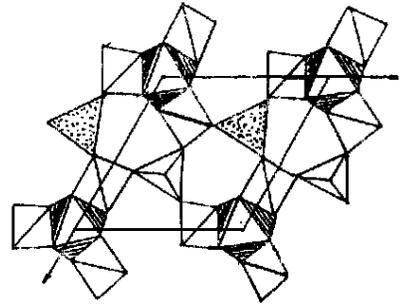


图 3  $\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_4\text{O}_{14}$  的晶体结构

表 2 掺  $\text{Nd}^{3+}$  (5at%) 锆镓酸盐单晶的激光性能(晶棒  $\parallel c$ , 长度为 3mm)

单晶	$P_i$ (mW)	$P_t$ (mW)	$P_0$ (mW)	$\mu$ (%)	$\lambda_m$ (nm)	$\tau$ ( $\mu\text{s}$ )	$\sigma_e$ ( $10^{-20}\text{cm}^2$ )
$\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_4\text{O}_{14}$	110	75	106	20	1068.8	200	5.6
$\text{Sr}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_4\text{O}_{14}$	85	65	130	24	1069.4	200	4.8
$\text{La}_3\text{Ga}_5\text{GeO}_{14}$	130	15	90	18	1067.5	200	5.8
(10mm)	100	80	101	19.5			

## 2.6 锆酸锂晶体

北京工业大学研究了  $\text{Li}_2\text{GeO}_3:\text{Cr}^{3+}$  晶体及光谱<sup>[22]</sup>。  $\text{Li}_2\text{GeO}_3$  为一致熔融化合物, 熔点  $1225^\circ\text{C}$ 。  $\text{Cr}^{3+}$  离子吸收峰为 545.6nm 和 762.2nm, 相应于  ${}^4\text{A}_2 \rightarrow {}^4\text{T}_1$  和  ${}^4\text{A}_2 \rightarrow {}^4\text{T}_2$  跃迁, 光谱分析 Racah 参数  $B = 573\text{cm}^{-1}$ ,  $C = 2292\text{cm}^{-1}$ ,  $D_q = 1277.9\text{cm}^{-1}$ ,  $D_q/B = 2.23$ , 属弱场。锆酸锂晶体属正交晶系, 空间群  $\text{Cmc}2_1(36)$ ,  $Z = 4$ , 晶胞参数  $a = 0.9637\text{nm}$ ,  $b = 0.5484\text{nm}$ ,  $c = 0.4884\text{nm}$ , 晶体中  $\text{Cr}^{3+}$  的发射在 850~970nm, 由于在 804nm 仍有较强的吸收, 这对于二极管泵浦较为有利。在锆酸锂晶体中, 用 250nm 激发, 观察到 408nm 和 468nm 的荧光发射, 其来源难以用  $\text{Cr}^{3+}$  离子的能级结构解释, 考虑到  $\text{Cr}^{4+}$  ( $CN = 6$ ) 和  $\text{Ge}^{4+}$  ( $CN = 6$ ) 的离子半径仅相差 2pm, 而碱金属氧化物会促使  $[\text{GeO}_4]$  形成  $[\text{GeO}_6]$ <sup>[23]</sup>, 因此, 处于八面体配位而不是四面体

配位,其光发射就不再是红外光区而是可见光区<sup>[24]</sup>。

生长单晶方法很多,作为激光基质的多采用 Czochralski(提拉)法,这要求组分为一致熔融化合物,无相变过程。 $\text{Li}_2\text{GeO}_3$ ,  $\text{Na}_4\text{Ge}_9\text{O}_{20}$ 和  $\text{K}_6\text{Ge}_{11}\text{O}_{25}$ 在热力学上均为稳定化合物,都属于一致熔融化合物,可以采用提拉法生长单晶。

此外,Huber<sup>[24]</sup>等研究了  $\text{Li}_4\text{Ge}_5\text{O}_{12}:\text{Ti}^{4+}$  单晶的光谱,认为激发态吸收和发射重迭,不可能实现激光输出。但是该晶体光学性能优良,完全可以作为  $\text{Cr}^{4+}$  离子的基质晶体。

### 3 结束语

锆酸盐激光晶体的研究虽然已引起人们关注,但毕竟刚刚起步,远未像其它激光晶体那样深入,尤其是对  $\text{Cr}^{4+}$  掺杂的调谐激光晶体需求,激发着人们进行新的探索。如  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ,  $\text{Mg}_2\text{GeO}_4$ ,  $\text{LiNbGeO}_4$  等晶体中均发现有  $\text{Cr}^{4+}$  的存在,对  $\text{NaREGeO}_4$  ( $\text{RE} = \text{Y}, \text{Gd}, \text{Lu}$ ):  $\text{Nd}^{4+}$  的光谱,偏振特性的研究也已经开始,可望有新发现。锆酸盐作为激光晶体中的一个新家族,已显示出其重要特点,在调谐激光晶体和二极管泵浦的低阈值高效激光材料方面,完全有可能诞生一批性能优良的新激光材料。除了开展光谱研究,更重要的是生长出高质量大尺寸单晶以检验其激光性能,创造具有我国特色的新激光晶体。

### 参 考 文 献

- Moncorge R, Cormier G, Sinkin D J *et al.* IEEE, 1991; QE27(1): 114~ 120
- Kuck S, Hartung S, Petermann K *et al.* Appl Phys, 1995; B61: 33~ 36
- Scheps R, Myers J F, Sereze H B *et al.* Appl Opt, 1991; 16: 820~ 822
- 臧竞存,董治长,江少林 *et al.* 激光技术, 1997; 21(1): 1~ 4
- Welford D, Moulten P F. Opt Lett, 1988; 13(11): 975~ 977
- Quarles G J, Rosenbaum A, Marquardt C *et al.* Opt Lett, 1990; 15(1): 42~ 44
- Pappalardo R G, Miniscalco W J, Peters J E *et al.* J Lumin, 1993; 55: 87~ 91
- Watanabe K. J Crystal Growth, 1991; 114: 373~ 379
- 利鲍 F. 硅酸盐结构化学. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989
- 邬承就. 人工晶体学报, 1993; 22(4): 384~ 390
- Nicholls J F H, Zhang X X, Bass M. Opt Commun, 1997; 137(4/6): 281~ 284
- 黄德群,单振国,干福熹. 新型光学材料. 北京: 科学出版社, 1991: 62, 84
- Capmany J, Bausa L E, Garcia-Sole J *et al.* J Lumin, 1994; 60-61: 78~ 80
- Capmany J, Bausa L E, Jaque D *et al.* J Lumin, 1997; 72-74: 816~ 818
- 中尧,三松. 激光技术, 1997; 21(2): 127
- 王光富. 光电子技术与信息, 1997; 10(2): 46
- Sardar D K, Vizcarra S, Islam M A *et al.* J Lumin, 1994; 60-61: 97~ 100
- 袁剑辉,刘行仁,赵福谭. 光电子·激光, 1995; 6(增刊): 230~ 234
- Ками́нский А А, Вердун Г Р, Ми́ль В В *et al.* Неорганические Ма́териа́лы, 1992; 28(1): 141~ 145
- Kaminskii A A, Belokoneva E L, Mill B V *et al.* Phys Status Solidi (a), 1984; 86(1): 345~ 363
- 徐 军,张 强,邓佩珍 *et al.* 光学学报, 1995; 15(7): 871~ 873
- 臧竞存,陈小兵. 北京工业大学学报, 1997; 23(1): 119~ 123
- 舒尔茨 H. 玻璃的本质、结构和性质. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984: 35~ 41
- Wong W C, Danger T, Huber G *et al.* J Lumin, 1997; 72-74: 208~ 210

\* \* \*

作者简介: 臧竞存,男, 1947年11月出生。教授。现从事激光晶体生长研究。