



团体标准

T/CEATEC XXX—2025

耐低温碳纳米管晶体管制备工艺技术与性能评价规范

Low-temperature carbon nanotube transistor fabrication process technology
and performance evaluation specification

(征求意见稿)

2025-X-XX 发布

2025-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 制备工艺流程	2
4.1 定位	2
4.2 图案化	2
4.3 源漏区域	2
4.4 顶栅沉积	2
5 制备工艺要求	2
5.1 原料要求	2
5.2 薄膜制备	3
5.3 图形化与微加工	3
5.4 电极沉积	4
5.5 工艺环境控制	5
6 性能评价指标	5
6.1 常温性能评价指标	5
6.2 低温性能评价指标	6
7 评价方法	6
7.1 常温性能指标测试	6
7.2 低温性能指标测试	6
8 评价结果	7
8.1 等级划分	7
8.2 评价结果判定	8
8.3 公示与追溯	8
8.4 复检	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。

本文件主要起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

耐低温碳纳米管晶体管制备工艺技术与性能评价规范

1 范围

本文件规定了耐低温碳纳米管晶体管的制备工艺流程、制备工艺要求、性能评价指标、评价方法、评价结果。

本文件适用于柔性或刚性衬底上的耐低温碳纳米管晶体管器件的实验室制备和小批量生产。

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 24491 单壁碳纳米管

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

晶体管 transistor

一种基于半导体材料实现电信号放大、开关控制或信号调制功能的固态电子器件，是现代电子电路的核心组成单元，通过输入电极施加的电信号，控制输出回路中电流的流动状态，进而实现对电信号的处理。根据结构与工作机制的不同，分为双极结型晶体管（BJT）、场效应晶体管（FET）等类型，碳纳米管晶体管属于场效应晶体管。

3.2

碳纳米管晶体管 carbon nanotube transistor

以碳纳米管（符合 GB/T 24491 的要求）作为核心导电沟道材料的场效应晶体管，是耐低温碳纳米管晶体管的基础器件形态。其结构通常包含衬底、绝缘层、栅极、源极、漏极及碳纳米管沟道，电学特性优异，可实现更高效的电流控制与信号处理。相较于传统硅基场效应晶体管，碳纳米管晶体管在高频性能、集成密度、低功耗等方面具有潜在优势，适用于对器件性能与尺寸要求较高的电子领域。

3.3

耐低温晶体管 low-temperature transistor

耐低温晶体管是能够在低于常规工作温度（通常指低于室温，具体低温范围可根据应用场景调整）并正常实现信号放大、开关等功能的晶体管。其设计重点解决低温环境下材料特性变化、界面接触稳定性、结构可靠性等问题，常见于对工作环境温度有严苛低温要求的领域，如航天航空电子设备、极地科考仪器、低温物理实验装置等。

3.4

耐低温碳纳米管晶体管 low-temperature carbon nanotube transistor

将碳纳米管作为沟道材料与“耐低温”特性结合的特定类型晶体管，需同时满足碳纳米管晶体管的结构要求与耐低温环境的性能要求。

4 制备工艺流程

4.1 定位

定位操作步骤如下：

- 在碳纳米管（CNT）上，首先通过激光直写/电子束曝光出标记（Mark）的位置；
- 通过电子束沉积（EBE）钛/金（Ti/Au）（5/45nm），Ti为黏附层，Au为增量；
- 通过N-甲基吡咯烷酮（NMP）和异丙醇（IPA）进行剥离。

4.2 图案化

通过Mark对齐需要预留的沟道位置，进行曝光，将多余地方的CNT进行图案化操作，通过等离子体（RIE）进行干法刻蚀，单独暴露沟道区域。

4.3 源漏区域

源漏区域操作步骤如下：

- 通过Mark对齐源漏，在CNT上进行源漏沉积；
- 激光直写进行源漏区域曝光；
- 通过EBE进行电子束沉积Pd/Au（20/30nm），制作P型晶体管，沉积Sc/Au或者Y/Au，制作N型晶体管；
- 通过NMP和IPA进行剥离。

4.4 顶栅沉积

顶栅沉积操作步骤如下：

- 通过Mark对齐顶栅位置，将源漏完全包裹；
- 分步骤通过ALD沉积8nmHfO₂，EBE蒸镀Ti/Au作为栅金属；
- 统一剥离。

5 制备工艺要求

5.1 原料要求

5.1.1 碳纳米管原料

5.1.1.1 规格

碳纳米管规格要求如下：

选用单壁碳纳米管单壁碳纳米管，长度分布范围控制在 $1\sim 5\mu\text{m}$ 。

5.1.1.2 纯度

碳纳米管半导体纯度需达99.9%。

5.1.1.3 分散浓度

碳纳米管在分散液（如N-甲基吡咯烷酮、去离子水等）中的分散浓度宜为 $0.1\sim 0.5\text{mg/mL}$ ，超声分散后需经 10000r/min 离心处理 20min ，上清液中碳纳米管单根分散比例 $\geq 80\%$ 。

5.1.2 衬底材料

衬底材料要求如下：

a) 衬底材料一般采用本征硅上 285nm 的氧化硅（单抛）；

b) 柔性衬底：如聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）、聚萘二甲酸乙二醇酯（PEN）、聚酰亚胺（PI）、聚二甲基硅氧烷（PDMS），超薄玻璃等；

c) 在高频器件领域，可采用金刚石衬底。

5.1.3 辅助材料

辅助材料要求如下：

a) 光刻胶：应选用与工艺兼容的光刻胶，显影后图形分辨率应满足设计要求，胶膜厚度均匀性偏差 $\leq \pm 5\%$ ；

b) 电子束胶：应选用与具体电子束曝光工艺契合的电子束胶，显影后图形分辨率应满足设计要求，胶膜厚度均匀性偏差 $\leq \pm 5\%$ ；

c) 源极/漏极：P型器件源极/漏极选用Ti（与衬底粘附性好，厚度 0.3nm ）+Pd（钯）（厚度 20nm ），N型器件源极/漏极选用Sc（钪）/Y（钇）+Au（金）；

d) 栅极材料：选用Ti（厚度 3nm ）和Au（厚度 45nm ）

5.2 薄膜制备

5.2.1 制备要求

薄膜制备步骤如下：

a) 衬底采用旋涂法，衬底转速 $2000\sim 5000\text{r/min}$ ，加速时间 $1\sim 3\text{s}$ ，旋涂时间 $30\sim 60\text{s}$ ，薄膜厚度控制在 $20\sim 50\text{nm}$ ；

b) 在低温干燥箱中进行薄膜干燥，温度 $60\sim 120^\circ\text{C}$ ，真空度 $\geq 10\sim 3\text{Pa}$ ，干燥时间 $1\sim 2\text{h}$ ，分阶段升温（每 30min 升温 20°C ）；

c) 干燥后薄膜含水率 $\leq 0.5\%$ ，通过卡尔费休水分测定仪检测。

5.2.2 质量检测

薄膜质量需满足均匀性与完整性要求，具体质量检测要求如下：

a) 厚度均匀性偏差 $\leq \pm 5\%$ ；

b) 台阶仪检测任意10个检测点的厚度极差 $\leq 2\text{nm}$ ；

c) 碳纳米管在薄膜中的面密度分布偏差 $\leq \pm 10\%$ ；

d) 拉曼光谱表征，判断缺陷；

e) 原子力显微镜（AFM）观察，碳纳米管形态完好，薄膜无针孔、裂纹、团聚现象，团聚体尺寸 $\leq 500\text{nm}$ ，且单个团聚体在沟道区域的占比 $\leq 5\%$ ；

f) 通过相应电学性能测试验证电流传输均匀性。

5.3 图形化与微加工

5.3.1 光刻工艺与电子束曝光工艺

5.3.1.1 涂胶

涂胶步骤如下：

a) 光刻工艺：旋涂法涂覆光刻胶，先涂覆3A，转速4000r/min，持续40s，在180℃下烘2min，涂覆S1805，转速4000r/min，持续30s，在100℃下烘2min，使光刻胶凝固，进行光刻；

b) 电子束曝光工艺：旋涂法涂敷电子束胶，先涂敷A4，转速4000r/min，持续40s，在150℃下烘7min，然后涂敷50K，转速4000r/min，持续50s，在150℃下烘7min，使电子束胶凝固，进行电子束曝光。

5.3.1.2 曝光显影

曝光显影步骤如下：

a) 仪器：使用紫外光刻机（波长365nm或405nm），电子束曝光工艺选择EBL；

b) 光刻胶显影：使用四甲-基氢氧化铵显影液，显影时间35s，显影后需用去离子水冲洗1min30s，氮气吹干，显影后图形边缘粗糙度 $\leq 0.5\mu\text{m}$ ，通过光镜观察，是否过曝或过显影；

c) 电子束胶显影：使用电子束显影液，显影时间2min，显影后使用IPA进行定影，定影时间5min，氮气吹干，显影后图形边缘粗糙度 $\leq 0.5\mu\text{m}$ ，通过光镜观察，是否过曝或过显影。

5.3.2 刻蚀工艺

刻蚀工艺优先采用等离子刻蚀，选用 O_2 ，刻蚀功率30W，气压3Pa，刻蚀时间1min，控制刻蚀时间。

5.3.3 氧化层图形化

氧化层图形化步骤如下：

a) 顶栅结构的绝缘层图形化中，绝缘层沉积采用ALD制备 HfO_2 氧化层；

b) 以四（二甲氨基）钪（TDMA-Hf）和水为前驱体，在90℃/150℃的条件下沉积 HfO_2 薄膜，沉积厚度6~10nm，厚度均匀性偏差 $\leq \pm 2\%$ ；

c) 重复光刻工艺定义栅极窗口图形（宽度2~5 μm ，长度5~15 μm ）；

d) 选用 CF_4 气体进行等离子体刻蚀，刻蚀功率120W，气压4Pa，刻蚀时间1min，刻蚀后栅极窗口边缘无残留绝缘层。

5.3.4 低温热处理与退火

低温热处理与退火步骤如下：

a) 低温热处理使用真空退火炉，真空度 $\leq 10^{-3}\text{Pa}$ ，温度控制精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ ，升温速率为 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ ，处理温度350℃，保温时间1h；

b) 通入 Ar/H_2 混合气体去除碳纳米管表面吸附的水分子、有机杂质；

c) 处理后碳纳米管的拉曼光谱G峰与D峰强度比（ IG/ID ） ≥ 10 ，通过拉曼光谱仪检测，碳纳米管结构完整。

5.4 电极沉积

5.4.1 清洁去胶

清洁去胶步骤如下：

a) 表面清洁与对准标记制备：表面清洁采用NMP去胶剂清洗，温度80℃，清洗1h，清洗两遍，之后使用IPA，温度80℃，清洗1h，清洗两遍；

b) 对接：通过光镜观察，确保电极与沟道精准对接。

5.4.2 金属沉积

金属沉积步骤如下：

a) 真空蒸镀适用于Ti、Pd、Sc、Y、Au、Al、Cr等金属，真空度 $\leq 10^{-4}\text{Pa}$ ，蒸发速率0.1~0.5A/s，沉积过程中衬底温度 $\leq 100^\circ\text{C}$ ；

b) 沉积后金属膜厚度均匀性偏差 $\leq \pm 5\%$ 。

5.5 工艺环境控制

5.5.1 核心工艺区域

核心工艺区域环境控制如下：

- a) 薄膜制备、光刻、电极沉积等步骤需在ISO 5级的洁净室中进行，粒径 $\geq 0.5 \mu\text{m}$ 的颗粒数 ≤ 3500 个/ m^3 ，粒径 $\geq 5 \mu\text{m}$ 的颗粒数 $=0$ 个/ m^3 ；
- b) 刻蚀、热处理等步骤需在ISO 6级洁净室中进行，粒径 $\geq 0.5 \mu\text{m}$ 的颗粒数 ≤ 35200 个/ m^3 ；
- c) 洁净室管理人员需穿戴无尘服、无尘手套、无尘鞋，进入前经风淋室，风淋时间 $\geq 15\text{s}$ 。

5.5.2 温湿度控制

5.5.2.1 温度

温度控制如下：

- a) 洁净室：温度通过空调系统精准调控，保持 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ，温度波动 $\leq \pm 1^\circ\text{C}/\text{h}$ ；
- b) 衬底温度：薄膜制备、光刻工艺中衬底温度偏差 $\leq \pm 0.5^\circ\text{C}$ ；
- c) 光刻胶储存： $5 \pm 3^\circ\text{C}$ 。

5.5.2.2 湿度

湿度控制如下：

- a) 相对湿度： $45 \pm 5\%$ ，湿度波动 $\leq \pm 5\%/\text{h}$ ，通过除湿机或加湿器调节；
- b) 光刻胶储存：相对湿度 $\leq 40\%$ 。

5.5.3 气氛

气氛控制如下：

- a) 真空度：电极沉积、低温热处理等真空环节，真空计实时监测真空度，稳定在设定值（蒸镀真空度 $\leq 10^{-4}\text{Pa}$ ，退火真空度 $\leq 10^{-3}\text{Pa}$ ），真空度波动 $\leq \pm 10\%$ ；
- b) 高纯度气体：等离子刻蚀、ALD沉积等工艺使用高纯度气体（纯度 $\geq 99.999\%$ ）
- c) 氮气：氮气保护工艺中氮气纯度 $\geq 99.999\%$ ，氧含量 $\leq 10\text{ppm}$ ，通过气体分析仪检测。

6 性能评价指标

6.1 常温性能评价指标

6.1.1 电学参数

电学参数指标如下：

- a) 开关比 $\geq 10^4$ ；
- b) 导通电流 $\geq 10 \mu\text{A}/\mu\text{m}$ ；
- c) 关断电流 $\leq 1 \text{nA}/\mu\text{m}$ ；

6.1.3 薄膜性能

薄膜性能指标如下：

- a) 薄膜粗糙度 $\leq \pm 5 \text{nm}$ ；
- b) 薄膜厚度偏差 $\leq \pm 5\%$ ；
- c) 薄膜结合力：无剥离或起皮现象。

6.1.4 结构表征

电极接触界面无明显空隙、剥离及氧化脱落现象。

6.1.5 碳纳米管结构完整性

拉曼光谱 G 峰与 D 峰强度比 (I_G/I_D) ≥ 10 。

6.2 低温性能评价指标

6.2.1 电学参数

电学参数指标如下：

- a) 开关比：经 4.3 K~300 K 温度循环 10 次后，与常温性能相比变化率 $\leq \pm 20\%$ ；
- b) 导通电流：经 4.3 K~300 K 温度循环 10 次后，与常温性能相比变化率 $\leq \pm 20\%$ ；
- c) 关断电流：经 4.3 K~300 K 温度循环 10 次后，与常温性能相比变化率 $\leq \pm 50\%$ ；
- d) 亚阈值摆幅： $\leq 100\text{mV/dec}$ ；
- e) 阈值电压绝对值（4.3 K 温度下） $\leq 150\text{ mV}$ 。

6.2.3 薄膜性能

薄膜性能指标如下：

- a) 薄膜粗糙度： $\leq 5\text{ nm}$ ；
- b) 薄膜厚度偏差： $\leq \pm 5\%$ ；
- c) 薄膜结合力：无剥离或起皮现象。

6.2.4 结构表征

电极接触界面无明显空隙、剥离及氧化脱落现象。

6.2.5 碳纳米管结构完整性

经 4.3 K~300 K 温度循环10次后，与常温CN结构完整性相比无明显变化。

7 评价方法

7.1 常温性能指标测试

7.1.1 电学参数测试

采用标准电学测量与常规表征手段，通过半导体参数分析仪在 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $45 \pm 5\%$ 环境下测定 I-V 特性曲线，提取电学参数。

7.1.3 薄膜性能

薄膜性能测试如下：

- a) 薄膜粗糙度：原子力显微镜（AFM）检测；
- b) 薄膜厚度偏差：原子力显微镜（AFM）检测并计算；
- c) 薄膜结合力：划格法。

7.1.4 结构表征

扫描电子显微镜（SEM）观测。

7.1.5 碳纳米管结构完整性

拉曼光谱法检测。

7.2 低温性能指标测试

7.2.1 测试准备

低温性能测试需模拟低温场景，做准备如下：

- a) 真空环境；
- b) 低温探针台（4.3 K~300 K）。

7.2.2 电学参数

低温场景下,通过半导体参数分析仪提取电学参数,通过低温循环实验(如 4.3 K~300 K循环 100 次)验证开关比、导通电流、关断电流的稳定性。

7.2.4 薄膜性能

经4.3K~300K温度循环后,薄膜性能测试如下:

- a) 薄膜粗糙度:原子力显微镜(AFM)检测;
- b) 薄膜厚度偏差:原子力显微镜(AFM)检测并计算;
- c) 薄膜结合力:采用划格法试验。

7.2.5 结构表征

经4.3K~300K温度循环后,扫描电子显微镜(SEM)观测。

7.2.6 碳纳米管结构完整性

经4.3K~300K温度循环后,采用拉曼光谱法试验。

8 评价结果

8.1 等级划分

基于性能评价指标的测试数据,将低温碳纳米管晶体管制备工艺技术与性能评价结果划分为合格、不合格两个等级,具体分级标准见表1。

表1 等级划分

性能指标			合格	不合格
常温性能	电学参数	开关比	$\geq 10^4$	$< 10^4$
		导通电流	$\geq 10 \mu A/\mu m$	$< 10 \mu A/\mu m$
		关断电流	$\leq 1 nA/\mu m$	$> 1 nA/\mu m$
		亚阈值摆幅	$\leq 150 mV/dec$	$> 150 mV/dec$
	薄膜性能	薄膜粗糙度	$\leq \pm 5 nm$	$> \pm 5 nm$
		薄膜厚度偏差	$\leq \pm 5\%$	$> \pm 5\%$
		薄膜结合力	无剥离或起皮现象	存在剥离或起皮现象
	结构表征	电极接触界面	无明显空隙、剥离及氧化脱落现象	存在明显空隙、剥离或氧化脱落现象
低温性能	碳纳米管结构完整性		拉曼光谱 G 峰与 D 峰强度比 $(I_G/I_D) \geq 10$	拉曼光谱 G 峰与 D 峰强度比 $(I_G/I_D) < 10$
	电学参数	开关比	变化率 $\leq \pm 20\%$	变化率 $> \pm 20\%$
		导通电流	变化率 $\leq \pm 20\%$	变化率 $> \pm 20\%$
		关断电流	变化率 $\leq \pm 50\%$	变化率 $> \pm 50\%$
		亚阈值摆幅	$\leq 100 mV/dec$	$> 100 mV/dec$
		阈值电压绝对值	$\leq 150 mV$	$> 1500 mV$
	薄膜性能	薄膜粗糙度	$\leq \pm 5 nm$	$> \pm 5 nm$
		薄膜厚度偏差	$\leq \pm 5\%$	$> \pm 5\%$
		薄膜结合力	无剥离或起皮现象	存在剥离或起皮现象
	结构表征	电极接触界面	无明显空隙、剥离及氧化脱落现象	存在明显空隙、剥离或氧化脱落现象
	碳纳米管结构完整性		无明显衰减	出现明显衰减

8.2 评价结果判定

8.2.1 单项判定

每个性能评价指标应均满足对应等级的全部要求，若某一指标中任意一项子要求不达标，则该指标判定为对应等级以下。

8.2.2 综合判定

综合判定规则如下：

- a) 当所有五项性能指标均达到“合格”等级要求时，综合评价结果为合格；
- b) 若任意一项性能指标判定为“不合格”，则综合评价结果直接判定为不合格，无需考虑其他指标表现。

8.3 公示与追溯

8.3.1 公示

每批次结果在生产单位官网或行业指定平台公示7天，公示内容包括批次号、原材料、关键参数、各项性能指标测试数据、综合评价等级及检测机构名称等；

8.3.2 追溯

建立“批次-性能”追溯档案，档案保存期限 ≥ 5 年，不合格批次单独建立不合格档案，记录不合格指标、原因分析、整改措施及整改后试生产批次的评价结果。

8.4 复检

若生产单位对评价结果存在异议，可在收到评价报告后10个工作日内，向原检测机构提交复检申请，并说明异议理由，同时提供该批次3个备用试样，复检机构应为具备CNAS资质的第三方检测机构，复检结果为最终评价结果。