

量子密钥分发

关于预习报告和实验报告的注意事项：

1. 实验前需认真阅读《量子密钥分发课前预备》和《量子密钥分发实验讲义》两个文档；
2. 实验前完成预习报告（如果预习报告是小组共同完成，需清楚说明或标记每个人的贡献）；
3. 实验前独立完成《量子密钥分发课前预备》中的“实验前预习思考题”（小组内可以讨论，但每个人必须独立撰写答案）；
4. 实验后完成一份完整的实验报告，如果实验报告是小组共同完成，需清楚说明或标记每个人的贡献；
5. 实验后完成《量子密钥分发实验讲义》中的“实验后”思考题（小组内可以讨论，但每个人必须独立撰写答案）。

【实验安全注意事项】

1. 系统工作温度在 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 的环境中，尤其避免过高温度下使用本系统。
2. 实验元件会单独给出，实验前检查是否完整。除给出的元件外，整体密钥分发系统不要触碰。
3. 镜筒等光机械安装时，螺丝拧紧避免晃动。光机械元件的调节旋钮，安装前，将螺丝行程旋至中间位置，方便实验过程中调节。
4. 所有镜片避免用手接触光学面，拿捏过程中，光学面垂直于平台，避免灰尘，使用完收入对应的盒子中。安装镜片需靠近台面，避免镜片跌落摔碎。
5. 探测器光电倍增管打开盖子前，一定要确认暗室条件并且无激光直接照射探测面。使用完后，断电并盖好盖子。
6. 不要使眼睛与光路处于同一水平面，不要用手直接接触激光，激光为 30mw 紫外激光，必须戴好护目镜。

【实验目的】

了解量子物理中波粒二象性的基本特性，了解 BB84 密钥分发的物理原理及其安全性基础，具体方面如下：

1. 掌握量子叠加（概率幅叠加）与经典混合（概率相加）的差异；
2. 掌握单光子的标定；

3. 掌握单光子的探测及相应探测器效率的测量；
4. 掌握密钥分发过程数据处理。

【实验后思考题】

- 1、量子相干叠加与经典概率混合的本质区别是什么，为什么说经典概率混合是量子相干叠加的特例？
- 2、是否可以通过直接衰减任意的光源，比如白炽灯，到单光子级别来得到真正的单光子源吗？（真正的单光子源是指每次触发可以确定性的得到一个仅包含一个光子的光脉冲信号）。
- 3、理解单光子探测器后脉冲效应的产生原因。
- 4、理解单光子探测器的暗计数原理，并设计实验装置测量探测器的暗计数率。
- 5、对基后的数据，为什么会有误码出现，如何降低误码？
- 6、部分遮挡信道后，QKD 系统的计数率和误码率会怎么变化，为什么？

【仪器用具】

表 1-1 量子叠加与经典混合差异的用具

编号	仪器用具名称	数量	主要参数（型号，规格等）
1	准直激光器	2	波长：404nm，最大功率：150mW
2	偏振分光棱镜	2	波长：404nm，消光比>500
3	半波片	2	波长：404nm，零级
4	小型磁性底座		MB105
5	PH 系列杆架	6	PH102
6	SP 系列接杆	6	SP104
7	激光器镜架	6	OM311
8	精密棱镜台	2	PPM101
9	偏光镜架	2	PM101
10	可见光功率计	2	PM100、S120VC
11	直流稳压电源	1	GPD-3303D

表 1-2 单光子标定的用具

编号	仪器用具名称	数量	主要参数（型号，规格等）
1	密钥分发系统	1	波长：404nm
2	可见光功率计	1	PM100、S120VC

表 1-3 单光子的探测及相应探测器探测效率测量的用具

编号	仪器用具名称	数量	主要参数（型号，规格等）
1	反射镜	1	波长：404nm，45 度入射
2	滤波片	1	波长：405nm，带宽：3nm
3	光纤准直器	1	F671FC-405
4	反射镜折叠架	1	OM402
5	透镜固定架	1	LH102
6	光纤耦合架	1	PFC201
7	小型磁性底座	3	MB105
8	PH 系列杆架	3	PH102
9	SP 系列接杆	1	SP104
10	SP 系列接杆	2	SP134
11	可见光功率计	1	PM100、S120VC
12	密钥分发系统	1	波长：404nm

表 1-4 密钥分发过程数据处理的用具

编号	仪器用具名称	数量	主要参数（型号，规格等）
1	密钥分发系统	1	波长：404nm

【实验原理及步骤】

随着计算机科学技术日新月异的发展，经典密码系统的安全性越来越受到挑战。经典密码体制主要包括对称密钥体制和非对称密钥体制两大类。对称密钥密码体制最主要的问题是如何进行两端的密钥分发管理，最优秀的算法，如果密钥在分发时泄露，则整个安全体系毁于一旦；而公钥密码则有效的避免了密钥分发管理的难题。公钥密码算法都是基于一些复杂的数学难题，例如广泛使用的 **RSA** 算法就是基于大整数因子分解这一著名的数学难题。所以，公钥密码的安全性始终无法得到严格意义上的数学证明，而只能依赖于不可靠的计算复杂性。例如：600 台计算机需要花费 17 年时间才能质因数分解一个 129 位的阿拉伯数字。而随着计算机技术的不断发展，特别是量子计算机的不断研究，研究表明如果使用一个 2000 个量子比特的量子计算机，只需要 1 秒钟就可以破解成功。所以量子计算给经典密码带来了巨大的威胁。

量子密钥分发完美的解决经典密码体系中密钥安全分发的问题。量子密钥分发的安全性不是通过算法的复杂性保证的，而是基于量子力学的物理定律保证的，分别是测量塌缩理论、海森堡不确定原理、量子不可克隆定律；然而上述定律保证量子密钥分发安全性的基础是单

光子量子态的传输。例如：A 和 B 通过单光子量子态的编码、传输、解码、探测、后处理等过程，A 和 B 可以得打对称的安全密钥，再通过一次一密加密技术实现信息论条件下的信息安全传输。

我们（1）通过设计量子叠加与经典混合的差异实验，掌握量子态的特性，研究量子密钥分发中的量子态与经典态到底存在的区别。（2）通过设计单光子的标定实验，光子的探测及相应探测器效率的测量实验，以研究单光子的近似制备，掌握单光子的测量方法。（3）通过设计量子密钥分发的数据处理实验，掌握量子密钥分发过程的基本原理和流程。

1. 实验 1：量子叠加（概率幅叠加）与经典混合（概率相加）的差异

1.1 实验原理

偏振分光棱镜（PBS）：分光棱镜根据光的偏振态进行分光，当一束光垂直入射面入射，水平分量的光将会透射，垂直分量的光将会反射；即透射端口为水平偏振光，反射端口为垂直透射光。不考虑光子间的关联，单个光子的偏振态宏观表现为光束的偏振。

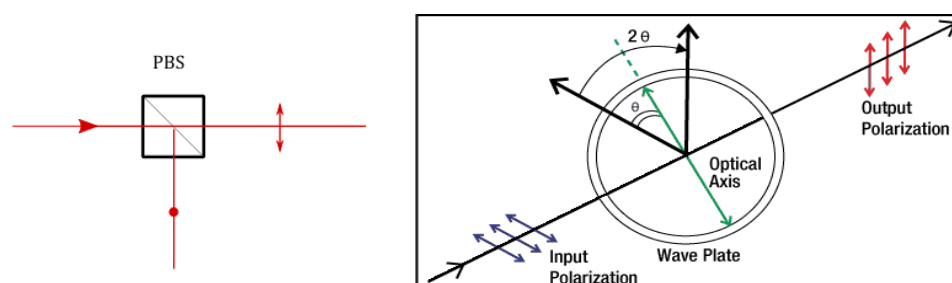


图 1-1 PBS 和半波片原理图

例如，量子密钥分发过程中，光子的量子态 D 宏观表现为一个与水平面呈 45° 夹角的线偏光。实验上可以利用一个起偏元件，例如偏振分光棱镜的透射端来产生一个水平偏振的光，然后利用半波片旋转 θ 角来制备一个偏振方向为 2θ 的线偏光。那么对于 45° 偏振光的制备，半波片需要旋转 22.5° 。此时，如果通过一个偏振分光棱镜后，在透射端和反射端探测功率，得到的比值为 0.5:0.5；如果先放置一个 22.5° 的半波片再在偏振分光棱镜后检测，根据图 1 所示，则得到反射端口功率为 0。上述两种现象，只有后者可以作为检测 45° 偏振光的方法，为什么？因为前者没有考虑水平偏振和竖直偏振方向之间的夹角，例如，输入一个左旋光或右旋光一样得到前者现象。

得到检测偏振态的方法后，我们就接着探究是否可以通过将水平偏振光与竖直偏振光按 0.5:0.5 的比例混合得到 45° 偏振光。

1.2 实验内容及步骤

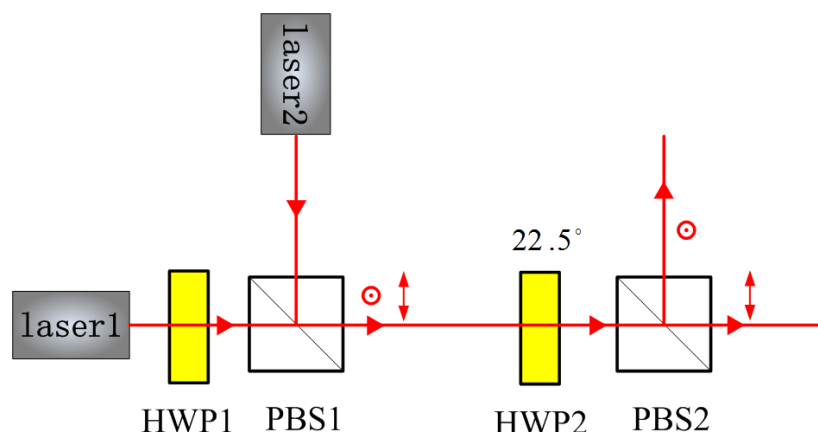


图 1-2 经典混合测量示意图

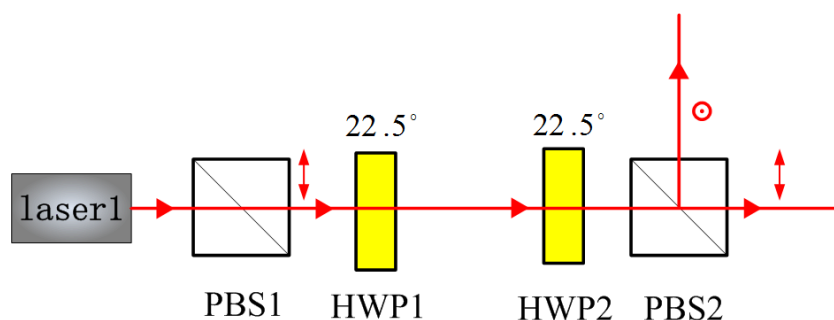


图 1-3 量子叠加测量示意图

- 1) 以激光器出射光高度为基准，安装光学元件，使光束从轴心位置通过；
- 2) 放置激光器 laser2，放置 PBS1，测量 PBS1 反射端功率，记下数值。按图示位置放置激光器 laser1 和半波片 1 (HWP1)。这里需要将 laser1 出来的光与 laser2 出来的光调重合，可以通过调节激光器位置和 PBS1 摆角使两束光重合；测量示意图如图 1-2 所示；
- 3) 关闭 laser2 激光，通过半波片 1 调节 laser1 激光偏振，使 laser1 在透射端功率与之前测的 laser2 功率一致；
- 4) 关闭 Laser2，放置半波片 2 和 PBS2，转动半波片 2 的角度 360 度，记下转动不同角度时，PBS2 出射端的功率变化，确定出光功率最大或最小时刻的镜架的刻度，此时的刻度即为半波片的 0° 光轴（半波片光轴对应角度）。此步骤一定要注意半波片的光轴和镜架的 0 刻度不一定重合，所以需要通过实验测试确定半波片的光轴。
- 5) 将半波片 2 的光轴转到与水平位置呈 22.5° ，打开 laser2 处的激光，检测合束的光是否为 45° 偏振光，即单光子的量子态是否为 D；
- 6) 关闭 laser2 激光器，如图 1-3 所示，直接在 PBS1 后放置 22.5° 半波片 1（请先思考如何确定此处半波片 1 的光轴），制备量子态 D，同样装置检测制备态（半波片 2 和 PBS2 不要移动）。

1.3 实验数据记录及处理

表格格式见附录表一：量子叠加与经典混合差异测量实验数据记录表。

2. 实验 2：单光子的探测及相应探测器效率的测量

2.1 实验原理

光子计数是一种测量极弱光的检测方法，具有计数稳定性高、抗干扰能力强、低噪声、高探测效率等特点，应用于弱光精密测量分析领域，在生物、医学、化学等各个领域的发光分析技术中已经得到普遍应用¹。

微弱光通过探头前端面窗口入射到光电倍增管的光电面，激发出电子，经电子倍增后被阳极收集，由阳极输出一个电流脉冲，再由放大器转换为电压脉冲并放大，经甄别、成形后转换为一个具有固定脉冲幅度和宽度的电压脉冲输出。

此时将单光子探测器直接放在出口处接收，通过空间偏振 QKD 系统可以得到单光子探测器的扫描计数 M ；则：

$$M = f \times \mu \times \eta$$

式中 η 为单光子探测器的探测效率；由于 f 、 μ 、 M 已知， η 则可计算出。

3.2 实验内容及步骤

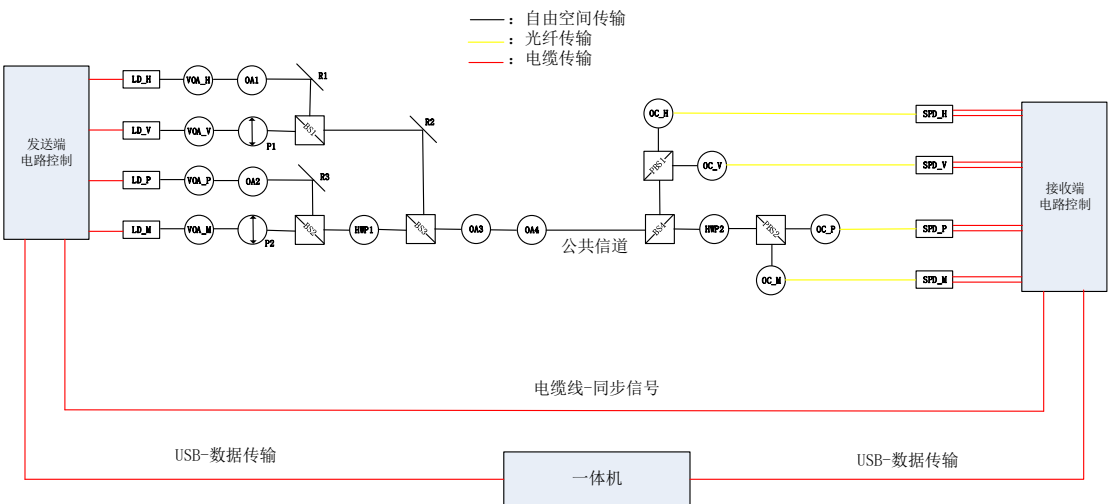


图 2-1 探测器效率测量示意图

1. 如图 2-1 所示，利用图中 M 的光路进行单光子的探测和探测器探测效率的测量；其中 M 路光路包括：LD_M、VOA_M、P2、BS2、HWP1、BS3、OA3、OA4、BS4、HWP2、PBS2、OC_M、SPD_M。
2. 发送端电路控制模块上电，启动 QKD 软件，点击 QKD 软件中的触发 M 路激光器发光；使用可见光功率计测量 M 路激光器输出功率并记录；

¹ 目前的单光子探测技术主要有光电倍增管、雪崩二极管、超导单光子探测三种探测器。在本实验中，主要采用光电倍增管来进行单光子探测。

3. 查看激光器 LD_M 每秒发射脉冲数，理论计算，当到达单光子探测器的平均光子数为 0.1 光子/脉冲时，LD_M 和 SPD_M 之间需要多少衰减；
4. M 路光路中除可调衰减元件，其余元件的衰减值均在实验平台上给出，利用上述理论计算值和其余元件的衰减值，推导当到达单光子探测器的平均光子数为 0.1 光子/脉冲时，可调衰减元件需增加多少衰减；
5. 转动可调衰减片，使用功率计测量衰减，使得其衰减和上部分推导值一致停止转动；
6. 接收端电路模块上点，点击 M 路扫描，得到 M 路计数值并记录；（实际扫描时，会出现四路计数，分别对于四个探测器，其中 SPD_H 对应 Scan0 计数，SPD_V 对应 Scan1 计数，SPD_P 对应 Scan2 计数，SPD_M 对应 Scan3 计数）
7. 使用 M 路探测计数值计算出单光子探测器的探测效率。（扫描模式每秒脉冲数设置为 10MHz）

2.3 实验数据记录及处理

表格格式见附录表二：单光子的探测及相应探测器效率的数据记录表。

3. 实验 3：单光子的标定

3.1 实验原理

在 BB84 协议中，信息的物理载体是单个光子。因此在量子密钥分发实验中应当使用某种每触发一次就发射且仅发射一个光子的设备作为光源，这样的设备被称为“单光子光源”。目前，不同的实验室基于 NV 色心、量子点等技术已经制备了高亮度的单光子源，但是其设备还较为复杂、成本也比较高。因此，在现阶段的单光子量子密钥分发实验中，比较常用的方法是用经过强衰减的脉冲激光代替单光子光源²。

实验的偏振 QKD 系统通过调节光路衰减模块，包括固定衰减片和圆形可调衰减片，使得密钥分发系统发送端出射光子达到单光子水平。实验用的 404nm 脉冲激光器的发光重复频率为 10MHz。单个 404nm 光子的能量为：

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = 6.626 \times 10^{-34} \times 3 \times \frac{10^8}{404 \times 10^{-9}} = 4.92 \times 10^{-19} \text{J}$$

上式中，h 为普朗克常量，c 为光速，λ 为光波长。

因此，当计算每个脉冲平均光子数为 0.1 个光子时出口需要的功率。

$$P = \mu \times f \times E = 0.1 \times 10 \times 10^6 \times 4.92 \times 10^{-19} = 4.92 \times 10^{-13} \text{W}$$

上式中，μ 为平均光子数脉冲，f 为光触发频率，P 即为光功率。设脉冲激光器发光功率为 P₀，则从激光发光出口处所加衰减值为

² 严格讲，当激光二极管产生光脉冲的强度被大幅度衰减值极弱时，其光子数分布服从泊松分布。即每个光脉冲中包含 n 个光子的概率为 $P_n = e^{-u} u^n / n!$ ，其中 u 表示光脉冲的平均强度。因此，强衰减激光仅是一种近似单光子源，当 $u \approx 0.1$ 量级时，这是一种较好的近似。

$$10\log \frac{p_0}{p} = ?$$

时，单光子制备完成。例如：激光器发光功率测量结果为 $20 \mu W$ ，则所加衰减值为：

$$10\log \frac{20 \times 10^{-6}}{4.92 \times 10^{-13}} = 76.1\text{dB};$$

即在脉冲激光器出口处加衰减 76.1dB ，便可得到平均光子数为 0.1 个光子/脉冲的激光。

严格来说，单光子的标定需要额外的高功率激光器来标定衰减器的衰减值，但为了实验的简单，在本实验中采用单光子探测器来标定衰减器的衰减值。当标定单光子为 0.1 光子/脉冲时，则到达单光子探测器的计数应该=激光器发光频率(f) \times 平均光子数脉冲(μ) \times 单光子探测器探测效率(η)= $10 \times 10^6 \times 0.1 \times 20\% = 200\text{K}$ ；（此处根据实验所使用单光子探测器的参数，设定探测器效率为 20% ）。

3.2 实验内容及步骤

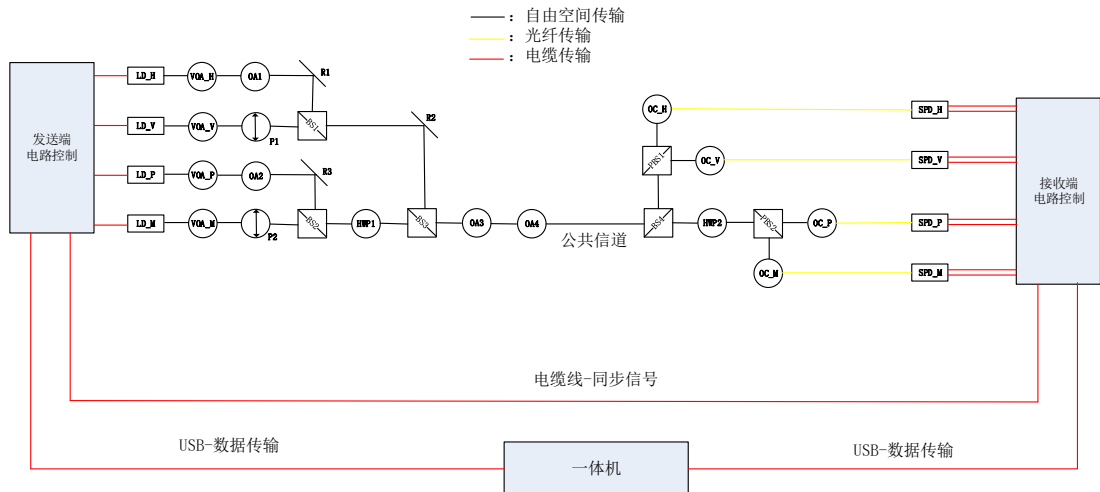


图 3-1 单光子标定测量示意图

1. 单光子的标定如图 3-1 所示，H、V、P、M 路光路到达公共信道时，出射光为单光子状态；
2. 理论计算当公共信道平均光子数为 0.1 光子/脉冲时，经过接收端光路衰减到达单光子探测器的探测计数 n ；（以 M 路光路为例计算）
3. 发送端和接收端电路控制模块上电，启动 QKD 软件；
4. 选中 QKD 软件 Alice-Bob 链路，点击软件上方的工具栏，选择扫描模式；
5. 选择 M 路扫描，调节 VOA_M 可衰减片，使得 SPD_M 扫描计数接近 n ；
6. 依次分别选择 H、V、P 路扫描，也使得对应的探测器扫描计数接近 n ；上述过程即完成密钥分发系统的单光子标定。

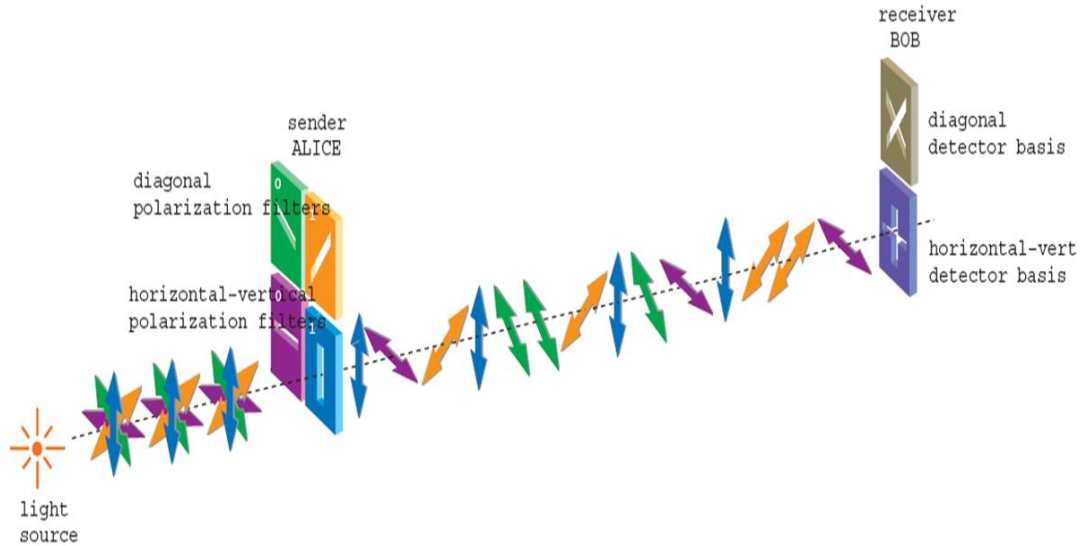
3.3 实验数据记录及处理

表格格式见附录表三：单光子的标定实验数据记录表。

4. 实验 4：密钥分发过程数据处理

4.1 实验原理

发送方 Alice 制备一系列的光子发送给接收方 Bob，每个光子的偏振态随机地从水平偏振态 $|\rightarrow\rangle$ 、竖直偏振态 $|\uparrow\rangle$ 、右斜 45 度偏振态 $|\nearrow\rangle$ 和左斜 45 度偏振态 $|\nwarrow\rangle$ 四个偏振态中选取，如果 Alice 发送光子的偏振态为水平偏振态 $|\rightarrow\rangle$ 或者竖直偏振态 $|\uparrow\rangle$ ，则称 Alice 选择+基制备光子，如果 Alice 发送光子的偏振态是右斜 45 度偏振态 $|\nearrow\rangle$ 或者左斜 45 度偏振态 $|\nwarrow\rangle$ ，则称 Alice 选择×基制备光子。



Alice产生的随机序列	0	0	1	1	1	0	1	0	1
Alice选用的基	+	×	+	+	×	×	×	+	×
光子的偏振态	\rightarrow	\nearrow	\uparrow	\uparrow	\nwarrow	\nearrow	\nwarrow	\rightarrow	\nwarrow
Bob随机选择的基	+	+	×	+	+	×	+	+	×
Bob的测量结果	\rightarrow	\rightarrow	\nearrow	\uparrow	\uparrow	\nearrow	\rightarrow	\rightarrow	\nwarrow
对基结果	√			√		√		√	√
生成的密钥序列	0			1		0		0	1

图 4-1 密钥分发原理图

接收方 Bob 与 Alice 完全独立地随机选取+基和 X 基测量 Alice 发送过来光子的偏振态，并记录下测量到光子的位置信息。

Alice 和 Bob 对基，即双方仅保留基相同（Alice 制备基和 Bob 测量基）并且 Bob 测量到光子位置的光子偏振态信息，双方基不同时则直接抛弃相关信息。

Alice 和 Bob 将保留的光子偏振态信息转换成相应的密钥比特信息，即对基后保留的光子偏振态按水平偏振态 $|\rightarrow\rangle$ 和右斜 45 度偏振态 $|\nearrow\rangle$ 转换为比特“0”，竖直偏振态 $|\uparrow\rangle$ 和左斜 45 度偏振态 $|\nwarrow\rangle$ 转换为比特“1”。

Alice 和 Bob 通过经典公开信道对上一步中获得的密钥比特进行处理，其过程主要分成纠错和保密放大来进行，纠错就是使得密钥比特一致，而保密放大（Privacy Amplification）就是将可能泄漏给窃听者的信息剔除掉。

实际量子密钥分发时，用两位的 bit 编码表示光子信息，其中个位 bit 代表基矢信息，十位 bit 代表密钥信息；例如：Alice 端水平偏振编码为 00，垂直偏振编码为 10，右斜 45 度偏振编码为 01，左斜 45 度偏振编码为 11；相应的 Bob 端四路探测器探测到信号，分别也是按照上述编码方式进行编码。

密钥分发的过程中，光子传输探测后，会得到一系列的这种两位编码的信息数据，如何从这些数据中提取出有用信息，需要经过对基、纠错、保密放大等过程，以保证密钥的安全性。当然，考虑到是否存在窃听，需要对系统的每次传输过程进行误码估计。以保证此次的传输数据有效。

Alice 和 Bob 两端传输探测完成后会得到一系列两位编码的信息数据，首先需要对两端的数据进行对基，再对对基的数据进行比对，计算出系统的误码率。当误码率低于理论安全界限 11%时，本次传输有效，继续进行后续处理过程。

4.2 实验内容及步骤

1. 发送端和接收端电路控制模块上电，启动 QKD 软件；
2. 点击 QKD 的接收端控制界面（Bob-Alice），选择误码平均采样率后点保存；点击 QKD 的发送端控制界面（Alice-Bob），勾选中间密钥输出功能，点击保存；选中工具栏中的蓝色 R（密钥随机分发），点击右侧的运行按钮；

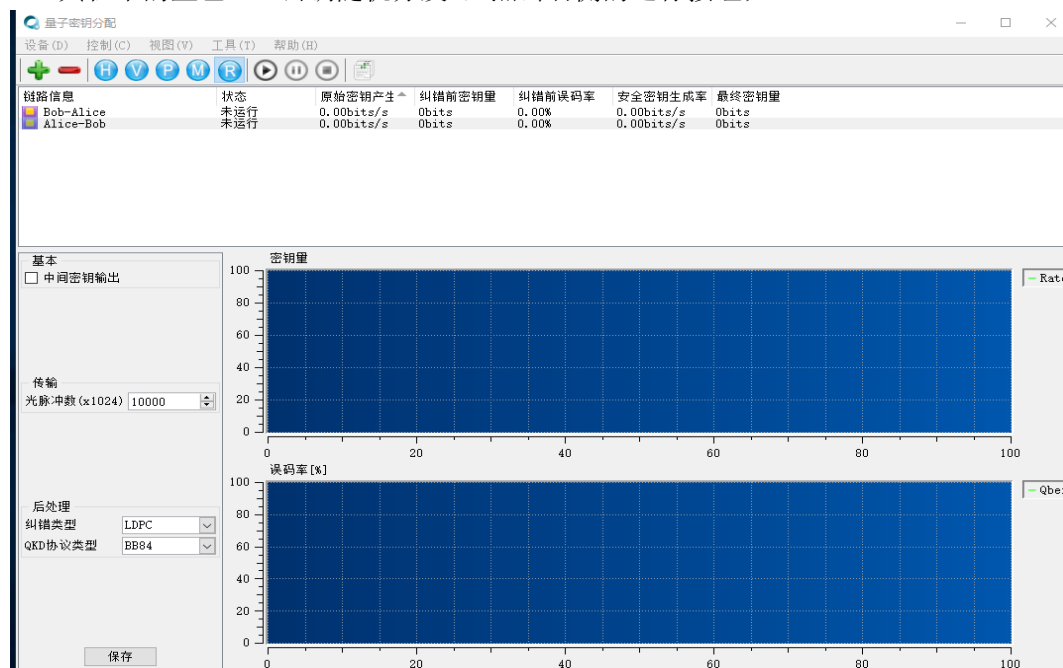


图 4-2 QKD 发送端界面

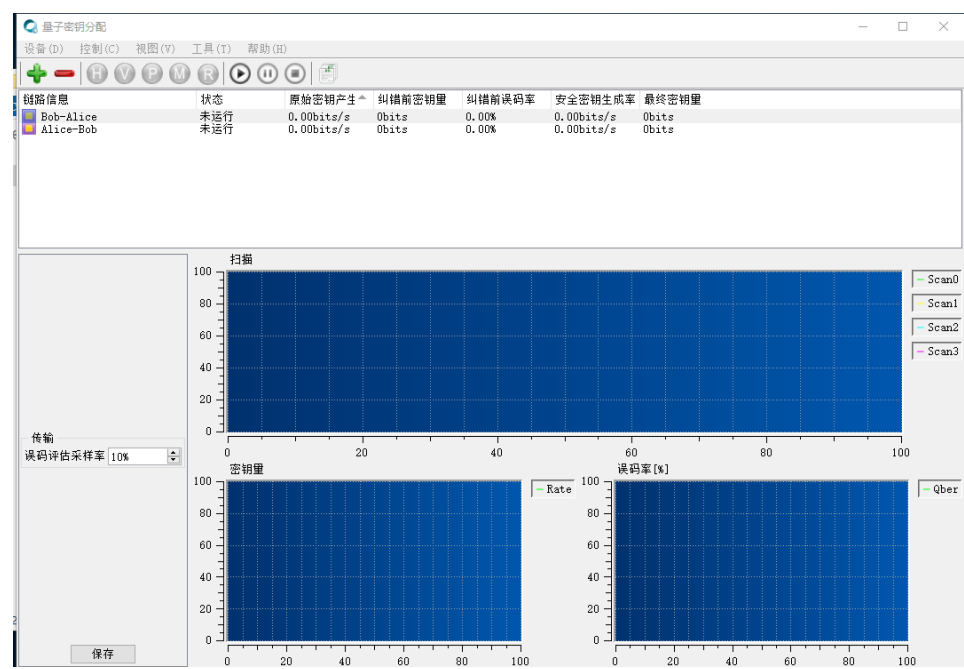


图 4-3 QKD 接收端界面

- 待系统运行 5-10 秒后，点击停止按钮。此时，记录下系统的平均误码率；
3. 在桌面的自由空间偏振文件夹中查看中间密钥输出的数据，输出的数据主要包括原始数据(raw)，对基后数据(sift)，纠错后数据(reconcile)，最终安全密钥数据(key)，对应的发送端分别为：transmitter-raw、transmitter-sift、transmitter-reconcile、transmitter-key，接收端分别为：receiver-raw、receiver -sift、receiver -reconcile、receiver -key；
 4. 打开桌面上的软件 Beyond Compare，选择文本比较，进入界面，点击最上方的会话选项，比较文件用，选择十六进制文件。分别打开 transmitter-sift 和 receiver -sift，然后进行误码估计，由于 QKD 软件保存的数据格式均为十六进制，所以实际误码估计时需要将十六进制转为二进制文件进行比对。（例如总共 100 个二进制数据，两端有 5 个错误位，则误码率为 5%）
 5. 采用毛玻璃或者纸片遮挡信道（在可调衰减片后遮挡），观察系统计数率和误码率变化情况。

4.3 实验数据记录及处理

表格格式见附录表四：密钥分发过程数据处理实验数据记录表。

【参考文献】

苗二龙，自由空间量子密钥分配，博士学位论文，中国科学技术大学，2006 年；

陈彦，基于单光子源的量子密码术研究，博士学位论文，电子科技大学，2007 年。

【附录】

一、量子叠加与经典混合差异测量实验数据记录表：

序号	名称	数据	单位
1	Laser2 + PBS1 反射功率		dbm
2	Laser1 + PBS1 透射功率		dbm
3	半波片 2 转动 0°	PBS2 透射功率	dbm
		PBS2 反射功率	dbm
4	半波片 2 转动 22.5°	PBS2 透射功率	dbm
		PBS2 反射功率	dbm
5	半波片 2 转动 45°	PBS2 透射功率	dbm
		PBS2 反射功率	dbm
6	半波片 2 转动 67.5°	PBS2 透射功率	dbm
		PBS2 反射功率	dbm
7	半波片 2 转动 90°	PBS2 透射功率	dbm
		PBS2 反射功率	dbm
8	半波片 2 转动 112.5°	PBS2 透射功率	dbm
		PBS2 反射功率	dbm
9	半波片 2 转动 135°	PBS2 透射功率	dbm
		PBS2 反射功率	dbm
10	半波片 2 转动 157.5°	PBS2 透射功率	dbm
		PBS2 反射功率	dbm
11	半波片 2 转动 180°	PBS2 透射功率	dbm
		PBS2 反射功率	dbm
12	半波片 2 转动 202.5°	PBS2 透射功率	dbm
		PBS2 反射功率	dbm
13	半波片 2 转动 225°	PBS2 透射功率	dbm
		PBS2 反射功率	dbm
14	半波片 2 转动 247.5°	PBS2 透射功率	dbm
		PBS2 反射功率	dbm
15	半波片 2 转动 270°	PBS2 透射功率	dbm
		PBS2 反射功率	dbm

16	半波片 2 转动 292.5°	PBS2 透射功率		dbm
		PBS2 反射功率		dbm
17	半波片 2 转动 315°	PBS2 透射功率		dbm
		PBS2 反射功率		dbm
18	半波片 2 转动 337.5°	PBS2 透射功率		dbm
		PBS2 反射功率		dbm
19	半波片 2 转动 360°	PBS2 透射功率		dbm
		PBS2 反射功率		dbm
20	半波片 2 的光轴转至于水平方向 呈 22.5° 打开 Laser2	PBS2 透射功率		dbm
		PBS2 反射功率		dbm
21	关闭 Laser2 + 放置半波片 1 且光 轴呈 22.5°	PBS2 透射功率		dbm
		PBS2 反射功率		dbm

二、单光子的探测及相应探测器效率的数据记录表

序号	名称	数据	单位
1	LD_M 激光器功率		dbm
2	总需要衰减值		db
3	VOA_M 可调衰减片理论需调节衰减值		db
4	VOA_M 可调衰减片实际调节衰减值		db
5	QKD 扫描 M 路 SPD_M 探测计数值		Hz/s
6	SPD_M 探测器探测效率		%

三、单光子的标定实验数据记录表

序号	名称	数据	单位
1	M 路到达公共信道时为单光子，探测器计数值		Hz/s
2	M 路扫描，SPD_M 计数值		Hz/s
3	H 路扫描，SPD_H 计数值		Hz/s
4	V 路扫描，SPD_V 计数值		Hz/s
5	P 路扫描，SPD_P 计数值		Hz/s

四、密钥分发过程数据处理实验数据记录表

序号	名称	数据	单位
1	QKD 系统软件统计密钥量		Hz
2	QKD 系统软件统计误码率		%

3	QKD 系统误码估计采样率		%
4	手动提取原始数据比例		%
5	对基后数据误码率		%
6	遮挡信道后系统密钥量		Hz
7	遮挡信道后系统误码率		%