

文章编号: 1000-324X(2004)02-0275-08

透明陶瓷材料现状与发展

吉亚明, 蒋丹宇, 冯 涛, 施剑林

(中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050)

摘 要: 透明陶瓷的诞生使得高压钠灯得到实际应用. 近年来通过透明陶瓷技术可以解决单晶工艺中的某些难题, 并发展多晶代替单晶开发出了激光陶瓷、陶瓷闪烁体等新一代光学材料.

本文就透明陶瓷的现状和发展作一简要综述.

关 键 词: 透明陶瓷; 激光陶瓷; 陶瓷闪烁体

中图分类号: TQ 174 **文献标识码:** A

1 引言

自 1957 年美国陶瓷学家 Coble 制造出第一块透明氧化铝陶瓷“Lucalox”^[1~3], 透明陶瓷经过几十年的发展, 目前已经研制出了几十种透明陶瓷: 从过去的氧化铝透明陶瓷、氧化镁透明陶瓷、氧化钇透明陶瓷等发展到铝镁尖晶石透明陶瓷、氮化铝透明陶瓷、氮氧化铝透明陶瓷、透明 PLZT 电光陶瓷、钇铝石榴石激光透明陶瓷、以及 YGO、GGG、Gd₂O₂S 透明闪烁陶瓷等材料. 目前许多研究单位和公司都在从事新型透明陶瓷的研发.

根据透明陶瓷的用途和功能可将透明陶瓷分为透明结构陶瓷和透明功能陶瓷. 透明结构陶瓷主要用于高压钠光灯管、高温透视窗等方面, 包括氧化铝, 氧化钇, 氧化锆, 氧化镁及尖晶石透明陶瓷等结构材料. 透明功能陶瓷包括: 电光透明陶瓷(PLZT)、激光透明陶瓷(Nd:YAG)、闪烁透明陶瓷(YGO、GGG、Gd₂O₂S 等)等.

最近功能透明陶瓷尤其是透明激光陶瓷和闪烁陶瓷得到了广泛的研究与关注, 并取得了可喜的成果. 目前已成功地研制出透明 YAG 激光陶瓷^[4~6]和透明 YGO^[7]、Gd₂O₂S^[8,9]等闪烁陶瓷. Siemens 公司已经成功地将 Gd₂O₂S 陶瓷闪烁体应用于医学 X-CT, 制造出的 Ultrafast X-CT 具有优异的性能^[10]. 大大促进了新型透明陶瓷的研究与探索.

本文就影响陶瓷透明的因素, 透明陶瓷的制备方法和其最新进展及发展方向做一简要综述.

2 影响陶瓷透明的因素

陶瓷是一种多晶的无机材料, 陶瓷中存在大量的气孔、杂质、晶界等缺陷, 这些缺陷造成对光线强的散射和折射. 图 1 为透明陶瓷中光散射模型示意图.

因此, 通常陶瓷是不透明的, 但 1959 年 GE 公司的研究表明, 在一定结构条件下, 一些陶瓷会变得透明^[2,3].

大量研究结果表明, 对陶瓷透明性能的影响因素主要有以下几个方面.

收稿日期: 2003-02-13, 收到修改稿日期: 2003-04-17

作者简介: 吉亚明(1977-), 男, 硕士研究生. E-mail: ji-ym@mail.sic.ac.cn

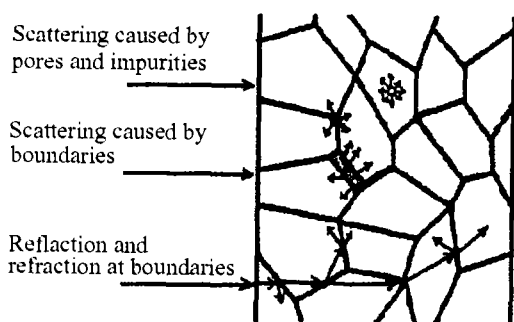


图 1 陶瓷中的主要散射效应

Fig. 1 Schematic diagram of the main scattering effects in ceramics

2.3 晶体结构

在各向异性的晶体中, 光从一个晶粒向邻近的晶粒入射时, 由于双折射现象会产生散射. 因此要得到透明的多晶体, 双折射必须很小. 一般选用对光各项同性的立方晶系材料制备透明陶瓷, 如 YAG、YGO、 Y_2O_3 [11~13] 等. 而对光各项异性的晶系则很难得到透明度很高的透明陶瓷, 如 Gd_2O_2Si [14]、 Lu_2SiO_5 [15] 等陶瓷的透明性则不是很好.

2.4 原料与第二相杂质

陶瓷中的杂质等第二相与基体的光学性质不一致, 往往成为散射和吸收中心, 大大降低陶瓷的透明性. 因此, 透明陶瓷体要求是均一、连续的单相结构. 这就要求原料必须具备高纯、超细、高分散等特性, 制备过程中不能引入杂质.

2.5 晶粒尺寸与添加剂

研究表明晶粒的尺寸大小和分布对陶瓷的透明性也有影响. 如果晶粒的直径与入射光的波长相同时晶粒对入射光散射最强. 晶粒直径小于入射光波长时光线可以容易地通过.

为了获得透明陶瓷, 有时需加入添加剂, 抑制晶粒生长, 依靠晶粒边界的缓慢移动把微气孔赶跑. 添加剂的用量一般很少, 且能均匀分布于材料中. 另外, 添加剂还应能完全溶于主晶相, 不生成第二相, 不破坏系统的单相性.

2.6 表面加工光洁度

透明陶瓷的透光率还受表面光洁度的制约. 表面粗糙度越大, 漫反射越严重, 陶瓷的透明度就越低. 由于陶瓷表面粗糙度与原料的细度有关. 因此应选用超细原料外, 此外还应应对陶瓷表面进行研磨和抛光.

其它研究表明陶瓷中的空位等点缺陷对陶瓷的透光率也有一定的影响 [16].

为了综合表示以上因素对透光率的影响, 陶瓷的透光率可用以下公式表示 [17]:

$$I/I_0 = (1 - R)^2 \exp(-mx) \quad (1)$$

其中 I 为透过光强度; I_0 为入射光强度; R 为光线反射率; m 为光线吸收系数; x 为试样厚度.

吸收系数 m 可以由下列公式算出:

$$m = \alpha + S_{im} + S_{op} \quad (2)$$

其中 α 为电子跃迁吸收系数, 为材料的本征吸收; S_{im} 为结构不均匀引起的散射 (例如气孔、第二相等); S_{op} 为光学各相异性引起的散射 (例如六方晶系). 对于陶瓷透光性和反

2.1 气孔率

对透明陶瓷透光性能影响最大的因素是气孔率. 普通陶瓷即使具有高的致密度, 往往也不是透明的, 这是因为其中有很多封闭的气孔. 气孔与多晶本身的折射率相差很大造成入射光的强烈散射.

2.2 晶界结构

陶瓷材料的物相组成通常包含两相或更多相, 这种多相结构会导致光在相界表面上发生散射. 透明和不透明陶瓷的晶界结构是不同的. 透明材料是单相的, 晶界与晶体的光学性质差别小因而晶界模糊不清, 而非透明材料是多相的, 晶界很清晰.

射、散射系数等光学性能的特征与测量已有文献报道^[18,19]。

因此, 要使陶瓷具有透光性, 就应该从工艺上消除对光的散射的各种因素。综合下来应具备下面的条件:

- (1) 致密度要高 (为理论密度的 99.5% 以上);
- (2) 晶界上不存在空隙, 如有空隙, 其大小比波长应小得多;
- (3) 晶界上没有杂质以及玻璃相, 或晶界的光学性质与晶体之间差别很小;
- (4) 晶粒较小而且均匀, 气孔率很低;
- (5) 晶体对入射光的选择吸收很小; (6) 无光学各向异性, 晶体结构最好是立方晶系;
- (7) 表面光洁度高。

3 透明陶瓷的制备工艺

陶瓷的制备工艺包括粉体制备、成型工艺、烧结工艺、以及后处理等工艺。透明陶瓷的制备也包含以上步骤, 但是其制备过程有自身的特点, 特别是粉体制备和烧结工艺。工艺目的就是要在各个工艺中尽量减少气孔、杂质、晶界等各种缺陷造成光散射和吸收, 制备出致密透明的陶瓷体。

3.1 粉体制备

透明陶瓷对粉体的要求特别严格, 要求粉体高纯 (一般要求其纯度 >99.95%)、均匀、超细 (一般要求平均晶粒尺寸为 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$)。因此, 粉体的制备工艺成为决定陶瓷透明性的重要因素。

目前文献报道的氧化物透明陶瓷粉体制备的方法主要有固相反应合成法^[6,20]、醇盐水解法^[21]和化学共沉淀法^[22,23]。固相反应合成需要较高的反应温度和较长的反应时间, 而且球磨混合难以达到化学组成均一, 因此固相反应难以制备出具有均相、高烧结活性的粉体; 醇盐水解法可以制备高纯的粉体, 但是由于原料昂贵且难以获得一般很少采用; 共沉淀法制备粉体工艺简单、可以达到分子水平的混合能制备出性能优异的粉体。

相对于固相反应法制备粉体, 用共沉淀方法制备粉体可以降低粉体合成的煅烧温度和提高粉体的烧结活性降低陶瓷的烧成温度。如用固相反应制备 YAG 粉体需要在充分混合均匀后在大于 1600°C 条件下煅烧才能得到单相的 YAG 粉体, 而用共沉淀法在不到 1200°C 的条件下煅烧就可得到单相的 YAG 粉体^[23]。目前氧化物透明陶瓷粉体的制备方法广泛使用共沉淀法^[22,23]。

但是共沉淀法制备粉体也存在一些缺点: (1) 对于多组分体系由于溶度积、沉降速率的差别难以形成精确化学计量比、组分均一的前驱粉体; (2) 对于多组分体系难以控制适当的 pH 值使各个组分同时完全沉淀; (3) 在共沉淀制备粉体的过程中, 从共沉淀、晶粒长大到沉淀的漂洗、干燥、煅烧的每一个阶段都可能导致颗粒长大及团聚的形成。

关于 sol-gel 法制备透明氧化物陶瓷粉体的文献报道还很少。最近 Tachiwaki^[24] 通过 sol-gel 法制备 YAG 粉体, 在 1200°C 条件下煅烧得到粉体具有高的烧结活性, 在 1600°C 条件下真空烧结 2h 便得到致密的透明 YAG 陶瓷。

利用硝酸盐和有机燃料 (如 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ (urea)、 CH_6N_4 (carbohydrazide) 和 $\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$ (glycine)) 放热反应制备氧化物粉体的燃烧法可以在短时间内制备超细、化学组分均一、单相的粉体, 并且可以精确控制发光离子的掺杂浓度, 是一种制备多元氧化物荧光粉 (phosphor) 的较为理想方法^[25]。最近 Zych 等人^[26] 尝试燃烧法制备 $\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Eu}$ 粉体, 但得到的粉体团聚严重,

在 1700°C 条件下真空烧结 5h 得到透明性不是很好的陶瓷体。如能解决燃烧法制备粉体的团聚问题, 燃烧法将成为制备透明陶瓷粉体的重要方法, 特别是制备多掺杂的透明陶瓷闪烁体粉体方面。

3.2 成型工艺

成型工艺对陶瓷成品的透明性也有一定的影响。成型压力大, 素坯密度高有利于烧结致密。当然并不是所用的压力越大越好。目前, 透明陶瓷的成型工艺主要有: 干压、等静压成型。

3.3 烧结工艺

要得到致密的、气孔率低的透明陶瓷, 必须采用不同于普通陶瓷的特殊烧结工艺。目前, 透明陶瓷的烧结工艺主要有:

3.3.1 热压烧结

热压烧结指在烧成过程中施加一定的压力 (10~40MPa), 促使材料加速流动、重排与致密化。与无压烧结相比热压烧结的主要特点是: 通过在烧结过程中施加外在压力, 以促使材料致密化, 同时晶粒生长较少, 从而可得到细晶粒的陶瓷材料。不过此烧结法不易生产形状复杂制品, 烧结生产规模小, 成本高, 而且容易产生缺陷、引入杂质等。热压烧结广泛应用于透明陶瓷的制备。目前已用热压烧结法制备出 Al_2O_3 ^[3]、 Y_2O_3 ^[13]、 AlN ^[27]、 Lu_2O_3 ^[28]、 MgO ^[29] 等多种透明陶瓷。

3.3.2 热等静压烧结 (HIP)

热等静压烧结适合形状复杂制品生产。目前已应用于掺 La 的 PMN ^[30]、 $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ ^[9]、 PNNZT ^[31] 等透明陶瓷的制备。Ikeshue 用热等静压制备 YAG 但是晶粒内存在大量的氩气泡, 其光学性能并不能得到提高^[32]。

3.3.3 真空烧结

在真空条件下烧结有利于烧结过程中消除陶瓷中的气孔, 提高陶瓷的透明性。目前, 透明 YAG 陶瓷的烧结, 主要是用真空烧结^[23,24]。真空烧结也可以和热压烧结相结合烧结透明陶瓷^[33]。

3.3.4 常压烧结以及各种气氛中的烧结

用传统的常压烧结方法制备透明陶瓷, 可以降低成本。此外, 氧化气氛或还原气氛中烧结陶瓷可以消除由于材料成分的挥发产生的空位等缺陷, 提高陶瓷的透明性。常压烧结一般需要加入烧结助剂, 以促进烧结致密化。常压烧结制备出了 Hydroxyapatite [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$, HAP]^[34]、 Y_2O_3 ^[35]、 AlN ^[36] 等透明陶瓷。

3.3.5 微波烧结

微波烧结的加热速度快、时间短可以在常压条件下迅速使陶瓷致密化, 阻止晶粒长大。最近, 微波烧结技术已成功应用于 Mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)^[37]、HAP^[34]、 AlON 、 AlN 、铝镁尖晶石透明陶瓷^[38]、 Al_2O_3 ^[17] 等透明陶瓷的制备。研究表明^[17,34,37,38] 在一定条件下用常压微波烧结, 上述材料在很短的时间内就可以得到透明性优异的致密陶瓷体。Cheng 等人研究发现微波烧结 Al_2O_3 ^[17] 在加入 0.05wt%MgO 烧结助剂的条件下烧结 45min 就可以得到密度为 $3.97\text{g}/\text{cm}^3$ (~理论密度) 平均粒径为 $40\mu\text{m}$ 透明性优异的 Al_2O_3 陶瓷, 见图 2。

微波烧结技术是一种很有应用前景的烧结技术, 但是微波烧结技术仍存在一些有待解决的问题, 如缺乏系统的材料介电系数对不同频率下各种材料介电常数的变化规律的了解. 在烧结其它透明陶瓷方面还有待进一步的研究探索.

4 透明陶瓷的应用

4.1 照明灯具

透明陶瓷有广泛的用途, 最早是使用在高压金属放电灯上. 高压钠灯是一种发光效率很高的电光源, 但在钠蒸气放电时会产生 1000°C 以上的高温, 具有很强的腐蚀性, 玻璃灯管根本没法耐受, 所以高压钠灯一直没能问世, 直到有了透明陶瓷, 高压钠灯才得到实际应用.

国内高压钠灯的生产已经比较成熟, 2002 年, 全国十几个企业共生产高压钠灯近千万只, 其中上海亚明、南京三乐、北京大华和沈阳光大为 80 年代从英国引进设备. 后来, 国际上三大照明厂飞利浦、西门子集团欧司朗、GE 公司的前两家分别在中国成立了上海飞亚和欧司朗佛山照明两家合资公司生产高压钠灯. 目前国内市场每年高压钠灯的用量近 3 千万只, 而且还以每年 10%~15% 的速度发展. 传统高压钠灯用透明氧化铝管的生产都是采用高纯氧化铝粉体, 添加 MgO 、 La_2O_3 、 Y_2O_3 ^[3,39] 等添加剂, 在氢气下烧结制备. 其成型方法主要是等静压成型, 后来 GE 和 philips 逐渐采用挤出成型.

除高压钠灯外, 透明陶瓷还使用于其它新型灯具, 如艳灯、铷灯、钾灯等. 近年来, 研究人员还研制出其他透明材料如 YAG 透明陶瓷用在钠光灯管和高温透视窗上.

4.2 激光透明陶瓷

20 世纪 60 年代中期 Carnell^[40] 等人报道了用多晶陶瓷 $\text{Dy}^{2+}:\text{CaF}_2$ 制成的固态激光器, 开创了陶瓷激光体的先河. 70 年代初又出现了掺 Nd^{3+} 的透明 $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{ThO}_2$ 激光陶瓷的报道^[41,42]. 但是直到高透明的掺 Ln^{3+} 的 YAG($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) 特别是掺 Nd^{3+} 陶瓷的研制成功, 陶瓷激光材料才引起关注^[43~45]. 最近十几年, 激光透明陶瓷的研究, 主要是对 Nd:YAG 的研究.

1984 年, de with 和 van dijk 通过掺杂氧化硅或氧化镁获得了透明的 YAG 陶瓷^[11]. 1991 年 Sekita 和 Haneda 报道了掺不同稀土离子的透明 YAG 陶瓷的发光光谱^[44]. 1995 年 Ikesue 等人首次报道了 Nd:YAG 陶瓷激光器^[46]. 最近相继出现了通过不同方法制备的粉体在真空烧结条件下制备出透明 YAG 陶瓷的报道^[5,22~24]. Ikesue 报道的 Nd:YAG 陶瓷激光器的某些发光性能已优于 Cz 方法制备的高品质的单晶^[6]. 与 YAG 激光晶体相比多晶 YAG 透明激光陶瓷具有以下优点:

(1) 可以实现高掺杂、而且掺杂均匀.

高掺杂的激光晶体可以提高激光器的输出功率使激光器小型化, 因此高掺杂晶体是发展微片激光器 (microchip lasers) 的一个目标. 由于 Nd^{3+} 在 YAG 中的分凝系数大约为 0.2 因此很难在 YAG 单晶中均匀地掺如浓度 $>1\text{at.}\%$ 的 Nd^{3+} 发光离子. 最近中国科学院上海光机所通过温度梯度法生长出 Nd^{3+} 浓度为 3% 的 YAG 单晶, 但是 Nd^{3+} 离子在生长轴线上的

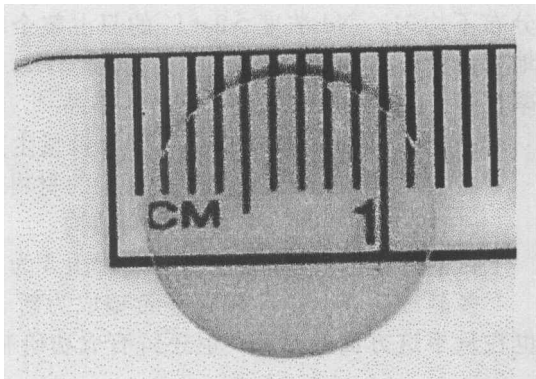


图 2 1750°C 条件下微波烧结 45min 得到的透明 Al_2O_3 陶瓷

Fig. 2 Appearance of a highly transparent Al_2O_3 sample microwave sintered at 1750°C for 45min

分布不均匀, Nd 浓度 $>2\text{at.}\%$ 的只占整个单晶的 $1/4^{[47]}$. 而多晶的 YAG 透明陶瓷可以均匀地掺入 $0.3\sim 4.8\text{at.}\%$ 的 Nd 离子, 掺杂 $1.1\text{at.}\%$ 和 $2.4\text{at.}\%$ 的多晶透明 Nd:YAG 陶瓷的输出功率超过了掺杂 $0.9\text{at.}\%$ 的 Nd:YAG 单晶 $^{[4]}$.

(2) 制备容易, 成本低, 可以大批量生产.

(3) 可以制备大尺寸, 形状复杂的材料以减少后处理加工等的损耗.

(4) 可以制备多层多功能陶瓷结构.

目前日本的 YAG 已经商品化, 图 3 为 Konoshima 公司生产的 YAG 透明陶瓷.

多晶透明 Nd:YAG 陶瓷有希望成为新一代的固体激光材料 $^{[5]}$. 目前国内一些研究单位也在从事这方面的研究, 但还鲜有成功研制透明 Nd:YAG 激光陶瓷的报道.

4.3 闪烁陶瓷

无机闪烁体 (inorganic scintillator) 在辐射探测中起着非常重要的作用, 广泛应用于影像核医学、核物理、高能物理、工业 CT、油井勘探、安全检查等领域. 目前研究应用最多的无机闪烁体是无机闪烁晶体. 但是对于一些潜在的无机闪烁材料, 传统的晶体生长技术难以生长. 透明陶瓷的制备技术使研制 (多晶) 陶瓷闪烁体成为可能. 多晶陶瓷制备技术可以实现高掺杂而且掺杂均匀, 工艺简单、生产成本低, 因此近 10 几年来, GE、Siemens、Hitachi 等公司以及一些研究单位相继开展了医用陶瓷闪烁体的研究. 相继开发出 $(\text{Y}, \text{Gd})_2\text{O}_3:\text{Eu}(\text{YGO})^{[7]}$ 、

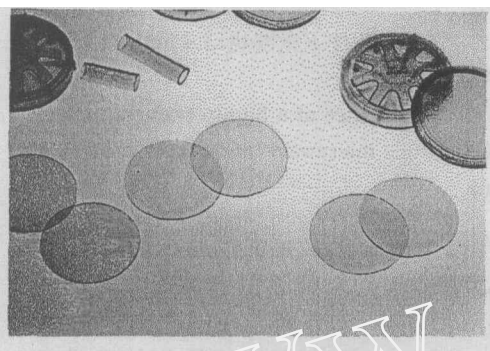


图 3 Konoshima 公司生产的透明 YAG 陶瓷
Fig. 3 Commercial transparent YAG ceramics
(Konoshima Co.)

$\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Pr}, \text{Ce}, \text{F}(\text{GSO})^{[8,9]}$ 、 $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Cr}, \text{Ce}(\text{GGG})^{[48]}$ 等陶瓷闪烁体, 并成功将 YGO、 $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ 应用于医学 X-CT 上 $^{[10,49]}$. 最近又出现了 $\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Eu}$ 陶瓷闪烁体文献报道 $^{[28]}$. 表 1 为一些陶瓷闪烁体的性能 $^{[14]}$.

除了医用陶瓷闪烁体, 近年来还出现了用于高能物理领域的陶瓷闪烁体的报道 $^{[50]}$.

陶瓷闪烁体也是透明陶瓷应用领域研究的一个热点. 而提高陶瓷的透明性和光输出则是陶瓷闪烁体的一个技术难点, 限制了陶瓷闪烁体的实际应用. 目前报道的实际应用到器件的也只有 YGO 和 $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ 两种陶瓷闪烁体.

5 透明陶瓷的研究趋势

在传统照明灯具领域, 主要是从提高灯管寿命, 提高成品率和劳动生产率, 降低成本着手. 而在新产品开发方面, 如用透明陶瓷材料取代石英材料作为金卤灯内管, 能够提高高发光效率和显色性, 并具有寿命长及多种光色可供选择的优点. 这方面有欧司朗的 POWERSTAR, GE 的 Lucalox 等, 其灯管寿命均大于 15000h.

在激光陶瓷领域, Nd:YAG 激光陶瓷将在制备大功率和小型化的激光器方面占有重要的地位. Nd:YAG 激光陶瓷的发光性能以及应用到器件上还存在许多问题, 这也是目前的研究任务.

闪烁陶瓷领域, 对于一些新型的医用闪烁体, 单晶制备困难, 发展多晶陶瓷闪烁体以代替单晶是目前重要的研究方向. 目前陶瓷闪烁体还处于试验性阶段, 弄清其发光机理从工艺和掺杂技术上提高光输出、抑制余辉 $^{[8,12,51,52]}$ 以及将陶瓷闪烁体扩展到工业 X-CT、

PET、安全检查、高能物理等应用领域也是目前的研究任务。

表 1 一些陶瓷闪烁体的主要性能

Table 1 Some important properties of X-ray scintillators for imaging applications

Material	Form	Crystal system	Transparency	Density/g·cm ⁻³
CsI:Tl	Single crystal	Cubic	Transparency	4.51
CdWO ₄	Single crystal	Monoclinic	Transparency	7.99
Y _{1.34} Gd _{0.6} Eu _{0.06} O ₃	Ceramic	Cubic	Transparency	5.92
Gd ₂ O ₂ S:Pr,Ce,F	Ceramic	Hexagonal	Transparency	7.34
Gd ₃ Ga ₅ O ₁₂ :Cr,Ce	Ceramic	Cubic	Transparency	7.09

Material	X-ray atten.		Emission λ/nm	Relative light output/%*	Primary decay time/s	Afterglow /%**
	coeff./cm ⁻¹					
	70keV	500keV				
CsI:Tl	34	0.49	550	100	1×10 ⁻⁶	0.3
CdWO ₄	56	0.91	530	30	5×10 ⁻⁶	0.02
Y _{1.34} Gd _{0.6} Eu _{0.06} O ₃	26	0.71	610	70	1×10 ⁻³	<0.01
Gd ₂ O ₂ S:Pr,Ce,F	52	0.80	510	80	3×10 ⁻⁶	<0.01
Gd ₃ Ga ₅ O ₁₂ :Cr,Ce	32	0.70	730	40	14×10 ⁻⁵	0.01

* Measured with photodiodes for X-ray tube voltage of 60kVp

** Measured at room temperature and at 100ms after turn-off of a 0.5s X-ray excitation pulse

6 结束语

透明陶瓷技术可以解决单晶中的某些问题;对于单晶生长困难的光学材料,发展多晶以代替单晶开发出新一代光学材料也是目前的一个重要研究方向。随着透明陶瓷制备工艺的发展,透明陶瓷必将在光学材料中占有越来越重要的地位。

参考文献

- [1] Carol A Handwerker, et al. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1994, **77** (2): 293-297.
- [2] Coble R L, et al. *Am. Ceramic. Soc. Bull.*, 1959, **38** (10): 507.
- [3] Coble R L. U.S. Pat. No. 3026210, 1962.
- [4] Akio Ikesue, Kiichiro Kamata, Kunio Yoshida. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1996, **79** (7): 1921-1926.
- [5] Jianren Lu, Ken-ichi Ueda, Hideki Yagi, et al. *J. Alloys Comp.*, 2002, **341**: 202-225.
- [6] Ikesue A. *Opt. Mater.*, 2002, **19**: 183-187.
- [7] Cusano D, et al. U.S. Pat. No. 4421671, 1983.
- [8] Yamada H, Suzuki A, Uchida Y, et al. *J. Electrochem. Soc.*, 1989, **136** (9): 2713-2716.
- [9] Ito H, Yamada H, Yoshida M, et al. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1988, **27** (8): L1371-1373.
- [10] Hupke R. *RBM-Revue Europeenne de Technologie Biomedicale*, 1998, **20** (9): 227-232.
- [11] de With G, van Dijk H J A. *Mat. Res. Bull.*, 1984, **19**: 1669-1674.
- [12] Köstler W, Winnacker A, Rossner W, et al. *J. Phys. Chem. Solids.*, 1995, **56** (7): 907-913.
- [13] Dutta K, Gazza G E. *Mater. Res. Bull.*, 1969, **4**: 791-796.
- [14] Greskovich C, Duclos S. GE Research & Development Technical Report, 1996.
- [15] Jiang, Haochuan. U.S. Pat. No. 6498828, 2002.

- [16] Charles Brecher, George C Wei, William H Rhodes. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1990, **73** (6): 1473-1488.
- [17] Jiping Cheng, Dinesh Agrawal, Yunjin Zhang, et al. *Mate. Lett.*, 2002, **56**: 587-592.
- [18] Thomas M B, Doremus R H. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1976, **59** (5-6): 229-232.
- [19] Erneta M, et al. *Am. Ceram. Soc.*, 1973, **56** (7): 394-395.
- [20] Akio Ikesue, Isao Furusato, Kiichiro Kamata. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1995, **78** (1): 225-228.
- [21] Mazdiyasi K S, Lynch C T, Smith J S. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1967, **50** (10): 532-537.
- [21] Yanagitani T, Yagi H, Ichikawa M, Japanese patent: 10-101333, 1998.
- [22] Ji-Guang Li, Takayasu Ikegami, Jong-Heun Lee, et al. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2000, **83** (4): 961-963.
- [23] Tokumatsu Tachiwaki, Masaru Yoshinaka, Ken Hirota, et al. *Solid State Commun.*, 2001, **119**: 603-606.
- [24] Zych E, Hreniak D, Strek W, et al. *J. Alloys Comp.*, 2002, **341**: 391-394.
- [25] McKittrick J, Shea L E, Bacalski C F, et al. *Display*, 1999, **19**: 169-172.
- [26] Veitch C D. *J. Matt. Sci.*, 1991, **26**: 6527-6532.
- [27] Kuramoto N, Taniguchi H. *J. Mater. Sci. Lett.*, 1984, **3**: 471-474.
- [28] Lempicki A, Brecher C, Szupryczynski P, et al. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 2002, **488**: 579-590.
- [29] Mark W. Benecke, Norman E. Olson, Joseph A. Pask. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1967, **50** (7): 365-368.
- [30] Kim N, Mchenry D A, Jang S-J, et al. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1990, **73**: 923-928.
- [31] Edward F. Alberta, Amar S. Bhalla. *Int. J. Inorg. Mater.*, 2001, **3**: 987-995.
- [32] Akio Ikesue. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1996, **79** (7): 1927-1933.
- [33] Edward Carnall, Donald Pearlman. *Mat. Res. Bull.*, 1972, **7**: 647-654.
- [34] Fang Y, Agrawal D K, Roy D M, et al. *Mater. Lett.*, 1995, **23**: 147-151.
- [35] Greskovich G, Woods K N. *Ceramic Bulletin*, 1973, **52** (5): 473-478.
- [36] Kuramoto N, Taniguchi H. *J. Mater. Sci. Lett.*, 1984, **3**: 471-474.
- [37] Fang Y, Roy R, Agrawal D K. *Mater. Lett.*, 1996, **28**: 11-15.
- [38] Cheng J, Agrawal D, Zhang Y, et al. *Bull. Am. Ceram. Soc.*, 2000, **79** (9): 71-74.
- [39] Kaneno, et al. Takehiro. U.S. Pat. No. 4373030, 1983.
- [40] Carnelli E, Hatch S E, et al. *Material Science Research*, Vol. 3, Plenum, New York, 1966. 165.
- [41] Greskovich C, Chernoch J P. *J. Appl. Phys.*, 1973, **44** (10): 4599-4606.
- [42] Greskovich C, Chernoch J P. *J. Appl. Phys.*, 1974, **45** (10): 4495-4502.
- [43] Sekita M, Haneda, Yanagitani T, et al. *J. Appl. Phys.*, 1990, **67**: 453-458.
- [44] Sekita M, Haneda, Shiransaki S, et al. *J. Appl. Phys.*, 1991, **69**: 3709-3718.
- [45] Ikesue A, Kamata K, Yoshida K. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1995, **78**: 2545-2547.
- [46] Ikesue A, Kinoshita T, Kamata K, et al. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1995, **78**: 1033-1040.
- [47] Dong J, Deng P, Gan F, et al. *Opt. Commun.*, 2001, **197**: 413-418.
- [48] Tsoukala, Veneta G, Greskovich, et al. U.S. Pat. No. 5318722, 1994.
- [49] Charles D Greskovich, Dominic Cusano, et al. *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 1992, **71** (7): 1120-1130.
- [50] Zverev N D, Kudin A M. *Inorg. Mater.*, 1998, **34** (4): 405-407.
- [51] Nakamura R, Yamada N, Ishii M. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1999, **38**: 6923-6925.
- [52] Nakamura R. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1999, **82** (9): 2407-2410.

Fabrication and Developments of Transparent Ceramics

JI Ya-Ming, JIANG Dan-Yu, FENG Tao, SHI Jian-Lin

(Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: The application of transparent ceramics can be found in a variety of fields, such as luminous tubes, new laser materials and scintillators. The fabrication and developments of transparent ceramics were reviewed in this paper.

Key words transparent ceramics; laser ceramics; ceramic scintillators