

廊坊市机佳数控设备有限公司

地址：河北省廊坊市光明西道 194 号

电话：13933929580

磁振精密材料

赵宇彤 Yutong.zhao@yigsphere.com

YIG 晶向系列 (二)

书接上文，1956 年在贝尔实验室合成了 YIG 晶体后，随着 1960 年代早期 X 射线进动相机的进步，晶体学家通过这种方法确定了 YIG 的晶向，为 YIG 的磁晶各项异性研究打开了大门。

YIG 单晶体饱和磁化强度和温度的关系

1956 年，美国著名科学家弗里曼·戴森，就是提出戴森球的那个戴森，理论上预言了“理想铁磁体中的热力学行为”。(Thermodynamic Behavior of an Ideal Ferromagnet) 从理想的海森堡模型铁磁体出发，推导出了铁磁体中磁化强度随温度变化的五阶项。

$$M = M_0 \left(1 - a_0 T^{\frac{3}{2}} - a_1 T^{\frac{5}{2}} - a_2 T^{\frac{7}{2}} - a_3 T^4 \right)$$

其中， M_0 为绝对零度时的饱和磁化强度。

a_0, a_1, a_2 为常量，其中 1 和 $a_0 T^{\frac{3}{2}}$ 来源于简化 Bloch 理论，其中自旋波被视为具有恒定有效

质量的非相互作用 Bose 粒子。 $a_1 T^{\frac{5}{2}}$ ， $a_2 T^{\frac{7}{2}}$ 则来源于有效质量随速度的变化的修正项。

T 为开尔文温度。 T^4 项来源于最低阶自旋波相互作用项。

M 为随温度变化的饱和磁化强度。



弗里曼·戴森

和

他提出的著名猜想 —— 戴森球

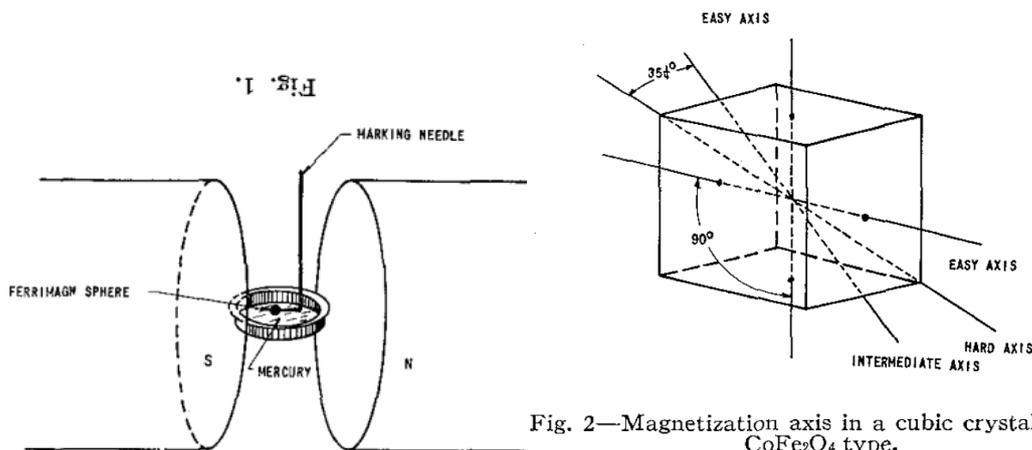
早在 1962 年，仙童半导体公司的工程师 Irvin H. Solt, Jr 在研究 YIG 磁化对于温度的依赖性的时候，就有意识地去测量 YIG 晶体中不同晶向的物质特性了。他使用了 [100] 和 [111] 进行实验，并测量了 (210) 和 (220) 共振模式。实验证明，YIG 晶体的饱和磁化强度随温度的变化只与其中的三项有关，因此上面的公式变为：

$$M = M_0 \left(1 - 8.19 \times 10^{-6} T^{\frac{3}{2}} - 1.03 \times 10^{-7} T^{\frac{5}{2}} \right)$$

实验验证的真实数据与理论预测只相差 ± 0.03 高斯。其中的常量则由曲线拟合测得，因此可能由高达 20% 的误差。

YIG 单晶体中的磁化难轴、易轴和中间轴

使用 X 射线进动相机确定晶向非常昂贵且耗时，尽管使用 X 射线反射图案技术可以将样品精确地安装在给定的晶面上，通常误差在 1 度以内。这就使得发明一种低成本、高效地确定晶向的方法非常迫切。1962 年，美国陆军信号研究与开发实验室电子管室的 MARTIN AUER 提出了一种磁场中的水银悬浮法确定易轴的方法。对于 YIG 晶体来说，易轴[111]是立方晶胞的体对角线。中间轴[110]则可以通过确定两个分离角度为 70.5° 的易轴的平面角分线来获得。而难轴[100]则可以通过确定两个分离角度为 109.5° 的易轴平面角分线来获得。这种方法的准确性主要受标记和安装技术的影响。



(左). 匀强磁场中，盘子中的水银悬浮了铁磁小球。小球在磁场作用下易轴自动与外加磁场对齐。此时使用一标记针做标记。很神奇的是编辑在排版时把图弄颠倒了，意外捕获了 60 年前的一位马大哈。

(右). 与 YIG 晶体不同的是钴铁氧体 (CoFe_2O_4)。其易轴与难轴和 YIG 相反。图中的易轴是[100]方向，难轴是[111]方向。不过原理都是一样的。

作者使用这种新的方法测试了 YIG 球的安装并获得了满意的效果。YIG 若安装在中间轴[110]上，则可以通过旋转依次得到三个主轴。

YIG 单晶体中的最佳热补偿轴

Optimum Thermal Compensation in YIG crystal

那么我们知道了 YIG 的饱和磁化强度和温度紧密关联，所以如果要设计更好的产品，尤其是尽可能的减小 YIG 对温度的敏感性则显得至关重要。

1971 年，Watkins-Johnson 公司工程师 R. Tokheim 推导证明了 YIG 晶体中围绕着[100]轴存在一个锥形轨迹，使得 YIG 对温度的敏感性最低，也就是所谓的最佳温度平衡轴或者叫热补偿轨迹。在热补偿轨迹上的任意轴在的给定频率和温度变化范围内将产生最小的频率变化。

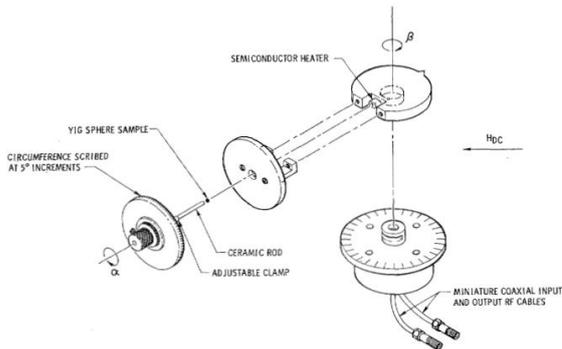


Fig. 1. Filter-orienter device.

实验设备的构造

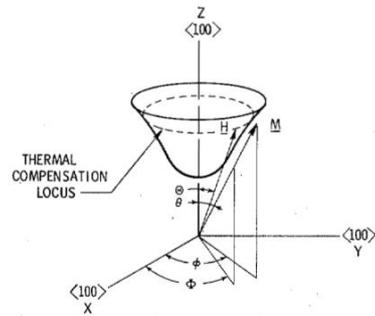


Fig. 4. Surface of ferromagnetic resonance frequency at constant applied bias magnetic field as a function of crystallographic orientation near $\langle 100 \rangle$ direction.

YIG 的围绕的[100]的热补偿轨迹

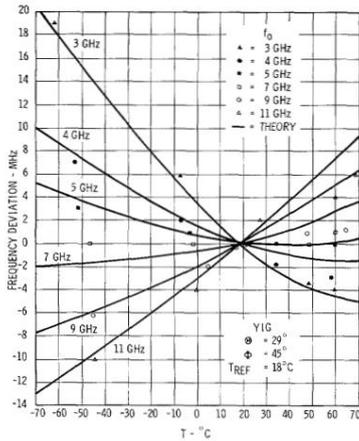


Fig. 7. Experimental frequency deviation of YIG sphere together with theoretical curves for $\theta = 29^\circ$, $\phi = 45^\circ$. Reference temperature: 18°C . Field range corresponded to $f_0 = 3$ to 11 GHz, where $f_0 = (\gamma/2\pi)H_0$.

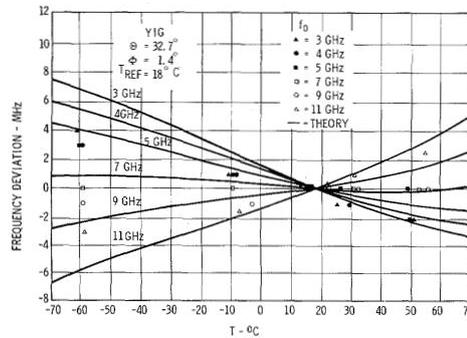


Fig. 8. Frequency deviation of YIG sphere together with theoretical curves for $\theta = 32.7^\circ$, $\phi = 1.4^\circ$. Frequency and temperature ranges same as in Fig. 7.

(左) 在非最佳的情况下, 所测得的 140 摄氏度的温度区间的频率变化大于 34MHz。共振频率区间在 3-11GHz 之间。

(右) 在把磁场调整到与热补偿轨迹平行时(温度平衡轴), 同等条件下所测得的 140 摄氏度的温度区间的频率变化小于 16MHz。

1978 年, 中科院物理所的贾惟义和张鹏翔在 Tokheim 的理论和实验基础上, 对 YIG 的温度补偿方向做了更加精准的推导。理论上论证了[010]晶面内的[8013]方向是唯一最佳补偿方向。[225]方向则是最差补偿方向。二者相差可达两倍多, 可从 12MHz 优化到 6MHz。不过文章也同时指出, 对于大于 4GHz 的工作范围, 这些优化的效果已无明显效果。对于专注于低频的掺镱 YIG 更具参考意义。

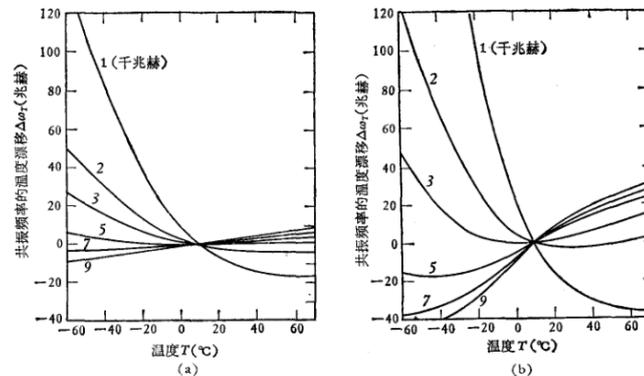


图 4 YIG 器件工作于修正的温度补偿方向时的温度特性

最佳优化的温度平衡轴(左)和最差优化的温度平衡轴(右)的理论计算的区别。

1985 年，在研究 YIG 的非线性效应时。一篇文章再次验证了沿着[110]固定的 YIG 球旋转，可以得到三个主要的磁化轴。

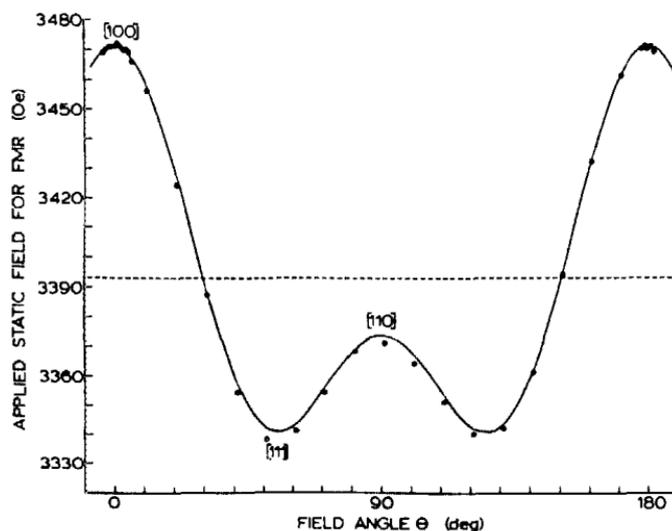


FIG. 2. Low power ferromagnetic resonance field vs field (and magnetization) angle for rotations in the (110) plane. The [100] direction is taken as 0° . Data were obtained using a YIG sphere at room temperature with a microwave frequency of 9.5 GHz and microwave field amplitude of 2 mOe (0.3 mW).

YIG 的低功率铁磁共振。[100]是难轴，在同等的共振频率下，所需的磁场最高，因此在图中的纵坐标最高。[111]是易轴，在同等的共振频率下，所需的磁场最低，因此在图中的纵坐标最低。[110]是中间轴，所需的磁场强度介于难轴和易轴之间，因此处于两者中间。

图中的虚线是介于难轴和易轴之间的温度平衡轴，因此如果旋转一周，则可以遇到 4 个温度平衡轴。

总结

对确定了[110]晶向的 YIG 来说，在 YIG 相关产业中扮演着非常重要的作用。尤其是对于军用产品来说，对温度的工作区间有着更多的要求。通过沿[110]旋转确定温度平衡轴至今仍是产业界广泛使用的方法。

- [1]. Dyson, Freeman J. "Thermodynamic behavior of an ideal ferromagnet." *Physical Review* 102.5 (1956): 1230.
- [2] Solt Jr, Irvin H. "Temperature dependence of YIG magnetization." *Journal of Applied Physics* 33.3 (1962): 1189-1191.
- [3]. Lüthi, B. "Thermal conductivity of yttrium iron garnet." *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 23.1-2 (1962): 35-38.
- [4]. Auer, M. "Novel method to orient ferrimagnetic single-crystal spheres." *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 10.1 (1962): 88-88.
- [5]. Jia, Wei-yi, and Peng-xiang Zhang. The Optimum Compensation of Temperature Instability Caused By Magnetocrystalline Anisotropy Field in YIG Microwave Devices. FOREIGN TECHNOLOGY DIV WRIGHT-PATTERSON AFB OHIO, 1978.
- [5]. 贾惟义, 张鹏翔. "磁晶各向异性场引起的 YIG 单晶微波器件温度不稳定性的最佳补偿." *物理学报* 3 (1976).
- [6]. McKinsty, Kevin D., Carl E. Patton, and Milind Kogekar. "Low power nonlinear effects in the

ferromagnetic resonance of yttrium iron garnet.” Journal of applied physics 58.2 (1985): 925-929.
2023 年 6 月 9 日星期五