

近代物理实验 I 要点总结

Siyan Dong

本文档主要结合 kimi、孙 hr 学长的手写笔记进行实验要点总结。

实验 1 锁相放大器与弱信号测量

1.1 实验原理及重要概念

1. 锁相放大器原理：锁相放大器通过特定的载波将湮没在噪声中的微弱信号提取出来的技术。它采用频谱迁移和交流放大技术、用相敏检波器和低通滤波器来实现调制信号的解调。见图1
2. 电阻热噪声：电阻热噪声是由于电阻器与环境不断交换能量，当达到热平衡时，其从环境接收的能量等于向环境发射的能量，从而产生噪声。
3. 趋肤效应：当电流通过导体时，在导体外空间产生电磁场，当通过导体的是交变电流时，导体外空间的电磁场也以相同的频率交替变化，导致电磁场和电流分布趋向于导体表面，此时导电横截面积减少、电阻增加。
4. 还要注意其他一些概念：时间常数（TC）——决定滤波器带宽；陡降（Slope）——决定滤波器阶数 n ；
5. 提高信噪比（衡量指标 SINR）的途径有两条：一是通过物理屏蔽来抑制环境噪声（压低强度），二是通过信号处理滤除噪声（缩小积分范围）。
6. 滤波法测量小信号只适用于信号与噪声频谱不重叠的情况

1.2 重要公式

1. 基本信号描述：

$$x(t) = a \sin(\omega t + \phi)$$

其中， a 是振幅， ω 是角频率， ϕ 是相位。

2. 信噪比（SNR(dB)）：

$$SNR(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right)$$

其中， P_{signal} 是信号功率， P_{noise} 是噪声功率。

3. 热噪声功率谱密度：

$$S_V(f) = 4kTBR$$

其中， k 是玻尔兹曼常数， T 是温度， B 是带宽， R 是电阻。

4. 趋肤深度：

$$\delta = \frac{2}{\sqrt{\omega \mu \sigma}}$$

其中， ω 是角频率， μ 是导体磁导率， σ 是导体电导率。

1.3 图

锁相放大器工作原理图: Know how it works

信号输入 → 调制器 → 放大器 → 相敏检波器 → 低通滤波器 → 输出

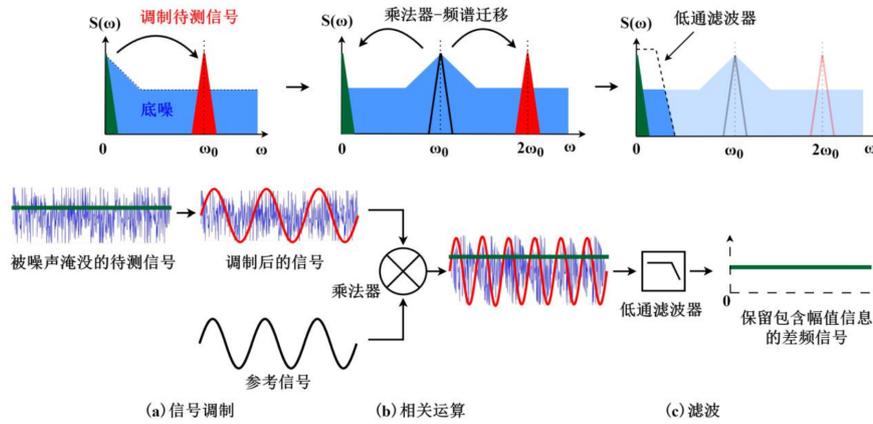


图 1: 锁相放大器的工作原理

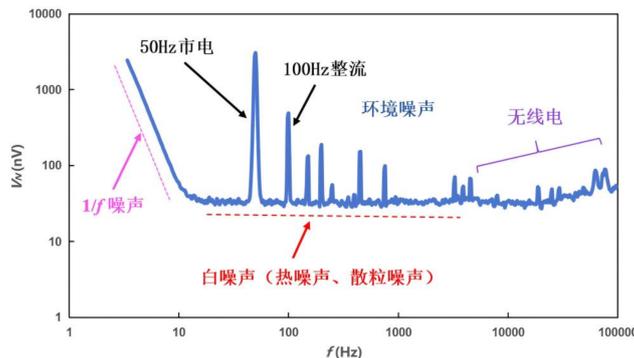


图 2: 本实验涉及的 3 类噪声分布

实验 2 材料真空兼容测试和等离子特性研究

2.1 重要实验原理与公式

2.1.1 一些概念

1. 真空的定义: 在给定空间内, 气体压强低于一个标准大气压的气体状态 (气体分子的密度低于标准大气压的气体分子密度的状态), 称之为真空。
2. 温度的微观意义: 气体分子无规运动称为热运动, 热现象的本质就是分子的热运动。
3. 固体表面对气体的吸附及气体的脱附: 气体吸附就是固体表面捕获气体分子的现象, 吸附分为物理吸附 (无选择性) 和化学吸附 (发生在较高温, 类似化学反应)。
4. 真空气体放电的基本物理过程是利用外电场加速电子使之碰撞中性原子 (分子) 来电离气体, 主要包括粒子的激发、电离、复合、漂移、扩散等基本过程。气体放电是产生等离子体 (Plasma: 由离子、电子以及中性原子 (分子) 的集合组成, 整体宏观呈中性的物质状态。) 的一种常见形式。

5. 在（平面电极）均匀电场中，气体击穿电压是气体压力 p 与电极距离 d 乘积的函数，通称为帕邢定律，其特点为：在一定 pd 数值，击穿电压有极小值
6. 辉光放电（glow discharge）是指低压气体中显示辉光的气体放电现象，即是稀薄气体中的自持放电现象。

So many concepts!

2.1.2 公式

- 理想气体压强公式：

$$p = nkT$$

其中， p 是气体压强， n 是气体分子数密度， k 是玻尔兹曼常数， T 是热力学温度。

- 气体分子碰撞之间的平均自由程：

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}$$

其中， λ 是平均自由程， d 是气体分子直径， n 是气体分子数密度。

真空的获得

- 气体流量：

$$q = \frac{dV}{dt} \cdot p$$

其中， q 是气体流量， $\frac{dV}{dt}$ 是体积流率。

- 真空泵的抽速：

$$S = \frac{dV}{dt}$$

其中， S 是真空泵的抽速。

气体放电、帕邢定律、辉光放电、等离子体

- 帕邢定律：

$$V = f(p \cdot d)$$

其中， V 是击穿电压， p 是气体压力， d 是电极距离。

- 热电离方程（沙哈方程）：

$$\frac{n_i}{n_0} = \frac{kT}{h^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{U_i}{kT}} - 1}$$

其中， n_i 代表电离的分子数密度， n_0 代表未电离的中性分子数密度， T 为气体温度， k 是玻尔兹曼常数， U_i 为气体电离能。

等离子体基本参数

- 德拜长度：

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{kTe}{ne^2}}$$

其中， λ_D 是德拜长度， k 是玻尔兹曼常数， T 是电子温度， e 是电子电荷， n 是电子密度。

- 等离子体振荡频率（朗缪尔振荡）：

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{\epsilon_0 m_e}}$$

其中， ω_p 是等离子体振荡频率， n 是电子密度， e 是电子电荷， ϵ_0 是真空电容率， m_e 是电子质量。

2.2 图

1. 真空度随时间变化图：展示机械泵和分子泵启动后真空度随时间的变化，反映真空系统的特性和泵的性能。
 2. 帕邢定律曲线图：展示击穿电压与 pd 乘积的关系，显示在特定 pd 数值下击穿电压的极小值。
 3. 辉光放电光区分布图：展示辉光放电中不同亮度区间的分布，包括阿斯通暗区、阴极光层等。
 4. 等离子体光谱图：展示等离子体发射的线状谱和连续谱，反映等离子体中粒子的激发、电离等过程。
- 以上可查看实验报告这里不展示。

实验 3 量子密钥分发

3.1 重要实验原理

1. 量子密钥分发 (QKD) 原理：

- 量子密钥分发基于量子力学的物理定律，包括测量塌缩理论、海森堡不确定原理和量子不可克隆定律，来保证密钥分发的安全性。
- BB84 协议：利用量子态的特性来分发密钥，任何窃听行为都会扰乱量子状态，留下痕迹。

2. 单光子探测器效率测量：

- 使用光电倍增管 (PMT) 来测量单光子水平的光信号。
- 通过衰减激光至单光子水平，并计算探测器的探测效率。

3. 单光子源的近似制备：

- 使用强衰减的脉冲激光来近似模拟单光子源。

3.2 重要公式

1. 单个光子能量计算：

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

其中， h 是普朗克常量， c 是光速， λ 是光波长。

2. 平均光子数计算：

$$P = \mu \times f \times E$$

其中， μ 是平均光子数脉冲， f 是光触发频率， E 是单个光子的能量。

3. 单光子探测器探测效率计算：

$$N = f \times \mu \times \eta$$

其中， N 是探测器的计数值， f 是激光器发光频率， μ 是平均光子数脉冲， η 是单光子探测器的探测效率。
还涉及到误码率的计算 16 与 2 进制转换—思考题经典问题

3.3 图表

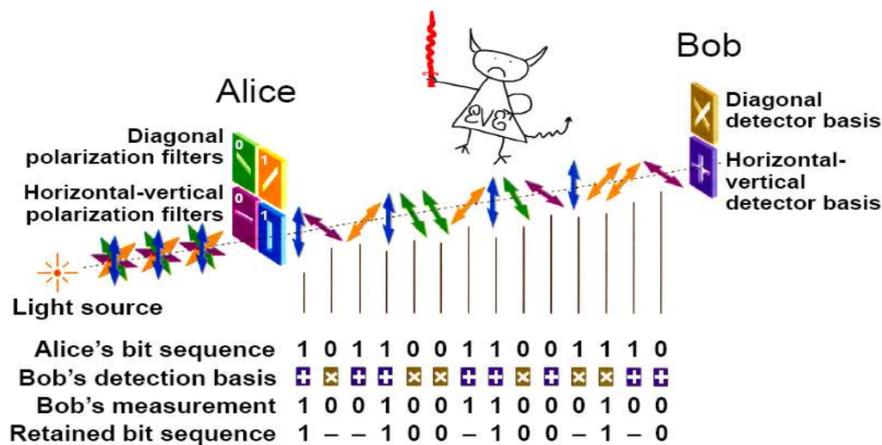


图 3: 偏振编码 BB84 协议流程图

实验 4 电子、核磁共振

4.1 重要实验原理

1. 电子自旋共振 (ESR) 原理:

- ESR 涉及处于恒定磁场中的电子自旋磁矩在电磁场作用下发生的塞曼能级间的共振跃迁现象。
- 共振跃迁仅发生在电子固有磁矩不为零的顺磁材料中, 用于检测物质中不配对电子的状态及其周围环境。

2. 核磁共振 (NMR) 原理:

- NMR 涉及具有非零自旋磁矩的原子核在恒定磁场中产生塞曼能级分裂, 在射频场照射下的共振吸收和辐射现象。

4.2 重要公式

1. 电子自旋共振条件:

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

其中, g 是朗德因子, μ_B 是玻尔磁子, B 是磁场强度, h 是普朗克常数, ν 是频率。

2. 核磁共振条件:

$$\nu = \frac{\gamma B_0}{2\pi}$$

其中, ν 是射频场频率, γ 是原子核的旋磁比, B_0 是外磁场强度。

3. 横向弛豫时间:

$$T_2 = \frac{1}{\pi\Delta\omega}$$

其中, T_2 是横向弛豫时间, $\Delta\omega$ 是共振线宽。

4.3 图表

辅助理解, 以上主要为原子物理 + 量子力学内容

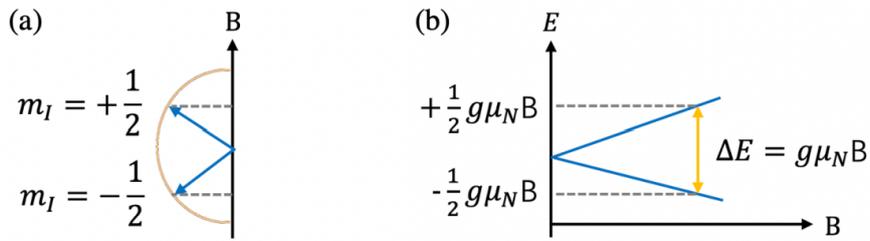


图 4: 氢核在磁场中的分裂

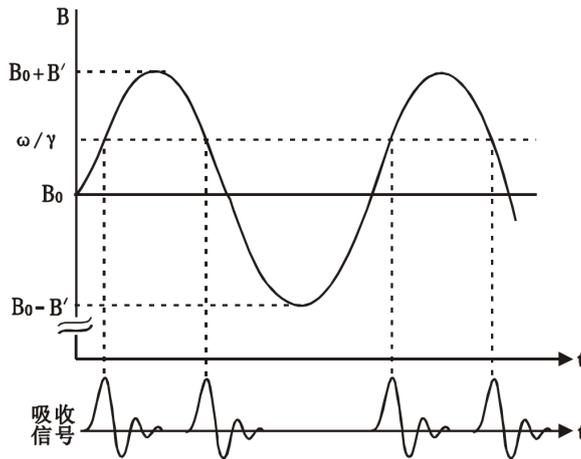


图 5: 扫场法检测共振信号

实验 5 α 粒子的能量损失

5.1 重要实验原理

1. α 衰变:

- 不稳定的原子核通过释放 α 粒子（带两个正电荷的氦核）转变为另一种原子核的过程。

2. 金硅面垒半导体探测器工作原理:

- 带电粒子穿过半导体材料时，通过激发或电离过程损失能量，产生电子-离子对，从而产生可测量的电信号。

5.2 重要公式

1. 线性阻止本领:

$$S = -\frac{dE}{dx}$$

其中， S 是线性阻止本领， $\frac{dE}{dx}$ 是单位长度的能量损失率。

2. 阻止截面:

$$\Sigma(E) = -\frac{dE}{dx} \cdot \frac{1}{N}$$

其中， $\Sigma(E)$ 是阻止截面， N 是单位体积内的原子数。

3. α 粒子能量损失:

$$\Delta E = -\Sigma(E) \cdot \langle \Delta x \rangle$$

其中, ΔE 是能量损失, $\Sigma(E)$ 是阻止截面, $\langle \Delta x \rangle$ 是平均路径长度。

4. 薄膜厚度计算:

$$\Delta x = \frac{\Delta E}{\Sigma(E)}$$

其中, Δx 是薄膜厚度, ΔE 是能量损失, $\Sigma(E)$ 是阻止截面。

复杂的计算这里省略了, 敢赌不考。

5.3 图表

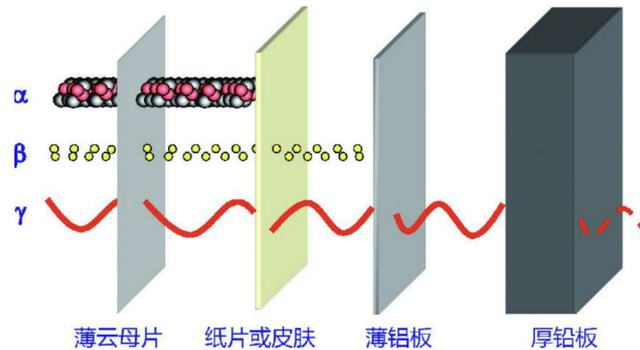


图 6: 三种粒子对比

注意区分是否带 +/- 电; 然后电离能力相反;

实验 6 γ 能谱测量

6.1 重要实验原理

1. 伽马射线与物质的相互作用:

- 光电效应: γ 光子将全部能量转移给束缚电子, 使电子脱离原子束缚。
- 康普顿效应: γ 光子与自由电子碰撞, 转移部分能量给电子, 光子被散射。
- 电子对效应: 当 γ 光子能量大于 2 倍电子静止质量能量时, 可转化为一个正电子和一个负电子。

2. 闪烁伽马能谱仪:

- 闪烁探头: 包括闪烁体、光电倍增管、分压电路以及屏蔽外壳。
- 信号放大与多道分析: 线性放大器放大信号, 多道脉冲幅度分析器测量信号多道能谱。

6.2 重要公式

1. 光电效应中光电子动能计算:

$$E_e = E_\gamma - B_i$$

其中, E_e 是光电子动能, E_γ 是入射 γ 光子能量, B_i 是束缚电子所在壳层的结合能。

2. 康普顿效应中反冲电子动能计算:

$$E_e = \frac{E_\gamma(1 - \cos \theta)}{1 + \frac{E_\gamma}{m_0 c^2}(1 - \cos \theta)}$$

其中, E_e 是反冲电子动能, E_γ 是入射 γ 光子能量, θ 是散射角, $m_0 c^2$ 是电子静止质量能量。

3. 电子对效应中正负电子动能计算:

$$E_e^+ + E_e^- = E_\gamma - 2m_0c^2$$

其中, E_e^+ 和 E_e^- 是正负电子动能, E_γ 是入射 γ 光子能量。

4. 谱仪能量分辨率定义:

$$\eta = \frac{FWHM}{E_\gamma} \times 100\%$$

其中, η 是能量分辨率, $FWHM$ 是峰的半高全宽, E_γ 是 γ 光子能量。

6.3 图表

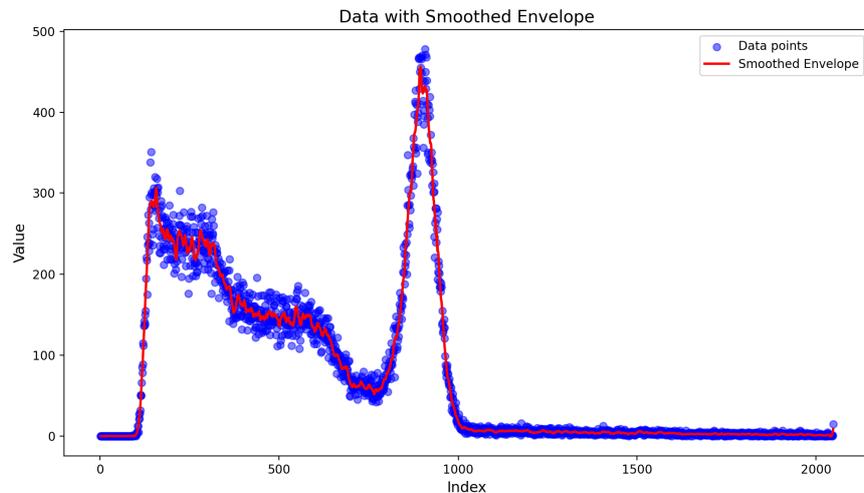


图 7: 典型 ^{137}Cs 的 γ 射线能谱图

EC 即为康普顿边界, 对应反冲电子的最大能量。背散射峰 Eb 是由射线与闪烁体屏蔽层等物质发生反向散射后进入闪烁体内而形成的光电峰, 一般背散射峰很小。光电峰 E_e ; 标定 N-E 略

实验 7 CCD 原理与应用

7.1 重要实验原理

1. CCD 结构与原理:

- CCD 由感光部分、转移存储和移位输出控制等部分组成, 感光部分由光电二极管或 MOS 或 CMOS 阵列构成, 用于光电转换和电荷存储。

2. CCD 成像步骤 (**Attention**):

- (1) MOS 金属栅电极施加时钟脉冲形成势阱;
- (2) 光注入释放信号电荷并存储;
- (3) 时钟脉冲变化使信号电荷定向转移;
- (4) 信号经放大和滤波后转换为数字信号;
- (5) 图像数据处理和存储。

3. 驱动脉冲与积分时间关系:

- CCD 输出信号受驱动频率和积分时间共同决定, 积分时间改变通过增加或减少驱动脉冲实现。

4. 投影成像测量法:

- 利用平行光照射被测物体, 投影在 CCD 传感面上, 通过计算 CCD 上产生的阴影宽度获得被测物体尺寸。

5. 角位置测量法:

- 通过光学换算将 CCD 的像素尺寸转换到反射镜的旋转角位置上, 实现小角度的静态和动态测量。

6. 模拟/数字信号转换及 USB 数据传输:

- ADC 模拟/数字转换过程包括取样、保存和量化两个步骤, USB 数据传输具有速度快、兼容性强等优点。

7.2 重要公式

1. 灰度线性变换:

$$f(x) = Af + B$$

其中 x 为灰度值, A 为斜率, B 为截距。

2. 灰度阈值变换:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x < T_{th} \\ 255 & \text{if } x \geq T_{th} \end{cases}$$

其中 T_{th} 为阈值。

3. 灰度窗口变换:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x < L \\ 255 & \text{if } x > U \\ x & \text{if } L \leq x \leq U \end{cases}$$

其中 L 为窗口下限, U 为窗口上限。

4. 灰度拉伸变换:

$$f(x) = \begin{cases} y_1(x - x_1) & \text{if } x_1 \leq x \leq x_2 \\ y_2(x - x_2) & \text{if } x_2 < x \leq x_3 \end{cases}$$

5. 灰度均衡变换:

$$A = \frac{255}{N} \sum_{i=0}^{255} \frac{n_i}{H \times W}$$

其中 A 为灰度均衡值, N 为像素总数, H 为图像高度, W 为图像宽度。

7.3 图表

对照讲义:

图 D8-2 线阵 CCD 器件芯片结构示意图

图 D8-4 TCD1208AP 工作时序图

图 D8-9 投影成像测量法结构图

图 D8-10 角位置测量原理示意图

图 D8-11 ADC 基本原理图

实验 8 He-Ne 激光原理与应用

8.1 重要实验原理

1. 激光谐振原理:

- 激光谐振腔由输出镜与全反镜构成, 工作物质为密封在玻璃管里的氦气、氖气, 激励系统为激光电源。

The three needed portions to setup a laser

2. 激光横模与纵模:

- 描述谐振腔内每个本征频率对应的光场分布, 横模描述横向分布状态, 纵模描述轴向光场分布状态。

3. 高斯光束特性:

- 高斯光束是亥姆赫兹方程在慢变振幅近似下的一个特解, 光束半径随坐标呈双曲函数变化。

4. 高斯光束的 q 参数描述:

- 使用复参数 q 简洁地描述高斯光束, q 参数与光束的等相位面曲率半径和光束半径相关。

5. 高斯光束通过光学系统的变换:

- 高斯光束通过光学系统后, 仍保持为高斯光束, 其复参数 q 满足 ABCD 矩阵定律。

8.2 重要公式

1. 激光器中单模激光器的输出功率:

$$P = \frac{A \cdot G(z, T)}{1 + \frac{G(z, T)}{\alpha}}$$

其中, P 是输出功率, A 是光束的有效横截面积, $G(z, T)$ 是增益系数, α 是总损耗系数。

2. 高斯光束的光束半径:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}$$

其中, $w(z)$ 是光束半径, w_0 是光腰半径, z 是光束传播距离, z_R 是瑞利长度。

3. 高斯光束的远场发散角:

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0}$$

其中, θ 是远场发散角, λ 是激光波长, w_0 是光腰半径。

4. 高斯光束的 q 参数:

$$q(z) = \frac{z}{R(z)} + iw_0$$

其中, $q(z)$ 是复参数 q , z 是光束传播距离, $R(z)$ 是等相位面曲率半径, w_0 是光腰半径。

5. 高斯光束通过光学系统的变换:

$$q_{out} = \frac{q_{in}}{M}$$

其中, q_{in} 和 q_{out} 分别是入射和出射高斯光束的 q 参数, M 是光学系统的变换矩阵。

8.3 图表

我只记得激光很难调，下面放一些好看的图吧：

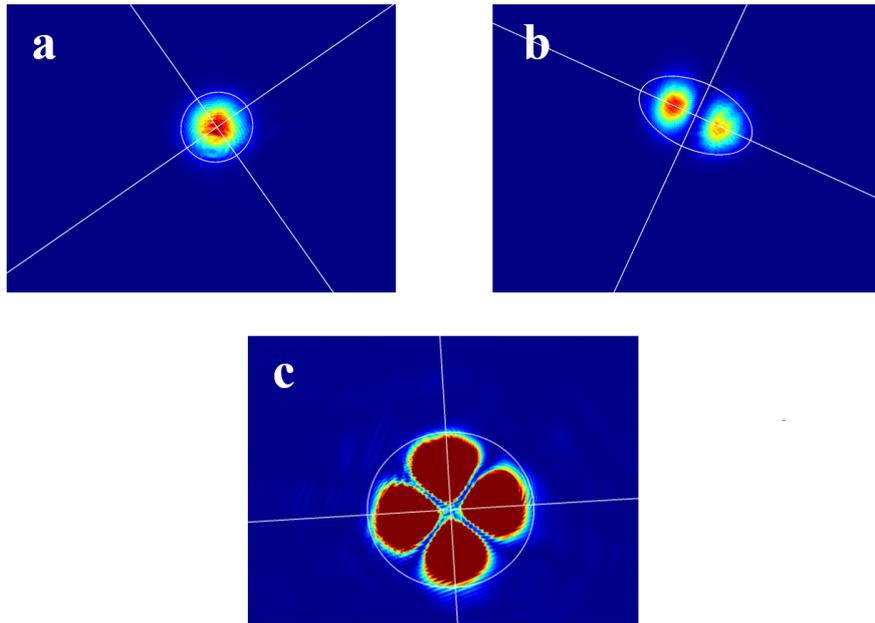


图 8: 同模式下的氦氖光斑