装置设计

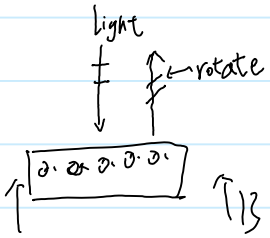
2021年12月22日 14:04

- 极化Kerr效应测量装置

  已知：

  - 磁畴~100μm(实际要百nm)
  - Kerr Effect

    反射光偏振转变1/1000



  方案：

  a. 放大装置
  - 光学显微镜~2k − 3k倍
  - 电子显微镜
    - 扫描电镜(表面反射)~1nm
    - 透射电镜~0.1~1nm
  - 激光扫描显微镜（精度 > 光学, 成像效果略差）
  - 扫描探针显微镜
    - 扫描隧道显微镜：0.1nm
    - 原子力显微镜：0.5nm
    - $SNOM$(光纤代替探针 + 光反射)：20nm

  b. 整体方案考量

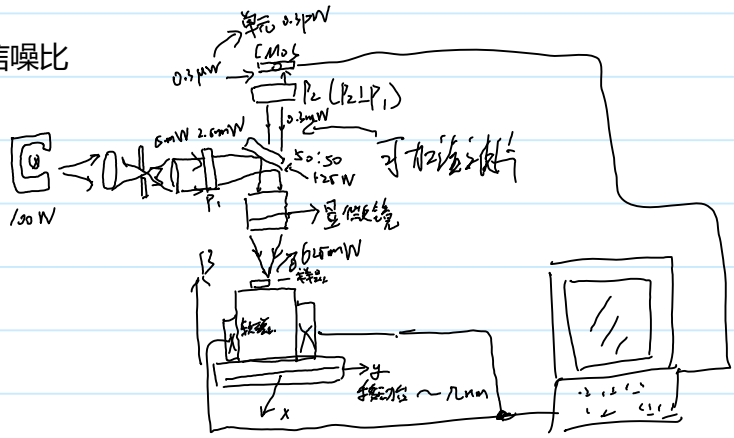
     i. 正确的信号检测系统：信噪比

     ii. 合理的动态范围

     iii. 原器件可行

     iv. 整机方案（价格，效率）

     v. 方便性



  c. 光学器件选择

     i. 成像 $\begin{cases} CCD \\ CMOS \end{cases}$

     ii. 放大倍数：物镜x目镜

     pixel10μm左右

     iii. 光源（氙灯）：衍射极限~560nm光源~250nm分辨率⇒ 倍数 $= \frac{10\mu\text{m}}{250\text{nm}} = 40$倍

     物x目=16x3= 48倍

     iv. 到CMOS单元上的功率≈ $0.3pW = 5 \times 10^5$光子$/s \cdot$ Pixel

     对42%量子效率的CMOS

     $\eta \cdot$光子数 $= 42\% \times 5 \times 10^5 \approx 2 \times 10^5$光子

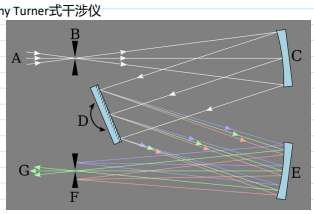
     暗计数: $4/s \cdot Pixel$

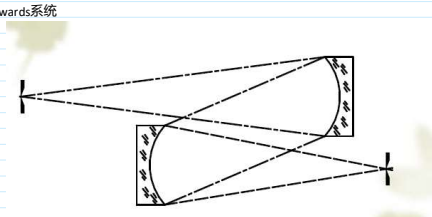
     最大计数率：$10^7/s$

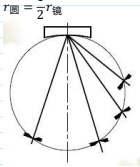
     动态范围：$\sqrt{4} = 2$~10^7个每秒每pixel

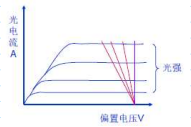
考试特别Paper

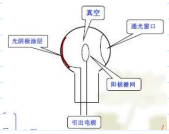
2021年12月21日 14:32

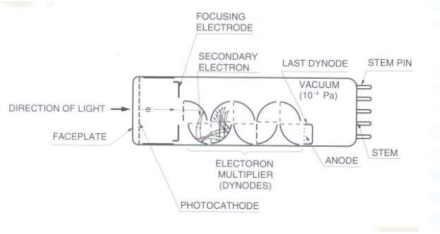
- 第零章
  - 光的能量与分类
    - 光的波段 (Å)
      - 紫外: 真空10-2000；远：2k-3k; 近3k-4k
      - 可见光：4k-7.6k
      - 红外光：7.6k-10^7
      - 无线电波：$6\times10^6-10^{15}$；太赫兹:$200-300\mu m$
  - SiO_2的吸收谱窗口：
    - 由于氧吸收在180nm,故玻璃透镜(SiO_2)没有用于200nm附近的。（可以考虑MgF_2，业界最优，130nm吸收峰。）
  - 色散的种类
    - 纵向色散（传播速度对波长的依赖不同导致不同波长到达终点时间上有差异）
      限制光通讯的传输速率。
    - 偏振色散（传播速度对偏振方向的依赖不同导致...）
      限制光通讯的传输速率
    - 横向色散（折射率对波长依赖不同导致界面处不同波长光分离；衍射和干涉导致不同波长光传播方向上的差异）
      最方便用来实现光单色化应用
  - 色散棱镜
    - 分辨率：$R=\frac{\lambda}{d\lambda}=t\frac{dn}{d\lambda}=(t_1-t_2)\frac{dn}{d\lambda}$
      决定因素：底边宽度与玻璃色散
    - 优点：
      - 效率高
      - 无二级谱
      - 易与传统数据比较
      - 无光谱鬼线（假信号）
    - 缺点
      - 受材料限制波段窄
      - 色散率低分辨率低
      - 色散非线性
      - 结构不方便
  - 光栅光谱仪
    - 光栅常数：$n=\frac{1}{d}$刻痕密度，周期d
    - 光栅方程：$d(\sin\phi+\sin\theta)=\pm k\lambda, k=0,1,2\ldots$
    - 最大谱级次：$|\sin\theta+\sin\phi|\le 2\Rightarrow k_{max}\le\frac{2d}{\lambda}$
    - 闪耀光栅：
      - 闪耀角：α
      - 闪耀波长：$\lambda_B=2d\sin\alpha$
    - 透射光栅特点
      - 零级强，一级弱，效率低
      - 两边对称，但只用一边，效率更低
      - 透射准直，材料决定光谱范围。
      - 透射材料直接影响谱仪性能。
    - 反射光栅特点
      - 光谱色散近似线性
      - 刻画则存在鬼线
    - 高阶谱: $k\lambda_1=(k+1)\lambda_2$
      因此有二级谱，$\lambda_2=\frac{1}{2}\lambda_1$
    - 分辨率：$R=kN$
    - 理想狭缝宽度：$a=\frac{\lambda}{D}f$
      D:系统的有效光阑(光栅宽度)；f：后准直焦距
    - 注意点
      - 刻画光栅比全息光栅的劣势为前者更容易出现鬼线
      - 光栅常用平面面形，紫外红外可能用凹面。
    - Czerny Turner式干涉仪
      - 

      - 最常用，最简单
      - 优点：光线近正入射，简单方便，光谱广，分辨率高，消慧差
      - 缺点：存在球差，象散和畸变
    - Woswards系统
      - 
      - 优点：简单，折叠，小巧，光通量大
      - 缺点：离轴像差大，分辨率不高
    - 光栅的选择:
      - 在分辨率满足情况下，n越小越好
        - 红外: 150~300g/mm
        - 可见~紫外：600-1200g/mm
        - 高分辨可见-紫外：1200-1800-2400g/mm
      - 选择全息而不用刻画
        - 一般用复制除非大热载才用原刻
      - 正弦型~30%；闪耀型~60-70%
      - 可用范围：(2)$\frac{3}{2}\lambda_b\sim\frac{\lambda_b}{2}$

效率曲线：p偏振，s偏振两个效率
- 相对孔径:
  - $F = D/f \sim \frac{1}{4} - \frac{1}{12}$, D光栅宽度，孔径要匹配
- 杂散光越低越好<10^{-5}
  - 元件散射
  - 校准失佳
  - 零级光强弱
  - 内部涂黑质量
- 罗兰圆：
  - 光源，slits，凹面球面镜r光栅G：
    同放在d=r的圆周上，且光栅与圆周相切。入射和出射成像均在圆上。
    $r_{圆} = \frac{1}{2} r_{镜}$
  - 

- 第一章
  - 1906年爱因斯坦首次提出光子的概念并给出光电效应公式：
    $h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + w_0$
    两个实验
    - 伦纳德
      - 光电效应释放出来的是带负电的质点；
      - 荷质比测量证明，这些质点是电子——光电子；
    - 密立根
      - 定量地验证了爱因斯坦公式的正确性；
  - 单光子
    - 描述光的单位：波长，能量，频率，波数
    - 能量：1光子能量 $= h\nu = \frac{hc}{\lambda}$; 1eV~1240nm光子
    - 人眼能看到$10^{6\sim7}$个光子
  - 真空光电管
    - I-V特性
      

    - 基本结构
      

    - 特点
      - 优点
        - 响应速度快（ps）
        - 暗电流小（pA）
          玻璃导电，真空度以及阴极涂层金属蒸发造成。
          极限测量电流: $10^{-11}A$
        - 受光面积大
        - 灵敏度高
      - 缺点
        - 体积大(cm)
        - 工作电压高（百V）
        - 无放大作用
      - 应用范围
        - 高速响应场合（ps级）
        - 大光照面积场合。
  - 光电倍增管（PMT）
    - 基本结构
      - 投射式PMT
        

        光阴极不能太厚：否则电子过不去。
        光阴极不能太薄：否则光子透过。
        因此效率不高。 晶振：利用压电效应和电致压缩效应的器件。
      - 反射式PMT

    - 光电倍增管特点
      - 优点
        - 光信号放大（$10^5 \sim 10^9$）
        - 响应速度块（ns）

- 暗电流小（nA）
- 受光面积大
- 缺点
  - 体积大
  - 工作电压高（500V-5kV）
- 光谱响应
  - 阴极材料——决定长波极限
  - 窗口材料——决定短波极限
  - 结构——决定响应曲线形状以及响应速度。

$\eta_{tot} = \eta_c \cdot \eta_w \cdot \eta_{cr}$

- 噪声与干扰
  - 光噪声：
    - 背景光：环境光，原则可屏蔽
    - 杂散光
      - 信号无关：一次杂散光
      - 相位有关：二次激发杂散光
  - 电子噪声：
    - 干扰

      与系统外部电磁设备，天体运转有关，时相关，原则上可以屏蔽和祛除。关键是找到干扰源。应特别注意工频（50Hz及其倍频）的干扰，为以下两种耦合。
      - 空间感应干扰
        - 周围电磁设备
        - 开关、可控硅、相对运动

        解决方案
        - 屏蔽（大金属网，对高频极其有效）
        - 减少回路面积
        - 固定测量线路，降低振动带来的感应噪声。
      - 串扰
        - 供电功率不足
        - 地线不合格/计算机

        解决方案
        - 改善接地线
        - 改变电连接方式
        - 增加供电能力
        - 改善电网（供电隔离）
    - 噪声

      与系统外界无关且无用，时无关，不可消除
      - 电路噪声
        - 热噪声

          温度，越高越大
        - 1/f噪声（闪烁噪声）

          频率越大越弱，可能与材料结构、加工
        - 量子

          小信号量子起伏，在探测时要考虑

        解决方案：微弱信号检测技术
      - 自然噪声
        - 天体噪声
          - 宇宙电磁辐射1GHz（影响量子信息），
          - 水散射20GHz（现代通讯上限）
          - 氧分子散射60GHz（目前无关，maybe20年后）
          - 宇宙射线激发10min（影响低计数率实验）
        - 空间噪声
          - 广播 1kHz-1MHz
          - 电视 10MHz
          - 手机 1-3GHz
  - 信号测量

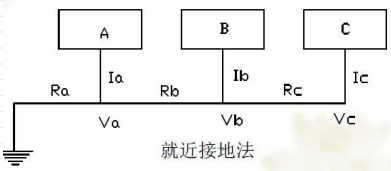
    核心是提高信噪比
    - 信噪比：$S_n = \frac{\text{信号强度}}{\text{噪声强度}} = \frac{S}{N}$

      测量极限:$S_n \geq 1$
    - 实际方法
      - 放大信号
      - 抑制噪声

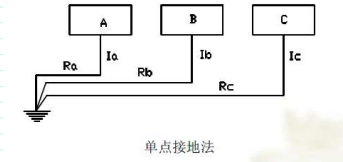
      信噪比提高: $R = \frac{S_n^{out}}{S_n^{in}}$
  - 接地
    - 接地目的
      - 给电路共同参考点
      - 提供安全保护

      直流地，数字地，交流地，模拟地，要分开

      任何地线都有电阻，电容，电感
    - 接地方式
      - 就近接地

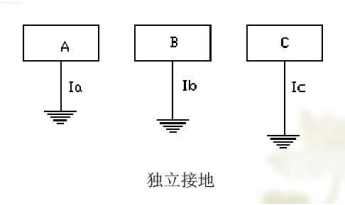
        

        就近接地法
        - 优点：简单，方便，实验室最常用（实际实验室都算是就近接地，只不过远近不同）
        - 缺点：干扰很大，电器上的电压随其他用电器工作电流变化，当其他用电器电流大时尤其糟糕
      - 单点接地

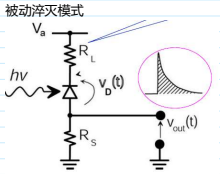
        单点接地法
        - 优点：设备独立，尽管各自地电位不同但不干扰

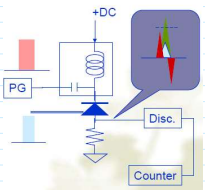
            - 缺点：地线长，电感大，高频耦合干扰
            - 应用：
                - $f > 10Mhz$时刻勿用, $f < 1MHz$时最好
                - $1MHz < f < 10MHz$，也可用但地线应短于电磁波长$\frac{1}{20}$
        - 独立接地



            - 特点：各设备地点位独立，但相互间有电信号传输时不好用！
            - 应用范围：$f > 10MHz$可用
        - 结论*
            - 探测器与放大器必须同点接地
            - 信号线电阻R_{cg}尽可能小，粗导线
            - 信号源浮地[$R_{sg} \to \infty(10-1M\Omega)$]或者放大器浮地
            - 最好用电池供电
    - 抗感应干扰
        - 信号线尽可能短，并且固定
        - 采用双绞线
        - 最好用层叠薄膜屏蔽电缆
    - 弱信号布线注意事项
        - 不以屏蔽线作为信号传输——易受干扰
        - 信号与前置放大器同点接地，不能多点接地
        - 减少信号线与地之间环路面积——降低干扰
        - 弱信号与大电流线远离，垂直最好
        - 模拟和数字电路分开
        - 信号线尽可能短
        - 必要时采光隔离耦合
        - 高频附近严格隔离
- 弱信号测量设备（直流信号测量）
    - 可测信号范围：信号短路电流决定信号可测与否
        - 可测区；过渡区；不可测量区
    - 数字万用表(DMM)
        - 特点:
            - offset电流/电压小
            - 漏电流小
            - 输入电阻大 10MΩ~1GΩ
        - 范围
            - 信号源电阻<$1M\Omega$
            - 信号源电压≥ $1\mu V$
            - 灵敏度要求>$1\mu V$
            - 信号源电流>$1nA$
        - 不适合范围
            - 输入电阻> $17\Omega(10^{12}$)
            - 电流分辨率 <1nA
            - 电压灵敏度 $< 1\mu V$
    - 静电计
        - 特点
            - 覆盖DMM全部测量范围，输入电阻太高（低内阻信号测量弱于DMM）
            - 易受外界干扰
            - 电压噪声与漂移严重
        - 范围（必须用）
            - 测量范围大小
                - 信号电流低于100pA
                - 电阻高于1GΩ
            - 附加负载小
                - 电信号源电阻高于1MΩ
                - 且表压降小于100mV
            - 电荷测量及其他灵敏电流测量，接近$Johnson$噪声信号
    - 纳伏表（微弱电压专用）
        - 特点
            - 比静电计内阻略小
            - 电压噪声和漂移比静电计好
            - 电流噪声和漂移比比静电计差比DMMS好
            - 输入电阻与DMMs相当
            - 范围到1nV左右
    - 皮安表（微弱电流专用）
        - 特点
            - 灵敏度低于静电计
            - 电流测量功能高于DMMs
            - 价格低
    - 噪声与抑制
        - 差模噪声抑制比：$NMRR = 20\log\left|\frac{V_{in}}{V_{error}}\right| \geq 80dB(good), V_{in}$ is AC input.
        - 共模噪声抑制比：$CMRR = 20\log\left|\frac{A_{ud}}{A_{uc}}\right| \geq 120dB\ (good)$
- 实际测量应考虑的问题
    - 热电动势
        - 不同材料间产生热电动势
        - 金属与氧化物之间产生热电动势
        - 0.1nV~1mV/℃
        - 方案：
            - 尽量采用同材料，同工艺同批次连接导线和钉等
            - 尽量不焊接，非焊不可时采用低热电动势焊料（Cd-Sn~几纳伏）
            - 严格清洁表面，但不能用腐蚀剂
            - 尽量保持系统恒温
    - 绝缘电阻

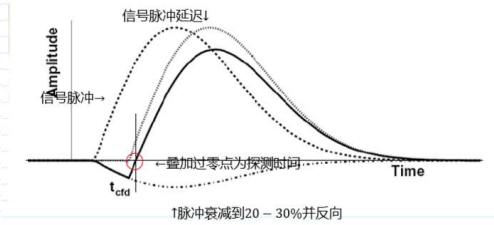
      测量仪表的输入内阻应根据信号源内阻决定。
        - 高信号源内阻

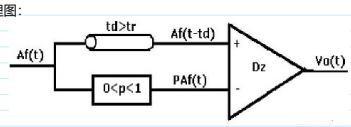
            - 判据: $V_s < 1\mu A \cdot R_s$
            - V_s为仪表的电压灵敏度， R_s信号源内阻
        - 周围绝缘电阻
            - 周围材料的体电阻。
            - 周围材料的表面电阻。
            - 吸附水等漏电（表面清洁，木质材料）
            - 压电以及电荷储存效应（机械加工，压力敏感，石英玻璃类材料）
            - 摩擦起电
            - 介电吸收或释放（长期漂移）
    - 单光子测量技术
        - PMT
            - PMT脉冲特性
                - 单光子脉冲
                - 其他脉冲
                - 阴级热激发脉冲
                - （非理想真空）离子发射脉冲
                - （天体）高能辐射脉冲
                - denode级激发脉冲
            - 减少暗计数方法
                - 降温
                - 屏蔽
                - 甄别
                - 去除dynode热激发(下界)和高能离子激发(上界)
                - 无法去除热激发和光激发
            - PMT的选取
                - 放大倍数应大于10^5
                - 峰值响应应在待测波长处
                - 阴极电流在nA以下（源自阴极蒸镀污染，真空度）
                - 渡越时间及其分散（越小越好）--决定脉冲宽度
            - PMT的困难
                - 红外响应限制
                - 常规，阴极高效率区$< 1.1\mu m$ （受脱出功影响）
                  量子效率$< 25\%$,一般$10\% \sim 15\%$
                - 特殊可做到$1.6\mu m$，但效率仅0.5%还贵
        - 微通道板光电倍增管 MC-PMT
            - 优点：电子渡越时间短，时间特性好（优于光电倍增管1-2个量级）
            - 缺点：价格是PMT的数倍
        - 像增强CCD，I-CCD
            - 优点：单光子成像，比较成熟，价格便宜
            - 缺点
                - 噪声比PMT大（热噪声，读出噪声）
                - 速度较慢
        - 半导体单光子探测（效率$95\% +$）
            - 种类
                - 超导纳米线 (SNSPD)
                  光子加热导致不超导，于是大电流突变，只能测有和无光子
                - 超导转边缘（TES）
                  温度接近超导态和正常态相变点，利用电阻变化可以分辨光子数分布
                - 微波动态电感探测器 （MKID）
                  光子改变腔动态电感，频率shift，可以实现光子数分辨。
        - 雪崩光电二极管APD (绝缘层电压很高)
            - 基本要求
                - 灵敏度高，噪声低
                - 有内放大作用且倍数>10^5
                - 很好的高频性能
                  结电容小⇒结面积小（有效面积小）($C < 6pF, 25\mu m$尺度)
                  电子迁移率高
            - 原理：光子激发产生电子到导带，产生电子-空穴对，且雪崩完不会坏。
            - 种类：
                - Si基 APD
                - 禁带宽度： 0K-1.17eV；室温-1.1eV
                - 有效工作范围: $0.4 \sim 1.0\mu m$
                - Ge基 APD
                - 禁带宽度： 0K-0.74eV；室温-0.64eV
                - 有效工作范围: $\leq 1.7\mu m$
                - $\mathrm{InGaAs/InP}$ 异质结APD
                - 禁带宽度： 0K-1.52~0.43； 室温-1.43~0.36eV
                - 有效工作范围: $0.9 \sim 1.6\mu m$
            - 工作模式
                - 被动淬灭模式
                - 

                - 原理：导通后负载电阻的压降实现雪崩电流截止
                - 优点：电路简单，容易实现
                - 缺点：死时间长，计数率低；脉冲幅度低，分布大，效率不高。
                - 门驱动模式
                - 原理：没光子时关门，光子快到时开门，采用脉冲驱动
                - 

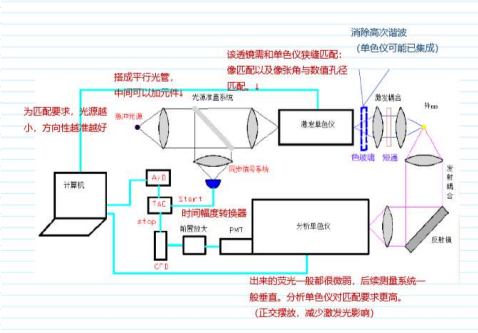
                - DC：加以仅低于APD所需电压以减少电压的上升下降。
            - 暗计数的来源

        - 热激发——降温
        - 耗尽层隧穿（高能量电子突破势垒）——外加偏压不能太高
        - 后脉冲效应（势阱俘获了电子，在热激发下在此被激发）——温度不能太低
            - 因素
                - 势阱浓度，势阱深度（强度）
                - 材料基质，纯度，加工工艺
                - 前一次激发相隔时间
                - 限制计数率
                - 环境温度
                - 高温快，低温慢
            - 降低方法：
                - 适当的工作电压
                - 适当的工作温度
                - 适当的脉冲宽度
    - 总结
        - 单光子探测——采用脉冲甄别模式
          （电路必须要在300-1000MHz的高频下工作）
        - 紫外——近红外波段
            - $0.11\sim1.2\mu m$：PMT ok，低暗计数，低效率
            - $0.4\sim1.0\mu m$：Si ok 高效率，低暗计数
            - $0.9\sim1.65\mu m$： InGaAs/InP ok 低效率，低暗计数
            - 宽谱：超导单光子探测器，高效率，低暗计数
  - 常阈值（恒比）甄别原理(CFD-constant Fraction Discriminator)
    但阈值甄别，脉冲幅度会影响到达时间，常用作高精度时间相关问题测量
    - 原理：

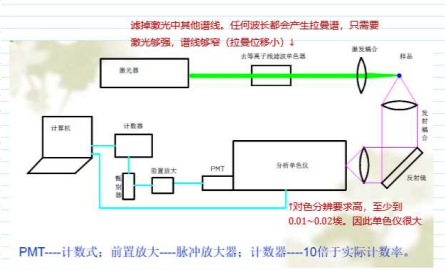


        - 输入脉冲延时；
        - 比例衰减脉冲反向；
        - 双脉冲叠加；
        - 过零判断。
    - 原理图：
        - 

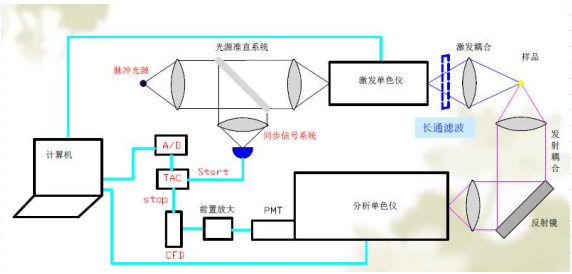
- 第二章
  - 单光子计数荧光系统
    - 激发单色仪扫描---给出激发光谱； 发射单色仪扫描----给出发射光谱
    - 实验装置图



  - 拉曼光谱系统（版本A）

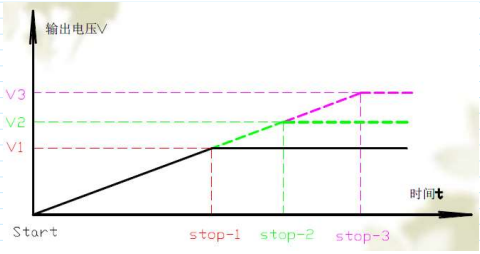


    - 注意事项
        - 激发光尽量长波：避免短波激发荧光；但不能太短否则量子效率低。
        - 分析单色仪分辨率要高（< 0.1埃）
        - 探测必须采用单光子计数系统。
        - 激发单色器要求低，可用带通滤波片，但是要去激光等离子线。
  - 衰弱光谱测量（版本A）



- 与单光子计数荧光实验几乎一模一样，除了滤光片处长通滤波以及单透镜准直。

- TAC原理：时间幅度转换器



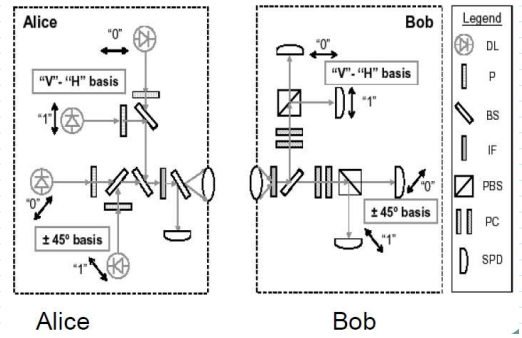
  - A/D——高速模数转换

- 第三章
  - BB84协议

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A	↘	↘	→	↑	→	↗	→	↑	↑	↘	↗	→	↘	↑
B	+	×	×	+	×	×	+	×	×	×	+	+	+	+
C	→	↘		↑	↗	↗	→		↗	↘	↑		↑	↑
D		↘		↑		↗	→			↘				↑
E		1		1		0	0			1				1

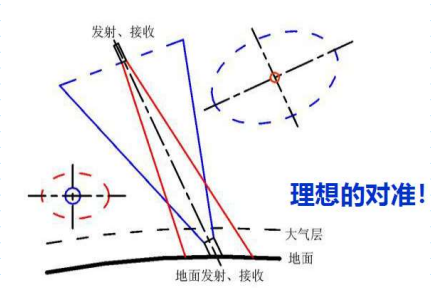
↕ =1　　→↗ =0

  - 多光源偏振编码方案



此方案最大的缺陷是四个激光器波长不可能一样，导致可以通过波长区分光子。（但这是最早做通实验得方法）

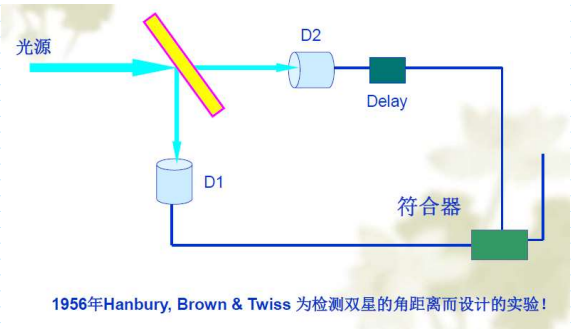
  - 地空通信望远镜



需要跟瞄系统。

  - 好处：卫星的速度和方向是可以实现计算的。
  - 麻烦：激光在前进过程中会遇到大气流动和湍流，路径有不可预计的折射，使到达地面的光随机晃动。 对卫星发出的光影响更小，因为其先经过定向的自由空间，到达大气层发生可能的折射之后只剩十几公里的路径，造成的线度偏离不大。所以主要发射部分在天上，接收在地面。
  - 方案：地面上放一个较强的激光，发散角尽量大。卫星线抓住地面这个信标光，然后它也发一个信标光，利用两个信标光让双方锁准。

- 第四章
  - HBT实验



- 二阶相干度

  $g^{(2)}(r,t,\tau)=\frac{\langle I(r,t)I(r,t+\tau)\rangle}{\langle I(r,t)\rangle\langle I(r,t+\tau)\rangle}$

  - 经典光场：

    $g^{(2)}(r,t,0)\geq 1$

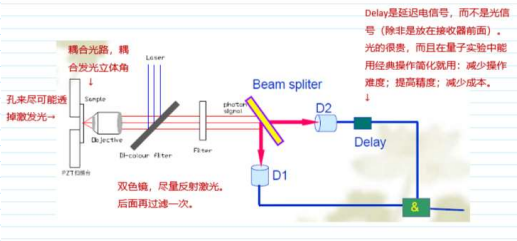
    $Schwarz$ 不等式 $\langle I^2(r,t)\rangle\langle I^2(r,t+\tau)\rangle\geq|\langle I(r,t)I(r,t+\tau)\rangle|^2$

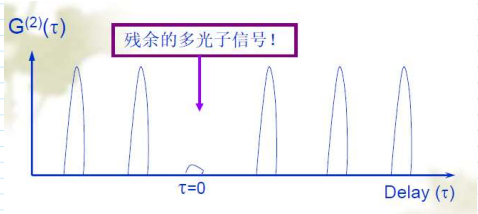
    $g^{(2)}(r,t,\tau)\leq g^{(2)}(r,t,0)$

    光倾向于同时到达探测器---聚束效应
  - 量子光场：

    $g^{(2)}(0)=0$,存在$g^{(2)}(\tau)\geq g^{(2)}(0)$

    $\begin{cases} g^{(2)}(0)>1,\text{超泊松分布 bunched} \\ g^{(2)}(0)=1,\text{泊松分布 random} \\ g^{(2)}(0)<1,\text{亚泊松分布 antibunched} \end{cases}$
- 基于燃料分子的单光子源测量系统
  - 装置图

    一般激光光子能量比辐射光子能量高。
  - 基本实验要求
    - 所选分子必须容易分散在溶液中（团状结构不行，必须以分子的形式溶剂存在）
    - 分子与成膜介质互相作用要小。
    - 介质膜（溶剂，胶）本身无荧光。
  - 信号
    - 

    - 多余信号来自玻璃的拉曼散射或者反射激光没完全滤掉。
  - 缺点
    - 染料分子容易被漂白——寿命有限（染料分子易被氧化，大概一百万次激发就寄了）
    - 光子收集效率很小！（没有办法把4π立体角内的光全部收集，能收集的立体角范围小。）
- 第五章
  - 滤光片(核心是利用吸收)
    - 截止滤光片（色玻璃等）
      - 曲线基本为长通
      - 特点
        - 紫外-可见-近红外波段
        - 隔离度10^3~10^5
        - 过渡区宽度80-100nm,最窄25nm
        - 可见~红外波段只有长通型
        - 透过率60%~90%
        - 入射角度对滤波无影响
    - 半导体材料：利用禁带宽度
      - 隔离度很高但过渡区很宽，基本也是长通
    - 特种材料薄膜
      - 铝模，铍膜，金膜，氧化铝膜
      - 主要用于软x光和VUV波段
  - 干涉光技术（薄膜的分振幅干涉，核心是反射）
    - 增反膜与增透膜
      - 增反膜：通常用来做特定波长的反射镜
      - 增透膜：用来减少光学原件的表面反射
    - 小心带外漏光，很严重
    - 光学元件膜注意事项
      - 不能随便擦
      - 不能随便洗，特别是丙酮
      - 任何光学元件都不能水洗
  - 原子滤光器
    - 原子滤光器
      - 结构
        - 法拉第反常色散滤波器

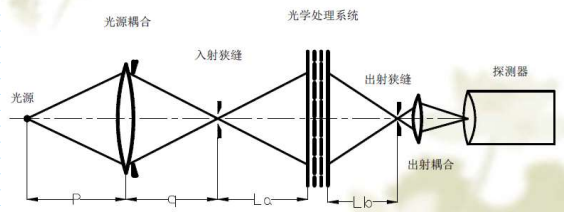
          带略宽，调节性宽，透过率好
        - 佛格特反常色散原子滤波器

          更窄点，调节性略差，透过率略差
      - 原理

        - cell的透射光谱
        - 原子的旋光特性
        - Fadof透射光谱
    - 性能和特点
        - 通带宽度0.1-1Ghz可微调(0.01nm)
        - 只能有有限几个波长可以用
        - 高透射率，信号损失少
        - 带外隔离度取决于偏振器的隔离度
  - 各种滤波器性能比较

类型	透过率	Long pass	Short pass	Band pass	Notch filter	极限带宽	Block order
截止	50-90%	√	紫外			25nm	3-4
干涉	40-80%	√	√	√	√	0.2nm	4-6
双折射	20%			√		0.1nm	4-6
原子滤波	90%			√		0.01nm	6

- 空间滤波与光耦合
  - 典型光路



  - 将需要模式以外的光滤掉
  - 需要耦合的地方
    - 探头（半导体探头）
    - 光纤（特别是单模光纤）（一般孔径十微米左右，上下10度）
    - 狭缝
    - 针孔，光阑
  - 目标：提高信噪比
    - 将信号光尽可能耦合进系统
    - 将杂散光尽可能挡在系统外面
  - 拉氏不变量
    - $n_1\theta_1h_1 = n_2\theta_2h_2$
    - 意义
        - 给定光源，成像大发散小，成像小发散大
    - 结论
        - 不是将光斑聚得越小越好
        - 最佳耦合是数值孔径匹配
    - 衍射限制
        - 圆孔：$R = f\theta = f\frac{1.22\lambda}{D}$
        - 矩形：$d = f\theta = f\frac{\lambda}{D}$

- 第六章
  - Entanglement
    - Qubit

      1q比特：$|\phi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$

      nq比特：2^n个状态
    - EPR(Einstein, Podolsky, Rosen)态
      - $|\Phi^{\pm}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle \pm |11\rangle)$
      - $|\Psi^{\pm}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle \pm |10\rangle)$

      Bell基——两粒子的最大纠缠态
  - 密度矩阵
    - $\rho^+ = |\Phi^+\rangle\langle\Phi^+| = \frac{1}{2}\begin{pmatrix}1&0&0&1\\0&0&0&0\\0&0&0&0\\1&0&0&1\end{pmatrix}$
    - 若经典分布：$\rho^c = \frac{1}{2}|00\rangle\langle 00| + \frac{1}{2}|11\rangle\langle 11| = \frac{1}{2}\begin{pmatrix}1&0&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&1\end{pmatrix}$
  - 观测非对角元（假设编码在偏振）

    假设对第一个比特做正交测量：

    $\langle\psi_A| = \alpha^*\langle 0| + \beta^*\langle 1|; \langle\psi_A^{\perp}| = \beta\langle 0| - \alpha\langle 1|$

    往$\langle\psi_A|$ 方向测量：

    $\langle\psi_A|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(\alpha^*|0\rangle + \beta^*|1\rangle) \Rightarrow P = Tr(|\psi_A\rangle\langle\psi_A|\rho^+) = \frac{1}{2}(|\alpha|^2 + |\beta|^2) = \frac{1}{2}$

    归一化：$\sqrt{2}(\alpha^*|0\rangle + \beta^*|1\rangle)$

    $\langle\psi_A|\rho|\psi_A\rangle = \frac{1}{2}(\alpha^*|0\rangle\langle 00| + \beta^*|1\rangle\langle 11|)|\psi_A\rangle = \frac{1}{2}(|\alpha|^2|0\rangle\langle 0| + |\beta|^2|1\rangle\langle 1|)$

    归一化：$(|\alpha|^2|0\rangle\langle 0| + |\beta|^2|1\rangle\langle 1|)$

    往$\langle\psi_A^{\perp}|$方向测量：

    $\langle\psi_A^{\perp}|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(\beta|0\rangle - \alpha|1\rangle),\ P = \frac{1}{2}$

    $\langle\psi_A^{\perp}|\rho|\psi_A^{\perp}\rangle = \frac{1}{2}(|\beta|^2|0\rangle\langle 0| + |\alpha|^2|1\rangle\langle 1|)$

    这时候我们舍弃$\langle\psi_A^{\perp}|$的测量结果（把它反射掉之类的）

    然后用偏振片测量b比特上的结果：

    对$\sqrt{2}(\alpha^*|0\rangle + \beta^*|1\rangle)$：旋转偏振片，光强随角度$\theta$变化，$\alpha,\beta$的相位与态有关。

    对$(|\alpha|^2|0\rangle\langle 0| + |\beta|^2|1\rangle\langle 1|)$：光强恒定在$\frac{1}{2}$，且$\alpha,\beta$的相位与此时的态无关。

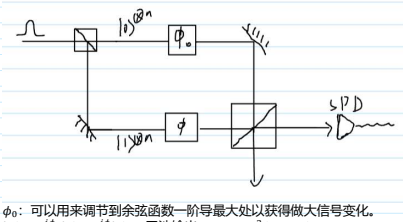
    (本质是改变测量基矢，但不用这么麻烦，单比特线偏振光/自然光直接测就是。)
  - Cat
    - 微观态与宏观态的纠缠

      $\frac{1}{\sqrt{2}}[|0\rangle \otimes |Live\rangle + |1\rangle \otimes |Dead\rangle]$

      为何是写成叠加态而不是混态？关键是有无外部自由度，是否是封闭系统。

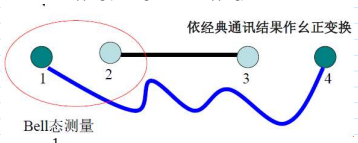
      （参见Sakurai 3.4）
  - Application
    - Metrology/sensor

      Mach-Zehnder interferometer:相位变换转化为强度变化。

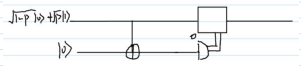


ϕ_0：可以用来调节到余弦函数一阶导最大处以获得做大信号变化。
$|\psi\rangle = e^{i\phi_0}|0\rangle + e^{i\phi}|1\rangle \to$ 干涉输出$P_{out} = \cos^2(\phi + \phi_0)$
N-bits GHZ state时：$|\psi_N\rangle = e^{iN\phi_0}|0\rangle^{\otimes n} + e^{iN\phi}|1\rangle^{\otimes n} \Rightarrow P_{out} = \cos^2(N\phi + N\phi_0)$
故$SNR \propto N \Leftrightarrow Classical\ case: repeated\ N\ times, SNR \propto \sqrt{N}$

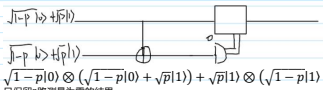
- Quantum correction
  利用纠缠抵御局域的噪声。
  $|0\rangle + e^{i\phi}|1\rangle \xrightarrow[bit\ flip]{noise} |1\rangle + e^{i\phi}|0\rangle = |0\rangle + e^{-i\phi}|1\rangle$
  利用三比特编码，另外两个比特即可纠错。
  $|000\rangle + e^{i\phi}|111\rangle \xrightarrow{noise} |100\rangle + e^{i\phi}|011\rangle$
- Quantum teleportation
  Alice有一个单比特未知态:$|\chi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$
  准备一个bell态$|\Psi^-\rangle$,前一个比特归Alice，后一个归Bob：
  $|\chi\rangle|\Psi^-\rangle = (a|0\rangle + b|1\rangle)\frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle)$
  $= \frac{1}{2}[|\Psi^-\rangle(-|\chi\rangle) + |\Psi^+\rangle(-\sigma_z|\chi\rangle) + |\Phi^-\rangle(\sigma_x|\chi\rangle) + |\Phi^+\rangle(-i\sigma_y|\chi\rangle)]$
  Alice测量第一个比特：随机得到四个Bell基中的一个。并把测量结果告诉Bob。
  Bob根据测量结果，选择泡利操作来还原得到$|\chi\rangle$。
- Communication——teleportation
  AB的纠缠 + $\mathrm{BSM_A}$(Bell State Measurement) $\to |\chi\rangle$传到B处。
  漏洞：既然$|\phi\rangle$传不到那么远，那AB怎么纠缠?
- Quantum Swapping (Entanglement Swapping)纠缠变换



  $|\phi_{23}^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle_{23} + |11\rangle_{23})$
  $|\psi_{14}^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|\chi_0\rangle_4 + |1\rangle_1|\chi_1\rangle_4)$,其中$\{|\chi_0\rangle, |\chi_1\rangle\}$未归一化。
  $|\psi_{14}^+\rangle|\phi_{23}^+\rangle = \frac{1}{2}\left(|\phi^+\rangle_{12} + |\psi^+\rangle_{12}\sigma_x^{(3)} - |\psi^-\rangle_{12}i\sigma_y^{(3)} + |\phi^-\rangle_{12}\sigma_z^{(3)}\right)\left((|0\rangle_3|\chi_0\rangle_4 + |1\rangle_3|\chi_1\rangle_4)\right)$
  于是只要12联合测量并信息发给3，3根据信息做测量，即可把3与4纠缠在一起。
  漏洞：就算23相隔1公里仍有损耗，损耗会累积?
- Entanglement purification
  - Target $|0\rangle, p \ll 1$

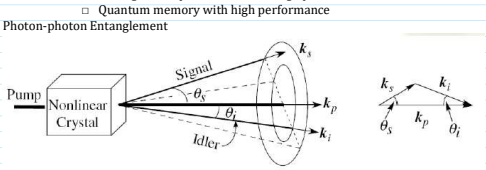


    2路作测量$\begin{cases} 测到|0\rangle(P = 1-p), 1路导通 \\ 测到|1\rangle\ (P = p), 1路堵塞，重复直到得到0 \end{cases}$
  - 线路如果有噪声

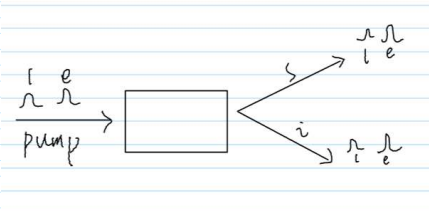


    $\sqrt{1-p}|0\rangle \otimes \left(\sqrt{1-p}|0\rangle + \sqrt{p}|1\rangle\right) + \sqrt{p}|1\rangle \otimes \left(\sqrt{1-p}|1\rangle + \sqrt{p}|0\rangle\right)$
    $\xRightarrow{\text{只保留2路测量为零的结果}} ((1-p)|0\rangle + p|1\rangle) \otimes |0\rangle$
    此时1路为零的概率：$\frac{(1-p)^2}{(1-p)^2+p^2} > 1-p$ 若$p < \frac{1}{2}$
- 量子中继
  - Photon Loss Problem: Entanglement Swapping
  - Decoherence Problem: Purification
  - General requirement
    - Entanglement swapping with high precision
    - Entanglement purification with high precision
    - Quantum memory with high performance

- Photon-photon Entanglement



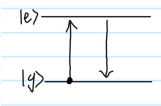
  - 参量下转换：$\omega_p = \omega_s + \omega_i$;
    SPDC$\begin{cases} Type\ I: e \to o + o \\ Type\ II: e \to e + o \end{cases}$
  - 哈密顿量：$H = g\left(a_p^\dagger a_s a_i + a_p a_s^\dagger a_i^\dagger\right)$
    $e^{iHt}|\phi_p\rangle|0_s 0_i\rangle \to \sqrt{2 - e^{\beta}}|00\rangle + \sqrt{\beta}|11\rangle + \sqrt{\frac{\beta^2}{2}}|22\rangle + \cdots; \beta \ll 1$
    $\sqrt{2 - e^{\beta}} \approx 1$
  - 时序编码



    $(|00\rangle + \beta|11\rangle + \beta^2|22\rangle + \cdots)_l \otimes (|00\rangle + \beta|11\rangle + \beta^2|22\rangle + \cdots)_e$
    $\xRightarrow{\text{只要双光子子空间}} \beta(|00\rangle|11\rangle + |11\rangle|00\rangle)$
    (注意测量要在计算结束后才进行)
  - 相位匹配（能量守恒+动量守恒）
    $\begin{cases} \hbar\omega_p = \hbar\omega_s + \hbar\omega_i \\ \vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i \end{cases}, |\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}n_\omega$
    方法：

- ◇ 角度与合适的位置
- ◇ 温度
- ◇ 周期性晶体的准相位匹配: $k_p \pm \Lambda = k_s + k_i$

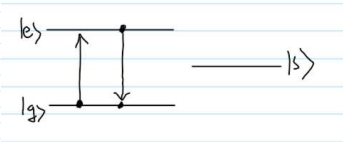
- Photon-Atom Entanglement
  - □ 自发辐射



原子(lifetime:50ns)

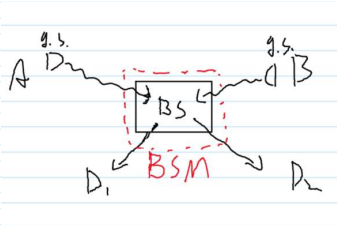
我们等$< 50ns$时间，系统处于$|e\rangle \otimes |0\rangle + |g\rangle \otimes |1\rangle$纠缠态

  - □ 亚稳态： $|g\rangle, |s\rangle$都是长寿命的态（可作储存器）



$(\alpha|g\rangle + \beta|s\rangle) \otimes |0\rangle \xrightarrow{\pi脉冲} (\alpha|e\rangle + \beta|s\rangle) \otimes |0\rangle \xrightarrow{等100ns} (\alpha|g\rangle|1\rangle + \beta|s\rangle|0\rangle)$纠缠态

  - □ 实现2个远程的物理储存器的纠缠



$(|g\rangle_A|1\rangle_A + |s\rangle_A|0\rangle_A) \otimes (|g\rangle_B|1\rangle_B + |s\rangle_B|0\rangle_B)$

用一个BS，在此处做BSM，即可实现A,B的纠缠。

- 第七章
  - 锁相放大技术
    - 信号$S(t)$; 任何噪声:$N(t)$
    - 理想的弱信号:$S(t) = \sum_n e_n \cos(\omega_n t + \theta_n)$

      e_n 是我们需要测量的量。
    - 参考信号（必须的）： $s_r(t) = e_r \cos(\omega t + \theta)$

      若弱信号只有一个单傅里叶分量

      $s_s(t) = e_s \cos(\omega_0 t + \theta_0)$

      $E = s_s(t)s_r(t) \approx \frac{1}{2}\cos(\Delta\omega t + \Delta\theta)$ (滤掉高频)

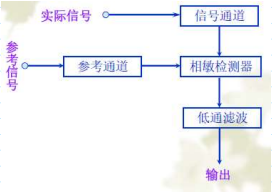
      则特定频率信号测量转换为直流信号测量。

      若$S_s = e_s \cos(\omega_0 t + \theta_0) + e_n \cos(\omega' t + \theta')$

      则$E_0 \approx \frac{1}{2} e_r e_s \cos(\Delta\omega t + \Delta\theta) + \frac{1}{2} e_r e_n \cos((\omega - \omega')t + \Delta\theta')$

      若$\omega - \omega' \gg \Delta\omega$, 则我们可以把noise去掉。
    - 实际处理：取$\Delta\omega = 0$，取参考信号振幅为1（依赖相敏检测器PSD处理）

      得到随相位漂动的直流慢变信号。取最大值即可得到e_s。



      - ◇ PSD

        乘法器，参考信号控制开关
      - ◇ 信号通道

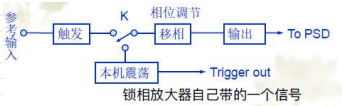
        - ▸ 前置放大器

          干扰抑制，阻抗匹配，增加驱动能力。
        - ▸ 多级可变增益放大器

          放大倍数可调，再放大，使得BPF后衰减不至于太弱
        - ▸ 补偿放大器

          倍率可调节，再放大，使得信号与PSD匹配良好。
      - ◇ BPF带通滤波器

        f_0可变 – 扫频滤波器
      - ◇ 参考通道

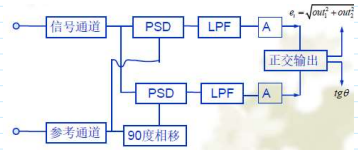


        锁相放大器自己带的一个信号

        一般需要一个触发电路（trigger out为外部提供同步信号用）

        需要相位调节。
      - ◇ 低通放大器

        简单的直流放大器
      - ◇ 正交型锁相放大器

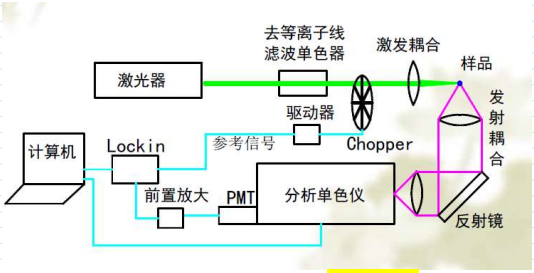


    - 实际应用考虑

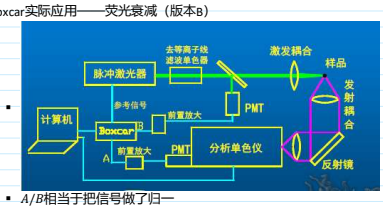
- 动态范围
  - 最小可测信号（MDS）
    测量下限，系统实际最大漂移量。
  - 过载电平(OVL)
    输入的信号+噪声总和
  - 满刻度输入电平(FS)
    最大输出时对应的输入电平大小
- 定义与意义

总输入动态范围=$\frac{\text{OVL}}{\text{MDS}}(dB)$(最大可测量范围最大有效放大倍数)
动态储备 $= \frac{OVL}{FS}$(dB)(系统容忍干扰和噪声的能力)
输出动态范围= $\frac{FS}{MDS}(dB)$(可测信号范围)
OVL与FS的区别在于noise在LPF前已经滤除

- 三种工作模式
  - 高稳定模式：测量最弱信号，交流放大倍数小，直流大，MDS下拉
  - 高储备模式：对付强干扰信号，交流大，直流小，OVL上拉
- 关于过载的讨论*
  - 输入信号过强，PSD过载
  - 信号通道噪声或者干扰过大，PSD过载
  - 输出直流放大过度，输出过载
  - 危害：非线性放大导致信号失真。
  - 因素：
    - 强白噪声
    - 与信号频率相近干扰（最易出现）
    - 远离信号频率的干扰（最不易发生）
  - 处理：
    - 特定频率干扰：陷波滤波
    - 宽带干扰导致过载：增加动态储备，调低信号通道A1的放大倍数
    - 直流输出过载：降低输出放大器A2的放大倍数
- Lockin实际应用——微弱荧光或拉曼谱(版本B)



- Chopper：斩波器，因为锁相需要交流信号。但是会导致出来是方波，傅里叶后高频低频都有，故锁相时有不少噪声。前置放大器需要和chopper匹配。
- 锁相放大器测的为低频信号，电流变换频率低，且不需要单光子计数模式。故此处PMT可以用尽可能大的阻抗（$100k\sim1M$）。当测量单光子信号时，电阻大会让信号变小，高频时电阻50。PMT用的是脉冲放大器，不需要线性放大器。在处理脉冲信号时的元件带宽要宽。

- 第八章
  - Boxcar
    适用于若脉冲信号恢复
    - 原理：多次次取样脉冲的特点部分
      实际信号$= S_{in} + N_{in}$
      N次平均取样:$S_{out} = NS_{in}, N_{out} = \sqrt{N}N_{in}$
      信噪比: $\frac{S_{out}}{N_{out}} = \sqrt{N}\frac{S_{in}}{N_{in}}$
    - 实际方法：
      信噪比改善与采用次数有关
      为了波形不失真，门宽要尽可能窄
      采样时间： $t =$ 采样点数$n \times \frac{\text{每点采样次数}N}{\text{信号重复率}}$
    - 特点：
      需要参考信号
      积分可以提高信噪比达$\sqrt{N}$倍
      增加积分时间可以提高信噪比
      时间消耗随积分时间N倍增加
    - 适用范围：
      高速，时间分辨率高的信号
      微弱，湮没于噪声中的信号
      不适用于低重复率信号
      瞬态光学化学过程、高速脉冲恢复，衰弱与时间分辨光谱。
  - Boxcar实际应用——荧光衰减（版本B）
    - 

    - A/B相当于把信号做了归一
  - 四种办法
    - 直接测量：测量精度最低，是眼睛的灵敏度。
    - 单光子计数：比直接大六个数量级，但慢。
    - Lock-in：处理慢变信号（<3MHz），比直接测量高三个数量级。脉冲信号不适用。
    - Boxcar(取样平均)：假定噪声是高斯，根号N增加，信噪比改善与采样次数有关。耗时长。

考试特别Paper(Blank)

2021年12月21日 14:32

- 第零章
  - 光的能量与分类
    - 光的波段 (Å)
      - 紫外: _____; 远: _____; 近_____;
      - 可见光: _____;
      - 红外光: _____;
      - 无线电波: _____; 太赫兹:_____;
  - SiO_2的吸收谱窗口:
    - 由于氧吸收在_____,故玻璃透镜(SiO_2)没有用于_____附近的。（可以考虑_____，业界最优，_____吸收峰。）
  - 色散的种类
    - _____（_____）_____。
    - _____（传播速度对_____的以来不同导致...）_____。
    - _____（_____对波长依赖不同导致_____; _____）_____。
  - 色散棱镜
    - 分辨率: $R = \frac{\lambda}{d\lambda} =$ $=$
      决定因素: _____与_____。
    - 优点:
      - _____;
      - _____;
      - _____;
      - _____;
    - 缺点
      - _____;
      - _____;
      - _____;
      - _____;
  - 光栅光谱仪
    - 光栅常数: $n =$_____; 刻痕密度，周期_____;
    - 光栅方程: _____; _____;
    - 最大谱级次: $|\sin\theta + \sin\phi| \le 2 \Rightarrow$_____;
    - 闪耀光栅:
      - 闪耀角: _____;
      - 闪耀波长: $\lambda_B =$_____;
    - 透射光栅特点
      - _____;
      - _____;
      - _____;
      - _____;
    - 反射光栅特点
      - _____;
      - _____;
    - 高阶谱: _____;
      因此有二级谱，_____;
    - 分辨率: $R =$_____;
    - 理想狭缝宽度: $a =$_____;
      D: _____; f: _____;
    - 注意点
      - 刻画光栅比全息光栅的劣势为_____;
      - 光栅常用_____，_____用凹面。
    - Czerny Turner式干涉仪
      -
      - 最_____，最_____;
      - 优点: _____，_____，_____，_____，_____;
      - 缺点: 存在_____，_____和_____;
    - Woswards系统
      -
      - 优点: _____，_____，_____，_____。
      - 缺点: _____，_____。
    - 光栅的选择:
      - 在分辨率满足情况下，_____。
        - 红外: _____g/mm
        - 可见-紫外: _____g/mm
        - 高分辨可见-紫外: _____g/mm

- □ 选择全息而不用刻画
  - ◆ _____。
- □ 正弦型~_____%； 闪耀型~_____%
- □ 可用范围：_____。

  效率曲线：
- □ 相对孔径：
  - ◆ F = ~$\frac{1}{4}$ – $\frac{1}{12}$，_____，_____。
- □ 杂散光越低越好<10^{-5}
  - ◆ _____；
  - ◆ _____；
  - ◆ _____；
  - ◆ _____；
- 罗兰圆：
  - □ _____，_____，_____：

    _____。入射和出射成像_____。

    $r_{圆}$ =_____；
  - □

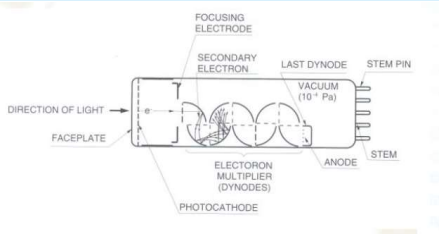
- 第一章
  - 1906年爱因斯坦首次提出光子的概念并给出光电效应公式：

    _____；

    两个实验
    - 伦纳德
      - □ _____；
      - □ _____——光电子；
    - 密立根
      - □ _____；
  - 单光子
    - 描述光的单位：_____，_____，_____，_____；
    - 能量：1光子能量 = $h\nu = \frac{hc}{\lambda}$，1eV~_____光子
    - 人眼能看到_____个光子
  - 真空光电管
    - I-V特性
    - 基本结构
    - 特点
      - □ 优点
        - ◆ _____（_____）
        - ◆ _____（_____）

          _____，_____以及_____造成。

          极限测量电流：_____。
        - ◆ _____
        - ◆ _____
      - □ 缺点
        - ◆ _____(_____)
        - ◆ _____（_____）
        - ◆ _____
      - □ 应用范围
        - ◆ _____（_____级）
        - ◆ _____场合。
  - 光电倍增管（PMT）
    - 基本结构
      - □ 投射式PMT



光阴极不能太厚：_____。
光阴极不能太薄：_____。
因此效率不高。 晶振：_____。

- 反射式PMT

- 光电倍增管特点
  - 优点
    - _____（_____）
    - _____（_____）
    - _____（_____）
    - _____
  - 缺点
    - _____
    - _____（_____）
  - 光谱响应
    - _____——决定长波极限
    - _____——决定短波极限
    - 结构——_____以及_____。

$\eta_{tot} = \eta_c \cdot \eta_w \cdot \eta_{cr}$

- 噪声与干扰
  - 光噪声：
    - _____：_____，_____
    - _____
      - 信号无关：_____
      - 相位有关：_____
  - 电子噪声：
    - _____
      与系统外部电磁设备，天体运转有关，时相关，原则上_____。
      关键是_____。应特别注意_____的干扰，为以下两种耦合。
      - _____
        - _____
        - _____、_____、_____

        解决方案
        - _____
        - _____
        - _____。
      - _____
        - _____
        - _____/_____

        解决方案
        - _____
        - _____
        - _____
        - _____
    - _____
      与系统外界无关且无用，时无关，_____
      - _____
        - _____
          温度，越高越大
        - _____
          频率越大越弱，可能与材料结构、加工
        - _____
          小信号量子起伏，在探测时要考虑

        解决方案：_____
      - _____
        - _____
          - _____（影响量子信息），
          - _____（现代通讯上限）
          - _____（目前无关，maybe20年后）
          - _____（影响低计数率实验）
        - _____
          - _____ _____
          - _____ _____
          - _____
  - 信号测量
    核心是_____
    - 信噪比：$S_n =$ $=$
      测量极限:_____
    - 实际方法
      - _____
      - _____

      信噪比提高: $R =$
  - 接地
    - 接地目的
      - _____
      - _____

      _____，_____，_____，_____，要分开
      任何地线都有_____，_____，_____
    - 接地方式
      - 就近接地

        - 优点：_____
        - 缺点：_____

- 单点接地

  - 优点：_____
  - 缺点：_____
  - 应用：
    - $f >$ 时刻勿用, $f <$ 时最好
    - _____ $< f <$ _____，也可用但_____
- 独立接地

  - 特点：_____!
  - 应用范围：_____
- 结论*
  - 探测器与放大器必须同点接地
  - 信号线电阻R_{cg}尽可能小，粗导线
  - 信号源浮地[$R_{sg} \to \infty(10 - 1M\Omega)$]或者放大器浮地
  - 最好用电池供电

- 抗感应干扰
  - _____，并且_____
  - _____
  - _____
- 弱信号布线注意事项
  - _____
  - _____
  - _____
  - _____
  - _____
  - _____
  - _____
  - _____

- 弱信号测量设备（直流信号测量）
  - 可测信号范围：_____决定信号可测与否
    - _____；_____；_____
  - 数字万用表(DMM)
    - 特点:
      - _____
      - _____
      - _____
    - 范围
      - 信号源电阻<_____
      - 信号源电压≥
      - 灵敏度要求>_____
      - 信号源电流>_____
    - 不适合范围
      - 输入电阻>
      - 电流分辨率 <
      - 电压灵敏度 <
  - 静电计
    - 特点
      - _____
      - _____
      - _____
    - 范围（必须用）
      - _____
        - _____
        - _____
      - _____
        - _____
        - _____
      - _____
  - 纳伏表（微弱电压专用）
    - 特点
      - _____
      - _____
      - _____
      - _____
      - _____
  - 皮安表（微弱电流专用）
    - 特点
      - _____
      - _____
      - _____
  - 噪声与抑制
    - 差模噪声抑制比：$NMRR =$ ≥ $(good), V_{in}$ is AC input.
    - 共模噪声抑制比：$CMRR =$ ≥ $(good)$

- 实际测量应考虑的问题
  - _____
    - _____产生_____
    - _____产生_____
    - _____/°C
    - 方案：
      - _____

- _____
- _____
- _____

- 绝缘电阻

  测量仪表的输入内阻应根据_____决定。
  - 高信号源内阻
    - 判据: _____
    - V_s为 , R_s
  - 周围绝缘电阻
    - _____。
    - _____。
    - _____ (_____, _____)
    - _____ (_____, _____, _____材料)
    - _____
    - _____ (长期漂移)

- 单光子测量技术
  - PMT
    - PMT脉冲特性
      - _____
      - 其他脉冲
        - _____
        - _____
        - _____
        - _____
    - 减少暗计数方法
      - _____
      - _____
      - _____
        - 去除_____
        - 无法去除_____
    - PMT的选取
      - _____
      - _____
      - _____ (源自_____, _____)
      - _____--决定_____
    - PMT的困难
      - _____
      - 常规，阴极高效率区< (受_____影响)

        量子效率< ,一般
      - _____, _____
  - 微通道板光电倍增管 MC-PMT
    - 优点: _____, _____ (_____)
    - 缺点: _____
  - 像增强CCD，I-CCD
    - 优点: _____, _____, _____
    - 缺点
      - _____ (_____, _____)
      - _____
  - 超导体单光子探测（效率_____)
    - 种类
      - 超导纳米线 (_____)

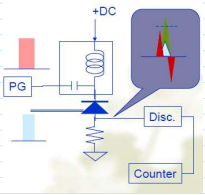
        _____
      - 超导转边缘（_____)

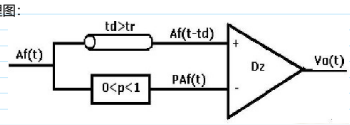
        _____
      - 微波动态电感探测器 (_____)

        _____。
  - 雪崩光电二极管APD (绝缘层电压很高)
    - 基本要求
      - _____
      - _____
      - _____

        _____ ⇒ _____ (_____) (C < pF，μm尺度)

        _____
    - 原理: _____且_____。
    - 种类:
      - Si基 APD
        - 禁带宽度: _____; _____
        - 有效工作范围: _____
      - Ge基 APD
        - 禁带宽度: _____; _____
        - 有效工作范围: _____
      - lnGaAs/lnP 异质结APD
        - 禁带宽度: _____; _____
        - 有效工作范围:_____
    - 工作模式
      - 被动淬灭模式
      -
        - 原理: _____
        - 优点: _____, _____
        - 缺点: _____, _____; _____。
      - 门驱动模式
        - 原理: _____

- 

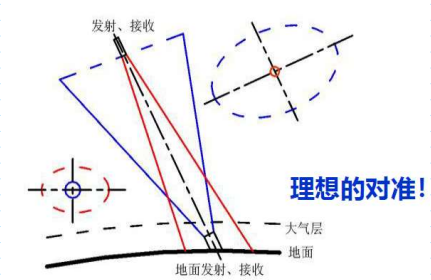
    - DC：_____。
  - 暗计数的来源
    - _____——_____
    - _____（_____）——_____
    - _____（_____，_____）——_____
      - 因素
        - _____
          - _____
        - _____
          - _____
        - _____
          - _____
      - 降低方法：
        - _____
        - _____
        - _____
- 总结
  - 单光子探测——_____
    （电路必须要在_____下工作）
  - 紫外——近红外波段
    - _____μm：_____
    - _____μm：_____
    - _____μm：_____
    - 宽谱：_____
- 常阈值（恒比）甄别原理(CFD-constant Fraction Discriminator)
  但阈值甄别，脉冲幅度会_____，常用作_____测量
  - 原理：
    - _____；
    - _____；
    - _____；
    - _____。
  - 原理图：
    - 

- 第二章
  - 单光子计数荧光系统
    - 激发单色仪扫描---_____； 发射单色仪扫描----_____
    - 实验装置图
  - 拉曼光谱系统（版本A）
    - 注意事项
      - _____；_____。
      - _____
      - _____。
      - _____。
  - 衰弱光谱测量（版本A）

- 与单光子计数荧光实验几乎一模一样，除了滤光片处长通滤波以及单透镜准直。
- TAC原理：时间幅度转换器
- A/D——_____

- 第三章
  - BB84协议
    -
  - 多光源偏振编码方案
    -

    此方案最大的缺陷是_____，导致_____。（但这是最早做通实验得方法）
  - 地空通信望远镜

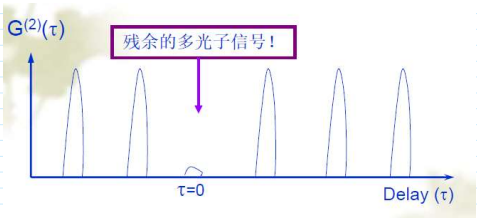
    需要跟瞄系统。
    - 好处：_____。
    - 麻烦：_____。
    - 方案：_____。
- 第四章
  - HBT实验
  - 二阶相干度

    $g^{(2)}(r,t,\tau)=$
    - 经典光场：
      _____ $\geq$ _____
      Schwarz 不等式
      _____ $\leq$ _____
      _____---*聚束效应*
    - 量子光场：

_____,存在 _____ ≥ _____

$$\begin{cases} g^{(2)}(0) > 1, \\ g^{(2)}(0) = 1, \\ g^{(2)}(0) < 1, \end{cases}$$

- 基于燃料分子的单光子源测量系统
  - 装置图

    一般_____。
  - 基本实验要求
    - _____（_____）
    - _____。
    - _____。
  - 信号
    - 

    - 多余信号来自_____。
  - 缺点
    - _____（_____）
    - _____（_____）
- 第五章
  - 滤光片(核心是_____)
    - _____（色玻璃等）
      - 曲线基本为_____
      - 特点
        - _____
        - _____
        - _____
        - _____
        - _____
        - _____
    - _____：利用_____
      - _____
    - _____
      - _____，_____，_____，_____
      - 主要用于_____
  - 干涉光技术（薄膜的分振幅干涉，核心是_____）
    - 增反膜与增透膜
      - 增反膜：_____
      - 增透膜：_____
    - 小心_____
    - 光学元件膜注意事项
      - _____
      - _____
      - _____
  - 原子滤光器
    - 原子滤光器
      - 结构
        - _____滤波器 _____
        - _____滤波器 _____
      - 原理
        - _____
        - _____
        - _____
      - 性能和特点
        - _____
        - _____
        - _____
        - _____
    - 各种滤波器性能比较

类型	透过率	长通	短通	带通	带阻	极限带宽	Block order

  - 空间滤波与光耦合
    - 典型光路

- 将需要模式以外的光滤掉
- 需要耦合的地方
  - _____
  - _____
  - _____
  - _____，_____
- 目标：_____
  - 将_____
  - 将_____
- 拉氏不变量
  - _____
  - 意义
    - _____
  - 结论
    - _____
    - _____
  - 衍射限制
    - 圆孔：$R = f\theta =$
    - 矩形：$d = f\theta =$

- 第六章
  - Entanglement
    - Qubit

      1q比特：$|\phi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$

      nq比特：2^n个状态
    - EPR(Einstein, Podolsky, Rosen)态
      - $|\Phi^{\pm}\rangle =$
      - $|\Psi^{\pm}\rangle =$

        Bell基——_____
    - 密度矩阵
      - $\rho^+ = |\Phi^+\rangle\langle\Phi^+| = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
      - 若经典分布：$\rho^c = \frac{1}{2}|00\rangle\langle 00| + \frac{1}{2}|11\rangle\langle 11| = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
    - 观测非对角元（假设编码在偏振）

      假设对第一个比特做正交测量：

      $\langle\psi_A| = \alpha^*\langle 0| + \beta^*\langle 1|; \langle\psi_A^{\perp}| = \beta\langle 0| - \alpha\langle 1|$

      往$\langle\psi_A|$ 方向测量：

      $\langle\psi_A|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(\alpha^*|0\rangle + \beta^*|1\rangle) \Rightarrow P = Tr(|\psi_A\rangle\langle\psi_A|\rho^+) = \frac{1}{2}(|\alpha|^2 + |\beta|^2) = \frac{1}{2}$

      归一化：$\sqrt{2}(\alpha^*|0\rangle + \beta^*|1\rangle)$

      $\langle\psi_A|\rho|\psi_A\rangle = \frac{1}{2}(\alpha^*|0\rangle\langle 00| + \beta^*|1\rangle\langle 11|)|\psi_A\rangle = \frac{1}{2}(|\alpha|^2|0\rangle\langle 0| + |\beta|^2|1\rangle\langle 1|)$

      归一化：$(|\alpha|^2|0\rangle\langle 0| + |\beta|^2|1\rangle\langle 1|)$

      往$\langle\psi_A^{\perp}|$方向测量：

      $\langle\psi_A^{\perp}|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(\beta|0\rangle - \alpha|1\rangle),\ P = \frac{1}{2}$

      $\langle\psi_A^{\perp}|\rho|\psi_A^{\perp}\rangle = \frac{1}{2}(|\beta|^2|0\rangle\langle 0| + |\alpha|^2|1\rangle\langle 1|)$

      这时候我们舍弃$\langle\psi_A^{\perp}|$的测量结果（把它反射掉之类的）

      然后用偏振片测量b比特上的结果：

      对$\sqrt{2}(\alpha^*|0\rangle + \beta^*|1\rangle)$：旋转偏振片，光强随角度$\theta$变化，$\alpha, \beta$的相位与态有关。

      对$(|\alpha|^2|0\rangle\langle 0| + |\beta|^2|1\rangle\langle 1|)$：光强恒定在$\frac{1}{2}$，且$\alpha, \beta$的相位与此时的态无关。

      (本质是改变测量基矢，但不用这么麻烦，单比特线偏振光/自然光直接测就是。)
  - Cat
    - 微观态与宏观态的纠缠

      $\frac{1}{\sqrt{2}}[|0\rangle \otimes |Live\rangle + |1\rangle \otimes |Dead\rangle]$

      为何是写成叠加态而不是混态？关键是有无外部自由度，是否是封闭系统。

      （参见Sakurai 3.4）
  - Application
    - Metrology/sensor

      Mach-Zehnder interferometer:_____。

      ϕ_0：可以用来调节到余弦函数一阶导最大处以获得做大信号变化。

      _____ → 干涉输出 _____

      N-bits GHZ state时：_____ ⇒ _____

      故$SNR \propto$ $\Leftrightarrow Classical\ case: repeated\ N\ times, SNR \propto$
    - Quantum correction

      利用纠缠抵御局域的噪声。

      $|0\rangle + e^{i\phi}|1\rangle \xrightarrow[bit\ flip]{noise} |1\rangle + e^{i\phi}|0\rangle = |0\rangle + e^{-i\phi}|1\rangle$

      利用三比特编码，另外两个比特即可纠错。

      $|000\rangle + e^{i\phi}|111\rangle \xrightarrow{noise} |100\rangle + e^{i\phi}|011\rangle$
    - Quantum teleportation

      Alice有一个单比特未知态:$|\chi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$

      准备一个bell态$|\Psi^-\rangle$,前一个比特归Alice，后一个归Bob：

      _____ = _____ = _____

      Alice测量第一个比特：随机得到四个Bell基中的一个。并把测量结果告诉Bob。

      Bob根据测量结果，选择泡利操作来还原得到$|\chi\rangle$。
    - Communication——teleportation

      _____ + _____ → $|\chi\rangle$传到B处。

      漏洞：_____
    - Quantum Swapping (Entanglement Swapping)纠缠变换

$=$ _____

$=$ _____，其中$\{|\chi_0\rangle, |\chi_1\rangle\}$未归一化。

$=$ _____

于是只要12联合测量并信息发给3，3根据信息做测量，即可把3与4纠缠在一起。

漏洞：_____？

- Entanglement purification
  - Target $|0\rangle, p \ll 1$

    2路作测量$\begin{cases} \text{测到}|0\rangle (P = 1-p), 1\text{路导通} \\ \text{测到}|1\rangle\ (P = p), 1\text{路堵塞，重复直到得到}0 \end{cases}$
  - 线路如果有噪声

    _____ $+$ _____

    $\xRightarrow{\text{只保留2路测量为零的结果}}$

    此时1路为零的概率：$\frac{(1-p)^2}{(1-p)^2+p^2} > 1-p$ 若$p < \frac{1}{2}$
- 量子中继
  - Photon Loss Problem: _____
  - Decoherence Problem: _____
  - General requirement
    - _____
    - _____
    - _____

- Photon-photon Entanglement

  SPDC$\begin{cases} Type\ I: e \to o + o \\ Type\ II: e \to e + o \end{cases}$
  - 参量下转换：$\omega_p = \omega_s + \omega_i$;
  - 哈密顿量：$H = e^{iHt}|\phi_p\rangle|0_s 0_i\rangle \to$ _____ $; \beta \ll 1$

    $\sqrt{2 - e^{\beta}} \approx 1$
  - 时序编码

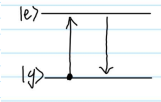
    _____

    $\xRightarrow{\text{只要双光子子空间}}$

    (注意测量要在计算结束后才进行)
  - 相位匹配（能量守恒+动量守恒）

    $\begin{cases} \hbar\omega_p = \hbar\omega_s + \hbar\omega_i \\ \vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i \end{cases}, |\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda} =$

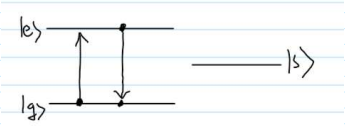
    方法：
    - _____
    - _____
    - _____ ; _____
- Photon-Atom Entanglement
  - 自发辐射



原子(lifetime:50ns)

我们等$< 50ns$时间，系统处于 $|e\rangle \otimes |0\rangle + |g\rangle \otimes |1\rangle$纠缠态

- 亚稳态： $|g\rangle, |s\rangle$都是长寿命的态（可作储存器）



$(\alpha|g\rangle + \beta|s\rangle) \quad \otimes |0\rangle \xrightarrow{\pi\text{脉冲}} (\alpha|e\rangle + \beta|s\rangle) \otimes |0\rangle \xrightarrow{\text{等}100\text{ns}} (\alpha|g\rangle|1\rangle + \beta|s\rangle|0\rangle)$纠缠态

- 实现2个远程的物理储存器的纠缠

- 第七章
  - 锁相放大技术
    - _____：_____
    - 理想的弱信号:$S(t) = \sum_n e_n \cos(\omega_n t + \theta_n)$

      e_n 是我们需要测量的量。
    - 参考信号（必须的）： $s_r(t) = e_r \cos(\omega t + \theta)$

      若弱信号只有一个单傅里叶分量

      $s_s(t) = e_s \cos(\omega_0 t + \theta_0)$

      $E = s_s(t) s_r(t) \approx \frac{1}{2}\cos(\Delta\omega t + \Delta\theta)$ (滤掉高频)

      则特定频率信号测量转换为直流信号测量。

      若$S_s = e_s \cos(\omega_0 t + \theta_0) + e_n \cos(\omega' t + \theta')$

      则$E_0 \approx \frac{1}{2} e_r e_s \cos(\Delta\omega t + \Delta\theta) + \frac{1}{2} e_r e_n \cos((\omega - \omega')t + \Delta\theta')$

      若$\omega - \omega' \gg \Delta\omega$, 则我们可以把noise去掉。
    - 实际处理：取$\Delta\omega = 0$，取参考信号振幅为1（依赖相敏检测器PSD处理）

      得到随相位漂动的直流慢变信号。取最大值即可得到e_s。

      - PSD

        _____
      - 信号通道

        - 前置放大器

          _____。
        - 多级可变增益放大器

          _____
        - 补偿放大器

          _____。
      - BPF带通滤波器

        _____
      - 参考通道

一般需要_____

需要相位调节。

- 低通放大器

  _____

- 正交型锁相放大器

~ 7

- 实际应用考虑
  - 动态范围
    - _____（MDS）

      _____。
    - _____(OVL)

      _____
    - _____(FS)

      _____
  - 定义与意义

    总输入动态范围=_____（_____）

    动态储备 =（_____）

    输出动态范围=（_____）

    OVL与FS的区别在于_____
- 三种工作模式
  - 高稳定模式：_____
  - 高储备模式：_____
- 关于过载的讨论*
  - 输入信号过强，PSD过载
  - 信号通道噪声或者干扰过大，PSD过载
  - 输出直流放大过度，输出过载
  - 危害：非线性放大导致信号失真。
  - 因素：
    - 强白噪声
    - 与信号频率相近干扰（最易出现）
    - 远离信号频率的干扰（最不易发生）
  - 处理：
    - 特定频率干扰：陷波滤波
    - 宽带干扰导致过载：增加动态储备，调低信号通道A1的放大倍数
    - 直流输出过载：降低输出放大器A2的放大倍数

- Lockin实际应用——微弱荧光或拉曼谱(版本B)

- Chopper：_____。但是会_____，傅里叶后高频低频都有，故锁相时有不少噪声。前置放大器需要_____。
- 锁相放大器测的为低频信号，电流变换频率低，且不需要单光子计数模式。故此处PMT可以_____。当测量单光子信号时，电阻大会让_____，高频时_____。PMT用的是_____，_____。_____。

- 第八章
  - Boxcar

    适用于若脉冲信号恢复
    - 原理：_____

      实际信号$= S_{in} + N_{in}$

      N次平均取样:$S_{out} =$ ，$N_{out} =$

      信噪比: $\frac{S_{out}}{N_{out}} =$
    - 实际方法：

      _____

      _____

      采样时间： $t =$

- 特点：
  _____
  _____
  _____
  _____
- 适用范围：
  _____
  _____
  _____
  _____、_____，_____。

- Boxcar实际应用——荧光衰减（版本B）
  - A/B相当于把信号做了归一
- 四种办法
  - _____：_____。
  - _____：_____。
  - _____：_____。
  - _____：_____。