ICS 17.180.99
CCS A60

中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

量子技术 双光子偏振纠缠源性能测量方法

Quantum technology — Measurement methods for the performance of two-photon polarization-entangled sources

(点击此处添加与国际标准一致性程度的标识)

（征求意见稿）

（本草案完成时间：2026.11.5）

XXXX－XX－XX 发布　　XXXX－XX－XX 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会　发布

目　　次

前言 II
1　范围 1
2　规范性引用文件 1
3　术语和定义 1
4　缩略语 3
5　性能参数 3
6　测量条件 3
6.1　环境条件 4
6.2　测量仪器 4
6.3　测量通用要求 4
7　测量方法 4
7.1　光子对速率、光子对平均数、符合与偶然符合比 4
7.2　条件收集效率 6
7.3　泵浦功率归一化光子对速率和谱亮度 6
7.4　偏振关联可见度 6
7.5　量子态保真度、偏振量子态纯度、并发度 7
7.6　CHSH Bell 参数 8
7.7　光谱宽度 9
7.8　输出稳定性 9
8　测量不确定度和单侧置信下限 10
8.1　测量不确定度 10
8.2　单侧置信下限 10
9　测量报告 10
附录 A（资料性）　典型偏振投影态波片角度设置 12
附录 B（资料性）　测量报告模板 13
参考文献 16

前　言

本文件按照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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国量子技术标准化技术委员会（SAC/TC 578）提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

量子技术 双光子偏振纠缠源性能测量方法

1 范围

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，提供了测量报告。

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测量。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 27418-2017 测量不确定度评定和表示

GB/T 27419-2018 测量不确定度评定和表示 补充文件1：基于蒙特卡洛方法的分布传播

GB/T 42565-2023 量子计算 术语和定义

GB/T 43692-2024 量子通信术语和定义

3 术语和定义

GB/T 42565-2023和GB/T 43692-2024界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

双光子偏振纠缠源 two-photon polarization-entangled source

产生偏振纠缠光子对且两个光子分别经两个通道输出的光源或光学系统。

3.2

规定输出边界 specified output boundary

被测源与外部测量路径之间约定的光学接口位置。

注：内置于被测源的滤波器归入被测源，外置滤波器归入测量路径。

3.3

工作点 operating point

被测源单次测量期间保持不变的工作条件。

注：工作条件包括泵浦方式、泵浦功率、重复频率（适用时）、器件温度以及滤波和耦合设置。

3.4

符合窗口 coincidence window

判定两个或多个探测事件属于同一符合事件的时间区间。

3.5

符合计数 coincidence count

给定测量时间内，两个或多个单光子探测器输出信号的时间差落入**符合窗口**（3.5）的事件数。

3.6

真符合计数 true coincidence count

同一光子对中的两个光子分别被两个通道探测形成的**符合计数**（3.6）。

3.7

偶然符合计数 accidental coincidence count

不同光子对、暗计数或背景光子等不相关事件在符合窗口内随机形成的**符合计数**（3.6）。

3.8

光子对速率 photon-pair rate

单位时间内通过**规定输出边界**（3.3）的相关光子对数。

3.9

光子对平均数 mean photon-pair number

单个泵浦脉冲通过规定输出边界的相关光子对数的期望值。

3.10

符合与偶然符合比 coincidence-to-accidental ratio

真符合计数（3.7）与**偶然符合计数**（3.8）的比值。

3.11

条件收集效率 conditional collection efficiency

另一通道探测到相关光子的条件下，本通道光子到达探测器输入端的概率。

3.12

泵浦功率归一化光子对速率 pump-power-normalized photon-pair rate

光子对速率（3.9）与作用于被测源的平均泵浦功率之比。

3.13

谱亮度 spectral brightness

泵浦功率归一化**光子对速率**（3.13）与输出光子光谱宽度的比值。

3.14

偏振关联可见度 polarization correlation visibility

给定偏振测量基下，由相关和反相关符合计数之差归一化得到的无量纲量。

3.15

量子态层析 quantum state tomography

利用信息完备的测量数据重构未知量子态密度矩阵的方法。

[来源：GB/T 42565-2023，3.29，有修改]

3.16

量子态保真度 fidelity of quantum state

量子态物理实现与其理论模型相近程度的度量。

注：本文件采用7.5公式（15）定义的平方保真度。

[来源：GB/T 42565-2023，4.21]

3.17

偏振量子态纯度 polarization-state purity

双光子偏振态密度矩阵平方的迹。

注：表征量子态接近纯态的程度。

3.18

并发度 concurrence

定量表征双量子比特态纠缠程度的无量纲量。

注：取值范围0～1。

3.19

光谱宽度 spectral width

以波长表征的光子数谱密度曲线半峰值处两交点间的波长差。

3.20

输出稳定性 output stability

被测源在规定观测时间内，性能参数维持稳定的程度。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

CAR：符合与偶然符合比（Coincidence-to-Accidental Ratio）

CHSH：CHSH不等式（Clauser-Horne-Shimony-Holt inequality）

FWHM：半高全宽（Full Width at Half Maximum）

HWP：二分之一波片（Half-Wave Plate）

PBS：偏振分束器（Polarizing Beam Splitter）

QWP：四分之一波片（Quarter-Wave Plate）

RSD：相对标准偏差（Relative Standard Deviation）

TCSPC：时间相关单光子计数（Time-Correlated Single-Photon Counting）

TDC：时间数字转换器（Time-to-Digital Converter）

5 性能参数

双光子偏振纠缠源性能参数分为主要参数和特性参数，见表1。开展完整性能表征时，应测量全部主要参数；特性参数按需选测。

表 1 性能参数及测量方法

类别	参数	符号	测量方法
主要参数	光子对速率	B	7.1
	光子对平均数（脉冲泵浦源）	μ	7.1
	符合与偶然符合比	CAR	7.1
	偏振关联可见度	$V_{\mathrm{pol,b}}$	7.4
	量子态保真度	F	7.5
特性参数	条件收集效率	$\eta_{\mathrm{c,A}}$、$\eta_{\mathrm{c,B}}$	7.2
	泵浦功率归一化光子对速率	B_{p}	7.3
	谱亮度	B_{λ}	7.3
	偏振量子态纯度	P	7.5
	并发度	C	7.5
	CHSH Bell参数	S_{CHSH}	7.6
	光谱宽度	$\Delta\lambda_{\mathrm{FWHM}}$	7.7
	输出稳定性	$\mathrm{RSD_B}$、D_{B}	7.8

6 测量条件

6.1 环境条件

测量环境应符合下列要求：

——环境温度和相对湿度在被测源、测量仪器的规定工作范围内；

——光路遮光，防止环境杂散光入射探测器。

6.2 测量仪器

测量仪器应检定或校准合格且在有效期内，测量仪器要求见表2。

表 2 测量仪器要求

仪器	要求
单光子探测器	响应波长覆盖被测光谱；探测效率经校准；在测量计数率范围内线性响应；暗计数率、死时间和时间抖动已知
时间相关单光子计数器或时间数字转换器	输入通道数满足测量需要；时间分辨率满足符合窗口设置要求
偏振分析模块（QWP、HWP、PBS）	可实现H/V、D/A、R/L基的偏振投影；消光比和波片延迟在被测波段经标定
光谱测量装置	波长经校准；光谱分辨率足以分辨被测光谱宽度
光功率计	测量范围和波长覆盖泵浦光

6.3 测量通用要求

各项测量应符合下列通用要求：

a) 规定输出边界：以被测源的 A、B 输出端口作为规定输出边界；

b) 工作点：测量前确定并记录工作点，被测源预热至输出稳定后开始测量；报告的全部参数在同一工作点测得；

c) 符合测量：校准各通道间的相对延时；符合窗口以符合峰为中心，宽度覆盖完整符合峰，同一项测量中保持不变，记录窗口宽度；

d) 暗计数：遮断被测源输出，保持其余条件不变，测量各通道暗计数；

e) 通道探测效率：在被测波长与偏振条件下，校准 A、B 通道自规定输出边界至探测器的探测效率η_A、η_B，包括测量路径传输效率和探测器探测效率；

f) 偏振分析：双光子偏振态按 {|HH⟩, |HV⟩, |VH⟩, |VV⟩} 的基矢顺序表示，$|D\rangle=(|H\rangle+|V\rangle)/\sqrt{2}$，$|A\rangle=(|H\rangle-|V\rangle)/\sqrt{2}$，$|R\rangle=(|H\rangle+i|V\rangle)/\sqrt{2}$，$|L\rangle=(|H\rangle-i|V\rangle)/\sqrt{2}$；测量前在规定输出边界注入 H、V、D、A、R、L 参考偏振态，标定偏振分析模块；典型波片角度见附录 A；

g) 探测端口相对响应：采用双端口 PBS 四探测器配置时，逐端口标定 A+、A−、B+、B−的相对探测效率；计算偏振关联可见度和 CHSH Bell 参数时，各投影组合的符合计数除以相应两个端口相对探测效率的乘积进行归一化，量子态层析时将其计入测量算符；单端口配置下各投影由同一探测器测量，可不进行端口归一化；

h) 目标态：测量前根据被测源的设计输出指定目标态，通常为公式（11）～公式（14）给出的四种标准贝尔态之一;

i) 测量期间，除测量方法规定的投影切换外，光路和光学器件不应调整。

7 测量方法

7.1 光子对速率、光子对平均数、符合与偶然符合比

按下列步骤测量光子对速率、光子对平均数、符合与偶然符合比：

a) 按图 1 连接测量装置，按 6.3 校准通道探测效率；

b) 设置被测源工作点，待输出稳定；

c) 校准 A、B 通道相对延时，在符合峰中心设置符合窗口；

d) 在测量时间 T 内采集 A、B 通道单边计数 N_{A}、N_{B} 和符合窗口内原始符合计数 N_{raw}；

e) 同一测量时间内，在偏离符合峰、与符合窗口等宽的延迟窗口内测量偶然符合计数 N_{acc}；脉冲泵浦源可取相邻脉冲的符合峰；

f) 按公式（1）计算真符合计数，按公式（2）计算光子对速率：

$$N_{\mathrm{C}} = N_{\mathrm{raw}} - N_{\mathrm{acc}} \quad \cdots\cdots (1)$$

$$B = \frac{N_{\mathrm{C}}}{T\eta_{\mathrm{A}}\eta_{\mathrm{B}}} \quad \cdots\cdots (2)$$

式中：

B —— 光子对速率，单位为每秒（s^{-1}）；

N_{C} —— 真符合计数；

N_{raw} —— 符合窗口内的原始符合计数；

N_{acc} —— 偶然符合计数；

T —— 测量时间，即各通道共同有效采集计数的累计时间，单位为秒（s）；

η_{A}、η_{B} —— A、B 通道的探测效率；

g) 按公式（3）计算脉冲泵浦源的光子对平均数：

$$\mu = \frac{B}{f_{\mathrm{rep}}} \quad \cdots\cdots (3)$$

式中：

μ —— 光子对平均数；

f_{rep} —— 泵浦脉冲重复频率，单位为赫兹（Hz）；

h) 按公式（4）计算符合与偶然符合比：

$$\mathrm{CAR} = \frac{N_{\mathrm{C}}}{N_{\mathrm{acc}}} = \frac{N_{\mathrm{raw}} - N_{\mathrm{acc}}}{N_{\mathrm{acc}}} \quad \cdots\cdots (4)$$

式中：

CAR —— 符合与偶然符合比。

公式（1）、公式（2）和公式（4）适用于：延迟窗口或相邻脉冲符合峰可有效估计符合窗口内的偶然符合计数，多光子对贡献及探测器非线性的影响可忽略或已修正。不满足上述条件时，如接近确定性发射的脉冲源（相邻脉冲符合峰主要来源于不同脉冲中的光子），不应直接从中心峰扣除偶然符合计数，应采用与其发射统计特性和探测特性相适配的计数模型，并在报告中注明。

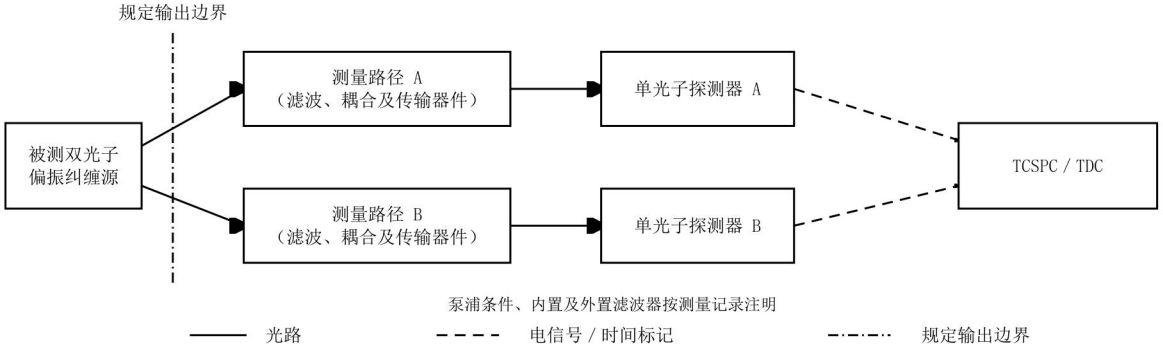


图 1　符合计数测量装置示意图

7.2　条件收集效率

按下列步骤测量条件收集效率：

a)　按图 1 连接测量装置；

b)　采用符合-单边计数法[1],按 7.1 采集 A、B 通道单边计数与符合计数，并按 6.3 测定各通道暗计数；

c)　按公式（5）、公式（6）分别计算 A、B 通道的条件收集效率，条件收集效率包括滤波、耦合和传输的影响，不包括探测器探测效率：

$$\eta_{\mathrm{c,A}}=\frac{N_{\mathrm{C}}}{N_{\mathrm{B,net}}\eta_{\mathrm{det,A}}} \quad \cdots\cdots (1)$$

$$\eta_{\mathrm{c,B}}=\frac{N_{\mathrm{C}}}{N_{\mathrm{A,net}}\eta_{\mathrm{det,B}}} \quad \cdots\cdots (2)$$

式中：

$\eta_{\mathrm{c,A}}$、$\eta_{\mathrm{c,B}}$ —— A、B 通道的条件收集效率；

$N_{\mathrm{A,net}}$、$N_{\mathrm{B,net}}$ —— 扣除暗计数后的 A、B 通道单边计数；

$\eta_{\mathrm{det,A}}$、$\eta_{\mathrm{det,B}}$ —— A、B 通道探测器的探测效率。

7.3　泵浦功率归一化光子对速率和谱亮度

按下列步骤测量泵浦功率归一化光子对速率和谱亮度：

a)　按图 1 连接测量装置，额外配置光功率计用于泵浦功率测量，并采用 7.7 规定的光谱测量装置测定光谱宽度；

b)　按 7.1 测量光子对速率 B；

c)　在同一工作点，用光功率计测量作用于被测源的平均泵浦功率 P_{p}；

d)　按 7.7 测量选定输出通道的光谱宽度；

e)　按公式（7）计算泵浦功率归一化光子对速率，按公式（8）计算谱亮度（以 A 通道为例）：

$$B_{\mathrm{p}}=\frac{B}{P_{\mathrm{p}}} \quad \cdots\cdots (1)$$

$$B_{\lambda,\mathrm{A}}=\frac{B_{\mathrm{p}}}{\Delta\lambda_{\mathrm{FWHM,A}}} \quad \cdots\cdots (2)$$

式中：

B_{p} —— 泵浦功率归一化光子对速率，单位为每秒每毫瓦（$\mathrm{s^{-1}\cdot mW^{-1}}$）；

P_{p} —— 平均泵浦功率，单位为毫瓦（mW）；

$B_{\lambda,\mathrm{A}}$ —— A 通道谱亮度，单位为每秒每毫瓦每纳米（$\mathrm{s^{-1}\cdot mW^{-1}\cdot nm^{-1}}$）；

$\Delta\lambda_{\mathrm{FWHM,A}}$ —— A 通道光谱宽度，单位为纳米（nm）。

7.4　偏振关联可见度

按下列步骤测量偏振关联可见度：

a)　按图 2 连接测量装置，按 6.3 标定偏振分析模块及各探测端口的相对响应；

b)　根据目标态（见 6.3）确定各测量基的相关类型系数 s_{b}：目标态在该基下以相同偏振投影占优时取+1，以正交偏振投影占优时取−1；

c)　在 H/V 基下采集 HH、HV、VH、VV 四个投影组合的符合计数，各组合测量时间相同；

d)　在 D/A 基下重复步骤 c）；

e） 各投影组合的符合计数按 6.3 g）归一化后，按公式（9）计算测量基 b 下的偏振关联可见度：

$$V_{\mathrm{pol},b} = s_b \frac{N_{\mathrm{same},b} - N_{\mathrm{diff},b}}{N_{\mathrm{same},b} + N_{\mathrm{diff},b}} \cdots\cdots (1)$$

式中：

$V_{\mathrm{pol,b}}$ —— 测量基 b 下的偏振关联可见度；

s_{b} —— 相关类型系数，取+1 或−1；

$N_{\mathrm{same,b}}$ —— 相同偏振投影（XX、YY）归一化后的符合计数之和；

$N_{\mathrm{diff,b}}$ —— 正交偏振投影（XY、YX）归一化后的符合计数之和。

注：采用双端口PBS时，可同步采集同一测量基下的4组投影组合；采用单端口配置时，依次切换投影完成测量。

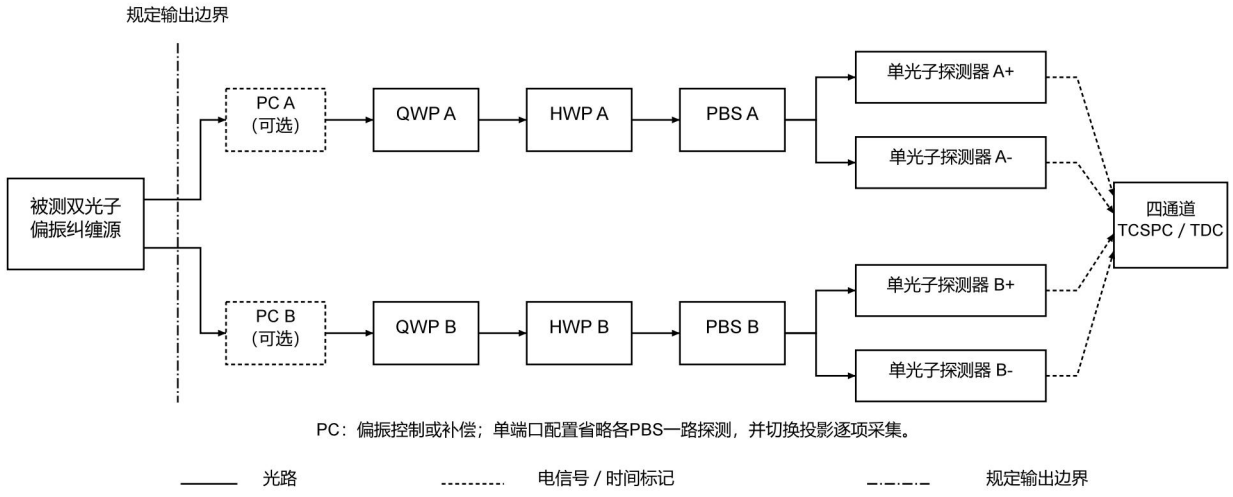


图 2 偏振分析测量装置示意图

7.5 量子态保真度、偏振量子态纯度、并发度

按下列步骤测量量子态保真度、偏振量子态纯度和并发度：

a） 按图 2 连接测量装置，按 6.3 标定偏振分析模块及各探测端口的相对响应，并指定目标态；

b） 对 A、B 两通道 H/V、D/A、R/L 基组成的 9 组测量基组合，每组采集 4 个联合投影的符合计数，共 36 个投影组合，各组合的测量时间相同；

c） 由 36 个投影组合的符合计数，采用最大似然法重构密度矩阵ρ_{exp}[2]，重构时将各探测端口的相对探测效率计入测量算符，ρ_{exp} 为迹等于 1 的 4×4 厄米半正定矩阵。

d） 目标态为纯态$|\psi_{\mathrm{target}}\rangle$ 时，按公式（10）确定理想密度矩阵，四种标准贝尔态按公式（11）～公式（14）表示：

$$\rho_{\mathrm{ideal}} = |\psi_{\mathrm{target}}\rangle\langle\psi_{\mathrm{target}}| \cdots\cdots (1)$$

$$|\Phi^+\rangle = \frac{|HH\rangle + |VV\rangle}{\sqrt{2}} \cdots\cdots (2)$$

$$|\Phi^-\rangle = \frac{|HH\rangle - |VV\rangle}{\sqrt{2}} \cdots\cdots (3)$$

$$|\Psi^+\rangle = \frac{|HV\rangle + |VH\rangle}{\sqrt{2}} \cdots\cdots (4)$$

$$|\Psi^-\rangle = \frac{|HV\rangle - |VH\rangle}{\sqrt{2}} \cdots\cdots (5)$$

e） 按公式（15）计算量子态保真度：

$$F=\left[\mathrm{Tr}\sqrt{\sqrt{\rho_{\mathrm{ideal}}}\rho_{\mathrm{exp}}\sqrt{\rho_{\mathrm{ideal}}}}\right]^{2} \cdots\cdots (6)$$

式中：

F —— 量子态保真度；

$\mathrm{Tr}(\cdot)$ —— 矩阵的迹；

ρ_{ideal} —— 目标态的理想密度矩阵；

ρ_{exp} —— 重构得到的密度矩阵；

f） 目标态为纯态时，公式（15）可简化为公式（16）：

$$F=\mathrm{Tr}\left(\rho_{\mathrm{ideal}}\rho_{\mathrm{exp}}\right)=\langle\psi_{\mathrm{target}}|\rho_{\mathrm{exp}}|\psi_{\mathrm{target}}\rangle \cdots\cdots (7)$$

g） 按公式（17）计算偏振量子态纯度：

$$P=Tr\left(\rho_{\mathrm{exp}}^{2}\right) \cdots\cdots (8)$$

式中：

P —— 偏振量子态纯度；

注：取值范围为1/4～1，P=1表示纯态。

h） 按文献[3]计算并发度，自旋翻转密度矩阵为公式（18）：

$$\tilde{\rho}_{\mathrm{exp}}=(\sigma_{\mathrm{y}}\otimes\sigma_{\mathrm{y}})\rho_{\mathrm{exp}}^{*}(\sigma_{\mathrm{y}}\otimes\sigma_{\mathrm{y}}) \cdots\cdots (9)$$

式中：

σ_{y}——泡利 Y 矩阵；

$\otimes$——张量积；

$*$——复共轭；

i） 令λ_1、λ_2、λ_3、λ_4为矩阵$\rho_{\mathrm{exp}}\rho_{\mathrm{exp}}$四个特征值的非负平方根，按从大到小排列，按公式（19）计算并发度：

$$C=\max(0,\lambda_1-\lambda_2-\lambda_3-\lambda_4) \cdots\cdots (10)$$

式中：

C —— 并发度。

上述参数由原始符合计数计算。目标态为标准贝尔态时，若F的95%单侧置信下限大于1/2，或C的95%单侧置信下限大于0，则表明被测源输出存在偏振纠缠[4]；单侧置信下限按8.2计算。

7.6 CHSH Bell 参数

按下列步骤测量CHSH Bell参数：

a） 按图 2 连接测量装置，按 6.3 标定偏振分析模块及各探测端口的相对响应；

b） 设置偏振分析角：A 通道为 a=0°、a′=45°；目标态为$|\Phi^{+}\rangle$或$|\Psi^{-}\rangle$时，B 通道为 b=22.5°、b′=67.5°；目标态为$|\Phi^{-}\rangle$或$|\Psi^{+}\rangle$时，B 通道为 b=157.5°、b′=112.5°；参考附录 A，理想配置下分析角 θ 对应 QWP 快轴取 θ、HWP 快轴取 θ/2，实际设置经标定确认；

c） 在（a，b）、（a，b′）、（a′，b）、（a′，b′）四组设置下，分别采集++、+−、−+、−−投影组合的符合计数，“+”对应分析角 θ 方向的线偏振投影，“−”对应 θ +90° 方向的投影。同一分析配置下各组投影组合测量时间应保持一致；若时间不同，先换算为符合计数率。

d) 按 6.3 g）归一化各投影组合的符合计数后，按公式（20）计算偏振关联函数，按公式（21）计算 CHSH Bell 参数：

$$E(a,b)=\frac{N_{++}+N_{--}-N_{+-}-N_{-+}}{N_{++}+N_{--}+N_{+-}+N_{-+}} \cdots\cdots (1)$$

$$S_{\mathrm{CHSH}}=E(a,b)-E\left(a,b'\right)+E\left(a',b\right)+E\left(a',b'\right) \cdots\cdots (2)$$

式中：

E(a,b) —— 分析设置 a、b 下的偏振关联函数；

N_{++}、N_{--}、N_{+-}、N_{-+} —— 相应投影组合归一化后的符合计数；

S_{CHSH} —— CHSH Bell 参数。

e) $|S_{\mathrm{CHSH}}|$的 95%单侧置信下限大于 2 时，判定违背 CHSH 不等式[5]；单侧置信下限按 8.2 计算。

注：本方法适用于目标态为标准贝尔态的被测源。

7.7 光谱宽度

按下列步骤测量光谱宽度：

a) 将光谱测量装置分别接入被测源的 A、B 输出端口；

b) 设置被测源工作点，待输出稳定；

c) 设定扫描范围、分辨率带宽与积分时间，扫描范围应覆盖完整谱峰；

d) 分别采集 A、B 通道的输出光谱，以及遮断信号后的背景光谱；

e) 扣除背景光谱，并完成仪器光谱响应修正；

f) 光谱以功率谱密度表示时，逐波长乘以λ/(hc)换算为光子数谱密度；式中 h 为普朗克常量，c 为真空中的光速；

g) 以光子数谱密度最大值的一半为半峰值，用线性插值确定两侧对应的波长λ_1、λ_2，光谱宽度$\Delta\lambda_{\mathrm{FWHM}}=\lambda_2-\lambda_1$，单位为纳米（nm）。

7.8 输出稳定性

按下列步骤测量输出稳定性：

a) 按图 1、图 2 连接测量装置；

b) 确定并记录观测时间和采样间隔；被测源输出稳定后，在观测时间内按采样间隔，重复按 7.1 测量光子对速率，按 7.4 测量 H/V、D/A 基的偏振关联可见度；

c) 测量期间不调整光路和工作点，同步记录泵浦功率和环境温度；

d) 分别按公式（22）、公式（23）计算光子对速率的相对标准偏差和最大相对偏差：

$$RSD_{\mathrm{B}}=\frac{s_{\mathrm{B}}}{\overline{B}}\times 100\% \cdots\cdots (1)$$

$$D_{\mathrm{B}}=\frac{\max_i\left|B_i-\overline{B}\right|}{\overline{B}}\times 100\% \cdots\cdots (2)$$

式中：

$\mathrm{RSD_B}$ —— 光子对速率的相对标准偏差；

D_{B} —— 光子对速率的最大相对偏差；

B_i —— 第 i 个采样点的光子对速率，单位为每秒（$\mathrm{s^{-1}}$）；

$\overline{B}$ —— 各采样点光子对速率的算术平均值，单位为每秒（$\mathrm{s^{-1}}$）；

s_{B} —— 各采样点光子对速率的实验标准偏差，单位为每秒（$\mathrm{s^{-1}}$）。

8 测量不确定度和单侧置信下限

8.1 测量不确定度

测量不确定度按GB/T 27418-2017评定，主要来源包括：

——计数统计；

——通道探测效率和探测器探测效率的校准；

——偏振分析元件的消光比、波片角度和延迟误差；

——暗计数、背景和偶然符合的估计；

——泵浦功率和光谱宽度的测量；

——测量期间的环境变化和被测源输出漂移。

计数服从泊松分布，计数N的标准不确定度取$\sqrt{N}$。由量子态层析、比值等非线性运算得到的参数，按GB/T 27419-2018采用蒙特卡洛法评定其不确定度。测量结果宜以测量值及其扩展不确定度表示，并注明包含因子。

8.2 单侧置信下限

用于纠缠判定（见7.5）和CHSH不等式判定（见7.6）的95%单侧置信下限，应符合下列要求：

a) 由原始计数按其统计模型计算，并计入偏振分析元件标定、探测端口相对响应等不可忽略的其他分量；

b) 存在零计数或低计数时，不应直接以实测计数为泊松均值抽样，应采用精确方法、似然比检验反演，或以重构模型给出的期望计数为均值抽样等方法；

c) 采用蒙特卡洛法时，抽样次数按 GB/T 27419-2018 的自适应程序要求，以数值结果收敛确定；

d) 所用方法应通过覆盖率验证：在实际的投影组合和计数水平下，选取判定阈值附近和测量结果附近的代表性密度矩阵作为已知态，分别生成多组模拟数据并按相同方法计算单侧置信下限，各已知态下置信下限不大于真值的比例均应不低于 95%；同时记录模拟次数和覆盖率估计值；

e) 采用最大似然层析时，应评估有限计数引入的估计偏差及其对纠缠判定的影响[6]。

各投影组合的计数较大、估计偏差可忽略且计算结果近似服从正态分布时，95%单侧置信下限可按公式（24）计算：

$$x_{\mathrm{L}} = x - 1.645u(x) \cdots\cdots (1)$$

式中：

x_{L} —— 95%单侧置信下限；

x —— 测量结果，即F、C或$|S_{\mathrm{CHSH}}|$；

$u(x)$ —— 测量结果的合成标准不确定度。

报告单侧置信下限时，应注明计算方法和覆盖率验证结果；采用蒙特卡洛法时，还应注明抽样次数。

9 测量报告

测量报告应至少包括下列内容：

a) 报告编号、测量单位、测量人员和测量日期；

b) 被测源的名称、型号、编号和泵浦方式；

c) 测量环境条件；

d) 测量仪器的名称、型号、编号和校准状态；
e) 工作点、目标态和规定输出边界的位置；
f) 符合测量设置：符合窗口宽度、测量时间、偶然符合估计方法及扣除规则；采用双端口 PBS 时，还应包括各探测端口的相对探测效率；
g) 测量项目、所用方法及偏离本文件规定的情况；输出稳定性还应包括观测时间和采样间隔；
h) 测量结果及其测量不确定度；用于判定时，给出 95%单侧置信下限及其计算方法和覆盖率验证结果；
i) 对测量结果有影响的其他情况。

测量报告模板参见附录B。

附 录 A
（资料性）
典型偏振投影态波片角度设置

表A.1给出光依次通过QWP、HWP和PBS，且PBS透射端对应H投影时的典型设置。角度为波片快轴方位角，以H轴为0°、向D轴转动为正；偏振态定义按6.3。采用exp[i(kz−ωt)]的场约定，并略去整体相位，QWP(0°)=diag(1,i)、HWP(0°)=diag(1,−1)。任意角度θ时，U(θ)=R(θ)U(0°)R(−θ)，其中 $R(\theta)=\begin{pmatrix}\cos\theta & -\sin\theta\\ \sin\theta & \cos\theta\end{pmatrix}$。PBS透射端对应的入射投影态为[UHWP UQWP]†|H⟩。其他轴、观察方向或相位约定应作相应换算

表 A.1 QWP—HWP—PBS 结构的典型角度设置

投影态	QWP快轴角度	HWP快轴角度
H	0°	0°
V	0°	45°
D	45°	22.5°
A	45°	−22.5°
R	45°	0°
L	−45°	0°
注：表中角度为典型设置，实际测量角度应按6.3的规定通过偏振分析模块标定确定。		

附 录 B
（资料性）
测量报告模板

表B.1给出测量记录表，可作为测量报告的记录模板。量子态层析各测量基组合下的投影1～投影4依次对应A、B两通道的（+，+）、（+，−）、（−，+）、（−，−）投影，“+”为H、D、R，“−”为V、A、L。原始数据较多时，可另附数据文件并记录其标识。

表 B.1 测量记录表

项目	记录内容			
一、基本信息				
报告编号	_____			
测量单位、测量人员	_____			
测量日期、地点	_____			
被测源名称、型号、编号	_____			
泵浦方式、泵浦波长、重复频率（脉冲泵浦源）	_____			
环境温度、相对湿度	____℃；____%			
二、测量仪器				
单光子探测器	型号、编号、校准状态：_____			
时间相关单光子计数器或时间数字转换器	型号、编号、校准状态：_____			
偏振分析模块	配置（单端口/双端口PBS）、型号、标定日期：_____			
光谱测量装置	型号、编号、校准状态：_____			
光功率计	型号、编号、校准状态：_____			
三、工作点和测量设置				
工作点	泵浦功率及其测量位置、器件温度、滤波和耦合设置：_____			
规定输出边界	位置：_____			
目标态	_____			
通道探测效率	η_A：____；η_B：____			
探测器探测效率	$\eta_{det,A}$：____；$\eta_{det,B}$：____			
探测端口相对探测效率（双端口PBS）	A+：____；A−：____；B+：____；B−：____			
符合测量设置	符合窗口宽度：____ ns；延迟窗口位置：____ ns；测量时间T：____ s			
偶然符合估计方法及扣除规则	_____			
暗计数	A：____；B：____（测量时间____ s）			
四、原始数据				
单边计数和符合计数	N_A	N_B	N_{raw}	N_{acc}
计数	____	____	____	____
偏振关联可见度测量基	**HH / DD**	**HV / DA**	**VH / AD**	**VV / AA**
H/V（s_b=____）	____	____	____	____

项目		记录内容			
D/A（s_b=____）		____	____	____	____
A通道测量基	**B通道测量基**	**投影1**	**投影2**	**投影3**	**投影4**
H/V	H/V	____	____	____	____
H/V	D/A	____	____	____	____
H/V	R/L	____	____	____	____
D/A	H/V	____	____	____	____
D/A	D/A	____	____	____	____
D/A	R/L	____	____	____	____
R/L	H/V	____	____	____	____
R/L	D/A	____	____	____	____
R/L	R/L	____	____	____	____
CHSH Bell参数分析角		a：____；a′：____；b：____；b′：____			
CHSH分析设置		**++**	**+−**	**−+**	**−−**
（a，b）		____	____	____	____
（a，b′）		____	____	____	____
（a′，b）		____	____	____	____
（a′，b′）		____	____	____	____
光谱		**λ_1 / nm**	**λ_2 / nm**	**$\Delta\lambda_{FWHM}$ / nm**	**数据文件标识**
A通道		____	____	____	____
B通道		____	____	____	____
输出稳定性		观测时间：____；采样间隔：____；时间序列数据文件标识：_____			

五、测量结果

参数（单位）	**测量值**	**扩展不确定度U（k=2）**	**95%单侧置信下限**
光子对速率B（s^{-1}）			—
光子对平均数μ（脉冲泵浦源）			—
符合与偶然符合比CAR			—
条件收集效率$\eta_{c,A}$、$\eta_{c,B}$			—
平均泵浦功率P_p（mW）			—
泵浦功率归一化光子对速率B_p（$s^{-1}\cdot mW^{-1}$）			—
光谱宽度$\Delta\lambda_{FWHM,A}$、$\Delta\lambda_{FWHM,B}$（nm）			—
谱亮度B_λ（$s^{-1}\cdot mW^{-1}\cdot nm^{-1}$），通道：____			—
偏振关联可见度$V_{pol,H/V}$			—
偏振关联可见度$V_{pol,D/A}$			—
量子态保真度F			
偏振量子态纯度P			—
并发度C			
CHSH Bell参数$\lvert S_{CHSH}\rvert$			
输出稳定性RSD_B、D_B（%）			—

项目	记录内容		
偏振关联可见度变化范围（H/V、D/A基）			—
六、判定和说明			
单侧置信下限计算方法	方法：____；抽样次数：____；覆盖率验证结果：____		
纠缠及CHSH判定结论	_____		
偏离本文件规定的情况	_____		
其他说明	_____		
测量人：_____　　复核人：_____　　日期：_____			

参 考 文 献

[1] KLYSHKO D N. Use of two-photon light for absolute calibration of photoelectric detectors[J]. Soviet Journal of Quantum Electronics, 1980, 10(9): 1112-1117. DOI: 10.1070/QE1980v010n09ABEH010660.

[2] JAMES D F V, KWIAT P G, MUNRO W J, WHITE A G. Measurement of qubits[J]. Physical Review A, 2001, 64(5): 052312. DOI: 10.1103/PhysRevA.64.052312.

[3] WOOTTERS W K. Entanglement of formation of an arbitrary state of two qubits[J]. Physical Review Letters, 1998, 80(10): 2245-2248. DOI: 10.1103/PhysRevLett.80.2245.

[4] GÜHNE O, HYLLUS P, BRUß D, et al. Detection of entanglement with few local measurements[J]. Physical Review A, 2002, 66(6): 062305. DOI: 10.1103/PhysRevA.66.062305.

[5] CLAUSER J F, HORNE M A, SHIMONY A, HOLT R A. Proposed experiment to test local hidden-variable theories[J]. Physical Review Letters, 1969, 23(15): 880-884. DOI: 10.1103/PhysRevLett.23.880.

[6] SCHWEMMER C, KNIPS L, RICHART D, et al. Systematic Errors in Current Quantum State Tomography Tools[J]. Physical Review Letters, 2015, 114(8): 080403. DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.080403.