JJF

北 京 市 地 方 计 量 技 术 规 范

JJF（京）186—2025

太赫兹法非电导涂层厚度测量仪校准规范

Terahertz non-conductive coating thickness measuring instrument calibration specification

2025-06-13 发布　　2025-07-01 实施

北京市市场监督管理局 发 布

太赫兹法非电导涂层厚度测量仪校准规范

JJF（京）186—2025

Terahertz non-conductive coating thickness measuring instrument calibration specification

归 口 单 位: 北京市市场监督管理局

起 草 单 位：北京优量云产业计量技术创新研究院有限公司

参加起草单位：北京远大恒通科技发展有限公司

首都师范大学

本规范委托北京优量云产业计量技术创新研究院有限公司负责解释

本规范主要起草人：

徐科英（北京优量云产业计量技术创新研究院有限公司）

刘　珊（北京优量云产业计量技术创新研究院有限公司）

参加起草人：

金玉环　（北京远大恒通科技发展有限公司）

张振伟　（首都师范大学）

左　剑　（首都师范大学）

吴伟强　（北京远大恒通科技发展有限公司）

目　录

引　言 II
1 范围 1
2 引用文件 1
3 术语和计量单位 1
4 概述 2
5 计量特性 6
6 校准条件 6
7 校准项目和校准方法 7
8 校准结果表达 9
9 复检时间间隔 10
附录 A 标准厚度块的技术要求 11
附录 B 校准原始记录推荐格式 12
附录 C 校准证书内页格式 15
附录 D 测量不确定度评定示例 16

引　言

JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》、JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》共同构成本校准规范制定工作的基础性系列文件。

本规范主要参考了 JJF 1603-2016《（0.1～2.5）THz 太赫兹光谱仪校准规范》、JJF 1707-2018《电解式（库仑）测厚仪校准规范》、DIN 50996 《Non-conductive Coatings - Non-destructive Measurement of Coating Thickness-Terahertz Measurement Method》、T/CITS 207-2024《非金属材料复折射率太赫兹波测试方法》、T/CITS 208-2024《太赫兹时域测厚仪校准规范的相关内容。

本规范为首次发布。

太赫兹法非电导涂层厚度测量仪校准规范

1 范围

本规范适用于测量范围为 0.1 mm ~ 20 mm ，分辨率为 30 μm 非电导涂层的太赫兹法厚度测量仪校准。其他测量范围的太赫兹厚度测量仪的校准可参照执行。

本规范规定了非导电涂层厚度的无损测量采用的基于飞行时间太赫兹光谱仪（厚度测量仪）的测量方法、计量特性、校准条件、校准项目和校准方法、校准结果表达和复校时间间隔。

2 引用文件

本规范引用下列文件：

JJD 1071-2010 国家计量校准规范编写规则

JJF 1707-2018《电解式（库仑）测厚仪校准规范》

JJF 1603-2016《（0.1～2.5）THz 太赫兹光谱仪校准规范》

GB/T 20737 无损检测 通用术语和定义

T/CITS 207-2024《非金属材料复折射率太赫兹波测试方法》

T/CITS 208-2024《太赫兹时域测厚仪校准规范的相关内容

DIN 50996 《Non-conductive Coatings - Non-destructive Measurement of Coating Thickness-Terahertz Measurement Method》Mia 2020

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用本规范。

3 术语和计量单位

JJF 1603-2016、GB/T 20737-2006 界定的以及下列术语和定义适用于本规范。

3.1 太赫兹辐射 Terahertz Radiation

频率在 0.1 THz ~ 10 THz 之间，波长在 30 μm ~ 3 mm 范围的电磁辐射。处于微波

和红外之间的过渡区域，称为太赫兹波，简称太赫兹。

3.2 太赫兹回波脉冲 Terahertz Echo Pulse

太赫兹脉冲通过光学元件传播时，在元件前后表面往复反射后被探测到的时域脉冲。太赫兹回波脉冲与主脉冲在时域产生时间延迟，在频域产生光谱干涉。

3.3 太赫兹时域光谱技术 Terahertz Time-domain Spectroscopy Technology

通过时间扫描的相干探测获得太赫兹脉冲电场时域波形，并利用傅里叶变换算法得到太赫兹脉冲在频域的光谱振幅和相位的技术。

3.4 太赫兹飞行时间测试技术 Terahertz Time-of-flight Testing Technology

太赫兹波在不同介质中传播时，由于介质折射率的不同而在介质界面发生的反射和透射现象。采用脉冲反射原理进行检测，通过分析从介质不同界面的太赫兹回波脉冲时间实现对介质厚度的检测。

3.5 测量系统的校准 Calibration of Measurement Systems

对测量系统进行一系列操作，使其提供与待测量值相对应的特定指示。

3.6 非电导涂层结构 Non-conductive Coating Structure

非电导涂层结构分为基底以及功能涂层，基底是功能涂层下面的材料，功能涂层是包含特定功能的一到多层非电导涂层。涂层的具体结构和组成会根据其应用领域和性能要求而有所不同。

3.7 试块或试件 Reference Block or Reference Sample

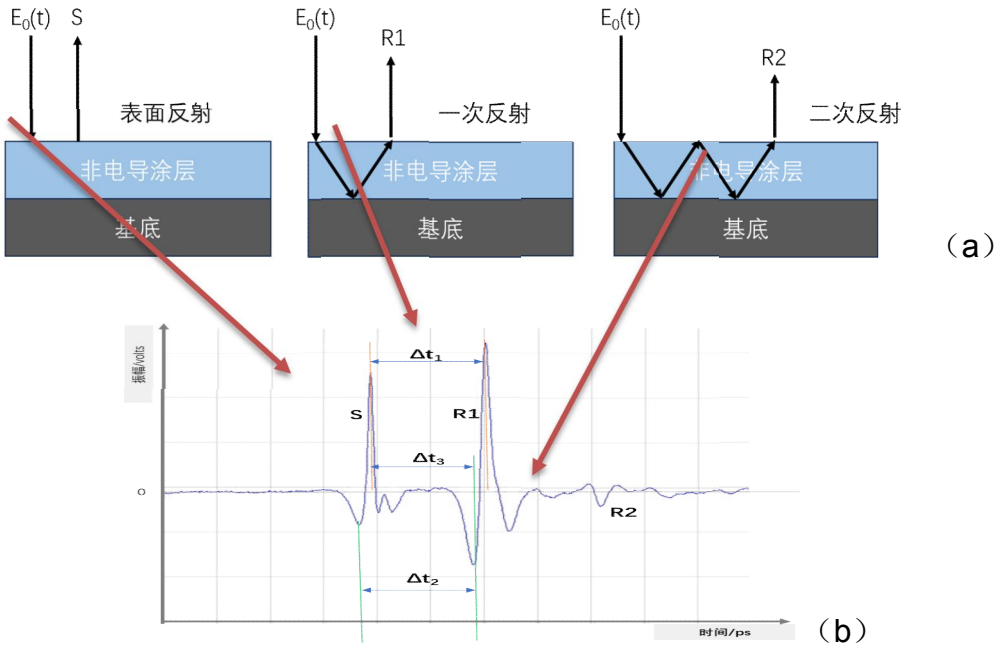
具有规定几何形状和尺寸特性，由单层或多层材料构成，用来校准和评价设备。

4 概述

4.1 原理

太赫兹法非电导涂层厚度测量仪，又称太赫兹测厚仪，是一种非接触式测量非电导涂层厚度的仪器。太赫兹测厚仪采用反射式太赫兹时域光谱技术，其原理为当太赫兹辐射垂直入射到试块上时，可以检测到表面回波，如图 1（a）所示。一部分入射太赫兹波从试件上表面反射回来（S），一部分透过上表面在基底和材料界面处反射回来（R1），另一部

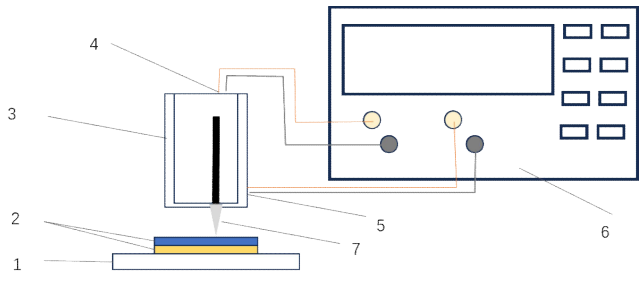
分在试件下表面和基底上表面间再次反射（R2），其中脉冲太赫兹辐射（在太赫兹测厚仪中产生）聚焦于试块上表面或下表面并穿透试块。被测量的涂层或材料必须能被太赫兹辐射穿透。当被测涂层是由多层材料组成时，太赫兹辐射会在试块每层界面上发生反射和透射。反射分量和透射分量的比例由相关材料的光学参数折射率 *n* 和消光系数 *k* 以及涂层厚度 *d* 决定。所有太赫兹回波的脉冲分量的总和聚焦于太赫兹测量头（探测器）上。根据检测到的电场强度信号，从而计算出试块每一层的厚度。



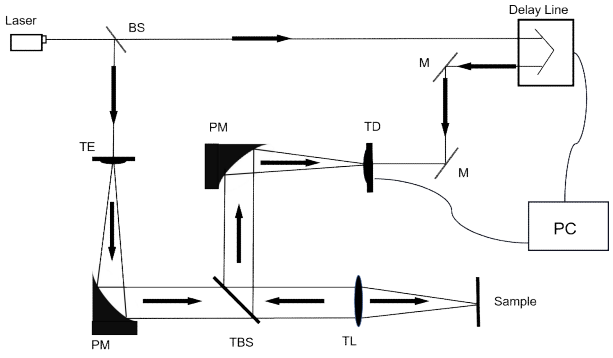
（a）太赫兹辐射在试块内传输模型 （b）典型的反射波形

图 1 太赫兹涂层测厚原理

太赫兹测厚仪常用的光谱测量范围是 0.1 THz ～ 2.5 THz ，可扩展到 10 THz ，从光路结构上分为透射式和反射式，本规范讨论的太赫兹测厚仪采用反射式测量，结构示意图分别如图 2 所示。



1—基体；2—涂层；3—反射式太赫兹测量头；4—发射天线；5—接收天线；6—太赫兹测厚仪；7 太赫兹辐射



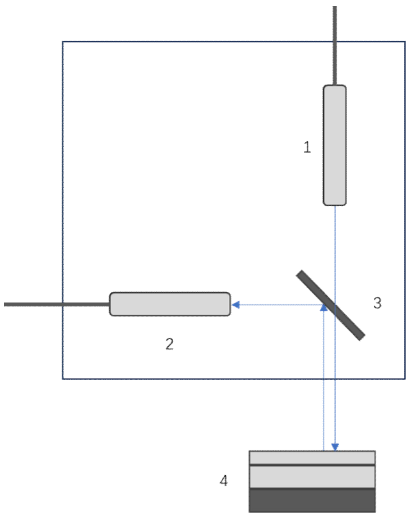
Laser—飞秒激光器；BS—分束镜；TBS—太赫兹分束镜；Delay—光学延迟线；M—反射镜；TE—太赫兹发射器；

TD—太赫兹探测器；PM—抛物面镜；TL—太赫兹透镜；Sample—试块；PC—计算机

（a）整体结构图 （b）反射式太赫兹测厚仪光路图

图 2　反射式太赫兹测厚仪结构示意图

对于涂层厚度测量，尤其是需要分析多层试块时，最好在反射状态下进行测量，由于结构原因，在测试过程中太赫兹辐射需要垂直入射试块表面。图 3 为测量头可能的结构示意图。



说明：1—太赫兹发射天线；2—太赫兹接收天线；3—半透半反镜/膜；4—基底上的多层试块

图 3—正反射太赫兹测量头示意图

4.2 厚度的计算

如图 1b 所示，由时域反射信号获得相邻回波（S 和 R1 或 R1 和 R2）之间的时间间隔 Δt，被测材料折射率 n ，基底材料折射率为 n_0，S 和 R1 的峰值间隔时间为Δt_1，S 和 R1

的谷值间隔时间为Δt_2，S 的峰值和 R1 的谷值间隔时间为Δt_3，则：

当$n < n_0$，$\Delta t = \Delta t_1$或$\Delta t = \Delta t_2$；

当$n > n_0$，$\Delta t = \Delta t_3$；

当$n = n_0$，Δt无效。

被测材料厚度为：

$$d = \frac{c\Delta t}{2n} \tag{1}$$

式中：

c——光速；

n——样品折射率；

Δt——样品和参考信号之间时间间隔。

4.3 测量仪器

基于太赫兹时域光谱技术的太赫兹法非电导涂层厚度测量仪主要用于已知折射率 *n* 的情况下，对非导电涂层厚度进行测量。核心指标要求如下：

飞秒激光器中心波长： （780 ～ 1560） nm

频谱范围：不少于 （0.1 ～ 2.5） THz

动态范围：> 60 dB

时域分辨率：≤ 0.2 ps

纵向分辨率：≤ 0.03 mm

扫描速率： （1～1000） Hz

时间扫描范围：应大于目标测厚结构界面反射脉冲间的时间间隔，计算方法如下：

正反射式：扫描时间范围 $> 2nd/c$ (n为样件的平均折射率，*c* 为光速，*d* 为样件的物理厚度)，单位 ps 。

5 计量特性

5.1 厚度测量示值误差

仪器涂层厚度测量的相对示值误差应不超过 ± 10%。

5.2 厚度测量示值重复性

仪器涂层厚度测量的相对示值重复性应不超过 5%。

6 校准条件

6.1 环境条件

1） 环境温度：（20±2）℃；

2） 环境湿度：≤50 %RH；

3） 测量校准区域不应有影响校准读数的震动源或气体流动等干扰；

4） 测量校准区域应避免电磁干扰和背景辐射，设备周围 1 m 范围内无电磁干扰源；

5） 测量校准区域环境洁净，避免灰尘等杂物对测量设备和试块造成影响。

6.2 测量标准及其他设备

1） 标准厚度片（参考试块）：可根据仪器测量范围和实际使用情况选用不同的参考试块，且已知厚度和折射率，经过计量技术机构检定或校准，满足校准使用要求，并在有效期内。

2） 校准时推荐使用的参考试块类型和厚度范围见附录 A，参考试块厚度示值误差绝对值宜优于 3%，参考试块的要求详见附录 A。

6.3 标准厚度片的放置

调整太赫兹测量头与待测参考试块之间的距离，保证待测参考试块结构区域处于镜头景深范围内；同时保证被测参考试块界面的反射峰包含在时域扫描范围内。当测试不同参考试块或者更换太赫兹装置时，需重新进行试块位置调整。

7 校准项目和校准方法

本规范采用太赫兹时域光谱仪技术作为非导电涂层厚度的无损测量太赫兹测厚仪器核心技术，具体校准方法依据 JJF 1603-2016《（0.1 ～ 2.5）THz 太赫兹光谱仪校准规范》。

7.1 校准项目

厚度测量示值重复性和厚度测量示值误差。

7.2 校准前准备

校准前，需确保仪器处于正常工作状态及没有影响校准计量性能的因素后方可进行校准，所用参考试块应保持表面洁净，避免划痕、腐蚀和氧化。每次仪器测量后应及时检测参考试块表面情况，对出现偏离校准目的情况，应重做该次测量。校准准备应符合以下要求：

在进行仪器校准前，应对仪器外观检查，目测是否有影响计量结果的碰伤、划痕以及其他缺陷。

被校仪器应在本规范规定的环境条件下开机启动直到系统运行稳定，获取信号稳定。

7.3 校准方法

7.3.1 校准步骤

校准步骤如下：

（1） 太赫兹测厚仪发出太赫兹辐射，沿法线方向垂直入射到参考试块，调整太赫兹测量头，使得回波脉冲出现在时间窗口内，并靠近中心位置；

（2） 至少选取 1 个经计量认证且在有效期的参考试块，将参考试块紧贴放置在参考金属面上；太赫兹辐射应完全照射到参考试块上，无遮挡太赫兹波束的情况；

（3） 保证参考试块与空气界面的太赫兹回波脉冲和参考试块与参考金属面的太赫兹回波脉冲包含在时域扫描范围内；

（4） 记录时域信号，按照公式（2）计算厚度值，原始记录表见附录 B；

（5） 与参考试块厚度计量的标准值对比，计算示值误差；

（6） 取同一参考试件不少于 3 个不同位置，每次不少于 5 次重复测量，取平均值；

（7） 给出校准结果，校准证书内页格式见附录 C，测量不确定度示例见附录 D。

7.3.2 厚度测量示值误差

厚度测量示值误差应满足以下要求：

选取至少 1 个已知厚度和折射率且经计量认证并在有效期的参考试块，每个参考试块紧贴放置于金属反射镜面上，每个参考试块在测量区域相邻近不同位置处重复测量至少 5 次。依次记录第 i 个参考试块第 j 次测量的太赫兹时域信号，并读取出参考试块与空气界面的太赫兹回波脉冲和参考试块与参考金属面的太赫兹回波脉冲的时间位置。再根据公式（2）计算测量厚度值，表示为H_{ij}；

根据公式（2）计算算术平均值$\bar{h}_i$作为第 i 个参考试块的测量结果：

$$\bar{h}_i = \frac{1}{3} \times \sum_{j=1}^{3} h_{ij} \tag{2}$$

式中：

$\bar{h}_i$——对第 i 个参考试块，测量示值的平均值，单位为 mm ；

h_{ij}——第 i 个参考试块，第 j 次测量厚度，单位为 mm 。

分别在每个参考试块的同一测量区域相邻位置处重复测量 5 次并记录仪器示值，计算算术平均值H_i作为第i个参考试块的测量结果，根据公式（3）计算仪器厚度测量值示值误差：

$$\delta_i = \bar{h}_i - H_i \tag{3}$$

式中：

δ_i——对第i 个参考试块，仪器的示值误差，单位为 mm ；

$\bar{h}_i$——对第i 个参考试块，仪器示值的平均值，单位为 mm ；

H_i——第i 个参考试块的标准厚度值，单位为 mm 。

根据公式（4）计算厚度测量相对示值误差r（δ_i）：

$$r(\delta_i) = \frac{\bar{h}_i - H_i}{H_i} \times 100\% \tag{4}$$

式中：

$\bar{h}_i$——对第i个参考试块，示值的平均值，单位为 mm ；

H_i——第i个参考试块，给定厚度值，单位为 mm；

r（δ_i）——第i个参考试块，测量相对示值误差，单位为 mm 。

7.4 厚度测量示值重复性

在仪器有效测量范围内，选取一个涂层/基体类型的参考试块。仪器测量程序与所选标准厚度块的涂层/基体类型保持已知，在同一测量区域相邻位置处连续测量该标准厚度块 5 次，记录仪器示值 h，按照公式(5)计算实验极差s：

$$s = \frac{h_{max} - h_{min}}{C} \tag{5}$$

式中：

h_{max}——测量示值最大值，单位为 mm ；

h_{min}——测量示值最小值，单位为 mm ；

C——极差系数，5 次测量条件下，C 取 2.33。

试验极差s除以仪器 5 次测量结果的算术平均值$\bar{h}$所得到的百分数即为仪器镀层厚度的相对示值重复性s_{rel}，按公式（6）计算：

$$s_{rel} = \frac{s}{\bar{h}} \times 100\% \tag{6}$$

式中：

s——试验极差，单位为 mm ；

$\bar{h}$——仪器 5 次测量结果的算术平均值，单位为 mm ；

校准原始数据推荐格式见附录 B。

8 校准结果表达

经校准的太赫兹测厚仪出具校准证书，校准证书包括的信息应符合 JJF 1071-2010 国家计量校准规范编写规则中 5.12 的要求。校准证书应至少包含以下信息：

1） 标题：“校准证书”；

2） 实验室名称和地址；

3） 进行校准的地点（如果与实验室地址不同）；

4） 校准证书或报告的唯一性标识(如编号)，每页及总页数的标识；

5） 客户的名称和地址；

6） 进行校准的日期，如果与校准或检测结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；

7） 如果与校准结果的有效性和应用有关，应对被校试块的抽样程序进行说明；

8） 参考规范编号、依据的标准、技术归档的标识，包括名称及代号；

9） 本次检测或校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；

10） 校准所用标准块的基本信息，包含但不限于材料类型、n/k 值、数量、尺寸等；

11） 对校准环境的描述；

12） 校准结果以及其测量不确定度的说明；

13） 对校准规范的偏离的说明；

14） 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识；

15） 校准结果仅对被校准对象有效的声明；

16） 未经实验室书面批准，不得复制证书或报告的声明。

校准过程应详细记录，校准记录样式见附录 B，校准证书内页样式见附录 C。

9 复检时间间隔

由于复检时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸多因素所决定的，因此送检单位可以根据实际使用情况自主决定复检时间间隔。建议复检时间间隔不超过 1 年。更换重要部件、维修、重新安装或对仪器性能有怀疑时，应随时送检。

附录 A 标准厚度块的技术要求

A.1　标称值及允许偏差列于表 A.1

表 A.1 标准厚度块的技术要求

mm

标称值 H	0.1	0.2	1	2	5	10	15	20
允许偏差δ	≤±3%							

A.2　标称值及允许偏差列于表 A.1（单位为 mm） 。

A.3　材料：氧化锆量块，折射率 2.600-5.800；石英量块，折射率 1.950；高阻硅量块，折射率 3.400 等（实际折射率以生产厂家为准，小数点后保留三位）

A.4　已知厚度和光学常数合适且长期稳定。

A.5　参考试块厚度覆盖 0.1 mm ~ 20 mm 范围，厚度标称值宜为：0.1 mm 、0.2 mm、1 mm 、2 mm 、5 mm 、10 mm 、15 mm 、20 mm 。

A.6　参考试块厚度示值误差绝对值：宜优于 3%。

附录 B 校准原始记录推荐格式

校准原始记录推荐格式

原始记录编号：_____

仪器名称：_____；

客户名称：_____；电话：_____；联系人：_____；

客户地址：_____；邮编：_____；送检日期：____年____月____日；

制造厂商：_____；型号规格：_____；出厂编号：_____；

外观检查：□ 正常 □ 有缺陷 □ 说明：_____；

干燥方式：□ 无， □ 真空， □ 氮气吹扫，□ 干燥空气吹扫，□ 其他：_____；

所依据的技术规范：

□ JJF 非导电层-涂层厚度的太赫兹测量仪器校准规范，

□ 其他规范：_____；

厚度测量模块校准使用的标准装置或主要标准器：

校准结果：

1.原始数据

参考试块 1　　单位 ps

编号		参考试块位置 1					参考试块位置 2					参考试块位置 3				
测试次数		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
原始记录	脉冲位置 Ts（峰）															
	脉冲位置 Ts（谷）															
	脉冲位置 T_{R1}（峰）															
	脉冲位置 T_{R1}（谷）															
	脉冲位置 T_{R2}（峰）															
	脉冲位置 T_{R2}（谷）															
计算值	脉冲间隔 1 Δt1															

	脉冲间隔 2 Δt2															
	脉冲间隔 Δt															

参考试块 n　　单位 ps

编号		参考试块位置 1					参考试块位置 2					参考试块位置 3				
测试次数		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
原始记录	脉冲位置 Ts（峰）															
	脉冲位置 Ts（谷）															
	脉冲位置 T_{R1}（峰）															
	脉冲位置 T_{R1}（谷）															
	脉冲位置 T_{R2}（峰）															
	脉冲位置 T_{R2}（谷）															
计算值	脉冲间隔 1 Δt1															
	脉冲间隔 2 Δt2															
	脉冲间隔 Δt															

2. 厚度测量相对示值误差校准结果：　　单位 mm

参考试块序号	参考试块折射率 n	参考试块厚度值 D	太赫兹测厚仪厚度测量示值 d				示值误差
			1	2	3	均值$\overline{d}$	δ
1							
2							
3							
...							

3.厚度测量重复性校准结果：　　单位 mm

测量次数	厚度测量值
1	
2	
3	
4	
5	

…	
测量结果平均值	
厚度测量重复性	

对校准规范偏离的说明：

校准地点：_____；

环境条件：温度：_____℃；湿度：_____%RH；

校准员：_____；核验员：_____；

校准日期：_____年_____月_____日

附录 C 校准证书内页格式

校准证书内页参见表 C.1。

表 C.1 校准证书内页格式

1、外观：

2、校准结果：

（1） 厚度测量相对示值误差

标准厚度片类型 （涂层/基体）			
标准厚度值/μm			
示值误差/μm			
相对示值误差%			

（2） 仪器厚度测量示值重复性

（标准厚度片类型： ，标准厚度值： mm

测量点/mm	测量重复性

3、仪器厚度测量示值误差的扩展不确定度：

以下空白

附录 D 测量不确定度评定示例

D.1 厚度不确定度评定

D.1.1 数学模型

第i个厚度标准样块第j次的厚度测量结果按照公式（D.1）计算：

$$D_{ij} = \frac{\Delta T_{ij}}{\Delta T_o} \times D_{0s} \tag{D.1}$$

式中：

ΔT_o——参考标准样块的飞行时间平均值，单位 ps；

ΔT_{ij}——第i个厚度标准第j次的飞行时间，单位 ps；

D_{0s}——参考标准样块的厚度标准值，单位 mm；。

D.1.2 测量不确定度来源分析

在进行校准时，以参考用 2 mm 标准样块（高阻硅）为例，厚度测量不确定度主要来源有：：

a) 厚度标准样块厚度溯源引入的测量不确定度 u_1：

1） 参考标准样块厚度溯源引入的测量不确定度 u_{1a}；

厚度标准样块自身厚度示值扩展不确定度为：U_{rel}=0.5%（k=2）；则 u_{1a}=0.25%。

2） 校准标准样块厚度溯源引入的测量不确定度 u_{1b}；

厚度标准样块自身厚度示值扩展不确定度为：U_{rel}=0.5%（k=2）；则 u_{1b}=0.25%。

参考标准样块和校准标准样块厚度标准值采用同一台仪器，同一种方法测量赋值，故：

$$u_1 = u_{1a} + u_{1b} = 0.5\% \tag{D.2}$$

b) 线膨胀系数和环境温度变化引入的不确定度 u_2：

1） 线膨胀系数引入的不确定度 u_{2a}：

硅的线膨胀系数为 2.6×10^{-6}/K，服从均匀分布，在常温下，温度变化 10 K 时：

$$u_{2a} = \frac{50\times2.6\times10^{-6}\times10}{50\sqrt{3}} \times 100\% = 0.001\% \tag{D.3}$$

2） 环境温度变化引入的不确定度 u_{2b}：

环境等温后，测厚仪器和厚度标准样块的温差最大为 1 K，且服从均匀分布，则

$$u_{2b} = \frac{50\times2.6\times10^{-6}\times1}{50\sqrt{3}} \times 100\% = 0.0001\% \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \tag{D.4}$$

故环境温度变化和线膨胀系数引入的的不确定度分量 u_2 为：

$$u_2 = \sqrt{u_{2a}^2 + u_{2b}^2} = 0.001\% \cdots\cdots (D.5)$$

c) 飞行时间测量不准引入的测量不确定度 u_3；

1） 参考标准样块飞行时间测量不准引入的测量不确定度 u_{3a}：

厚度标准样块自身厚度示值扩展不确定度为：飞行时间引入的不确定度分量 u_{3a} 不大于 0.25%。

2） 校准标准样块飞行时间测量不准引入的测量不确定度 u_{3b}：

厚度标准样块自身厚度示值扩展不确定度为：飞行时间引入的不确定度分量 u_{3b} 不大于 0.25%。

参考标准样块和校准标准样块厚度标准值采用同一台仪器，同一种方法测量赋值，故：

$$u_3 = u_{3a} + u_{3b} = 0.5\% \quad (D.6)$$

d) 标准样块摆放姿态、标准样块平行度、以及标准样块均匀性引入的测量不确定度 u_4（不大于 0.2%）；

e) 湿度变化引入的测量不确定度 u_5：

当光路内湿度在低于 50%RH 时，湿度变化引入的不确定度分量 u_5 不大于 0.2%。

f) 测量重复性引入的测量不确定度 u_6：

根据 6.2.5 计算测量重复性，按式（D.7）计算测量重复性引入的测量不确定度分量。

$$u_6 = \frac{\delta_n}{\sqrt{n}} \quad (D.7)$$

测量重复性为 0.6%，则 u3=0.35%。

将以上不确定度分量及相对扩展不确定度结果如下：

上述三个不确定度分量互不相关，则

$$u_c = \sqrt{{u_1}^2 + {u_2}^2 + {u_3}^2 + {u_4}^2 + {u_5}^2 + {u_6}^2} = 0.8\% \quad (D.8)$$

经计算，u_c = 0.8%，则相对扩展不确定度为U_{rel} = 2.0% (k=2)。