

ICS 31.260

CCS N 30

T

团体标准

T/CEATEC XXX—2026

超稳光学腔技术规范

Technical specification for ultra-stable optical cavities

(征求意见稿)

2026-X-XX 发布

2026-X-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 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 分类与命名 2

 4.1 分类 2

 4.2 命名 2

5 技术要求 2

 5.1 一般要求 3

 5.2 材料要求 3

 5.3 外观与结构要求 3

 5.4 光学性能要求 3

 5.5 频率稳定性要求 4

 5.6 热学性能要求 4

 5.7 真空性能要求 4

 5.8 机械稳定性要求 5

 5.9 环境适应性要求 5

6 试验方法 5

 6.1 试验条件 5

 6.2 外观与结构检查 5

 6.3 光学性能试验 6

 6.4 频率稳定性试验 6

 6.5 热学性能试验 7

 6.6 真空性能试验 7

 6.7 机械稳定性试验 7

 6.8 环境适应性试验 7

7 检验规则 7

 7.1 检验分类 7

 7.2 出厂检验 7

 7.3 型式检验 7

8 标志、包装、运输和贮存 8

 8.1 标志 8

 8.2 包装 8

 8.3 运输 8

 8.4 贮存 8

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。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

超稳光学腔技术规范

1 范围

本文件规定了超稳光学腔的分类与命名、技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输和贮存。

本文件适用于工作波长在可见光至近红外波段（380nm~2500nm）、频率稳定度优于 1×10^{-13} （1s积分时间）的超稳光学腔的设计、制造、检验和验收。

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 191 包装储运图形符号标志
- GB/T 2828.1 计数抽样检验程序 第1部分：按接收质量限（AQL）检索的逐批检验抽样计划
- GB/T 3163 真空技术 术语
- GB/T 2423.1 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验A：低温
- GB/T 2423.2 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验B：高温
- GB/T 2423.3 环境试验 第2部分：试验方法 试验Cab：恒定湿热试验
- GB/T 2423.10 环境试验 第2部分：试验方法 试验Fc：振动（正弦）
- GB/T 2423.56 环境试验 第2部分：试验方法 试验Fh：宽带随机振动和导则
- GB/T 26331 光学薄膜元件环境适应性试验方法
- GB/T 26332.1 光学和光子学 光学薄膜 第1部分：术语

3 术语和定义

GB/T 3163、GB/T 26332.1界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

超稳光学腔 ultra-stable optical cavity

由低热膨胀系数材料制成的光学谐振腔体、两面（或两面以上）超高反射率腔镜及精密机械支撑结构组成的，通过精密温控和隔振措施实现腔长高度稳定，能够为激光频率锁定提供超稳定频率参考基准的光学器件。

3.2

精细度 finesse

法布里-珀罗腔的一个无量纲品质因数，等于自由光谱范围与腔模线宽之比，表征腔的光谱分辨能力。

3.3

自由光谱范围 free spectral range

法布里-珀罗腔相邻两个透射峰之间的频率间隔，单位为赫兹（Hz）。

3.4

腔体损耗 cavity loss

光在腔内往返一次因反射、透射、散射和吸收等因素造成的总功率损耗，以百万分之一（ppm）或分贝（dB）表示。

3.5

零膨胀温度点 zero-crossing temperature

腔体材料热膨胀系数为零时所对应的温度值，单位为摄氏度（℃）。

3.6

振动敏感度 vibration sensitivity

单位重力加速度变化所引起的腔体谐振频率的相对变化量，单位为每重力加速度（/g）。

3.7

频率漂移率 frequency drift rate

在规定时间内，超稳光学腔谐振频率随时间的单向变化速率，单位为赫兹每秒（Hz/s）或赫兹每小时（Hz/h）。

4 分类与命名

4.1 分类

4.1.1 按腔体几何形状

分类如下：

- a) 圆柱形腔；
- b) 凹形腔（切口腔）；
- c) 球形腔；
- d) 立方体腔。

4.1.2 按工作温度

分类如下：

- a) 室温超稳腔（工作温度：15℃～45℃）；
- b) 低温超稳腔（工作温度：≤10K）。

4.1.3 按应用场景

- a) 实验室用超稳腔；
- b) 可搬运超稳腔；
- c) 空间应用超稳腔。

4.2 命名

超稳光学腔的产品型号宜由以下部分组成：

USC-□□-□□□-□□□□

其中：

USC——超稳光学腔（Ultra-Stable Cavity）代号；

□□——腔体几何形状代号（CY—圆柱形；AU—凹形；SP—球形；CB—立方体）；

□□□——腔体光学长度标称值，单位为毫米（mm）；

□□□□——中心工作波长标称值，单位为纳米（nm）。

示例：USC-CY-100-1550 表示光学长度为 100 mm、中心工作波长为 1550 nm 的圆柱形超稳光学腔。

5 技术要求

5.1 一般要求

- 5.1.1 超稳光学腔应按本文件及经规定程序批准的图样和技术文件制造。
- 5.1.2 超稳光学腔所用材料应符合相应材料标准的规定，且应具有可追溯的质量证明文件。
- 5.1.3 超稳光学腔的结构设计应满足预期的频率稳定度、线宽及环境适应性要求。

5.2 材料要求

- 5.2.1 腔体材料
腔体材料宜采用超低膨胀（ULE）玻璃、单晶硅或具有等效或更优热膨胀特性的材料。腔体材料的热膨胀系数应在工作温度范围内满足表 1 的要求。

表 1 腔体材料热膨胀系数要求

材料类型	工作温度范围	热膨胀系数要求	备注
ULE 玻璃	15℃~45℃	$\leq 1.5 \times 10^{-8} / ^\circ\text{C}$	零膨胀温度点宜在 18℃~45℃ 范围内
单晶硅	4K~300K	在 4K 附近趋近于零	适用于低温应用
其他低膨胀材料	按设计要求	按设计要求	应提供热膨胀系数测试报告

5.2.2 腔镜材料

腔镜基片宜采用熔融石英、ULE 玻璃或具有等效性能的材料。腔镜工作面镀制的超高反射率薄膜宜采用离子束溅射沉积（IBS）镀膜技术制备。

5.3 外观与结构要求

- 5.3.1 腔体表面应无肉眼可见的裂纹、气泡、划痕及异物附着。
- 5.3.2 腔镜工作面应清洁、无污染，膜层应均匀、无脱落、无针孔。
- 5.3.3 机械支撑结构应牢固可靠，在运输和使用过程中不应产生永久性变形或位移。
- 5.3.4 真空密封结构应可靠，应能在规定的真空度下长期稳定工作。

5.4 光学性能要求

5.4.1 腔镜反射率

在规定的工作波长处，每片腔镜的反射率应不低于 99.99%。对于超高精细度应用，反射率宜不低于 99.9985%。

5.4.2 精细度

超稳光学腔的精细度应根据应用需求确定，并应符合表 2 的规定。

表 2 精细度分级要求

等级	精细度 F	典型应用
一级（高精细度）	$F \geq 200000$	光钟、超稳激光
二级（中等精细度）	$50000 \leq F < 200000$	精密光谱学、量子计算
三级（一般精细度）	$10000 \leq F < 50000$	常规稳频应用

5.4.3 腔体损耗

超稳光学腔的总腔体损耗（含反射损耗、透射损耗、散射损耗和吸收损耗）不应超过表 3 的规定。

表 3 腔体损耗要求

精细度等级	最大允许总损耗	备注
一级	$\leq 5\text{ppm}$	相当于反射率 $\geq 99.9995\%$
二级	$\leq 20\text{ppm}$	相当于反射率 $\geq 99.998\%$
三级	$\leq 100\text{ppm}$	相当于反射率 $\geq 99.99\%$

5.4.4 自由光谱范围

超稳光学腔的自由光谱范围 FSR 实测值与标称值的偏差不应超过标称值的 $\pm 1\%$ 。

5.5 频率稳定性要求

5.5.1 频率稳定度

超稳光学腔的频率稳定度（艾伦偏差，ADEV）应在规定积分时间下满足表 4 的要求。

表 4 频率稳定度要求

等级	积分时间 $\tau=1\text{s}$	积分时间 $\tau=100\text{s}$	备注
一级	$\leq 1 \times 10^{-15}$	$\leq 5 \times 10^{-16}$	适用于光钟等最高精度应用
二级	$\leq 1 \times 10^{-14}$	$\leq 1 \times 10^{-15}$	适用于精密光谱学
三级	$\leq 1 \times 10^{-13}$	$\leq 1 \times 10^{-14}$	适用于常规稳频应用

5.5.2 频率漂移率

在规定的条件环境和温控条件下，超稳光学腔的谐振频率漂移率不应超过表 5 的规定。

表 5 频率漂移率要求

等级	最大频率漂移率	测试条件
一级	$\leq 150\text{mHz/s}$ （或 $\leq 540\text{Hz/h}$ ）	环境温度波动 $\leq 0.1^\circ\text{C}$ ，主动温控
二级	$\leq 5\text{kHz/h}$	环境温度波动 $\leq 0.3^\circ\text{C}$ ，主动温控
三级	$\leq 10\text{kHz/天}$	环境温度波动 $\leq 0.5^\circ\text{C}$ ，被动保温

5.5.3 锁定后激光线宽

超稳光学腔用于激光锁频时，锁定后激光线宽应根据精细度等级满足表 6 的要求。

表 6 锁定后激光线宽要求

精细度等级	锁定后激光线宽	备注
一级	$\leq 10\text{Hz}$	典型值可达亚赫兹量级
二级	$\leq 100\text{Hz}$	—
三级	$\leq 1\text{kHz}$	—

5.6 热学性能要求

5.6.1 零膨胀温度点

超稳光学腔的零膨胀温度点应在设计工作温度范围内，且应在出厂时标明实测值。零膨胀温度点的控制精度应优于 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 。

5.6.2 温控精度

超稳光学腔的主动温控系统应满足表 7 的要求。

表 7 温控精度要求

应用等级	温控稳定度	温控测量精度	备注
一级	$\leq 1\text{mK/h}$	$\leq 0.5\text{mK}$	适用于最高精度应用
二级	$\leq 10\text{mK/h}$	$\leq 1\text{mK}$	适用于常规高精度应用
三级	$\leq 50\text{mK/h}$	$\leq 5\text{mK}$	适用于一般应用

5.7 真空性能要求

5.7.1 真空度

超稳光学腔工作时的真空度不应低于表 8 的规定。

表 8 真空度要求

应用等级	最高允许气压	备注
一级	$\leq 1 \times 10^{-7}\text{Pa}$ （约 $7.5 \times 10^{-10}\text{Torr}$ ）	适用于光钟等最高精度应用
二级	$\leq 1 \times 10^{-5}\text{Pa}$ （约 $7.5 \times 10^{-8}\text{Torr}$ ）	适用于常规高精度应用
三级	$\leq 1 \times 10^{-4}\text{Pa}$ （约 $7.5 \times 10^{-7}\text{Torr}$ ）	适用于一般应用

5.7.2 真空密封

真空室应具有良好的密封性能，在离子泵停止工作后 24h 内，真空度上升不应超过一个数量级。

5.8 机械稳定性要求

5.8.1 振动敏感度

超稳光学腔的振动敏感度应根据应用场景满足表 9 的要求。

表 9 振动敏感度要求

应用场景	最大振动敏感度	备注
空间应用/可搬运	$\leq 1 \times 10^{-10}/g$	需经有限元分析优化支撑结构
实验室高精度	$\leq 5 \times 10^{-10}/g$	安装于隔振平台
实验室一般	$\leq 1 \times 10^{-9}/g$	安装于隔振平台

5.8.2 抗振性能

超稳光学腔在经受表 10 规定的振动试验后，光学性能和频率稳定性应无明显劣化。

表 10 振动试验条件

试验项目	试验条件	参考标准
正弦振动	频率范围：5Hz～200Hz，加速度：2g	GB/T 2423.10
随机振动	频率范围：20Hz～2000Hz，功率谱密度：0.02g ² /Hz	GB/T 2423.56

5.9 环境适应性要求

5.9.1 工作温度范围

超稳光学腔应在表 11 规定的工作温度范围内正常工作。

表 11 工作温度范围要求

类型	工作温度范围	贮存温度范围
室温超稳腔	15℃～45℃	0℃～60℃
低温超稳腔	按设计要求	按设计要求

5.9.2 环境试验

超稳光学腔应按 GB/T 2423.1、GB/T 2423.2 和 GB/T 2423.3 的规定进行高低温及湿热环境试验，试验后各项性能指标应符合第 5 章的要求。

6 试验方法

6.1 试验条件

6.1.1 环境条件

除另有规定外，试验应在以下环境条件下进行：

- a) 温度：23℃±2℃；
- b) 相对湿度：45%～75%；
- c) 大气压力：86kPa～106kPa。

6.1.2 测试设备

测试用仪器设备应经计量检定或校准合格，并在有效期内。测量不确定度应优于被测量指标要求的 1/3。

6.2 外观与结构检查

6.2.1 外观检查应在照度不低于 300lx 的条件下，使用 10 倍放大镜或同等分辨率的检测设备进行目视检查。

6.2.2 结构尺寸应采用经校准的计量器具进行测量，测量结果应与图样及技术文件相符。

6.3 光学性能试验

6.3.1 腔镜反射率测量

腔镜反射率应采用腔衰荡光谱（CRDS）法或等效方法进行测量，测量不确定度应优于±1ppm。

6.3.2 精细度测量

精细度宜采用以下方法之一进行测量：

a) 扫腔法：通过扫描腔长或激光频率，测量透射峰的半高全宽（FWHM），按公式（1）计算精细度 F ：

$$F = \frac{FSR}{FWHM} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

FSR——自由光谱范围，单位为赫兹（Hz）；

FWHM——透射峰半高全宽，单位为赫兹（Hz）；

b) 腔衰荡法：测量腔的衰荡时间常数 τ ，按公式（2）计算精细度 F ：

$$F = \frac{\pi c \tau}{2L} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

π ——圆周率，取 3.1415926；

c ——真空中的光速，单位为米每秒（m/s）；

τ ——腔的衰荡时间常数，单位为秒（s）；

L ——腔体光学长度，单位为米（m）。

6.3.3 腔体损耗测量

腔体损耗应采用腔衰荡法测量。衰荡时间常数 τ 与腔体总损耗 δ 的关系按公式（3）计算：

$$\tau = \frac{L}{c\delta} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：

τ ——腔的衰荡时间常数，单位为秒（s）；

L ——腔体光学长度，单位为米（m）；

c ——真空中的光速，单位为米每秒（m/s）；

δ ——腔体总损耗，无量纲。

6.3.4 自由光谱范围

超稳光学腔的自由光谱范围 FSR 按公式（4）计算：

$$FSR = \frac{c}{2L} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

c ——真空中的光速，单位为米每秒（m/s）；

L ——腔体光学长度，单位为米（m）。

6.4 频率稳定性试验

6.4.1 频率稳定度测量

频率稳定度应采用两台同类型超稳光学腔进行拍频比对测量，或采用光学频率梳与氢钟/铯钟进行比对测量。艾伦偏差按公式（5）计算：

$$\sigma_y(\tau) = \left[\frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} (\bar{y}_{i+1} - \bar{y}_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中：

$\sigma_y(\tau)$ ——积分时间为 τ 时的艾伦偏差，无量纲；

τ ——积分时间，单位为秒（s）；

M ——测量数据组数，无量纲；

$\bar{y}_i$ ——第 i 个测量间隔内的平均相对频率偏差，无量纲。

6.4.2 频率漂移率测量

频率漂移率应在规定的环境条件和温控条件下，连续测量不少于 12h，记录谐振频率随时间的变化，采用线性拟合计算漂移率。

6.5 热学性能试验

6.5.1 零膨胀温度点测量

零膨胀温度点应在精密温控环境中，通过测量不同温度点下腔体长度的相对变化量来确定。温度扫描范围应覆盖设计工作温度范围，温度步长不应大于 1℃。

6.5.2 温控精度测试

温控精度应采用经校准的高精度温度传感器（测量精度不低于 0.1mK）进行测量，连续记录不少于 12h 的温度数据，计算温度波动的均方根值。

6.6 真空性能试验

真空度应采用经校准的真空计进行测量，测量应在超稳光学腔达到热平衡且离子泵连续工作不少于 24h 后进行。

6.7 机械稳定性试验

6.7.1 振动敏感度测量

振动敏感度应在精密隔振平台上，通过在三个正交方向施加已知加速度的振动激励，测量谐振频率的相对变化量来确定。

6.7.2 抗振试验

抗振试验应按 GB/T 2423.10 和 GB/T 2423.56 的规定进行。试验后应按 6.3 和 6.4 的方法重新测试光学性能和频率稳定性。

6.8 环境适应性试验

环境适应性试验应按 GB/T 2423.1、GB/T 2423.2 和 GB/T 2423.3 的规定进行。光学薄膜元件的环境适应性试验应按 GB/T 26331 的规定进行。

7 检验规则

7.1 检验分类

超稳光学腔的检验分为出厂检验和型式检验。

7.2 出厂检验

7.2.1 检验项目

每台超稳光学腔出厂前应进行出厂检验，检验合格并附有质量合格证明文件后方可出厂，出厂检验项目应包括：

- a) 外观与结构检查；
- b) 腔镜反射率；
- c) 精细度；
- d) 自由光谱范围；
- e) 真空度；
- f) 零膨胀温度点。

7.2.2 判定规则

出厂检验项目中任一项不合格时，应进行返工或返修。返工或返修后应重新进行全部出厂检验项目的检验。

7.3 型式检验

7.3.1 检验时机

有下列情况之一时，应进行型式检验：

- a) 新产品或老产品转厂生产的试制定型鉴定时；
- b) 正式生产后，如结构、材料、工艺有较大改变，可能影响产品性能时；
- c) 产品停产一年以上，恢复生产时；
- d) 正常生产时，每两年至少进行一次；
- e) 出厂检验结果与上次型式检验有较大差异时。

7.3.2 检验项目

型式检验项目应包括第 5 章规定的全部技术要求。

7.3.3 抽样方案

型式检验的样品应从出厂检验合格的产品中按照 GB/T 2828.1 的规定随机抽取。

7.3.4 判定规则

型式检验中任一项不合格时，应停止生产和出厂检验，查明原因并采取纠正措施后，重新进行型式检验。

8 标志、包装、运输和贮存

8.1 标志

8.1.1 产品标志

每台超稳光学腔应在明显位置设置标牌，标牌内容应包括：

- a) 产品名称及型号；
- b) 制造厂名或商标；
- c) 出厂编号及制造日期；
- d) 中心工作波长；
- e) 精细度等级；
- f) 零膨胀温度点。

8.1.2 包装箱标志

包装箱外表面应按 GB/T 191 的规定标注“易碎物品”“向上”“怕雨”等储运图示标志。

8.2 包装

8.2.1 超稳光学腔的包装应能防止在运输和贮存过程中受到振动、冲击、潮湿和灰尘的影响。

8.2.2 包装箱内应衬有防震缓冲材料，产品在箱内应固定牢固。

8.2.3 包装箱内随附文件应包括产品合格证、产品使用说明书、出厂检验报告、装箱清单。

8.3 运输

超稳光学腔在运输过程中应避免剧烈振动、冲击和倒置，运输环境温度宜为 0℃～60℃。

8.4 贮存

超稳光学腔应贮存在清洁、干燥、无腐蚀性气体的环境中，贮存环境温度宜为 0℃～60℃，相对湿度不宜大于 80%。

T/CEATEC XXX—XXXX

中 华 人 民 共 和 国
团 体 标 准
超稳光学腔技术规范

T/CEATEC XXXX—XXXX

*

中国欧洲经济技术合作协会
网址 <https://www.ceatec.org.cn/>

*

开本 880×1230 1/16 印张 1.5 字数 XXX 千字
2026 年 X 月第一版 2026 年 X 月第一次印刷

*

如有印装差错 由中国欧洲经济技术合作协会调换
版权专有 侵权必究

举报电话：010-64516951



T/CEATEC XXX—2026