

自准直法测 GdTaO<sub>4</sub> 晶体折射率

王小飞 杨华军 张戈 张庆礼 窦仁勤 丁守军 罗建乔 刘文鹏 孙贵花 孙敦陆

Measurement of refractive indices of GdTaO<sub>4</sub> crystal by the auto-collimation method

Wang Xiao-Fei Yang Hua-Jun Zhang Ge Zhang Qing-Li Dou Ren-Qin Ding Shou-Jun Luo Jian-Qiao Liu Wen-Peng Sun Gui-Hua Sun Dun-Lu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 087801 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.087801

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.087801>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I8>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于多角度偏振载荷数据的中国典型地物偏振特性研究

Polarized properties of typical surface types over China based on the multi-angular polarized remote sensing measurements

物理学报.2015, 64(22): 227801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.227801>

Ba(Mg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub> 电子结构第一性原理计算及光学性能研究

First-principle study of electronic structure and optical properties of Ba(Mg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>

物理学报.2015, 64(21): 217801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.217801>

基于介质环形柱结构的二维光子晶体中 Dirac 点的实现

Photonic Dirac point realized in two dimensional annular photonic crystals

物理学报.2015, 64(14): 147802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.147802>

基于磁/电介质混合型基体的宽带超材料吸波体的设计与制备

Design and fabrication of a broadband metamaterial absorber based on a dielectric and magnetic hybrid substrate

物理学报.2015, 64(7): 077801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.077801>

硅太阳能电池的调制载流子红外辐射动态响应与参数分析

Infrared radiation dynamic response and parametric analysis for silicon solar cell using photocarrier radiometry

物理学报.2014, 63(22): 227801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.227801>

自准直法测 GdTaO<sub>4</sub> 晶体折射率\*王小飞<sup>1)2)</sup> 杨华军<sup>1)2)</sup> 张戈<sup>3)</sup> 张庆礼<sup>1)†</sup> 窦仁勤<sup>1)2)</sup> 丁守军<sup>1)2)</sup>  
罗建乔<sup>1)</sup> 刘文鹏<sup>1)</sup> 孙贵花<sup>1)</sup> 孙敦陆<sup>1)</sup>

1)(中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽光学精密机械研究所, 光子器件与材料研究室, 合肥 230031)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

3)(中国科学院福建物质结构研究所, 福州 350002)

(2015年9月18日收到; 2016年2月1日收到修改稿)

本文利用自准直法在 473, 532, 632.8 和 1064 nm 的激光波长上精确地测量出 GdTaO<sub>4</sub> 晶体的折射率, 得到了 Sellmeier 方程, 并计算了在 632 nm 处光轴与折射率主轴  $n_z$  的夹角为 21.75°, 进而得知 GdTaO<sub>4</sub> 晶体是正光性双轴晶体.

关键词: 自准直法, GdTaO<sub>4</sub> 晶体, 折射率

PACS: 78.20.Ci

DOI: 10.7498/aps.65.087801

## 1 引言

GdTaO<sub>4</sub> 属于单斜晶系, 存在两种空间群结构:  $I2/a$  型 (M 型,  $b$  轴是惟一的二次对称轴) 和  $P2/a$  (M' 型). M' 型 GdTaO<sub>4</sub> 可直接在低于 1400 °C 下合成, 当温度高于 1450 °C 时它会转化成具有白钨矿结构的高温四角相, 而后随着温度的下降转化为 M 型 GdTaO<sub>4</sub>. 其晶胞参数为  $a = 5.411 \text{ \AA}$ ,  $b = 11.049 \text{ \AA}$ ,  $c = 5.073 \text{ \AA}$ ,  $\beta = 95.58^\circ$  [1]. GdTaO<sub>4</sub> 晶体因具有高密度 (8.84 g·cm<sup>-3</sup>)、快衰减、辐照硬度大、物理化学性能稳定等优良特性而被认为有望成为一种新型的重闪烁体材料, 文献 [2,3] 对 GdTaO<sub>4</sub>, Tb: GdTaO<sub>4</sub> 晶体生长及发光性能进行了研究; 文献 [4,5] 对 GdTaO<sub>4</sub> 晶体发光机理、物理性能及其闪烁性能进行了研究并探索其作为一种新型高密度闪烁体的可能性; 文献 [6, 7] 对 Nd:GdTaO<sub>4</sub> 的激光性能进行了研究, 认为其具有优良的激光性能, 可作为一种激光材料基质.

折射率是晶体的一个基本光学参数, 对于研究

材料的激光及发光性能都非常重要. 文献 [8] 利用晶体薄片的吸收光谱计算了 Yb:GdTaO<sub>4</sub> 晶体的折射率, 并给出了其 Sellmeier 方程, 但并未考虑晶体的各向异性对折射率的影响, 结果较为粗糙. 此外, 对于 GdTaO<sub>4</sub> 晶体的折射率测量并未见有报道, 因而有必要对 GdTaO<sub>4</sub> 晶体的折射率进行进一步的研究.

晶体折射率的测试方法很多, 但由于折射率测试的数值范围和精度都因方法本身所要求的条件而受到不同程度的限制. 例如, 可通过测量晶体薄片的透过光谱计算出折射率, 且可在透明波段获得连续测试波长的折射率, 对折射率大小也没有限制, 但此方法要求晶体在所测量波段是透明的, 如果薄片在测试波段内存在掺杂吸收或晶体基质本身不透明, 则不能进行测量 [9]; 此外, 折光率计法、油浸法和掠入射法通常测试折射率值的范围为 1.3—1.9 [10]. V 棱镜法和最小偏向角法虽然对折射率大小没有要求, 但样品加工要求较高, 且光路调节复杂. 自准直法是一种精确测量晶体折射率的

\* 国家自然科学基金 (批准号: 51172236, 51272254, 51102239, 61205173, 61405206) 和中国科学院功能晶体与激光技术重点实验室开放课题 (批准号: FCLT201405) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zql@aiofm.ac.cn

测量方法, 且折射率的测量范围不受限制, 测量方法简单, 故本文采用自准直法对室温下 GdTaO<sub>4</sub> 晶体的折射率进行了精确测量, 并计算了在 632.8 nm 处光轴与折射率主轴的夹角, 进而得知 GdTaO<sub>4</sub> 晶体是正光性双轴晶体.

## 2 实验方法

由提拉法生长获得的 M-GdTaO<sub>4</sub> 晶体属于单斜晶系, 它是一种低对称性晶体, 只有一个 *b* 轴为二次对称轴, 此二次轴方向的主折射率  $n_y$  保持不变, 而另外两个主轴折射率会存在折射率色散. 实验中为了克服 GdTaO<sub>4</sub> 晶体折射率主轴色散给主轴折射率测量带来的麻烦, 在用自准直法测量晶体的折射率时, 加工如图 1 所示的三个 GdTaO<sub>4</sub> 晶体棱镜 I, II, III, 使得较长的 *AB* 面分别为晶体的 (100), (010), (001) 面, 即三个棱镜的 *AB* 面分别为晶体的 *a*, *b*, *c* 面, 法线方向分别为 *a*, *b*, *c* 晶轴方向. *AB* 长直角边的长度为 10.0 mm, *BC* 短直角边的长度为 7.0 mm, 棱镜厚度为 8.0 mm,  $\varphi$  为 17°20', 每条直角边与晶轴的定向偏差小于 3', 平面度优于  $\lambda/4$ , 斜边和长直角边所在面精细抛光, 同时后者所在面镀以 Al 反射膜, 使得入射光沿斜边面射入然后在长直角边面上反射并沿原光路返回 (见图 1). 当用样品 I 测试时, *AB* 面为 *a* 面, 折射光所在的折射率椭圆面就是包含  $n_y$  主轴的折射率椭球截面, 由双折射测得的较小的一个折射率为  $n_y$ , 较大的折射率为  $n'_z$ ; 当用样品 II 测试时, *AB* 面为 *b* 面, 折射光所在的折射率椭圆面是主轴为  $n_z$ ,  $n_y$  的折射率椭球截面, 由双折射测得的较小的一个折射率为  $n_x$ , 较大的折射率为  $n_z$ ; 当用样品 III 测试时, *AB* 面为 *c* 面, 折射光所在的折射率面为包含  $n_y$  主轴的折射率椭球截面, 由双折射测得的较小的一个折射率为  $n_y$ , 较大的折射率为  $n'_a$ ; 样品 I, III 均测得折射率  $n_y$  值的一致性, 可用于检测测量结果的可靠性 [11,12].

将 GdTaO<sub>4</sub> 晶体制成的直角棱镜放置于精度为弧秒的 32 J 测角仪的平台上, 利用光强稳定的 473, 532 nm YAG 倍频激光、633 nm He-Ne 激光以及 1064 nm YAG 激光做测量光源, 提高了自准直位置的判别准确度. 使用该方法测量的准确度主要受到晶体主轴定向准确度、晶体光学加工和测量判别的影响, 通常准确度可达  $2 \times 10^{-4}$  [13]. 测量光源

的激光从以最小偏向角  $\theta$  射向棱镜的斜面时, 光线折射成平行于短直角边的光线. 光束在 Al 反射面反射后沿着原光路返回, 此时折射率应满足 [14]

$$n = \frac{\sin \theta}{\sin \varphi}, \quad (1)$$

式中,  $\theta$  为光线入射角,  $\varphi$  为棱镜顶角,  $n$  为晶体对应于入射波长的折射率.

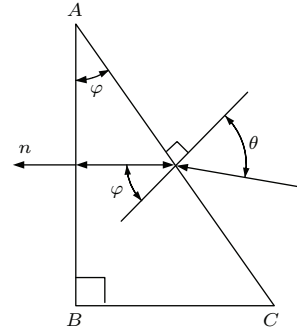


图 1 GdTaO<sub>4</sub> 晶体棱镜测试样品示意图,  $n$  为与 *a*, *b*, *c* 轴垂直的平面的法线方向

Fig. 1. Schematic of GdTaO<sub>4</sub> crystal prism sample:  $n$  is normal direction of the plane perpendicular to crystallographic axis *a*, *b* and *c*.

## 3 结果与讨论

在 473, 532, 632.8 和 1064 nm 波长下分别测量了 GdTaO<sub>4</sub> 晶体在三个方向的折射率, 测量结果见表 1. 从表 1 中可以看出, 在任意方向上, 随着波长的增加, 折射率变小; 在波长一定时, 沿着晶体不同的方向, 折射率也不同, 这是由于晶体的各向异性所致.

表 1 GdTaO<sub>4</sub> 晶体的折射率测量值

Table 1. The measured values of refractive indices of GdTaO<sub>4</sub> crystal.

$\lambda/\text{nm}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
473	2.0793	2.0983	2.2208
532	2.0644	2.0828	2.2008
632.8	2.0496	2.0665	2.1808
1064	2.0252	2.0413	2.1486

折射率与波长的关系可由 Sellmeier 方程描述 [15]:

$$n_i^2 = A_i + \frac{B_i}{\lambda^2 - C_i} - D_i \lambda^2, \quad i = x, y, z. \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  为相应测量光源的波长, 单位为 nm. 由表 1 中各波长、折射率值, 采用 Mathematica 软件

的Solve求解,得到Sellmeier方程常量 $A$ ,  $B$ ,  $C$ 和 $D$ ,如表2所示,其中 $A$ 没有单位, $B$ ,  $C$ 的单位为 $\text{nm}^2$ ,  $D$ 的单位为 $\text{nm}^{-2}$ .

表2 Sellmeier方程系数  
Table 2. The constants in Sellmeier's equations.

	$n_x$	$n_y$	$n_z$
$A$	4.10755	4.13336	4.61362
$B/\text{nm}^2$	36568.33378	52480.58526	54733.89487
$C/\text{nm}^2$	60399.65518	30991.39439	56769.06600
$D/10^{-8} \text{ nm}^{-2}$	3.55349	1.24635	4.24314

由于 $\text{M-GdTao}_4$ 晶体为单斜晶体,其结晶学坐标轴( $a, b, c$ )和折射率坐标轴( $X, Y, Z$ ) (相应折射率表示为 $n_x, n_y, n_z$ )在 $I2/a$ 空间群的坐标轴取向下,只有 $b$ 轴和 $Y$ 轴是重合的,晶体的另外两个结晶学轴与折射率椭球的另外两个主轴有一定的夹角<sup>[16]</sup>.由于 $n_y - n_x < n_z - n_y$ ,所以 $\text{GdTao}_4$ 晶体是正光性双轴晶体.对于正光性双轴晶体,其光轴总是与主折射率大小居中的对应坐标轴( $Y$ 轴)垂直,与主折射率最大和最小的相应坐标轴所决定的平面( $XOZ$ 面)共面,且靠近 $Z$ 轴,和 $Z$ 轴的夹角 $V_z$ 可由下式求出<sup>[17]</sup>:

$$\sin V_z = \frac{n_z}{n_y} \sqrt{\frac{n_y^2 - n_x^2}{n_z^2 - n_x^2}}, \quad (3)$$

计算得到了在473, 532, 632.8和1064 nm处光轴与折射率主轴 $n_z$ 的夹角 $V_z$ 分别为 $22.5^\circ$ ,  $22.5^\circ$ ,  $21.9^\circ$ ,  $22.0^\circ$ .

## 4 结 论

本文利用自准直法测量了473, 532, 632.8和1064 nm波长处 $\text{GdTao}_4$ 晶体的折射率,给出了它们的折射率的Sellmeier方程,并且光轴角 $2V_z$ 分别为 $45.0^\circ$ ,  $45.0^\circ$ ,  $43.8^\circ$ ,  $44.0^\circ$ ,所以 $\text{GdTao}_4$ 晶体是正光性双轴晶体.

## 参考文献

[1] Xiao L H, Gu M, Liu X L, Zhang R, Liu B J, Xu X 2007 *Spectrosc. Spect. Anal.* **27** 1055 (in Chinese) [肖莉红, 顾

牡, 刘小林, 张睿, 刘冰洁, 徐昕 2007 光谱学与光谱分析 **27** 1055]  
 [2] Liu W P, Zhang Q L, Gu C J, Zhou W L, Yin S T 2009 *Proceedings of the 15th national conference crystal and material Ningbo, China 2009* p421 (in Chinese) [刘文鹏, 张庆礼, 谷长江, 周文龙, 殷绍唐 2009 第15届全国晶体生长与材料学术会议 宁波, 中国, 2009 第421页]  
 [3] Liu W P, Zhang Q L, Zhou W L, Gu C J, Yin S T 2010 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **57** 1287  
 [4] Yang H J, Peng F, Zhang Q L, Shi C S, Guo C X, Wei X T, Sun D L, Wang X F, Dou R Q, Xing X, Zhang H L 2015 *Journal of Luminescence* **160** 90  
 [5] Yang H J, Peng F, Zhang Q L, Guo C X, Shi C S, Liu W P, Sun G H, Zhao Y P, Zhang D M, Sun D L, Yin S T, Gu M, Mao R H 2014 *Cryst. Eng. Comm.* **16** 12  
 [6] Peng F, Liu W P, Zhang Q L, Yang H J, Shi C S, Mao R H, Sun D L, Luo J Q, Sun G H 2014 *Journal of Crystal Growth* **406** 31  
 [7] Peng F, Yang H J, Zhang Q L, Luo J Q, Liu W P, Sun D L, Dou R Q, Sun G H 2015 *Appl. Phys. B-Lasers and Opt.* **118** 4  
 [8] Zhang Q L, Zhou W L, Liu W P, Ding L H, Luo J Q, Yin S T, Jiang H H 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 849 (in Chinese) [张庆礼, 周文龙, 刘文鹏, 丁丽华, 罗剑乔, 殷少唐, 江海河 2010 光学学报 **30** 849]  
 [9] Zhang Q L, Yin S T, Wang Z B, Sun D L, Wang S M 2007 *J. Synth. Cryst.* 36 110 (in Chinese) [张庆礼, 殷绍唐, 王召兵, 孙敦陆, 万松明 2007 人工晶体学报 36 110]  
 [10] Xie K C, Liu G Y, Luo K J 1996 *Piezoelectrics & Acousto-optics* **18** 62 (in Chinese) [谢克诚, 刘光耀, 罗康俊 1996 压电与声光 **18** 62]  
 [11] Zhang D Y, Shen H Y, Liu W, Zhang G F, Chen W Z, Zhang G, Zeng R R, Huang C H, Lin W X 2000 *Functional Materials* **31** 539 (in Chinese) [张德颖, 沈鸿元, 刘文, 张国芳, 陈文志, 张戈, 曾瑞荣, 黄呈辉, 林文雄 2000 功能材料 **31** 539]  
 [12] Huang L X, Zhao Y W, Zhang G, Gong X H, Huang C H, Wei Y, Wei M 2008 *J. Synth. Cryst.* **37** 185 (in Chinese) [黄凌雄, 赵玉伟, 张戈, 龚兴红, 黄呈辉, 魏勇, 位民 2008 人工晶体学报 **37** 185]  
 [13] Huang L X 2003 *Journal of Synthetic Crystals* **32** 139  
 [14] Shen H Y, Xu H, Zeng Z D 1992 *Appl. Opt.* **31** 6695  
 [15] Wang Z B, Huang L X, Zhang Q L, Zhang G, Sun D L, Yin S T 2007 *Photoelectron. Laser* **18** 956 (in Chinese) [王召兵, 黄凌雄, 张庆礼, 张戈, 孙敦陆, 殷绍唐 2007 光电子·激光 **18** 956]  
 [16] Sun S Q 2014 *Ph. D. Dissertation* (jinan:Shandong university) (in Chinese) [孙尚倩 2014 博士学位论文(济南:山东大学)]  
 [17] Hui H J, Wang S X, Yang Y Q, Niu J J, Geng X J, Rao Z Y 2008 *College Physics* **27** 4 (in Chinese) [胡慧君, 王蜀霞, 杨云青, 牛君杰, 耿晓菊, 饶早英 2008 大学物理 **27** 4]

# Measurement of refractive indices of GdTaO<sub>4</sub> crystal by the auto-collimation method\*

Wang Xiao-Fei<sup>1)2)</sup> Yang Hua-Jun<sup>1)2)</sup> Zhang Ge<sup>3)</sup> Zhang Qing-Li<sup>1)†</sup> Dou Ren-Qin<sup>1)2)</sup>  
 Ding Shou-Jun<sup>1)2)</sup> Luo Jian-Qiao<sup>1)</sup> Liu Wen-Peng<sup>1)</sup> Sun Gui-Hua<sup>1)</sup> Sun Dun-Lu<sup>1)</sup>

1) (Key Laboratory of Photonic Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3) (Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, China)

( Received 18 September 2015; revised manuscript received 1 February 2016 )

## Abstract

In this paper, the refractive index of GdTaO<sub>4</sub> crystal is measured by the auto-collimation method. GdTaO<sub>4</sub> crystal is processed into three rectangular prisms, their planes with longer right angle side are planes *a*, *b* and *c* of the crystal, respectively, and their normal directions are the directions of crystal plane axes *a*, *b* and *c*, respectively. with a side by angle  $\varphi$ . Plane enclosed by hypotenuse and the longer right angle side is subjected to fine polishing, while the surface plating for the latter is subjected to Al reflectance coating, so that the light is incident along the hypotenuse plane with minimum angle of deviation ( $\theta$ ), reflects on the plane with longer right angle and returns along the original path.

The rectangular prisms processed by GdTaO<sub>4</sub> crystal are placed on the platform of 32 J goniometer with an accuracy of arc seconds. The 473, 532 nm YAG double frequency laser, 633 nm He-Ne laser and 1064 nm YAG laser with stable light intensity are used as a measuring light source, light will refract into the light perpendicular to the longer right angle side when the laser of measuring light source shoots towards the bevel of a prism with a minimum angle of deviation ( $\theta$ ). The refractive indexes  $n_x$ ,  $n_y$ , and  $n_z$  of a crystallographic axis directions can be measured by  $\varphi$ ,  $\theta$  and the relationship between refractive index ellipsoid section and prism refraction of light. The constants  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$ , and  $D_i$  ( $i = x, y, z$ ) are given in Sellmeier's equation  $n_i^2 = A_i + B_i/(\lambda^2 - C_i) - D_i\lambda^2$ , and the values of angle  $V_z$  included between light axis and refractive index at wavelengths of 473, 532, 632.8 and 1064 nm are calculated to be 22.5, 22.5, 21.9 and 22.0°, respectively. It is proved that GdTaO<sub>4</sub> crystal is optically positive biaxial crystal.

**Keywords:** the auto-collimation method, GdTaO<sub>4</sub> crystal, refractive index

**PACS:** 78.20.Ci

**DOI:** 10.7498/aps.65.087801

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51172236, 51272254, 51102239, 61205173, 61405206) and the Opening Subject of Key Laboratory of Functional Crystals and Laser Technology, Chinese Academy of Sciences (Grant No. FCLT201405).

† Corresponding author. E-mail: [zql@aiofm.ac.cn](mailto:zql@aiofm.ac.cn)