



中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

量子压缩光源技术规范

Technical specification for quantum squeezed light sources

（征求意见稿）

（本草案完成时间：2025 年 8 月 5 日）

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
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 1

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 量子压缩光源的原理与分类 2

5 参数要求 4

6 制备方法 4

7 测试方法 7

8 评估报告 12

附录 A（资料性） 相敏非线性过程常用方法..... 13

附录 B（资料性） 测试报告模版..... 14

参考文献 15

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：

量子压缩光源技术规范

1 范围

本文件界定了量子压缩光源的术语和定义，描述了量子压缩光源的原理与分类，规定了量子压缩光源的参数要求、制备方法与测试方法。

本文件适用于自发参量下转换、四波混频、光力和克尔效应等方法制备的量子压缩光源，在量子精密测量等领域中的量子压缩光源参照使用。

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 43737—2024 量子测量术语

3 术语和定义

GB/T 43737—2024界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

标准量子极限 standard quantum limit

散粒噪声极限 shot noise limit

由量子力学原理决定的噪声极限。

注：处于真空态时两个正交分量的量子噪声相等且满足海森堡最小不确定关系。

3.2

真空态 vacuum state

真空能量密度的量子态。

注：真空能量密度时两个正交分量的量子噪声起伏均达到标准量子极限。

3.3

相干态 coherent state

两个正交分量的量子噪声起伏均达到标准量子极限的量子态。

注：相空间中正交分量起伏分布呈圆特征。

[来源：GB/T 43737—2024，3.12，有修改]

3.4

压缩态 squeezed state

满足海森堡不确定度关系且某一正交分量的量子噪声起伏低于标准量子极限的量子态。

注：相空间中正交分量起伏分布呈椭圆特征。

[来源：GB/T 43737—2024，3.13，有修改]

3.5

量子压缩光源 quantum squeezed light source

能够产生压缩态的量子光源。

3.6

压缩度 squeezed degree

衡量压缩分量量子噪声起伏的程度。

注：通常用 $V_{dB} = 10 \log_{10}(V_s)$ 的数值结果来表示，其中 V_s 为压缩分量的噪声方差。

4 量子压缩光源的原理与分类

4.1 原理

依据海森堡不确定原理，量子压缩光源通过相敏非线性过程，可以抑制光场的某一正交分量的噪声起伏，使其低于标准量子极限，而与之共轭的正交分量噪声起伏则被放大。当使用量子压缩光源开展精密测量时，待测信号与压缩分量一致，则可实现突破标准量子噪声极限的信号提取。

如果两个正交分量的噪声方差 $\Delta^2 \hat{A}$ 和 $\Delta^2 \hat{B}$ 满足式（1）或式（2）关系，即为压缩态：

$$\Delta^2 \hat{A} < \frac{1}{2} |\alpha|, \Delta^2 \hat{B} > \frac{1}{2} |\alpha| \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta^2 \hat{A} > \frac{1}{2} |\alpha|, \Delta^2 \hat{B} < \frac{1}{2} |\alpha| \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$\Delta^2 \hat{A}$ ——量子压缩光源正交分量 $\hat{A}$ 的量子噪声起伏；

$\Delta^2 \hat{B}$ ——量子压缩光源正交分量 $\hat{B}$ 的量子噪声起伏；

$\hat{A}, \hat{B}$ ——量子压缩光源的两个正交分量，满足对易关系： $[\hat{A}, \hat{B}] = i\hat{a}$ 。

因此，两个分量的方差不能同时小于 $\frac{1}{2} |\alpha|$ 。

当两正交分量为振幅和相位时，正交振幅算符和正交相位算符定义见式（3）和式（4）：

$$\hat{X} = (\hat{a} + \hat{a}^+) \dots\dots\dots (3)$$

$$\hat{Y} = \frac{1}{i} (\hat{a} - \hat{a}^+) \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$\hat{a}$ ——湮灭算符；

$\hat{a}^+$ ——产生算符。

使用 $\hat{X}$ 、 $\hat{Y}$ 可以得到压缩态的噪声方差满足式（5）或式（6）关系：

$$\Delta^2 \hat{X} < 1, \Delta^2 \hat{Y} > 1 \dots\dots\dots (5)$$

$$\Delta^2 \hat{X} > 1, \Delta^2 \hat{Y} < 1 \dots\dots\dots (6)$$

式中：

$\Delta^2 \hat{X}$ ——正交振幅噪声起伏；

$\Delta^2 \hat{Y}$ ——正交相位噪声起伏；

真空态、正交振幅压缩态、正交位相压缩态的相空间示意如图1所示，其中 r 为压缩因子。

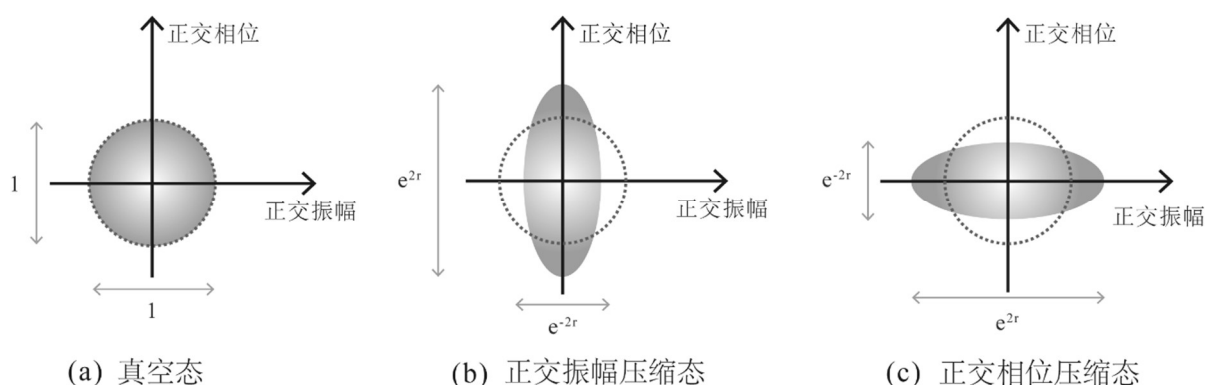


图1 真空态、正交振幅压缩态、正交相位压缩态的相空间示意图

4.2 分类

4.2.1 正交振幅压缩态量子光源

当基频光和倍频光的相对相位为 π 时，光场振幅分量的量子起伏低于相干态正交振幅分量起伏，该光场称为正交振幅压缩态，即满足式（5）的关系。示意图见图1（b）。

4.2.2 正交相位压缩态量子光源

当基频光和倍频光的相对相位为0时，光场相位分量的量子起伏低于相干态正交相位分量起伏，该光场称为正交相位压缩态，即满足式（6）关系。示意图见图1（c）。

4.2.3 任意分量压缩态量子光源

当基频光和倍频光的相对相位为任意相位时，光场一个正交振幅和正交相位线性组合分量的量子起伏低于相干态的量子噪声起伏，该光场称为任意分量压缩态，即满足（7）或者（8）关系。示意图见图2，其中 X_1 ， Y_1 和 X_2 ， Y_2 分别为正交振幅与正交相位和任意分量压缩对应的压缩与反压缩分量。

$$\Delta^2(\cos\frac{\theta}{2}\hat{X} + \sin\frac{\theta}{2}\hat{Y}) > 1, \Delta^2(-\sin\frac{\theta}{2}\hat{X} + \cos\frac{\theta}{2}\hat{Y}) < 1 \dots\dots\dots (7)$$

$$\Delta^2(\cos\frac{\theta}{2}\hat{X} + \sin\frac{\theta}{2}\hat{Y}) < 1, \Delta^2(-\sin\frac{\theta}{2}\hat{X} + \cos\frac{\theta}{2}\hat{Y}) > 1 \dots\dots\dots (8)$$

式中：

θ ——压缩角。

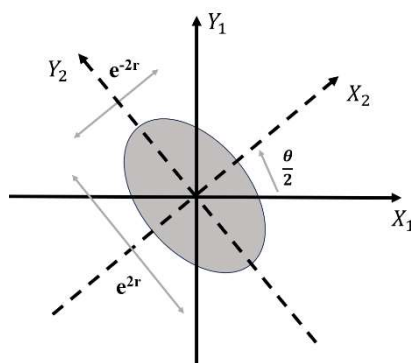


图2 任意分量压缩态示意图

5 参数要求

5.1 概述

量子压缩光源参数包括压缩度、输出功率、光束质量、纯度，各参数性质如下：

- a) 压缩度：量子压缩光源关键参数指标，用于衡量光源压缩分量的量子噪声起伏；
- b) 输出功率：用于衡量量子压缩光源亮度；
- c) 光束质量：用于衡量压缩态量子光源聚焦的能力；
- d) 纯度：用于衡量量子态与纯态接近程度的一个物理量。

5.2 压缩度

压缩度应小于0dB。

5.3 输出功率

输出功率宜大于0W。

5.4 光束质量

光束质量 M^2 宜小于1.1。

5.5 纯度

纯度宜介于0~1之间。

6 制备方法

6.1 概述

量子压缩光源主要包括：激光器、相敏非线性模块、探测系统、腔长锁定电子伺服回路以及相位锁定电子伺服回路，如图3所示。

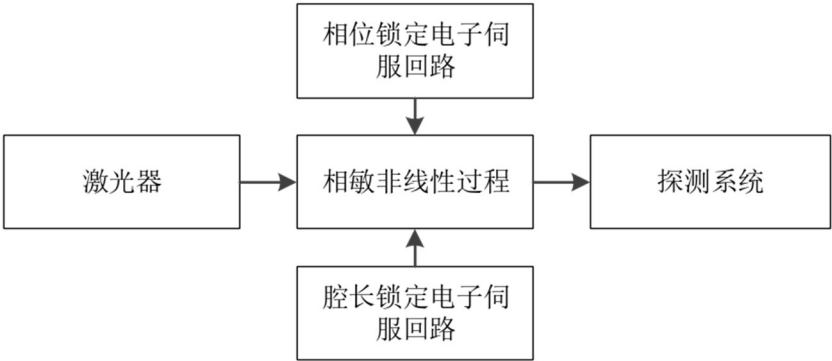


图3 量子压缩光源组成框图

各组成部分主要功能为：

- a) 激光器：提供光源和频率标准；
- b) 相敏非线性模块：制备压缩态量子光源；
- c) 探测系统：测试压缩态量子光源的压缩度、输出功率、光束质量、纯度以及稳定性等参数；
- d) 腔长锁定电子伺服回路、相位锁定电子伺服回路：激光稳频、滤波、降噪和相位稳定。

6.2 制备系统组成

6.2.1 激光器

相关参数宜达到如下指标：

- a) 激光器数量：1 台；
- b) 激光纵模模式：单纵模。

6.2.2 相敏非线性模块

6.2.2.1 光学参量振荡器

光学参量振荡器通过相敏参量下转换过程，即在特定的相位条件下，产生正交分量压缩光。光学参量振荡器参数宜达到如下指标：

- a) 工作状态：阈值以下；
- b) 增益：7dB~10dB；
- c) 相对位相：0 或 π ；
- d) 谐振条件：压缩光载波共振；
- e) 模式匹配效率： $\geq 95\%$ 。

6.2.2.2 四波混频器

四波混频是光与物质之间的三阶非线性相互作用，可以实现四个光场之间的能量和动量转换，从而产生具有压缩特性的信号光和闲置光。基于热原子系综的四波混频过程参数宜达到如下指标：

- a) 原子池温度：110℃~120℃；
- b) 信号光与泵浦光的夹角：5mrad~10mrad；
- c) 泵浦光功率： $\geq 100\text{mW}$ ；
- d) 探针光与共振能级蓝失谐：700MHz~1100MHz；
- e) 探针光腰斑：200 μm ~400 μm ；
- f) 泵浦光腰斑：500 μm ~700 μm 。

6.2.3 电子伺服回路

电子伺服回路是保证非线性相互作用是相敏过程的核心单元模块，主要包含光学谐振腔腔长和相对相位的稳定锁定，实现激光稳频、滤波、降噪和相对相位的实时稳定。电子伺服回路参数宜达到如下指标：

- a) 控制增益： $\geq 20\text{dB}$ ；
- b) 相位裕度： $30^\circ \sim 45^\circ$ ；
- c) 控制带宽：50kHz~150kHz。

6.2.4 平衡零拍探测器

平衡零拍探测器能够放大信号光，直接表征信号光的正交分量的特点，用于评估量子压缩光源的噪声。其原理如图4所示，量子压缩光源输出的单模压缩光作为信号光与本底光在50:50分束器上发生干涉并耦合输出后，以相同的输出功率注入两个低噪声探测器。探测器输出的交流信号通过减法器相减，使用高压放大器对本底光路中的压电陶瓷进行扫描时，两束光之间的相对位相在0~ π 之间不断发生变化，从而在不同的位相处探测得到信号光的反压缩、压缩或者鉴于两者之间的信息。将扫描信号即获得振幅压缩光正交分量的量子噪声通过频谱分析仪（SA）记录，即可观察到压缩光的压缩度大小。

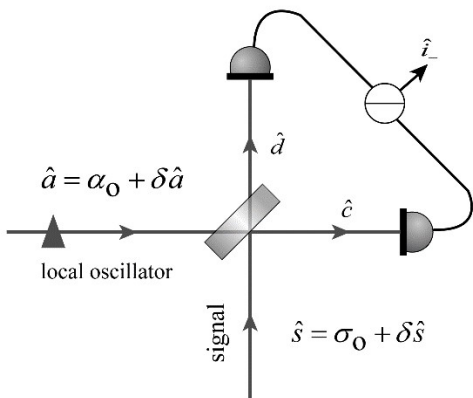


图4 平衡零拍探测原理图

平衡零拍探测器参数宜达到如下指标：

- a) 量子效率：≥90%；
- b) 共模抑制比：≥35dB；
- c) 增益：≥10dB；
- d) 探测带宽：≥分析频率带宽。

6.2.5 光功率计

光功率计能够测量光功率大小，可进行光功率直接测量与光衰减量的相对测量。光功率计参数宜达到如下指标：

- a) 工作波长：覆盖光源中心波长；
- b) 测量光功率范围：覆盖量子压缩光源输出光功率；
- c) 测量不确定度：≤±0.5dB。

6.2.6 光束质量分析仪

光束质量分析仪能够对光束的空间能量或强度分布、光束宽度、质心、椭圆度和方向等信息进行测量，可以对光束的M²因子进行测量。光束质量分析仪参数宜达到如下指标：

- a) 工作波长：覆盖光源中心波长；
- b) 测量光功率范围：覆盖量子压缩光源输出光功率。

6.3 制备步骤

6.3.1 低噪声光源的制备

单频激光器（Single Frequency Laser, SFL）输出的基频光振幅噪声、位相噪声较大，采用窄线宽、高透射率的模式清洁器，改善基频光光束质量和空间模式分布，同时过滤高频噪声，改善激光指向稳定性，为高压缩度压缩态的制备与测量提供优质的低噪声光源。

6.3.2 相敏非线性模块

6.3.2.1 概述

不同方法所采用的相敏非线性过程方法不同，经常采用的方法包括光学参量振荡器、四波混频、光力法、克尔效应等。本标准主要介绍光学参量振荡器方法，其余方法的相敏非线性过程见资料性附录A。

6.3.2.2 光学参量振荡器

将单频激光器输出的基频光注入倍频腔（Second Harmonic Generator, SHG）中，通过参量上转换过程，产生倍频光，作为光学参量振荡器（Optical Parametric Oscillator, OPO）的泵浦光。随后，将产生的倍频光和基频光同时注入OPO中，在OPO中的非线性晶体内发生参量下转换，产生下转换光。通过电子伺服回路将下转换光和倍频光的相对相位锁定为 π ，此时OPO输出的下转换光即产生正交振幅压缩光；当下转换光和倍频光的相对相位锁定为0时，产生正交相位压缩光。

6.4 平衡零拍探测

采用平衡零拍探测器（Balanced Homodyne Detector, BHD），同时注入压缩光和本底光，结合相位锁定电子伺服回路，实现输出压缩光的高效探测。根据量子探测的实验数据，初步评估量子压缩光源的性能指标。例如正交振幅压缩光的测量，当压缩光和本底光的相对位相锁定为0或 π 时，平衡零拍探测器得到压缩分量噪声，当压缩光和本底光的相对位相锁定为 $\pi/2$ 时，平衡零拍探测器得到反压缩分量噪声。

7 测试方法

7.1 环境条件

量子压缩光源测试环境应满足以下条件：

- 温度： $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ ；
- 相对湿度： $(40 \pm 10)\%$ ；
- 洁净度：优于万级；
- 电源环境：220V，配备UPS和稳压电源。

7.2 压缩度及其稳定性测试

7.2.1 测试原理

根据朗之万方程推导并进行简化处理，输出信号光正交分量的噪声谱方差可以用式（9）计算：

$$V_{a/s} = [1 \mp \frac{4(1-l_{tot})\sqrt{P/P_{th}}}{(1 \pm \sqrt{P/P_{th}})^2 + 4\kappa^2}] \cos^2 \theta_{tot} + [1 \pm \frac{4(1-l_{tot})\sqrt{P/P_{th}}}{(1 \mp \sqrt{P/P_{th}})^2 + 4\kappa^2}] \sin^2 \theta_{tot} \dots\dots\dots (9)$$

式中：

- $V_{a/s}$ ——压缩度/反压缩度，无量纲；
 P ——泵浦光功率，单位为瓦（W）；
 P_{th} ——阈值功率，单位为瓦（W）；
 θ_{tot} ——相位起伏，单位为弧度（rad）；
 l_{tot} ——光学损耗，无量纲；
 κ ——常数，无量纲， $\kappa = 2\pi f/\gamma$ ；
 f ——傅里叶频率，单位为赫兹（Hz）；
 γ ——衰减系数，无量纲， $\gamma = c(T + L)/2l$ ；
 c ——光速， 3.0×10^8 ，单位为米每秒（m/s）；
 T ——输出耦合镜对基频光的透射率，无量纲；
 L ——内腔损耗，无量纲；
 l ——腔长，单位为米（m）。

一般将压缩度转换为对数表示，见式（10）：

$$V_{dB} = 10 \log_{10}(V_{a/s}) \dots\dots\dots (10)$$

式中：

$V_{a/s}$ ——压缩噪声方差/反压缩噪声方差，无量纲。

从上式可见，压缩度的大小主要取决于光学损耗、泵浦功率与阈值功率的比值、分析频率相对于谐振腔线宽的比值。输出耦合镜透射率损耗占总损耗比例越大，得到的压缩度越高；泵浦功率越接近阈值，压缩度越高；分析频率越低，所测得压缩度越高。

7.2.2 测试步骤

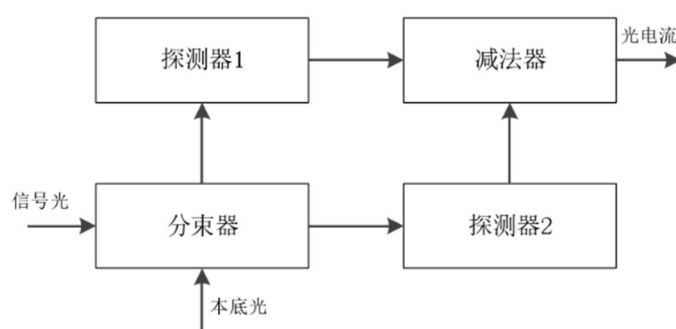


图5 压缩度测试框图

压缩度测试框图如图5所示。具体测试步骤如下：

- 挡住量子压缩光源，本底光经 50:50 分束器输出后注入 BHD 的两个低噪声光电二极管，探测器输出的交流信号通过减法器相减后进入频谱分析仪，记录可得标准量子极限；
- 量子压缩光源作为信号光与本底光在 50:50 分束器上发生干涉并耦合输出后，以相同的输出功率注入 BHD 的两个低噪声光电二极管；
- 探测器输出的交流信号通过减法器相减后进入频谱分析仪；
- 通过高压放大器对本底光路中的压电陶瓷进行扫描，当两束光之间的相对位相在 $0 \sim \pi$ 之间不断发生变化时，从而在不同的位相处即可以探测到信号光的反压缩、压缩或者鉴于两者之间的量子噪声方差信息；
- 将扫描信号即获得振幅压缩光正交分量的量子噪声通过频谱分析仪记录，即可观察到压缩光的压缩度大小；
- 使压缩态量子光源工作在最大压缩度附近，连续测试 1 个小时，获得压缩源的长期稳定性。

7.2.3 数据处理

由 7.1.2 小节记录的各类噪声信息进一步完成数据处理，可得到标准量子噪声极限、压缩与反压缩噪声方差如下：

- 记录标准量子极限：7.1.2 小节步骤 a) 频谱分析仪测试的噪声谱曲线；
- 记录扫描信号：7.1.2 小节步骤 d) 频谱分析仪测试的随本底光与信号光相对位相变化产生的噪声谱曲线；
- 压缩与反压缩噪声方差：b) 中扫描信号的最小值与标准量子极限的差值即为压缩噪声方差即压缩度，最大值与标准量子极限的差值即为反压缩噪声方程，即反压缩大小。

7.3 输出功率及其稳定性测试

7.3.1 测试原理

压缩态由平移算符和压缩算符定义，见式（11）：

$$|\alpha, \xi\rangle = \hat{D}(\alpha)\hat{S}(\xi)|0\rangle \dots\dots\dots (11)$$

式中：

$\hat{D}(\alpha)$ ——位移算符，计算公式见式（12）；

$\hat{S}(\xi)$ ——压缩算符，计算公式见式（13）；

$$\hat{D}(\alpha) = \exp(\alpha\hat{a}^+ - \alpha^*\hat{a}) \dots\dots\dots (12)$$

式中：

α ——复数，可表示为 $|\alpha|e^{-i\phi}$ 。

$$\hat{S}(\xi) = \exp\left[\frac{1}{2}(\xi^*\hat{a}\hat{a} - \xi\hat{a}^+\hat{a}^+)\right] \dots\dots\dots (13)$$

式中：

ξ ——压缩参量，计算公式见式（14）：

$$\xi = re^{i\phi} \dots\dots\dots (14)$$

式中：

r ——压缩因子，与压缩度的大小有关，范围为 $0 \leq r \leq \infty$ ；

ϕ ——相位，与压缩的方向 $\frac{\phi}{2}$ 有关，其范围为 $0 \leq \phi \leq 2\pi$ 。

平均光子数计算公式见式（15）：

$$\langle\alpha, \xi|\hat{n}|\alpha, \xi\rangle = |\alpha|^2 + \sinh^2(r) \dots\dots\dots (15)$$

在没有信号光注入到谐振腔中时，此时产生的压缩光处于压缩真空态，其输出的功率极其微弱。当注入信号光并精确锁定信号光、泵浦光和压缩光之间相对位相后，此时输出的压缩光为明亮压缩态光场。当控制泵浦光与信号光的相对位相，使得系统运转于参量缩小过程时，得到处于正交振幅压缩态的明亮压缩态光场，注入信号光功率的大小对于该类压缩度影响不大，其输出功率可以达到百微瓦量级，输出功率明显提高；当控制泵浦光与信号光的相对位相，使得系统运转于参量放大过程时，得到处于正交相位压缩态的明亮压缩态光场，输出压缩光的压缩度随着注入种子光功率的增加而降低，进而会影响到压缩态光场的输出。

注：根据实际情况调节种子光功率，使明亮压缩态光场的压缩度和输出功率得到平衡。

7.3.2 测试步骤

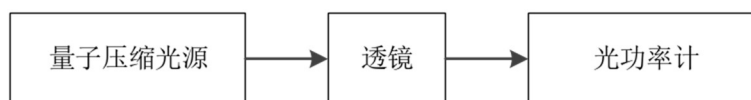


图6 输出功率测试框图

输出功率评估框图如图6所示。具体测试步骤如下：

- 将量子压缩光源输出的明亮压缩光通过透镜导入功率计，用功率计记录输出功率；
- 通过调节输入参数获得最大输出功率，并使量子压缩光源工作在最大输出功率附近；
- 连续测试 2 小时，以此获得量子压缩光源的输出功率，以及长期功率不稳定性。

7.4 光束质量及其稳定性测试

7.4.1 测试原理

量子压缩光源设计中常采用圆形镜共焦腔，其所激发的高斯光束在柱面坐标系中的表达式见式（16）：

$$\Phi(x, y, z) = \frac{c}{\omega(z)} e^{-\frac{r^2}{\omega^2(z)}} e^{-i[k(z + \frac{r^2}{2R(z)}) - \arctan \frac{z}{z_0}]} \dots\dots\dots (16)$$

式中：

c ——常数因子，无量纲；

z ——光束传播方向上位置，单位为米(m)；

r ——光束传播方向横截面距中心点位置，单位为米(m)；

k ——波数，单位为每米(m^{-1})；

z_0 ——高斯光束的共焦参数（瑞利长度），无量纲，计算公式见式（17）；

$\omega(z)$ ——与传播轴线相交于 z 点的高斯光束等相位面上的光斑高斯半径，单位为米(m)，计算公式见式（18）；

$R(z)$ ——与传播轴线相交于 z 点的高斯光束的等相位面曲率半径，单位为米(m)，计算公式见式（19）。

$$z_0 = \frac{\pi z_0^2}{\lambda} \dots\dots\dots (17)$$

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2} = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{2\pi z_0}\right)^2} \dots\dots\dots (18)$$

式中：

ω_0 ——光束腰斑处高斯半径，单位为米(m)；

λ ——激光波长，单位为米(m)。

$$R(z) = z_0 \left(\frac{z}{z_0} + \frac{z_0}{z} \right) = z \left[1 + \left(\frac{2\pi z_0}{\lambda z} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (19)$$

高斯光束的远场发散角表示见公式（20）：

$$\theta_0 = 2 \frac{\lambda}{\pi \omega_0} = 2 \sqrt{\frac{\lambda}{\pi z_0}} \dots\dots\dots (20)$$

光束质量因子 M^2 定义见式（21）：

$$M^2 = \frac{\Theta}{\theta} \dots\dots\dots (21)$$

式中：

Θ ——测量的实际光束的远场发散角；

θ ——理想的 TEM_{00} 模远场发散角。

一般情况下， M^2 是实际光束腰斑和发散角的乘积与理想高斯光束腰斑和发散角乘积的比值。

高斯光束在空间中的传播路径为双曲线形，在实际测量中通过测量光束在空间中传播路径上各处的光斑尺寸，从而拟合出双曲线形来测量腰斑大小和光束发散角，计算出光斑的光束质量因子 M^2 ，式（22）为计算公式：

$$M^2 = \frac{\pi}{4\lambda} \Theta \times 2\omega_0 \dots\dots\dots (22)$$

式中：

ω_0 ——实际光斑腰斑半径。

7.4.2 测试步骤



图7 光束质量测试框图

光束质量测试框图如图7所示。量子压缩光源输出的最理想分布为TEM₀₀模的高斯光束，这也是衍射极限的光束大小。由于光学谐振腔长，激光增益介质，输出镜及辅助光学系统等的限制，大多数激光光束并不是完全由衍射极限决定的高斯型轮廓的纯TEM₀₀模。高斯光束在空间中的传播路径为双曲线形，在实际测量中通过测量光束在空间中传播路径上的光斑尺寸，从而拟合出双曲线形来测量腰斑大小和光束发散角。具体测试步骤如下：

- a) 将量子压缩光源输出的明亮压缩光通过衰减器衰减后导入光束质量分析仪，用光束质量分析仪记录光束质量；
- b) 通过调节光束质量分析仪的位置和横纵坐标，使量子压缩光源工作在光束质量分析仪的中心附近；
- c) 由相敏非线性模块输出的量子压缩光源，从近至远，测量一系列量子压缩光源的光斑尺寸，拟合获取量子压缩光源的腰斑大小和光束发散角，由光束质量分析仪直接测出 M² 因子。

7.5 纯度测试

7.5.1 测试原理

压缩态属于高斯态，其特性完全由协方差矩阵 σ 描述。式（23）为纯度简化公式：

$$Purity = \frac{1}{\sqrt{\det(\sigma)}} \dots\dots\dots (23)$$

式中，协方差矩阵 $\sigma = \begin{pmatrix} \eta V_a + 1 - \eta & 0 \\ 0 & \eta V_s + 1 - \eta \end{pmatrix}$ 为对角矩阵。

式中：

- η ——传输效率，无量纲；
- V_a ——反压缩噪声方差，无量纲；
- V_s ——压缩噪声方差，无量纲。

7.5.2 测试步骤

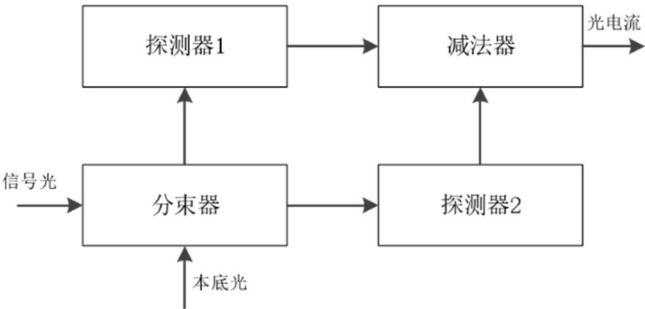


图8 纯度测试框图

纯度测试框图如图8所示。具体测试步骤如下：

- a) 量子压缩光源作为信号光与本底光在 50:50 分束器上发生干涉并耦合输出后，以相同的输出功率注入两个低噪声探测器。
- b) 探测器输出的交流信号通过减法器相减后进入频谱分析仪。
- c) 将两束光之间的相对位相锁定为 0，得到压缩态量子光源的正交压缩分量；或者将两束光之间的相对位相锁定为 $\frac{\pi}{2}$ ，得到压缩态量子光源的正交反压缩分量。
- d) 利用式（23）计算获取压缩态量子光源的纯度。

8 评估报告

评估报告应至少包含以下内容：

- a) 评估报告的唯一编号；
- b) 评估用仪器和设备的型号和工作条件；
- c) 评估内容及要求；
- d) 评估结果以及必要的结果说明；
- e) 评估日期；
- f) 评估人员及审核人员签字；
- g) 评估单位名称及地址。

测试报告示例可参考附录B。

附录 A

(资料性)

相敏非线性过程常用方法

A.1 四波混频

将两束频率不同的强泵浦光（频率分别为 ω_p 和 ω_p' ）与一束频率为 ω_s 的信号光同时注入具有三阶非线性光学效应的介质中（如某些特殊晶体或气体）。在满足相位匹配条件下，四束光相互作用发生四波混频，通过能量和动量的重新分配，产生一束频率为 $\omega_i = \omega_p + \omega_p' - \omega_s$ 的闲置光。通过对输入光的强度、相位等参数进行调控，可使产生的光场呈现出压缩特性。当精确控制泵浦光与信号光之间的相位关系时，能够实现特定分量的量子起伏低于标准量子极限，产生压缩态光场。

A.2 光力法

将一束强激光（泵浦光）注入包含微纳机械振子（如纳米薄膜、微腔等）的光学系统中。泵浦光与微纳机械振子发生光-机械相互作用，光子的动量传递给机械振子，使其产生振动。同时，机械振子的振动又会对光场产生反作用，改变光场的特性。引入一束较弱的探测光与泵浦光共同作用于该系统，通过探测光与机械振子振动的耦合，调节光场与机械振子之间的相互作用强度和相位关系。当满足特定条件时，探测光的量子噪声在某些特定分量上得到抑制，从而产生具有压缩特性的光场。例如，通过优化光力系统的参数，可实现正交振幅或正交相位的压缩。

A.3 克尔效应

将一束强激光（泵浦光）注入具有克尔非线性效应的介质（如某些光学晶体、有机材料或光纤）中。由于克尔效应，介质的折射率会随泵浦光强度发生变化，即 $n = n_0 + n_2 \times I$ （其中 n_0 为线性折射率， n_2 为非线性折射率系数， I 为光强）。当再注入一束较弱的信号光通过该介质时，泵浦光引起的折射率变化会对信号光的相位进行调制。在合适的泵浦光强度、信号光强度以及介质参数条件下，信号光的量子噪声在某些分量上被压缩。通过调整泵浦光与信号光的相对强度、相位以及介质的非线性特性，可实现对光场不同分量的压缩，产生压缩态光场。

附录 B
(资料性)
测试报告模版

B.1 测试参数

测试参数如下：

- a) 压缩频段：根据应用需求选取；
- b) 探测频段：0.1mHz~200MHz；
- c) 压缩度：低于标准量子极限；
- d) 压缩角稳定性：≤50mrad。

测试环境	温度	
	湿度	
	洁净度	
	电源环境	
测试参数	波长	
	频段	
	压缩度	
	输出功率	
	光束质量	
	纯度	
测试结果	报告编号	
	测试报告页数	
	图像	
	必要的说明	
测试单位	测试人姓名	
	测试单位名称及地址	
	测试单位联系电话	
	审核人姓名	
	测试日期	

参 考 文 献

- [1] L. A. Wu, H. J. Kimble, J. L. Hall, and H. Wu, Generation of Squeezed States by Parametric Down Conversion, *Phys. Rev. Lett.*, 1986, 57, 2520.
- [2] H. Vahlbruch, M. Mehmet, K. Danzmann, and R. Schnabel, Detection of 15 dB squeezed states of light and their application for the absolute calibration of photoelectric quantum efficiency, *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 117, 110801.
- [3] W. H. Yang, S. P. Shi, Y. J. Wang, W. G. Ma, Y. H. Zheng, and K. C. Peng, Detection of stably bright squeezed light with the quantum noise reduction of 12.6 dB by mutually compensating the phase fluctuations, *Opt. Lett.*, 2017, 42, 4553-4556.
- [4] X. C. Sun, Y. J. Wang, L. Tian, Y. H. Zheng, and K. C. Peng, Detection of 13.8 dB squeezed vacuum states by optimizing the interference efficiency and gain of balanced homodyne detection, *Chin. Opt. Lett.*, 2019, 17, 072701.
-