

量子精密测量实验

廖荣

中国科学技术大学 微尺度物质科学国家研究中心 物理学院, 合肥 230026
合肥国家实验室, 合肥 230088

1 实验原理

1.1 金刚石中的 NV 色心

NV (Nitrogen-Vacancy) 色心是金刚石中的一种点缺陷, 如图 1 所示。金刚石晶格中一个碳原子缺失形成空位, 邻近的位置有一个氮原子, 这样就形成一个 NV 色心, 空位与氮原子的连线作为 NV 色心的方向。NV 色心由于用空位和氮原子替换了两个相邻的碳原子, 从而导致相对于金刚石晶格有四种可能取向。

NV 色心, 指的是带负电荷 NV⁻顺磁中心。NV 色心的有六个电子, 两个来自氮原子, 三个来自与空位相邻的碳原子, 另外一个是一个俘获的 (来自施主杂质的) 电子。

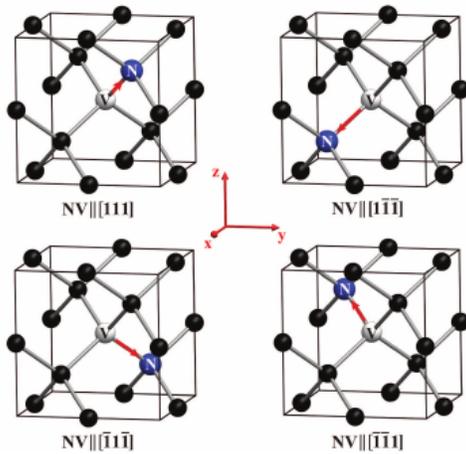


图 1: NV 色心主轴的四种可能方向, 这些方向组成一个四面体

1.2 自旋态初始化和读出

NV 色心的基态为自旋三重态, 三重态基态与激发态间跃迁相应的零声子线为 637nm, 红色区域为声子边带。基态的自旋三重态 ($|m_s = 0\rangle$, $|m_s = 1\rangle$, $|m_s = -1\rangle$) 中, $|m_s = \pm 1\rangle$ 在无磁场时是简并的, 它们与 $|m_s = 0\rangle$ 态之间的能隙 (零场

劈裂) 对应微波频率为 2.87GHz。激发态的能级自旋分裂对应的微波频率为 1.4GHz。

由于 $|m_s = \pm 1\rangle$ 态有更大的概率通过单重态回到基态, 并且不发出荧光。所以 $|m_s = 0\rangle$ 态的荧光比 $|m_s = \pm 1\rangle$ 态的荧光强度大, 实验上得出大约 20 - 40%。根据 $|m_s = 0\rangle$ 态和 $|m_s = \pm 1\rangle$ 对应荧光强度的差别, 就可以区分 NV 色心的自旋态, 即实现对自旋量子比特状态的读出。

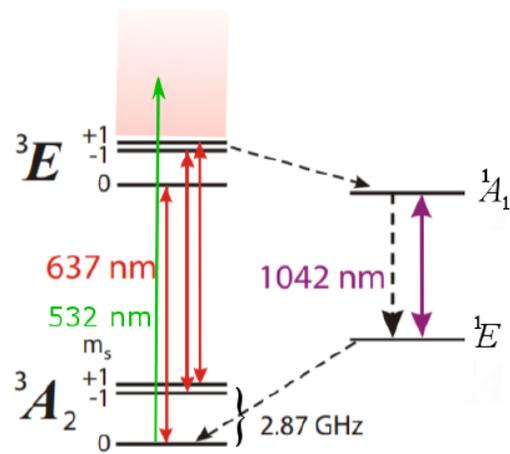


图 2: 室温下金刚石 NV 色心的能级结构示意图。会辐射出光子的跃迁用实线箭头表示, 非辐射跃迁用虚线箭头表示

1.3 NV 色心与磁场的耦合

当 NV 色心处于磁场环境中, 塞曼相互作用会使得 NV 基态能级随磁场变化发生劈裂或者移动。对于 NV 色心的基态能级而言, 我们把 z 方向定义为 NV 色心的轴向, 其哈密顿量可以写成以下形式:

$$H = DS_z^2 + \gamma \cdot \vec{B} \cdot \vec{S} \quad (1)$$

其中 D 是 $|m_z = 0\rangle$ 和 $|m_z = \pm 1\rangle$ 态之间的在没有外磁场时的能隙 (零场劈裂) 对应微波频率为 2.87GHz。γ 为 NV 色心电子自旋的旋磁比, $\gamma = 2.8032 \text{ MHz/Gs}$ 。

假设当我们施加的外界磁场方向与 NV 色心的

轴向一致时, 即 $\vec{B} = (0, 0, B_z)$, 那么哈密顿量 H 的矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} D + \gamma B_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D + \gamma B_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

系统的本征态为 $|m_z = 0\rangle$ 和 $|m_z = \pm 1\rangle$, 并且 $|m_z = 0\rangle$ 向 $|m_z = \pm 1\rangle$ 跃迁的共振频率为:

$$\nu_{\pm} = D \pm \gamma B_z \quad (3)$$

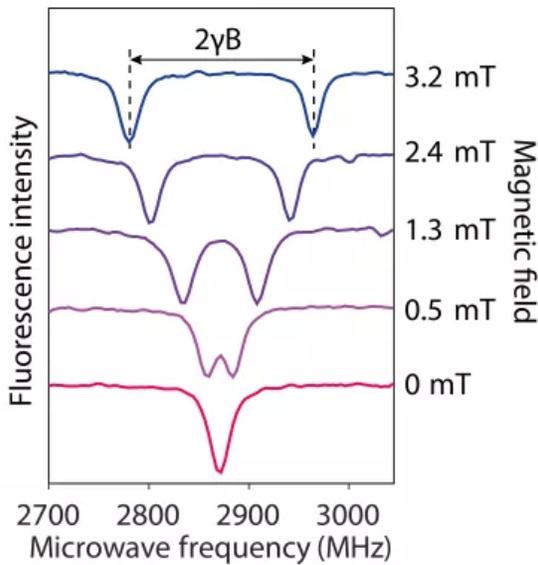


图 3: 不同磁场下的连续波谱

上面讨论的是外磁场与 NV 色心轴向一致的情况, 当外磁场不沿 NV 轴的时候, 此时 $\vec{B} = (B_x, B_y, B_z)$, 那么哈密顿量 H 的矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} D + \gamma B_z & \frac{B_x \gamma}{\sqrt{2}} - \frac{i B_y \gamma}{\sqrt{2}} & 0 \\ \frac{B_x \gamma}{\sqrt{2}} + \frac{i B_y \gamma}{\sqrt{2}} & 0 & \frac{B_x \gamma}{\sqrt{2}} - \frac{i B_y \gamma}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{B_x \gamma}{\sqrt{2}} + \frac{i B_y \gamma}{\sqrt{2}} & D + \gamma B_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

在我们的实验中, 外场始终处在较小的量级 ($< 200\text{MHz}$), 可以将不沿轴向的磁场部分考虑为微扰, 此时哈密顿量给出的本征能量分别为:

$$D + \gamma B_z + \frac{\gamma^2 (B_x^2 + B_y^2)}{2D} \quad (5)$$

$$D - \gamma B_z + \frac{\gamma^2 (B_x^2 + B_y^2)}{2D} \quad (6)$$

$$-\frac{\gamma^2 (B_x^2 + B_y^2)}{2D} \quad (7)$$

从中可以看出, 不沿 NV 轴的横向场与能级为二阶依赖关系且远小于 D 故在实验中可以忽略横向场对能级产生的影响, 只关注轴向场导致的劈裂。

1.4 系综 NV 色心共振谱与外磁场关系

针对不同轴向的 NV 其谱线位置与外场的近似 (一阶微扰) 关系通过如下公式给出:

$$D + \frac{1}{\sqrt{3}} \gamma (B_x + B_y + B_z) \quad (8)$$

$$D + \frac{1}{\sqrt{3}} \gamma (-B_x - B_y - B_z) \quad (9)$$

$$D + \frac{1}{\sqrt{3}} \gamma (-B_x + B_y + B_z) \quad (10)$$

$$D + \frac{1}{\sqrt{3}} \gamma (B_x - B_y - B_z) \quad (11)$$

$$D + \frac{1}{\sqrt{3}} \gamma (-B_x - B_y + B_z) \quad (12)$$

$$D + \frac{1}{\sqrt{3}} \gamma (B_x + B_y - B_z) \quad (13)$$

$$D + \frac{1}{\sqrt{3}} \gamma (B_x - B_y + B_z) \quad (14)$$

$$D + \frac{1}{\sqrt{3}} \gamma (-B_x + B_y - B_z) \quad (15)$$

2 实验内容

实验中我们完成连续波测量实验之后, 记录下测试得到的三组数据。

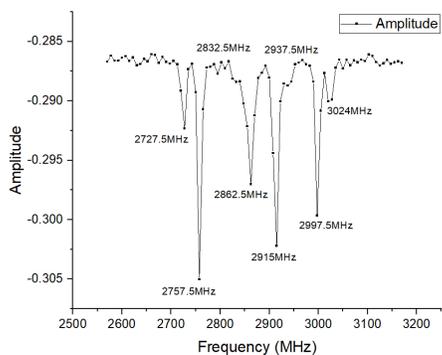


图 4: 不同磁场下的连续波谱-1

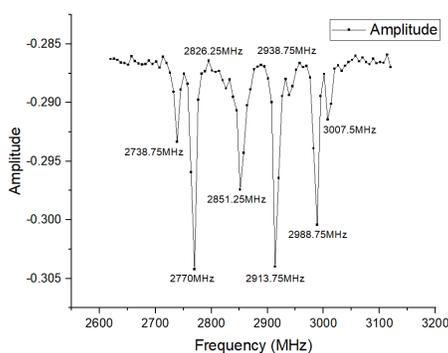


图 5: 不同磁场下的连续波谱-2

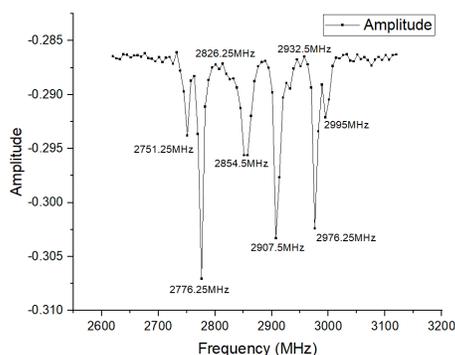


图 6: 不同磁场下的连续波谱-3

	第一组	第二组	第三组
f_1	2727.5	2738.75	2751.25
f_2	2757.5	2770	2776.25
f_3	2832.5	2826.25	2826.25
f_4	2862.5	2851.25	2854.5
f_5	2915	2913.75	2907.5
f_6	2937.5	2938.75	2932.5
f_7	2997.5	2988.75	2976.25
f_8	3024	3007.5	2995

根据公式 (8-15) 计算得到

	第一组	第二组	第三组
$B_x(Gs)$	8.18	5.79	5.80
$B_y(Gs)$	18.54	15.45	13.51
$B_z(Gs)$	68.43	63.72	57.93

3 思考题

3.1 实验中谱线峰宽的来源是什么？对最终结果的影响是什么？并分析实验中其他的误差来源。

谱线峰宽的来源可能是 NV 色心制备工艺的限制，制备得到的 NV 色心不是所有晶胞中空位和氮原子的取代都是理想的，同时，信号发生器的峰宽、激光器的峰宽都有影响。

对最终结果的影响是信噪比不理想，对谱线位置的判断依赖于密集的采样。

实验中其他的误差来源有：地磁环境和实验室其他磁铁造成外磁场不稳定；实验中采样率较低，谱线位置判断不够精确。

3.2 实验中可以看到不同峰的对比如不同，请分析其中原因

由于 $|m_s = \pm 1\rangle$ 态有更大的概率通过单重态回到基态，并且不发出荧光。所以 $|m_s = 0\rangle$ 态的荧光比 $|m_s = \pm 1\rangle$ 态的荧光强度大，实验上得出大约大 20 - 40%。

3.3 你对这门课程有什么建议或者理解（不少于 100 字）

实验中的最困难的步骤在于调整小磁铁的方向，使其磁场方向与 4 个 NV 方向上的投影大小一致，以找到两个峰，这一过程由于小磁铁的磁场分布不理想，以及摆放方位不精确变得十分费时费力，可以选择为小磁铁设计夹具，并安装在手动位移台上实现精确可控的调整。也可以考虑使用电磁铁等方式实现外加磁场的精确调控。