第31卷 第1期 物 理 学 报 Vol. 31, No. 1
1982年1月 ACTA PHYSICA SINICA Jan., 1982

可见及红外区域内钇铁石榴石的色散行为

何钰泉 关铁樑
(西南应用磁学研究所)
1981年4月16日收到

提 要

由测量自然晶面的反射率，提出钇铁石榴石单晶折射率色散数据．使用 Sellmeier 三振子和幂级数表达式分析了实验结果．在0.5至5.5 μm波长范围内，测量值与计算值的偏差约为 3×10^{-3}．

一、引 言

在磁性石榴石块状单晶及其外延膜的磁光研究中，了解材料的光学色散行为是一个十分重要的课题．它不仅关系到外延薄膜厚度的计算，吸收系数测量中样品表面反射的修正，研究磁光波导传播模式等具体应用，而且有助于揭示晶体的晶格振动、电子跃迁等微观运动规律．

众所周知，为测量块状单晶材料光学折射率，一般将被测晶体磨制成稜镜，由最小偏角法测取数据．此法精度高，但操作不便．在早期的工作中，Johuson[1] 利用最小偏角法测量了在1.4至5.5μm波长范围内钇铁石榴石（YIG）单晶的折射率．我们曾用此法得到一些稀土铁石榴石在近红外范围内实验结果[2]．对于外延YIG膜折射率的测量，文献中还报道过 Brewster 角法[3]、光波导法[4]和干涉法[5]．前两种方法受使用光源的限制，后一种方法仅对一定厚度的薄膜有较好的精度．

我们选取大单晶的自然晶面，应用反射法在0.509至1.2μm波长范围内，测量了钇铁石榴石单晶折射率．方法精度较高，简便易行．

二、样品和测量装置

钇铁石榴石单晶样品，是依照文献[6, 7]用熔盐法生长的．在坩埚底部加籽晶并局部冷却，采用加速坩埚旋转工艺（ACTR），待晶体从熔盐中结晶长大以后，在高温时倒转坩埚，使晶体与剩余的熔盐分离．此法一般能长成直径约3cm的大单晶，晶面线度可达1cm以上．经用9J型干涉显微镜检查，一般{110}或{211}自然晶面表面不平度小于等于0.03μm，与1级平面平晶相当．使用前，需用软绸蘸酒精乙醚混合液将其测量面轻轻擦净，以消除表面污染对测量结果的影响．

测量装置如图1所示．光源一般为250W溴钨放映灯，由高稳定度可调稳流源 S 供

电．亦曾使用波长 0.6328μm 和 1.153μm 氦-氖激光器．

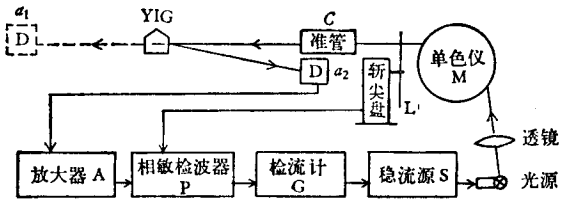


图 1　测量 YIG 晶体表面反射率装置

光束先后经 WDS-J2 型单色仪，英制 ORTEC Brookdeal 9479 型斩光盘和光束准直系统 C，到达位置 $a1$ 上的检测器 D．测量反射时在光路中放入 YIG 晶体，使反射光束到达位置 $a2$ 上同一检测器 D．检测器为 PbS 光敏电阻，调制频率取 740Hz．检测器给出的电信号经 ORTEC Brookdeal 9542 型精密交流放大器放大后，与斩光盘给出的参考输出信号一起送入相敏检波器 P，最后由 AC9/3 型直流复射式检流计读出探测到的光强．系统完全避免了杂散光的影响，工作稳定可靠．设在位置 a_1 检测到的光强为 I_1，在位置 a_2 检测到的光强为 I_2，则晶体表面反射率 (R) 为 I_1/I_2．为了精确抵消在测量 I_1 和 I_2 时光束在传播路程中的衰减，应使准直系统出射窗口至 $a1$ 的距离等于它至晶体的距离与晶体至 $a2$ 的距离之和．我们取晶体与位置 $a2$ 的距离为 1.2m，入射及反射光路夹角约为 2 度，由 Fresnel 公式计算可知，由此引起的相对于垂直入射情况下反射率的偏差为 10^{-6}，因而可以忽略．

三、结果和讨论

在垂直入射情况下，空气与材料界面处的反射率取决于材料折射率的实部 n 和虚部 k，

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}, \qquad (1)$$

$$k = \frac{\alpha\lambda}{4\pi}, \qquad (2)$$

其中 k 为消光系数，α 为晶体的吸收系数．由吸收系数的测量可知[2]，在本文所测量的波长范围内，k^2 项可以忽略．

我们在 0.509 至 1.2μm 波长范围内，测量了高质量 YIG 单晶自然晶面的反射率，据 (1) 式计算的 n 值列在表 1．可以看到，本文反射法所测的 YIG 单晶的 n 值与文献 [1—4] 一致．唯干涉法所得结果偏低约 2%[5]．

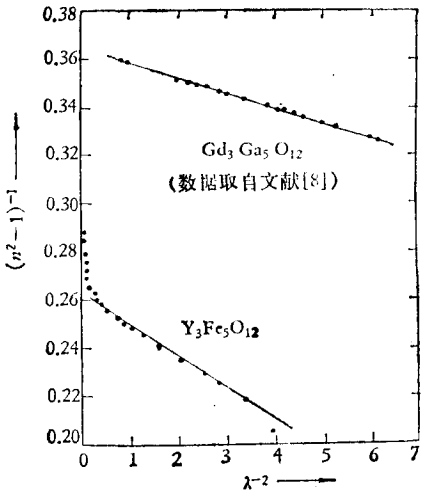


图 2　YIG 和 GGG 单晶光学色散

Johnson 首先把二振子的 Sellmeier 公式用于拟合 1.4 至 5.5μm 波段 YIG 单晶的色散曲线，最大偏差达 3×10^{-3}，标准残差为 1.9 ×

10^{-3}. 利用我们在可见光和近红外波段的测量结果和 Johnson 在红外波段的实验值(表1),取 $(n^2-1)^{-1}$ 对 λ^{-2} 作图, 如图2所示. 为对比起见,图2中还给出钆镓石榴石(GGG)的类似曲线.

表1 YIG 折射率数据

波长 (nm)	测量值 n_e	计算值 n_s	计算值 n_p
509	2.419	2.4097	2.4180
550	2.357	2.3692	2.3600
600	2.325	2.3338	2.3246
632.8	2.313	2.3162	2.3099
700	2.288	2.2890	2.2883
800	2.264	2.2623	2.2654
900	2.249	2.2448	2.2484
1000	2.235	2.2326	2.2356
1100	2.226	2.2236	2.2258
1153	2.220	2.2197	2.2215
1200	2.218	2.2167	2.2182
1400	2.209	2.2068	2.2071
1600	2.200	2.1998	2.1995
1800	2.194	2.1943	2.1936
2000	2.188	2.1897	2.1887
2500	2.177	2.1798	2.1783
3000	2.168	2.1703	2.1684
3500	2.158	2.1599	2.1578
4000	2.148	2.1482	2.1462
4500	2.134	2.1346	2.1333
5000	2.118	2.1188	2.1190
5500	2.103	2.1003	2.1033

注: 表中 1.4 至 5.5μm 的测量值 n_e 取自文献 [1], n_s 是采用三振子 Sellmeier 公式计算值, n_p 是采用幂级数展开式计算值.

对于不含铁离子的 GGG, 在 0.407—1.083μm 范围内, $(n^2-1)^{-1}$ 对 λ^{-2} 为一直线,因此可以用单个谐振子的 Sellmeier 色散公式拟合. 由最小二乘法可得色散公式

$$n^2-1=\frac{2.7363}{1-\left(\frac{0.13167}{\lambda}\right)^2}, \tag{3}$$

标准残差低达 1.7×10^{-4}, 最大偏差 3×10^{-4}. 单个谐振子对应于氧 $2p$—$4s$ 光学跃迁. 由图2可以明显地看到,对 YIG 单晶,在长波长侧与直线有正曲率的偏差, 可归结为晶格振动对折射率有负的贡献. 在短波长侧与直线有负曲率的偏差, 这表明必须进一步考虑 YIG 单晶中 d 电子的存在引起的光学跃迁.

实际上,参照 YIG 单晶吸收系数的测量,在红外部分波长 14μm 处曾观察到吸收系数急剧变大[9],即 FeO_4 分子群(团) ν_3 振动的单声子过程[10]. 在紫外部分, 对吸收作出主要贡献的除了位于 85000cm^{-1} 处的氧 $2p$—$4s$ 跃迁以外[11], 还应考虑位于 35600cm^{-1} 处的氧 $2p$ 到八面体 Fe^{3+} 次晶格 $3d$ 电荷迁移跃迁[5].

我们使用三振子的 Sellmeier 公式来拟合 YIG 的色散数据：

$$n^2-1=\sum_{i=1}^{3}\frac{f_i}{1-\left(\frac{\lambda_i}{\lambda}\right)^2}, \tag{4}$$

取 $\lambda_1=0.118\mu m$，$\lambda_2=0.28\mu m$，$\lambda_3=14\mu m$. 利用表 1 中 YIG 单晶在 0.509 至 5.5μm 范围内折射率实测值，使用 DJS-130 电子计算机求出拟合方程

$$n^2-1=\frac{1.65942}{1-\left(\frac{0.118}{\lambda}\right)^2}+\frac{2.13114}{1-\left(\frac{0.28}{\lambda}\right)^2}+\frac{2.11354}{1-\left(\frac{14}{\lambda}\right)^2}, \tag{5}$$

其中 λ 以 μm 为单位. 计算表明，用 (5) 式拟合其标准残差为 4.5×10^{-3}. 进而，应用 Sellmeier 公式的幂级数展开式[12]，应用最小二乘法由计算机定出系数，得色散公式

$$n^2=4.79527-1.24554\times10^{-2}\lambda^2+0.157432\lambda^{-2}+0.103093\lambda^{-4}$$
$$-5.45379\times10^{-2}\lambda^{-6}+9.22313\times10^{-3}\lambda^{-8}. \tag{6}$$

由 (6) 式计算的 n 值亦列在表 1 中，其标准残差低达 1.45×10^{-3}，最大偏差仅 3×10^{-3}.

基于以上结果，我们认为 YIG 晶体在由可见光到红外宽广范围内的色散行为主要由 0.118μm，0.28μm，14μm 三处共振吸收峰做出贡献. 这种三振子模型是相当成功的. 色散公式为简捷的解析表达式，模型具有清晰的物理图象. 采用幂级数展开的方法，可进一步提高拟合精度.

王书斌同志为我们提供了 YIG 单晶样品，在计算机程序设计中，赵宗凤同志给了我们很多帮助，在此表示谢意.

参　考　文　献

[1] B. Johnson and A. K. Walton, *Brit. J. Appl. Phys.*, **16**(1965), 475.
[2] Ho Yu-chuan, Chang Shih-chun and Kuan Tie-lian, *IEEE Trans. Mag.* **MAG-14** (1978), 457.
[3] B. C. McCollum *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **23**(1973), 702.
[4] J. Waraer, *Materials Research Bulletin*, **9**(1974), 507.
[5] G. B. Scott *et al.*, *Phys. Rev.*, **10**(1974), 971.
[6] W. Tolksdorf and F. Welz, *J. Crystal Growth*, **13/14**(1972), 566.
[7] W. Tolksdorf and F. Welz, *J. Crystal Growth*, **35**(1976), 285.
[8] J. Bohm *et al.*, *Kristall und Technik*, **13**(1978), K10.
[9] B. Andlauer and *W. Tolksdorf, Phys. Stat. Sol.* (*b*), **64**(1974), 503.
[10] F. F. Y. Wang, Treatise on Materials Science and Technology Vol. 2 Ed. by H. Herman, New York, Academic Press, (1973).
[11] I. M. Galuza *et al.*, *Sov. Phys. Sol. State*, **15**(1973), 470.
[12] M. Born and E. Wolf, Principles of Optics, Pergamon Press, (1975).

THE VISIBLE AND INFRARED REFRACTIVE INDEX DISPERSION OF YTTRIUM IRON GARNET

HE YU-QUAN GUAN TIE-LIANG

(Southwest Research Institute of Applied Magnetics, Sichuan Province)

ABSTRACT

The refractive index dispersion data of the single crystal yttrium iron garnet are obtained from reflectivity measurements on natural crystal faces. The esults are analyzed using Sellmeier three-term oscillator and power series expression. The deviation of measured and calculated refractive index is about 0.003 over the wavelenth range 0.5 to 5.5 μm.