

预习报告		实验记录		分析讨论		总成绩	
25		30		25		80	

专业：	物理学	年级：	2022 级
姓名：	戴鹏辉 & 杨舒云	学号：	2344016 & 22344020
日期：	2024/10/30	教师签名：	

D4-1 电子自旋共振实验

【实验报告注意事项】

- (1) 实验报告由三部分组成：
- (1) 预习报告：（提前一周）认真研读实验讲义，弄清实验原理；实验所需的仪器设备、用具及其使用（强烈建议到实验室预习），完成课前预习思考题；了解实验需要测量的物理量，并根据要求提前准备实验记录表格（第一循环实验已由教师提供模板，可以打印）。预习成绩低于 10 分（共 20 分）者不能做实验。

(2) 实验记录：认真、客观记录实验条件、实验过程中的现象以及数据。实验记录请用珠笔或者钢笔书写并签名（用铅笔记录的被认为无效）。保持原始记录，包括写错删除部分，如因误记需要修改记录，必须按规范修改。（不得输入电脑打印，但可扫描手记后打印扫描件）；离开前请实验教师检查记录并签名。

(3) 分析讨论：处理实验原始数据（学习仪器使用类型的实验除外），对数据的可靠性和合理性进行分析；按规范呈现数据和结果（图、表），包括数据、图表按顺序编号及其引用；分析物理现象（含回答实验思考题，写出问题思考过程，必要时按规范引用数据）；最后得出结论。

实验报告就是将预习报告、实验记录、和数据处理与分析合起来，加上本页封面。

- (2) 实验安全注意事项
- i. 磁极间隙在仪器出厂前已经调整好，实验时最好不要自行调节，以免偏离共振磁场过大。

ii. 双 T 调配器和短路活塞不宜在螺纹范围之外用力调节，避免出现滑丝。

iii. 保护好高斯计探头，避免弯折和挤压。

iv. 励磁电压要缓慢调节，同时仔细注意波形变化，才能辨认出共振吸收峰。

v. 样品使用时要轻拿轻放，使用完后记得放回样品盒，避免丢失和损坏。

vi. 实验结束后，励磁电压和扫场电压调节到零，再关闭电源，并将所有仪器恢复原状。

目录

1	D4-1 电子自旋共振实验 预习报告	3
1.1	实验目的	3
1.2	仪器用具	3
1.3	原理概述	4
1.4	实验前思考题	8
2	D4-1 电子自旋共振实验 实验记录	10
2.1	实验内容和步骤	10
2.1.1	确定励磁电压与磁感应强度关系曲线	10
2.1.2	观察磁共振信号并测定电子郎德因子	10
2.1.3	估测 DPPH 样品横向弛豫时间	11
2.1.4	测量波导波长及微波波长	12
2.2	实验过程中遇到的问题记录	12
2.3	实验数据记录	13
3	D4-1 电子自旋共振实验 分析与讨论	14
3.1	实验数据分析	14
3.1.1	确定励磁电压与磁感应强度关系曲线	14
3.1.2	观察磁共振信号并测定电子郎德因子	14
3.1.3	估测 DPPH 样品横向弛豫时间	15
3.1.4	测量波导波长及微波波长	19
3.2	实验后思考题	20
4	D4-1 电子自旋共振实验 实验总结	21
4.1	实验分工	21
4.2	Attachment	21

D4-1 电子自旋共振实验 预习报告

1.1 实验目的

- (1) 了解和掌握各个微波波导器件的功能和调节方法。
- (2) 了解电子自旋共振的基本原理，比较电子自旋共振与核磁共振各自的特点。
- (3) 观察在微波段电子自旋共振现象，测量 DPPH 样品自由基中电子的朗德因子。
- (4) 理解谐振腔中 TE_{10} 波形成驻波的情况，调节样品腔长，测量不同的共振点，确定波导波长。
- (5) 学会利用 DPPH 样品 EPR 共振吸收信号数据拟合法和谱宽直接估测法，获得样品的横向弛豫时间。

1.2 仪器用具

表 1: 电子自旋共振实验仪器用具

编号	仪器用具名称	数量	主要参数（型号，测量范围，测量精度等）
1	控制主机	1	玻璃管装
2	组合式电磁铁	1	
3	支撑座	1	
4	微波系统	1	
5	DPPH 实验样品	1	
6	高斯计探头	1	
7	微波源连接线（高频）	1	
8	磁铁电源连接线	1	
9	Q9 连接线	1	
10	三芯航空连接线	1	
11	主机电源线	1	红黑各一根
12	短路活塞	1	
13	直波导样品腔	1	
14	扭波导	1	
15	微波频率计	1	
16	双 T 阻抗匹配器	1	
17	环形器	1	
18	检波器	1	
19	隔离器	1	
20	固体微波源	1	

1.3 原理概述

(1) DPPH

结构式如图 1 所示。它的第 2 个 N 原子少了一个共价键，有一个未偶电子，或者说一个未配对的“自由电子”，是一个稳定的有机自由基。对于这种自由电子，它只有自旋角动量而没有轨道角动量。或者说它的轨道角动量完全猝灭了。所以在实验中能够容易地观察到 ESR 现象。

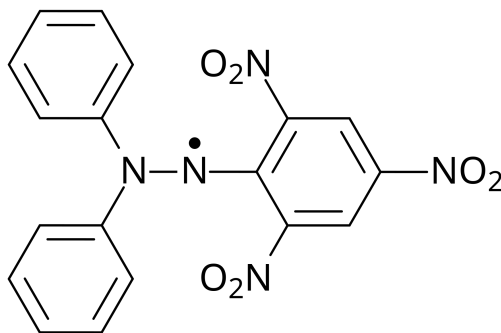


图 1: 2,2-二苯基-1-苦基肼自由基的结构式

由于 DPPH 分子中的“自由电子”并不是完全自由的，其朗德 g 因子标准值为 2.0036，标准线宽为 $2.7 \times 10^{-4} \text{T}$ 。

(2) 电子顺磁共振 (EPR) 简介

电子顺磁共振 (Electron Paramagnetic Resonance, EPR) 是一种用于研究具有未成对电子的分子、离子和固体的电子自旋态的方法。这些未成对电子的自旋与外加磁场相互作用，会产生特定的能级分裂，通过吸收或发射微波，可以检测到电子自旋翻转的共振现象。EPR 是研究自由基、过渡金属离子以及缺陷中心等系统的强有力工具。

在 EPR 中，未成对电子的自旋（用自旋角动量算符 \mathbf{S} 表示）在外加磁场 \mathbf{B} 下会与磁场发生相互作用。其哈密顿量 H 可以表示为：

$$H = g\mu_B \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}$$

其中， g 是电子自旋的 g 因子（通常约为 2.0023，对于自由电子）， μ_B 是玻尔磁子，定义为 $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$ ， \mathbf{B} 是外加磁场的矢量，而 \mathbf{S} 是电子自旋角动量算符。当外加磁场沿 z 轴施加时，哈密顿量可以简化为：

$$H = g\mu_B B_z S_z$$

其中 B_z 是磁场在 z 方向的分量， S_z 是自旋在 z 方向的分量。该哈密顿量表明，电子的能量将因磁场的存在而发生劈裂，产生两个能级。

在磁场 B 下，电子的两个自旋态 $m_s = +\frac{1}{2}$ 和 $m_s = -\frac{1}{2}$ 对应的能量分别为：

$$E_{\pm} = \pm \frac{1}{2} g\mu_B B$$

能量差 ΔE 为：

$$\Delta E = g\mu_B B$$

这个能量差正是我们在 EPR 中探测到的共振频率。为了使电子发生自旋跃迁，需要满足电子的能量差与微波辐射的频率相匹配的条件，即共振条件。共振频率 ν 满足：

$$h\nu = \Delta E = g\mu_B B$$

即

$$\nu = \frac{g\mu_B B}{h}$$

其中 h 为普朗克常数。通过调节外加磁场 B 或微波频率 ν ，可以找到满足该条件的共振点，从而检测到 EPR 信号。

在实验中，将样品置于磁场和微波场中，逐步调节磁场强度，记录不同磁场下微波吸收的变化。当外加磁场满足共振条件时，样品会吸收特定频率的微波，从而检测到吸收峰。通过分析这些吸收峰的特征，可以获得样品中电子自旋的特性及其与核的相互作用信息。EPR 在化学、生物学和物理学中有广泛应用，如探测自由基的结构与反应活性、研究金属离子配合物的电子结构、研究固体材料中的晶格缺陷以及生物大分子中金属离子活性位点的研究。EPR 提供的电子和核相互作用信息可以揭示样品的微观结构和局部环境。

(3) EPR 信号的起源与共振条件

每个电子都有一个**磁矩**和**自旋量子数** $s = \frac{1}{2}$ ，其磁性分量为 $m_s = +\frac{1}{2}$ 或 $m_s = -\frac{1}{2}$ 。在外部磁场 B_0 的作用下，电子的磁矩会与磁场平行 ($m_s = +\frac{1}{2}$) 或反平行 ($m_s = -\frac{1}{2}$) 排列，每种排列因**塞曼效应**具有特定的能量：

$$E = m_s g_e \mu_B B_0,$$

其中：

- g_e 是电子的 **g 因子**（也称**朗德 g 因子**），对于自由电子， $g_e = 2.0023$ ；
- μ_B 是**玻尔磁子**。

因此，对于未配对的自由电子，高低能态之间的能量差为 $\Delta E = g_e \mu_B B_0$ 。此方程表明（由于 g_e 和 μ_B 是常数），能级的分裂与磁场的强度成正比，如图 2 所示。

未配对的电子可以通过吸收或发射一个能量为 $h\nu$ 的光子来改变其电子自旋，以满足共振条件 $h\nu = \Delta E$ 。这就是 EPR 光谱学的基本方程： $h\nu = g_e \mu_B B_0$ 。

实验上，此方程允许频率和磁场值的多种组合，但大多数 EPR 测量是在 9000-10000 MHz (9-10 GHz) 区域的微波下进行，对应的磁场约为 3500 高斯 (0.35 T)。此外，可以通过改变样品上光子的频率并保持磁场恒定，或者反之来生成 EPR 谱。在实际操作中，通常保持频率恒定。一组**顺磁中心**（如自由基）暴露在固定频率的微波下。通过增加外部磁场， $m_s = +\frac{1}{2}$ 和 $m_s = -\frac{1}{2}$ 能态之间的能量差逐渐扩大，直到它匹配微波的能量，如图 2 中的双箭头所示。此时，未配对电子可以在两个自旋态之间跃迁。由于麦克斯韦-玻尔兹曼分布的关系，通常低能态中的电子数更多，从而产生净能量吸收，监测这种吸收并将其转换为光谱。图 3 中的上方光谱是一个在变化的磁场下自由电子系统的模拟吸收谱，下方光谱是吸收谱的一阶导数。后一种方式是记录和发布连续波 EPR 谱的最常用方式。

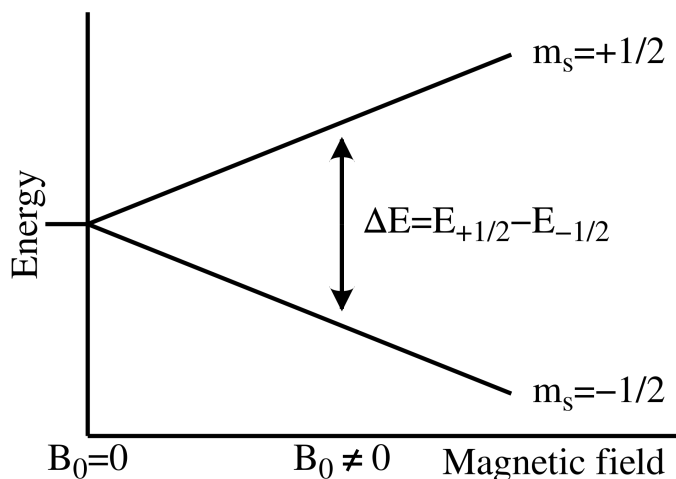


图 2: 电子自旋态的分裂

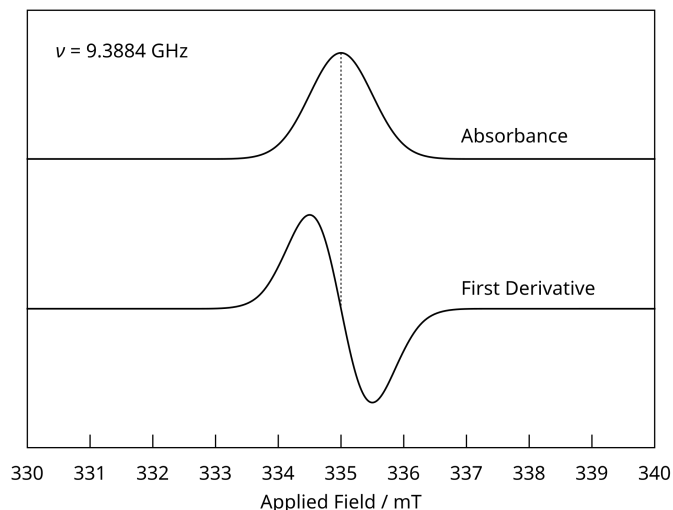


图 3: 在 X 波段频率为 9.3884 GHz 且导数峰峰线宽为 1 mT 时, $g = 2.0023$ 的双峰的吸收和一阶导数 EPR 信号

对于 9388.4 MHz 的微波频率, 预测的共振磁场约为

$$B_0 = \frac{h\nu}{g\mu_B} = 0.3350 \text{ T} = 3350 \text{ G}.$$

由于电子与核的质量差异, 电子的磁矩远大于任何核的相应值, 因此在相同的磁场强度下, 需要更高的电磁频率才能引起电子的自旋共振。例如, 对于图 3 中的 3350 G 磁场, 电子的自旋共振发生在约 9388.2 MHz, 而对于 ^1H 核则仅约为 14.3 MHz。(对于 NMR 光谱学, 相应的共振方程为 $h\nu = g_N\mu_N B_0$, 其中 g_N 和 μ_N 取决于研究的核种。)

(4) 微波及微波器件简介

微波是频率范围在 300 MHz 至 300 GHz 之间的电磁波, 其波长范围从 1 米到 1 毫米。微波在通讯、雷达、医学、微波加热等领域中有着广泛的应用。在电子顺磁共振 (EPR) 实验中, 微波用于引发电

子自旋共振，因为其频率正好能满足未成对电子在外加磁场中自旋跃迁所需的能量差。为实现微波的产生、传输和控制，微波器件发挥了至关重要的作用。

微波器件主要包括微波源、波导、滤波器、耦合器、衰减器、放大器和天线等。微波源是用于产生微波信号的器件，常见的微波源包括磁控管、行波管（TWT）和速调管（Klystron）。以磁控管为例，其基本工作原理是通过电场与磁场的作用加速电子产生微波辐射。磁控管的输出频率由其谐振腔结构决定，通常工作在固定频率，广泛应用于微波加热（如微波炉）和雷达中。波导是一种用于传输微波的结构，其作用相当于光纤在光通信中的作用。波导通常是空心的金属管，内部电场和磁场的模式决定了微波在其中的传播模式。波导方程为：

$$\frac{d^2 E_x}{dx^2} + \frac{d^2 E_y}{dy^2} + \left(k^2 - \frac{\omega^2}{c^2}\right) E_z = 0$$

该方程描述了不同模式（如 TE 模式和 TM 模式）下电磁场的分布。波导在低损耗传输微波信号方面具有优势，广泛用于高频应用。

滤波器用于控制特定频段的微波通过，去除不需要的频率分量。常见的微波滤波器包括带通滤波器和带阻滤波器。耦合器则用于实现微波信号的功率分配或合并，其设计基于微波的干涉原理，如分支耦合器、定向耦合器等。衰减器用于减少微波信号的强度，提供精确的信号调节。放大器用于增强微波信号，通常采用行波管放大器（TWT）和半导体放大器。行波管放大器通过电子流与微波信号的相互作用放大信号，而半导体放大器则利用微波频率的电流放大效应。天线用于将微波信号转化为电磁波并发射到空间中。常见的微波天线有抛物面天线、喇叭天线等，天线的辐射效率和方向性决定了其在信号发射与接收中的性能。

在电子顺磁共振实验中，微波器件如波导、腔体和天线被用来产生并传输微波信号。微波频率在 EPR 实验中非常关键，因为它需与外加磁场产生的电子能级劈裂频率相匹配，满足共振条件，从而激发电子自旋翻转并产生 EPR 信号。微波源通过精确的调节和控制，可以产生不同频率的微波，以便与不同的电子能级结构共振，从而揭示样品中电子自旋的微观特性。

1.4 实验前思考题

思考题 1.1: 简述电子自旋共振的基本原理，并与核磁共振作比较。

电子自旋共振 (Electron Spin Resonance, ESR) 或电子顺磁共振 (Electron Paramagnetic Resonance, EPR) 的基本原理是研究具有未成对电子的原子、离子或分子在外加磁场下的自旋行为。当未成对电子处于磁场中时，其自旋状态会发生能级分裂，称为塞曼分裂，能量差与磁场强度成正比。通过引入与电子能级分裂频率相匹配的微波辐射，可以引发电子自旋的跃迁（即从一个自旋状态翻转至另一个状态）。这种电子自旋翻转会产生微波吸收，从而被检测到作为 ESR 信号。

与核磁共振 (Nuclear Magnetic Resonance, NMR) 相比，ESR 和 NMR 的基本原理相似，都是利用外加磁场产生能级分裂，并通过电磁辐射引起自旋跃迁。然而，两者的主要区别在于探测对象：ESR 探测的是未成对电子自旋，而 NMR 则探测原子核自旋（通常是氢核的自旋）。此外，由于电子的磁矩远大于核磁矩，ESR 的共振频率比 NMR 高得多，因此 ESR 通常采用微波频率 (GHz 级)，而 NMR 多采用射频 (MHz 级)。这种差异导致 ESR 和 NMR 适用于不同的研究对象和应用领域，如 ESR 主要用于研究自由基和过渡金属离子，而 NMR 在有机分子结构分析和医学成像中应用广泛。

思考题 1.2: 电子自旋共振的必要条件有哪些？

首先，ESR 研究的基础是电子的自旋行为，因此样品中必须存在未成对电子。通常，未成对电子存在于自由基、过渡金属离子或某些缺陷中心中。对于无未成对电子的系统，由于电子处于成对状态，电子的总自旋为零，自旋态的磁矩也相互抵消，因此不会产生可探测的自旋共振现象。

在没有外加磁场时，电子的自旋态 $m_s = +\frac{1}{2}$ 和 $m_s = -\frac{1}{2}$ 是简并的，即两者的能量相等。当施加外部磁场 \mathbf{B} 时，电子自旋磁矩与外加磁场相互作用，会引起能级的劈裂，这种现象称为塞曼效应。哈密顿量 H 表示为：

$$H = g\mu_B \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}$$

其中 g 是电子的 g 因子，接近 2（约为 2.0023）， μ_B 是玻尔磁子，定义为 $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$ ， \mathbf{B} 是外加磁场， \mathbf{S} 是电子自旋角动量算符。当磁场沿 z 轴施加时，哈密顿量可以简化为：

$$H = g\mu_B B S_z$$

其中 B 是磁场的强度， S_z 是自旋角动量在 z 方向的分量。对于自旋量子数为 $S = \frac{1}{2}$ 的电子，其 S_z 可以取 $+\frac{1}{2}$ 和 $-\frac{1}{2}$ 两个值，因此电子在外加磁场下的能量分别为：

$$E_+ = +\frac{1}{2}g\mu_B B$$

$$E_- = -\frac{1}{2}g\mu_B B$$

能量差 ΔE 为：

$$\Delta E = E_+ - E_- = g\mu_B B$$

这种能级分裂是发生 ESR 的必要条件，因为电子自旋的跃迁所需的能量正是由此产生的。

为实现电子自旋跃迁，需要向系统施加频率为 ν 的微波辐射，使其频率满足共振条件，即微波辐射的光子能量 $h\nu$ 等于电子自旋的能级分裂 ΔE 。即：

$$h\nu = \Delta E = g\mu_B B$$

因此，共振频率 ν 满足：

$$\nu = \frac{g\mu_B B}{h}$$

其中 h 为普朗克常数。这个公式表明，为了使电子发生自旋跃迁，必须调节外加磁场 B 或微波频率 ν 以满足该共振条件。在实际实验中，通常通过固定微波频率并逐渐调节磁场强度来找到满足条件的磁场值，以便检测到 ESR 信号。

此外，电子自旋跃迁的发生不仅需要微波频率与能级分裂相匹配，还需要一定的辐射强度。微波的强度要足以激发电子自旋翻转，即提供足够的光子通量以增加跃迁概率。微波辐射的功率不足会导致信号微弱甚至无法检测。因此，微波功率必须经过调节，使得电子在两个自旋态之间发生有效的跃迁。

样品的电子自旋态在热平衡条件下会有一定的极化，即自旋处于低能级（例如 $m_s = -\frac{1}{2}$ ）的电子数略多于高能级（ $m_s = +\frac{1}{2}$ ）的电子数。这个不均匀的分布在一定程度上产生了净磁化矢量，是检测 ESR 信号的基础。温度越低，这种极化效应越明显，因此在低温条件下，ESR 信号的强度通常会更高。因此，实验通常在低温下进行，以增强极化并提高信号强度。

思考题 1.3: 在恒定磁场上叠加交变磁场的目的是什么？如果不加扫场，能否观测到 ESR 信号？

在恒定磁场上叠加交变磁场的目的主要包括：

在恒定磁场上叠加交变磁场的目的是实现电子自旋共振（ESR）的共振条件，使得不成对电子的自旋在不同能级间发生跃迁，从而产生可观测的共振吸收信号。叠加交变磁场的主要作用在于提供合适的电磁场频率，当该频率与恒定磁场下产生的能级分裂（塞曼效应）频率相匹配时，就满足了共振条件，即 $h\nu = g\mu_B B_0$ ，其中 h 是普朗克常数， ν 是交变磁场的频率， g 是朗德因子， μ_B 是玻尔磁子， B_0 是恒定磁场强度。此时，不成对电子可以在不同的塞曼能级间发生跃迁，吸收特定频率的电磁波，形成共振吸收信号。因此，叠加交变磁场是实现 ESR 共振的必要条件。

此外，交变磁场的存在使电子能够持续地在高低能级间来回跃迁，以产生稳定的信号。恒定磁场的作用是使能级发生分裂，而交变磁场则进一步激发电子从低能级跃迁至高能级，并在弛豫过程中返回到低能级，从而在宏观上产生稳定的共振吸收效应。通过调节交变磁场的频率或强度，能够进一步优化共振条件，使得 ESR 信号在检测仪器（如示波器）上达到最佳观测效果。由于交变磁场的频率需要与电子塞曼分裂频率精确匹配，交变磁场的叠加在观测 ESR 信号时至关重要。

如果不加扫场，通常无法有效观测到 ESR 信号。这是因为共振频率对磁场强度有精确的匹配要求，在恒定磁场下，若磁场值与微波频率未能完全达到共振条件，就无法观测到信号。扫场的引入可以逐步调整磁场强度，使系统达到共振条件，从而产生信号。同时，扫场可以提高信号的稳定性和准确性，通过扫描磁场范围来确定最佳磁场强度，优化实验数据的稳定性和精确度。因此，在没有扫场的情况下，由于缺乏对磁场强度的灵活调整，难以实现共振条件，从而无法获得有效的 ESR 信号。

专业：	物理学	年级：	2022 级
姓名：	戴鹏辉 & 杨舒云	学号：	22344016 & 22344020
室温：	26℃	实验地点：	A413
学生签名：	见附件	评分：	
实验时间：	2024/10/31	教师签名：	

D4-1 电子自旋共振实验

实验记录

2.1 实验内容和步骤

2.1.1 确定励磁电压与磁感应强度关系曲线

- (1) 开启实验主机和示波器的电源, 预热 20 分钟。
- (2) 将高斯计探头远离磁场, 旋转调零旋钮将高斯计示数调零。
- (3) 改变励磁电压, 观察并记录高斯计读数。因为线圈发热很小, 可认为励磁电压与励磁电流（即磁感应强度）成线性关系。
- (4) 得到的电压与磁感应强度结果如表 2

电压 (V)	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5
磁感应强度 (Gs)	3220	3232	3244	3253	3263	3275	3287	3299	3312	3325	3338	3359	3365

表 2: 励磁电压与磁感应强度关系

2.1.2 观察磁共振信号并测定电子郎德因子

- (1) 将高斯计探头换成 DPPH 样品。调节双 T 调配器的两臂上的活塞旋钮以检查实验设备是否正常工作。
- (2) 根据共振条件, 调节励磁电源使共振磁场在 3300 Gs 左右。
- (3) 首先将示波器调节至直流档, 调节双 T 调配器和短路活塞, 使得直流电平信号最小（实验中最小电平为 40mV）; 此时切换至交流档, 并打开扫场磁场电源, 理论上会观察到共振吸收信号出现。
- (4) 此时再调整励磁电源, 使信号均匀出现。扫场磁场的频率为市电 50 Hz, 所以应调整至信号出现间隔为 10 ms, 一个周期内出现两次信号。如图 4所示。
- (5) 当调整至信号间隔 10 ms 后, 由实验一所得的电压与磁感应强度关系曲线, 得到此时的共振磁场大小; 旋转频率计, 当示波器图像出现跳动后, 记录下此时的频率。

- (6) 由共振磁场大小、频率大小，代入公式可计算得到样品的朗德因子大小。
- (7) 测量数据见表 3

电压 (V)	频率 (GHz)
6.6	9.38
6.56	9.37
6.61	9.3725
6.85	9.376
6.93	9.375

表 3: 共振频率对应电压测量值

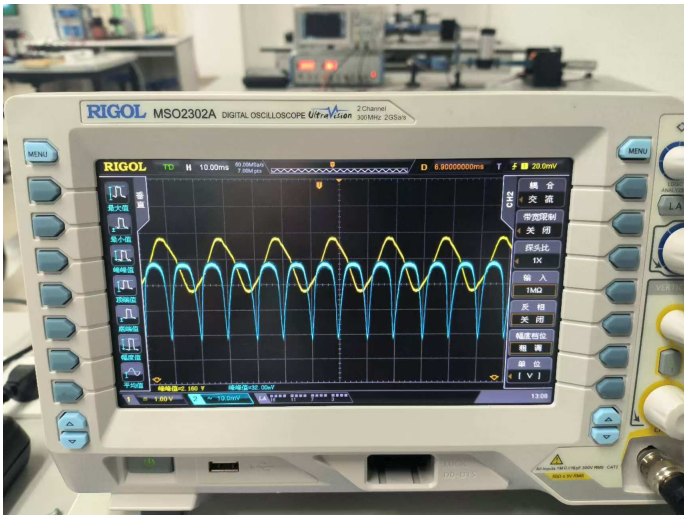


图 4: 信号均匀出现的共振吸收信号

2.1.3 估测 DPPH 样品横向弛豫时间

由估算横向弛豫时间的公式 $T_2 = \frac{2}{\gamma \Delta B}$ 可知，估算 ΔB 是关键。

具体的实验步骤为：把带有移相器的扫场信号用线接入到示波器 CH1，检测输出的磁共振信号用线接入到示波器 CH2，将示波器切换到 X-Y 扫描模式，合成李萨如图。通过调节扫场相位，使两个共振峰重合。

实验中主要使用两种方法估算 ΔB 。

- 使用李萨如图直接拟合得到 ΔB 。
- 利用共振吸收信号拟合得到半高宽所对应的时间间隔，再根据扫场法原理间接得到半高宽。

扫场磁场的测量方法：

- (1) 注意到，扫场磁场和励磁磁场并不是一组线圈，所以不能通过实验一测得的电压和磁感应强度曲线和示波器 CH1 通道测量的电压得到扫场磁场的大小。

- (2) 由扫场法原理，当励磁磁场满足共振吸收条件，此时再叠加扫场，每当扫场磁场为零时，会发生共振吸收，即在一个周期内发生两次共振吸收，记录下此时励磁电压的大小；此时将励磁磁场减小，使得扫场的极大值 + 励磁磁场满足共振吸收条件，即在一个周期内仅发生一次共振吸收，同样记录下此时励磁电压的大小。
- (3) 两次励磁电压之差即对应扫场磁场的大小。
- (4) 同时使用 CH1 通道的峰峰值建立扫场电压与扫场磁场大小的对应关系。

测量得到的数据：

- 共振吸收信号为 10ms 时，励磁电压大小为：6.85V
- 共振吸收信号为 20ms 时，励磁电压大小为：5.80V
- 扫场电源的峰峰值：2.240V

2.1.4 测量波导波长及微波波长

- (1) 由实验原理可知，当谐振腔长度为半个波导波长的整数倍时，可观察到共振吸收信号。
- (2) 改变谐振腔长度，当观察到共振吸收信号时，记录下此时谐振腔长度的读数（实验中可观察到两个共振吸收点）。
- (3) 由这两个共振吸收点，可计算得到波导波长与微波波长。
- (4) 测量到的两个共振吸收点为 $L_1 = 7.320mm$ $L_2 = 30.663mm$

2.2 实验过程中遇到的问题记录

- (1) 高斯计调零时应当尽量远离磁场。
- (2) DPPH 样品应当放在谐振腔中驻波的波腹位置，实验中可尝试移动实验架，找到磁场最大的位置。

专业:	物理学	年级:	2022 级
姓名:	戴鹏辉 & 杨舒云	学号:	22344016 & 22344020
日期:	2024/11/12	评分:	

D4-1 电子自旋共振实验 分析与讨论

3.1 实验数据分析

3.1.1 确定励磁电压与磁感应强度关系曲线

对于表 2 的数据，使用线性拟合，得到励磁电压与磁感应强度的大小关系：

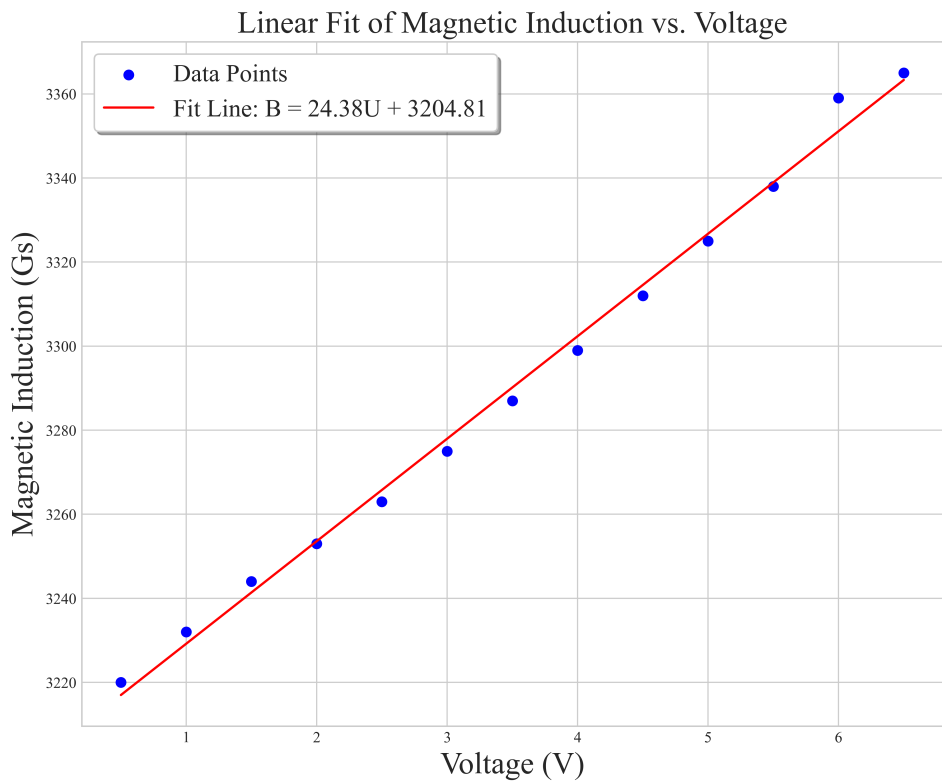


图 6: 励磁电压与磁感应强度拟合拟合关系

3.1.2 观察磁共振信号并测定电子朗德因子

(1) 由表 3 的数据，计算得到磁场大小，并代入公式计算朗德因子 g ：

$$g = \frac{\mu_B \cdot B_0}{f \cdot h}$$

(2) 根据测量结果，计算得到的朗德因子结果为 $g = 1.9906$ 。

(3) 下面进行误差分析：

朗德因子的标准差由下面公式计算得到：

$$\sigma_g = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial B_0} \sigma_{B_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial f} \sigma_f\right)^2} = 0.00128$$

相对不确定度为：

$$\eta_1 = \frac{\sigma_g}{g} \times 100\% = 0.1279\%$$

测量值与标准值的相对误差为：

$$\eta_2 = \frac{g - g_0}{g_0} \times 100\% = -0.6215\%$$

可见，相对不确定度为 0.1279%，说明测量结果比较精确。但是与标准值比较可以发现，测量结果偏小。由朗德因子计算公式可知，可能的原因为测量的磁感应强度偏小、或测量的微波频率偏大。

- 在实验中，磁感应强度由高斯计来测定。如果高斯计的校准存在偏差（即系统误差），可能导致磁场强度测量结果有较大误差。虽然在实验一测量励磁电压与磁感应强度关系曲线之前，已经对高斯计进行了校准，可能是因为在校准时没有完全屏蔽磁场，或者是高斯计自身有个系统性的偏差。
- 实验中我们使用吸收式频率计测量频率，具体是观察示波器波形是否发生跳动。由于旋转频率计是从示数小向示数大的方向旋转，且人的动作有延迟，所以在观察到波形跳动后旋转才停止，可能导致频率计测量频率偏大。

3.1.3 估测 DPPH 样品横向弛豫时间

首先考虑扫场磁场的测量：

(1) 扫场磁场的大小：

$$B' = 24.38 \times (6.85 - 5.80) \text{Gs} = 25.60 \text{Gs}$$

(2) 单位扫场电源电压对应扫场磁场大小：

$$k = 2 \times \frac{B'}{V_{pp}} = 2 \times \frac{25.60}{2.240} \text{Gs/V} = 23.21 \text{Gs/V}$$

对于示波器导出的数据，我们将按照如下的步骤进行分析与处理：

- (1) 将数据分为多个周期并求平均，得到一个周期内的平均值，以减小噪声并提高数据的平滑度。
- (2) 由于导出的数据中，时间序列的数据间隔为单位时间，而不是秒，所以需要根据采样率定义周期。周期长度 T_{x1} 和 T_{y1} 被设定为 400，以适应数据的周期性结构。多个周期平均后的数据便于后续滤波和拟合。

- (3) 使用 Savitzky-Golay 滤波器对平均化后的 X 和 Y 数据进行平滑处理,以去除高频噪声。Savitzky-Golay 滤波器可以有效保持信号的趋势,并在平滑的同时尽量不改变信号的主要形状。
- (4) 为了进一步分析和绘制李萨如图,将平滑后的 X 和 Y 数据从索引 50 到 200 截取。这样的截取确保选择的片段位于信号稳定且噪声较小的区域,减少边界效应对拟合结果的干扰。
- (5) 使用 Lorentzian 函数对李萨如图数据进行拟合。Lorentzian 是常见的共振曲线拟合函数,适用于 ESR 信号分析。拟合得到的参数包括中心位置 x_0 、全宽半高 (FWHM) Γ 、幅值 A 和基线 y_0 。

$$f(x) = y_0 - \frac{A}{1 + \left(\frac{x-x_0}{\Gamma/2}\right)^2}$$

- (6) 时序图的拟合分两种情况进行,分别是“平均时序图”和“普通时序图”。与李萨如图类似,时序图也使用 Lorentzian 拟合。
 - 平均时序图拟合: 对 Y 数据重新按 200 个数据点为周期进行平均,获得平滑后的时序图数据并进行 Lorentzian 拟合。拟合后的 FWHM 用于计算弛豫时间。
 - 普通时序图拟合: 直接对选定的 Y 数据片段拟合,得到另一组 FWHM 参数,并用于计算弛豫时间。

- 首先考虑拟合李萨如图的方法:

得到的拟合结果如图 7:

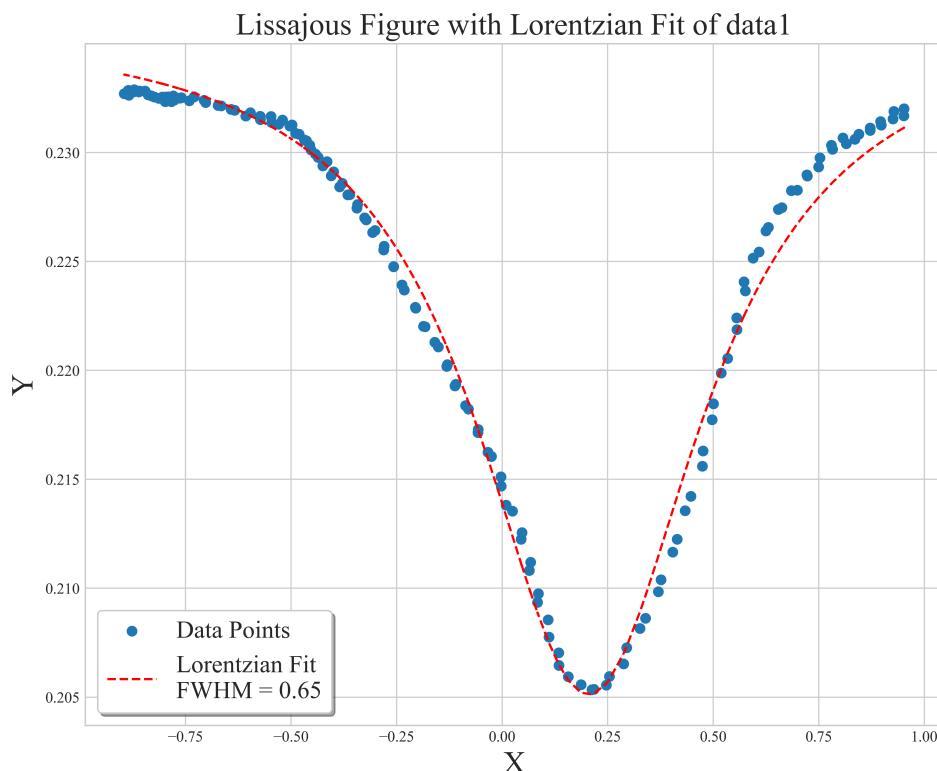


图 7: 洛伦兹峰拟合李萨如图

得到曲线的全高半宽为 0.65。于是得到 $\Delta B = k \cdot 0.65 = 0.0008566\text{T}$

$$\Rightarrow T_2 = \frac{2}{\gamma \Delta B} = 7.2838\text{ns}$$

- 再考虑拟合时序图的方法：

考虑如下方式计算 ΔB ：

$$\Delta B = B' \sin \omega t_2 - B' \sin \omega t_1 = 2B' \cos \omega \frac{t_2 + t_1}{2} \cdot \sin \omega \frac{t_2 - t_1}{2} = 2B' \sin \frac{\omega \Delta t}{2}$$

分别使用”平均时序图拟合”和”时序图拟合”的方法，对其拟合，得到结果如图 8、图 9(其中横轴为单位时间长度)：

分别得到全高半宽为 “53.62” 和 “42.19”，分别对应

$$\Delta t_1 = \frac{53.62 \times 10^{-3}}{200} = 0.00268\text{s}$$

$$\Delta t_2 = \frac{42.19 \times 10^{-3}}{200} = 0.00211\text{s}$$

分别计算横向弛豫时间 T_2 ，结果为：

(1) 平均时序图拟合得到弛豫时间 $T_2 = 5.4265\text{ ns}$

(2) 时序图拟合得到弛豫时间 $T_2 = 6.8187\text{ ns}$

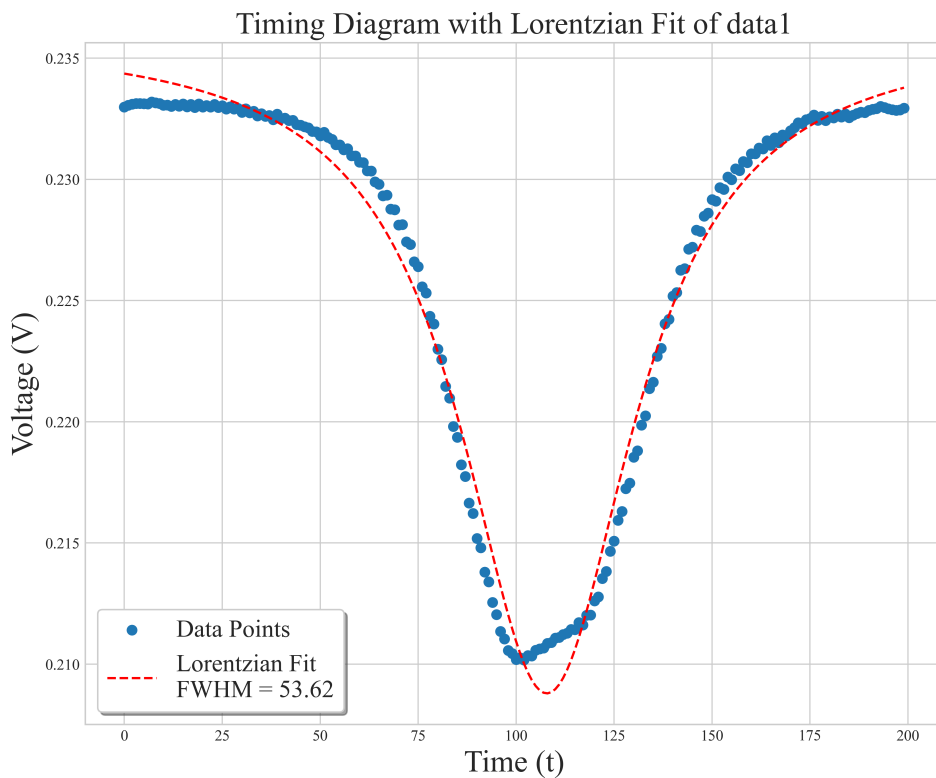


图 8: data1 平均时序图拟合

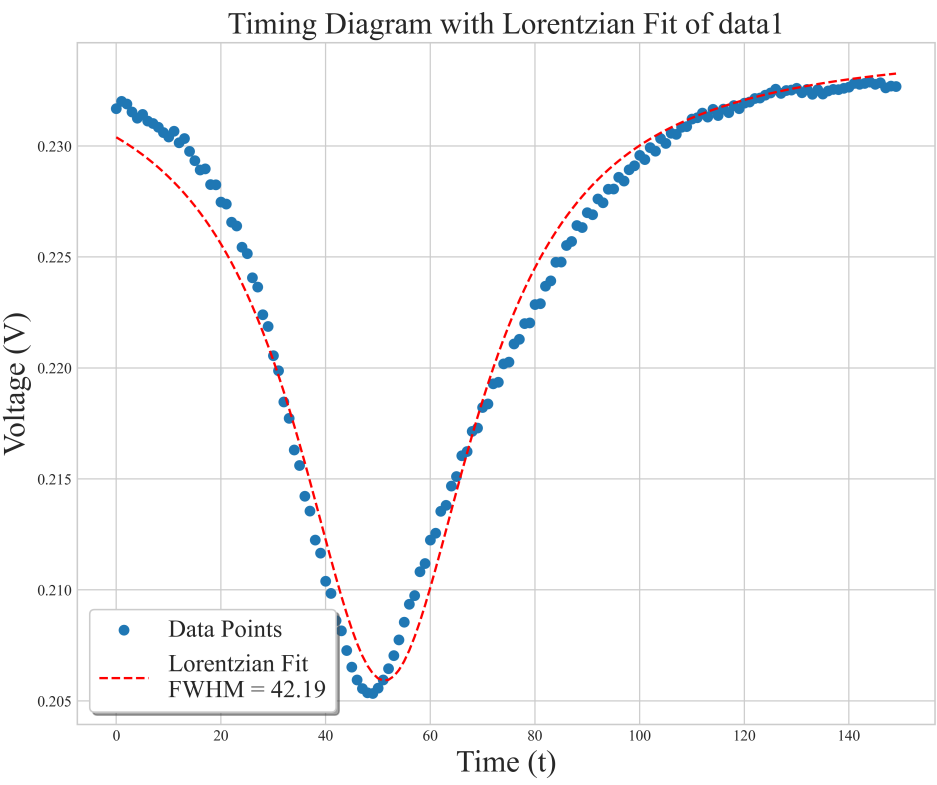


图 9: data1 时序图拟合

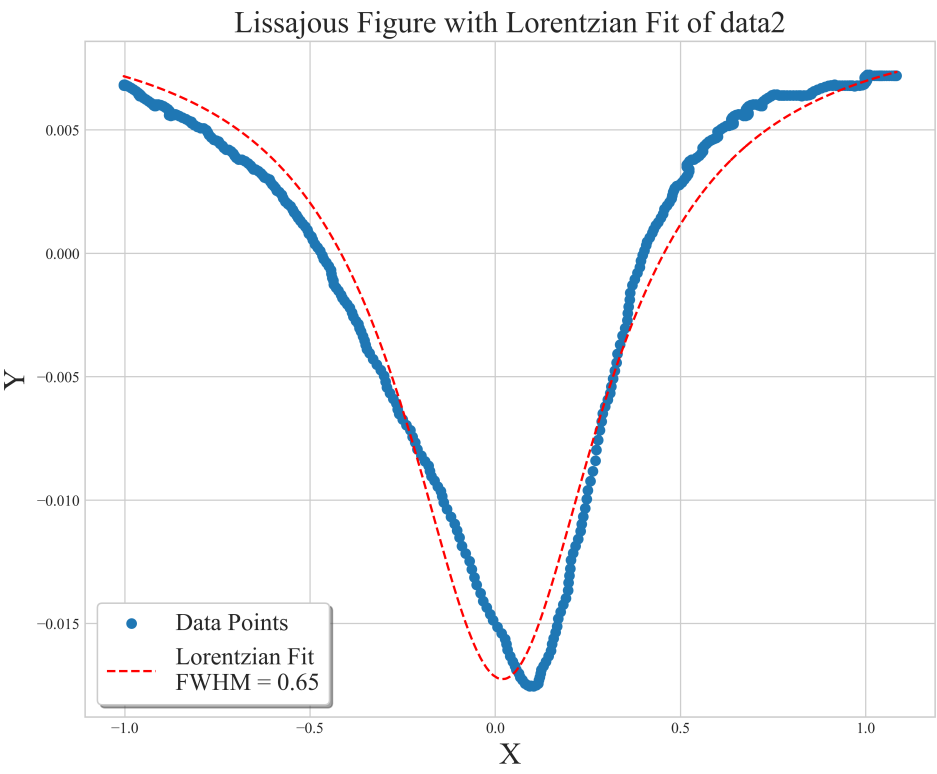


图 10: data2 李萨如图拟合

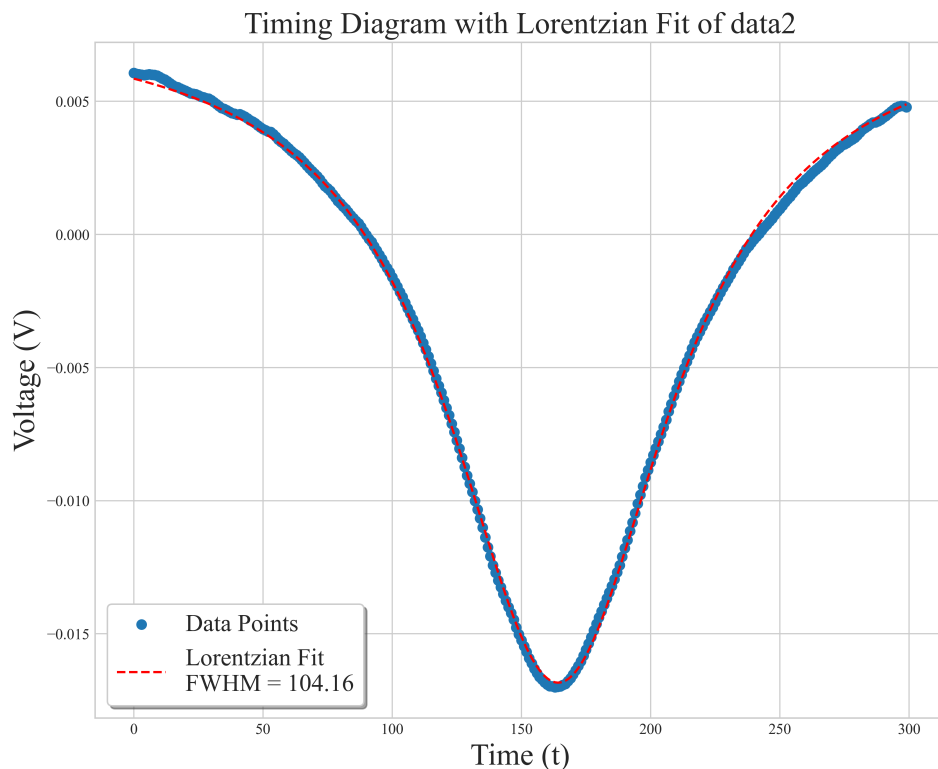


图 11: data2 平均时序图拟合

按照上述方法，对第二组数据 data2 进行同样的分析处理，结果如图 10、图 11：

- (1) data2 李萨如图拟合的结果为 $\text{FWHM} = 0.65$ ，与 data1 一致，则得到一样的横向弛豫时间 $T_2 = 7.2838\text{ns}$
- (2) data2 平均时序图拟合的结果为 $\text{FWHM} = 104.16$ ，得到横向弛豫时间 $T_2 = 6.9015\text{ns}$

3.1.4 测量波导波长及微波波长

- (1) 由测量到的两个相邻的共振吸收点，可计算得到波导波长为：

$$\lambda_g = 2(L_2 - L_1) = 46.686\text{mm}$$

- (2) 由以下公式可计算得到微波波长，其中截止波长 $\lambda_c = 2a = 45.72\text{mm}$ ：

$$\begin{aligned}\lambda_g &= \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c)^2}} \\ \Rightarrow \lambda &= 32.6651\text{mm} \\ \Rightarrow f &= 9.1778\text{GHz}\end{aligned}$$

该测量值明显小于实验中使用的微波频率 9.36GHz。可能是因为在改变谐振腔长度时，同时改变了驻波波腹的位置；原本放在驻波波腹位置的样品，在改变谐振腔长度后，偏离了波腹的位置，导致共振吸收信号受到影响（即，示波器显示的共振吸收信号最大的位置，并不对应半波长的整数倍位置）。

3.2 实验后思考题

思考题 3.1: 观察电子自旋共振需要提供哪些磁场？它们各起什么作用？

需要提供**静态磁场**和**扫场磁场**两种。

- (1) 在静态磁场的作用下，电子的自旋会发生塞曼能级分裂。其作用是将电子自旋的不同方向对应的能级区分开，使得自旋态能级之间出现差距，从而产生可观察的共振条件。
- (2) 扫场磁场用于激发电子的自旋跃迁，当交变磁场频率与自旋态能级分裂的频率相同时，会引发共振吸收。

思考题 3.2: 在电子自旋共振实验中，如何测定共振磁场的大小？测定共振磁场时，应将共振信号调成什么状态？

- (1) 首先通过高斯计，确定励磁电压与磁感应强度关系曲线。
- (2) 随后按照实验二的步骤，调出共振吸收信号。
- (3) 再调整励磁电压，使信号均匀出现。由于使用的扫场磁场频率为 50Hz，当两次共振吸收信号间隔为 10ms 时，一个周期内将出现两次共振吸收，此时静态磁场的大小满足共振吸收条件。
- (4) 此时，读出励磁电压大小，并利用实验一得到的励磁电压与磁感应强度关系曲线，即可得到共振磁场大小。

思考题 3.3: 微波谐振腔的作用是什么？腔长和微波频率的关系是什么？调节短路活塞的作用是什么？实验样品应位于什么位置？为什么？

- **微波谐振腔：**微波谐振腔用于集中微波能量，使得微波在腔内形成驻波，从而在特定位置形成较强的交变磁场，以有效地驱动电子自旋的跃迁，增加信号强度。
- **腔长和微波频率的关系：**当谐振腔腔长是半波导波长的整数倍时，谐振腔内可发生谐振：

$$\frac{n}{2}\lambda_g = L \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots$$

而波导波长与入射微波波长存在关系，其中 $\lambda_c = 2a$ ：

$$\lambda_g = 2(L_2 - L_1) = 46.686\text{mm}$$

- **短路活塞：**短路活塞可以在腔体内移动，从而改变腔体的有效长度。通过调节活塞的位置，可以调节腔体的谐振频率，使其与微波源的频率精确匹配。
- 实验样品应放置在腔体内磁场强度最大的位置，通常是驻波波腹的位置。这个位置交变磁场较强，电子受到的驱动也最强，能更有效地引发自旋共振。