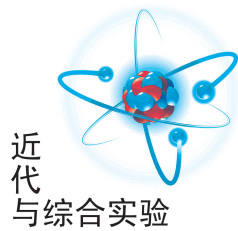


文章编号:1005-4642(2023)07-0001-07



近代  
与综合实验

## 基于金刚石 NV 色心的弱磁场测量

孙晓宇<sup>a</sup>, 麦 棣<sup>b</sup>, 仲 成<sup>b</sup>, 张帼一<sup>b</sup>,  
王子祺<sup>b</sup>, 代如成<sup>a</sup>, 王中平<sup>a</sup>, 张增明<sup>a</sup>

(中国科学技术大学 物理学院 a. 物理实验教学中心; b. 物理系, 安徽 合肥 230026)

**摘 要:**从选题背景、实验原理、实验设计方案、实验结果与讨论、教学应用与展望等方面入手,介绍了基于金刚石 NV 色心的弱磁场测量相关的实验教学研究. 重点阐述了金刚石 NV 色心的制备、共聚焦光路系统的搭建、通电线圈和圆柱形磁铁磁场的测量以及三维亥姆霍兹线圈的应用. 该成果转化应用到全国大学生物理实验竞赛中,通过竞赛、教学、科研的有机结合,培养学生的综合素质和实践创新能力,并丰富大学物理实验的前沿教学内容.

**关键词:**金刚石 NV 色心;光探测磁共振谱;能级劈裂;微波共振;量子测量

**中图分类号:**O482.5;O441

**文献标识码:**A

**DOI:**10.19655/j.cnki.1005-4642.2023.07.001

大学物理实验教学在培养学生严谨的科学思维、自主学习、理论联系实际、分析和解决问题的能力等方面具有其他教学环节不可替代的作用. 中国科学技术大学物理实验教学中心构建了基础实验、综合性实验、设计性实验、研究性实验、专业基础实验和专业实验 6 个层次的物理实验教学体系,针对每个实验项目分别进行了基础、提升、进阶、高阶的阶梯型设置,引导学生由浅入深、由易到难、分层递进地完成实验,达到多学科、多层次交叉融合的实验教学效果.

随着现代科学技术的飞速发展,物理实验教学也要紧跟国际前沿,将科学研究中的实验思维、技术和方法等应用到教学实践和实验竞赛中,这也成为全国高校实验类教学改革的重要手段之一. 作者团队通过科研成果转化,设计完成了“基于金刚石 NV 色心的弱磁场测量”项目,并获得第 7 届全国大学生物理实验竞赛中自选类题目一等奖,通过参赛进一步优化了该项目设计,推进了该项目在研究性实验课程中的教学实施. 本文主要从选题背景、实验原理、实验设计方案、实验结果与讨论及教学应用与展望等方面对此课题进行了介绍.

### 1 选题背景

磁性测量普遍存在于各类实验中,在物理、化学等基础科学领域,国防、军事、人造卫星宇宙工程领域,工业、交通、仪器仪表等生产生活领域以及生物医学、医疗器械等医用领域都具有广泛应用<sup>[1]</sup>. 针对不同的需求,各种不同的磁测量方案被提出,而金刚石 NV 色心(Nitrogen-vacancy color center, NV center)作为磁探针,通过 NV 色心的能级特性以及塞曼效应进行磁场测量,成为新型磁测量技术的典型代表. 相比于高斯测量计、振动样品磁强计、霍尔效应传感器、超导量子干涉仪、磁力显微镜等传统的磁测量技术,采用 NV 色心进行磁测量具有显著优势:如工作温度覆盖 4~600 K,空间分辨率能够达到数十 nm,灵敏度能够达到 nT 量级,同时氮空位色心无荧光闪烁、无荧光漂白,室温下也可稳定工作,且对样品本身磁场没有任何侵扰,是测量物质磁性的有效手段<sup>[2-3]</sup>. 同时,对于目前正在迅猛发展的量子技术,例如量子测量、量子传感、量子信息处理与通讯,以及常见的纳米技术、生物技术和超分辨率成像技术等,NV 色心作为其重要的物理实现载体,

**收稿日期:**2022-12-08; **修改日期:**2023-02-19

**基金项目:**教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会教学研究项目(No. DWJZW2021ZD);基础学科拔尖学生培养计划重点课题项目(No. 20211034);中国科学技术大学 2022 年度校级虚拟仿真实验教学项目(No. 2022xxfxm06)

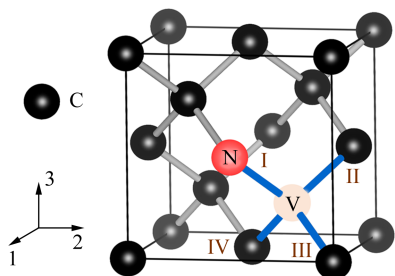
**作者简介:**孙晓宇(1992-),女,吉林长春人,中国科学技术大学物理学院实验师,博士,研究方向为凝聚态物理. E-mail: xysun2015@ustc.edu.cn

**通信作者:**张增明(1966-),男,安徽合肥人,中国科学技术大学物理学院教授,博士,研究方向为凝聚态物理. E-mail: zzm@ustc.edu.cn

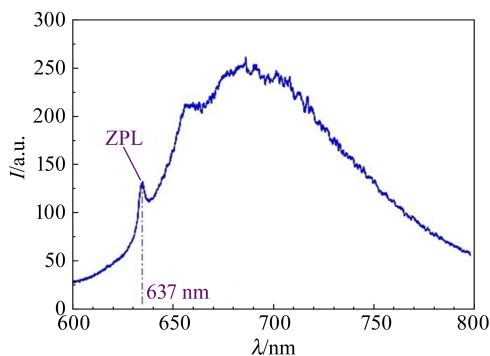
也具有较大的研究和应用价值<sup>[4-5]</sup>. 近年来, 金刚石 NV 色心得到了广泛应用, 例如弱磁场测量、量子计算、温度传感、压力传感、电场传感等领域<sup>[2,6-8]</sup>. 本文与国际前沿量子技术接轨, 使用金刚石 NV 色心, 通过磁致能级分裂、自旋反转、微波共振、NV 荧光强度变化等多知识点交叉融合的方法实现了磁场的精密测量. 由于该实验是基于多技术、多学科的交叉融合实现对弱磁场的精确测量, 利于学生综合多知识点及实验技能来解决问题, 培养学生对此类复杂实验系统各环节的优化协调能力, 提升学生的综合科研能力.

## 2 实验原理

NV 色心是金刚石的一类缺陷, 是由 1 个替代 C 原子的 N 杂质和相邻格点的空位构成的复合结构, 如图 1(a) 所示, 主要存在 2 种形式:  $NV^0$  和  $NV^-$ . 量子技术领域主要研究  $NV^-$ , 其结构中共有 6 个电子, 2 个来自 N 原子, 3 个来自与 V 相邻的 C 原子, 1 个为捕获的施主杂质的电子,  $NV^-$  色心结构整体呈现出  $C_{3v}$  空间对称性. N 和 V 连接线是 NV 色心的轴线, 其在晶格中分别存在 4 个不同的方向, 相互间的夹角均为  $109.5^\circ$ .



(a) 金刚石晶格中 NV 色心的结构和 4 种取向



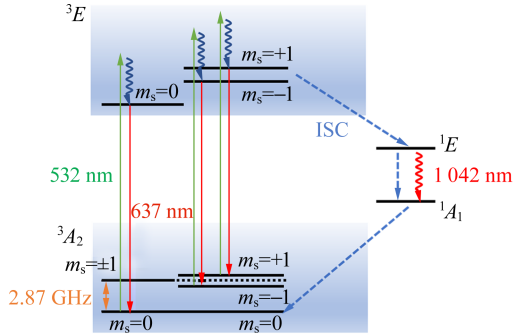
(b) NV 色心系综的室温发射光谱  
图 1 NV 色心示意图及发射光谱

在这种特殊结构的作用下,  $NV^-$  能够在室温下被激发产生相应的光致发光谱线, 图 1(b) 所示为 NV 色心系综的室温发射光谱, 其中激发光为 532 nm 的绿光, 637 nm 为  $NV^-$  的零声子线. 观察整个波段的发光谱图, 可以发现零声子线只占荧光的一部分, 绝大部分荧光来自声子边带. 而俘获的施主杂质电子可参与自旋三重态的形成, 为后面利用塞曼效应测定弱磁场提供条件. 基于 NV 色心的光探测磁共振实验, 可根据参与探测的色心数目, 分为单色心实验和色心系综实验. 单色心实验所用的金刚石样品, 色心浓度一般在 1 ppb [part per billion, 浓度单位, 无量纲, 代表杂质原子数占总原子数的 10 亿分比 ( $10^{-9}$ )] 量级, 色心系综实验所用的金刚石样品, 色心浓度一般在 100 ppb 以上. 本文实验采用的均为金刚石 NV 色心系综<sup>[9]</sup>.

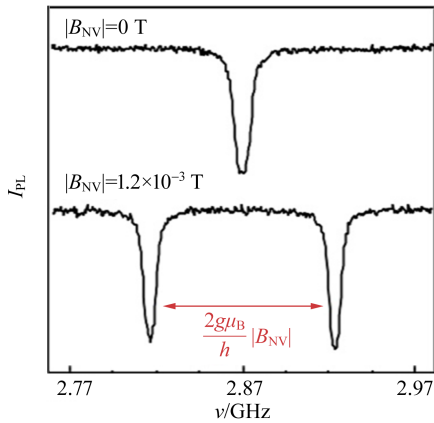
金刚石 NV 色心的能级结构和发光特性如图 2(a) 所示. NV 色心的基态是自旋三重态  $^3A_2$ , 分别为磁量子数为  $m_s=0$  态和  $m_s=\pm 1$  态,  $^3E$  是三重态的激发态,  $^1A_1$  是单态基态. 当不施加外界磁场时,  $m_s=\pm 1$  态的能级是简并的, 如图 2(a) 中虚线所示, 其与自旋磁量子数  $m_s=0$  态之间有 2.87 GHz 的零场分裂. 当利用 532 nm 激光激发基态电子时, 由于电子跃迁属于电偶极跃迁, 且与电子自旋无关, 所以跃迁前后自旋守恒,  $m_s=0$  态和  $m_s=\pm 1$  态上的电子分别跃迁至对应激发态, 之后  $m_s=0$  态上的电子绝大多数都直接跃迁回基态辐射荧光, 对应于 637 nm 的红光发射, 而  $m_s=\pm 1$  激发态上的电子仅有一部分直接跃迁回基态辐射荧光, 另一部分通过系间窜越 (Intersystem crossing, ISC) 的形式无辐射跃迁到单重态  $^1A_1$ , 再回到三重态的  $m_s=0$  基态. 所以  $m_s=0$  态比  $m_s=\pm 1$  态的荧光强度大, 通过实验比较得出大 20%~40%<sup>[6]</sup>.

在没有磁场加载时, 色心受微波辐照且当微波频率对应能量等于基态  $m_s=0$  和  $m_s=\pm 1$  的能级差时 (2.87 GHz, 25 °C), 可以改变自旋在  $m_s=0$  态和  $m_s=\pm 1$  态上的布居, 实现基态电子自旋翻转操作, 荧光强度会因自旋翻转至  $m_s=\pm 1$  而下降. 为减少测量时间, 一般单光子计数器的计数表征 600~800 nm 的荧光强度. 通过测量不同微波频率时的荧光强度, 可获得如图 2(b) 所示的光探测磁共振 (Optical detection magnetic res-

onance,ODMR)谱. 当磁场为 0 时,能级没有劈裂,共振频率只有 2.87 GHz,可以观察对应的 1 个共振吸收峰,如图 2(b)中的上图所示.



(a) NV 色心的能级结构和塞曼效应



(b) 金刚石 NV 色心的 ODMR 谱<sup>[10]</sup>

图 2 金刚石 NV 色心的能级结构和发光特性

当施加一定程度的外界磁场时,  $m_s = \pm 1$  态的能级发生塞曼劈裂,此时光探测磁共振谱会探测到 2 个共振吸收峰,分别位于 2.87 GHz 左右,

如图 2(b)中下图所示,即为 ODMR 谱测量磁场的原理. 根据 NV 色心基态电子自旋哈密顿量<sup>[4,11]</sup>及塞曼效应谱线的裂距公式可获得共振频率的表达式为

$$\nu_{\pm}(B_{NV}) = D \pm \sqrt{\left(\frac{g\mu_B}{h}B_{NV}\right)^2 + E^2}, \quad (1)$$

其中,  $D$  表示电子自旋零场劈裂处的频率,在室温下  $D = 2.87 \text{ GHz}$ ;  $B_{NV}$  为沿 NV 主轴的磁场分量;  $g = 2.003$  为朗德常量,  $\mu_B = 9.274 \times 10^{-24} \text{ J/T}$  为玻尔磁子常量,  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  为普朗克常量.  $E$  表示周围环境的应力场或外加电场大小,在无外加电场的理想晶体环境下,  $E = 0$ . 磁场引起 NV 色心  $m_s = \pm 1$  态能级发生劈裂后,劈裂的大小与磁场大小成正比,通过扫描微波频率即可记录下 NV 色心的光探测磁共振谱,对光谱进行分析即可得到外磁场的大小<sup>[12-13]</sup>

$$\Delta\nu = \frac{2g\mu_B B_{NV}}{h}, \quad (2)$$

则

$$B_{NV} = \frac{h}{2g\mu_B} \Delta\nu, \quad (3)$$

将  $h, g, \mu_B$  等常量代入式(3),即可获得共振峰间距  $\Delta\nu$  与磁场  $B_{NV}$  的准确对应关系.

### 3 实验设计方案

#### 3.1 金刚石 NV 色心的制备

实验中金刚石样品为 IIa 型金刚石(购于上海欧罗迪亚超硬材料应用科技有限公司),选取规格适当的金刚石样品(实验中选取台面直径为  $300 \mu\text{m}$ ),制备金刚石 NV 色心的工艺流程如图 3 所示.

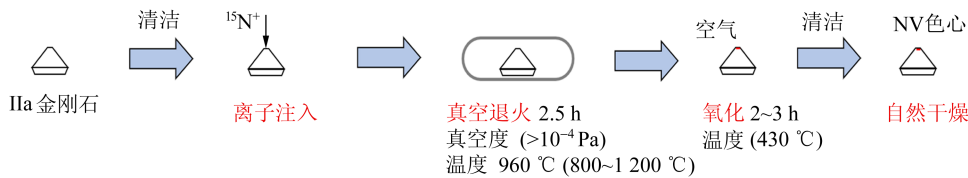


图 3 金刚石 NV 色心的制备工艺流程图

1) 清洁. 利用浓硫酸和双氧水混合液(体积比 3 : 1)及蒸馏水反复冲洗 3~4 次.

2) 将清洁过的样品放置在特定托盘上,置于离子注入机扫描区,并按照程序设定向注入机中

加入适当比例的  $\text{N}_2$ , 利用电离和扫描方法将带有正电的氮离子注入金刚石样品浅表层,待仪器稳定后将样品取出.

3) 将注入氮离子的准金刚石 NV 色心样品置

于试管中进行真空退火操作,真空度为  $10^{-4}$  Pa,温度为  $960\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,退火时间为 2.5 h.

4)待退火完成后将样品放置在高温炉中,维持  $430\text{ }^{\circ}\text{C}$  氧化 2~3 h,将氧化后的样品取出.

5)再次清洗,待其自然干燥,完成 NV 色心制备,即可用于后续实验测量.

### 3.2 金刚石 NV 色心共聚焦光路系统

实验搭建的金刚石系综<sup>[14-15]</sup> NV 色心共聚焦光路系统如图 4 所示,主要包含光学显微聚焦光路部分和电路连接部分 2 个模块. 532 nm 激光器作为激发光源,半波片、极化分束器组合实现激

光的光强衰减,激光经过 532 nm 全反镜,由物镜聚焦到金刚石样品上. 利用长通二向色镜进一步滤除 532 nm 绿光,透过的红光利用单光子计数器采集,生成数字脉冲 TTL 电平信号并输入到计算机. 微波部分采用 LabVIEW 编程软件实现,同时由该软件控制脉冲信号发生器、射频信号发生器、数据采集卡,使信号发生器输出 2.80~2.94 GHz 的正弦波,记录不同频率微波下色心发出的红光光强,得到光探测磁共振光谱,以测量金刚石色心处的磁场. 实验中天线为长度、形状适当的铜导线.

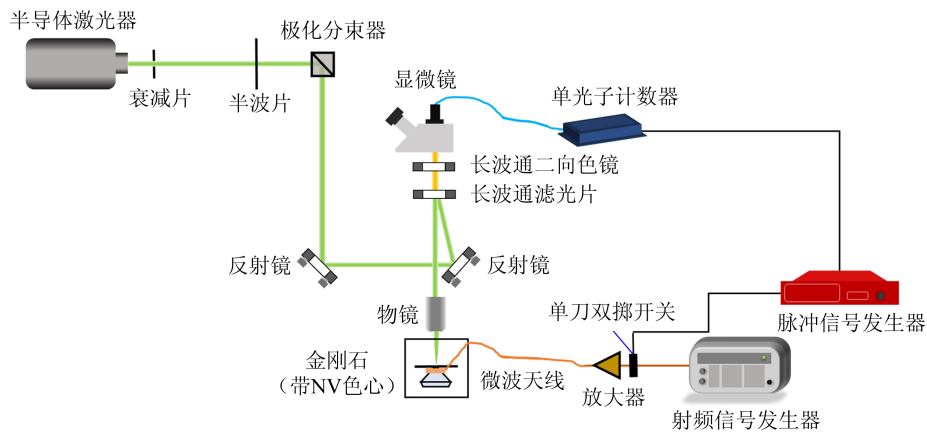


图 4 金刚石 NV 色心共聚焦光路系统

## 4 实验结果与讨论

### 4.1 通电线圈的磁场测量

利用图 4 装置进行通电线圈磁场测量,实验选用外径 5 mm、内径 3 mm、高 0.5 mm、匝数 100 的线圈. 改变线圈中电流大小,提供不同强度的磁场,不同电流强度下线圈中心的 ODMR 谱如图 5 所示(黑圈代表原始数据,绿线代表拟合后的单峰位置,红线代表拟合后的谱图). 观察发现施加磁场后,光致发光光谱 PL 谱图出现了 2 个吸收峰,两峰间距随电流增大而增大. 匝数分别调整为 200 匝和 300 匝,改变线圈中电流大小,采用相同方法采集数据,不同电流强度下线圈中心的 ODMR 谱如图 6 和图 7 所示. 利用式(3),获得不同电流下线圈中心的磁感应强度.

以电流为横坐标,磁感应强度为纵坐标,绘制线圈在不同匝数下的磁感应强度随电流的变化关系,如图 8 所示. 磁感应强度与线圈电流的线性关系符合较好,相关系数  $R$  均为 0.999 9,呈现正

相关线性关系,结果准确性得以验证. 另外,从磁感应强度与电流的线性拟合结果中发现:拟合直线斜率的增加倍数与线圈匝数的增加倍数相近,说明实际测量的磁感应强度大小与单位线圈匝数呈比例,这与理论符合较好,验证了实验结果的准确性.

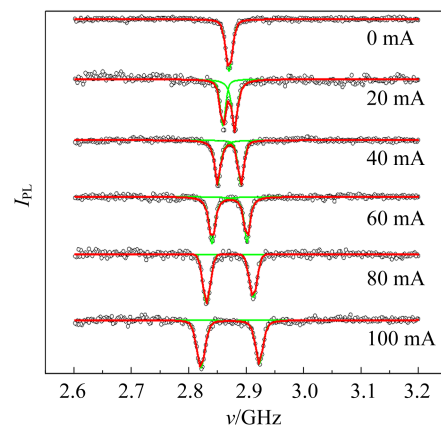


图 5 100 匝线圈中心的 ODMR 谱图



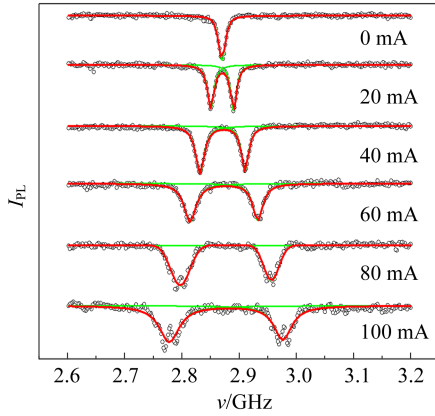


图 6 200 匝线圈中心的 ODMR 谱图

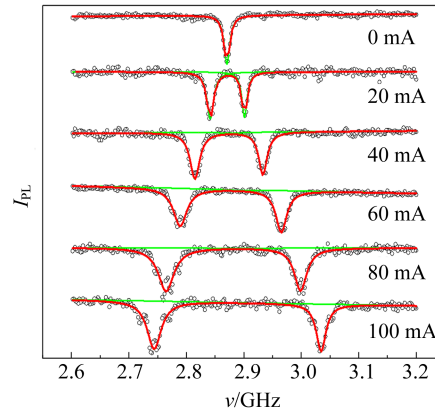


图 7 300 匝线圈中心的 ODMR 谱图

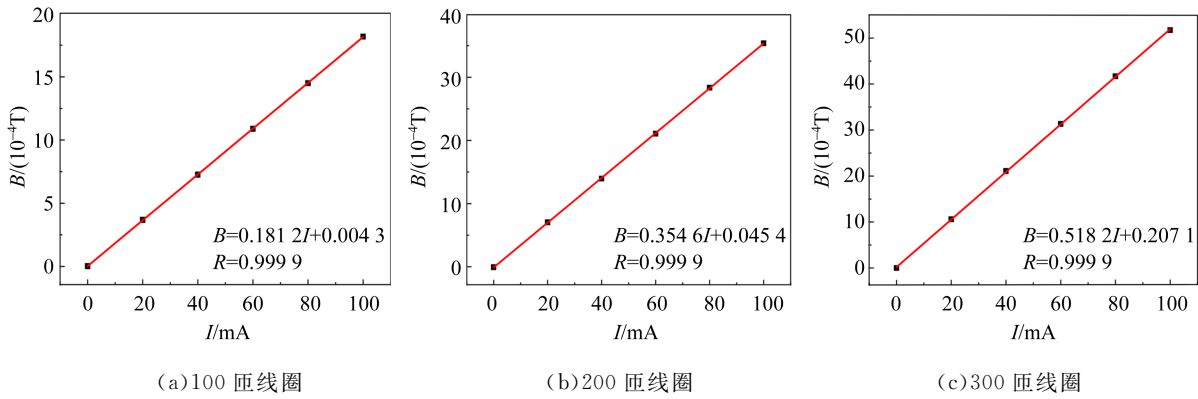


图 8 磁感应强度随电流的变化关系

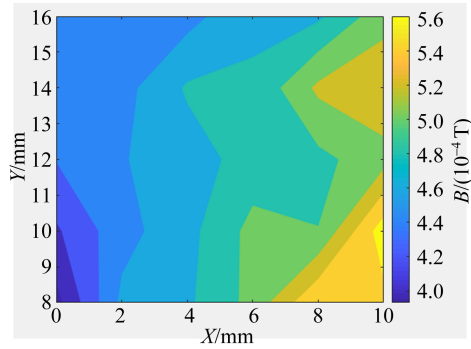
### 4.2 圆柱形小磁铁的磁场成像

本装置中带有色心的金刚石底部到二维位移台的距离为 5.78 cm,通过调节二维位移台的纵横 2 个方向上的螺旋测微器读数来改变圆柱形小磁铁的空间位置. 本实验中以横向为 X 方向,纵向为 Y 方向. 当螺旋测微器的示数为(10.000, 10.000)(单位:mm)时,磁铁位于金刚石的正下方. 在 X 方向从 0 到 10.000 mm、Y 方向从 8.000 mm 到 16.000 mm 范围内,划分出 30 个格点,每个格点与相邻格点的距离为 2.000 mm. 每个格点测量 3 组数据,计算磁感应强度并取平均值,各个格点位置的磁感应强度均值如表 1 所示. 根据表 1 中磁感应强度值绘制出圆柱形小磁铁磁场的二维图像及三维图像,如图 9 所示. 由图 9 可知此圆柱形磁铁的磁场分布并不规则,但整体呈现的分布规律为:离磁铁中心轴线越远,磁场越弱. 分析其原因,磁场的分布不规则可能是由小磁铁做工不均匀所致;整体上离磁铁轴线越远、磁

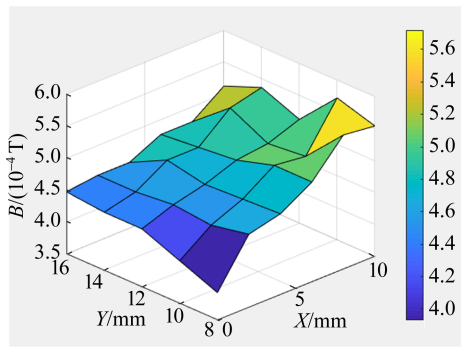
场越弱的分布符合理论上圆柱形磁铁磁场的分布规律.

表 1 各个格点位置的磁感应强度

(X/mm,Y/mm) B/(10 <sup>-4</sup> T)	(X/mm,Y/mm) B/(10 <sup>-4</sup> T)
(0.000,8.000) 3.93	(6.000,8.000) 5.06
(0.000,10.000) 4.17	(6.000,10.000) 5.06
(0.000,12.000) 4.41	(6.000,12.000) 4.89
(0.000,14.000) 4.41	(6.000,14.000) 4.83
(0.000,16.000) 4.47	(6.000,16.000) 4.77
(2.000,8.000) 4.65	(8.000,8.000) 5.60
(2.000,10.000) 4.53	(8.000,10.000) 5.00
(2.000,12.000) 4.59	(8.000,12.000) 4.94
(2.000,14.000) 4.53	(8.000,14.000) 5.24
(2.000,16.000) 4.53	(8.000,16.000) 4.77
(4.000,8.000) 4.77	(10.000,8.000) 5.54
(4.000,10.000) 4.74	(10.000,10.000) 5.72
(4.000,12.000) 4.71	(10.000,12.000) 5.12
(4.000,14.000) 4.83	(10.000,14.000) 5.36
(4.000,16.000) 4.53	(10.000,16.000) 5.12



(a) 二维图像



(b) 三维图像

图 9 圆柱形小磁铁磁场分布图

### 4.3 三维亥姆霍兹线圈的拓展应用

在金刚石中,由于空位周围 4 个 N 原子方向不同,分别标记为  $N_I, N_{II}, N_{III}$  和  $N_{IV}$ ,所以 NV 色心存在 4 种不同的取向,如图 1(a)晶胞中所示. 利用 3 套相同的亥姆霍兹线圈沿  $X, Y$  和  $Z$  3 个方向放置,假设理想状态下,多种取向色心的金刚石颗粒放置在 3 套亥姆霍兹线圈的中心重合位置,金刚石单胞坐标系与  $X, Y, Z$  重合,如图 10 中插图所示. 利用此三维亥姆霍兹线圈即可产生一定条件的偏置磁场  $B_0$ ,磁场在晶体中 4 个 NV 色心方向上的投影结合起来,会产生 8 个共振峰<sup>[7]</sup>,即可获得带有 8 个共振峰的典型 ODMR 谱,如图 10 所示.

当利用三维亥姆霍兹线圈产生的偏置磁场叠加待测磁场时,可通过 ODMR 谱中 4 对共振峰的劈裂情况,重构坐标系,获得偏置磁场  $B_0$  的大小. 具体方法如下<sup>[7]</sup>:首先选择任意坐标系( $X, Y, Z$ ),其轴向与晶格坐标系的  $X, Y$  和  $Z$  对齐,4 个 NV 色心方向分别被标记为 I, II, III 和 IV,分

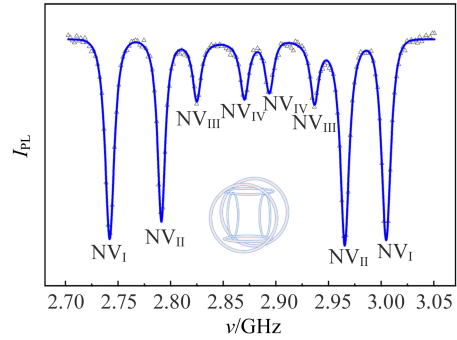


图 10 三维亥姆霍兹线圈产生的偏置磁场下的 ODMR 谱

别对应 4 个矢量表达 $[1\ 1\ 1], [-1\ -1\ 1], [-1\ 1\ -1]$ 和 $[1\ -1\ -1]$ . 因此在此坐标系中, $\mathbf{B}_0 = (B_{0,x}, B_{0,y}, B_{0,z})$ ,不同 NV 色心方向上的投影分别为

$$B_{0,I} = \frac{1}{\sqrt{3}}(B_{0,x} + B_{0,y} + B_{0,z}), \quad (4)$$

$$B_{0,II} = \frac{1}{\sqrt{3}}(-B_{0,x} - B_{0,y} + B_{0,z}), \quad (5)$$

$$B_{0,III} = \frac{1}{\sqrt{3}}(-B_{0,x} + B_{0,y} - B_{0,z}), \quad (6)$$

$$B_{0,IV} = \frac{1}{\sqrt{3}}(B_{0,x} - B_{0,y} - B_{0,z}), \quad (7)$$

由晶体的对称性可得

$$B_{0,I}^2 + B_{0,II}^2 + B_{0,III}^2 + B_{0,IV}^2 = \frac{4}{3}B_0^2. \quad (8)$$

最后可求得偏置磁场  $B_0$  的大小. 具体参量和结果如表 2 所示(表中  $i = I, II, III, IV$ ),求得  $B_0 = 5.180\text{ mT}$ .

表 2 三维亥姆霍兹线圈加载偏置磁场的测量结果

NV 色心取向	$\Delta\nu/\text{GHz}$	$B_{0,i}/\text{mT}$
I	0.262 7	4.685
II	0.174 2	3.107
III	0.111 9	1.996
IV	0.023 7	0.422

## 5 教学应用与展望

本实验项目以金刚石 NV 色心为对象,实验技术要点主要包括:NV 色心制作、光路搭建与调节、微波加载系统的组装与调试等,重点阐述了 NV 色心在磁场精密测量方面的应用,使学生有

更多机会学习与国际前沿领域相关的知识和实验内容,激发学生实验的兴趣和参与度。基于此目的,以本教学研究课题为核心,作者团队申请了以“基于金刚石 NV 色心的量子精密测量虚拟仿真实验”为题的校级虚拟仿真实验项目,意在解决实际实验教学中的困难,提升学生对金刚石 NV 色心磁探针的了解与认识,培养学生光学、电学、磁学等多学科综合性物理实验技能,促进学生掌握量子测量和量子传感实验能力,推动学科融合发展与创新。

在近 2 年的教学实践中,学生在掌握了 NV 色心测量弱磁场的原理、方法和技术后,通过进一步探究,已经开展了以下研究性实验项目:张帼一等人设计了响应更快、更灵敏的弱场探测装置,“基于金刚石 NV 色心弱磁场测量”获得全国大学生物理实验竞赛一等奖;王子祺等人拓展延伸课题内容,研究了“基于 FGT5 材料下自旋阀巨磁阻效应”,获得校级研究性实验特等奖。同时,色心探测相关的研究课题仍在不断探索中,例如基于 NV 色心的光探测磁共振谱成像,基于 NV 色心的电场测量,探究通电导线的电流密度分布,基于 BN 色心的弱磁场测量,基于 SiC 色心的弱磁场测量,等等。

## 6 结束语

本文搭建了金刚石 NV 色心量子精密测量系统,介绍了金刚石 NV 色心的制备工艺,成功测量了不同匝数的导电线圈和圆柱形磁铁的磁场大小及分布,对固态自旋体系 NV 色心探针在三维亥姆霍兹线圈中的实验拓展以及实验教学方面的应用进行了探索和研究,体现了科研成果转化在实验教学方面的重要价值。通过教学和科研的有效结合,丰富了大学物理实验教学内容<sup>[16]</sup>,促进了物理实验教学课程体系和教学内容改革的发展进程。

## 参考文献:

- [1] 车晓芳. 磁场测量技术的发展与应用[J]. 湖北科技学院学报,2014,34(10):11-12.
- [2] Wang C J, Shi F Z, Wang P F, et al. Nanoscale

magnetic field sensing and imaging based on nitrogen-vacancy center in diamond [J]. ACTA Physica Sinica, 2018,67(13):130701.

- [3] 高扬,徐超群,黄魁,等. 激光与微波功率对金刚石 NV 色心磁强计 ESR 谱线的影响研究[J]. 北京理工大学学报,2021,41(11):1222-1225.
- [4] 杜博. 基于金刚石氮-空位色心的生物成像与传感研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2021.
- [5] 郭卫军,郑斗斗,王军旗,等. 量子调控型 NV 色心系综磁强计灵敏度优化[J]. 微纳电子技术,2020,57(1):54-59.
- [6] 王俊峰. 金刚石 NV 色心的制备、相干性与温度探测研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2016.
- [7] Lesik M, Plisson T, Toraille L, et al. Magnetic measurements on micrometer-sized samples under high pressure using designed NV centers [J]. Science, 2019,366(6471):1359-1362.
- [8] Rondin L, Tetienne J P, Hingant T, et al. Magnetometry with nitrogen-vacancy defects in diamond [J]. Reports on Progress in Physics, 2014,77(5):056503.
- [9] 于会尧. 金刚石氮-空位色心系综传感器的性质、制备及应用研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2021.
- [10] Achard J, Jacques V, Tallaire A. Chemical vapour deposition diamond single crystals with nitrogen-vacancy centres: A review of material synthesis and technology for quantum sensing applications [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020,53(31):313001.
- [11] 赵博文. 金刚石 NV 色心的制备以及在量子测量领域的应用[D]. 合肥:中国科学技术大学,2020.
- [12] 高扬,徐超群,黄魁,等. 基于光纤耦合金刚石 NV 色心系综磁强计的电路诊断方法[J]. 航天器环境工程,2022,39(1):100-104.
- [13] 王军旗,牛刘敏,柴笑哈,等. 基于金刚石 NV 色心系综磁强计相干布局振荡研究[J]. 量子光学学报,2021,27(1):81-86.
- [14] 谢一进. 基于金刚石氮-空位色心系综的磁测量方法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2020.
- [15] 高健. 金刚石 NV 色心系综量子态测量关键技术研究[D]. 太原:中北大学,2018.
- [16] 赵铮阳,周诗韵. 基于金刚石 NV 色心的量子调控教学实验拓展[J]. 物理实验,2022,42(4):1-6.

(下转 12 页)

## Limitations of simplified triple-probe method for instantaneous plasma diagnostic experiments

LU Wenqi, TANG Yuanzhen

(School of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** In order to exhibit the problem that existed in some instantaneous plasma diagnostic experiments using the triple-probe method based on floating-potential-measurement, the floating potential of a pulsed microwave electron cyclotron resonance (ECR) plasma was measured with an oscilloscope, which was compared with that obtained by a time-resolved single-probe. The results revealed that the reason for the errors in the floating-potential-measurements by an oscilloscope was the contradiction between the floating requirement and the limited probe-ground resistance, and that between the high probe-ground impedance and the rapid response of the measurement system. Further triple-probe diagnostic experiments showed that the errors mainly caused by the floating-potential-measurement would bring a significant influence to the diagnostic results. It could be concluded that for instantaneous plasma diagnostics, the standard dual-biased triple-probe method should be adopted.

**Key words:** simplified triple-probe; instantaneous plasma; floating potential; time revolution of measurement

[责任编辑:任德香]

(上接 7 页)

## Measuring weak magnetic field based on diamond NV color center

SUN Xiaoyu<sup>a</sup>, MAI Di<sup>b</sup>, ZHONG Cheng<sup>b</sup>, ZHANG Guoyi<sup>b</sup>,

WANG Ziqi<sup>b</sup>, DAI Rucheng<sup>a</sup>, WANG Zhongping<sup>a</sup>, ZHANG Zengming<sup>a</sup>

(a. Center for Physical Experiments; b. Department of Physics, School of Physical Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** The contents of teaching and research related to “the weak magnetic field measurement based on diamond NV color center” were introduced in terms of the background, experimental principle, design scheme, results and discussion, teaching application and prospects, etc. The preparation of diamond NV color center, the construction of confocal optical system, the measurements of magnetic field of coil and cylindrical magnet, and the application on three-dimensional Helmholtz coil were mainly described. The transformation of scientific research achievements was integrated into the China undergraduate physics experiment competition. Through the combination of competition, teaching and scientific research, the comprehensive quality and practical innovation ability of students had been cultivated, and the advanced teaching content of college physics experiment had also been enriched.

**Key words:** diamond NV color center; optical detection magnetic resonance; energy level splitting; microwave resonance; quantum measurement

[责任编辑:任德香]