

芯飞睿技术参数十问系列 (三)

FOM

FOM

一、什么是钛宝石的品质因子

表征钛宝石晶体的重要参数为FOM值，定义为吸收主峰处 π 光吸收系数与增益峰值波长处 π 光吸收系数之比，通常称为品质因子。

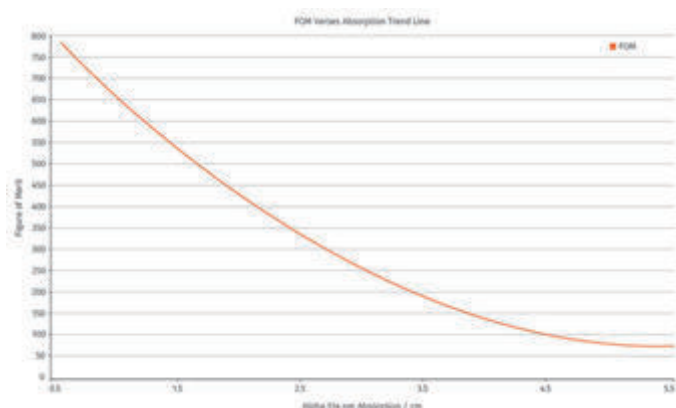


图1. FOM与吸收趋势线

二、如何量化表述材料的品质因子

$$FOM = \alpha_{\text{吸收主峰处}} / \alpha_{\text{增益峰值处}}$$

$\alpha_{\text{吸收主峰处}}$ 是吸收主峰处 π 光吸收系数， $\alpha_{\text{增益峰值处}}$ 是增益峰值波长处 π 光吸收系数。

通常吸收主峰出现在490~532nm波段处，增益峰值出现在800nm左右，此文将吸收主峰定位490nm处，增益峰值定为800nm处。

三、什么是吸收系数

吸收系数 α ，表示在光穿过介质时，每经过单位长度时，能量被吸收的比例。

$$\alpha = -\ln T / L$$

四、钛宝石的品质因子受什么影响

钛宝石的FOM主要与 Ti^{3+} 离子浓度有关，当 Ti^{3+} 离子浓度过高时， Ti^{3+} 会转变成 Ti^{4+} ， Ti^{4+} 浓度增加，从而造成晶体的红外吸收增强，FOM值降低。

钛宝石的FOM还与晶体生长方法有关，采用HEM法生长的Ti:Sapphire在没有额外退火工艺的情况下，通常会产生较高的FOM值。

除此之外还有退火工艺，退火影响的实质就是将 Ti^{4+} 会转变成 Ti^{3+} ，以此改善FOM。

五、为什么要测量材料的品质因子FOM

品质因子FOM是表示晶体质量的参量。当FOM越大，就说明晶体质量越好，晶体的光增益越高。而且随着品质因子值的增大，荧光强度逐渐减小，但是品质因子值的增大意味着 Ti^{3+} 与 Ti^{4+} 的浓度比值增大。

六、如何测试材料的吸收系数

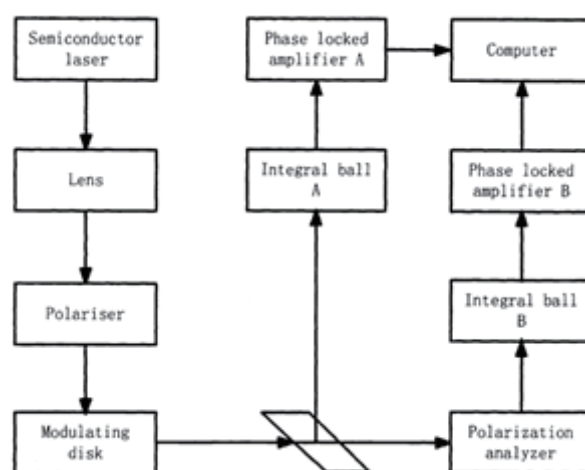


图2. 800nm波长下钛蓝宝石晶体吸收系数测量原理图

以增益峰值800nm波长处掺钛蓝宝石晶体吸收系数的原理图（图2示）来说明。其中半导体激光器的发射功率为100mw，输出波长为805nm。由于掺钛蓝宝石激光晶体具有各向异性，不同的偏振光具有不同的吸收系数。对于掺钛蓝宝石晶体在800nm波长附近的吸收， π 分量的吸收系数大于 α 分量的吸收系数，其中 π 为平行光轴的偏振光， α 为垂直光轴的光。我们选择平行于光轴的偏振光来测量 α_{800nm} 。

七、如何测试材料的品质因子

测试采用双光路结构和以布儒斯特角入射的光。选择偏振方向平行于晶体光轴的偏振光进行测量。实验光路采用双光路系统，以消除光源随时间波动对测量精度的影响，用积分球A接收参考光路激光能量，积分球B内放入被测晶体，晶体光轴在测量水平面内，并使激光以布儒斯特角射入晶体，用来减少端面反射，提高测量精度。根据测试计算出测出晶体的透过率T，进一步可换算出吸收系数 α ，从而确定FOM值。

八、用户如何匹配应用需求选择合适的材料

用户在选择钛宝石时，需要考虑应用抽运阈值的大小，FOM值越大抽运阈值越小，大的FOM值意味着较小的吸收损耗；需要考虑Ti³⁺的掺杂浓度，掺杂浓度越大，FOM值越小；而且人们普遍认为，用于激光腔的钛宝石的FOM必须大于100，这也是需要考虑的一点。

九、钛宝石的品质因子的规格

钛宝石的品质因子FOM值的范围很广，根据现有的资料显示，FOM最大值可达1000。且不同掺杂浓度对应的FOM最值是不一样的，因为掺杂浓度越高，FOM越小。当Ti³⁺掺杂浓度为0.1%时，FOM最大值为800；当Ti³⁺掺杂浓度为0.15%时，FOM最大值为330。通常来说在实际使用中钛宝石的品质因子应达150以上，具体以实际要求为准。

十、钛宝石客户询价实例

在这里给出三例钛宝石客户询价的实例，对FOM的要求分别为>70、>150、>200。

- 1. Size: 15 mm Diameter. X 10 mm thickness ;
- 2. Normal cut, with the optical axis perpendicular to the end surface.
- 3. Doping density: 0.15% (weight percentage of Ti₂O₃ in sapphire crystal, absorption coefficient should be around @ 532 = 2.5 cm⁻¹).
- 4. Doping uniformity: +/- 0.01% ;
- 5. Figure of merit (FOM): >150 ;
- 6. Surface flatness $\lambda/10$ @ 632.8 nm ;
- 7. The two end surfaces are both with BBAR coating of R(average)<0.5% at 700-900 nm and with AR coating at 532 nm (R<0.5%) ;
- 8. All other surfaces are fine grind finished ;
- 9. Damage threshold > 3 J/cm² for 100-ps pulse at 810 nm ;
- 10. Parallelism of the two end surfaces: < 20 arcsec .

图3. 案例1

- Ti:Sapphire rod:
- Diameter: 15mm,
- Length: 15mm,
- Absorption>92%@532,
- Both sides polished: 20-10 s/d,
- Flatness: $\lambda/10$ @633nm,
- Parallelism: 10 arcsec,
- FOM: >200,
- Both sides coated: AR<0.5% @ 532nm + AR<1% @ 700-900nm,
- Damage threshold for both coating and substrate: >10J/cm².

图4. 案例2

Product	Specification
PART 1 Ti:Sapphire crystal (5x5x2)	Rectangular cut Aperture: 5 mm x 5 mm Length: 2 mm Absorption coefficient @ 532 nm: 6 l/cm (+/- 0.1 l/cm) FOM: >70 Coatings: S1: AR 532 nm and AR 700-900 nm, AOI = 0 deg S2: AR 532 nm and AR 700-900 nm, AOI = 0 deg Damage threshold of coatings: >10J/cm ²
Ti:Sapphire crystal (5x5x4)	Rectangular cut Aperture: 5 mm x 5 mm Length: 4 mm Absorption coefficient @ 532 nm: 5.5 l/cm (+/- 0.1 l/cm) FOM: >70 Coatings: S1: AR 532 nm and AR 700-900 nm, AOI = 0 deg S2: AR 532 nm and AR 700-900 nm, AOI = 0 deg Damage threshold of coatings: >10J/cm ²

图5. 案例3

参考文献

- [1]Su L, Yan P, Ding B, et al. Determination of figure of merit (FOM) of Ti-doped sapphire laser crystal material[C]//Current Developments in Optical Elements and Manufacturing. International Society for Optics and Photonics, 1998, 3557: 331-335.
- [2]Alombert-Goget G, Guyot Y, Nehari A, et al. Scattering defect in large diameter titanium-doped sapphire crystals grown by the Kyropoulos technique[J]. CrystEngComm, 2018, 20(4): 412-419.
- [3]Boquillon J P, Musset O. Flashlamp-pumped Ti: Sapphire laser: Influence of the rod figure of merit and Ti 3+ concentration[J]. Applied Physics B, 1994, 59(3): 357-360.
- [4]<https://gtat.com/products/ti-sapphire/>
- [5]阎平, 苏林, 丁伯瑜, 等. 掺钛蓝宝石激光晶体品质因素的测定[J]. 光电工程, 1997, 24(5): 46-49.



有什么问题请联系我们的
技术工程师，在线为
您解答



了解更多资讯，请关
注我们的公众号--上海
芯飞睿科技有限公司

