ICS 07.030;17.220.20
CCS A 42

中华人民共和国国家标准

GB/T 44076—2024

纳米技术　碳纳米管电学特性测试方法

Nanotechnologies—Test methods for measurement of electrical properties of carbon nanotubes

（IEC 62624:2009，Test methods for measurement of electrical properties of carbon nanotubes，MOD）

2024-05-28 发布　　2024-12-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会　发布

目　　次

前言 …… Ⅲ
引言 …… Ⅳ
1　范围 …… 1
2　规范性引用文件 …… 1
3　术语、定义和缩略语 …… 1
3.1　术语和定义 …… 1
3.2　缩略语 …… 1
4　电学特性通则 …… 2
4.1　测试仪器 …… 2
4.2　探测系统 …… 2
4.3　测量技术 …… 2
4.4　重复性和报告样本量 …… 5
4.5　测量的复现性 …… 5
4.6　低噪声技术的应用 …… 6
5　纳米管特性 …… 6
5.1　概述 …… 6
5.2　单壁纳米管 …… 7
5.3　多壁纳米管 …… 7
6　电极 …… 7
6.1　概述 …… 7
6.2　材料 …… 8
6.3　电极制造方法 …… 8
6.4　尺寸 …… 8
7　器件表征 …… 8
7.1　架构设计 …… 8
7.2　加工和制造方法 …… 8
7.3　表征过程的指南 …… 8
8　测量方法与报告 …… 9
8.1　报告要求 …… 9
8.2　电导率、电阻率的测定和报告 …… 9
8.3　载流子迁移率、电荷载流子密度的测定和报告 …… 10
8.4　非线性行为的确定和报告 …… 11
8.5　环境条件报告 …… 11
8.6　其他可报告的参数 …… 12
参考文献 …… 13

粉体圈 www.360powder.com 标准下载

粉体圈 www.360powder.com 标准下载

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。

本文件修改采用IEC 62624:2009《碳纳米管电学特性测试方法》。

本文件与IEC 62624:2009相比做了下述结构调整：

——第1章对应IEC 62624:2009中的1.1；

——增加了第2章规范性引用文件；

——第3章对应IEC 62624:2009中的第2章；

——第4章对应IEC 62624:2009中的1.3，其中4.5.3对应IEC 62624:2009中的1.3.5.2和1.3.5.3；

——第5章对应IEC 62624:2009中的第3章；

——第6章对应IEC 62624:2009中的第4章；

——第7章对应IEC 62624:2009中的5.1、5.2和5.3.1；

——第8章对应IEC 62624:2009中的5.3.2和5.4，其中8.5对应IEC 62624:2009中的5.3.2.5和5.4；

——参考文献对应IEC 62624:2009中的附录A。

本文件与IEC 62624:2009的技术差异及其原因如下：

——删除了IEC 62624:2009中1.2的“目的”，以符合GB/T 1.1—2020的规定；

——将IEC 62624:2009中2.1引导语的第2句话改为注的形式(见3.1)，以符合GB/T 1.1—2020的规定；

——更改了“碳纳米管”的定义(见3.1.1)，使用最新的定义；

——删除了术语“激励端”“激励电压”“接地平台”“开尔文测量”“多壁碳纳米管”“测量端”“单壁碳纳米管”“转移特性”，因为本文件未使用或仅使用了一次这些术语；

——删除了缩略语“NIST”，因为本文件未使用该缩略语；

——增加了缩略语“EMI”和“RFI”，因为本文件在4.6中使用了这两个缩略语(见3.2)；

——将“100 aA(10^{-16} A)”更改为“1 fA(10^{-15} A)”，以符合前文表述逻辑(见4.1)；

——删除了“美国国家标准与技术研究院(NIST)”，增加可操作性，提高本文件的适用性(见4.1)；

——将“<”更改为“≤”，增加可操作性，提高本文件的适用性(见4.3.2)。

本文件做了下列编辑性改动：

——为与现有标准协调，将标准名称改为《纳米技术　碳纳米管电学特性测试方法》；

——增加了条标题(见4.3.1.1、4.5.1、5.1和6.1)；

——删除了资料性附录B，IEC 62624:2009中的附录B不适用于本文件。

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。

本文件由中国科学院提出。

本文件由全国纳米技术标准化技术委员会(SAC/TC 279)归口。

本文件起草单位：深圳市德方纳米科技股份有限公司、国家纳米科学中心、深圳市飞墨科技有限公司、中国科学院上海微系统与信息技术研究所、深圳大学、中国科学院微电子研究所、深圳市德方创域新能源科技有限公司、佛山巧鸾科技有限公司、深圳烯湾科技有限公司、中国计量大学。

本文件主要起草人：孔令涌、王远航、高洁、孙言、黄少真、宋志棠、翟永彪、夏洋、陈小刚、邱志平、金青青、裴现一男、陈心怡、李忻达、刘焕明、车晓东、肖坚、何萌、张淑琴、钟丽坤。

粉体圈 www.360powder.com 标准下载

引　言

本文件旨在提供碳纳米管(CNT)电学特性表征的推荐方法和报告要求。由于碳纳米管的性质,如果操作不当,会引入较大的测量误差。本文件描述了常见的测量误差来源,尤其是碳纳米管电学特性测量常用到的高阻抗测试,并给出了推荐的操作方法,以降低因测量方法不同而带来的影响。随着技术的发展,这些方法将有助于建立一个从研究到制造都可以使用的推荐性报告。

为了使分析报告数据规范化,本文件还给出了报告要求,包括环境条件和样本量的描述,以便研究人员可恰当地评估结果。这些报告要求还支持结果的可重复性分析,以便更有效地确认新的发现。

本文件旨在促进碳纳米管技术从实验室向产业化发展。标准化的表征方法和报告要求为信息的有效比较提供了一种手段,并为生产制造奠定了基础。

粉体圈 www.360powder.com 标准下载

纳米技术　碳纳米管电学特性测试方法

1　范围

本文件描述了碳纳米管电学特性测试方法。

本文件适用于不同工艺路线制备的碳纳米管的电学特性测量。

2　规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3　术语、定义和缩略语

3.1　术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

注：对于本条中未定义的术语参考 IEEE 100。

3.1.1

碳纳米管　carbon nanotube

由碳原子构成的纳米管。

注：通常是由卷曲的碳单层构成，包括单壁碳纳米管、双壁碳纳米管和多壁碳纳米管。

[来源：GB/T 30544.3—2015，4.3]

3.1.2

手性　chirality

分子结构不能与其镜像相重叠的特性。

3.1.3

被测器件　device under test

连接到仪器上，用于评估特定物理特性（如电阻或 I-V 特性）的样品。

3.1.4

环境条件　environmental condition

被测器件周围即时的真实或人造氛围条件。

注：测量时尽可能接近被测器件，并以对测试环境影响最小的方式进行。

3.2　缩略语

下列缩略语适用于本文件。

AC：交流电（alternating current）

AFM：原子力显微镜（atomic force microscope）

CNT：碳纳米管（carbon nanotube）

CVD：化学气相沉积（chemical vapor deposition）

DC：直流（direct current）

DUT：被测器件（device under test）

粉体圈 www.360powder.com 标准下载

EMI:电磁干扰(electromagnetic interference)
FCMV:施加恒流,测量电压法(force current,measure voltage)
FVMC:施加恒压,测量电流法(force voltage,measure current)
ICs:集成电路(integrated circuits)
IEEE:电气与电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers)
MS:测量系统(measurement system)
MWNT:多壁纳米管(multi-wall nanotube)
RFI:射频干扰(radio frequency interference)
RH:相对湿度(relative humidity)
SEM:扫描电子显微镜(scanning electron microscope)
SMU:源测量单元(source-measure unit)
STM:扫描隧道显微镜(scanning tunneling microscope)
SWNT:单壁纳米管(single-wall nanotube)
TEM:透射电子显微镜(transmission electron microscope)

4 电学特性通则

4.1 测试仪器

用于测试的电子器件测试系统应具备高于±0.1%的测量灵敏度(低于预期信号水平3个数量级或以上的最小灵敏度)。例如,通过CNT的最小电流能达到1 pA(10^{-12} A)或更小,则仪器的分辨力应为1 fA(10^{-15} A)或更小。此外,由于在纳米尺度测量时会遇到多种阻抗,测试系统所有元件的输入阻抗应至少比器件的最高阻抗高出3个数量级。具有表征CNT材料和器件功能的商用半导体表征系统,通常具有10^{13} Ω~10^{16} Ω的输入阻抗值。

本测试方法要求根据一组已知且恰当的标准样品对仪器进行校准。仪器校准可由仪器用户执行,前提是按仪器说明书进行校准,或者由仪器供应商提供校准服务。如果不对已知的CNT标准样品或器件进行校准,则应根据可溯源的方法对基本仪器操作(例如,电压、电流和电阻)进行校准。当仪器发生了移动或测试条件发生显著变化时(例如,温度变化大于10 ℃,RH变化大于30%等情况),按仪器说明书对仪器重新校准。

4.2 探测系统

选择能保障数据一致性,且能在不同实验室得到验证的探测系统。选择经证明适用于测试平台的探针。为了减少产生错误数据的可能性,宜遵循相关流程以确保探针不会被污染。探针应存放在没有污染物的环境中,在纳米管表征过程中应按照严格的流程进行处理,以减少污染。

4.3 测量技术

4.3.1 欧姆接触

4.3.1.1 通则

测量时,CNT应处于欧姆接触状态。

半导体行业中,欧姆接触是指金属与半导体之间,产生与施加电压无关的小电阻(这种电阻可用恒定电阻表示)的一种接触。要形成欧姆接触,应选择在界面处不形成势垒(或者势垒非常薄,电荷载流子能很容易穿透势垒)的金属和半导体材料。欧姆接触时流经接触点的电流与接触面的电压降之间存在线性关系。

粉体圈 www.360powder.com 标准下载

当接触点之间的电势差与流经它的电流不成线性关系时，即存在非欧姆接触。非欧姆接触通常被称为整流接触或肖特基接触。由于非线性连接，低压电路中可出现非欧姆接触。

4.3.1.2 检查欧姆接触的建议方法

4.3.1.2.1 改变电源和测量量程

当使用半导体表征系统验证欧姆接触时，改变电源和测量量程能检测到欧姆接触状态。正常情况会显示相同的读数，但相应的分辨力会更高或更低，这取决于仪器是处于上行刻度量程还是下行刻度量程。如果读数明显不同，则可表明处于非欧姆接触状态。注意，非线性行为可归因于器件本身。

4.3.1.2.2 进行一次过零点的 *I-V* 扫描

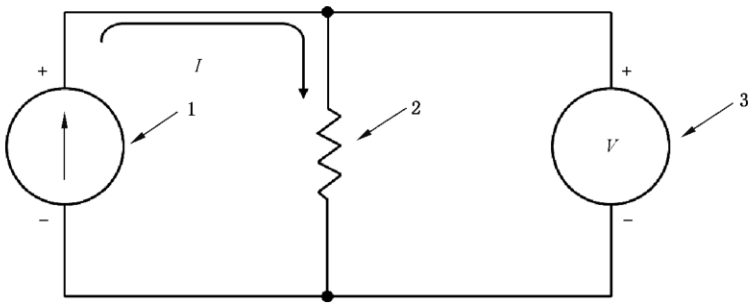
当使用半导体表征系统验证欧姆接触时，进行一次过零点的 *I-V* 扫描是确定欧姆接触的快速测试方法。如果扫描响应过零点，则表示已实现欧姆接触。如果扫描响应没有过零点，则很可能处于非欧姆接触状态，此时显示为高电阻值。扫描响应可是指示开路状态和高电阻状态的水平线，也可是非线性且不过零点的响应，这也表示处于非欧姆接触状态。

4.3.1.3 减少非欧姆接触情况

选用与 CNT 匹配的接触材料（如铟或金）来减少非欧姆接触。选择能减少接触势垒的材料，一般通过匹配材料的功函数来实现。确保仪器上的恒流制输出电压足够高，以避免由于源接触而产生的非线性问题。采用屏蔽和适当的接地措施降低 AC 干扰，以减少由电压表非欧姆接触所产生的误差。

4.3.2 低电阻测量（≤100 kΩ）

当 *I-V* 特性显示电阻不大于 100 kΩ 时，宜使用四线（开尔文）连接方案的 FCMV 表征 CNT 和系统的电学特性。如图 1 所示，电流源提供的测试电流（*I*）通过一组测试导线流经一电阻（*R*），该电阻（*R*）上的电压（*V*）则由另一组导线连接的电压表测量。虽然小部分电流可流经电压表的导线（有时称为测试导线），但流经电压表的电流非常小（通常远小于 1 pA），在实际应用中通常忽略不计。由于测试导线两端的电压降忽略不计，因此测量单元测得的电压与电阻（*R*）上的电压基本相同。注意，电压测试导线宜尽可能靠近 DUT，以避免测量结果包含测试导线的电阻。



标引序号说明：

1——电流源；

2——电阻；

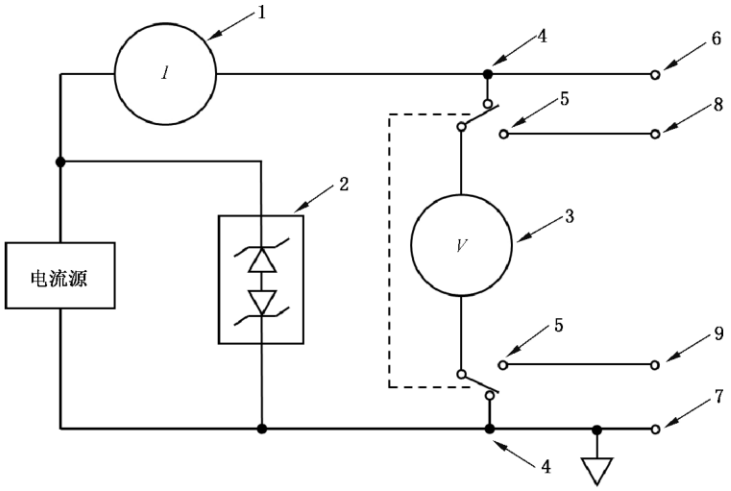
3——电压表。

图 1 低阻抗器件的 FCMV 配置

当 SMU 被配置为电流源时，如图 2 所示，SMU 作为具有电压限制能力的高阻抗电流源，能测量电流或电压。限压电路将输出电压限制为编程值。对于电压测量，检测方式（近端或远端）决定了在何处

粉体圈 www.360powder.com 标准下载

进行测量。近端检测时，在 SMU 的“激励”端和“公共”端测量电压。远端检测时，使用“测量＋”端和“测量－”端能直接测量 DUT 的电压。为了实现真正的四线（开尔文）测量，SMU 宜配置为远端检测，这种检测方法消除了测试导线以及 SMU 或前置放大器与 DUT 之间连接出现的任何电压降。



标引序号说明：

1——电流表；

2——恒流制输出电压；

3——电压表；

4——近端；

5——远端；

6——“激励”端；

7——“公共”端；

8——“测量＋”端；

9——“测量－”端。

图 2　远端检测和近端检测配置

4.3.3　高电阻测量（＞100 kΩ）

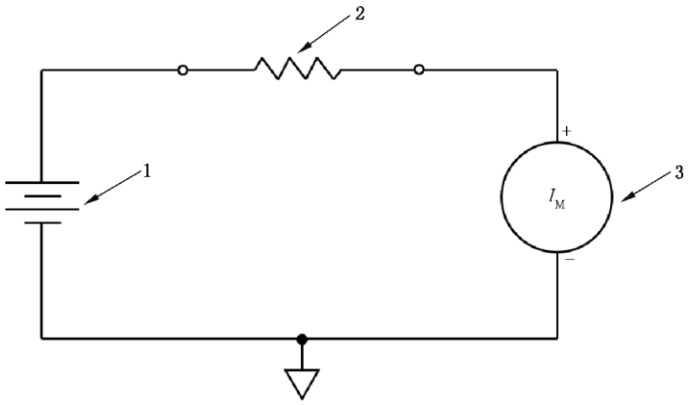
当 *I-V* 特性显示电阻大于 100 kΩ 时，采用 FVMC（也称作“恒压法”）对 CNT 和系统进行电学特性测试。使用 FVMC 进行高电阻测量，需要一个能测量小电流的仪器（见 4.1）和 DC 电压源。FVMC 的基本配置如图 3 所示。

在此方法中，恒压电源（*V*）与未知电阻（*R*）和电流表（I_M）串联。由于电流表两端的电压降忽略不计，因此实际上所有的电压都作用在 *R* 上。产生的电流由电流表测量，通过欧姆定律计算电阻，见公式（1）。

——高阻状态下电阻值可能与所施加电压相关，这使得 FVMC 优于 FCMV。在不同电压下进行测试，能得到电阻与电压的关系曲线，也能确定“电阻的电压系数”。

——当 SMU 配置为电压源时，SMU 作为具有电流限制能力的低阻抗电压源，能测量电流或电压。限流电路将电流限制为编程值。检测电路用于持续监测输出电压，并根据需要对电压源进行调整。电压表可检测“激励”端和“公共”端（近端检测）或 DUT（使用“测量＋”端和“测量－”端的远端检测）的电压，并将其与已编程的电平进行比较。如果检测到的电平和编程值不一致，则相应地调整电压源。远端检测消除了测试导线中电压降的影响，从而确保 DUT 上的电压与编程值一致。

粉体圈 www.360powder.com 标准下载



标引序号说明：

1——电压源；

2——电阻；

3——电流表。

图 3　用于高阻抗测量的 FVMC 配置

4.4　重复性和报告样本量

由于制备工艺的差异，不同器件的性能可能有所不同。此外，确定报告结果的可重复性也很重要。应按以下方式报告样本量：

a）　如果未报告样本量，则假定数据代表的样本量为 1（可能无法代表可重复的结果）；

b）　对于大于 1 的样本量，报告样本量时附带取样方法（写明是对所有器件进行了表征，或是从总样本集中随机抽取一部分等）；

c）　对报告数据所表明的内容（平均值、最大值、最小值、均值、标准偏差等）进行描述。

4.5　测量的复现性

4.5.1　概述

CNT 制造技术生产不同类型的纳米管“束”。用于表征时，单根碳纳米管很难提取。实现理想情况下的单根纳米管测试比较困难。通常，表征时会提取一小束 CNT 并将其放在“检测台”上。对于电学特性表征，检测台可为同一个表面上两个彼此绝缘的接触盘。该表面上的多组接触盘可使 MS 同时测量一系列的纳米管样品并按顺序检测得到测量数据。

使用类似 AFM 的“探针台”和 *I-V* 电学特性仪器对纳米管进行电学特性表征。SEMI E89 中定义了复现性。有一些因素可能影响纳米管的测量结果，及其计算出来的“复现性”。

4.5.2　纳米管 MS 的复现性

纳米管 MS 的复现性能通过测量一些标准样品（非纳米管）的 *I-V* 特性来确定。

4.5.3　多组接触盘表面上对同一批次器件进行多次测量的复现性

目前，对于纳米管而言，实现同一器件的多次测量以验证其复现性比较困难。每束或每根纳米管在测量过程中容易发生形变，进而改变纳米管束的电学特性，因此测量次数 n 限定为 1（即 $n=1$）。

在多组接触盘表面上对同类器件进行多次测量的复现性是能实现的。但单个束群（纳米管数、纳米

粉体圈 www.360powder.com 标准下载

管类型、排列情况、长度等)或单根纳米管之间的差异可能影响报告的结果。

4.5.4 标准样品

由于单个束群或单根纳米管之间存在差异,多组接触盘表面上使用同类器件实现同类 MS 之间的复现性较为困难。使用标准样品确定同类 MS 之间的复现性。因此,建立复现性,有利于纳米管的商业贸易。

以下方面仍有大量工作要做:

a) 标准样品;

b) MS 配置;

c) 提取和固定单根纳米管的技术;

d) 循环试验,以建立实验室内和实验室间的复现性数据。

4.6 低噪声技术的应用

通常,低的绝对偏置电压比高的绝对偏置电压产生的应力效应更小。根据器件结构,通过将 DUT 良好接地可减少漂移。通过低阻抗路径的系统接地可进一步减少漂移。

为了使不同器件结构具有可比性并与其他技术兼容(例如,集成到传统硅 ICs),提供足够的信息,以便确定电场。理想情况下给出明确的电场值。在缺乏已知或未确定几何信息的情况下,提供电压信息的同时,还要说明获取几何数据的困难性。

由于某些材料具有光敏性,所有测量宜在接地良好(安全)的黑箱内进行。如果在光照和黑暗环境中的测量值相差超过 1 %,宜进行光学屏蔽。

由于测量的阻抗高且电流值极低,在 MS 运行期间,宜尽量远离人员、重型机械或其他潜在的 EMI/RFI 源。当测量电压低于 1 mV 或电流值小于 1 μA 时,这一点尤其值得注意。

5 纳米管特性

5.1 概述

测量单根纳米管的特征尺寸存在困难,但这些特征尺寸会影响测得的电学特性结果,因此记录这些尺寸非常重要,宜提供这些特征尺寸的测量值。由于目前尺寸测量仪器在接近最佳性能的情况下运行,测量时宜说明用于获取这些尺寸的技术。

注:在某些情况下,AFM 对纳米管尺寸的测量因其有限的探针尖端半径而变得复杂,并可能引入误差。

尺寸/特性和表征技术如下所示:

a) MWNT 或 SWNT,TEM;

b) 对于 MWNT,指明是同心管还是并排的“绳状”管,TEM;

c) 电极间纳米管的长度, SEM;

d) 外径,TEM,SEM;

e) 内径,TEM;

f) 壁层数量,TEM;

g) 缺陷密度,TEM;

h) 管内端盖密度(竹节状结构),TEM;

i) 手性,STM。

粉体圈 www.360powder.com 标准下载

5.2 单壁纳米管

5.2.1 加工和制造方法

报告 SWNT 的制造工艺(例如,一氧化碳歧化、CVD、激光烧蚀、电弧等方法),以及任何生长后的化学纯化、解聚、化学衍生等处理方法,或结构分类的描述。

5.2.2 结构

尽可能详细地报告 SWNT 的结构。这些信息可包括以下内容:

a) 纳米管的长度;
b) 纳米管的直径;
c) 纳米管的手性。

5.2.3 其他性质

宜报告其他特性,如管填充、管端开口或闭口、化学衍生化程度等。

5.3 多壁纳米管

5.3.1 加工和制造方法

报告 MWNT 的制造工艺(例如,CVD、激光烧蚀、电弧等方法),以及任何生长后的化学纯化、解聚、化学衍生等处理方法,或结构分类的描述。

5.3.2 结构

尽可能详细地报告 MWNT 的结构。这些信息可包括以下内容:

a) 管壁的层数;
b) 纳米管的长度;
c) 纳米管的外径。

5.3.3 其他性质

宜报告其他特性,如管填充、管端开口或闭口、化学衍生化程度等。

6 电极

6.1 概述

宜报告电极的设计和制造方法,如电子束沉积、聚焦离子束沉积、图案化气相沉积金属、CNT 在测试触点的放置、电学特性表征系统探针尖端、自组装等。除了电极之外,电极和纳米管之间的界面(在本文件中称为接合点)宜有以下描述:

a) 与电极接触的纳米管的长度;
b) 与电极接触的纳米管的宽度;
c) 纳米管和电极之间接合点的厚度;
d) 接合点的成分;
e) 接合点的制造技术(若接合点不是电极制造时产生的)。

粉体圈 www.360powder.com 标准下载

6.2 材料

宜报告电极材料的成分［例如，金(Au)］。

6.3 电极制造方法

宜报告电极制造的以下信息：

a) 电子束沉积工艺参数；
b) 聚焦离子束沉积工艺参数；
c) 气相沉积工艺参数；
d) 电极制造前的基材组成和表面特性；
e) 电极制造前后的基材表面处理方法；
f) 电极制造步骤之间所有的表面处理方法，包括使用的化学、机械或任何其他增强处理方法。

6.4 尺寸

报告电极的尺寸。至少报告以下几何信息：

a) 电极的长度，l［以厘米(cm)、微米(μm)或纳米(nm)为单位］；
b) 电极的宽度，w［以厘米(cm)、微米(μm)或纳米(nm)为单位］；
c) 电极的厚度，t［以厘米(cm)、微米(μm)或纳米(nm)为单位］。

7 器件表征

7.1 架构设计

应报告器件的结构，包括器件的几何结构、电极位置等。至少报告以下几何信息：

a) 第一电极与衬底的关系(足以再现试验的描述)；
b) 第二电极与衬底的关系(足以再现试验的描述)；
c) 第一电极和第二电极之间的距离。

7.2 加工和制造方法

报告制造二端元件的以下信息：

a) 衬底组分；
b) 制造过程；
c) 器件制造步骤之间所有的表面处理方法，包括化学、机械化或使用的其他增强处理方法。

7.3 表征过程的指南

按照以下方式进行选择。

a) 步长足够小，每条曲线至少有 10 个数据点，25 个或更多数据点更好。数据点数量的增加能够得到更精确的拟合曲线和更大的噪声/离群值公差，因此参数提取更精确。以清晰的方式报告每次测量使用的点数(例如，起始值、终止值、步长值和测量的点数等)。
b) 数值能反映完整的预期工作范围和/或展示完整的器件工作范围。
c) 所选数值的范围能准确代表完整的器件工作范围。选择这些数值是为了在完整的预期工作范围内展现器件行为。
d) 每个电极使用一个探针，另外加一个与衬底(“块体”)电接触的屏蔽接地平台连接。如果任一沟道的测量电阻不大于 100 kΩ，则每个电极使用两个探针(一个是用于施加电流的“激励”电

粉体圈 www.360powder.com 标准下载

极，另一个是用于测量电压的“测量”电极）以最小化电极和界面阻抗误差（见 4.3.2）。

8 测量方法与报告

8.1 报告要求

按表 1 报告二端元件的信息。

表 1 二端元件的电学特性参数列表

特性	标准符号	单位
电导率	σ	S/cm
电阻率	ρ	Ω·cm
载流子迁移率	μ	$cm^2/(V \cdot s)$
电荷载流子密度	N	cm^{-3}
电子载流子密度	n	cm^{-3}
空穴载流子密度	p	cm^{-3}
二极管饱和电流	I_S	A

8.2 电导率、电阻率的测定和报告

按以下两种方法测量电导率及电阻率。

a) FCMV（见 4.3.2），对样品施加恒定且已知的电流密度 J，测量产生的电场 E。通常，FCMV 用于电阻远小于 100 kΩ 的样品，对于电阻小于 1 kΩ 的样品应使用四线（开尔文）法进行测量。四线（开尔文）法使用不同的接触点进行施加电流和测量电势差，其中施加电流的接触点位于样品的外边缘。

b) FVMC（见 4.3.3），在样品上施加已知的恒定电场 E，测量流经样品的电流密度 J。FVMC 用于表征电阻大于 10 MΩ 的样品，不适用于电阻小于 1 kΩ 的样品。FVMC 仅使用两个接触点，分别位于被测样品的两端。

电导率和/或电阻率根据欧姆定律推导，如公式（1）所示：

$$J = \sigma E = \frac{E}{\rho} \qquad \cdots\cdots (1)$$

式中：

J ——电流密度，单位为安培每平方厘米（A/cm^2）；

σ ——电导率，单位为西门子每厘米（S/cm）；

E ——电场强度，单位为伏特每厘米（V/cm）；

ρ ——电阻率，单位为欧姆厘米（Ω·cm）。

按公式（2）计算电流密度：

$$J = I/A \qquad \cdots\cdots (2)$$

式中：

J ——电流密度，单位为安培每平方厘米（A/cm^2）；

I ——电流，单位为安培（A）；

A ——样品的横截面积，单位为平方厘米（cm^2）。

粉体圈 www.360powder.com 标准下载

注：对于纳米管，其横截面积可能难以定义，因此电流密度、电导率和电阻率可能需要特殊的定义。在这些情况下，提供几何的定义。

按公式(3)计算电场强度：

$$E = V/L \qquad \cdots\cdots(3)$$

式中：

E ——电场强度，单位为伏特每厘米(V/cm)；

V ——两个电压探针之间的电势差，单位为伏特(V)；

L ——两个电压探针之间的距离，单位为厘米(cm)。

对于具有基本线性行为的二端元件，应报告电导率或电阻率的测量结果。这些测量还需要与二端元件进行欧姆接触(见 4.3.1)。如果二端元件明显是非线性的，则通常无法推导出器件的电导率和电阻率数据。

对于半导体或绝缘样品，通常报告其电导率。对于金属样品，通常报告其电阻率。

8.3 载流子迁移率、电荷载流子密度的测定和报告

载流子迁移率 μ 和电荷载流子密度 N 可通过霍尔效应确定。在霍尔效应测量中，在二端元件的 x 轴方向施加已知的电流密度 J_x，在 z 轴方向上施加已知的磁场 B_z，然后在二端元件 y 轴方向上测量霍尔电场 E_y。按公式(4)计算传导电子的数量：

$$N = \frac{J_x B_z}{q E_y} \qquad \cdots\cdots(4)$$

式中：

N ——电荷载流子密度，单位为每立方厘米(cm^{-3})；

J_x ——x 轴方向的电流密度，单位为安培每平方厘米(A/cm^2)；

B_z ——z 轴方向上施加的磁场，单位为高斯(G)；

q ——单个电子的电荷量，1.602×10^{-19} C；

E_y ——y 轴方向中的霍尔电场，单位为伏特每厘米(V/cm)。

N 的符号决定于传导过程中是电子还是空穴占主导地位，如果空穴占主导地位，则 N 为正，如果电子占主导地位，则 N 为负。

N 与电导率 σ 结合(见 8.2)可得出载流子迁移率，按公式(5)计算载流子迁移率：

$$\mu = \frac{\sigma}{Nq} \qquad \cdots\cdots(5)$$

式中：

μ ——载流子迁移率，单位为平方厘米每伏特秒[$cm^2/(V\cdot s)$]；

σ ——电导率，单位为西门子每厘米(S/cm)；

N——电荷载流子密度，单位为每立方厘米(cm^{-3})；

q ——单个电子的电荷量，1.602×10^{-19} C。

需要注意的是，公式(5)中给出的载流子迁移率不同于场效应器件[例如场效应晶体管(FET)]中测量的场效应迁移率。场效应迁移率受各种器件参数的影响，通常与载流子迁移率有显著偏差。

8.4 非线性行为的确定和报告

适用于存在整流行为的非线性二端元件。

对于紧密接触的 p 型和 n 型半导体的 p-n 结，可使用肖克莱方程(也称为理想二极管定律)将反向偏置饱和电流与载流子迁移率相关联，如公式(6)所示：

$$I_S = A k_B T \left(\frac{C_{ep}\mu_{ep}}{L_{ep}} + \frac{C_{hn}\mu_{hn}}{L_{hn}} \right) \qquad \cdots\cdots(6)$$

粉体圈 www.360powder.com 标准下载

式中：

I_S ——反向偏置饱和电流，单位为安培(A)；

A ——器件的横截面积，单位为平方厘米(cm^2)；

k_B ——玻尔兹曼常数，1.381×10^{-23} J/K；

T ——温度，单位为开尔文(K)；

C_{ep} ——每个半导体区域中 p 型电子载流子密度，单位为每立方厘米(cm^{-3})；

μ_{ep} ——p 型电子载流子迁移率，单位为平方厘米每伏特秒[$cm^2/(V\cdot s)$]；

L_{ep} ——p 型电子扩散长度，单位为厘米(cm)；

C_{hn} ——每个半导体区域中 n 型空穴载流子密度，单位为每立方厘米(cm^{-3})；

μ_{hn} ——n 型空穴载流子迁移率，单位为平方厘米每伏特秒[$cm^2/(V\cdot s)$]；

L_{hn} ——n 型空穴扩散长度，单位为厘米(cm)。

对于金属半导体结(形成肖特基接触)，按公式(7)计算反向偏置饱和电流：

$$I_S = ABT^2 e^{-\frac{\phi_M-\phi_S}{k_B T}} \qquad \cdots\cdots(7)$$

式中：

I_S ——反向偏置饱和电流，单位为安培(A)；

A ——器件的横截面积，单位为平方厘米(cm^2)；

B ——常数值；

T ——温度，单位为开尔文(K)；

e ——自然对数的底数；

ϕ_M ——金属的功函数；

ϕ_S ——半导体的功函数；

k_B ——玻尔兹曼常数，1.381×10^{-23} J/K。

二端整流器件的电流-电压关系(I-V)如公式(8)所示：

$$I(V) = I_S\left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1\right) \qquad \cdots\cdots(8)$$

式中：

$I(V)$——器件电流，单位为安培(A)；

I_S ——反向偏置饱和电流，单位为安培(A)；

e ——自然对数的底数；

q ——单个电子的电荷量，1.602×10^{-19} C；

V ——器件电压，单位为伏特(V)；

k_B ——玻尔兹曼常数，1.381×10^{-23} J/K；

T ——温度，单位为开尔文(K)。

8.5 环境条件报告

器件存储和表征过程中的环境条件应与所有电学特性数据一起报告。

器件存储的环境条件会显著影响器件性能，应报告器件从制造到测量期间的存储条件。存储和测试环境的变化可导致器件性能的显著变化，为了更好地比较或验证数据，应详细记录器件从制造到表征过程的存储和测量环境。

对器件测量时，应监测并记录环境条件，至少记录每次实验开始和结束时的环境条件。宜实时记录环境状况，并记录每个数据点。

应监测和记录以下环境条件：

a) 测量气氛(例如，空气、氮气、真空等)；

粉体圈 www.360powder.com 标准下载

b) 光照条件和光照时间(例如,黑暗、紫外线隔绝情况等),以及光照条件的变化,例如,在曝光后和电学特性测量之前将样品放置在黑暗环境中的时长;
c) 器件温度(测量分辨力至少为 1 ℃或 1 K,宜为 0.1 ℃或 0.1 K);
d) RH(最小分辨力为 5 %,宜为 1 %);
e) 测量持续时间、测量时间(以帮助评估由于长寿命效应而导致的测量失真)。

8.6 其他可报告的参数

表 2 列出了能与电学特性数据一起报告的其他参数。报告这些参数应使用表 2 所示的术语、符号和单位。

表 2 其他可报告的非电学特性参数

特性		标准符号	单位
热性能	导热系数	K	mW/(cm·K)或 W/(m·K)
	塞贝克系数	S	μV/K
机械性能	抗拉强度	σ_{uts}	GPa
	杨氏模量	E	GPa

粉体圈 www.360powder.com 标准下载

参 考 文 献

[1] GB/T 30544.3—2015 纳米科技 术语 第3部分:碳纳米物体

[2] IEEE 100 The authoritative dictionary of IEEE standards terms, Seventh Edition

[3] SEMI E89 Guide for measurement system analysis (MSA)

粉体圈 www.360powder.com 标准下载