

双光子 HOM 干涉实验 · 预习报告

唐延宇* PB22030853

2025 年 5 月 3 日

1 实验目的

1. 通过实验熟悉产生 HOM 干涉的基本条件, 包括光子全同性、时间同步性及偏振匹配性。
2. 理解自发参量下转换 (SPDC) 的物理机制, 分析光子产生率与泵浦功率、晶体非线性系数等参数的依赖关系, 探究符合信噪比的影响因素。
3. 掌握 HOM 干涉曲线的测量方法, 学习干涉可见度计算、光子带宽估算及实验误差分析方法。

2 实验仪器

- 关联双光子源 (405 nm 单纵模激光器与 II 型 PPKTP 晶体)
- 单光子探测器 (APD1 和 APD2)
- 符合计数器 (时间窗口约 1 ns)
- 光功率计 (监测泵浦光功率)
- 光学元件: 偏振分束器 (PBS)、四分之一波片 (QWP)、半波片 (HWP)、平移台、带通滤波器 (BPF)

3 实验原理

3.1 HOM 干涉基本原理

当两全同单光子同时入射至 50:50 分束器时, 量子干涉导致光子聚束效应, 其输出态可表示为:

$$|F\rangle_{\text{out}} = (R - T)|1, 1\rangle + i\sqrt{2RT}(|2, 0\rangle + |0, 2\rangle)$$

当 $R = T = 1/2$ 时, $|1, 1\rangle$ 项消失, 符合计数率出现低谷。实验通过平移台调节两光子到达分束器的相对延迟 Δt , 观测符合计数率 N_{cc} 随 Δt 的变化曲线, 其半高宽与光子带宽 $\Delta\omega$ 满足:

$$N_{cc} \propto 1 - e^{-(\Delta\omega\Delta t)^2}$$

*近代物理系, 19942431972, yanyutang@mail.ustc.edu.cn

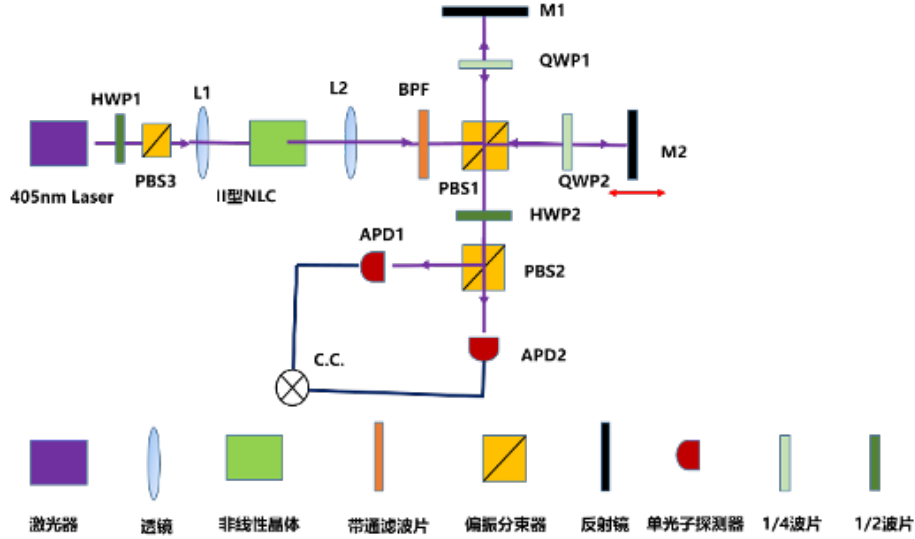


图 1: 实验光路图

3.2 自发参量下转换

泵浦光在非线性晶体中通过二阶非线性过程产生纠缠光子对，哈密顿量为：

$$\hat{H} = \hbar\xi(\hat{a}_s^\dagger\hat{a}_i^\dagger + \text{h.c.})$$

光子产生概率与泵浦功率 P_p 成正比：

$$P_{si} \propto \frac{\chi^{(2)2} P_p L^2}{\Delta k^2 + (\alpha/2)^2}$$

其中 $\chi^{(2)}$ 为非线性系数, L 为晶体长度, Δk 为相位失配量。

3.3 符合信噪比

符合计数信噪比 (CAR) 定义为：

$$\text{CAR} = \frac{R_{cc} + R_{acc}}{R_{acc}} = \frac{m_c a_s a_i}{[(m_c + m_{sn})a_s + d_s][(m_c + m_{in}a_i + d_i)]} + 1$$

其中 m_c 为平均每脉冲光子对的概率, $a_{s,i}$ 为收集探测效率, $d_{s,i}$ 为暗计数率。

4 实验步骤

4.1 单路计数与符合计数测量

1. 调节 QWP 光轴至 45° , 关闭干涉条件。
2. 改变泵浦功率 (0–50 mW), 记录 APD1、APD2 单路计数及符合计数。
3. 验证 $N_{\text{single}} \propto P_p$ 和 $N_{cc} \propto P_p^2$ 的线性关系。

4.2 符合信噪比测量

1. 在零延迟和远延迟 ($\Delta t \gg 1/\Delta\omega$) 下分别测量 R_{cc} 和 R_{acc} 。
2. 计算不同泵浦功率下的 CAR 值, 拟合验证 CAR 先升后降的趋势。

4.3 HOM 干涉曲线测量

1. 调节 HWP 至 22.5° , 开启干涉条件。
2. 移动平移台 (步长 $10\mu\text{m}$), 记录 N_{cc} 随 Δt 的变化。
3. 用高斯函数拟合曲线, 计算干涉可见度 $V = \frac{N_{\max} - N_{\min}}{N_{\max}}$ 和光子带宽 $\Delta\omega$ 。

5 注意事项

- 半导体激光器需避免电流突变, 防止静电击穿。
- 405 nm 蓝光需严格避免直射人眼, 实验时佩戴防护眼镜。
- 光学元件表面镀膜易污染, 操作时需佩戴无尘手套。

6 领域前沿调研

近年来, HOM 干涉技术在多光子态制备和量子网络中取得新进展:

- **量子隐形传态:** 2022 年, Pan 组利用四光子 HOM 干涉实现了 1,200 km 自由空间量子态传输 (Nature 606, 862)。
- **集成光学:** 基于硅基波导的芯片级 SPDC 源 (Optica 9, 501) 显著提高了双光子产生效率与稳定性。
- **带宽压缩:** 使用啁啾晶体可将光子带宽压缩至 10 GHz 以下 (PRL 128, 133601), 提升 HOM 干涉可见度至 99.7%。

双光子 HOM 干涉实验

唐延宇* PB22030853

2025 年 5 月 18 日

摘要

本实验旨在通过搭建和调试 Hong-Ou-Mandel (HOM) 干涉光路, 观测双光子干涉现象。实验中使用自发参量下转换 (SPDC) 过程产生纠缠或非纠缠的光子对作为 HOM 干涉的光源。通过改变两光子到达分束器的光程差, 观察符合计数的变化, 验证 HOM 聚束效应。实验还探讨了光子不可区分性、辐射带宽等特性, 并掌握了利用 HOM 干涉效应表征光子特性及测量材料参数的方法。

关键词: Hong-Ou-Mandel (HOM) 干涉; 双光子干涉; 自发参量下转换 (SPDC)

1 实验目的

1. 理解 Hong-Ou-Mandel (HOM) 干涉效应的基本原理。
2. 学习搭建和调试 HOM 干涉光路, 观测双光子干涉现象。
3. 掌握利用 HOM 干涉效应表征光子特性 (如不可区分性、辐射带宽) 及测量材料参数 (如厚度) 的基本方法。
4. 熟悉单光子探测器和符合计数系统的工作原理和使用方法。

2 实验原理

Hong-Ou-Mandel (HOM) 干涉是量子光学中的一个基本现象, 它展示了两个完全不可区分的光子在 50:50 分束器 (Beam Splitter, BS) 上发生干涉时的独特行为。

考虑两个完全相同的单光子, 分别从 50:50 分束器的两个输入端口 a 和 b 入射。假设光子 1 经由路径 a 入射, 光子 2 经由路径 b 入射, 其初始量子态可以表示为 $|1_a, 1_b\rangle$ 。分束器的作用可以用幺正变换来描述。对于输入端口的产生湮灭算符 $\hat{a}_{in,a}^\dagger, \hat{a}_{in,b}^\dagger$ 和输出端口的产生湮灭算符 $\hat{a}_{out,c}^\dagger, \hat{a}_{out,d}^\dagger$, 它们之间的关系为 (忽略相位因子):

$$\begin{aligned}\hat{a}_{out,c}^\dagger &= \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{a}_{in,a}^\dagger + \hat{a}_{in,b}^\dagger) \\ \hat{a}_{out,d}^\dagger &= \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{a}_{in,a}^\dagger - \hat{a}_{in,b}^\dagger)\end{aligned}$$

或者, 对于一个对称的无损耗分束器:

$$\begin{aligned}\hat{a}_{in,a}^\dagger &\rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{a}_{out,c}^\dagger + i\hat{a}_{out,d}^\dagger) \\ \hat{a}_{in,b}^\dagger &\rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(i\hat{a}_{out,c}^\dagger + \hat{a}_{out,d}^\dagger)\end{aligned}$$

*近代物理系, 19942431972, yanyutang@mail.ustc.edu.cn

这里采用第二种常用的表达(反射引入 $\pi/2$ 相移, 透射无相移)。

初始态为 $\hat{a}_{in,a}^\dagger \hat{a}_{in,b}^\dagger |0\rangle_{vac}$ 。经过分束器后, 输出态变为:

$$\begin{aligned} |\Psi_{out}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{a}_{out,c}^\dagger + i\hat{a}_{out,d}^\dagger) \frac{1}{\sqrt{2}}(i\hat{a}_{out,c}^\dagger + \hat{a}_{out,d}^\dagger) |0\rangle_{vac} \\ &= \frac{1}{2}[i(\hat{a}_{out,c}^\dagger)^2 + \hat{a}_{out,c}^\dagger \hat{a}_{out,d}^\dagger + i^2 \hat{a}_{out,d}^\dagger \hat{a}_{out,c}^\dagger + i(\hat{a}_{out,d}^\dagger)^2] |0\rangle_{vac} \\ &= \frac{1}{2}[i(\hat{a}_{out,c}^\dagger)^2 + \hat{a}_{out,c}^\dagger \hat{a}_{out,d}^\dagger - \hat{a}_{out,d}^\dagger \hat{a}_{out,c}^\dagger + i(\hat{a}_{out,d}^\dagger)^2] |0\rangle_{vac} \end{aligned}$$

由于光子是玻色子, 它们的产生算符满足对易关系 $[\hat{a}_j^\dagger, \hat{a}_k^\dagger] = 0$, 因此 $\hat{a}_{out,c}^\dagger \hat{a}_{out,d}^\dagger = \hat{a}_{out,d}^\dagger \hat{a}_{out,c}^\dagger$ 。所以:

$$\begin{aligned} |\Psi_{out}\rangle &= \frac{i}{2}[(\hat{a}_{out,c}^\dagger)^2 + (\hat{a}_{out,d}^\dagger)^2] |0\rangle_{vac} \\ &= \frac{i}{\sqrt{2}} \left(\frac{(\hat{a}_{out,c}^\dagger)^2}{\sqrt{2!}} + \frac{(\hat{a}_{out,d}^\dagger)^2}{\sqrt{2!}} \right) |0\rangle_{vac} \\ &= \frac{i}{\sqrt{2}}(|2_c, 0_d\rangle + |0_c, 2_d\rangle) \end{aligned}$$

这个结果表明, 两个不可区分的光子在 50:50 分束器上干涉后, 总是在同一个输出端口出现(即两个光子要么都从端口 c 输出, 要么都从端口 d 输出)。在两个输出端口各检测到一个光子的概率为零。这就是所谓的 HOM 聚束效应。

实验上, 通过改变两光子到达分束器的光程差(或时间延迟 Δt), 可以观察到符合计数的变化。当光程差为零($\Delta t = 0$)时, 两光子完全不可区分, 符合计数率降到最低, 形成一个“HOM 凹陷”(HOM dip)。凹陷的宽度与光子的相干时间(或光谱带宽的倒数)相关。凹陷的可见度(visibility)则反映了光子的不可区分程度。

本实验通常采用自发参量下转换 (Spontaneous Parametric Down-Conversion, SPDC) 过程产生纠缠或非纠缠的光子对作为 HOM 干涉的光源。

3 实验仪器与装置

3.1 实验仪器

1. 关联双光子源: 通常包括泵浦激光器、非线性晶体(如 PPKTP)、聚焦和准直透镜。
2. 单光子探测器: 如雪崩光电二极管 (APD) 或超导纳米线单光子探测器 (SNSPD)。
3. 符合计数器: 用于记录来自两个探测器的信号, 并识别在特定时间窗口内同时到达的事件。
4. 光功率计: 测量泵浦光功率。
5. 光学与机械元件:
 - 波片: 半波片 (HWP)、四分之一波片 (QWP)。
 - 分束器: 偏振分束器 (PBS)、50:50 非偏振分束器。
 - 反射镜 (M)。
 - 一维精密平移台: 用于精确控制光程差。
 - 带通滤波器 (BPF): 选择所需波长的光子。
 - 光纤耦合器和单模光纤。

3.2 实验装置

本实验采用改进的光路结构(如图1所示)。

- 405 nm 单纵模激光器作为泵浦源,通过透镜 L1 聚焦到一块 II 型周期性极化磷酸氧钛钾 (PP-KTP)非线性晶体(NLC)上。
- SPDC 产生的正交偏振光子对(信号光子和闲频光子)通过透镜 L2 准直。
- 光子对通过一个带通滤波器(BPF)以滤除泵浦光和背景荧光。
- 滤波后的光子对进入一个偏振迈克尔逊干涉仪。该干涉仪由一个偏振分束器(PBS1)、两个四分之一波片(QWP1 和 QWP2)和两个反射镜(M1 和 M2)组成。
- 反射镜 M2 安装在一维精密平移台上,用于精确控制两路光子到达第二个偏振分束器 PBS2 的相对延迟。
- 在 PBS2 之前放置一个半波片(HWP),用于将两路正交偏振的光子旋转到相同的偏振方向(通常是 45 度或 135 度相对于 PBS2 的透射轴),以实现 HOM 干涉,或保持其正交偏振以进行对照测量。
- PBS2 的两个输出端口的光子分别通过单模光纤收集,并由单光子探测器 APD1 和 APD2 进行探测。
- APD 的输出信号连接到符合计数器进行单路计数和符合计数测量。

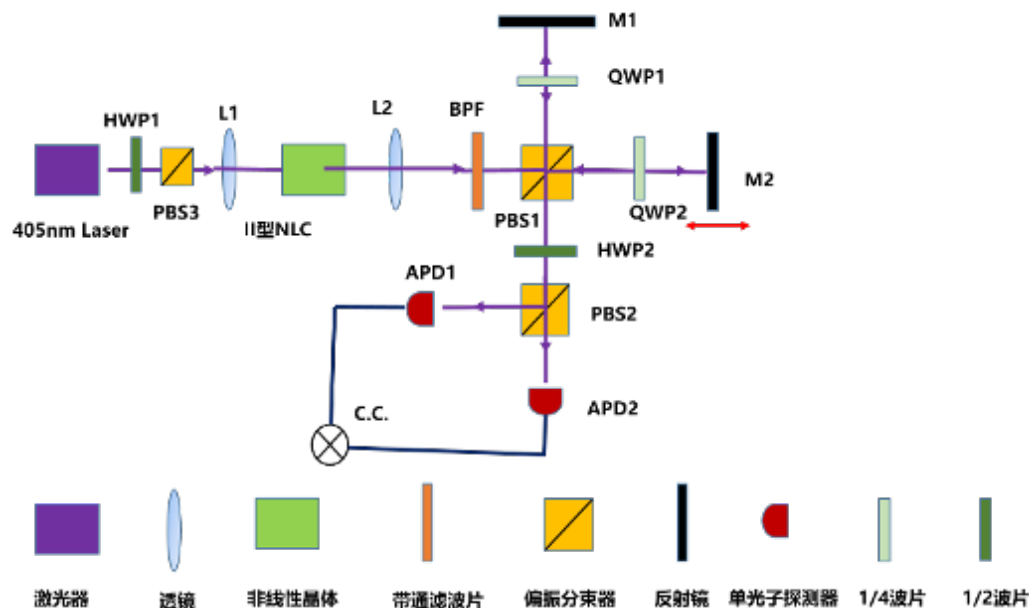


图 1: 实验光路图 (示意图)

4 实验步骤和内容

4.1 光子单路计数和符合计数与泵浦功率的关系实验

1. 系统校准:确保光路对准,光子耦合效率最优化。

2. 设置无干涉状态: 将偏振迈克尔逊干涉仪中的两个四分之一波片 (QWP1, QWP2) 的光轴旋转到 0° 或 90° , 使得从 M1 和 M2 返回的光在 PBS1 处仍保持其原有偏振, 并分别从 PBS1 的不同端口出射 (或通过适当调整使两臂光在 PBS1 后分开路径)。调整 PBS2 前的半波片 HWP2, 使其光轴与其中一个输入光子的偏振方向重合 (例如, 垂直偏振), 确保两路到达 PBS2 的光子偏振正交。在这种情况下, 两路光子不会发生 HOM 干涉, 可以直接测量各自的单路计数和它们之间的偶然符合计数。
3. 功率调谐与数据记录: 逐渐改变 405 nm 激光器的泵浦功率 (可通过激光器控制旋钮或外置可调衰减器实现), 使用光功率计记录泵浦功率值。
4. 对于每个功率点, 同时记录单光子探测器 APD1 和 APD2 的单路计数率, 以及它们之间的符合计数率。
5. 数据分析: 绘制单路计数率 (N_1, N_2) 和符合计数率 (N_c) 分别随泵浦功率变化的曲线。根据理论, 这些关系应近似为线性。对数据进行线性拟合, 验证理论预期。

4.2 符合信噪比 (CAR) 与泵浦功率的关系实验

1. 泵浦功率扫描: 与上一步类似, 改变泵浦功率。
2. 有效符合与暗符合测量: 对于每个功率点:
 - 将平移台 M2 移动到 HOM 偶极中心 (即符合计数最低点), 记录此时的符合计数。这可以作为评估干涉质量的参考, 但对于 CAR 测量, 我们通常需要 HOM 干涉条件下的峰值符合 (当光子可区分时, 如偏振正交或时间延迟很大) 或远离偶极的符合。
 - 或者, 确保两光子可区分 (例如, 通过 HWP2 使偏振正交, 或将 M2 移动到远离零延迟的位置), 测量此时的符合计数率 R_{signal} (即文本中的“有效符合”)。
 - 为测量暗符合或偶然符合率 $R_{\text{accidental}}$, 将平移台 M2 移动到 HOM 偶极之外很远的位置 (即两光子到达 PBS2 的时间差远大于其相干时间), 记录此时的符合计数率。或者, 在一些系统中, 暗符合可以通过关闭泵浦光或遮挡一路光子来估算, 然后计算偶然符合。
3. CAR 计算: 根据公式??或类似的定义 (例如, 使用 R_{signal} 和 $R_{\text{accidental}}$) 计算 CAR 值。
4. 数据分析: 绘制 CAR 值随泵浦功率 (或光子产生率 μ) 变化的曲线。观察 CAR 值先增加后减小的趋势。

4.3 HOM 干涉曲线测量

1. 设置干涉条件: 将偏振迈克尔逊干涉仪中的 QWP1 和 QWP2 的光轴均调整到相对于相应光路偏振方向的 45° , 这样从 M1 和 M2 返回的光在 PBS1 处均变为正交偏振并重新组合。将 PBS2 前的半波片 HWP2 的光轴旋转到 22.5° (假设输入到 HWP2 的两束光偏振分别为水平 H 和垂直 V, 且 PBS2 的透射轴为 H), 使得两路光子在 PBS2 上的偏振都变为对角线偏振 (例如, 都变为 45° 或 -45°), 从而在偏振维度上变得不可区分。
2. 寻找 HOM 偶极粗扫: 手动或低速自动移动平移台 M2, 观察符合计数的变化, 大致找到符合计数显著降低的区域 (HOM 偶极中心)。
3. 精细扫描与数据采集: 在 HOM 偶极中心附近, 以较小的步长 (例如, 几个微米) 精确移动平移台 M2。在每个位置停留一段时间 (例如几秒到几十秒, 以获得足够的统计数据), 记录对应的符合计数。记录平移台位置和符合计数值。

5 实验结果与数据处理

对实验中测得的双光子 HOM 干涉数据拟合得到的干涉曲线, 以及偶然计数率、符合光子计数率及符合信噪比随泵浦功率变化的曲线如图 2,3 所示。拟合参数均已在图中标出。

6 实验分析 (思考题)

6.1 观测 HOM 干涉需要满足哪些条件?

观测到清晰的 HOM 干涉效应, 需要满足以下核心条件:

1. 光子的不可区分性: 这是最关键的条件。两个参与干涉的光子必须在所有物理自由度上都不可区分, 包括:
 - 频率/波长相同: 光子的中心频率和频谱形状应尽可能一致。
 - 偏振相同: 两光子到达分束器时的偏振态必须相同。如果偏振不正交, 干涉可见度会下降。
 - 空间模式相同: 两光子在分束器输入端口的空间模式 (如横向模式、波前等) 应相同。
 - 时间上重合: 两光子必须在分束器上实现时间上的完美重叠。这是通过调节光学延迟线来实现的。光程差必须小于光子的相干长度。
2. 50:50 分束器: 分束器对于入射光子的反射率和透射率都应为 50%。如果分束比偏离 50:50, 干涉可见度会降低, 但不会完全消失。
3. 单光子态输入: 虽然 HOM 干涉最初是用光子对描述的, 但其本质是双光子干涉。输入到分束器两个端口的应是单光子态 (或弱相干态近似的单光子)。
4. 稳定的光路: 光路需要有良好的机械稳定性, 以避免光程差的抖动, 尤其是在扫描延迟线时。环境温度变化、气流扰动等都可能影响光程。
5. 有效的探测与符合计数: 需要高效的单光子探测器和精确的符合计数系统来分辨和记录光子对事件。符合门宽需要小于光子对之间的时间间隔, 但大于探测器的时间抖动和光子本身的持续时间。

6.2 自发参量下转换过程中, 光子的产生率依赖于哪些参数? 其辐射带宽与什么有关?

光子产生率依赖参数: SPDC 过程中光子对的产生率 (通常指单位时间内产生的符合光子对数目) 主要依赖于:

1. 泵浦光功率: 在未饱和的情况下, SPDC 产生的光子对数率与泵浦光功率近似成正比。
2. 非线性晶体的有效非线性系数 (d_{eff}): 非线性系数越大, 转换效率越高, 产生率越高。这与晶体材料、切割方向以及相位匹配类型有关。
3. 晶体长度 (L): 在理想相位匹配下, 产生率通常与晶体长度的平方 (L^2) 成正比。但过长的晶体会导致相位失配效应更显著, 限制带宽。
4. 相位匹配条件: 这是 SPDC 过程发生的关键。动量守恒 ($\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i$) 和能量守恒 ($\omega_p = \omega_s + \omega_i$) 必须满足。相位匹配的质量直接影响转换效率。通常通过调节晶体温度或角度来实现。

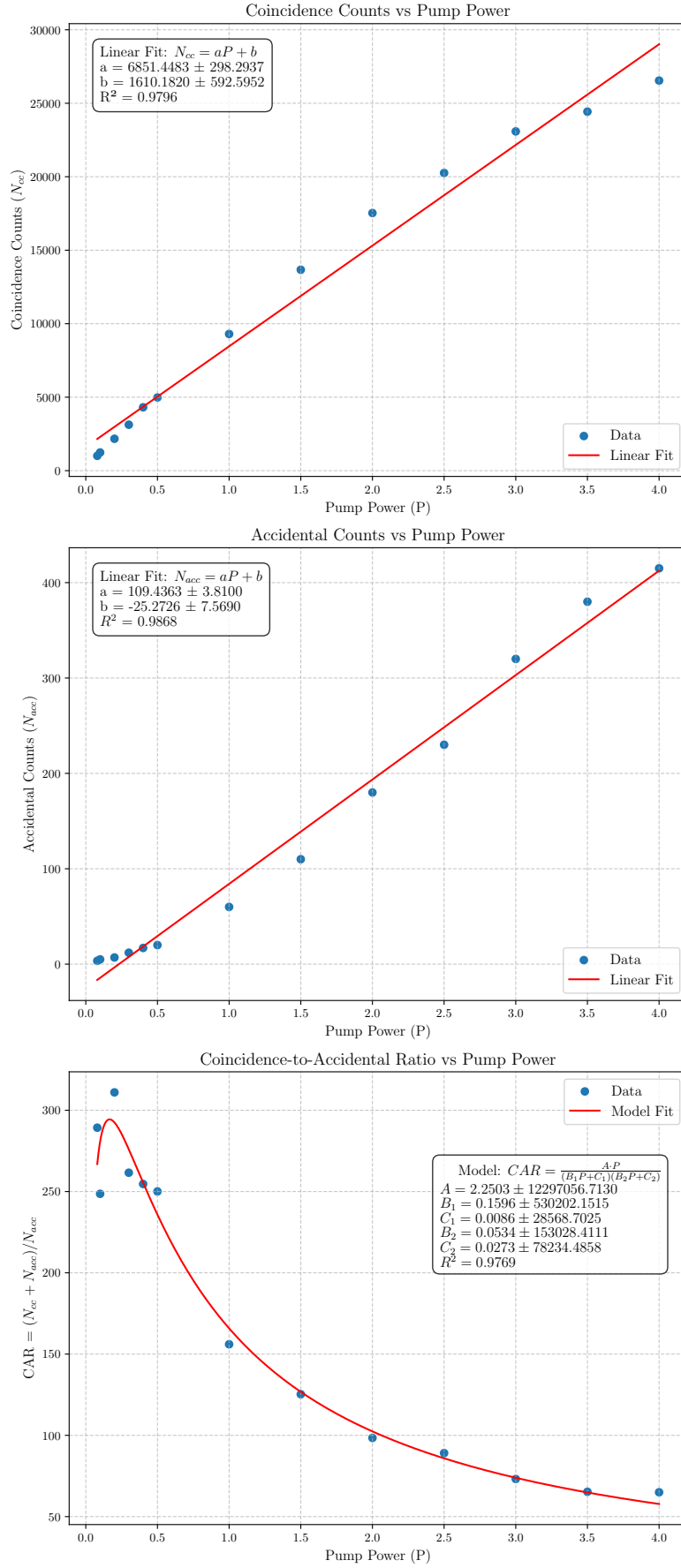


图 2: 偶然计数、符合计数以及符合信噪比随泵浦源功率变化曲线

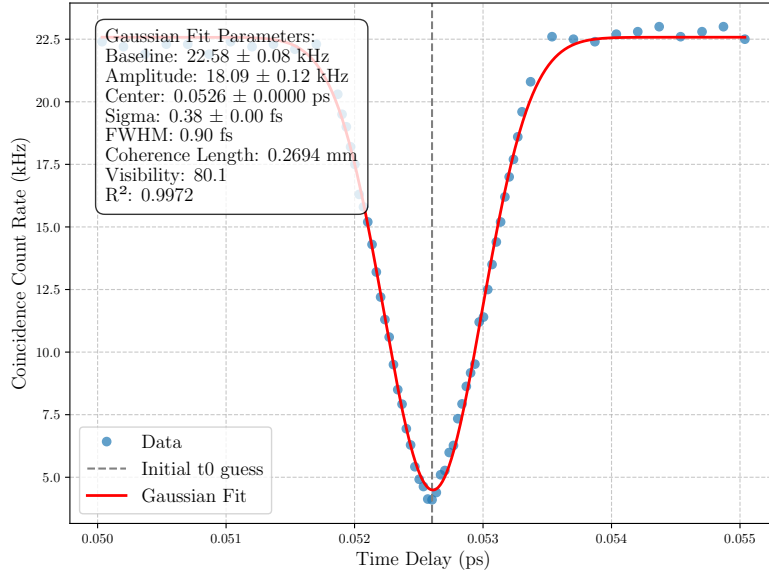


图 3: HOM 干涉曲线拟合结果

5. 泵浦光的聚焦情况：泵浦光在晶体内的光斑大小和聚焦参数会影响相互作用体积和光强，从而影响产生率。过度聚焦可能导致走离效应或损伤晶体。
6. 光子收集效率：包括 SPDC 出射光子的收集光学系统效率、滤光片透过率、光纤耦合效率（如果使用）等。
7. 模式交叠：泵浦光模式与产生的信号光、闲频光模式之间的交叠程度。

辐射带宽相关因素：SPDC 产生的光子的辐射带宽（或光谱宽度）主要与以下因素有关：

1. 相位匹配带宽：这是最主要的因素。相位匹配条件 $\Delta k = k_p - k_s - k_i = 0$ （共线情况）。光子频率的微小偏离会导致相位失配 $\Delta k \neq 0$ 。允许的相位失配范围（通常定义为 $\Delta k L \approx \pm \pi$ ）决定了下转换光的光谱带宽。
 - 晶体长度 (L)：带宽通常与晶体长度成反比。晶体越短，允许的 Δk 范围越大，因此相位匹配带宽越宽，产生的 SPDC 光子带宽也越宽。
 - 群速度失配 (Group Velocity Mismatch, GVM)：泵浦光、信号光和闲频光在晶体中不同的群速度会导致它们在传播过程中逐渐分离，这限制了有效相互作用长度，并影响光谱特性。特别是在超短脉冲泵浦 SPDC 中，GVM 对光子带宽和时间特性有显著影响。
 - 晶体色散特性：晶体的折射率随波长变化，直接影响相位匹配条件随频率的依赖关系，从而决定带宽。
2. 泵浦光带宽：如果泵浦光本身具有一定的带宽，这也会传递到产生的 SPDC 光子上。对于窄带泵浦，主要由相位匹配带宽决定；对于宽带泵浦，SPDC 光子带宽会更复杂，可能受到泵浦带宽的影响。
3. 晶体温度和角度的均匀性：晶体内部的温度或角度不均匀会导致不同部分的相位匹配条件略有差异，从而展宽整体的输出光谱。
4. 收集孔径：对于非共线 SPDC，收集不同出射角度的光子也会收集到不同频率的光子，从而影响观测到的带宽。

6.3 符合与暗符合信噪比与哪些因素有关？

符合信噪比 (*Signal-to-Noise Ratio, SNR*) 主要与以下因素有关：信噪比通常定义为真实符合计数率与噪声 (主要是偶然符合计数率) 的比值, 或者真实符合数与噪声计数的统计起伏的比值。

信号是真实符合计数率 (R_{true}), 主要由 SPDC 光子对产生率、光路传输效率、探测器效率和符合门宽内的符合概率决定。噪声主要来源于偶然符合计数率 (R_{acc}) 和探测器的暗计数引起的符合 (R_{dark_coinc})。 $R_{acc} = N_1 N_2 \tau_{coin}$, 其中 N_1, N_2 分别是两个探测器的单光子计数率, τ_{coin} 是符合计数器的时间窗口。 $N_1 = S_1 + D_1$, $N_2 = S_2 + D_2$, 其中 S_1, S_2 是来自光源的单光子计数率, D_1, D_2 是探测器的暗计数率。则 $R_{acc} \approx (S_1 + D_1)(S_2 + D_2)\tau_{coin}$ 。

因此, 提高符合信噪比的因素包括:

1. 提高真实符合计数率 (R_{true}):
 - 增加 SPDC 源的亮度 (但要注意过高的单光子率会增加偶然符合)。
 - 优化光路的收集效率和传输效率。
 - 使用高量子效率的探测器。
2. 降低偶然符合计数率 (R_{acc}):
 - 减小符合时间窗口 (τ_{coin}): 这是最有效的方法之一。窗口应尽可能小, 但要大于探测器的时间抖动和光子波包的到达时间差。
 - 降低单光子计数率中无关光子的比例: 通过好的滤波 (滤除泵浦光、环境光) 和空间滤波 (只收集目标模式的光子) 来降低 S_1, S_2 中由背景噪声引起的成分。
 - 使用时间相关的光子对: SPDC 产生的光子对是时间相关的, 而背景光子是随机的。这使得可以通过窄符合窗口有效区分。
3. 降低探测器暗计数 (D_1, D_2):
 - 选择低暗计数的探测器。
 - 对探测器进行冷却 (如对雪崩光电二极管)。
4. 优化光子对的产生与探测的配对效率 (*Klyshko efficiency*): 高的配对效率意味着探测到的一个光子, 其孪生光子也被探测到的概率很高, 这有助于提高真实符合相对于单光子计数率的比例。

暗符合 (*Dark Coincidence*): 暗符合是指在没有光源输入或光源被完全遮挡的情况下, 由于探测器本身的暗计数在符合窗口内随机发生重合而产生的符合计数。暗符合计数率 $R_{dark_coinc} = D_1 D_2 \tau_{coin}$ 。其信噪比的概念不常直接讨论, 因为这本身就是一种噪声。我们通常关心的是信号 (真实符合) 与包括了暗符合在内的总噪声的比例。如果实验中暗计数是主要的单光子计数来源 (例如光源极弱或被遮挡), 那么暗符合计数就会成为偶然符合的主要组成部分。降低暗符合率的关键是使用低暗计数的探测器 ($D_1, D_2 \downarrow$) 和尽可能窄的符合窗口 ($\tau_{coin} \downarrow$)。

6.4 如何通过 HOM 干涉来表征光子的辐射带宽？如何通过 HOM 干涉测量一个已知折射率的透明材料的厚度？

通过 HOM 干涉表征光子辐射带宽: HOM 干涉凹陷的形状和宽度与参与干涉的两个光子的时间特性 (相干时间) 直接相关, 而光子的相干时间与其辐射带宽成反比。

1. 原理: 当两光子在分束器上的时间延迟 Δt 改变时, 它们之间的不可区分性也随之改变。HOM 凹陷的宽度 (例如半高全宽, FWHM) $\Delta\tau_{dip}$ 大致对应于单个光子波包的相干时间 τ_c (或更准确地说, 是两个光子波包互相关的宽度)。

2. 测量方法：

- 精密扫描光学延迟线，记录不同延迟位置对应的符合计数值，得到 HOM 干涉曲线。
- 对 HOM 凹陷进行拟合，得到其 FWHM $\Delta\tau_{dip}$ 。这个时间宽度是从延迟线的位移除以光速得到的 ($\Delta\tau_{dip} = \Delta L/c$ ，如果延迟线移动距离是 Δx ，则光程差变化 $\Delta L = 2\Delta x$ 对于反射式延迟线)。
- 光子的辐射带宽 $\Delta\nu$ (频率带宽) 或 $\Delta\lambda$ (波长带宽) 与相干时间的关系近似为： $\Delta\nu \approx 1/\Delta\tau_{dip}$ (对于高斯型波包，因子可能略有不同，如 $2\ln(2)/\pi$ 或取决于具体的定义)。更准确地说，HOM 凹陷的傅里叶变换与光子功率谱的卷积相关。如果假设光子具有高斯谱，则凹陷形状也为高斯型，其宽度与光谱宽度成反比。对于波长带宽： $\Delta\lambda = \lambda_0^2 \Delta\nu/c$ ，其中 λ_0 是中心波长。

3. 条件：为准确测量，要求两光子的光谱形状基本一致。如果两光子光谱差异较大，HOM 凹陷形状会变得不对称，且可见度下降。

通过 HOM 干涉测量一个已知折射率的透明材料的厚度：HOM 干涉对光程差的变化非常敏感，因此可以用来精密测量微小的光程变化，进而推算材料厚度。

1. 原理：

- 首先，在没有待测样品的情况下，扫描延迟线，找到 HOM 凹陷的中心位置，记为 x_0 。此时两臂光程相等。
- 然后，在 HOM 干涉仪的一个臂中（在分束器之前）垂直插入待测的透明材料（厚度为 d ，折射率为 $n(\lambda)$ ）。
- 材料的插入会引入额外的光程 $n(\lambda)d$ ，替代了原本空气中的光程 $n_{air}(\lambda)d \approx d$ 。因此，光程差的改变为 $\Delta L_{mat} = (n(\lambda) - 1)d$ 。对于脉冲光子，更准确的是考虑群折射率 n_g 引入的群延迟 $\Delta\tau_g = (n_g - 1)d/c$ 。
- 为了重新恢复两臂光程（群延迟）相等以找到 HOM 凹陷的中心，需要移动光学延迟线来补偿这个由样品引入的光程差。设延迟线移动的物理距离为 Δx_{stage} 。对于反射式延迟线，光程变化为 $2\Delta x_{stage}$ 。
- 新的 HOM 凹陷中心位置将出现在 $x_1 = x_0 + \Delta x_{stage}$ 。
- 则有 $2\Delta x_{stage} = (n_g - 1)d$ 。

2. 测量方法：

- 无样品时，测得 HOM 凹陷中心位置 x_0 。
- 将已知折射率（特别是群折射率 n_g 在光子中心波长处的值）的透明样品插入其中一臂。
- 再次扫描延迟线，找到新的 HOM 凹陷中心位置 x_1 。
- 计算延迟线的位移 $\Delta x_{stage} = x_1 - x_0$ 。
- 材料的厚度 d 可以通过以下公式计算： $d = \frac{2\Delta x_{stage}}{n_g - 1}$ 。

3. 注意事项：

- 需要精确知道材料在光子工作波长下的群折射率 n_g 。如果只知道相折射率 $n(\lambda)$ ，可以通过 $n_g(\lambda) = n(\lambda) - \lambda \frac{dn(\lambda)}{d\lambda}$ 计算。
- 材料的色散 (n_g 随波长变化) 可能会导致 HOM 凹陷展宽和形变，如果光子带宽较宽，这会影影响测量精度。

- 样品表面需要有良好的光学质量,以减少散射损耗和波前畸变。
- 样品应垂直入射,避免引入额外的光程余弦因子。

这种方法对于测量薄膜材料的厚度或微小光程变化非常灵敏。

参考文献

- [1] 中国科学技术大学物理实验教学中心. 双光子 HOM 干涉实验. 实验讲义. 2025.04.14.