《量子技术 双光子偏振纠缠源性能测量方法》

国家标准编制说明

（征求意见稿）

2026 年 11 月

目录

一、工作简况 1
二、国家标准编制原则、主要内容及其确定依据 7
三、试验验证的分析、综述报告，技术经济论证，预期的经济效益、社会效益和生态效益 11
四、与国际、国外同类标准技术内容的对比情况 16
五、以国际标准为基础的起草情况，以及是否合规引用或者采用国际国外标准，并说明未采用国际标准的原因 17
六、与有关法律、行政法规及相关标准的关系 17
七、重大分歧意见的处理经过和依据 18
八、涉及专利的有关说明 18
九、实施国家标准的要求，以及组织措施、技术措施、过渡期和实施日期的建议等措施建议 18
十、其他应当说明的事项 18
附件 1《量子技术 双光子偏振纠缠源性能测量方法》实验测试报告 1 20
附件 2《量子技术 双光子偏振纠缠源性能测量方法》实验测试报告 2 32

一、工作简况

（一）任务来源

2026 年 3 月 2 日，国家标准化管理委员会发布《关于下达 2026 年第二批推荐性国家标准计划及相关标准外文版计划的通知》（国标委发〔2026〕15 号），下达《量子技术 双光子偏振纠缠源表征及测量方法》推荐性国家标准制定任务，计划号为 20260797-T-469，项目周期 18 个月。

本标准由全国量子技术标准化技术委员会（SAC/TC 578）归口，济南量子技术研究院牵头起草。

（二）制定背景

在国家顶层布局和相关部委的大力支持下，我国量子科技正处于从基础研究突破向工程化、产业化和标准化协同推进的关键阶段，急需标准化工作的系统支撑。《国家标准化发展纲要》将“推动标准化与科技创新互动发展”作为重点任务，明确提出在人工智能、量子信息、生物技术等领域开展标准化研究，并在新兴产业、未来产业领域开展标准化研究、制定一批应用带动的新标准。

双光子偏振纠缠源为基于纠缠的量子通信、光量子计算和量子测量实验提供光子对。对这类光源的评价，既要测量输出光子对的数量，也要测量两个光子的偏振关联和纠缠特性。不同测试中，光源输出边界、探测效率修正、符合窗口、偶然符合扣除和保真度定义的选择，会直接影响结果。仅比较符合计数率或某一测量基下的可见度，难以完整说明光源

性能。本标准统一性能参数、测量条件、数据处理和报告要求，为光源研发、产品选型及测试结果比较提供依据。

（三）起草过程

2025 年，济南量子技术研究院围绕双光子偏振纠缠源性能测试方法开展前期研究，完成项目申报材料和标准草案编制，预研阶段项目名称为《双光子偏振纠缠光源性能测试方法》。2025 年 10 月，组织完成《双光子偏振纠缠光源性能测试方法》国家标准立项建议的形式审查和委员技术审查，11 月 3 日-11 月 11 日，TC578 组织全体委员该项目建议进行投票，通过投票后向国家标准委申请立项（投票结果：委员总数 58 人，参与 50 人，赞同 50 人，反对 0 人，弃权 8 人）。

2026 年 3 月 2 日，国家标准化管理委员会发布《国家标准委关于下达 2026 年第二批推荐性国家标准计划及相关标准外文版计划的通知》（国标委发〔2026〕15 号），正式下达《量子技术 双光子偏振纠缠源表征及测量方法》推荐性国家标准制定任务，计划号 20260797-T-469，项目周期 18 个月。任务下达后，技术归口单位全国量子技术标准化技术委员会，会同项目牵头单位济南量子技术研究院，面向领域内相关科研院所、企事业单位、社会团体等，广泛开展了标准起草工作组成员单位/起草专家的征集工作。

2026 年 7 月 30 日，《量子技术 双光子偏振纠缠源表征及测量方法》国家标准启动会暨第一次工作组会议在济南量子技术研究院量子科学大厦召开，会议采用线上线下相结合方式。会议介绍了项目背景与任务要求，宣布标准起草工作

组正式成立，并对标准草案进行了逐条研讨。来自济南量子技术研究院、中国科学技术大学、科大国盾量子技术股份有限公司、国科量子通信网络有限公司、九章（济南）量子科技有限公司等29家单位的40位专家参加会议。会议期间共收到中国标准化研究院等11家单位提出的修改意见33条。

2026年8月，工作组认真研究并完成了对33条意见的处理，形成讨论稿（第二稿），并将讨论稿（第二稿）发送给工作组全体成员单位。

2026年8月27日，《量子技术 双光子偏振纠缠源表征及测量方法》国家标准第二次工作组会议在太原召开，会议采用线上线下相结合的方式，由济南量子技术研究院主办，国网山西省电力有限公司信息通信分公司协办。来自济南量子技术研究院、中国计量大学、国网山西省电力有限公司信息通信分公司、太原理工大学、上海交通大学等26家单位的30位专家参加会议。会议通报了第一次工作组会议意见处理情况，并对标准草案中的术语和定义、性能参数、测量设备、测试方法及测量报告等内容进行了逐条审议。本次会议共收到中国计量大学等12家单位提出的修改意见41条。

2026年9月至10月，工作组认真研究并完成了对41条意见的处理，重点修改了效率定义、参数分类、探测器适用要求、偶然符合扣除和保真度公式等内容。

2026年10月26日，《量子技术 双光子偏振纠缠源表征及测量方法》国家标准牵头单位特邀来自济南量子技术研究院、北京大学、中国科学技术大学、山东大学等4家单位

的 6 位专家就标准草案技术细节进行讨论。会后，起草组根据专家意见对草案结构和技术内容进行了集中梳理，形成通用测量方案。草案按性能参数、测量条件、测量方法、不确定度及测量报告重新组织，明确主要参数和特性参数，保留与双光子偏振纠缠源直接相关的通用测量项。此外，起草组结合工作组和专家意见逐版核对，补充了四个探测端口的相对响应修正、CHSH 线偏振投影的波片设置以及各投影组合测量时间一致的要求，明确了光子对速率计算和单侧置信下限的适用条件，形成讨论稿（第三稿）。

2026 年 11 月，经起草工作组研究论证，为确保标准名称的准确性与规范性，工作组决定将标准名称修改为《量子技术 双光子偏振纠缠源性能测量方法》。

2026 年 11 月 9 日，工作组将讨论稿（第三稿）发送至全体成员单位，并以函审形式召开项目第三次工作组会议。各成员单位代表就讨论稿（第三稿）形成征求意见稿进行表决投票。投票结果显示，同意将工作组讨论稿（第三稿）形成征求意见稿及征求意见稿编制说明，并提交至 TC578 标委会秘书处。具体投票情况如下：参加投票单位 33 家（超过全体成员单位数的 3/4），其中同意 33 家，反对 0 家，弃权 0 家；参加投票专家 39 人，其中同意 39 人，反对 0 人，弃权 0 人。参与投票的全体成员单位和专家均一致同意形成征求意见稿。

（四）主要起草人及其所做的工作

主要起草单位包括济南量子技术研究院、中国科学技术大学、科大国盾量子技术股份有限公司、国科量子通信网络有限公司和九章（济南）量子科技有限公司等。主要起草人及其具体分工见表1。

项目牵头单位负责组织标准起草、召开工作组会议、汇总处理各方意见及整理标准文本。起草组重点围绕光子对计数、偏振分析、量子态层析、效率校准和统计分析等内容开展技术研讨，并结合专家意见对标准条文进行了逐项完善。。

表1 主要起草人及工作

序号	姓名	单位	联系方式	主要工作
1	周飞	济南量子技术研究院	zhoufei@jiqt.org	牵头开展标准预研，负责标准制定总体组织协调工作，包括制定和推进工作计划、文件收集、提出标准整体框架和主要技术内容，组织讨论并提出意见建议。
2	林增森	济南量子技术研究院	linzengsen@jiqt.org	参与标准预研，参与标准草案及编制说明起草，组织或参与标准关键技术验证，参与讨论并提出意见建议。
3	王晶晶	济南量子技术研究院	wangjingjing@jiqt.org	参与标准预研，参与标准草案及编制说明起草，组织或参与标准关键技术验证，参与讨论并提出意见建议。
4	江扬帆	济南量子技术研究院	jiangyangfan@jiqt.org	参与标准预研，提供标准制定工作指导，参与标准专业技术内容审核。
5	徐佳敏	九章（济南）量子科技有限公司	daniel@jiuzhangqt.com	参与标准预研，提供标准制定工作指导，参与标准专业技术内容审核，提供测试报告。
6	曹原	中国科学技术大学	yuancao@ustc.edu.cn	提供标准制定工作指导，参与标准专业技术内容审核。
7	刘畅	山东量子科学技术研究院有限公司	chang. liu. ah@ouantum-info.com	提供标准制定工作指导，参与标准专业技术内容审核。

序号	姓名	单位	联系方式	主要工作
8	李蔚	上海理工大学	weil@usst.edu.cn	参与讨论、提供意见和建议，提供测试报告。
9	张萌	中国标准化研究院	zhangmeng@cnis.ac.cn	参与讨论、提供意见和建议。
10	李波	合肥国家实验室	libo1989@ustc.edu.cn	参与讨论、提供意见和建议。
11	刘杨	济南量子技术研究院	liuyang0301@jiqt.org	参与标准预研，提供标准制定工作指导，参与标准专业技术内容审核。
12	李明翰	国科量子通信网络有限公司	liminghan@qtict.com	提供标准制定工作指导，参与标准专业技术内容审核。
13	邱思	济南量子技术研究院	qiusi@jiqt.org	参与标准草案及编制说明起草，参与讨论、提供意见和建议。
14	霍美如	国网山西省电力有限公司信息通信分公司	15333669912@163.com	参与讨论、提供意见和建议。
15	李璟	中国计量大学	Ijagu@l63.com	参与讨论、提供意见和建议。
16	成永杰	北京无线电计量测试研究所	cyj229@163.com	参与讨论、提供意见和建议。
16	赵品彰	江苏省计量科学研究院	lemon_jsmi@163.com	参与讨论、提供意见和建议。
17	郭龑强	太原理工大学	guoyanqiang@tyut.edu.cn	参与讨论、提供意见和建议。
18	俞兵	西安应用光学研究所	Yubinglaile@126.com	参与讨论、提供意见和建议。
19	张春辉	南京邮电大学	chz@njupt.edu.cn	参与讨论、提供意见和建议。
20	明志茂	广电计量检测集团股份有限公司	mingzm@grgtest.com	参与讨论、提供意见和建议。
21	刘润泽	香港中文大学	lrunze970515@gmail.com	参与讨论、提供意见和建议。
22	逯鹤	山东大学	luhe@sdu.edu.cn	参与讨论、提供意见和建议。
23	何琼毅	北京大学	qiongyihe@pku.edu.cn	参与讨论、提供意见和建议。
24	金贤敏	上海交通大学	xianmin.jin@sjtu.edu.cn	参与讨论、提供意见和建议。
25	华昕	武汉光谷信息光电子创新中心有限公司	huaxin@noeic.com	参与讨论、提供意见和建议。

序号	姓名	单位	联系方式	主要工作
26	刘婧婧	安徽问天量子科技股份有限公司	liujingjing@qasky.com	参与讨论、提供意见和建议。
27	霍永恒	中国科学技术大学	yongheng@ustc.edu.cn	参与讨论、提供意见和建议。
28	葛哲屹	温州激光与光电子协同创新中心	gezheyi@pku.edu.cn	参与讨论、提供意见和建议。
30	李东东	科大国盾量子技术股份有限公司	dongdli@ustc.edu.cn	参与讨论、提供意见和建议。
31	刘想靓	中国计量科学研究院	Liuxl@nim.ac.cn	参与讨论、提供意见和建议。
32	韩玄	武汉量子技术研究院	hanxuan@mail.ustc.edu.cn	参与讨论、提供意见和建议。
33	赵童格	中国长城科技集团股份有限公司	Zhaotongge@greatwall.com.cn	参与讨论、提供意见和建议。
34	于春霖	中电长城科技有限公司	yuchunlin@greatwall.com.cn	参与讨论、提供意见和建议。
35	刘博	浙大城市学院	liubo@hzcu.edu.cnn	参与讨论、提供意见和建议。
36	高明	上海图灵智算量子科技有限公司	gaoming@turingq.com	参与讨论、提供意见和建议。
37	刘勇	合肥幺正量子科技有限公司	liuyong@unitqc.com	参与讨论、提供意见和建议。
38	石志全	中科酷原科技（武汉）有限公司	shizhiquan@cascoldatom.com	参与讨论、提供意见和建议。
39	公卫江	东北大学	gwj@neu.edu.cn	参与讨论、提供意见和建议。

二、国家标准编制原则、主要内容及其确定依据

（一）标准编制原则和依据

本标准文件按照GB/T 1.1－2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

（1）在国内当前的技术条件下实现标准化目标具有完全可能性。

（2）本项目的技术与主流技术发展方向相符合。

（二）主要技术内容

本文件描述了双光子偏振纠缠源的性能参数、测量条件、测量方法和测量报告。本文件适用于具有两个光子输出通道的双光子偏振纠缠源的性能表征和测量。

本标准的主要技术内容如下：1 范围、2 规范性引用文件 、3 术语和定义、4 缩略语、5 性能参数、6 测量条件、7 测量方法、8 测量不确定度和单侧置信下限、9 测量报告。

（三）主要技术内容的确定依据

1.测量边界和工作点

光子对速率取决于结果对应的光学接口位置。为使自由空间输出、光纤输出及带内置滤波的光源采用同一表述，本标准将被测源与外部测量路径的接口定义为规定输出边界，内置滤波器归入被测源，外置滤波器归入测量路径。

泵浦功率、重复频率、器件温度、滤波和耦合设置会改变光子对速率、谱宽及纠缠特性，因此以工作点记录这些条件。完整性能表征中的主要参数在同一工作点下测量，便于比较输出数量与量子态质量。

2.光子对速率和偶然符合处理

符合测量是表征两个输出通道相关光子对的直接方法。本标准先由原始符合计数和偶然符合估计得到真符合计数，再用有效采集时间和两通道探测效率换算规定输出边界处

的光子对速率。通道探测效率由外部路径透过率与探测器探测效率共同确定。

偶然符合采用与符合窗口等宽的延迟窗口估计，脉冲泵浦源可取相邻脉冲的符合峰。延迟窗口的估计已包含暗计数和不相关背景形成的偶然符合，计算真符合计数时不再单独扣除暗计数。该估计的有效性取决于发射统计、多光子对贡献和探测器非线性，因此标准按“偶然符合估计有效，多光子对和探测非线性影响可忽略或已修正”限定光子对速率等公式的适用条件；接近确定性发射的脉冲源等不满足条件的情形，采用与其发射统计相适应的计数模型。

3. 参数分类和效率定义

主要参数同时覆盖输出能力、背景水平、偏振关联和量子态质量，其中保真度提供相对于指定目标态的评价。条件收集效率按另一通道已探测到相关光子的条件定义，并结合探测器效率修正计算。泵浦功率归一化光子对速率和谱亮度用于比较不同泵浦功率及带宽条件下的输出，谱亮度报告所用通道的实测光谱宽度。

4. 偏振分析和量子态层析

偏振分析采用QWP、HWP和PBS组成的投影模块。H/V、D/A 和 R/L 三组基覆盖偏振量子比特的三个互补测量方向，两通道组成 9 组测量基、36 个联合投影。采用最大似然法重构迹为 1 的厄米半正定密度矩阵，并由同一矩阵计算保真度、纯度和并发度。层析方法依据 James 等的双量子比特测量方法，并发度依据 Wootters 的定义，文献列于标准参考文献。

双端口 PBS 配置中，各探测端口响应差异会改变符合计数比例。因此，对可见度和 CHSH 计算先作端口响应归一化，层析重构则将相对探测效率计入测量算符。附录给出典型波片角度，实际投影通过偏振分析模块标定确定。

5. 纠缠和 CHSH 判据

本标准采用平方保真度。目标态为标准贝尔态时，任意可分态与该目标态的保真度不超过 1/2，因此保真度的 95%单侧置信下限大于 1/2 可作为纠缠证据；并发度的 95%单侧置信下限大于 0 也可用于判定。

CHSH 方法由四组线偏振分析设置的关联函数组合得到 Bell 参数，以其绝对值的 95%单侧置信下限大于 2 判定违背 CHSH 不等式。测量时按目标贝尔态选择分析角。22.5°等分析角不在附录 B 的六种标准投影之内，标准给出理想配置下分析角θ对应 QWP 快轴θ、HWP 快轴θ/2 的关系，并要求经标定确认，以免把线偏振投影做成椭圆偏振投影。同一分析设置下各投影组合的测量时间相同，时间不同时先换算为符合计数率。上述阈值来自纠缠判据和 CHSH 不等式的数学界限。

6. 光谱宽度和输出稳定性

光谱宽度按扣除背景后的光子数谱密度曲线取半高全宽，光谱测量装置的波长校准和分辨率应与被测光谱宽度相匹配。光谱宽度同时用于计算谱亮度。输出稳定性以固定工作点下光子对速率的时间序列计算相对标准偏差和最大相对偏差，并记录偏振关联可见度的时间变化。

7. 测量不确定度和置信下限

不确定度评定包括计数统计、效率校准、偏振分析、背景估计和输出漂移等分量。非线性运算得到的参数可按 GB/T 27419—2018 采用蒙特卡洛法评定，抽样次数按该标准的自适应程序以数值收敛确定。

纠缠及 CHSH 判定采用 95%单侧置信下限。零计数、低计数和量子态重构的物理边界会使简单正态近似失效，以实测计数为泊松均值的重采样也会把零计数反复抽成零，因此标准要求采用精确方法、似然比检验反演或以重构模型期望计数为均值抽样等方法；所用方法应在判定阈值附近和测量结果附近选取代表性状态，通过模拟验证覆盖率。最大似然层析还需评估有限计数引起的估计偏差及其对纠缠判定的影响（依据见标准参考文献[6]）。计数较大、偏差可忽略且结果近似正态时，以测量值减去 1.645 倍合成标准不确定度计算下限。

三、试验验证的分析、综述报告，技术经济论证，预期的经济效益、社会效益和生态效益

（一）试验基础

牵头单位在立项前已开展基于 PPKTP 的偏振纠缠源系统研制，具备光子对计数、偏振关联测量和量子态层析的实验条件。本标准的主要测量装置由单光子探测器、时间相关单光子计数器或 TDC、偏振分析模块、光谱测量装置和光功率计构成，与现有量子光学实验平台衔接。

（二）验证内容和分析

测量方法的验证围绕三个方面展开：一是符合计数与效率修正，核对符合窗口、采集时间和探测效率对速率及 CAR 的影响；二是偏振分析与层析，核对投影设置、端口响应修正及由密度矩阵计算各参数的结果；三是统计判定，在实际投影组合和计数水平下检查置信下限的覆盖率。

理论模型校核采用标准贝尔态和四维希尔伯特空间中的最大混合态。以标准贝尔态为目标态，按标准中的公式计算，结果见表 2，均与已知理论值一致，表明各参数的定义和计算公式相互一致。

表 2 理论模型校核结果

校核对象	保真度 F	纯度 P	并发度 C	偏振关联可见度	CHSH 参数 |S|
目标贝尔态	1	1	1	1	2√2
最大混合态	1/4	1/4	0	0	0

覆盖率验证在判定阈值附近和测量结果附近选取已知态，由各投影的期望计数生成模拟数据，对每组数据使用相同的计算程序得到下限，分别统计下限不超过真值的比例。该项验证检查统计判定方法在所用计数水平下的表现。

（三）实测验证结果

按本标准方法对一台连续泵浦的双光子偏振纠缠源进行测量，目标态为$|\Psi^-\rangle$，主要结果见表 3。

表 3 实测验证结果

参数	测量结果	扩展不确定度（k=2）	95%单侧置信下限
光子对速率 B（s^{-1}）	2.40×10^{6}	0.12×10^{6}	—

参数	测量结果	扩展不确定度（k=2）	95%单侧置信下限
符合与偶然符合比 CAR	85	6	—
偏振关联可见度（H/V 基）	0.975	0.004	—
偏振关联可见度（D/A 基）	0.955	0.005	—
量子态保真度 F	0.968	0.006	0.963
偏振量子态纯度 P	0.937	0.010	—
并发度 C	0.935	0.012	0.925
CHSH 参数|S|	2.707	0.020	2.690
条件收集效率 $\eta_{c,A}$ / $\eta_{c,B}$	0.32 / 0.30	0.02 / 0.02	—
泵浦功率归一化光子对速率 Bp（$s^{-1}\cdot mW^{-1}$）	2.40×10^{5}	0.15×10^{5}	—
A 通道光谱宽度（nm）	0.60	0.02	—
谱亮度 $B_{\lambda,A}$（$s^{-1}\cdot mW^{-1}\cdot nm^{-1}$）	4.0×10^{5}	0.3×10^{5}	—
输出稳定性 RSD_B / D_B（%）	1.2 / 2.8	—	—

上述结果中，F、C 和|S|的 95%单侧置信下限分别大于 1/2、0 和 2，满足标准规定的纠缠及 CHSH 判据；各参数之间的关系与理论模型一致。

（四）技术经济论证

本标准采用现有符合计数、波片偏振分析和量子态层析技术。已具备相关实验条件的单位，主要工作是完善效率及偏振标定、统一计数处理并保存测量记录，可利用原有仪器开展测量。完整表征测量主要参数，特性参数按应用需要选测，能够控制测量工作量。

（五）预期的经济效益、社会效益和生态效益

技术经济论证：双光子偏振纠缠源是支撑量子密钥分发、光量子计算、量子传感与量子成像、量子计量标准装置等量

子信息领域关键应用的核心器件，当前国内外尚无针对该类器件的统一性能表征与测量方法标准，不同研发机构、生产企业的测试项目、测试流程与数据处理规范各异，测试结果缺乏可比性，产品性能指标宣称混乱，严重制约了量子信息产业中核心光源器件的标准化选型与规模化应用。制定本标准，对于具备双光子偏振纠缠源研制能力的单位，可有效避免重复研发与试验检测投入，规范研发与测试流程，具备良好的技术经济可行性。本标准系统界定纠缠纯度、纠缠保真度、光子不可分辨性、光子对产率等核心性能参数的表征方法与测量流程，为我国双光子偏振纠缠源技术迭代升级提供了标准化、规范化的核心支撑，对行业前沿技术创新与产业升级具有重要推动作用，对我国量子信息产品进行快速的技术迭代、抢占海内外市场以及争夺国际标准话语权有着重大意义。当前欧洲标准化委员会（CEN/CENELEC）已在《Quantum Technologies Standardization Action Plan》中规划启动"纠缠光源互操作性测试"相关标准研制工作，IEC/ISO JTC 3 也已提出多项相关技术报告提案，本标准构建了自主可控的双光子偏振纠缠源技术规范体系，有利于打破国外技术壁垒与市场垄断，加快国产器件市场化推广进程，全面提升我国量子信息产业的核心竞争力与整体经济效益。牵头单位济南量子技术研究院已具备年产 50 套高品质量子纠缠源系统的中试能力，关键器件实现国产化，可为行业提供全套计量校准与型式试验服务，具备实施本标准的技术条件与工程实践基础，标准实施的技术经济风险可控、综合效益显著。

经济效益：统一双光子偏振纠缠源的技术要求与测量方法，有效解决当前行业技术体系不统一、检测规范不一致带来的诸多问题，大幅降低产品研发、生产与运维成本。通过统一测量边界和数据处理方法，可减少因计数口径、效率修正和背景扣除不同造成的结果差异，降低供需双方重复测试和结果解释的成本，避免因指标口径分歧导致的交易摩擦与质量纠纷。标准的落地实施能够规范上下游配套产业链发展，引导周期性极化晶体、低噪声单光子探测器、窄线宽泵浦激光器等关键器件配套企业标准化生产，构建稳定规范的产业配套体系，推动双光子偏振纠缠源从定制化研制向规模化、产业化生产转型。统一的核心性能参数表征方法与计量溯源要求，还可提升不同厂商产品的互操作性，降低系统集成商的选型验证成本，加速纠缠光源在量子密钥分发、光量子计算等系统中的规模化应用，提升行业整体经济效益。

社会效益：填补国内双光子偏振纠缠源领域标准空白，规范行业市场秩序，保障纠缠光源核心性能指标测试数据准确可靠、可比可溯，为量子信息领域科研机构与企业的产品选型、质量评价和成果复核提供可靠的数据支撑，显著提升量子信息产业质量管理的科学化、规范化水平。明确偏振纠缠判据和报告要求，有助于光源选型、量子实验结果复核以及量子通信、量子计算等领域的技术交流，打通科研与产业之间的指标互认通道。同时，本标准固化前沿科研成果，打通技术成果转化应用通道，助力行业技术升级，有效提升量子信息产业的社会公信力。制定双光子偏振纠缠源标准，符

合国家量子科技战略布局和政策导向，可精准对接国际标准化布局，为提升我国在量子技术国际标准竞争中的话语权提供技术支撑。

生态效益：本标准为双光子偏振纠缠源性能表征提供统一的测量规范，规范测量记录、复用合适的测量配置，可减少重复试验和器件消耗，降低标准实施过程中的资源投入与环境负担。通过统一测试流程与数据处理方法，避免因方法不一致导致的重复测量与样品损耗，延长关键器件使用寿命，支撑量子信息产业绿色低碳发展。标准化的性能表征方法还可促进纠缠光源系统的效率优化与稳定性提升，减少系统调试与运行过程中的能源与器件浪费，助力量子信息基础设施的可持续建设，为量子科技产业生态文明建设提供有力的技术保障。

四、与国际、国外同类标准技术内容的对比情况

ISO/IEC 4879:2024《信息技术 量子计算 术语》规定量子计算领域的通用术语，为量子态、量子纠缠等概念交流提供基础。本标准通过相关国家标准统一术语，并进一步给出双光子偏振纠缠源的具体测量方法。

ETSI GR QKD 003 V2.1.1（2018-03）《量子密钥分发（QKD）；组件和内部接口》为 ETSI 研究报告，其第 6.1.4 条介绍纠缠光子源，涉及自发参量下转换、四波混频及量子点等产生机制，并讨论纠缠光源在 QKD 系统中的应用。本标准以光源性能测量为主，明确输出边界、效率校准、偏振投影、层析计算和置信判定等操作要求。

经检索，目前尚无已发布的、专门规定双光子偏振纠缠源性能测量方法的国际标准或国外先进标准。上述已发布的国际文件与本标准在量子态和纠缠光子源的基本概念上相衔接，但不规定具体测量方法，与本标准的技术内容不存在矛盾。

五、以国际标准为基础的起草情况，以及是否合规引用或者采用国际国外标准，并说明未采用国际标准的原因

本标准为自主制定，未以国际标准为基础起草，也未采用国际国外标准，原因是目前尚无已发布的规定双光子偏振纠缠源性能测量方法的国际标准，欧洲相关标准项目尚处于起草阶段。本标准规范性引用的文件均为现行国家标准，未规范性引用国际国外标准。量子态层析、并发度、纠缠判据、CHSH 不等式、符合—单边计数法和最大似然层析偏差等内容所依据的公开文献，作为资料性参考文献列出。

六、与有关法律、行政法规及相关标准的关系

经查，本文件与现有标准及制定中的标准无交叉重复，不涉及国内外专利，与有关的现行法律、法规和强制性国家标准无冲突。

本标准性质为推荐性国家标准，类别为方法标准。技术内容与下列国家标准衔接：GB/T 42565—2023 和 GB/T 43692—2024 用于相关术语；GB/T 27418—2017 用于测量不确定度评定与表示；GB/T 27419—2018 用于蒙特卡洛分布传播。

GB/T 43784—2024《单光子源性能表征及测量方法》与本标准同属量子光源测量领域。本标准针对双输出通道的光子对及其偏振量子态，补充符合统计、两通道效率修正、偏振关联和纠缠判定等内容，与单光子源标准共同服务于量子光源性能表征。

七、重大分歧意见的处理经过和依据

本标准在立项及各次讨论会以及编写讨论中，没有产生重大分歧。

八、涉及专利的有关说明

截至征求意见稿形成，起草工作组未收到也未识别出本标准涉及的必要专利。本标准前言已按 GB/T 1.1—2020 给出专利提示；征求意见阶段将同时征集相关专利信息。标准中符合计数、量子态层析和纠缠判据等方法均来自公开文献，相关来源已列入参考文献。如标准实施后发现涉及专利，将按照国家标准涉及专利管理相关规定处置。

九、实施国家标准的要求，以及组织措施、技术措施、过渡期和实施日期的建议等措施建议

鉴于本标准规定内容不涉及人身健康和生命财产安全、国家安全、生态环境安全等内容，属于基础性标准。根据标准化法及有关规定，建议本标准作为推荐性国家标准。

本标准的建议实施日期为：自发布之日起 6 个月。

十、其他应当说明的事项

本项目为新制定标准，不涉及现行国家标准的废止。本标准立项阶段确定的名称原为《量子技术 双光子偏振纠缠

源表征及测量方法》。2026 年 11 月，经起草工作组研究论证，为确保标准名称的准确性与规范性，工作组决定将标准名称修改为《量子技术 双光子偏振纠缠源性能测量方法》。

编写工作组承诺，本文件无版权风险。

本文件在起草过程中严格遵循“开放、公平、公正”原则，充分吸纳了产学研用各类市场主体的意见，未设置任何排除、限制竞争的条款，未偏袒特定主体或技术路线，标准内容符合国家公平竞争相关法律法规及政策要求，能够为各类市场主体提供平等的技术依据和竞争环境。

编写工作组承诺，本文件编写过程中未参考或引用任何受版权保护的文本、图表、数据或其他专有内容，本文件无版权风险，在标准后续征求意见、审定及实施过程中，将持续保障公平竞争原则的落实，确保标准的中立性和公正性。

《量子技术 双光子偏振纠缠源性能测量方法》

国家标准起草工作组

2026 年 11 月 6 日

附件 1

《量子技术 双光子偏振纠缠源性能测量方法》实验测试报告 1

1、待测样品

本例选取连续波泵浦双光子偏振纠缠源，给出测量方法、记录内容和结果图表示例。计数、结果和曲线均为模拟数据。样品及工作点见表 A.1，测试装置见图 A.1。

表 A.1 样品及工作点

项目	设置	用途或记录
被测样品	双光子偏振纠缠源	型号、编号：_____
泵浦光	连续波，405 nm，10.00 mW	在源泵浦输入端测功率
输出与目标态	A、B 通道约 810 nm；Ψ^-	测前指定目标态
规定输出边界	A、B 输出光纤连接器端面	各项测试采用同一边界
偏振分析	QWP—HWP—PBS	两个单端口模块依次投影
环境条件	约 22.0 ℃；相对湿度 45%	预热、温控和驱动参数另记

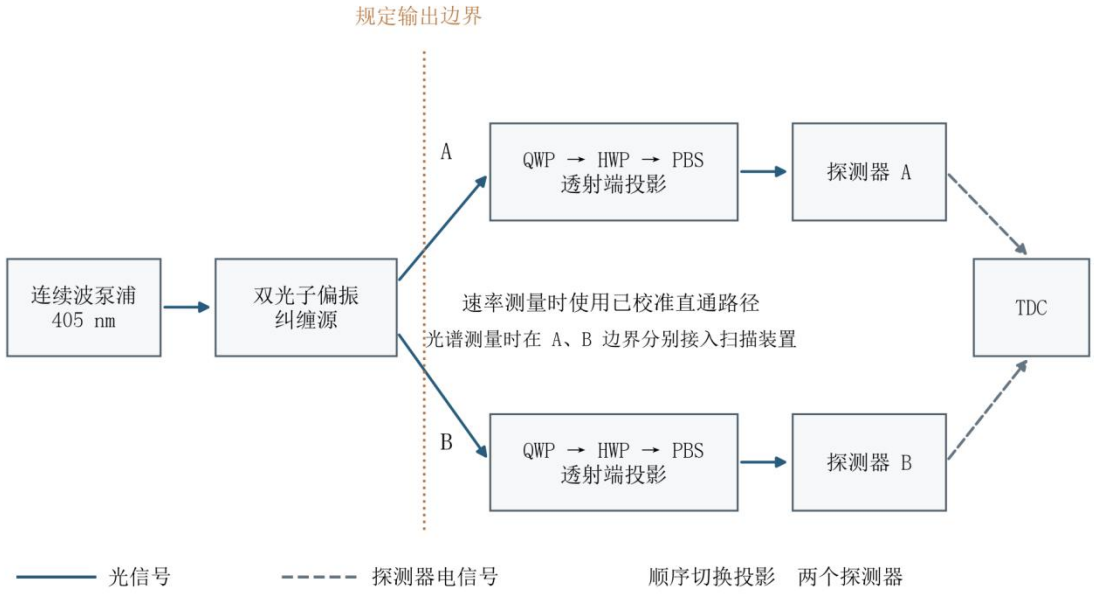


图 A.1 测量装置及规定输出边界

2、性能表征及测量结果

按现稿 7.1～7.8 测量。测试前校准通道延时、探测效率及偏振分析模块，记录仪器型号、编号、校准信息和源工作点。

2.1 光子对速率和符合与偶然符合比

根据 7.1，A、B 两通道直通接入探测器，保存单边计数及时间差直方图。将符合峰中心校至零点，取完整宽度 5 ns 的符合窗口[−2.5，2.5) ns，并在[17.5，22.5) ns 取等宽延迟窗口；两者共同有效采集时间均为 10 s。按表 A.2 统计计数，直方图见图 A.2。

表 A.2 速率及偶然符合测量记录

记录项	A 通道或符合窗	B 通道或延迟窗
共同有效时间 / s	10.000	10.000
单边计数	4,992,087	4,321,582
窗口计数	909,038	10,880
通道探测效率	0.2080	0.1800
直方图分箱宽度 / ns	0.25	0.25

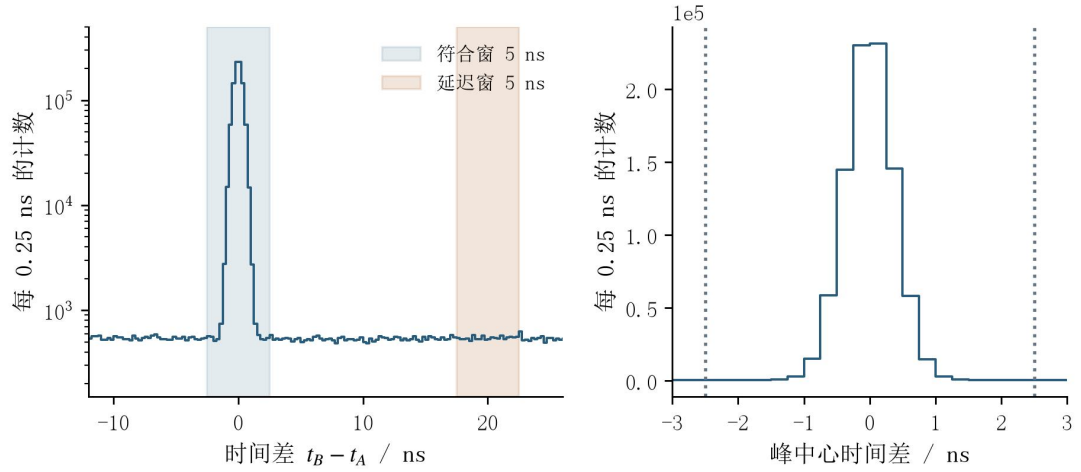


图 A.2 时间差直方图及符合窗口与延迟窗口

原始符合计数减去偶然符合计数，得到真符合计数 898,158。用真符合计数除以采集时间及两通道探测效率之积，得到光子对速率 $2398926\ \mathrm{s^{-1}}$；真符合与偶然符合之比为 82.5513。保存分箱计数、两个窗口起止位置及效率标定记录。本例为连续波源，光子对平均数μ不适用。

2.2 条件收集效率

根据 7.2，沿用表 A.2 的计数。遮断源输出，保持探测器设置不变，分别采集 100 s 暗计数，并按 10 s 折算后从单边计数中扣除。以 B 通道为条件计算 A 通道收集效率，反向同理；所除效率为相应探测器效率。

$$\eta_{c,A}=\frac{N_C}{N_{B,net}\eta_{det,A}};\ \eta_{c,B}=\frac{N_C}{N_{A,net}\eta_{det,B}}$$

表 A.3 条件收集效率测量记录与结果

记录项	A 通道	B 通道
100 s 暗计数	4,088	5,033
10 s 净单边计数	4,991,678.2	4,321,078.7
探测器探测效率	0.6500	0.6000
条件收集效率	0.319777	0.299885
扩展不确定度 U（k=2）	0.009613	0.009015

真符合已扣除偶然符合，不再重复扣除暗计数。记录暗计数采集时间及探测器效率；不确定度计算保留符合计数与条件单边计数共享事件的协方差。

2.3 泵浦功率归一化光子对速率和谱亮度

根据 7.3，在源泵浦输入端测量平均功率，记录功率计的波长设置和测量位置。用 2.1 的光子对速率除以泵浦功率，

再除以 2.7 所得 A 通道光谱半高全宽，得到 A 通道谱亮度。结果见表 A.4。

$$B_p = \frac{B}{P_p};\ B_{\lambda,A} = \frac{B_p}{\Delta\lambda_{FWHM,A}}$$

表 A.4 归一化速率和谱亮度结果

参数	结果	单位
平均泵浦功率	10.00	mW
A 通道半高全宽	0.594668	nm
泵浦功率归一化速率	239892.6	$s^{-1}\cdot mW^{-1}$
A 通道谱亮度	403405.7	$s^{-1}\cdot mW^{-1}\cdot nm^{-1}$

谱亮度标明所用带宽通道；功率、速率和带宽的测量记录相互关联。

2.4 偏振关联可见度

根据 7.4，对 H/V 和 D/A 两基依次测量 HH、HV、VH、VV 及 DD、DA、AD、AA，每投影采集 2 s，使用 5 ns 符合窗口。用参考态确认 QWP—HWP—PBS 的实际投影；线偏振投影角为θ时，理想快轴设置为 QWP 取θ、HWP 取θ/2。六种参考投影的设置见表 A.5。

表 A.5 偏振分析模块的理想快轴设置

投影	H	V	D	A	R	L
QWP / °	0	0	45	45	45	−45
HWP / °	0	45	22.5	−22.5	0	0

角度以 H 轴为零，使用 PBS 透射端，R、L 的旋向约定按标准。记录每投影的实际波片角度、共同有效时间、单边及原始符合计数。该 8 个投影同时用于层析，计数列于表 A.7。

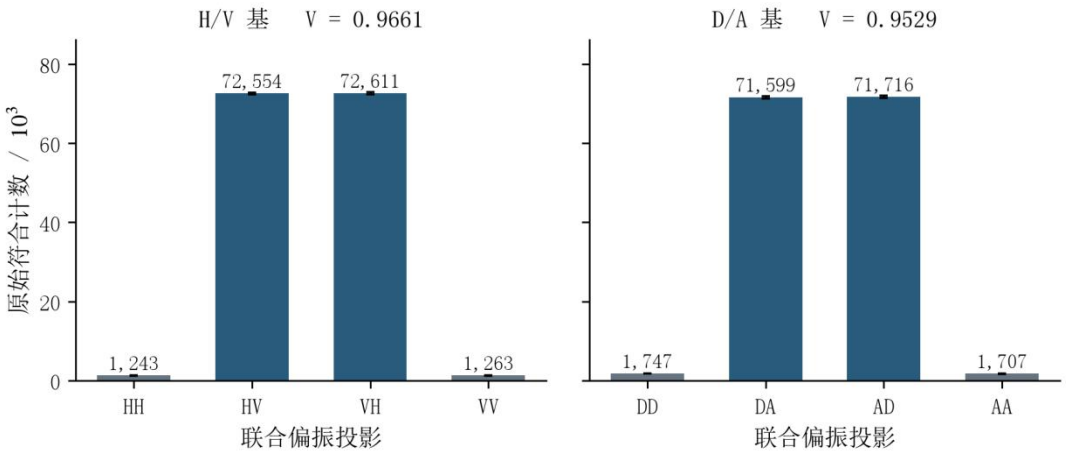


图 A.3 H/V 与 D/A 基四投影的原始符合计数

目标态Ψ^-在两基均为正交投影占优，相关类型系数取 −1。使用原始符合计数，不扣除偶然符合。图中误差棒为泊松计数标准差；可见度及其合成不确定度见表 A.6。

表 A.6 偏振关联可见度结果

测量基	可见度	扩展不确定度 U（k=2）
H/V	0.966060	0.001456
D/A	0.952933	0.001705

2.5 量子态保真度、纯度和并发度

根据 7.5，A、B 通道各取 H/V、D/A、R/L 三个基，组成 9 组设置，每组 4 个联合投影，共 36 个投影，每投影采集 2 s。逐次记录实际波片角度、开始时间、共同有效时间、单边及原始符合计数。以原始符合计数建立泊松似然，结合标定的测量算符进行最大似然重构，约束密度矩阵为厄米半正定且迹为 1。

表 A.7　量子态层析 36 个投影的原始符合计数

A 基	B 基	投影 1	投影 2	投影 3	投影 4
H/V	H/V	HH 1,243	HV 72,554	VH 72,611	VV 1,263
H/V	D/A	HD 36,585	HA 36,925	VD 36,330	VA 36,815
H/V	R/L	HR 36,438	HL 37,004	VR 36,910	VL 36,719
D/A	H/V	DH 36,813	DV 36,611	AH 36,763	AV 36,676
D/A	D/A	DD 1,747	DA 71,599	AD 71,716	AA 1,707
D/A	R/L	DR 36,869	DL 36,893	AR 36,835	AL 36,964
R/L	H/V	RH 36,892	RV 36,658	LH 37,171	LV 36,852
R/L	D/A	RD 36,897	RA 36,690	LD 37,068	LA 36,423
R/L	R/L	RR 2,135	RL 71,603	LR 71,351	LL 2,208

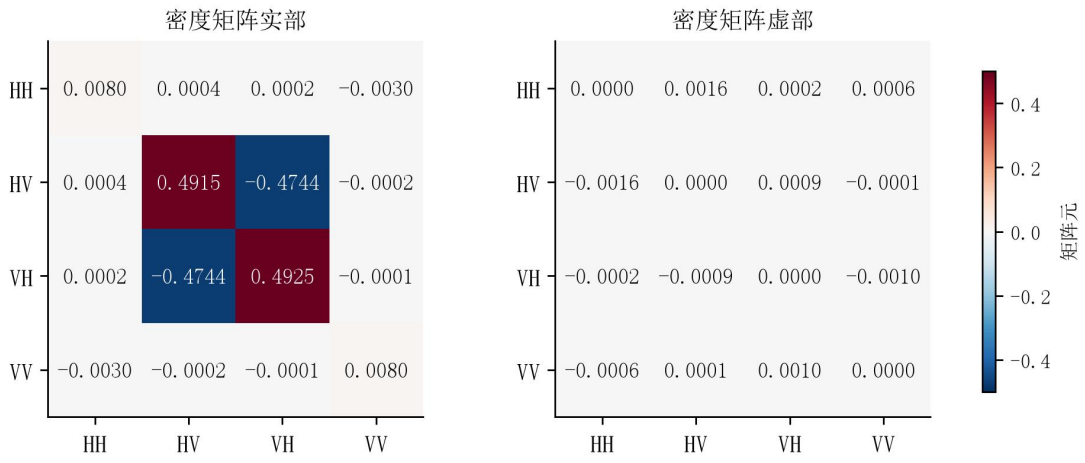


图 A.4　重构密度矩阵的实部与虚部

矩阵的行、列均按 HH、HV、VH、VV 排列，实部与虚部采用同一色标。目标态为预先指定的Ψ^-。保真度采用平方保真度定义；纯度由矩阵平方的迹计算，并发度按 7.5 的自旋翻转矩阵计算。结果见表 A.8。

$$F = \langle \Psi_{target} | \rho_{exp} | \Psi_{target} \rangle ; \quad P = \mathrm{Tr}(\rho_{exp}^{2})$$

表 A.8 量子态层析结果

参数	结果	扩展不确定度 U（k=2）
保真度 F	0.966437	0.000806
纯度 P	0.934465	0.001538
并发度 C	0.932886	0.001612

重构矩阵迹为 1.000000，最小特征值为 0.004795。保存完整复数矩阵、测量算符、标定文件及重构程序版本。

2.6 CHSH Bell 参数

根据 7.6，A 通道取 a=0°、a′=45°，B 通道取 b=22.5°、b′=67.5°。每组角度依次采集++、+−、−+、−−四个投影，各采集 2 s；“−”投影为相应“+”分析角加 90°。切换线偏振分析角时同时设置两片波片，用原始符合计数计算关联函数。

表 A.9 CHSH 四组设置的原始符合计数

A/B 角度 /°	++	+−	−+	−−
0/22.5	11,533	61,783	61,665	11,391
0/67.5	61,957	11,824	11,581	61,960
45/22.5	11,895	61,391	61,483	12,110
45/67.5	12,066	61,627	61,144	11,794

$$E = \frac{N_{++} + N_{--} - N_{+-} - N_{-+}}{N_{++} + N_{--} + N_{+-} + N_{-+}}$$

$$S_{CHSH} = E(a,b) - E(a,b') + E(a',b) + E(a',b')$$

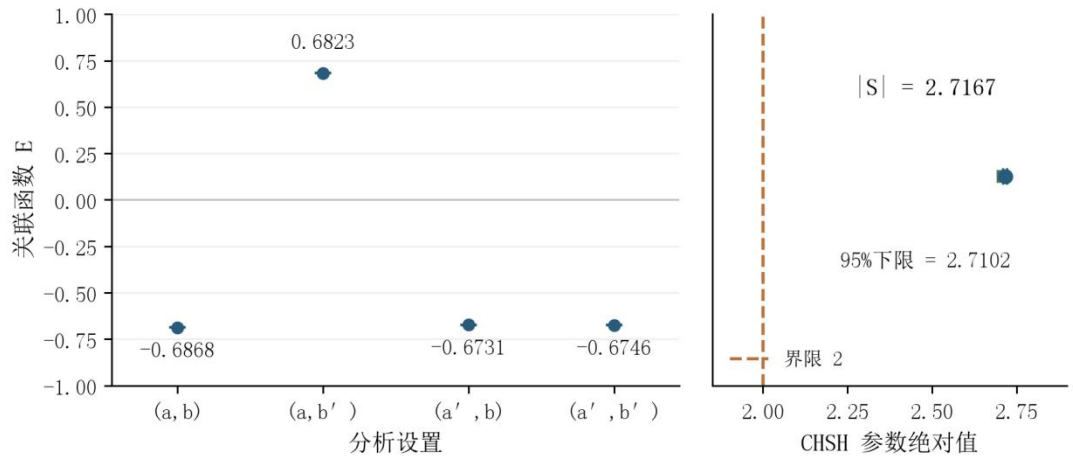


图 A.5 四组关联函数及 CHSH 参数绝对值的单侧下限

结果为 S=-2.716721，|S|=2.716721。保留 S 的正负号，以|S|计算单侧下限。图 A.5 左图给出四组关联函数，误差棒表示计数统计标准不确定度；右图标出|S|、95%单侧下限及界限 2。合成标准不确定度 u(|S|)=0.003959。

2.7 输出光谱与半高全宽

根据 7.7，分别在 A、B 规定输出边界接入光谱测量装置，保持泵浦功率 10.00 mW。扫描 807.5 ~ 812.5 nm，步长和分辨率带宽均为 0.02 nm，每点积分 0.5 s；按同一设置采集背景，逐点扣背景后修正仪器相对光谱响应。

本例使用计数型光谱。仪器输出为功率谱密度时，逐波长乘以λ/(hc)转换为光子数谱密度，λ用米。取修正谱峰值的一半，在两侧相邻采样点间插值求半高波长，差值为半高全宽。图 A.6 标出半高线、两个交点及带宽，结果见表 A.10。

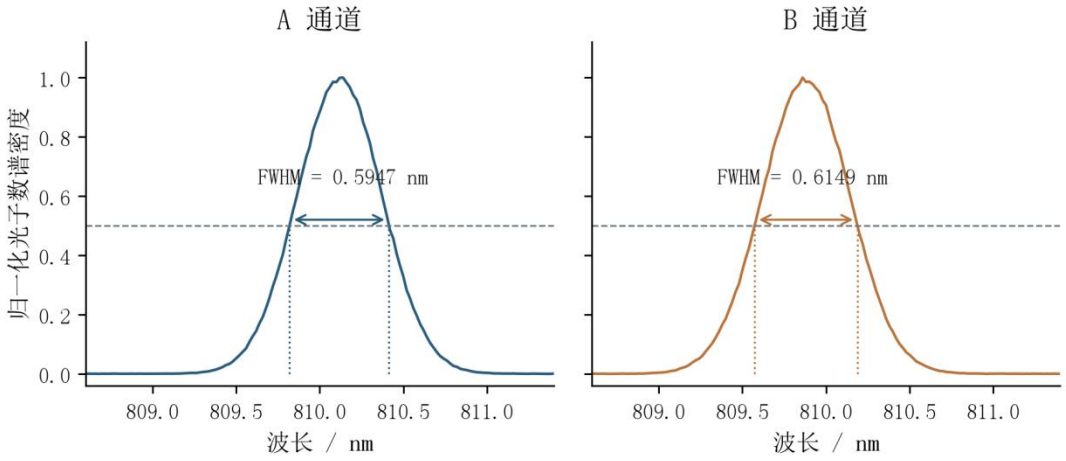


图 A.6 A、B 通道的光子数谱及半高全宽

表 A.10 光谱宽度结果

通道	峰值 / nm	左半高 / nm	右半高 / nm	FWHM / nm
A	810.1400	809.8199	810.4146	0.5947
B	809.8600	809.5731	810.1880	0.6149

保存原谱、背景谱、响应校准曲线和插值结果。A、B 通道分别报告；本例各带宽的扩展不确定度为 0.012 nm（k=2）。

2.8 输出稳定性

根据 7.8，连续观测 2 h，每 5 min 开始一轮，共 25 个点。每轮直通计数 10 s，再采集 H/V 和 D/A 两基的 8 个投影，每投影 2 s；同步记录泵浦功率和环境温度。固定源工作点和光路，保留每轮原始计数，分别计算速率和两基可见度，绘制图 A.7 所示时间序列。

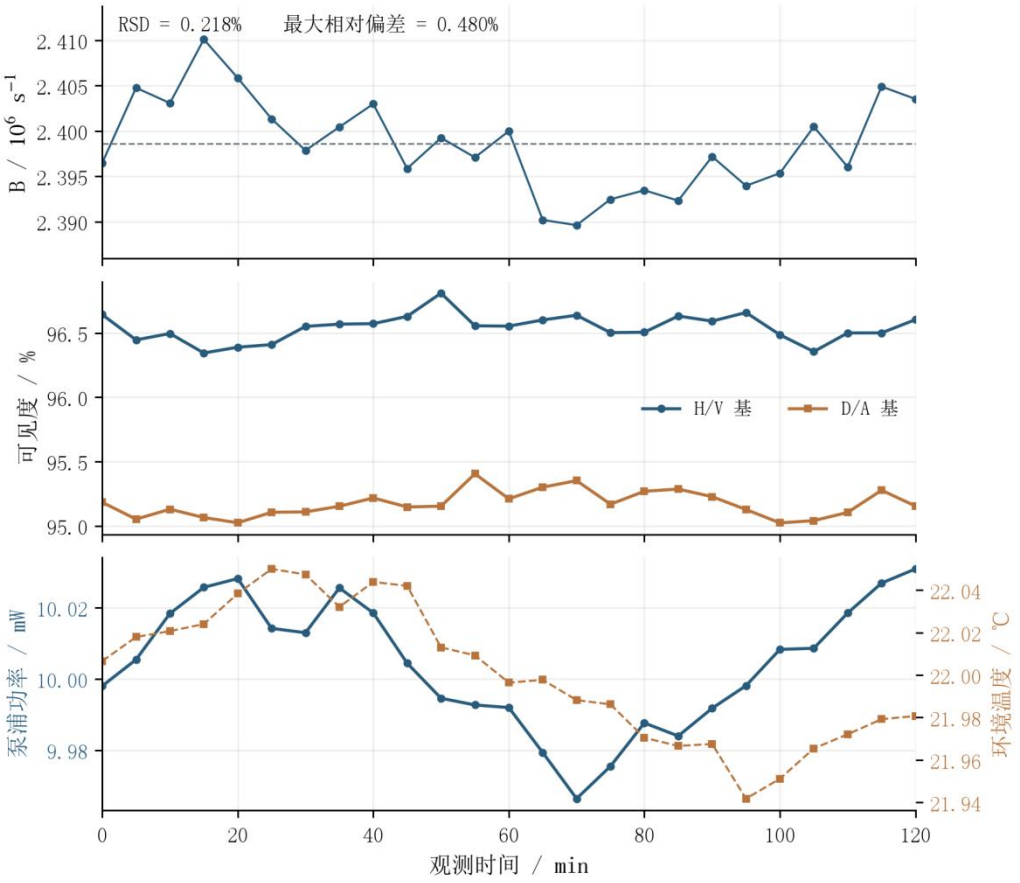


图 A.7 光子对速率、可见度及工作条件的时间序列

表 A.11 输出稳定性统计结果

统计量	结果
平均光子对速率 / s^{-1}	2398580
速率样本标准差 / s^{-1}	5219
速率相对标准偏差 / %	0.218
速率最大相对偏差 / %	0.480
H/V 可见度范围	0.9634 ~ 0.9681
D/A 可见度范围	0.9502 ~ 0.9540

相对标准偏差为速率样本标准差与均值之比；最大相对偏差为各点偏离均值的最大绝对值与均值之比。图中横轴保留实际采样时刻，原始记录逐点保存速率计数、8 个投影计数、泵浦功率和温度。

2.9 测量不确定度及单侧下限

按第 8 章评定不确定度。本例除泊松计数外，通道效率的相对标准不确定度各取 2.0%，探测器效率各取 1.5%，泵浦功率标准不确定度 0.10 mW，带宽标准不确定度 0.006 nm。偏振分析模型中，波片快轴零位各取 0.05°、延迟量各取 0.003 rad，投影泄漏概率取 0.0005、标准不确定度 0.0001。以上为计算示例的输入值。

表 A.12 速率与亮度的不确定度结果

参数	标准不确定度 u	扩展不确定度 U（k=2）
光子对速率 / s^{-1}	67900	135800
CAR	0.8058	1.6116
归一化速率 / $s^{-1}\cdot mW^{-1}$	7201	14403
谱亮度 / $s^{-1}\cdot mW^{-1}\cdot nm^{-1}$	12776	25551

先由重构态和标定的测量算符得到投影期望计数，再进行泊松抽样。每轮只抽取一组波片零位、延迟量及泄漏参数，并在该轮全部投影共用；用生成计数重新重构，计算 F、P、C 和可见度。CHSH 的 16 个投影采用同样的抽样处理。每批 2000 次，连续两批的标准不确定度最大相对变化小于 2%，累计运行 6000 次。

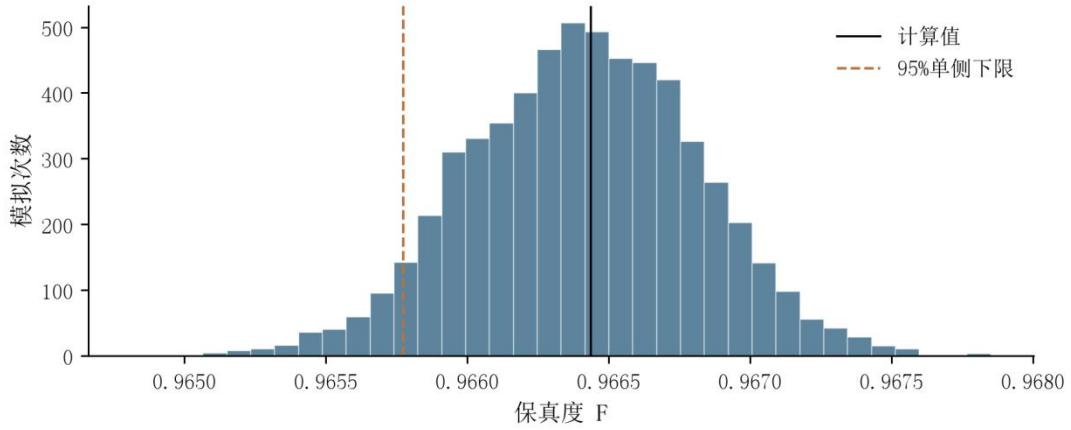


图 A.8 保真度的蒙特卡洛抽样分布

本例高计数下的抽样分布近似正态，按现稿公式（21）计算 95%单侧下限，结果见表 A.13。保存随机种子、抽样次数、收敛记录、标定模型和程序版本。

$$x_L = x - 1.645\,u(x)$$

表 A.13 95%单侧下限计算示例

量	计算值 x	标准不确定度 u	单侧下限
F	0.966437	0.000403	0.965774
|S|	2.716721	0.003959	2.710208

另选 F=0.5、|S|=2 及本例结果附近的已知态，重复生成计数并计算下限，统计下限不超过真值的比例，验证覆盖率。本例尚未运行此项，结果留待填写。

方法偏离及影响：_____

测量人：_____　复核人：_____　日期：_____

附件 2

《量子技术 双光子偏振纠缠源性能测量方法》实验测试报告 2

表 B.1 双光子偏振纠缠源测试结果记录表

序号	项目	记录内容	填写内容
1	报告基本信息	报告唯一编号、版本或修订状态、测试实验室、测试日期和地点、测试人员以及报告批准或等效确认信息。	上海理工大学智能科技学院实验室 2026年11月3日 上海市杨浦区军工路580号
2	被测对象信息	名称、型号、编号或其他唯一性标识、制造单位（适用时）、测试时状态、预热时间和泵浦方式。	上海理工大学 正常 预热1天 PPKTP晶体TypeⅡ相位匹配SPDC基于sagnac环的纠缠光子对源
3	测试依据与方法	测试依据（包括本文件编号和版本）、测试项目、测试方案编号（适用时）、测试方法及方法偏离情况和说明。	文件编号和版本 测试项目包括：亮度 量子态保真度 宣告单光子性 符合与偶然符合比 峰值波长 光子全同度 偏振量子态纯度 光谱宽度（适用时） 偏振关联可见度（适用时） CHSH Bell参数及CHSH不等式违背程度（适用时） 并发度（适用时） 输出稳定性（适用时） 光子对平均数、泵浦功率归一化产生率和系统收集效率（适用时） 光学测量
4	测试环境	温度、相对湿度及其他影响测试结果的环境条件和监测记录。	20.9℃ 36.8%
5	测试仪器设备	名称、型号、编号、校准状态及校准证书或记录编号；数据处理软件或脚本的编号或版本。	赋同SNSPD Driver P-EM-16 Swabian TDC Time Tagger 20
6	测试条件与边界	泵浦中心波长、平均功率及测量位置、重复频率和脉冲宽度（适用时）、滤波与耦合条件、符合窗口、延迟校准值、有效采集时间，以及被测源输出边界、测试路径边界、探测器输入边界、效率修正范围、系统收集效率边界和结果适	150.03mA 1.31mW 测量位置：泵浦端dm后，sagnac环pbs前 滤波与耦合条件：泵浦光经过780nm带通滤光片，780透DM，参量光一臂经过DM反和

序号	项目	记录内容	填写内容
		用边界。	1560长波通，一臂经过1300长波通和1560长波通。单模光纤耦合PAF进入自由空间。 符合窗口：8ns 探测器输入边界：收集端光纤耦合后接入偏振可调测量装置。 探测器效率（SDE）：CH1（78.545%） CH3（41.126%） CH4（32.479%）
7	亮度	亮度B及单位；原始计数、扣除项、修正后计数或对应数据文件的唯一标识，有效采集时间、泵浦方式、泵浦功率，以及泵浦脉冲数或重复频率（适用时）。	B=6484cps $N_C = N_{raw} - N_{acc} - N_{bg} = 6528 - 43.543 - 0 = 6484$ 采集时间1s 连续泵浦 1.31mW
8	量子态保真度	目标态、量子态保真度F、实验密度矩阵、重构方法、测量基或投影组合见附件。	目标态：$\|\Psi^-\rangle = \frac{\|HV\rangle - \|VH\rangle}{\sqrt{2}}$ 量子态保真度F $= \left[Tr\sqrt{\sqrt{\rho_{ideal}}\rho_{\exp}\sqrt{\rho_{ideal}}}\right]^2$ $= 0.7808$ 见附件
9	符合与偶然符合比	CAR点估计值、95%单侧下限、符合窗口、原始计数、扣除项和修正后计数或对应数据文件的唯一标识、偶然符合估计方法及泵浦方式。	$CAR = \frac{N_C}{N_{acc} + N_{bg}} = \frac{N_{raw} - N_{acc} - N_{bg}}{(N_{acc} + N_{bg})} = \frac{6484}{43.543 + 0} = 148.91$ 符合窗口：8ns 原始计数：A臂79672，B臂68316 扣除项：$N_C = N_{raw} - N_{acc} - N_{bg} = 6528 - 43.543 - 0 = 6484$ 连续泵浦
10	偏振关联可见度（适用时）	目标贝尔态、测量基、$V_{pol,b}$、关联类型、符合窗口见附件。	目标态：$\|\Psi^-\rangle = \frac{\|HV\rangle - \|VH\rangle}{\sqrt{2}}$ 见附件
11	CHSH Bell参数及CHSH不等式违背程度（适用时）	目标贝尔态、分析角、各关联函数、S_{CHSH}、Δ_{CHSH}、不确定度及判定结果见附件。	见附件

序号	项目	记录内容	填写内容
12	泵浦功率归一化产生率和系统收集效率（适用时）	B_P、$\eta_{c,A}$、$\eta_{c,B}$；泵浦方式、平均泵浦功率及测量位置、N_A、N_B、N_C、$\eta_{det,A}$和$\eta_{det,B}$。	连续泵浦 1.31mW 测量位置：泵浦端dm后，sagnac环pbs前 B=6484cps $B_P = \frac{B}{P_p} = \frac{6484}{1.31}$ $= 4949.618 cps/mW$ $\eta_{c,A} = \frac{N_C}{N_B \cdot \eta_{det,A}}$ $= \frac{6484}{68316 \cdot 41.126\%}$ $= 23.0783\%$ $\eta_{c,B} = \frac{N_C}{N_A \eta_{det,B}}$ $= \frac{6484}{79672 \cdot 32.479\%}$ $= 25.0573\%$ $N_A = 79672$ $N_B = 68316$ $N_C = 6484$ $\eta_{det,A}$=41.126% $\eta_{det,B}$=32.479%
13	测试结论或符合性判定	测试结论或符合性判定（适用时），以及限值或技术要求来源、判定规则来源。	测试结论：测试得到 CHSH = 2.1841 ± 0.0139（±为计数统计标准不确定度），超过经典上限 2 的幅度为 0.1841，约为 13.23σ。因此，在独立泊松计数、测量稳定和公平抽样等假设下，观察到 CHSH 不等式违反，支持偏振纠缠的存在。测量角与关联符号符合目标单态 Ψ^- 的特征。 判定规则来自 https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.23.880