

氧化锌透明陶瓷光学透过模型构建与实验验证

林德宝, 范灵聪, 丁毛毛, 谢建军, 雷芳, 施鹰

(上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444)

摘要: 本研究以 ZnO 透明陶瓷为研究对象, 基于 Mie 理论及 Rayleigh-Debye 近似散射理论, 建立了单轴六方晶系透明陶瓷的双折射散射与其直线光学透过率之间关联的理论模型, 阐明了 ZnO 透明陶瓷光学直线透过率随晶粒尺寸减小、陶瓷织构度的提升而增大的关系。采用强磁场下的注浆成型工艺结合优化放电等离子体烧结参数, 实现了 ZnO 透明陶瓷显微结构的有效调控, 使得制备的 ZnO 透明陶瓷符合模型要求。实验结果表明: 当 ZnO 陶瓷平均晶粒尺寸从 1.72 μm 减小至 0.66 μm 时, 其 600 nm 处的直线透过率从 5.1% 提高到 12.9%; 对于亚微米级 ZnO 陶瓷(平均晶粒尺寸 0.35 μm), 当陶瓷织构度从 4.0% 提高到 24.7% 时(XRD 计算), 样品光学直线透过率从 21.6% 提升到 36.6%。所获得实验结果与构建的理论模型计算结果吻合, 证实了所构建的模型。

关键词: ZnO; 双折射; 织构; 透过率

中图分类号: TB321 文献标识码: A

Optical Transmittance Model Construction for ZnO Transparent Ceramic and Experimental Verification

LIN De-Bao, FAN Ling-Cong, DING Mao-Mao, XIE Jian-Jun, LEI Fang, SHI Ying

(Material Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The influence of birefringent light scattering on in-line optical transmittance model depended on uniaxial hexagonal crystal structure transparent ceramics using ZnO as research object has been established based on Mie theory and its developed approximation Rayleigh-Gans-Debye scattering theory. Theoretical calculation indicates that in-line optical transmittance of ZnO transparent ceramics improves obviously with the decrease of grain size and increase of orientation. ZnO transparent ceramics which meet the microstructure requirements of the model were effectively controlled by slip casting process under a strong magnetic field and designing SPS sintering parameters. Corresponding results show that the in-line optical transmittance of non-textured ZnO transparent ceramic increased from 5.1% to 12.9% at 600 nm as grain size decreased from 1.72 μm to 0.35 μm while that of textured ZnO transparent ceramic (mean grain size 0.66 μm) was improved greatly from 21.6% to 36.6% at 600 nm due to increasing orientation factor to 24.7% calculated from XRD data. Based on these data, it is found that the calculation results of theoretical model match well with the experiment results.

Key words: ZnO; birefringence; texture; transmittance

从 1962 年 Coble^[1]首次成功制备透明 Al_2O_3 陶瓷以来, 透明陶瓷取得了令人瞩目的进展。然而, 迄

今高质量的透明陶瓷仅局限于高对称性的立方晶系, 低对称体系透明陶瓷的研究一直徘徊在较低水平,

收稿日期: 2018-09-10; 收到修改稿日期: 2018-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(51802186); 上海高校青年教师培养资助计划(ZZSD18008)

National Natural Science Foundation of China (51802186); Shanghai Young University Teachers' Training Subsidy Scheme (ZZSD18008)

作者简介: 林德宝(1990-), 男, 博士研究生. E-mail: depaul@shu.edu.cn

通讯作者: 施鹰, 教授. E-mail: yshi@shu.edu.cn

且研究对象局限于 Al_2O_3 , 光透过率亦较低。 Al_2O_3 陶瓷材料在光学上属于一轴晶非均质体, 对光线有双折率现象: 当光线穿过任意取向的两相邻晶粒时, 会发生晶界双折射。陶瓷存在着成百上千任意取向的晶粒, 多次反复的双折射最终导致透过率的下降^[2], 也严重阻碍了非立方体系透明陶瓷的发展。

目前研究主要集中在晶粒尺寸与织构度对非立方体系透明陶瓷透过率的影响^[2-6]。对于 Al_2O_3 透明陶瓷, 人们已经开展较多关于晶粒尺寸影响透过率的研究^[3-6]。Apetz 等^[3]在无烧结助剂添加的情况下, 制得在 600 nm 处透过率在 70% 以上的氧化铝透明陶瓷(厚度为 0.8 mm), 其晶粒尺寸仅为 0.3 μm 。Krell 等^[4]也报道了相似的实验结果, 同时他们采用了尺寸 0.1~0.2 μm 的初始粉体代替传统的纳米粉体, 亦获得了厚度为 0.8 mm、在 640 nm 处透过率在 72% 以上的氧化铝透明陶瓷, 其晶粒尺寸为 0.33 μm 。所获得高透过率的氧化铝陶瓷其晶粒尺寸基本上都在 0.5 μm 以下, 仅为传统半透明氧化铝陶瓷晶粒尺寸的 1% 左右。说明在六方晶系陶瓷中, 细晶化是提高光学透过率的一个重要手段。毛小健等^[2]则研究了织构度对透明陶瓷直线透过率的影响。他们采用注浆成型法在 12 T 强磁场条件下实现了 Al_2O_3 陶瓷素坯的定向成型, 经后续烧结, 实现了晶粒完全定向, 织构化透明陶瓷在可见光区域直线透过率提高了 30% 以上。这些研究方法为其它低对称体系透明陶瓷的探索研究提供了实验基础。

ZnO 是迄今为止发现衰减时间最短的闪烁材料^[7](~400 ps), 在快衰减闪烁探测领域具有良好的应用前景, 使得透明 ZnO 陶瓷的研究逐渐引起人们的重视^[8-9]。但常温常压下 ZnO 与 Al_2O_3 同为六方晶体结构, 如何有效提高 ZnO 多晶透明陶瓷的光学透过率是人们面临的一个难题, 其细晶化和高织构度是否可提高光学透过率值得深入研究。在已有 ZnO 透明陶瓷的研究报道中^[9-13], 尚未见讨论晶粒尺寸及晶粒取向对 ZnO 陶瓷透过率影响的相关报道。

基于上述背景, 本研究采用 Mie 散射理论, 模拟光在 ZnO 陶瓷内部的传输过程, 建立了单轴六方晶系透明陶瓷的双折射散射与其直线光学透过率之间关联的理论模型, 计算了 ZnO 陶瓷亚微米级晶粒尺寸与晶粒取向度对于光学直线透过率的影响。通过优化放电等离子体烧结参数和强磁场下的注浆成型过程, 实现了 ZnO 透明陶瓷显微结构的有效调控, 制备出符合理论预测模型要求的透明陶瓷材料, 进而从实验上验证了晶粒尺寸与晶粒取向度对 ZnO 透明陶瓷光学直线透过率影响的模型计算结果。

1 实验方法

以沉淀法制备的一次颗粒尺寸约 120 nm 的 ZnO 多晶粉体作为初始粉体, 添加 2wt% 聚丙烯酸配制成固含量为 35vol% 的 ZnO 陶瓷浆料, 分别在不同磁场强度下的均衡磁场条件下(SM1 超导磁体, 中国科学院强磁场科学中心(合肥))注浆成型, 制成素坯。采用内径为 20 mm 高强石墨模具, 在放电等离子烧结炉(Dr Sinter 2040, Sumitomo Coal Mining Co., Japan)中完成 ZnO 透明陶瓷的致密化烧结。烧结工艺参数为: <700 $^{\circ}\text{C}$ 时, 升温速率为 100 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 700 $^{\circ}\text{C}$ 以上时降低升温速率至 50 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 并开始逐步加压, 最终保持压力为 80 MPa。烧结温度为 850~875 $^{\circ}\text{C}$, 保温时间为 10 min, 真空度优于 10 Pa。

采用 X 射线衍射仪(XRD, D/Max-2200V PC, Rigaku, Japan)确定制得 ZnO 陶瓷的物相组成和取向度。具体测试条件为: $\text{CuK}\alpha$ 射线, $\lambda=0.15406$ nm, 仪器的电压和电流分别为 40 kV 和 40 mA, 2θ 扫描范围为 $10^{\circ}\sim 80^{\circ}$, 扫描步距为 0.02° , 狭缝宽度为 0.3~0.6 mm。采用荷兰 Philips 公司制造的 XL-30 型热场发射扫描电子显微镜(Field Emission Scanning Electron Microscopy, SEM)来观察所得 ZnO 多晶陶瓷的断口形貌。

2 理论模型构建

对于一个无气孔、第二相、杂质和色心等散射源的完美晶体来说, 材料的直线透过率只与晶体表面的反射有关。陶瓷表面反射系数 R 是关于材料的折射系数 n 的函数^[14], 可表示为:

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (1)$$

而关于陶瓷表面的总反射损失 R' 与反射系数 R 的关系为:

$$R' = \frac{2R}{1+R} \quad (2)$$

则完美透明陶瓷的理论透过率 T_{max} 可表示为:

$$T_{\text{max}} = 1 - R' = \frac{2n}{n^2 + 1} \quad (3)$$

光通过透明陶瓷的直线透过率可以用下式来表示^[14]:

$$T = (1 - R') \exp[-(\gamma_{\text{abs}} + \gamma_{\text{sca}})t] \quad (4)$$

其中 γ_{abs} 为光吸收系数, 与组成陶瓷材料的原子种类和晶体结构有关, 是物质的本征参数; γ_{sca} 是由气孔、杂质、晶界等陶瓷材料中宏观结构的不完整性

和组成的不均匀性造成的光散射系数, t 为样品的厚度。光散射的物理机制是光波与非均匀介质中的粒子相互作用后由粒子辐射而产生的次级光波的结果。目前的光散射理论一般把粒子视为均匀球形, 在实际运用中, 由于粒子的取向具有随机性, 大多数粒子的行为可等效成球形粒子处理。目前被普遍接受并广泛采用的理论是由 Mie 于 1908 年所提出 Mie 散射理论及其近似理论 Rayleigh-Gans-Debye (RGD) 散射理论^[15]。基于 RGD 散射理论

$$\gamma_{\text{sca}} = NC_{\text{sca}} \quad (5)$$

式中 N 表示模拟计算程中单位体积内散射源数量, 可表示为:

$$N = \mu \frac{1}{4/3\pi r^3} \quad (6)$$

定义 μ 为散射因子, 代表发生双折射晶粒在所有晶粒中的占比。 C_{sca} 为单颗粒的散射系数, 由于晶界与晶粒之间的物相无明显变化, 基于 RGD 光散射理论^[15], 可得散射系数为:

$$C_{\text{sca}} = \frac{8\pi^3 r^4}{\lambda_m^2} \left(\frac{\Delta n}{n}\right)^2 \quad (7)$$

其中 n 为 ZnO 陶瓷的平均折射率, λ_m 为光在介质中的波长, 基于 RGD 理论^[15], 则当陶瓷内部晶粒尺寸 $< 10 \mu\text{m}$ 时, γ_{sca} 可表示为:

$$\gamma_{\text{sca}} = 6\mu \frac{\pi^2 r}{\lambda_0^2} \Delta n^2 \quad (8)$$

结合式(4)对于各向异性多晶光学材料的实际直线透过率 T_{th} 与折射率差值 Δn 及陶瓷内部晶粒尺寸 $2r$ 关系为:

$$T_{\text{th}} = T_{\text{max}} \exp \left\{ -6\pi^2 \mu \left(\frac{\Delta n}{n}\right)^2 \frac{rd}{\lambda^2} \right\} \quad (9)$$

从式(9)中可以看出, 特定厚度的完美透明陶瓷样品的实际直线透过率只与陶瓷晶粒尺寸 $2r$ 及散射因子 μ 有关。

由于光在 ZnO 陶瓷内部散射损耗为光传输过程中所经过所有晶粒产生光损耗的总和, 即:

$$\gamma_{\text{sca}} = \sum_{i=1}^n k_i \frac{8\pi^3 r^4}{\lambda_m^2} \left(\frac{\Delta n}{n}\right)^2 \quad (10)$$

其中, k_i 表示第 i 个晶粒上发生的散射系数。图 1 描述了在此传输过程中三种特殊晶粒排布情况。由于 ZnO 晶体在 a 、 b 方向上的折射率相同, c 方向上的折射率不同, 在理论模型设计中以特定取向的圆柱体表示其六方晶体结构。S1 所表示光穿过折射率为 n_1 的晶粒到达下一个晶粒后依旧是折射率为 n_1 的晶粒, 光穿过两晶粒取向完全一致, 此时未发生散射,

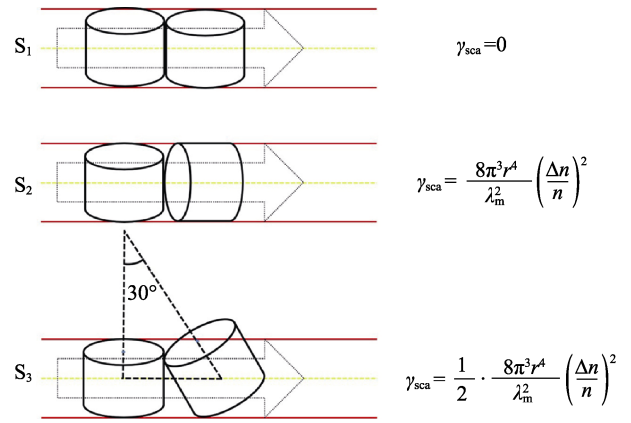


图 1 光在晶粒间传输中光散射过程三种特殊情况简化模型
Fig. 1 Three special situations in simplified model of light transmission through intergranular

其散射系数为 $\gamma_{\text{sca}} = 0$; S2 表示光穿过折射率为 n_1 的晶粒到达下一个折射率为 n_2 的晶粒, 光穿过两晶粒取向夹角为 90° , 光在此传输过程中发生光散射, 散射系数为:

$$\gamma_{\text{sca}} = \frac{8\pi^3 r^4}{\lambda_m^2} \left(\frac{\Delta n}{n}\right)^2 \quad (11)$$

S3 表示光在传输过程中通过两晶粒面夹角为 30° 时的情况, 则发生双折射散射部分为该晶粒在光传播方向上的投影部分, 对应散射系数为:

$$\gamma_{\text{sca}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{8\pi^3 r^4}{\lambda_m^2} \left(\frac{\Delta n}{n}\right)^2 \quad (12)$$

对光在晶粒间传输中的光散射过程, 按晶面夹角角度大小进行归类统计, 则 ZnO 陶瓷内部由双折射引起的总散射强度可表示为光传输过程中经过所有晶粒的光散射强度总和:

$$\gamma_{\text{sca}} = \sum_{\theta=0}^{90^\circ} \sin\theta P_\theta \frac{6\pi^2 r}{\lambda_0^2} \Delta n^2 \quad (13)$$

其中 P_θ 为光在传输过程中通过两晶粒面夹角为 θ 的晶粒所占比例。则散射因子 μ 表示为:

$$\mu = \sum_{\theta=0}^{90^\circ} \sin\theta P_\theta \quad (14)$$

3 结果与讨论

3.1 晶粒尺寸对 ZnO 陶瓷透过率影响

以波长 600 nm 处 ZnO 的折射率情况计算整个过程。其中 $n_o = 1.9985$, $n_e = 2.0147$, 平均折射率 $n_{\text{avg}} = 2.0066$ ^[16], 基于在氧化铝体系中经验规律^[17] $\Delta n = 2/3\Delta n_{\text{max}}$, 则 $\Delta n/n_{\text{avg}}$ 为 0.0054 , 对于 1 mm 厚度下的不同晶粒尺寸下 ZnO 陶瓷样品的直线透过率与入

射光波长之间的关系计算结果如图 2 所示。由结果可得 ZnO 陶瓷透过率随晶粒尺寸的增大而减小, 且当晶粒尺寸大于 5 μm 时, ZnO 陶瓷在可见光范围内的透过率接近于 0。

实验过程中通过在不同 SPS 烧结温度下获得了不同晶粒尺寸的 ZnO 陶瓷样品, 相关样品 600 nm 处直线透过率与模拟计算对比结果如图 3 所示。结果显示, 实验结果与模拟计算结果基本吻合, 晶粒尺寸越小的样品其直线透过率更高, 这一结果与在氧化铝体系中的文献报道结果一致^[18]。相关样品外观及其断面形貌如图 4 所示。

3.2 织构度对 ZnO 陶瓷透过率影响

由式(13)可知, μ 与陶瓷内部晶粒间取向角度及其对应概率相关, 可被视为关于陶瓷织构度 f 的函数 $\mu=\mu(f)$ 。为了计算散射系数 μ 值, 结合表 1 列出的 ZnO 标准卡片 PDF#36-1451 上给出的衍射峰位置及强度, 对发生双折射晶粒间的面夹角 θ 做了(如表 2)

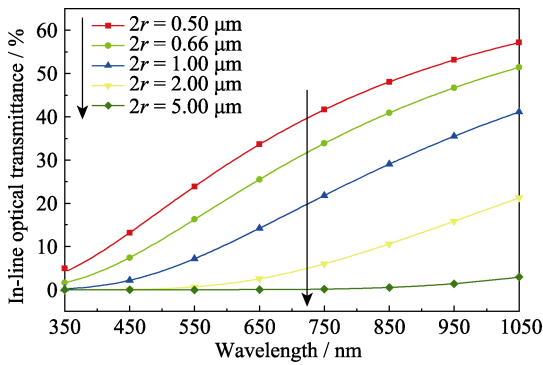


图 2 以 RGD 散射模型计算不同晶粒尺寸 ZnO 陶瓷的直线透过率

Fig. 2 Variation of in-line transmission of ZnO ceramic calculated from the RGD scattering model from different grain sizes

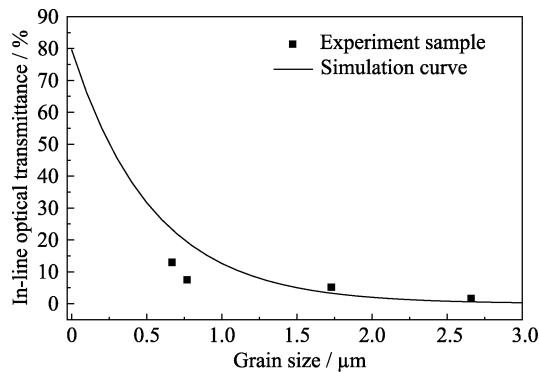


图 3 不同晶粒尺寸下 ZnO 陶瓷的直线透过率模拟计算结果与实际对比

Fig. 3 Comparison of in-line optical transmittance of ZnO ceramics with different grain sizes between calculated values from the RGD scattering model and ZnO samples by SPS processing

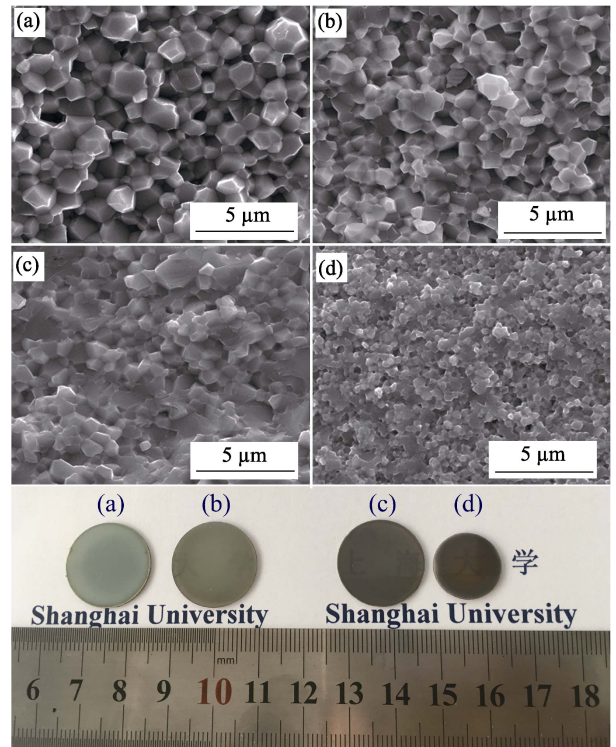


图 4 在晶粒尺寸为(a) 2.65、(b) 1.72、(c) 0.76 和(d) 0.66 μm 时 ZnO 陶瓷样品及其断面形貌

Fig. 4 Photographs of ZnO ceramics and corresponding fracture morphologies with grain sizes of (a) 2.65, (b) 1.72, (c) 0.76 and (d) 0.66 μm

划分, 对应的颗粒所占比例按标准 PDF 卡片晶面参数及对应比例给出了标准计算值。XRD 衍射峰对应晶面与(001)面的面夹角为 $\alpha(\theta=90-\alpha)$, 计算如式(15)所示, 其中 a, c 为 ZnO 的晶格常数, 分别为: $a=0.324982$ nm, $c=0.520661$ nm。

$$\cos \alpha = \frac{h_1 h_2 + k_1 k_2 + \frac{1}{2}(h_1 k_2 + h_2 k_1) + \frac{3a^2}{4c^2} l_1 l_2}{\sqrt{\left(h_1^2 + k_1^2 + h_1 k_1 + \frac{3a^2}{4c^2} l_1^2 \right) \left(h_2^2 + k_2^2 + h_2 k_2 + \frac{3a^2}{4c^2} l_2^2 \right)}} \quad (15)$$

则散射因子 $\mu=P_1 \times 0 + P_2 \times 0.5 + P_3 \times 0.707 + P_4 \times 0.866 + P_5 \times 1$, 其初值 $\mu_0=0.283 \times 0 + 0.420 \times 0.5 + 0.070 \times 0.707 + 0.088 \times 0.866 + 0.14 \times 1=0.4756$ 。按照 ZnO 陶瓷厚度为 1 mm, 晶粒尺寸为 0.35 μm, 平均折射率大小为 2.01 时, 不同散射因子计算结果如图 5 所示。由计算结果可知, 获得小晶粒尺寸样品后, 高取向度对非立方体系透明陶瓷的透过率影响显著。随着在陶瓷内部光传输过程中具有折射率差异的晶粒数量的减少, 陶瓷的理论透过率得到了明显的改善。当陶瓷内部晶粒实现完全定向时, 取向函数取值为 0, 散射因子为 0, 无双折射散射, 直线透过率迅速达到理论最大值。制备晶粒定向排列的透明陶瓷能够

表 1 ZnO 标准 PDF 卡片衍射峰位强度对比表

Table 1 Comparison of ZnO ceramics and standard pattern for ZnO measured by XRD (normalized intensity)

$2\theta/(\circ)$	(hkl)	Intensity/%	Angel α with (001) plane/ (\circ)	$2\theta/(\circ)$	(hkl)	Intensity/%	Angel α with (001) plane/ (\circ)
31.769	100	17.33	90	66.378	200	1.22	90
34.421	002	13.37	0	67.961	112	6.99	52.60
36.252	101	30.40	61.61	69.098	201	3.34	74.88
47.538	102	6.99	42.77	72.561	004	0.61	0
56.602	110	9.73	90	76.953	202	1.22	61.61
62.862	103	8.81	31.66				

表 2 ZnO 标准 PDF 卡片衍射峰位对应角度计算假设

Table 2 Hypothesis calculation of standard pattern for ZnO

$\theta=90-\alpha/(\circ)$	0	30	45	60	90
	(<15)	(15-37.5)	(37.5-52.5)	(52.5-75)	(75-90)
$\sin\theta$	0	0.5	0.707	0.866	1
P_0	$P_{01}(28.3\%)$	$P_{02}(42.0\%)$	$P_{03}(7.0\%)$	$P_{04}(8.8\%)$	$P_{05}(14.0\%)$

表 3 不同织构度下 ZnO 织构化函数数值与织构度间的关系

Table 3 Hypothesis calculation of standard pattern for ZnO

f	$\theta/(\circ)$	0	30	45	60	90	$\mu(f)$
		(<15)	(15-37.5)	(37.5-52.5)	(52.5-75)	(75-90)	
0		28.28%	41.95%	6.99%	8.81%	13.98%	0.4752
4.0%		31.13%	40.62%	5.69%	7.46%	15.09%	0.4588
9.2%		34.57%	43.65%	6.13%	5.58%	10.07%	0.4106
24.8%		46.62%	39.03%	4.34%	4.34%	5.67%	0.3201

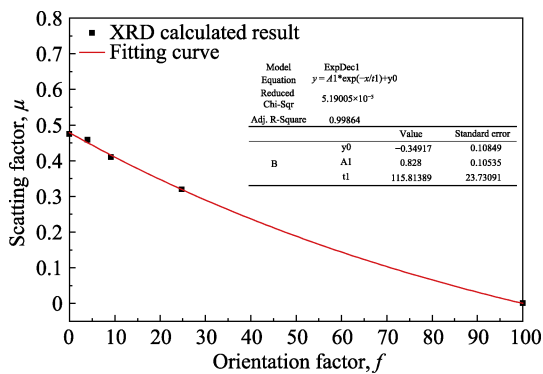


图 5 基于 ZnO 陶瓷织构化函数与织构度关系的数值模拟图
Fig. 5 Hypothesis calculation of scattering factor and orientation factor based on ZnO ceramic

有效抑制双折射对陶瓷直线透过率的影响^[2,19]。

根据在不同磁场强度下注浆成型工艺结合放电等离子体烧结获得了不同织构度的 ZnO 透明陶瓷样品, 根据实验结果及计算获得对应散射系数的值(表 3)。将实验值代入式(13), 计算不同织构度下的散射因子 μ 的值。根据计算数值以指数函数模拟结果如图 5 所示。根据拟合求解对应函数如式(16)所示。

$$\mu(f) = 0.828 \times \exp(-f / 115.814) - 0.349 \quad (16)$$

根据所得函数, 将散射因子换算成与织构度关联的相关数据模拟如图 6 所示。与模拟结果相似, ZnO 透明陶瓷的直线透过率随陶瓷的织构度的提升而逐渐增大。图 7 对比了实际样品与相同晶粒尺寸下(0.35 μm)不同织构度的 ZnO 透明陶瓷样品在 600 nm 波长处的直线透过率模拟数据, 从图中相应的理论模型直线与实际 SPS 样品数据点相对位置来看, 在取向度较低的范围, 较采用 RGD 模型得到的理论光学透过率与 SPS 烧结得到的 ZnO 多晶陶瓷

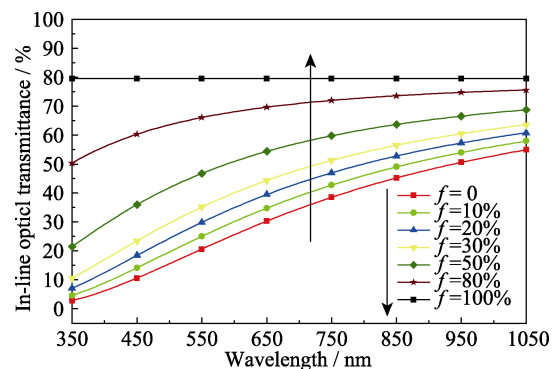


图 6 基于理论计算 ZnO 陶瓷织构度与光学透过率间的关系
Fig. 6 In-line optical transmittance curves of ZnO ceramic with different orientation factor based on theory computation

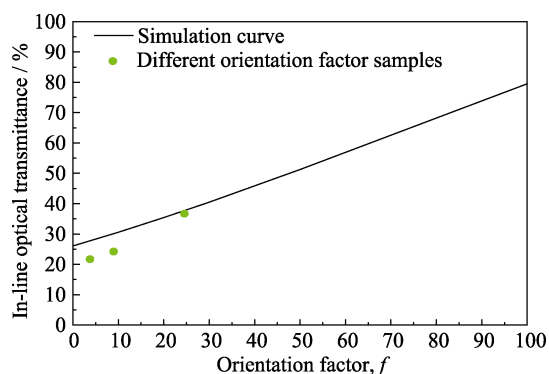


图 7 不同织构度下 ZnO 陶瓷的直线透过率(600 nm 处)模拟计算结果与实际 SPS 样品值对比

Fig. 7 Comparison of in-line optical transmittance of ZnO ceramics calculated from the RGD scattering model with orientation factor at 600 nm

的透过率吻合较好。可以看出随着织构度的提升,有望获得透明性良好的 ZnO 陶瓷材料。

4 结论

1) 本研究建立了单轴六方晶系透明陶瓷的双折射散射与其直线光学透过率之间关联的理论模型,计算了基于 ZnO 陶瓷亚微米级晶粒尺寸与晶粒取向度对于光学直线透过率的影响。

2) 通过设计放电等离子体烧结参数和强磁场下的注浆成型过程,实现了 ZnO 透明陶瓷显微结构的有效调控,当 ZnO 晶粒尺寸从 1.72 μm 减小至 0.35 μm 时, ZnO 透明陶瓷样品在 600 nm 处的直线透过率从 5.1% 提高到 12.9%; 当晶粒尺寸不变 (0.35 μm), 织构度从 4.0% 上升到 24.7% 时, 样品直线透过率从 21.6% 提升到 36.6%。实验结果验证了当晶粒尺寸在微米尺度以下时, ZnO 透明陶瓷的直线光学透过率随晶粒尺寸减小、织构度的提升而明显改善, 理论模型与之吻合良好。

3) 为了保证 ZnO 陶瓷的高织构度, 通常需要晶粒的长大来实现^[20], 而陶瓷的透过率又随着晶粒长大而降低。该矛盾的存在导致在实际制备 ZnO 透明陶瓷过程中需要协调这两种因素的冲突。为获得具有良好透过率的透明 ZnO 陶瓷, 应在减小晶粒尺寸的基础上尽可能提高陶瓷的织构度。

致谢

感谢中国科学院强磁场科学中心方军、郗传英、皮雳老师在强磁场下制备 ZnO 结构化样品过程中提供的帮助。

参考文献:

- [1] COBLE R L. Sintering alumina: effect of atmospheres. *Journal of the American Ceramic Society*, 1962, **45**(3): 123–127.
- [2] MAO XIAOJIAN, WANG SHIWEI, SHIMA S, *et al.* Transparent polycrystalline alumina ceramics with orientated optical axes. *Journal of the American Ceramic Society*, 2008, **91**(10): 3431–3433.
- [3] APETZ ROLF, MICHEL P B BRUGGEN. Transparent alumina: a light-scattering model. *Journal of the American Ceramic Society*, 2003, **86**(3): 480–486.
- [4] KRELL ANDREAS, BLANK PAUL, MA HONGWEI, *et al.* Transparent sintered corundum with high hardness and strength. *Journal of the American Ceramic Society*, 2010, **86**(1): 12–18.
- [5] KRELL ANDREAS, KLIMAKE JENS, HUTZLER THOMAS, *et al.* Advanced spinel and sub- μm Al_2O_3 for transparent armour applications. *Journal of the European Ceramic Society*, 2009, **29**(2): 275–281.
- [6] BERNARD-GRANGER GUILLAUME, GUIZARD CHRISTIAN. Influence of MgO or TiO_2 doping on the sintering path and on the optical properties of a submicronic alumina material. *Journal of the American Ceramic Society*, 2008, **91**(5): 1703–1706.
- [7] LUCKEY D. A fast inorganic scintillator. *Nuclear Instruments & Methods*, 1968, **62**(1): 119–120.
- [8] GOROKHOVA E I, ERON'KO S B, KUL'KOV A M, *et al.* Development and study of ZnO: in optical scintillation ceramic. *Journal of Optical Technology C/c of Opticheskii Zhurnal*, 2015, **82**(12): 837.
- [9] RODNYO P A, CHERNENKO K A, GOROKHOVA E I, *et al.* Novel scintillation material-ZnO transparent ceramics. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2012, **59**(5): 2152–2155.
- [10] PRAKASAM MYTHILLI, VIRAPHONG OUDOMSACK, MICHAU DOMINIQUE, *et al.* Critical parameters to obtain Yb^{3+} doped Lu_2O_3 and ZnO transparent ceramics. *Ceramics International*, 2014, **40**(1): 1859–1864.
- [11] GOROKHOVA E I, RODNYIP A, LOKSHIN E P, *et al.* Structural, optical, and scintillation characteristics of ZnO ceramics. *Journal of Optical Technology C/c of Opticheskii Zhurnal*, 2011, **78**(11): 753–760.
- [12] 赵宇. 镱掺杂氧化锌纳米晶透明陶瓷的制备. 长春: 吉林大学硕士学位论文, 2008.
- [13] QIN JIEMING, ZHANG YING, CAO JIANMING, *et al.* Characterization of the transparent n-type ZnO ceramic with low resistivity prepared under high pressure. *Acta Physics Sinica*, 2011, **60**(3): 431–435.
- [14] HULST HC, TWERSKY V. *Light Scattering by Small Particles*. Hoboken: John Wiley, 1957.
- [15] BARBER P W, WANG D S. Rayleigh-Gans-Debye applicability to scattering by nonspherical particles: corrigenda. *Applied Optics*, 1978, **17**(5): 797.
- [16] BOND W L. Measurement of the refractive indices of several crystals. *Journal Of Applied Physics*, 1965, **36**(5): 1674–1677.
- [17] WEN T C SHETTY D K, KRELL A. On the effect of birefringence on light transmission in polycrystalline magnesium fluoride. *Journal of the American Ceramic Society*, 2015, **98**(3): 829–837.
- [18] WEN TZUCHIEN. Effect of grain size on optical transmittance of birefringent polycrystalline ceramics. Salt Lake City: The University of Utah, 2016.
- [19] YOICHI SATO, JUN AKIYAMA, TAKUNORI TAIRA. Orientation control of micro-domains in anisotropic laser ceramics. *Optical Materials Express*, 2013, **3**(6): 829–841.
- [20] SUZUKI T S. Control of texture in ZnO by slip casting in a strong magnetic field and heating. *Chemistry Letters*, 2002, **31**(12): 1204–1205.