

## 吸收光谱测量晶体折射率的简易方法

张庆礼<sup>1</sup>, 殷绍唐<sup>1</sup>, 王召兵<sup>1,2</sup>, 孙敦陆<sup>1</sup>, 万松明<sup>1</sup>

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031; 2. 曲阜师范大学激光研究所, 曲阜 273165)

**摘要:** 折射率是晶体的基本参数, 本文提出了利用透过光谱来测量晶体折射率的简易方法, 此种方法具有对样品的尺寸要求低、测量范围无限制、操作简单、易获得一定光谱范围晶体折射率的优点。用吸收光谱法和自准直法测量了 Nd:GGG 的折射率, 二者给出的折射率测量结果符合得很好, 表明用晶体透射光谱来测量折射率是一种有效的简易测量方法。

**关键词:** 折射率; 吸收光谱; Nd:GGG; 晶体

**中图分类号:** O78

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-985X(2007)01-0110-04

## A Simple Method to Measure Crystal Refractive Indices with an Absorption Spectrum

ZHANG Qing-li<sup>1</sup>, YIN Shao-tang<sup>1</sup>, WANG Zhao-bing<sup>1,2</sup>, SUN Dun-lu, WAN Song-ming

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. Laser Research Institute, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

(Received 16 August 2006)

**Abstract:** Refractive index is an essential parameter of crystal. This work gives a simple method to measure the refractive index of crystal with its absorption spectrum, which has the advantages such as no strict demand for the sample size, no measurement range restriction and is easy to operate and can obtain indices within a spectral range. The refractive indices of Nd:GGG were measured by the absorption spectrum method and autocollimation method. The measured refractive indices given by two methods are consistent very well, which indicates that it is a viable method to measure the refractive indices of crystal by its absorption spectrum.

**Key words:** refractive index; absorption spectrum; Nd:GGG; crystal

## 1 引言

折射率是光学晶体的基本性质, 是研究晶体的光谱、激光等性能的重要参数。测量晶体折射率的方法有很多种, 如 V 棱镜法<sup>[1]</sup>、干涉法<sup>[2,3]</sup>、自准直法<sup>[4]</sup>和最小偏向角法<sup>[5]</sup>等。这些方法各有优缺点。其中, 阿贝折射仪法具有设备结构简单、测量快速、简便的优点, 但精度较低, 测量范围仅为 1.300 ~ 1.700; 普氏折射仪法对折射液和样品尺寸的要求低, 但样品两表面要精细抛光, 要求被测样品的折射率低于标准棱镜的折射率, 这给折射率的测量带来很多不便; V 棱镜折射仪的精度较高, 测量范围大, 但对折射液的要求高, 测量范

收稿日期: 2006-08-16

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 50472104; 60478025)

作者简介: 张庆礼 (1973-), 男, 云南省人, 副研究员。E-mail: zql@aiofm.ac.cn

围  $< 1.95$ ; 最小偏向角法和自准直法测量折射率的范围不受限制, 精度也较高, 但对仪器的要求高, 且晶体需加工成为较复杂的形状, 这就要求晶体必须满足一定的尺寸, 方可加工出满足测量要求的晶体样品。在实际工作中, 很多晶体所能生长出的尺寸很小, 在毫米量级, 用这两种方法测量就不可行。

本文提出了利用透过光谱来测量晶体折射率, 此种方法对样品尺寸的要求很低, 对测量折射率范围也没有限制, 操作简单, 由透射光谱即可快速计算出晶体折射率, 在实验室中非常容易实现, 且可获得较高的折射率测量精度。另一方面, 利用透射光谱法可获得很宽光谱范围内的折射率值。而 V 棱镜法、干涉法、自准直法和最小偏向角法等由于受到测量光源的限制, 通常仅可获得数个波长的折射率数据。显然前者较后者能更好地给出折射率在一定光谱范围内的折射率分布规律。

为了验证此方法的精度, 我们通过 Nd:GGG 的透射光谱计算了 Nd:GGG 晶体的折射率, 并与用自准直法测量的折射率结果做了比较, 结果表明此方法是一种具有较高精度、简易快速的折射率测量方法。

由吸收光谱测量晶体折射率法对样品的要求为: (1) 有两个精密抛光的平行平面; (2) 平面稍大于测量入射、出射光束的截面积; (3) 厚度  $d$  满足  $2nd \gg \lambda$ , 其中  $n$  为样品折射率,  $\lambda$  为测量光波长。

需要说明的是, 本文中所指的晶体折射率为通常意义上的折射率, 是真空中光速与介质中的光速比<sup>[6]</sup>, 它为实数值。

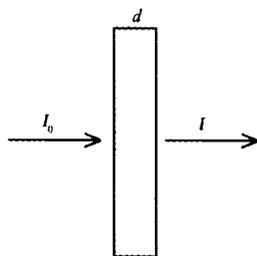


图 1 光垂直入射晶体薄片

Fig. 1 Light vertical-incident transmission through crystal wafer

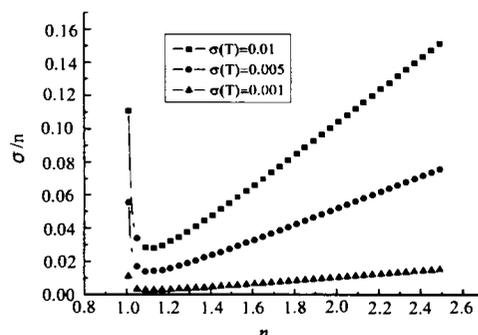


图 2 测量误差  $\sigma(T)$  引起的折射率误差

Fig. 2 Refractive index error caused by the measured error  $\sigma(T)$

## 2 吸收光谱测量晶体折射率

厚度为  $d$ 、折射率为  $n$  的晶体如图 1 所示。对于绝缘晶体, 其折射率为一实数, 在其透光波段吸收系数为 0。晶体经过精密光学加工后的平面, 可视为一个理想的镜面。一束能量为  $I_0$  的光垂直于加工晶面从折射率为 1 的空气中入射, 透过晶体后进入折射率为 1 空气中, 此时光束能量为  $I$ 。通常测量的晶体样品厚度  $d$  值在毫米量级, 可忽略光的干涉效应。由文献[7]可得透射率  $T = I/I_0$  和晶体反射率  $R$ 、吸收系数  $\alpha$  有如下关系:

$$T = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{1-R^2 e^{-2\alpha d}} \quad (1)$$

其中

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

在晶体的透明波段,  $\alpha = 0$ , (1) 简化为

$$T = \frac{(1-R)^2}{1-R^2} = \frac{1-R}{1+R} \quad (3)$$

由(2)、(3)式有:

$$R = \frac{1-T}{1+T} \quad (4)$$

$$n = \frac{1+\sqrt{R}}{1-\sqrt{R}} \quad (5)$$

由  $T$  的测量误差  $\sigma(T)$  引起的折射率误差由下式计算:

$$\sigma(n) = \frac{dn}{dR} \cdot \frac{dR}{dT} \Delta T = \frac{(1+R)^2}{2(1-\sqrt{R})^2 \sqrt{R}} \sigma(T) \quad (6)$$

误差  $\sigma(T)$  值为 0.01、0.005 和 0.001 所引起的折射率误差曲线如图 2 所示。可以看到,在同样的  $\sigma(T)$  值下,折射率值不同所引起的误差并不相同,在折射率为 1 附近有一拐点,约为 1.11,此处  $\sigma(n)$  有最小值, $\sigma(T)$  值为 0.01、0.005 和 0.001 时,相应的  $\sigma(n)$  值为 0.028、0.014、0.0028。离此拐点越远,同样  $\sigma(T)$  值引起的误差也就越大。例如,当  $\sigma(T) = 0.01$  时, $n = 2.5$ 、1.01 时的误差为 0.15、0.11;当  $\sigma(T) = 0.001$  时, $n = 2.5$ 、1.01 时的误差为 0.015、0.011。当  $\sigma(T) = 0.001\%$  时, $n$  的精度可达到  $10^{-3}$  量级。

对于吸收系数  $\alpha$  较大的晶体(如掺激活离子的光学晶体,在激活离子的吸收处常有较大的吸收),可选择适当厚度  $d$ ,满足  $e^{-2\alpha d} \approx 0$  的近似,测量两块掺杂浓度相同但厚度不同的晶体,取透射率的比值:

$$\frac{T_1}{T_2} = e^{\alpha(d_2 - d_1)} \quad (7)$$

由此求得吸收系数  $\alpha$  后,再利用(2)式和下式来获得晶体折射率  $n$ :

$$R = 1 - \sqrt{e^{\alpha d} T} \quad (8)$$

对于大多数掺稀土和过渡金属离子作为激活离子的激光晶体,激活离子的吸收大多数情况下不会覆盖基质晶体的整个透明波段,故可取吸收系数  $\alpha = 0$  的波段内的透射率数据来计算折射率。

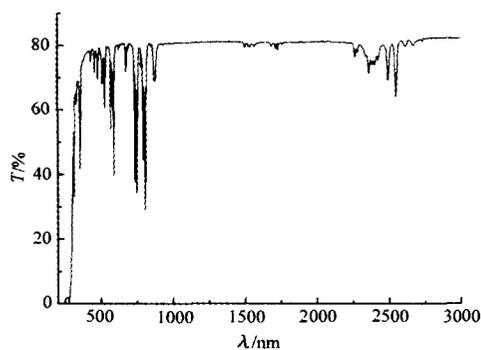


图3 (0.6at%)Nd:GGG 的吸收光谱

Fig.3 The absorption spectrum of (0.6at%)Nd:GGG

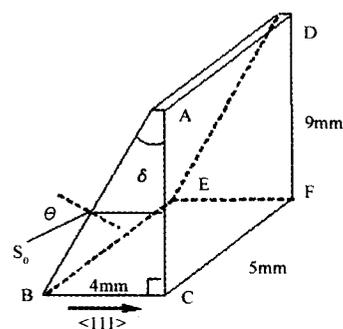


图4 Nd:GGG 晶体棱镜

Fig.4 Nd:GGG crystal prism

### 3 由吸收光谱计算 Nd:GGG 晶体折射率

Nd:GGG 是重要的激光晶体材料,它具有热容大、可获得无核心大直径激光晶体元件且光学质量很均匀等优点,在近年来受到人们的广泛关注。作为一个例子,我们用 Nd:GGG 的吸收光谱来计算它的折射率。

在室温下,用 Lambda 900 紫外可见红外分光光度计测量了  $\text{Nd}^{3+}$  掺杂浓度为 0.6% 原子分数的 Nd:GGG 的吸收光谱。其中,Nd:GGG 样品经双面光学抛光,厚度为 2mm。测量所得的 Nd:GGG 吸收光谱如图 3 所示。因在 1421 ~ 942.5nm 波段无  $\text{Nd}^{3+}$  的吸收,我们取这一段的吸收光谱来计算 Nd:GGG 的折射率。

为了对比,我们也用自准法测量了 Nd:GGG 的折射率。Nd:GGG 样品的加工形状为一直角棱镜,如图 4 所示。加工好的直角棱镜的直角边 BC(沿  $\langle 111 \rangle$  方向)和 AC 分别是 4mm 和 9mm,棱镜的厚度 CF 为 5mm,棱镜斜面及 ACFD 面(即(111)面)抛光,平面度优于  $\lambda/4$ ,并在 ACFD 面镀铝反射膜。在精度为 2 弧秒

的 32J 测角仪的平台上,用 473nm 激光、632.8nm 的 He-Ne 激光、1064nm、1319nm 和 1338nm YAG 激光作为测试光源,测量出  $\theta$  和  $\delta$  后,即可计算出 Nd:GGG 的折射率。

由吸收光谱计算所得 Nd:GGG 的折射率计算结果如图 5(a) 曲线所示,用自准直法测量所得的折射率列于表 1。可以看到,在折射率值的小数点后两位,二者的结果是完全一致的。这表明用吸收光谱来计算折射率是可行的,可达到较好的精度。

用吸收谱所计算得到的折射率对如下形式的 Sellmeier 方程进行拟合:

$$n^2(\lambda, T) = A(T) + \frac{B(T)}{\lambda^2 - C(T)} - D(T)\lambda^2 \quad (9)$$

拟合用 Origin 7.0 软件来进行,拟合方法用阻尼最小二乘法,其结果为:  $A = 2.85993$ ,  $B = 2788937.8207$ ,  $C = -2517526.90754$ ,  $D = 1.2652 \times 10^{-7}$ , 其中波长的单位为 nm。拟合曲线如图 5(c) 所示。由拟合方程计算所得的折射率如表 1 第三行所示。由表可见,除了 473nm 处,由吸收光谱法拟合方程计算的折射率和自准直法测量的折射率有较大误差 ( $-0.0153$ ) 外,在其他波长处均和用自准直法测量的结果符合得很好,在 632.8nm、1064nm、1319nm 和 1338nm 处的相差值分别为  $-0.0011$ 、 $-0.003$ 、 $-0.0059$  和  $-0.0005$ 。可见由吸收光谱来测量晶体的折射率值不失为一种有效的简易测量方法。

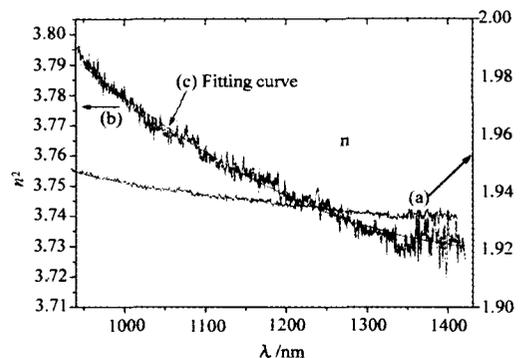


图 5 由吸收光谱计算得的(0.6at%)Nd:GGG 的折射率(a)、折射率平方(b)和 Sellmeier 方程拟合曲线(c)

Fig. 5 The refractive index (a), refractive index square (b) calculated from its absorption spectrum, and fitted curves (c) of (0.6at%) Nd:GGG with sellmeier equation

表 1 吸收光谱法和自准直法测量 Nd:GGG 折射率结果比较

Table 1 Measured refractive indices compare of Nd:GGG by the absorption spectrum method to autocollimation method

Method	$\lambda = 473 \text{ nm}$	$\lambda = 632.8 \text{ nm}$	$\lambda = 1064 \text{ nm}$	$\lambda = 1319 \text{ nm}$	$\lambda = 1338 \text{ nm}$
Autocollimation method	1.9915	1.9652	1.9437	1.9386	1.9382
Absorption spectrum method			1.9407	1.9323	1.9310
Calculated values by fitted sellmeier equation	1.9762	1.9663	1.9410	1.9327	1.9323

## 4 结 论

本工作给出了利用晶体吸收光谱来测量晶体折射率的方法。同时用自准直法和吸收光谱法测量了 Nd:GGG 的折射率,二者所给出的折射率测量结果符合得很好,表明用晶体透射光谱来测量它的折射率是一种可行的方法。

致谢:本文中的透射光谱由中国科学院安徽光机所顾志怀工程师、徐娟实验师帮助测量,自准直法测量 Nd:GGG 晶体折射率由中国科学院福建物质结构研究所黄凌雄、张戈老师帮助测量,在此一并表示衷心感谢。

## 参 考 文 献

- [1] 李晶. V 棱镜法测掺  $\text{Yb}^{3+}$  激光玻璃折射率[J]. 曲阜师范大学学报, 1998, 24(3): 46-47.
- [2] 郝殿中, 吴福全. 干涉法测量晶体的折射率[J]. 激光技术, 2003, 27(5): 407-408.
- [3] 杨德中, 赵建林, 李恩普. 利用 Mach-Zehnder 干涉仪测量晶体的折射率与光学均匀性[J]. 光学技术, 1998, 24(1): 64-65.
- [4] 程树英, 张戈. 用自准直法测量 ZF5 玻璃的折射率[J]. 福州大学学报, 2001, 29(3): 14-16.
- [5] 周棠. 用棱镜最小偏向角法测量晶体折射率[J]. 人工晶体学报, 1997, 26(3-4): 377.
- [6] 叶玉堂, 饶建珍, 肖峻. 光学教程[M]. 第 1 版, 北京: 清华大学出版社, 2005, 8: 393.
- [7] 方容川. 固体光谱学[M]. 第 1 版, 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001, 5: 31.