

ICS 29.030

CCS L 19

T

团体标准

T/CEATEC XXX—2026

二维反铁磁材料通用技术规范

Technical specification for two-dimensional antiferromagnetic materials

(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 产品分类 2

 4.1 基体化学组成 2

 4.2 堆叠层数 2

 4.3 工业化制备工艺 2

 4.4 产品成型形态 2

5 技术要求 2

 5.1 外观要求 2

 5.2 纯度要求 3

 5.3 尺寸与层厚要求 3

 5.4 结构与缺陷要求 3

 5.5 磁学性能 3

 5.6 电学性能 3

 5.7 稳定性要求 4

6 试验方法 4

 6.1 外观检验 4

 6.2 纯度试验 4

 6.3 尺寸与层厚试验 4

 6.4 结构与缺陷试验 4

 6.5 磁学性能试验 4

 6.6 电学性能试验 5

 6.7 稳定性试验 5

7 检验规则 5

 7.1 检验分类 5

 7.2 出厂检验 5

 7.3 型式检验 5

8 标志、包装、运输和贮存 5

 8.1 标志 5

 8.2 包装 5

 8.3 运输 6

 8.4 贮存 6

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。

二维反铁磁材料通用技术规范

1 范围

本文件规定了二维反铁磁材料的技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输和贮存。
本文件适用于原子级厚度（1层~10层）、面内反铁磁有序的层状范德华二维反铁磁材料。

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 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 6378.1 计量抽样检验程序 第1部分：按接收质量限（AQL）检索的对单一质量特性和单个AQL的逐批检验的一次抽样方案
- GB/Z 26082 纳米材料直流磁化率（磁矩）测量方法
- GB/T 40069 纳米技术 石墨烯相关二维材料的层数测量 拉曼光谱法
- GB/T 40071 纳米技术 石墨烯相关二维材料的层数测量 光学对比度法
- GB/T 43682 纳米技术 亚纳米厚度石墨烯薄膜载流子迁移率及方块电阻测量方法
- YS/T 1033 干式防渗料元素含量的测定 X射线荧光光谱分析法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

二维反铁磁材料 two-dimensional antiferromagnetic materials

依托层状晶体结构，层间依靠范德华力结合，单层厚度维持原子级尺度，材料内部相邻磁性离子自旋磁矩呈反向平行有序排列，宏观无净剩余磁化强度，在特定临界温度下可完成反铁磁有序态与顺磁无序态相互转变的层状二维功能磁性材料。

3.2

奈尔温度 néel temperature

二维反铁磁材料发生磁有序相变的临界特征温度，当环境温度低于该温度数值时，材料保持稳定反铁磁有序结构；环境温度高于该温度数值时，材料内部自旋磁矩无序排布，转变为顺磁状态，计量单位为开尔文（K）。

3.3

层厚均匀性 uniformity of layer thickness

同一二维反铁磁试样表面不同测试点位实测厚度数值与产品名义标定厚度之间的偏差幅度，采用厚度相对偏差进行量化表征，是判定薄片类产品质量的核心指标。

3.4

磁性能衰减率 magnetic property attenuation rate

二维反铁磁材料在规定恒温恒湿自然存放环境中，经过固定时长静置储存后，其核心磁学参数相较于初始出厂测试参数的下降比例，用于评定材料环境服役稳定性。

3.5

反铁磁有序度 antiferromagnetic order

表征二维材料内部自旋磁矩反向平行排布规整程度的量化参数，数值越趋近于 1，代表磁有序结构越完整，材料本征反铁磁特性越优异。

4 产品分类

4.1 基体化学组成

分类如下：

- a) 过渡金属硫族化合物类二维反铁磁材料：主要包含铬磷硫化合物、锰碲化合物、铬硒化合物等材料；
- b) 过渡金属卤化物类二维反铁磁材料：主要包含碘化镍、氯化铁、溴化钴等卤化物层状材料；
- c) 铋基拓扑反铁磁材料：主要包含锰铋碲化合物、铋锰硒化合物等材料。

4.2 堆叠层数

分类如下：

- a) 单层二维反铁磁材料：层数为 1 层，原子级超薄结构，宜用于超高精度自旋器件制备；
- b) 少层二维反铁磁材料：层数 2 层~5 层，可广泛适配通用型电子元器件，为市场主流应用品类；
- c) 多层二维反铁磁材料：层数 6 层~10 层，可用于电磁屏蔽、磁缓冲层等对超薄特性无严苛要求的场景。

4.3 工业化制备工艺

分类如下：

- a) 机械剥离型二维反铁磁材料：依托块体单晶人工机械剥离制备而成；
- b) 液相剥离型二维反铁磁材料：借助有机溶剂超声分散、流体剪切剥离制备；
- c) 化学气相沉积外延生长型二维反铁磁材料：采用气相外延沉积工艺在指定衬底表面定向生长而成。

4.4 产品成型形态

分类如下：

- a) 粉末状二维反铁磁材料：超细剥离分散粉体，适用于复合材料掺杂、浆料制备、涂层喷涂等场景；
- b) 独立薄片型二维反铁磁材料：无衬底自支撑二维薄片，适用于实验室物性测试、分立功能元件制作；
- c) 衬底附着型外延薄膜：生长于二氧化硅、蓝宝石等绝缘衬底表面的二维薄膜，可直接用于半导体芯片流片加工。

5 技术要求

5.1 外观要求

- 5.1.1 粉末产品色泽均匀，无结块、团聚及可见杂质，无受潮板结。
- 5.1.2 薄片与薄膜产品表面平整光洁，无划痕、裂纹、褶皱，边缘完整，同批次外观一致。
- 5.1.3 产品表面洁净，无油污、粉尘等外来杂质。

5.2 纯度要求

- 5.2.1 产品主相有效成分质量分数不应低于 99.0%。
- 5.2.2 产品内部杂质总含量不应高于 1.0%，其中磁性杂质单项含量宜控制在 0.3%以内。
- 5.2.3 产品表面吸附水、结晶水总含量不应大于 0.5%。
- 5.2.4 化学成分检测应符合 YS/T 1033 要求，同一试样平行检测两次成分偏差不宜超过 0.2%。

5.3 尺寸与层厚要求

5.3.1 横向尺寸

机械剥离薄片尺寸不应小于 5 μm；液相剥离材料尺寸不应小于 1 μm；气相沉积薄膜尺寸不应小于 10 μm，大面积成品覆盖率不应低于 90%。

5.3.2 层厚要求

同一片二维试样内随机选取 5 处不同位置进行厚度检测，检测数据极差不应超出表 1 规定波动限值。

表 1 二维反铁磁材料层数与层厚技术指标限值表

层数区间	名义总厚度 (nm)	厚度相对偏差 (%)	单点厚度波动 (nm)
单层	0.6~1.2	≤10	≤0.10
少层(2~5 层)	1.3~6.0	≤15	≤0.20
多层(6~10 层)	6.1~12.0	≤20	≤0.30

5.4 结构与缺陷要求

- 5.4.1 材料保持标准层状晶体结构，XRD 测试图谱与标准图谱偏差不大于 10%，无明显杂相。
- 5.4.2 层间晶格间距与理论值偏差控制在 5%以内。
- 5.4.3 机械剥离型缺陷密度不大于 5 个/μm²，气相沉积型缺陷密度不大于 8 个/μm²，液相剥离型缺陷密度不大于 10 个/μm²。
- 5.4.4 材料边缘破损占比宜控制在 3%以内。

5.5 磁学性能

通用产品磁性能应符合表 2 要求，定制产品由供需双方协商确定。

表 2 二维反铁磁材料核心磁学性能指标表

序号	指标	单位	技术要求	测试条件
1	奈尔温度 TN	K	机械剥离 100~300；气相沉积 80~50	磁场 0.1T，升温速率 2K/min
2	10K 低温磁化率	emu/(g·T)	$1.0\times10^{-4}\sim5.0\times10^{-3}$	10K，磁场 1T
3	室温磁各向异性常数	J/m³	$\geq1.0\times10^4$	300K，磁场 5T
4	反铁磁有序度	/	≥0.90	低于奈尔温度 50K，中子衍射法
5	30 天磁性能衰减率	%	≤5.0	温度 25℃±5℃，湿度 50%±10%
注：同批次产品奈尔温度差值不宜超过 20K。				

5.6 电学性能

- 5.6.1 室温状态下二维反铁磁材料本体电阻率管控区间为 $1.0\times10^{-3}\Omega\cdot\text{cm}\sim1.0\times10^3\Omega\cdot\text{cm}$ ，可根据具体材料品类精准划分区间。
- 5.6.2 单层及少层二维反铁磁材料的载流子迁移率不应低于 10 cm²/(V·s)。
- 5.6.3 材料与衬底接触电阻波动不宜大于 15%。

5.7 稳定性要求

- 5.7.1 产品可在-20℃~40℃环境下正常使用，温度变化后磁性能无明显下降。
- 5.7.2 常温常压环境存放 30 天，材料无氧化、层间脱落等现象。
- 5.7.3 高湿环境下产品不易吸潮变质。

6 试验方法

6.1 外观检验

采用放大倍数 500 倍~1000 倍光学体视显微镜进行目视全面观测，薄片类产品同步借助原子力显微镜观测表面微观平整度，记录外观缺陷、破损、色差、团聚等不良现象，做好原始检测记录。

6.2 纯度试验

采用电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS）结合 X 射线光电子能谱仪（XPS）联用方式检测产品化学成分与杂质含量，试样处理与检测流程按照 YS/T 1033 执行，判定产品纯度等级。

6.3 尺寸与层厚试验

6.3.1 横向尺寸

采用扫描电子显微镜与光学显微镜组合测试，每批次随机抽取不少于十五个独立试样完成尺寸测量，剔除异常极值后计算算术平均值作为最终检测结果。

6.3.2 材料层数

优先按照 GB/T 40069 拉曼光谱法进行精准层数标定，大批量快速筛查可采用 GB/T 40071 光学对比度辅助判定，存在争议时以原子力显微镜实测层数为最终判定依据。

6.3.3 精准厚度测试

使用原子力显微镜设定扫描速率 0.5Hz，扫描分辨率 512×512，单块试样选取 3 处互不重叠区域完成扫描测试，取 3 处测试平均值作为该试样标准厚度数值，同步计算厚度相对偏差。

6.4 结构与缺陷试验

6.4.1 X 射线衍射结构分析

采用铜靶 K α 特征射线辐射，扫描角度区间设定 10° 至 80°，仪器扫描速率控制为 2°/min，完成物相定性分析与晶体完整性判定。

6.4.2 层间晶格间距测试

采用高分辨透射电子显微镜，设定加速电压 200kV，清晰拍摄层间晶格条纹图像，精准测量标准晶格间距数值。

6.4.3 缺陷密度统计

借助透射电镜与原子力显微镜，随机选取 5 处无重叠标准观测区域，人工统计区域内空位、位错、晶格破损等缺陷数量，核算单位面积缺陷密度数值。

6.5 磁学性能试验

6.5.1 奈尔温度

应采用振动样品磁强计测定。

6.5.2 低温磁化率

应按照 GB/Z 26082 的规定，采用超导量子干涉仪测定。

6.5.3 磁各向异性常数

应采用扭矩磁强计测定。

6.5.4 反铁磁有序度

应采用中子衍射法测定。

6.5.5 环境稳定性磁衰减

将待测试样放入可程式恒温恒湿试验箱，设定标准温湿度环境连续静置 30 天，分别测试试验前后试样核心磁参数，按照公式计算磁性能衰减率：磁性能衰减率（%）=（初始实测磁化率-贮存后实测磁化率）÷初始实测磁化率×100%。

6.6 电学性能试验

6.6.1 室温电阻率

应按照 GB/T 43682 的规定，采用四探针测试法测定。

6.6.2 载流子迁移率

应采用范德堡测试方法，在无强光、无外磁场干扰的标准室温环境内完成测试。

6.7 稳定性试验

应按照 GB/T 2423.1、GB/T 2423.2、GB/T 2423.3 的规定进行。

7 检验规则

7.1 检验分类

分为出厂检验与型式检验。

7.2 出厂检验

7.2.1 检验项目

出厂检验项目为外观要求。

7.2.2 判定规则

出厂检验项目符合本文件要求时，判定为出厂检验合格，若有不合格项目，应进行返工，返工后重新检验，若返工后仍有不合格，判定为出厂检验不合格。

7.3 型式检验

7.3.1 检验时机

有下列情形之一时，应进行型式检验：

- a) 新产品试制定型鉴定；
- b) 正式生产后，如结构、材料、工艺等有较大改变，可能影响产品性能时；
- c) 正常生产满一年时；
- d) 间隔一年以上再生产时；
- e) 出厂检验结果与同批次的型式检验有较大差异时。

7.3.2 检验项目

型式检验项目为本文件规定的全部技术要求。

7.3.3 抽样规则

抽样规则应符合 GB/T 6378.1 的要求。

7.3.4 判定规则及处理措施

所有检验项目均满足本文件的技术要求时，判定为合格。任一项不符合规定时，判定为不合格。对于不合格的产品，应进行返工或报废处理，返工产品应重新进行检验。

8 标志、包装、运输和贮存

8.1 标志

每一件独立最小销售包装外部都应清晰印制牢固产品标志，符合 GB/T 191 的规定，字迹耐摩擦、不易脱落，内容应包含：产品正式名称、产品规格型号、材料基体种类、堆叠层数、制备工艺类型、产品生产批号、精准生产日期、生产企业全称、企业联系地址、产品执行本团体标准编号。

8.2 包装

- 8.2.1 薄片及薄膜类成品优先采用防静电硬质样品盒独立分格存放，粉体类产品采用真空密封铝箔袋分装。
- 8.2.2 所有内包装完成后统一充入高纯氮气完成惰性气体密封防护，最大限度隔绝空气水汽与氧气，延缓产品氧化失效。
- 8.2.3 外包装采用高强度防震抗压硬纸箱，箱体内侧填充缓冲防震材料。
- 8.2.4 成套出厂产品包装内必须附带产品出厂质量合格证、单批次产品抽检检验报告单，做到一单一证齐全。

8.3 运输

- 8.3.1 应避免阳光长时间直接暴晒、露天淋雨浸水、靠近强直流磁场、强交变磁场等特殊环境。
- 8.3.2 环境温度应控制在 $-20^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ ，运输途中环境相对湿度不得高于 80%。
- 8.3.3 二维反铁磁材料不应与强腐蚀性化工原料、易燃易爆危险品混装同车运输。

8.4 贮存

- 8.4.1 应贮存在温度 $10^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ ，室内相对湿度不高于 60%的环境内。
- 8.4.2 未开启惰性气体密封的原装成品，贮存保质期限应为六个月；产品一旦开启密封包装，应在一个月时限内尽快投入使用。
- 8.4.3 应遵循先进先出存放原则，不同批号、不同规格产品分区分类整齐摆放，严禁混批杂乱堆放。