

# 透明介质的衍射效应

李 艺 苏希玉

(曲阜师范大学物理系, 曲阜, 273165)

宋连科

(曲阜师范大学激光所, 曲阜, 273165)

**摘要:** 多晶材料对光的散射能力有三种成因: 晶界散射, 异相散射, 气孔散射。实际上, 上述每一种结构又皆由其它结构相包围。如此造成的具体现象是所考察介质元相对于周围介质的折射率有一定的变化。对此情况建立模型, 通过简化的衍射分析, 可得出散射作用对折射率变化大小的依赖关系。

**关键词:** 微晶 散射 衍射

## Diffraction effect of transparent materials

*Li Yi, Su Xiyu*

(Department of Physics, Qufu Normal University)

*Song Lianke*

(Institute of Laser, Qufu Normal University)

**Abstract:** In polycrystalline materials, there are three phenomena: the scattering in crystal boundary, the phase change scattering, the air cell scattering. Actually, the index variation of the observed material unit, relative to the adjacent medium, always exists. According to this consideration, the scattering effect as the function of index change is obtained in terms of the diffraction analysis.

**Key words:** polycrystal scattering diffraction

## 一、引 言

M. Born 和 E. Wolf 已经在他们的经典性著作<sup>[1]</sup>中对电磁波在若干种形状开口的不透明屏和金属屏上的衍射问题进行了综合讨论。但我们在研究固体微晶材料对光的散射问题时发现<sup>[2,3]</sup>, 当微晶晶粒的平均大小给定时, 晶粒与周围环境的折射率差, 或说相对折射率, 可能是影响晶粒对光的散射能力的关键因素。在光学领域内得到应用的固体微晶材料, 有专家们熟悉

的热压多晶 Irtran 系列,以及新近被介绍的矿物材料石髓<sup>[2,3]</sup>及人造材料  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷<sup>[7]</sup>,它们皆有着相似的微晶结构。这些材料内部的折射率变化是如何影响介质元的散射能力的,已有一些文献用不同的方法进行了讨论,例如在计算中加入衍射修正项等,但这些修正项的引入是非常生硬的,而且结果复杂,不方便使用<sup>[4,5,6]</sup>。本文通过一些近似,将计算过程简化,得出一个简单却十分有效的关系式,用来分析判断折射率变化对衍射效果的影响,并将此结果与实际情况相比较,证明它是有实际意义的,对科研实践有积极的指导作用。

## 二、介质模型及透射率分析

所有多晶材料的内部,皆有着相似的结构,一般有晶相,非晶相,或间杂有气孔。对不同的材料,这些结构造成的散射程度各有不同。有些介质如陶瓷,其内部气孔较多,气孔散射最为剧烈;再如矿物质材料石髓,其内部三种因素各作贡献,总的散射效果乃是三种因素之和。实际上,当考察气孔为散射元时,其周围的晶相,非晶相即为环绕介质;当考察某晶粒为散射元时,



Fig. 1a TEM photograph of chalcidony (2000×)

Fig. 1b SEM photograph of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramics (7000×)

其周围的其它因素即为环绕介质。具体如图 1a 和图 1b,分别为石髓及  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷的电镜照片。可看出,石髓中的小晶粒相互之间紧密排列,其间可能夹杂有极少量的非晶相。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷的结构较为松散,晶相为主,并有大量气孔存在。上述多晶材料有一个共同特点,即在它们的主要实用波长上有很好的透明度,基本上可忽略其吸收作用。此

时导致散射发生的原因应是折射和衍射,本文仅讨论衍射造成的影响。晶粒作为散射元,是个透明体,产生衍射的因素应是各部分介质之间的透射率差别。为此,建立一个简单模型:设有一无限大介质屏,其前表面位于空间直角坐标系的  $YOZ$  平面上,折射率为  $n_1$ ;中间嵌入一介质块,它在  $YOZ$  平面上的投影为  $2a \times 2b$  的矩形,折射率为  $n_2$ 。具体如图 2 所示。虽然实际上每一散射元应被其它介质全部环绕,但当入射光线透射到介质 2 前表面以后,发生的仍然是图 2 所示较简单的过程。因此,这个模型是有一定的实际意义的。

设有一束光线从  $x > 0$  空间向  $x < 0$  空间传播。不考虑不同介质由于吸收造成的透射率不等,介质屏的透射率仅由折射及反射决定。设光线在介质 1 的透射率为  $T_1$ ,在介质 2 的透射率为  $T_2$ 。首先讨论入射光在介质 1 前后表面的透射。为简便分析,仅考虑电磁波垂直入射至介质的情形。由电磁波理论,得光线在介质 1 前后表面的透射率分别为

$$T_{1f} = \frac{4n_1}{(1+n_1)^2}; \quad T_{1r} = \frac{4n_1}{(n_1+1)^2}$$

得总透射率为

$$T_1 = T_{1f}T_{1r} = \frac{16n_1^2}{(n_1+1)^4} \quad (1)$$

同理,对介质 2,有总透射率简单表为

$$T_2 = T_{2f}T_{2r} = \frac{16n_2^2}{(n_2+1)^4} \quad (2)$$

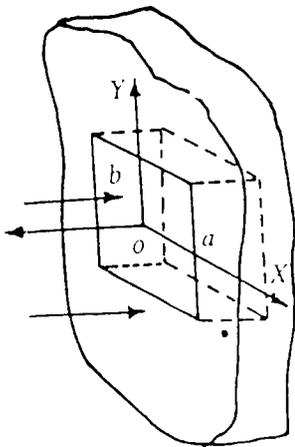


Fig. 2 Diffraction model of the transparent material

### 三、透明屏的衍射

设入射光强为  $I_0$ , 单纯考察介质 2 的透光情况, 即设介质 1 不透明, 应有衍射花样为<sup>[1]</sup>

$$I = \left(\frac{\sin u}{u}\right)^2 \left(\frac{\sin v}{v}\right)^2 I_0 T_2 \quad (3)$$

式中,  $u = 2\pi a \sin \theta / \lambda$ ;  $v = 2\pi b \sin \theta' / \lambda$ ,  $\theta, \theta'$  分别为衍射光线偏离入射光线方向的角度。已知我们所讨论的微晶材料的晶粒线度一般在  $10 \sim 1000 \text{nm}$ , 若以介质 2 代表微晶晶粒, 须使  $2a, 2b$  取以上数量级, 则可在实验波段可见区及近红外区均满足  $2a/\lambda, 2b/\lambda \leq 1$ 。此时, 衍射花样中央主极大之半角宽  $\theta, \theta' = \arcsin \lambda/2a \geq \pi/2$ , 对应(3)式中的  $u, v = \pi$ 。这个能量分布范围是相当大的。又因一般光学实验中所用激光器的发散角很小, 即使考虑到各种实验过程对激光光束方向性的破坏, 其光斑主要部分的发散角也仍在  $2 \text{deg}$  以内。为建立定量标准, 设分布在衍射花样中心  $\pm 5 \text{deg}$  以内的光线可被认为较好地保持了方向性, 在此范围以外的光能分布与散射相对应, 这部分能量占总光能的比例为

$$\frac{\int_{-\pi/36}^{\pi/36} \left(\frac{\sin u}{u}\right)^2 \left(\frac{\sin v}{v}\right)^2 d\theta d\theta' + \int_{\pi/36}^{\pi} \left(\frac{\sin u}{u}\right)^2 \left(\frac{\sin v}{v}\right)^2 d\theta d\theta'}{\int_{-\pi}^{\pi} \left(\frac{\sin u}{u}\right)^2 \left(\frac{\sin v}{v}\right)^2 d\theta d\theta'} > 98\% \quad (4)$$

从此得出结论, 几乎全部透射光能均参与有效散射。

实际上, 介质 1 也是透明的, 与介质 2 的差别仅在于透射率的不同。又知不论  $T_1 > T_2$  或  $T_2 > T_1$ , 只要  $|T_1 - T_2|$  确定, 衍射效果应是相同的, 不同之处仅在于衍射花样的分布形式。为此, 设  $n_1 > n_2$ , 则有  $T_1 > T_2$ 。在介质 2 的透射光强  $T_2 I_0$  中将等同于介质 1 的透射光强  $T_1 I_0$  部分作为背景光减掉。如此可将整个衍射简化为在不透明屏上透明孔的衍射, 透射光强为  $I_0(T_2 - T_1)$ , 有衍射花样为

$$I_d = \left(\frac{\sin u}{u}\right)^2 \left(\frac{\sin v}{v}\right)^2 (T_2 - T_1) I_0 \quad (5)$$

我们关心的是衍射光强  $I_d$  的极值  $(T_2 - T_1) I_0$  与被减掉的背景光  $I_0 T_1$  的比值如何, 因为这个

比值能较好地反应由衍射造成的散射效果的强弱。定义  $Q$  函数为

$$Q = \frac{I_0(T_2 - T_1)}{I_0 T_1} = \frac{n_2^2(n_1 + 1)^4 - n_1^2(n_2 + 1)^4}{n_1^2(n_2 + 1)^4} \quad (6)$$

再次简化分析, 令介质 2 的折射率  $n_2 = 1$ , 取  $n = n_1/n_2 = n_1$ , 得到

$$Q = \frac{(n + 1)^4 - 16}{16n^2} \quad (7)$$

具体到实际样品,  $Q$  随相对折射率的变化情况见图 3。可看出, 当相对折射率接近 1 时,  $Q$  值很小, 表明衍射花样的光强度与背景光强度之

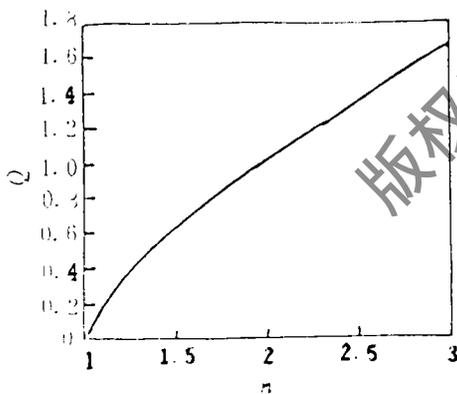


Fig. 3  $Q-n$  curve

比很小,不产生明显的衍射效应,因此不导致较强的散射。当相对折射率较大时,如 $n$ 等于或大于1.2, $Q$ 值明显升高,相应于较强的散射能力。这说明了为什么K. N. Liou等人<sup>[6]</sup>得出了相对折射率不影响衍射效果的结论,原因在于,他们所研究对象与邻界介质的折射率变化在0.2以下,所得 $Q$ 值很小,可以近似认为无影响。同时,本结论可以解释文献[2,3]中的遗留问题:当样品多晶材料内部仅有单纯一种晶相存在且无气孔分布时,晶界上的折射率变化量之上限亦仅为该晶体的双折射率,一般有 $\Delta n < 0.02$ ,不可能导致明显的散射。这就是为什么大家所熟知的热压多晶系列材料不产生明显散射的原因。图1a所示石髓的微晶结构基于同样原因不能造成明显的散射。石髓的散射是由于一定量的气孔的存在造成的,这在文献[3]中已有所描述。文献[7]中给出的透明 $Al_2O_3$ 陶瓷电镜照片见图1b,其内有大量气孔,晶体-空气相对折射率在1.7, $Q$ 对应很高的 $Q$ 值,产生强烈的散射。图3还说明,当 $n$ 继续增大时, $Q$ 仍有继续增大的趋势。这是可以理解的。当 $n_1$ 继续增大,使得 $n = n_1/n_2$ 增大,介质1部分的透射光 $I_0 T_1$ 作为背景光继续减弱,介质2部分的 $I_0(T_2 - T_1)$ 相对于 $I_0 T_1$ 呈增大趋势,并得到大于1的 $Q$ 值,这是符合物理实际的。需要说明的是,散射效应的强弱还应与散射元的平均线度有关。并且,当散射元之平均线度可以与入射光波长相比拟时,按严格理论,上述模型过于简单。但是,正是由于所得出的结论对实际问题有明确的指导意义,才使我们容许上述计算中的近似。

#### 四、结 论

本文讨论中虽然有数次简化,所得结论仍然有明显的实际意义。通过计算,我们知道微晶材料内部各种原因造成的折射率变化的大小是微晶材料散射能力的决定因素。并据此解答了关于Irtran系列, $Al_2O_3$ 陶瓷等材料散射能力的问题。这说明,依据本文结论,可对微晶材料的散射能力作出较为准确的估计,用于指导理论研究及实验研究的进行。

#### 参 考 文 献

- 1 Born M, Wolf E. Principles of optics. Pergamon Press, 6th ed, 1980
- 2 Li Y, Su X, Li Ch *et al.* Chinese Physics Letters, 1990;7(12):544~547
- 3 李 艺,苏希玉,李继仲. 光学学报,1992;12(5):80~84
- 4 Wendling P, Wendling R, Weickmann H K. Appl Opt, 1979;18(15):2663~2671
- 5 Muinonen K, Lumme K, Peltoniemi J *et al.* Appl Opt, 1989;28(15):3051~3060
- 6 Liou K N, Cai Q, Pollack J B *et al.* Appl Opt, 1983;22(19):3001~3008
- 7 刘联宝,陶瓷-金属封接技术指南. 北京:国防工业出版社,1990;16~34

作者简介:李 艺,男,1956年6月出生。副教授。现从事微晶材料光学性质及实用性研究。  
苏希玉,男,1960年3月出生。副教授。现从事超导物理及固体光学性质研究。  
宋连科,男,1961年7月出生。讲师。现从事激光偏光技术研究。

收稿日期:1994-01-06 收到修改稿日期:1994-04-12