

ICS 31.080.30

CCS L 42



# 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 crystal tube fabrication technology and performance evaluation specification

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 .....	3
2 规范性引用文件 .....	3
3 术语和定义 .....	3
4 原材料要求 .....	3
4.1 一般要求 .....	4
4.2 衬底材料要求 .....	4
4.3 电极材料 .....	4
4.4 栅介质材料 .....	4
5 工艺流程与关键参数 .....	5
5.1 工艺流程 .....	5
5.2 关键工序参数控制 .....	5
5.3 工艺参数记录与追溯 .....	6
6 工艺控制要求 .....	7
6.1 环境控制要求 .....	7
6.2 过程监控要求 .....	7
6.3 设备校准与维护 .....	8
6.4 分级维护机制 .....	8
7 性能评价指标 .....	8
8 评价方法 .....	9
8.1 直流电学特性试验 .....	9
8.2 温度应力试验 .....	9
8.3 机械应力与静电防护试验 .....	10
8.4 阵列几何参数试验 .....	10
8.5 界面电学特性试验 .....	10
9 评价结果 .....	10
9.1 等级划分 .....	10
9.2 评价结果判定 .....	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。

# 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

本文件规定了低温碳纳米管晶体管的原材料要求、工艺流程与关键参数、工艺控制要求、性能评价指标、评价方法、评价结果。

本文件适用于工作温度范围为77K（液氮温度）至298K（室温）的碳纳米管场效应晶体管（CNTFET）的研发、制造和质量评价。

## 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 2900.60 电工术语 半导体器件

GB/T 4589.1 半导体器件 第1部分：总则

GB/T 4937.1 半导体器件 机械和气候试验方法 第1部分：总则

GB/T 11499 半导体器件 测试方法

GB/T 14847 重掺杂衬底中轻掺杂外延层厚度的红外反射测量方法

GB/T 25915.1 洁净室及相关受控环境 第1部分：按粒子浓度划分空气洁净度等级

GB/T 32281 滚动轴承 滚针

GB/T 35000 半导体器件 机械冲击和振动试验方法

GB/T 40568 半导体材料 拉曼光谱测试方法

IEC 60747（所有部分） 半导体器件（IEC 60747, Semiconductor devices）

IEC 60749（所有部分） 半导体器件 机械和气候试验方法（IEC 60749, Semiconductor devices - Mechanical and climatic test methods）

IEC 61340-5-1 静电学 第5-1部分：电子器件的静电防护 通用要求（IEC 61340-5-1, Electrostatics - Part 5-1: Protection of electronic devices from electrostatic phenomena - General requirements）

## 3 术语和定义

GB/T 2900.60界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**亚阈值摆幅** subthreshold swing

栅源电压变化引起漏极电流变化一个数量级所需的电压量，用于表征器件开关特性，单位为毫伏每十倍频程（mV/dec）。

### 3.2

**低温制备工艺** low-temperature fabrication process

全工艺过程中最高处理温度不超过250℃，后段工艺（金属化、钝化）优选温度不超过150℃，以确保碳纳米管本征结构完整性与器件界面质量的制造技术。

## 4 原材料要求

#### 4.1 一般要求

##### 4.1.1 纯度要求

原材料应采用半导体性单壁碳纳米管(s-SWCNT)，特级品半导体性碳纳米管含量 $\geq 99.9999\%$  (6N)，金属性碳纳米管残留量 $\leq 0.0001\%$ ；一级品半导体性碳纳米管含量 $\geq 99.999\%$  (5N)，金属性碳纳米管残留量 $\leq 0.001\%$ 。

##### 4.1.2 几何参数要求

碳纳米管晶体管几何参数要求见表1。

表1 碳纳米管晶体管几何参数技术要求

参数项目	技术指标	允许偏差
管径范围	1.2nm~1.8nm	$\pm 0.25\text{nm}$
长度范围	1.0 $\mu\text{m}$ ~5.0 $\mu\text{m}$	$\pm 0.5 \mu\text{m}$
长径比	$\geq 1000$	-
手性分布	(6, 5)、(7, 5)、(8, 4) 占比 $\geq 85\%$	-

##### 4.1.3 化学残留要求

聚合物分散剂残留量 $\leq 0.01\text{wt}\%$ ，金属离子总含量 ( $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 等) $\leq 10\text{ppb}$ 。

#### 4.2 衬底材料要求

##### 4.2.1 石英衬底

石英衬底要求如下：

- 纯度： $\text{SiO}_2$ 含量 $\geq 99.99\%$ ；
- 表面粗糙度： $R_a \leq 0.5\text{nm}$ ；
- 平整度：总厚度变化 (TTV)  $\leq 10 \mu\text{m}$ ；
- 金属杂质： $\text{Fe}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Ni}$ 含量 $\leq 1 \times 10^9 \text{atoms}/\text{cm}^2$ 。

##### 4.2.2 蓝宝石衬底

蓝宝石衬底要求如下：

- 晶向：c-plane (0001)；
- 表面粗糙度： $R_a \leq 0.3\text{nm}$ ；
- X射线摇摆曲线半高宽： $\leq 15\text{arcsec}$ 。

#### 4.3 电极材料

##### 4.3.1 源漏电极

源漏电极材料要求如下：

- 钯 (Pd)：纯度 $\geq 99.99\%$ ，厚度 $20\text{nm} \pm 2\text{nm}$ ；
- 钛/金 (Ti/Au) 复合电极：Ti厚度 $5\text{nm} \pm 1\text{nm}$ ，Au厚度 $50\text{nm} \pm 3 \text{nm}$ ；
- 沉积速率： $0.1\text{nm}/\text{s} \sim 0.3\text{nm}/\text{s}$ 。

##### 4.3.2 栅电极

栅电极材料要求如下：

- 氮化钛 (TiN)：纯度 $\geq 99.9\%$ ，厚度 $50 \sim 100 \text{nm}$ ，电阻率 $\leq 50 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ；
- 金属钨 (W)：纯度 $\geq 99.95\%$ ，厚度 $50 \sim 80 \text{nm}$ ，用于替代TiN的高温工艺场景。

#### 4.4 栅介质材料

栅介质技术要求见表2。

表2 栅介质技术要求

介质材料	$\text{HfO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$
沉积方法	ALD	ALD

等效氧化层厚度 (EOT)	1.5~2.5 nm	1.0~2.0 nm
介电常数 k	$\geq 20$	$\geq 8$
漏电流密度@1V	$\leq 10^{-8}$ A/cm <sup>2</sup>	$\leq 10^{-9}$ A/cm <sup>2</sup>
击穿场强	>15 MV/cm	>12 MV/cm

## 5 工艺流程与关键参数

### 5.1 工艺流程

碳纳米管晶体管低温制备工艺流程为：

- a) 原料检验；
- b) 超声分散；
- c) 离心纯化；
- d) 阵列组装；
- e) 源漏光刻；
- f) 电极沉积；
- g) 剥离；
- h) 退火；
- i) 介质沉积；
- j) 栅极光刻；
- k) 栅极沉积；
- l) 钝化；
- m) PCM测试；
- n) 划片；
- o) 成品测试。

### 5.2 关键工序参数控制

#### 5.2.1 分散提纯

分散提纯关键工艺参数见表3。

表3 分散提纯关键工艺参数

工艺步骤	关键参数	控制范围	允许波动	监控频率
超声分散	功率密度	50 ~ 100W/L	$\pm 10\%$	每 30 分钟记录
超声分散	溶液温度	15 ~ 20℃	$\pm 2^\circ\text{C}$	实时监控
离心分离	相对离心力	70,000 $\pm 5,000 \times g$	$\pm 7\%$	全程记录
离心分离	离心时间	12 ~ 18h	$\pm 30$ 分钟	定时记录
上清液收集	光学密度	0.1 ~ 0.3 ( $\lambda=1000\text{nm}$ )	$\pm 0.05$	每批次检测

#### 5.2.2 阵列组装

阵列组装要求如下：

- a) 提拉速度：100  $\mu\text{m/s}$   $\pm 20 \mu\text{m/s}$ ；
- b) 环境湿度：45%RH ~ 55%RH；
- c) 环境温度：23℃  $\pm 2^\circ\text{C}$ ；
- d) 溶液浓度：5~10  $\mu\text{g/mL}$ 。

#### 5.2.3 源漏电极制备

源漏电极制备要求如下：

- a) 电子束蒸发温度： $\leq 80^\circ\text{C}$ ；

- b) 剥离工艺底切宽度：1.5 μm ~ 2.0 μm；  
c) 退火温度：120℃±10℃（N<sub>2</sub>气氛，30分钟）。

#### 5.2.4 栅介质与栅电极制备

本工序为后段工艺，温度需严格控制在150℃以下，具体参数见表4。

表4 栅介质与栅电极制备工艺参数

工艺步骤	关键参数	控制范围	精度要求	监控频率	工艺窗口
ALD HfO <sub>2</sub>	沉积温度	150℃	±5℃	实时	140-160℃
ALD HfO <sub>2</sub>	循环次数	50次	±2次	计数器	48-52次
ALD HfO <sub>2</sub>	前驱体流量	0.5sccm	±0.1sccm	每10次	0.4-0.6sccm
栅极光刻	光刻胶厚度	300nm	±20nm	每批次	280-320nm
栅极蒸发	TiN厚度	50nm	±5nm	晶振监控	45-55nm
L型侧墙刻蚀	刻蚀宽度	25nm	±5nm	SEM抽检	20-30nm

### 5.3 工艺参数记录与追溯

#### 5.3.1 参数记录

全流程记录工艺参数、环境条件及设备状态，确保可追溯性，实现原材料到单器件的精确追溯。

#### 5.3.2 关键参数自动采集

关键参数存储格式均为CSV+数据库，具体参数见表5。

表5 关键参数

序号	工艺环节	关键参数	控制范围/设定值	采样频率
1	超声分散	功率密度	50~100W/L	≥1Hz
2		溶液温度	15~20℃	≥1Hz
3	离心分离	相对离心力	70,000±5,000×g	≥1Hz
4		离心时间	12~18h	≥1Hz
5	阵列组装	提拉速度	100±20 μm/s	≥1Hz
6		环境湿度	45%~55%RH	≥1Hz
7		环境温度	23±2℃	≥1Hz
8	源漏电极制备	电子束蒸发温度	≤80℃	≥1Hz
9		退火温度	120±10℃	≥1Hz
10	栅介质沉积	ALD沉积温度	150±5℃	≥1Hz
11		ALD循环次数	50次	计数器实时记录
12		前驱体流量	0.5±0.1sccm	≥1Hz
13	栅极光刻	光刻胶厚度	300±20nm	每批次
14	栅极沉积	TiN厚度	50±5nm	晶振实时监控
15	栅极刻蚀	刻蚀速率	1.0±0.2nm/s	10Hz
16	环境控制	颗粒计数(≥0.5 μm)	按ISO等级要求	光刻区每20min,其他每2h
17		温湿度	按区域要求	连续记录,间隔≤5min
18		压差	按区域梯度要求	连续记录,间隔≤1min
19		气体纯度(O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O)	O <sub>2</sub> ≤5ppm/H <sub>2</sub> O≤3ppm	每10min

#### 5.3.3 数据保存期限

原始工艺参数与测试数据永久保存，设备记录≥5年。

## 6 工艺控制要求

### 6.1 环境控制要求

#### 6.1.1 洁净室等级与分区控制

制备环境应符合GB/T 25915.1的要求，并根据工艺风险等级实施分区管理，洁净室分区技术要求见表6。

表6 洁净室分区技术要求

功能区域	洁净度等级	$\geq 0.5 \mu\text{m}$ 颗粒限值	温度	湿度	压差梯度	换气次数
碳纳米管分散区	ISO Class 5	$\leq 35$ 个/ $\text{m}^3$	$23 \pm 2^\circ\text{C}$	$\leq 30\% \pm 5\%$	+15 Pa	$\geq 60$ 次/h
阵列组装区	ISO Class 5	$\leq 35$ 个/ $\text{m}^3$	$23 \pm 1^\circ\text{C}$	45-55% RH	+15 Pa	$\geq 60$ 次/h
光刻区	ISO Class 4	$\leq 10$ 个/ $\text{m}^3$	$23 \pm 1^\circ\text{C}$	$\leq 30\% \pm 3\%$	+20 Pa	$\geq 80$ 次/h
蒸发沉积区	ISO Class 6	$\leq 100$ 个/ $\text{m}^3$	$23 \pm 2^\circ\text{C}$	$\leq 30\% \pm 5\%$	+10 Pa	$\geq 40$ 次/h
测试区	ISO Class 7	$\leq 350$ 个/ $\text{m}^3$	$23 \pm 3^\circ\text{C}$	$\leq 40\% \pm 5\%$	+5 Pa	$\geq 25$ 次/h

#### 6.1.2 金属离子与气氛控制

金属离子与气氛控制要求如下：

- 材质要求：工艺设备必须采用316L不锈钢或高纯石英材质，禁止使用铜、锌材料；
- 污染限值：金属离子本底污染限值要求Fe、Ni、Cr、Cu、Zn等元素面密度 $\leq 1 \times 10^9$  atoms/ $\text{cm}^2$ ，检测频次按风险分级，分散设备每周一次，提拉夹具每批次检测，蒸发腔体每季度VPD-ICP-MS分析，晶圆盒每月抽检，所有维护后必须检测合格方可复产；
- 保护气体：采用99.999%高纯氮气，氧含量 $\leq 5$  ppm，水含量 $\leq 3$  ppm；
- 静电防护：所有操作区域执行IEC 61340-5-1标准，地面电阻率 $10^8$ - $10^9 \Omega$ ，人员佩戴 $1 \text{ M}\Omega \pm 5\%$ 防静电腕带，工器具表面静电势 $< 100 \text{ V}$ 。

#### 6.1.3 环境监测频次与记录

各区域环境参数需按严格频次监测并记录如下：

- 颗粒计数：光刻区每20分钟自动记录，其他区域每2小时记录一次，记录内容包括 $0.3 \mu\text{m}$ 、 $0.5 \mu\text{m}$ 、 $1.0 \mu\text{m}$ 三个通道的颗粒数及平均值；
- 温湿度：所有区域连续自动记录，数据存储间隔 $\leq 5$ 分钟，每日生成趋势图，发现漂移趋势（连续6点上升或下降）需预警；
- 压差：采用微压差传感器连续监控，数据记录间隔 $\leq 1$ 分钟，压差异常时同步记录FFU风机转速、过滤器压降等关联参数；
- 气体纯度：气体管道终端安装在线分析仪，氧含量和水含量每10分钟记录一次，主管道每月用露点仪和氧分析仪人工比对一次；
- 静电电位：每班次开工前用静电测试仪检测工作台、工器具和人员手腕带，记录数值并签字确认。

## 6.2 过程监控要求

### 6.2.1 关键参数在线监控

实施统计过程控制（SPC），对9个关键监控点设置控制限与警戒限如下：

- 超声分散溶液温度：控制范围 $15$ - $20^\circ\text{C}$ ，警戒限 $13$ - $22^\circ\text{C}$ ，超标时自动暂停并启动冷却；
- 离心转速：设定 $70,000 \times g$ ，允许波动 $\pm 5,000 \times g$ ，超 $\pm 7,000 \times g$ 立即停机；
- 阵列组装提拉速度： $100 \pm 20 \mu\text{m/s}$ ，警戒限 $\pm 25 \mu\text{m/s}$ ，由伺服系统实时纠偏；
- 阵列密度：控制在 $150 \pm 30$ 根/ $\mu\text{m}$ ，每 $2 \text{ cm}^2$ 通过SEM自动统计，超警戒限 $\pm 40$ 根/ $\mu\text{m}$ 时需调整溶液浓度；
- 电极退火温度： $120 \pm 10^\circ\text{C}$ ，ALD腔体温度 $150 \pm 5^\circ\text{C}$ ，均采用Pt100热电阻每秒监控，超警戒限即报警停机；
- 栅极刻蚀速率： $1.0 \pm 0.2 \text{ nm/s}$ ，通过干涉仪 $10 \text{ Hz}$ 频率监控。

### 6.2.2 工艺参数变更管理

任何工艺调整须执行变更控制程序如下：

- a) 变更申请：填写《工艺参数变更申请表》，说明变更原因、影响分析、验证方案；
- b) 技术评审：由工艺、质量、技术三方评审，必要时召开技术委员会会议；
- c) 小批验证：变更后首批试制 $\geq 30$ 片，数据经SPC分析 $C_{pk} \geq 1.33$ 方可转入正式生产；
- d) 文件更新：修订工艺规程（SOP），对相关人员进行培训并考核；
- e) 追溯标记：变更后首批产品批次号后缀加“-V”标识，直至验证完成。

### 6.2.3 物料批次管理与追溯

物料批次管理与追溯要求如下：

- a) 原材料批次绑定：每批次碳纳米管原料对应唯一原料批次号，该批次号贯穿至最终器件ID，当原料批次变更时，前3个生产批次必须加严监控（采样频率翻倍）；
- b) 辅料管控：光刻胶、显影液、剥离液等辅料开封后标注开封日期与有效期，有效期按供应商技术文件执行，最长不超过30天，每瓶辅料使用前需检查外观与粘度，异常立即停用；
- c) 化学品纯度验证：每批次甲苯、丙酮等溶剂入厂后抽检纯度，气相色谱法检测杂质峰面积 $\leq 0.1\%$ （面积归一化法），不合格整批退回。

## 6.3 设备校准与维护

### 6.3.1 核心设备校准周期

核心设备校准周期要求如下：

- a) 电子天平：每12个月用F1级砝码校准，误差 $\pm 0.01$  mg；
- b) 温湿度计：每6个月外校，精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}/\pm 1\%$  RH；
- c) 真空计：每6个月用标准真空规比对，误差 $\pm 10\%$ ；
- d) 膜厚监控仪：每3个月用标准 $\text{SiO}_2$ 片校准，精度 $\pm 0.1$  nm；
- e) 参数分析仪：每6个月用标准电阻/电压源校准，精度 $\pm 0.1\%$ 。

### 6.3.2 标识管理

所有合格设备贴绿色标签，注明校准日期与有效期；不合格贴红色“禁用”标签。

## 6.4 分级维护机制

### 6.4.1 四级维护机制

四级维护机制要求如下：

- a) 提拉装置：每日检查氮气压力与速度偏差，每周清洁导轨润滑丝杆，每月检查电机碳刷，年度更换伺服电机；
- b) 蒸发台：每日检查真空度与冷却水，每周清洁腔体，每月换真空泵油，年度更换分子泵；
- c) ALD设备：每日检查温度与气体流量，每周清洁腔体，每月更换前驱体管路，年度更换加热器；
- d) 探针台：每日检查定位精度，每月校准定位系统，年度更换制冷机；
- e) 所有维护记录在《设备维护记录表》签字存档 $\geq 5$ 年。

### 6.4.2 三级异常响应

三级异常响应要求如下：

- a) 一级异常：参数超警戒限、设备故障、 $\geq 5$ 片连续不合格，响应为立即停机，隔离批次，报告技术总监与质量总监，24小时内提交异常报告。复产需验证且连续3批 $C_{pk} \geq 1.33$ ；
- b) 二级异常：参数趋势漂移、2-4片连续不合格。响应为30分钟内调整参数并加严监控，报告工艺经理，3天内完成纠正措施；
- c) 三级异常：单点超控制限、环境轻微波动，2小时内记录分析。

## 7 性能评价指标

性能评价指标如表7所示。

表7 性能评价指标

评价指标	优秀等级	合格等级	不合格等级
------	------	------	-------

直流电学特性	饱和电流	$\geq 2.5/1.6 \text{ mA}/\mu\text{m}$	$77\text{K} \geq 2.0 \text{ mA}/\mu\text{m}, 298\text{K} \geq 1.3 \text{ mA}/\mu\text{m}$	$< 1.8/1.1 \text{ mA}/\mu\text{m}$
	峰值跨导	$\geq 2.0/1.2 \text{ mS}/\mu\text{m}$	$77\text{K} \geq 1.8 \text{ mS}/\mu\text{m}, 298\text{K} \geq 1.0 \text{ mS}/\mu\text{m}$	$< 1.6/0.8 \text{ mS}/\mu\text{m}$
	阈值电压	$-0.2 \sim 0.2 \text{ V}$	$-0.3 \text{ V} \sim 0.3 \text{ V}$	超出 $\pm 0.3 \text{ V}$
	亚阈值摆幅	$\leq 55/70 \text{ mV}/\text{dec}$	$77\text{K} \leq 60 \text{ mV}/\text{dec}, 298\text{K} \leq 75 \text{ mV}/\text{dec}$	$> 65/85 \text{ mV}/\text{dec}$
	开关比	$> 10^{10}/10^9$	$77\text{K} > 10^9, 298\text{K} > 10^8$	$< 10^8/10^7$
	关态漏电流	$< 0.05/5 \text{ nA}/\mu\text{m}$	$77\text{K} < 0.1 \text{ nA}/\mu\text{m}, 298\text{K} < 10 \text{ nA}/\mu\text{m}$	$\geq 0.2/20 \text{ nA}/\mu\text{m}$
温度应力	温度循环寿命	衰减 $\leq 5\%$	衰减 $\leq 10\%$	衰减 $> 10\%$
	高温贮存稳定性	增加 $\leq 30\%$	增加 $\leq 50\%$	增加 $> 50\%$
	低温贮存稳定性	下降 $\leq 3\%$	下降 $\leq 5\%$	下降 $> 5\%$
	湿热耐久性	增幅 $\leq 10\%$	增幅 $\leq 20\%$	增幅 $> 20\%$
机械应力与静电防护	ESD 敏感度	$\geq 2000 \text{ V}$	$\geq 1000 \text{ V}$	$< 500 \text{ V}$
	振动耐受性	变化 $\leq 3\%$	变化 $\leq 5\%$	变化 $> 5\%$ 或失效
	冲击耐受性	0 失效	0 失效	$\geq 1$ 失效
阵列几何参数	阵列密度	$120 \sim 180 \text{ 根}/\mu\text{m}$	$100 \sim 200 \text{ 根}/\mu\text{m}$	$< 90$ 或 $> 220 \text{ 根}/\mu\text{m}$
	密度均匀性	$\leq 12\%$	$\leq 15\%$	$> 15\%$
	取向角偏差	$\leq 7^\circ$	$\sigma_\theta < 8.3^\circ$	$\geq 10^\circ$
界面电学特性	界面陷阱密度	$\leq 3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$	$\leq 5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$	$> 5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$
	金属管残留率	$< 0.00005\%$	$< 0.0001\%$	$\geq 0.0005\%$

## 8 评价方法

### 8.1 直流电学特性试验

#### 8.1.1 输出与驱动能力指标

输出与驱动能力指标应包括：

- 饱和电流 ( $I_{D, \text{sat}}$ ) 测试：按GB/T 4589.1执行；
- 峰值跨导 ( $g_m$ ) 测试：按GB/T 4589.1执行；
- 阈值电压 ( $V_{\text{TH}}$ ) 测试：按GB/T 4589.1执行。

#### 8.1.2 开关特性指标

开关特性指标应包括：

- 亚阈值摆幅 (SS)：按IEC 60747执行；
- 开关比 ( $I_{\text{ON}}/I_{\text{OFF}}$ )：按GB/T 11499执行；
- 关态漏电流 ( $I_{\text{OFF}}$ )：按GB/T 11499执行。

### 8.2 温度应力试验

8.2.1 温度循环寿命  
按GB/T 4937.1执行。

8.2.2 高温贮存稳定性  
按GB/T 4937.1执行。

8.2.3 低温贮存稳定性  
按GB/T 4937.1执行。

8.2.4 湿热耐久性  
按GB/T 4937.1执行。

### 8.3 机械应力与静电防护试验

8.3.1 静电放电敏感度  
按IEC 60749执行。

8.3.2 机械振动耐受性  
按GB/T 35000执行。

8.3.3 机械冲击耐受性  
按GB/T 35000执行。

### 8.4 阵列几何参数试验

8.4.1 阵列密度  
按GB/T 32281执行。

8.4.2 密度均匀性  
按GB/T 14847执行。

8.4.3 取向角偏差  
采用傅里叶变换分析SEM图像，统计 $\geq 1000$ 根碳纳米管取向角的标准差。

### 8.5 界面电学特性试验

8.5.1 界面陷阱密度  
在禁带中央处采用高频C-V法提取。

8.5.2 金属管残留率  
按GB/T 40568规定的的拉曼光谱法执行。

## 9 评价结果

### 9.1 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优秀、合格、不合格三个等级。

### 9.2 评价结果判定

#### 9.2.1 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。

#### 9.2.2 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“优秀”等级要求时，综合评价结果为优秀；
- b) 当所有五项性能指标均达到“合格”等级要求，但达到“优秀”等级的指标不足三项时，综合评价结果为合格；
- c) 若任意三项性能指标判定为“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。