



中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

周期极化铌酸锂量子频率转换器件性能测试方法

Performance testing methods for periodically poled lithium niobate quantum frequency conversion devices

（征求意见稿）

（本草案完成时间：2025.8.27）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

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 器件结构 2

5 测试环境要求 2

6 测试设备要求 2

7 性能测试方法 2

 7.1 准相位匹配温度 3

 7.2 频率转换带宽 3

 7.3 量子频率转换效率 4

 7.4 量子频率转换噪声 5

 7.5 量子态保持特性 6

8 测试报告 7

附录 A（资料性） 典型周期极化铌酸锂量子频率转换器件结构 9

附录 B（资料性） 测试报告记录信息 10

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。

本文件由全国量子计算与测量标准化技术委员会（SAC/TC 578）提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

周期极化铌酸锂量子频率转换器件性能测试方法

1 范围

本文件描述了周期极化铌酸锂量子频率转换器件（以下简称：器件）的结构、测试环境要求、测试设备要求、性能测试方法，规定了测试报告的要求。

本文件适用于周期极化铌酸锂晶体以及基于该晶体制作的质子交换波导、金属扩散波导、薄膜脊型波导等光学非线性频率转换器件的性能参数测试。

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 15313 激光术语

GB/T 43737 量子测量术语

3 术语和定义

GB/T 15313和GB/T 43737界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

量子频率转换 quantum frequency conversion

将一个波段的量子态转换为另一波段量子态，同时保持量子态统计特性不变的过程。

注：验证器件的量子态保持特性，需测试并绘制概率性单光子源经器件进行量子频率转换前后的二阶自相关函数直方图，以两个直方图中0延时对应的最低值的接近程度作为量子态保持特性的衡量标准。最低值均小于经典阈值0.5的前提下越接近，证明经过量子频率转换过程，量子态保持越完好。

3.2

和频光 sum frequency light

从器件输出端输出，通过器件实现和频转换后的光信号。

3.3

差频光 difference frequency light

从器件输出端输出，通过器件实现差频转换后的光信号。

3.4

泵浦光 pump light

从器件输入端输入，为实现非线性光学过程提供泵浦的激光。

3.5

信号光 signal light

从器件输入端输入，需要在泵浦光辅助下实现和频/差频的光信号。

3.6

准相位匹配温度 quasi-phase matching temperature

器件进行和频/差频转换时，达到最大转换效率时的工作温度。

3.7

频率转换带宽 frequency conversion bandwidth

器件进行和频/差频转换时，改变信号光波长，和频光/差频光功率达到最大值一半时对应的两波长之间的宽度。

3.8

量子频率转换效率 quantum frequency conversion efficiency

器件进行和频/差频转换时，输出和频光/差频光与输入信号光的光子数比值。

3.9

量子频率转换噪声 quantum frequency conversion noise

器件进行和频/差频转换时，关闭信号光只输入泵浦光，经过滤波模块后，单位带宽内的光子计数率。

3.10

概率性单光子源 probabilistic single-photon source

无法在未来任意指定时刻作为单光子源,但通过光子发射时的关联物理现象能确定某些时刻作为单光子源的光源。

[来源：GB/T 43784—2024，3.13]

3.11

二阶自相关函数 second-order autocorrelation function

两个时空点上光强度的统计关联特性。

注：其数学表达涉及光强乘积的平均值计算，用于考察光的相干性。

4 器件结构

器件主要包括周期极化铌酸锂晶体或波导，及其配套使用的半导体制冷器、热敏电阻、机械外壳等组成部分，封装方式包含光纤耦合及自由空间方式。典型器件结构见附录A。

5 测试环境要求

测试环境应满足以下要求：

- a) 温度范围：10℃~35℃；
- b) 相对湿度：≤85%；
- c) 振动和干扰：无影响试验工作的光噪声、明显气流、电磁辐射或机械振动。

6 测试设备要求

测试设备应满足以下要求：

- a) 测试设备的量程满足被测器件参数范围；
- b) 精度范围至少优于被测指标误差4倍以上，一般情况下数字仪表示值至少有3位有效数字；
- c) 测试设备良好接地；
- d) 测试使用的电源电压、纹波及电源噪声等满足试验设备说明书的使用要求。

7 性能测试方法

7.1 准相位匹配温度

准相位匹配温度测试步骤如下：

- 按图 1 所示连接测试系统；
- 选择相应的信号光与泵浦光，待其输出稳定后，用光谱分析仪与光功率计测试并记录器件输入端信号光与泵浦光的波长与功率；
- 调节偏振控制元件，根据被测器件类型与准相位匹配类型，将信号光与泵浦光的偏振态调整至相应方向（如器件为基于 z 切薄膜的周期极化铌酸锂波导、0 型准相位匹配，需将输入器件的信号光与泵浦光偏振方向均调整至平行于 z 轴，即 e 光偏振态）；
- 调节温控模块，改变被测器件工作温度，使光功率计探测到和频光/差频光功率最大值 $P_{\text{out}i}$ 并记录此时的温度值 T_i ；
- 保持 b) 输入条件不变，重复测量 n ($n \geq 5$) 次，按公式(1)～(2)计算 n 次测量数据的均值，得到和频光/差频光功率最大值 P_{out} 和准相位匹配温度 T 。

$$P_{\text{out}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{\text{out}i} \dots\dots\dots (1)$$

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \dots\dots\dots (2)$$

式中：

P_{out} ——和频光/差频光功率最大值的平均值，单位为毫瓦特（mW）；

n ——测量次数；

$P_{\text{out}i}$ ——第 i 次测量的和频光/差频光功率最大值，单位为毫瓦特（mW）；

T ——准相位匹配温度的平均值，单位为摄氏度（℃）；

T_i ——第 i 次测量的准相位匹配温度，单位为摄氏度（℃）。

注1：信号光与泵浦光均由连续单频线偏振光源产生；

注2：温控模块的温度精度应优于 0.01°C 。

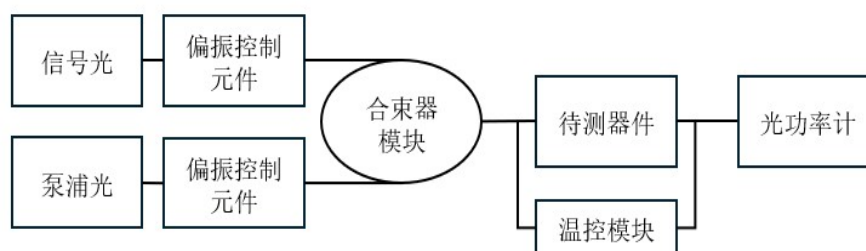


图1 准相位匹配温度测试框图

7.2 频率转换带宽

频率转换带宽测试步骤如下：

- 按图 1 所示连接测试系统；
- 按 7.1 操作找到准相位匹配温度值、信号光波长与和频光/差频光功率最大值；
- 在信号光波长附近以 0.01nm 步进扫描波长，测量对应的和频光/差频光功率并将数据进行平滑处理，得出和频光/差频光功率最大值一半对应的、分别位于信号光波长左右两端且最接近信号光的波长 λ_{1i} 与 λ_{2i} ，有效小数位数不低于 3 位；

- d) 保持 b) 输入条件不变, 重复测量 n ($n \geq 5$) 次, 按公式(3)~(4)计算 n 次测量数据的均值, 得到和频光/差频光功率最大值一半对应的、分别位于信号光波长左右两端且最接近信号光的波长 λ_1 与 λ_2 ;

$$\lambda_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_{1i} \dots\dots\dots (3)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_{2i} \dots\dots\dots (4)$$

式中:

λ_1 ——输入信号光/泵浦光功率应满足小信号近似条件, 和频光/差频光功率经平滑处理后得到拟合值, 得到最大拟合值的一半且最接近最大值的两个信号光波长较大值(或较小值)的平均值, 单位为纳米(nm);

n ——测量次数;

λ_{1i} ——输入信号光/泵浦光功率应满足小信号近似条件, 第 i 次测量的和频光/差频光功率经平滑处理后得到拟合值, 得到最大拟合值的一半且最接近最大值的两个信号光波长较大值(或较小值), 单位为纳米(nm);

λ_2 ——输入信号光/泵浦光功率应满足小信号近似条件, 和频光/差频光功率经平滑处理后得到拟合值, 得到最大拟合值的一半且最接近最大值的两个信号光波长较小值(或较大值)的平均值, 单位为纳米(nm);

λ_{2i} ——输入信号光/泵浦光功率应满足小信号近似条件, 第 i 次测量的和频光/差频光功率经平滑处理后得到拟合值, 得到最大拟合值的一半且最接近最大值的两个信号光波长较小值(或较大值), 单位为纳米(nm)。

- e) 按公式(5)计算 n 次测量数据的均值, 得到频率转换带宽 λ_{FWHM} 。

$$\lambda_{\text{FWHM}} = |\lambda_1 - \lambda_2| \dots\dots\dots (5)$$

式中:

λ_{FWHM} ——被测器件的频率转换带宽, 单位为纳米(nm)。

注1: 信号光与泵浦光均由可调谐恒功率连续单频线偏振光源产生, 功率应满足小信号近似条件;

注2: 扫描步进为建议值, 可根据带宽测试精度需求进行调整。

7.3 量子频率转换效率

量子频率转换效率测试步骤如下:

- a) 按图1所示连接测试系统;
- b) 按7.1操作找到准相位匹配温度值, 逐步调节泵浦光功率, 并调节温控模块, 改变被测器件工作温度, 直至光功率计探测到和频光/差频光功率最大值 $P_{\text{out}i}$, 记录 $P_{\text{out}i}$;
- c) 保持 b) 输入条件不变, 重复测量 n ($n \geq 5$) 次, 按公式(6)计算 n 次测量数据的均值, 得到和频光/差频光功率最大值 P_{out} ;

$$P_{\text{out}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{\text{out}i} \dots\dots\dots (6)$$

式中:

P_{out} ——和频光/差频光功率最大值的平均值, 单位为毫瓦特(mW);

n ——测量次数;

$P_{\text{out}i}$ ——第 i 次测量的和频光/差频光功率最大值, 单位为毫瓦特(mW)。

- d) 用光谱分析仪测试并记录被测器件输出端和频光/差频光波长 λ_{out} ;

- e) 按公式(7)计算出量子频率转换效率 η ;

$$\eta = \frac{P_{\text{in}} \cdot \lambda_{\text{in}}}{P_{\text{out}} \cdot \lambda_{\text{out}}} \times 100\% \quad (7)$$

式中：

η ——被测器件的量子频率转换效率；

P_{in} ——被测器件输入端信号光的功率，单位为毫瓦特（mW）；

λ_{in} ——被测器件输入端信号光的波长，单位为纳米（nm）；

λ_{out} ——被测器件输出端和频光/差频光的波长，单位为纳米（nm）。

7.4 量子频率转换噪声

量子频率转换噪声测试步骤如下：

- 按图 2 所示连接测试系统；
- 打开信号光与泵浦光，使用一定光子计数率的信号光输入波导中（建议进行 10 万光子/秒标定）；
- 调节偏振控制元件，根据被测器件种类与准相位匹配类型，将信号光与泵浦光的偏振态调整至相应方向；
- 调节温控模块，改变被测器件工作温度，使单光子探测器探测到的和频光/差频光的光子计数率为最大；
- 保持泵浦光与温控模块状态不变，关闭信号光，记录器件在一定频率转换效率时的探测器计数率 C_{1i} ；
- 保持温控模块状态不变，关闭泵浦光，记录此时的探测器本底噪声计数率 C_{2i} ；
- 保持 b) 输入条件不变，重复测量 n ($n \geq 5$) 次，按公式(8)和公式(9)计算 n 次测量数据的均值，得到器件在一定频率转换效率时的探测器计数率 C_1 与探测器本底噪声计数率 C_2 ；

$$C_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_{1i} \quad (8)$$

$$C_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_{2i} \quad (9)$$

式中：

C_1 ——器件在一定的频率转换效率时，关闭信号光后只输入泵浦光时的单光子探测器计数率的平均值，单位为计数每秒（cps）；

n ——测量次数；

C_{1i} ——第 i 次测量的器件在一定的频率转换效率时，关闭信号光后只输入泵浦光时的单光子探测器计数率，单位为计数每秒（cps）；

C_2 ——单光子探测器本底噪声计数率的平均值，单位为计数每秒（cps）；

C_{2i} ——第 i 次测量的单光子探测器本底噪声计数率，单位为计数每秒（cps）；

- 根据单光子探测器的探测效率 σ_1 、带通滤波模块的通光效率 σ_2 、带通滤波模块的带宽 λ_b ，按公式(10)计算出量子频率转换噪声 N 。

$$N = \frac{C_1 - C_2}{\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \lambda_b} \quad (10)$$

式中：

N ——被测器件所组成系统在特定滤波条件下单位带宽内的计数率，单位为计数每秒每纳米（cps/nm）；

σ_1 ——单光子探测器的探测效率；

σ_2 ——带通滤波模块的通光效率；

λ_b ——带通滤波模块的带宽，单位为纳米（nm）。

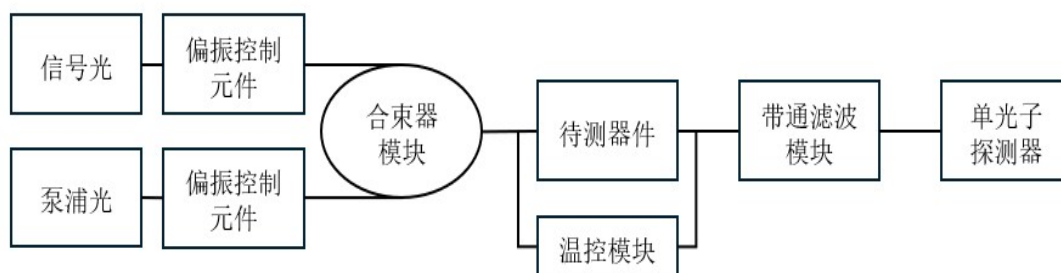


图2 量子频率转换噪声测试框图

7.5 量子态保持特性

量子态保持特性测试步骤如下：

- 测试概率性单光子源二阶自相关函数，按图 3 所示连接测试系统，s 通道中心波长应在器件频率转换带宽范围内；
- 打开纠缠光子源，调节可调谐滤波器，使 i 通道中心频率与 s 通道中心频率关于纠缠光子源的中心频率对称，将 i 通道可调谐滤波器带宽设置与 DWDM 带宽相同，即 s 通道与 i 通道光谱对应；
- 运行时间相关单光子计数器程序，在门宽大于测试单元时间抖动的条件下分别试验得到 i 通道计数率 C_i ，s1 通道与 i 通道 0 延时符合计数率 $C_{s1i}(0)$ ，s2 通道与 i 通道的符合计数率 $C_{s2i}(\tau)$ 以及 s1 通道、s2 通道与 i 通道的三通道符合计数率 $C_{ssi}(\tau)$ ；
- 根据公式 (11) 计算概率性单光子源的二阶自相关函数 $g_H^{(2)}(\tau)$ ，得到横坐标为 τ ，纵坐标轴为 $g_H^{(2)}(\tau)$ 的直方图，记录 0 延时对应的最低值 $g_H^{(2)}(0)$ 。

$$g_H^{(2)}(\tau) = \frac{C_{ssi}(\tau) \cdot C_i}{C_{s1i}(0) \cdot C_{s2i}(\tau)} \quad (11)$$

式中：

$g_H^{(2)}(\tau)$ ——概率性单光子源的二阶自相关函数；

C_i ——i通道的计数率，单位为计数每秒（cps）；

$C_{s1i}(0)$ ——s1通道和i通道的0延时双通道符合计数率，单位为计数每秒（cps）；

$C_{s2i}(\tau)$ ——s2通道和i通道的双通道符合计数率，单位为计数每秒（cps）；

$C_{ssi}(\tau)$ ——s1通道、s2通道和i通道的三通道符合计数率，单位为计数每秒（cps）。

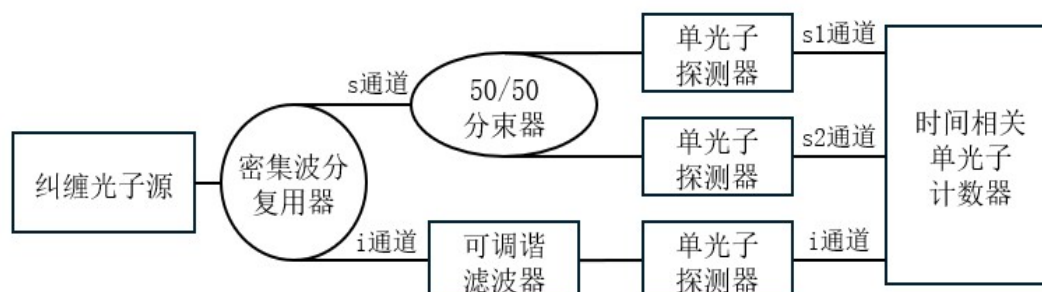


图3 概率性单光子源二阶自相关函数测试框图

- 测试概率性单光子源经过频率转换（和频/差频）后二阶自相关函数，按图 4 所示连接测试系统，s 通道中心波长应在器件频率转换带宽范围内；

- f) 打开纠缠光子源，调节可调谐滤波器，使 i 通道中心频率与 s 通道中心频率关于纠缠光子源中心频率对称，将 i 通道可调谐滤波器带宽设置与 DWDM 带宽相同，即 s 通道与 i 通道光谱对应；
- g) 打开泵浦光，调节温控模块，直至 s1 通道、s2 通道单光子探测器探测到和频光/差频光的光子计数率为最大；
- h) 运行时间相关单光子计数器程序，在 7.5.2 门宽条件下分别试验得到 i 通道计数率 C_i ，s1 通道与 i 通道 0 延时符合计数率 $C_{s1i}(0)$ ，s2 通道与 i 通道的符合计数率 $C_{s2i}(\tau)$ ，以及 s1 通道、s2 通道与 i 通道的三通道符合计数率 $C_{ssi}(\tau)$ ；
- i) 根据公式(12)计算概率性单光子源经过频率转换（和频或差频）后的二阶自相关函数 $g_{\text{HQFC}}^{(2)}(\tau)$ ，得到横坐标为 τ ，纵坐标轴为 $g_{\text{HQFC}}^{(2)}(\tau)$ 的直方图，记录 0 延时的最低值 $g_{\text{HQFC}}^{(2)}(0)$ ：

$$g_{\text{HQFC}}^{(2)}(\tau) = \frac{C_{\text{ssi}}(\tau) \cdot C_i}{C_{s1i}(0) \cdot C_{s2i}(\tau)} \dots\dots\dots (12)$$

式中：

$g_{\text{HQFC}}^{(2)}(\tau)$ ——概率性单光子源经过频率转换（和频/差频）后的二阶自相关函数；

C_i ——i通道的计数率，单位为计数每秒（cps）；

$C_{s1i}(0)$ ——s1通道和i通道的0延时双通道符合计数率，单位为计数每秒（cps）；

$C_{s2i}(\tau)$ ——s2通道和i通道的双通道符合计数率，单位为计数每秒（cps）；

$C_{ssi}(\tau)$ ——s1通道、s2通道和i通道的三通道符合计数率，单位为计数每秒（cps）。

注1：建议EPS的CAR值不低于10，实验需优化测试光路传输效率或延长积分时间以获得足够的数据量，以保证所绘制的概率性单光子源频率转换前后二阶自相关函数 $g_{\text{H}}^{(2)}(\tau)$ 与 $g_{\text{HQFC}}^{(2)}(\tau)$ 的直方图在非0延时区数据平坦并接近理想值1。

注2：概率性单光子源二阶自相关函数 $g_{\text{H}}^{(2)}(\tau)$ 的直方图、0延时时应具有最低值 $g_{\text{H}}^{(2)}(0)$ ，确认该值低于经典阈值0.5。

注3：概率性单光子源经过频率转换（和频或差频）后的二阶自相关函数 $g_{\text{HQFC}}^{(2)}(\tau)$ 的直方图、0延时时的最低值 $g_{\text{HQFC}}^{(2)}(0)$ ，确认该值低于经典阈值0.5。

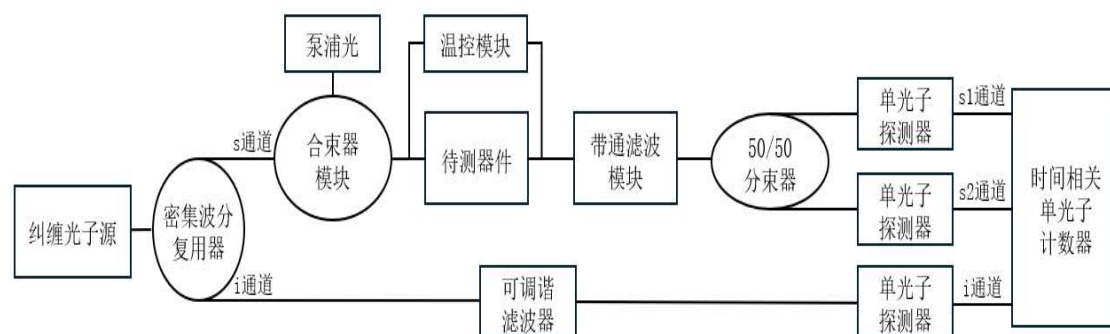


图4 概率性单光子源经过频率转换（和频/差频）后二阶自相关函数测试框图

8 测试报告

测试报告应包含以下内容：

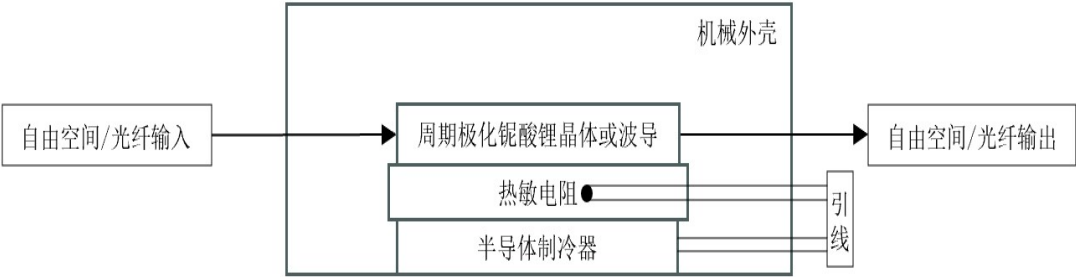
- a) 测试报告的唯一编号；
- b) 被测器件的型号和序列号；
- c) 测试内容及要求；
- d) 测试仪器的型号和工作条件；
- e) 测试结果以及必要的结果说明；
- f) 测试日期；

- g) 测试人员及审核人员签字；
 - h) 测试单位名称及地址；
 - i) 测试报告页码。
- 测试报告记录信息模板见附录B。

附录 A
(资料性)

典型周期极化铌酸锂量子频率转换器件结构

典型周期极化铌酸锂量子频率转换器件结构见图A.1。



图A.1 典型周期极化铌酸锂量子频率转换器件结构示意图

附 录 B
(资料性)
测试报告记录信息

测试报告记录信息见表B.1。

表B.1 测试报告记录数据

序号	项目	内容	
1	报告编号		
2	待测器件型号		
3	待测器件状态		
4	测试内容与要求		
5	测试仪器	光功率计型号	
		光谱仪型号	
		单光子探测器型号	
		时间相关单光子计数器型号	
6	测试环境	相对湿度	
		温度	
		温度波动范围	
		洁净度	
7	测试结果		
7.1	准相位匹配温度	信号光波长	
		信号光功率	
		泵浦光波长	
		泵浦光功率	
		最大和频光/差频光功率	
		准相位匹配温度	
7.2	频率转换带宽	泵浦光波长	
		对应最大和频光/差频光功率二分之一的信号光波长较小值	
		对应最大和频光/差频光功率二分之一的信号光波长较大值	
		频率转换带宽	
7.3	量子频率转换效率	信号光波长	
		信号光功率	
		和频光/差频光波长	
		最大和频光/差频光功率	
		量子频率转换效率	

序号	项目	内容	
7.4	量子频率转换噪声	器件在一定的量子频率转换效率下，只输入泵浦光的单光子探测器噪声计数率	
		单光子探测器本底噪声计数率	
		单光子探测器探测效率	
		带通滤波模块通光效率	
		带通滤波模块带宽	
		量子频率转换噪声	
7.5	量子态保持特性	概率性单光子源二阶自相关函数0延时最低值	
		概率性单光子源经过经过频率转换（和频/差频）后二阶自相关函数0延时最低值	
测试人姓名：测试单位联系电话：			
测试人单位：审核人姓名：			
测试单位（公章）：测试日期：			
报告书共 页			