

纤维器件及其阵列电学测试方案详解

纤维器件电学测试内容

一、输出电压与输出电流测试

测试目的：

- 评估纤维电学器件的电能输出能力，判断其性能优劣，以便筛选出性能更优的器件。
- 指导材料和结构设计，通过测试结果反馈器件的材料特性和结构合理性，为优化提供依据。
- 确定器件在实际应用中的驱动能力，确保能满足为其他电子设备或系统提供电能或信号驱动的要求。
- 用于故障诊断和可靠性分析，实时监测参数变化，及时发现器件故障并评估其在不同工作条件下的可靠性。

二、电导率测试

测试目的：

- 判断纤维电学器件导电性能优劣，确定其是否符合设计要求和应用需求，如电磁屏蔽、可穿戴电极等应用对导电性能有特定要求。
- 分析材料的均匀性，若电导率在不同部位或批次间差异大，提示材料均匀性差，有助于生产过程质量控制。
- 指导材料研发与改进，筛选合适材料并优化材料配方和制备工艺，通过研究电导率与材料参数、工艺条件的关系找到最佳方案。

三、电阻测试

测试目的：

- 了解纤维电学器件的电阻大小，以便评估其在电路中的电流通过情况、电能损耗情况，以及在不同应用场景下的功耗、发热情况和适配性等。

四、响应速度测试

测试目的：

- 确定纤维电学器件对输入信号（如光照、温度变化、外力作用等）的响应快慢程度，满足一些需要快速反应的应用场景，如传感器在实时监测中的应用要求。

五、阵列测试

测试目的：

- 对于组合成阵列形式的纤维器件来说，一需要进行性能评估，确定单个纤维器件的各项性能参数并掌握阵列整体性能；二需要实现质量控制，筛选出不合格器件，把控生产工艺稳定性；三需要完成功能验证，检验设计功能实现情况以及是否适配应用场景需求。

纤维器件电学测试方法

一、输出电压测试方法

- 使用电压表或 SMU 源表等测试设备（如数字多用表的电压测量档等）。将电压表的探头与纤维电学器件的两个输出电极相连接，确保连接牢固且接触良好，以减少接触电阻对测量结果的影响。
- 当纤维电学器件处于工作状态（如受到特定刺激，像压电纤维器件受到外力作用、光电器件受到光照等）或在特定的电路环境下运行时，电压表会实时显示出器件两端的电位差，即输出电压值。例如，在测试基于压电效应的纤维传感器输出电压时，将传感器安装在相应的测试装置上，对其施加已知大小和频率的压力，同时用高精度数字电压表连接传感器输出电极，直接读取电压表上显示的电压数值，该数值即为传感器在该压力作用下的输出电压。

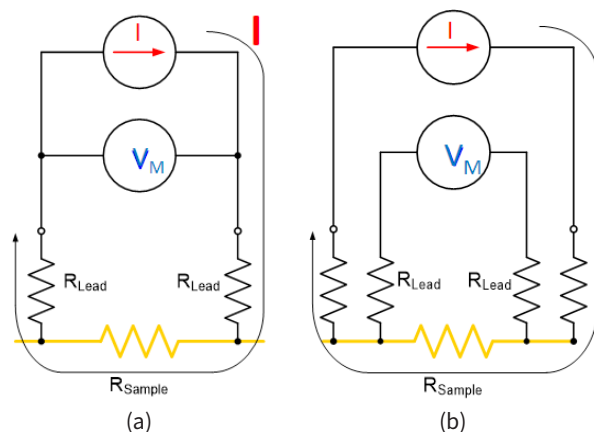
二、输出电流测试方法

- 采用电流表或 SMU 源表来进行测量。将电流表与纤维电学器件的电路进行串联连接，即让电流从电源流出后，先经过电流表，再通过纤维电学器件，最后回到电源形成完整回路。这样，通过电流表的电流就是纤维电学器件的输出电流。
- 在选择电流表时，要根据预计的电流大小选择合适量程的电流表，以确保测量的准确性和安全性。例如，对于输出电流较小的纤维基微电流传感器，可能需要选用微安表甚至纳安表进行测量；而对于一些功率较大的纤维电学器件，如纤维状加热元件等，需要毫安表或安培表来测量其输出电流。在测试纤维状太阳能电池的输出电流时，将合适量程的电流表与太阳能电池的电路串联，在太阳能电池受到光照产生电能输出时，电流表就能测量到相应的输出电流值。

三、电导率测试方法

二探针法：

- 需要准备两个探针、电源、电压表或者 SMU 源表以及用于固定和连接器件的装置等。将两个探针与纤维电学器件紧密接触，其中一个探针连接电源的正极，用于向器件提供电流；另一个探针连接电压表的正极，电压表的负极连接电源的负极。或者使用 SMU 源表的两探针直接连接器件两端，通过设置源表的输出和测量项目来进行电压电流测试。
- 通过电源向器件施加一定的直流电流，同时用电压表测量在电流通过器件时，探针两端的电压降。根据欧姆定律先计算出器件在两探针之间的电阻值。然后结合器件在两探针之间的长度、横截面积等几何尺寸信息，利用电导率公式计算出纤维电学器件的电导率。但这种方法存在接触电阻的影响，对于低电导率或高电阻的材料，测量误差可能较大。



二线法与四线法

四探针法：

- 相较于二探针法，四探针法需要额外准备两个探针。将四个探针按照一定的顺序排列并与纤维电学器件紧密接触，通常是外侧两个探针用于提供电流，内侧两个探针用于测量电压。例如上图 b，将最左边和最右边的探针分别连接电源的正极和负极，以提供稳定的直流电流通过器件；中间两个探针则分别连接电压表的正极和负极，用于测量电流通过器件时中间部分的电压降。
- 同样根据欧姆定律先计算出中间部分的电阻值，再结合器件相应的几何尺寸信息，利用电导率公式计算电导率。四探针法通过将测量回路和电流回路分开，有效地消除了接触电阻对测量结果的影响，因此能够更准确地测量纤维电学器件的电导率，尤其适用于对电导率测量精度要求较高的情况，如在研发高性能导电纤维材料时经常采用。

四、电阻测试方法

- 将万用表置于电阻测量档，根据纤维电学器件的大致电阻范围选择合适的量程。如果不确定器件的电阻范围，可以先从较大量程开始测量，然后根据测量结果逐步调整到合适的量程，以提高测量精度。
- 把万用表的两个表笔与纤维电学器件的两端相连接，确保连接紧密且接触良好。连接好后，万用表会显示出器件的电阻值。例如，在测试纤维状加热元件的电阻时，将万用表置于电阻测量档，选择合适量程后，用表笔连接加热元件的两端，万用表上显示的数值就是加热元件的电阻值，通过该电阻值可以根据焦耳定律计算出加热元件的发热功率等相关参数。

六、耐久性测试方法

针对不同器件特性的模拟测试法：

对于可充电纤维电学器件（如纤维状锂离子电池）：

- 设置充放电循环测试设备，包括电源、充放电控制器、电压表、电流表等。将纤维状锂离子电池连接到充放电循环测试设备上，按照预定的充放电倍率、温度等条件进行多次充放电循环操作。
- 在每次充放电循环过程中，使用电压表和电流表分别测量电池的输出电压、输出电流等参数，并记录下来。同时，还可以通过其他专业设备（如电池容量测试仪等）测量电池的容量变化情况。通过分析这些参数在多次充放电循环后的变化情况，评估电池在长期使用过程中的耐久性和性能保持情况。

对于可穿戴纤维电学器件（如用于健康监测的压电纤维传感器等）：

- 搭建模拟人体运动的测试装置，例如可以使用机械臂、振动台等设备来模拟人体不同部位的运动状态（如手腕的摆动、胸部的呼吸运动等）。将可穿戴纤维电学器件安装在模拟人体运动的测试装置上。
- 在模拟人体运动过程中，使用电压表、电流表等测量仪器测量器件的输出电压、输出电流等参数，并实时监测其电学性能指标的变化情况。通过分析这些参数在模拟人体运动过程中的变化情况，评估器件在承受人体日常活动产生的机械应力条件下的耐久性和性能保持情况。

七、响应速度测试方法

针对不同输入信号的快速变化测试法：

对于基于光电效应的纤维电学器件：

- 使用高速示波器、光照强度控制设备等搭建测试环境。首先将纤维电学器件连接到测试环境中，使其处于正常工作状态。然后通过光照强度控制设备快速切换光照条件，例如从强光突然切换到弱光或反之。
- 在光照条件快速变化的同时，使用高速示波器测量器件从接收到光照变化到产生相应输出电压或电流变化的时间间隔。高速示波器可以精确记录下这一过程中的电压或电流波形变化，通过分析波形变化的起始点和终点，确定器件的光电响应速度。

对于基于压电效应的纤维电学器件：

- 使用高速示波器、外力施加设备等搭建测试环境。将纤维电学器件安装在测试环境中，使其处于正常工作状态。然后通过外力施加设备快速施加变化的外力，例如从无外力突然施加到一定大小的压力或反之。
- 在施加外力快速变化的同时，使用高速示波器测量器件从接收到外力变化到产生相应输出电压或电流变化的时间间隔。通过分析波形变化的起始点和终点，确定器件的压电响应速度。

八、阵列测试方法

器件逐一手动测量

- 对于阵列的测试内容，与单个器件测试类似。对于阵列的测试，除了需要确定单个纤维器件的各项性能参数，还需要掌握阵列整体性能。对于单个纤维器件的各项性能参数评估：需要进行逐一的行列测试，并且更换不同的仪器来测不同的参数。但对于阵列整体性能的掌握，无法使用单一仪器完成。并且该方法繁琐复杂，测试效率低下，耗时长。

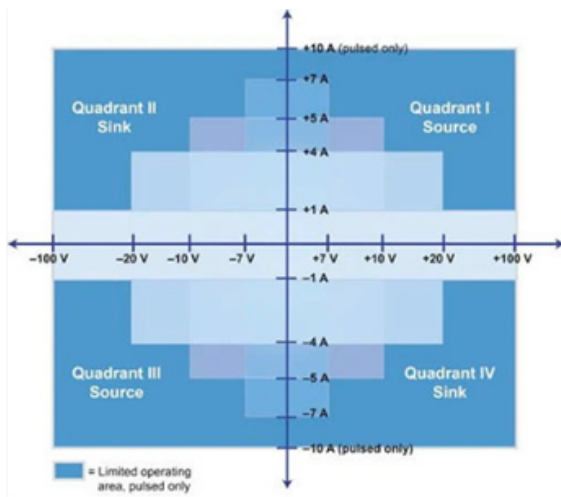
矩阵开关自动切换快速测量

- 对于器件阵列，开关型源表是合适的选择。此类源表内部的开关元件能够快速地进行导通和截止切换，从而实现对输出信号的快速调节，这使得开关型源表可以在短时间内完成不同电压、电流条件的切换，提高测试效率，并且能够模拟被测器件在实际工作中的动态电学环境，如脉冲信号、瞬态信号等。而且开关型源表的多通道支持一个表就可以同时测试多个行与列，实现器件阵列的完整性测试，以评估器件阵列的整体性能。

纤维器件电学测试方案

吉时利作为小信号测量的鼻祖，拥有丰富的产品线可供测试选择，助力纤维器件电学测试。

SMU 源表系列从 2400 到 2600 系列具有高精度 10nV 电压 0.1fA 电流测试，具备分析仪、曲线追踪仪和 I-V 系统功能，成本更低。它提供高度灵活的 4 象限电压和电流源 / 载荷，以及精密的电压和电流仪器。这个一体化仪器可以用作：精密电源，具有电压和电流回读功能；真正电流源；数字多用表、测量直流电压、电流、电阻和功率，分辨率 $6\frac{1}{2}$ 数位；精密电子载荷；触发控制器。



3706A 型系统开关带有高性能数字万用表，包含用于插卡的六个插槽，采用紧凑型 2U 高的机箱，可以轻松满足中高通道数应用的需求。满载情况下，主机最多可支持 576 条双线多路复用器通道，实现无与伦比的密度和低廉的每通道成本。可以实现纤维器件阵列测试，并且还可以同时对阵列进行不同参数性能的评估。因此，这是一个紧密集成的开关和测量解决方案，既适用于工作台也适用于机架。



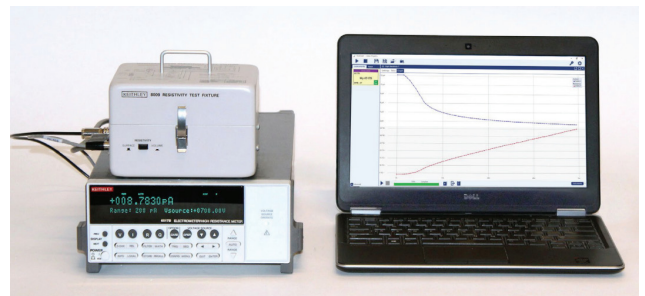
双通道 2182A 型纳米电压表经过优化，可进行稳定、低噪声的 nA 级别电压测量，并可靠、可重复地表征低电阻材料和器件。与其他低压测量解决方案相比，它提供更高的测量速度和明显更好的噪声性能。它提供简化的 delta 模式，可用于与反向电流源（如 6220 或 6221 型）结合进行电阻测量。

6220 型直流电流源和 6221 型交流直流电流源兼具易用性和极低电流噪声的特点。低电流源对于从研发到生产的测试环境中的应用至关重要。6220 和 6221 型具有高源精度和内置控制功能，非常适合霍尔测量、使用增量模式的电阻测量、脉冲测量和差分电导测量等应用。

Keithley 6400 系列皮安表可以测量 10fA 至 20mA 的电流，速度高达每秒 1000 个读数。6487 型皮安表 / 电压提供比 6485 更高的精度和更快的上升时间、一个 500V 源以及一种与电容设备配合使用的阻尼功能。6482 型双通道皮安表 / 电压源提供比 6485 型或 6487 型更高的测量分辨率和双独立 30V 电压偏置源。



Keithley 6517B 静电计 / 高阻表是全球科研实验室灵敏测量的标准。6517B 把吉时利数十年的弱电测量技术知识融汇到创新的低电流输入放大器中，输入偏置电流 <3fA，噪声仅 0.75fA_{p-p}，最低电流范围上压降 <20μV。对近似理想的电路负荷，电压电路输入阻抗超过 200TΩ。这些指标保证了所需的准确度和灵敏度，可以在物理、光学、纳米科技和材料科学等领域准确地进行低电流和高阻抗电压、电阻和电荷测量。内置 ±1kV 电压源拥有扫描功能，简化了绝缘材料上的漏流、击穿和电阻测试及体电阻率 (W-cm) 和表面电阻率 (W/square) 测量工作。



DMM7510/6500 集高精度、高分辨率数字万用表 (DMM)、图形触摸屏显示器和高速、高分辨率数字化器于一身，是一款图形采样万用表。DMM7510 具有低噪声输入级和 32 位 A-D 转换器，体现了 Keithley 的低电平测量专长，能提供通常只有计量级仪器才有的直流精度。高灵敏度可让 DMM7510 测量非常低的电压、电流和电阻，并检测微小变化和信号漂移。



Keithley 4200 是一种可以量身定制、全面集成的参数分析仪，提供同步电流电压曲线测试 (I-V 曲线测试)、电容 - 电压曲线测试 (C-V 曲线测试) 和超快脉冲 I-V 曲线测量。其直流电流为 10 aA - 1A 范围，电压为 0.2 μ V - 210V 范围，满足水凝胶多种应用场景的不同性能测试。

为何选择吉时利？

一、高精度的微弱信号测量能力：

低电流测量优势：在纤维电学器件中，有时需要测量非常微弱的电流，比如纳米纤维材料的导电性能测试、纤维状传感器的微弱信号检测等。吉时利的静电计系列产品，如吉时利 6517b，能够测量低至飞安 (10^{-15} A) 级别的电流，具有极高的灵敏度和极低的噪声水平，可以准确地捕捉到纤维电学器件中极其微弱的电流信号，确保测量结果的准确性和可靠性。这对于研究纤维电学器件在低电流条件下的性能和特性非常重要。

高阻抗测量能力：纤维材料或纤维器件可能具有很高的阻抗 (200T 欧姆)，吉时利的设备能够提供高输入阻抗的测量模式，可以有效减少测量过程中对被测对象的影响，准确测量高阻抗的纤维电学器件的电阻、电容等参数，对于分析纤维材料的绝缘性能、电荷存储能力等特性具有重要意义。

二、快速的测量速度和高效的数据处理能力：

快速测量：在纤维电学器件的研发和生产过程中，需要对大量的样品进行测试。吉时利的设备具有快速的测量响应速度，可以在短时间内完成对纤维电学器件的各项参数测量，提高测试效率。例如，在纤维状太阳能电池的性能测试中，能够快速测量不同光照条件下的电流、电压等参数，为评估电池的效率提供快速准确的数据支持。

强大的数据处理：吉时利的设备通常配备了功能强大的数据处理系统以及上位机软件 KickStart，可以实时对测量数据进行分析、处理和存储。例如，能够自动计算纤维电学器件的各种电学参数，如电阻、电容、电感等，并生成相应的曲线和图表，方便用户直观地了解器件的性能。同时，设备还支持数据的导出和共享，便于用户进行进一步的数据分析和处理。

三、灵活的配置和广泛的适用性：

丰富的产品线：吉时利拥有丰富的产品线，包括数字源表 SMU、数字万用表、静电计、半导体参数分析仪等多种类型的设备，可以满足纤维电学器件不同方面的电学测试需求。无论是对纤维材料的基本电学参数测量，还是对纤维器件的复杂性能测试，都能找到合适的吉时利设备进行测试。

可定制化测量：吉时利的设备支持用户根据自己的需求进行定制化测量。例如，通过编写脚本或使用特定的软件，可以设置不同的测量参数、测试序列和数据处理方式，满足纤维电学器件特殊的测试要求。这种灵活的配置能力使得吉时利的设备能够适应各种复杂的测试场景，为用户提供个性化的测试解决方案。

四、可靠的稳定性和耐用性：

稳定的性能：纤维电学器件的测试可能需要在不同的环境条件下进行，如温度、湿度、振动等。吉时利的设备具有良好的稳定性，能够在各种复杂的环境条件下保持准确的测量性能，确保测试结果的可靠性。例如，在高温环境下对纤维状的电子元件进行测试时，吉时利的设备仍然能够稳定地工作，准确测量元件的电学参数。

耐用的设计：设备的外壳和内部电路设计坚固耐用，能够承受长时间的使用和频繁的操作。这对于纤维电子器件的研发和生产过程中需要频繁进行测试的情况非常重要，可以降低设备的维护成本和使用成本，提高设备的使用寿命。

阵列测试方案：纤维阵列是纤维器件发展的一大方向，所以纤维阵列的测试也变得越发重要，使用常见设备能够完成阵列里单一器件的评估，但不能完成阵列整体性能的评估。Keithley 的开关型多通道 3706A 源表就是在该应用上很好的一个方案，使用该设备可以在保证测试精度的条件下，又高效、准确、直观的评估纤维阵列的性能，为纤维器件的研发节省了时间和成本。

纤维器件是什么

纤维器件是一种以纤维为基础结构形态的功能性元件。

结构形态

呈现纤维状，有着细长的外观，直径通常较为细小，长度则根据具体设计和应用需求可长可短。其形状可以是笔直的，也能被加工成具有一定弯曲度或柔韧性的样式，以便更好地适配不同的使用环境和集成要求。

材料构成

- **高分子材料：**像聚酯、聚酰胺等高分子聚合物常被用于纤维器件的制备，这些材料可赋予纤维良好的可加工性、柔韧性以及一定的机械性能，使其易于成型且能承受一定程度的外力作用。

- **无机材料：**例如玻璃纤维中的二氧化硅等无机成分，能够提供较好的耐高温、高强度等特性，适用于一些对环境耐受性要求较高的场景，如在高温环境下工作的工业部件。
- **复合材料：**往往是将不同特性的材料复合在一起，比如把导电材料与高分子纤维复合，让纤维器件在具备基本纤维形态和机械性能的同时，还拥有了导电等特殊功能，以满足多样化的应用需求。

常见类型及功能

- **纤维传感器：**能够对周围环境中的物理量（如温度、压力、应变等）或化学量（如特定气体、酸碱度等）产生响应，将这些外界刺激转化为可测量的电信号、光信号等，从而实现检测和监测功能。例如在航空航天领域，用纤维应变传感器监测飞行器结构部件在飞行过程中的受力变形情况。
- **纤维光电器件：**包含纤维发光二极管、纤维光电探测器等。纤维发光二极管可实现发光功能，应用于照明、显示等方面；纤维光电探测器则能接收光信号并进行相应的光电转换，常用于光通信、光学成像等领域。
- **纤维电极：**作为电极使用，主要起到导电、传输电信号的作用，在电池、电化学传感器以及生物电信号采集（如心电图、脑电检测）等方面有着重要应用，凭借其纤维的柔软特性，可更好地贴合物体表面进行电信号传导。

纤维器件的特点

柔性可弯曲：

纤维器件的主体结构是纤维状，这使其具备出色的柔韧性和可弯曲性，能够适应各种复杂的形状和弯曲的应用场景。例如，可以轻松地贴合人体的曲线，用于可穿戴电子设备中，如智能手环、智能服装等，不会给使用者带来僵硬的束缚感，保证了穿戴的舒适性。而且在一些特殊的应用场景，如弯曲的管道内部监测、可折叠的电子设备中，纤维器件的这种特性能够发挥重要作用，实现传统刚性器件无法完成的功能。

轻质便携：

纤维材料本身密度较小，使得纤维器件重量轻，便于携带和使用。这对于一些对重量有严格要求的应用场景非常重要，比如航空航天领域，轻质的纤维器件可以减轻飞行器的负载，降低能源消耗；在户外运动装备中，轻便的纤维器件可以让使用者更加轻松地携带和操作相关设备，不会给使用者造成额外的负担。

一维结构及可编织性：

纤维器件呈一维的细长结构，这种结构特点使其可以像普通纤维一样进行编织。通过编织技术，可以将纤维器件集成到织物中，形成智能纺织品，实现多种功能的集成，如同时具备传感、能量存储、能量转换等功能。并且，编织后的纤维器件具有较大的表面积，有利于与外界环境进行充分的接触和交互，例如在传感器应用中，能够更灵敏地感知外界的物理量变化。

良好的生物相容性（部分）：

一些纤维器件采用生物相容性良好的材料制备，如用于生物医学领域的纤维器件，可以与人体组织相兼容，不会引起免疫反应或其他不良反应。这类纤维器件可以用于植入式医疗设备，如神经刺激器、心脏起搏器的电极等，能够长期稳定地在体内工作，为医疗诊断和治疗提供支持。

多功能集成性：

纤维器件可以通过不同的材料选择、结构设计和制造工艺，实现多种功能的集成。例如，将导电材料与纤维结合，可以制备出具有导电功能的纤维器件，用于电子信号的传输和处理；将发光材料与纤维结合，可以制备出发光纤维器件，用于显示和照明；将传感材料与纤维结合，可以制备出能够感知温度、压力、湿度等物理量的纤维传感器。

高表面积体积比：

纤维的细长形状使其具有较高的表面积体积比。这意味着纤维器件与周围环境的接触面积相对较大，在能量转换、传感等应用中，能够更高效地进行物质交换、电荷传输等过程，从而提高器件的性能和效率。例如，在纤维太阳能电池中，高表面积体积比可以增加对太阳光的吸收和转换效率。

耐用性和稳定性：

纤维器件通常具有较好的耐用性和稳定性。纤维材料本身具有一定的机械强度和韧性，能够承受一定程度的拉伸、弯曲和摩擦等外力作用，不易损坏。同时，经过合理的设计和制造工艺，纤维器件的性能在不同的环境条件下能够保持相对稳定，如在温度、湿度等变化的情况下，仍能正常工作。

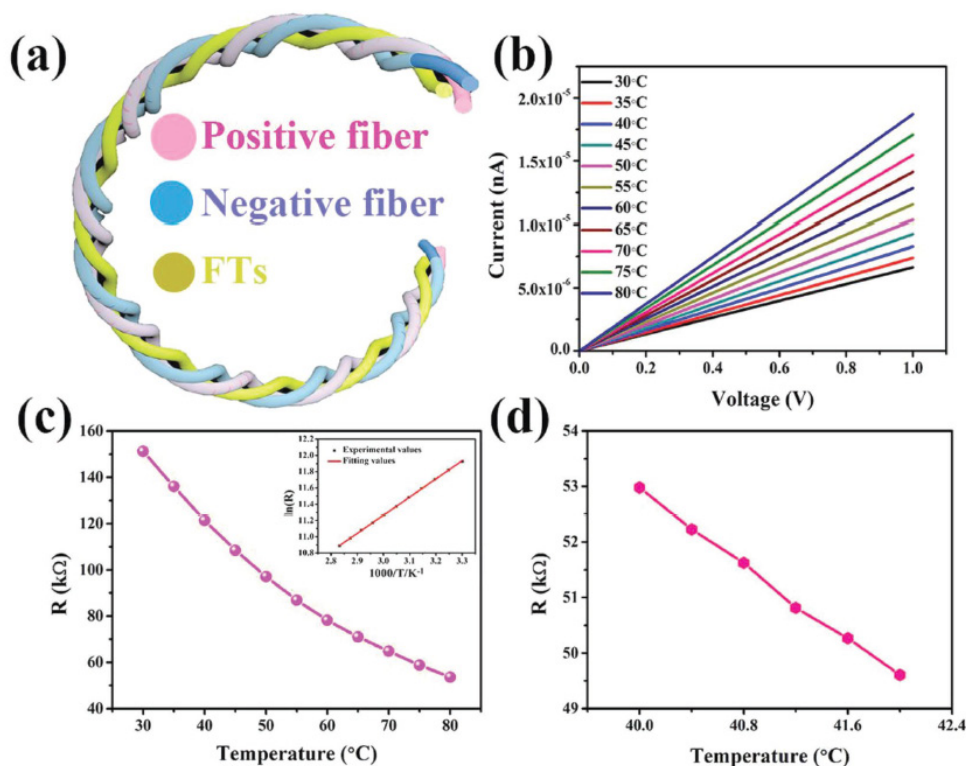
热门应用案例

案例一：3D 打印纤维电极用于通过非对称超级电容器和温度传感器混合集成的全纤维电子设备

3D Printing Fiber Electrodes for an All-Fiber Integrated Electronic Device via Hybridization of an Asymmetric Supercapacitor and a Temperature Sensor

本文介绍了一种 3D 打印的纤维状集成电子设备的开发，该设备结合了纤维状非对称超级电容器 (FASC) 和纤维状温度传感器 (FTS)。FASC 器件由 3D 打印的 V2O5/SWCNT 和 VN/SWCNT 纤维制成，并组装成扭曲结构，可提供稳定的输出功率来驱动 FTS。基于还原氧化石墨烯 (rGo) 的 FTS 具有高灵敏度，温度响应度为 $1.95\% ^\circ\text{C}^{-1}$ 。将能量存储和传感功能集成到单一的纤维状设备中，展示了 3D 打印用于开发先进可穿戴电子设备的潜力。

本文使用 Keithley 的 4200 参数分析仪来测试该集成电子设备的电气特性。

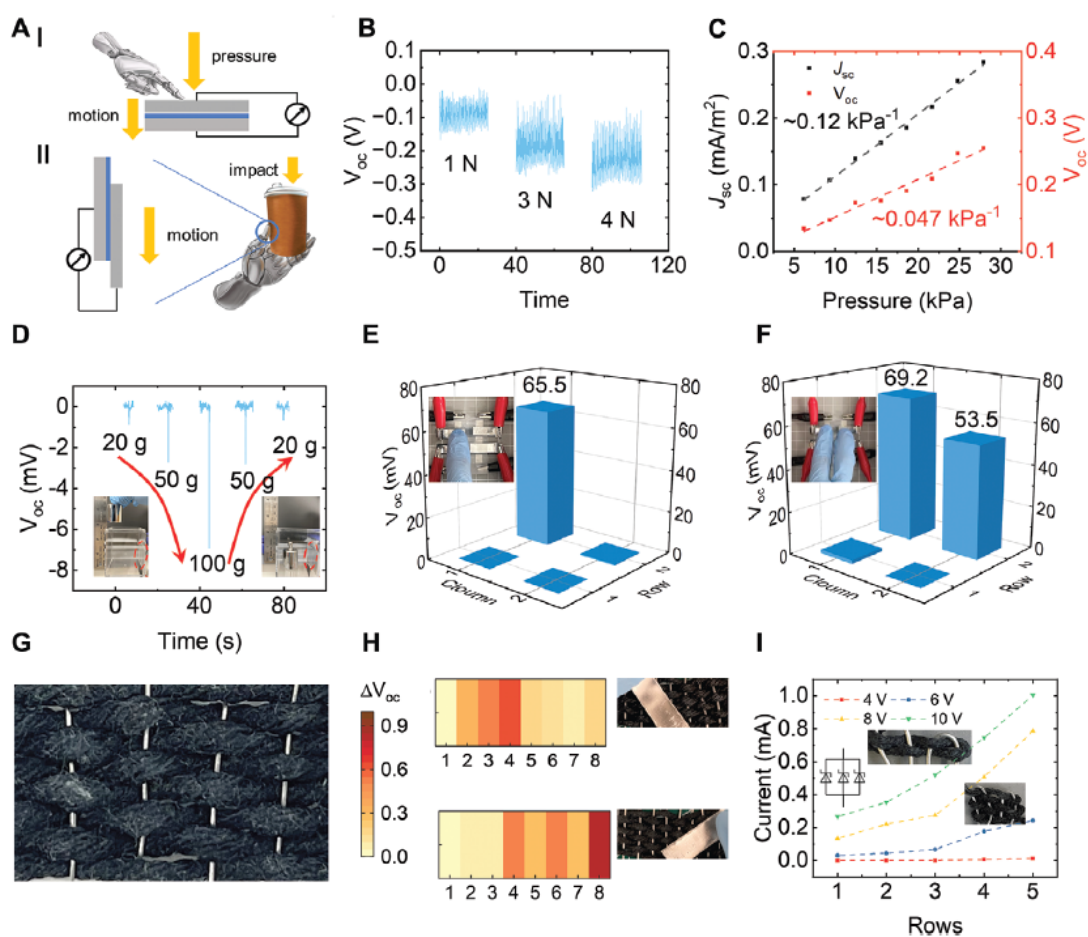


案例二：基于动态肖特基二极管的自供电多功能智能纺织品

Self-Powered Smart Textile Based on Dynamic Schottky Diode for Human-Machine Interactions

本文介绍了一种基于动态肖特基二极管 (DSD) 与纤维素纤维集成的自供电多功能智能纺织品的开发。该纺织品被设计用于持续发电并建立内置感知网络, 可检测双轴运动, 包括法向力和切向力。纤维素纤维的分层结构为导电聚合物 PEDOT:PSS 提供了支架, 形成 DSD 结。这些结构作为肖特基二极管, 可从机械刺激中产生电力, 形成一个织物感知元素矩阵。作者还提出了一种缓解策略, 以解决由于机械和电化学降解导致的 DSD 发电机寿命短的问题。所得到的智能纺织品展现出出色的柔韧性、可拉伸性、透气性以及与服装的兼容性, 使其成为从日常运动中发电并实现多功能感知的有前景方法。

本文使用 Keithley 的数字采集万用表 DAQ6510 来测试开路电压 V_{oc} 和短路电流密度 J_{sc} ; 使用 Keithley 的源表 SMU2450 来进行 C-V 曲线测试。

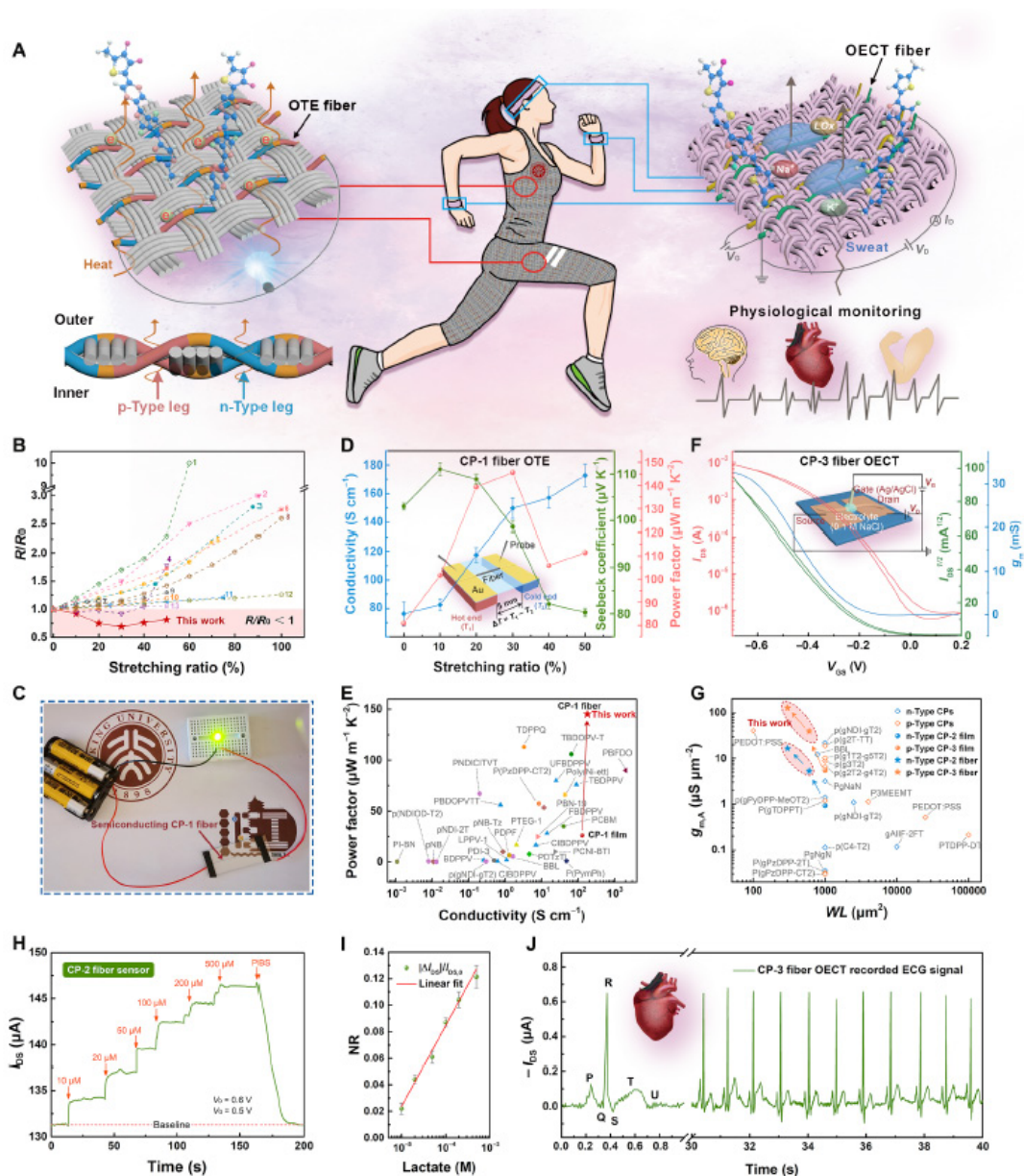


案例三：连续生产具有高电子性能的超韧半导体聚合物纤维

Continuous production of ultratough semiconducting polymer fibers with high electronic performance

本文介绍了一种称为流增强结晶 (FLEX) 的新方法，用于连续生产高强度、超韧性的共轭聚合物纤维。这些纤维展现出了出色的机械性能，拉伸强度超过 200 MPa，韧性超过 80 MJ/m³，优于许多合成纤维。关键创新在于使用低聚合物溶液浓度和强烈的伸长和剪切流动来分散和排列聚合物链，从而提高了结晶度和机械性能。这些纤维还显示出应变增强的电子性能，使其适用于高性能柔性 and 可拉伸电子应用，如可穿戴设备、传感器和能源设备。

本文使用 Keithley 的 2636B 源表和纳伏表 2182A 在氮气手套箱中进行电导率测试；使用 Keithley 的 4200 参数分析仪进行 CP 纤维 OECT 器件表征。



案例四：使用尼龙 -11 三摩擦电纱线制造的耐磨智能纺织品

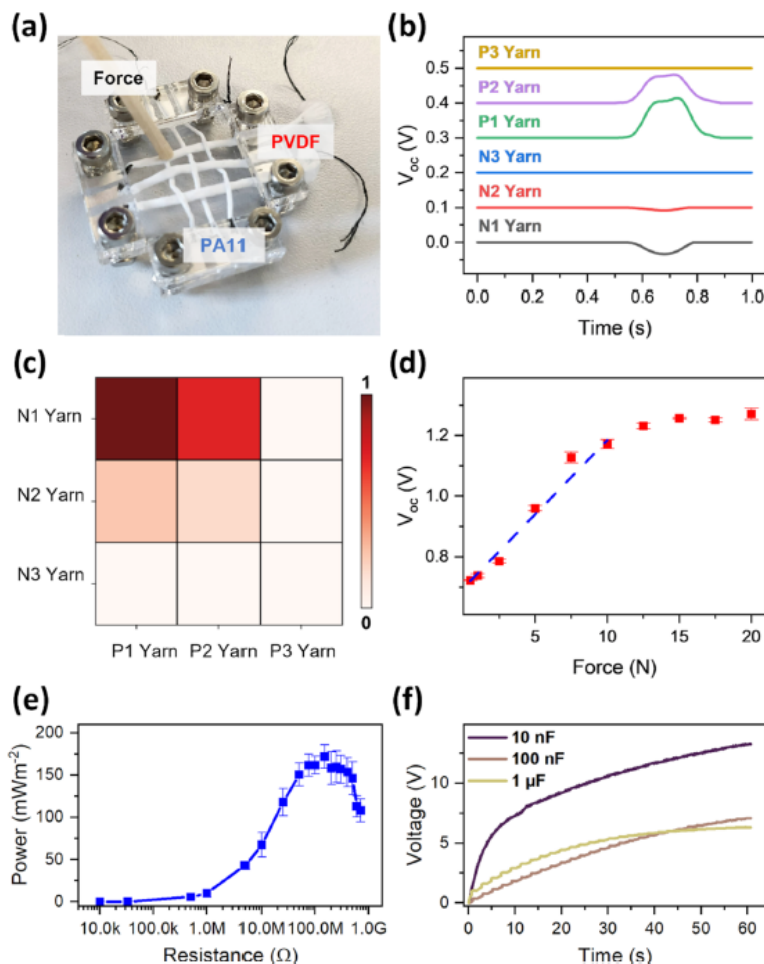
Wear-Resistant Smart Textiles Using Nylon-11 Triboelectric Yarns

这项研究探索了将能量收集功能集成到智能纺织品中的新方法，通过开发能够通过静电效应将机械能转换为电能的高效纱线来实现。研究人员专注于尼龙 -11(PA11), 这种材料以其适合产生强大静电响应的晶体结构而闻名。他们通过在导电磁纱线上电纺 PA11 纤维来创造静电纱线，从而实现能量收集应用。广泛的测试表明，这些纱线具有出色的耐用性，在经历最小的退化的情况下，超过了实际使用要求。此外，研究人员开发了一种原型触觉设备，通过编织静电正纱线 (PA11) 和静电负纱线 (聚偏二氟乙烯, PVDF) 来实现。这项研究成功地产生了耐用高效的纱线，具有强大的能量收集能力，为将智能纺织品集成到实际应用场景中打开了可能性。

本文使用了 Keithley 的万用表 2002 和皮安表 6485 进行能量采集，测试摩擦装置的输出电压和电流。

摩擦电纤维的电阻测试 通过自制装置进行测量。首先，将纤维固定在夹具上，然后将整个装置安装在线性电机上。接下来，使用硬化的铬钢球（直径 5mm）进行摩擦，铬钢球固定在静止的装置上。最后，将纤维和铬钢球连接到万用表（Keithley 2002），以测量它们之间的电阻。铬钢球的接触面积约为 1.6 平方厘米，施加在纤维上的力为 1215 牛顿。

能量收集表征： 能量收集摩擦电设备的性能通过使用定制的测试夹具进行，输出电压和电流通过万用表记录 (DMM 2002) 和皮安计 (6485)，分别记录、分别记录输出电压和电流。

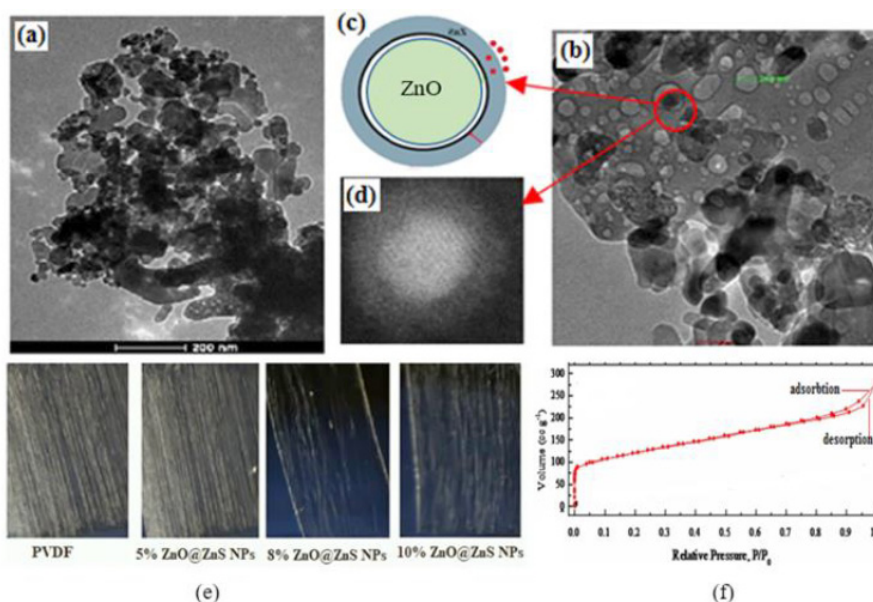
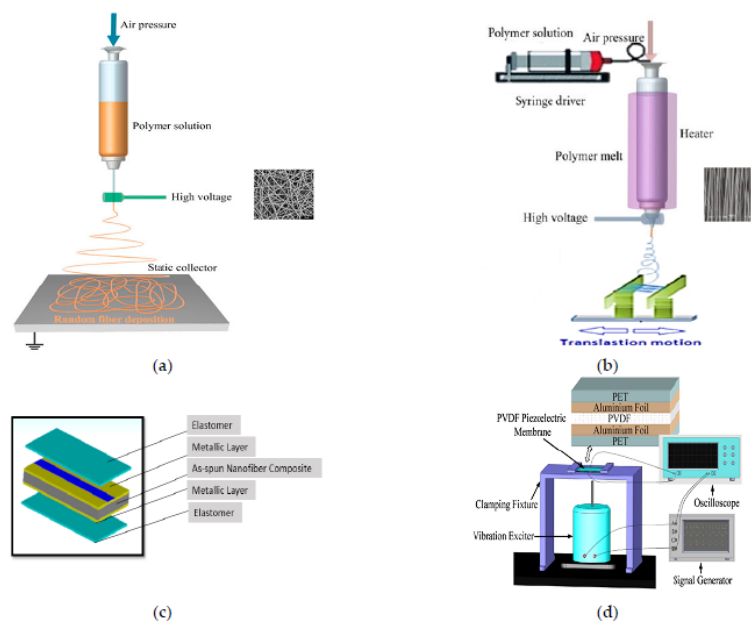


案例五：一种基于 PVDF 纳米纤维 -ZnO@ZnS 核壳纳米颗粒复合材料的可穿戴电纺压电垫，用于发电

Wearable Electrospun Piezoelectric Mats Based on a PVDF Nanofiber-ZnO@ZnS Core-Shell Nanoparticles Composite for Power Generation

本文采用了一种策略，使用新型功能性高性能压电材料来实现可穿戴自供电电子设备的可持续能源生产。采用创新的电纺丝技术生产了高度取向的纳米纤维。这种新型复合纳米纤维由聚偏氟乙烯 (PVDF) 制成，掺杂有 ZnO@ZnS 核壳纳米颗粒，以实现非脆性的异质纳米颗粒和压电聚合物性能。纳米纤维的优异压电性能是由于垫子的结晶性（极性 β 相）和表面拓扑结构所致。这些纳米发电机提供了一种简单、高效且经济实惠的微电子可穿戴设备解决方案。

本文使用 Keithely 的 2601A 源表进行纤维的电阻测试。

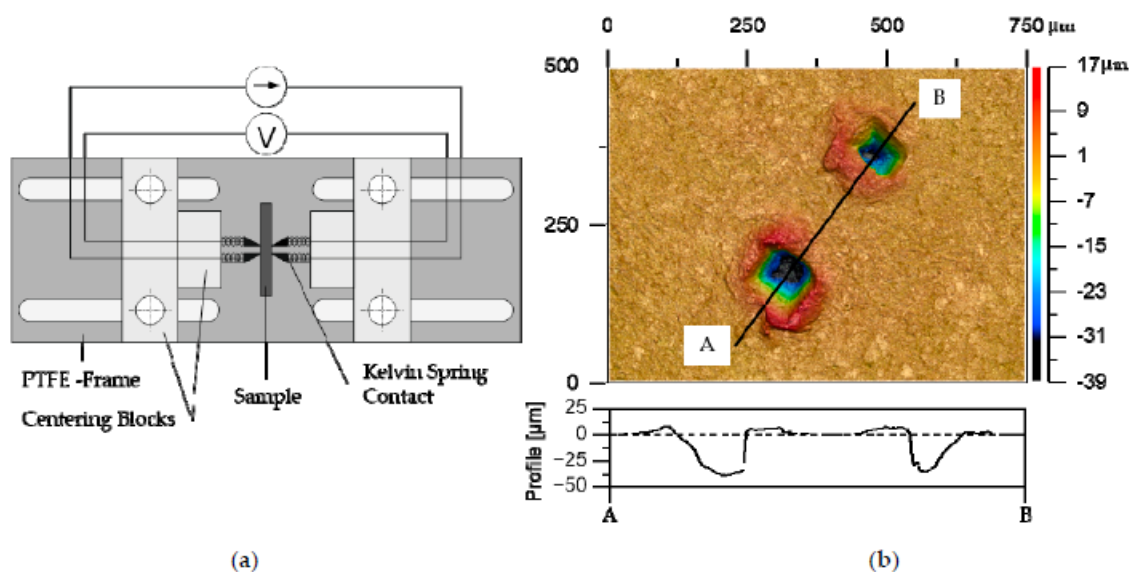


案例六：在压缩成型的纤维增强聚合物双极板中集成无纺碳纤维以提高机械性能的研究

Investigating the Integration of Nonwoven Carbon Fibers for Mechanical Enhancement in Compression Molded Fiber-Reinforced Polymer Bipolar Plates

本文研究了将无纺碳纤维作为增强剂集成到压缩成型的纤维增强聚合物双极板中。目标是在与仅由石墨填充聚丙烯（PP）基体制成的板材相比，实现足够的电导率和改善的机械稳定性。作者生产了厚度为 1 毫米的板材，其中包含四层浸渍在 PP- 石墨复合物中的碳纤维毡。他们分析了粒子和纤维的相互作用、电导率以及所得复合材料的力学性能。关键发现是，纤维增强板材的拉伸强度是 PP- 石墨板材的两倍，拉伸模量显著更高，断裂伸长率也有所增加。无论是纤维增强还是纯 PP- 石墨板材，通过增加石墨含量都可以实现较高的电导率。表面蚀刻对接触电阻基本没有影响，因为在压缩成型过程中没有形成聚合物表皮层。

本文使用 Keithley 的精密电流源 6220 和纳伏表 2182A 来进行通平面电导率测试。

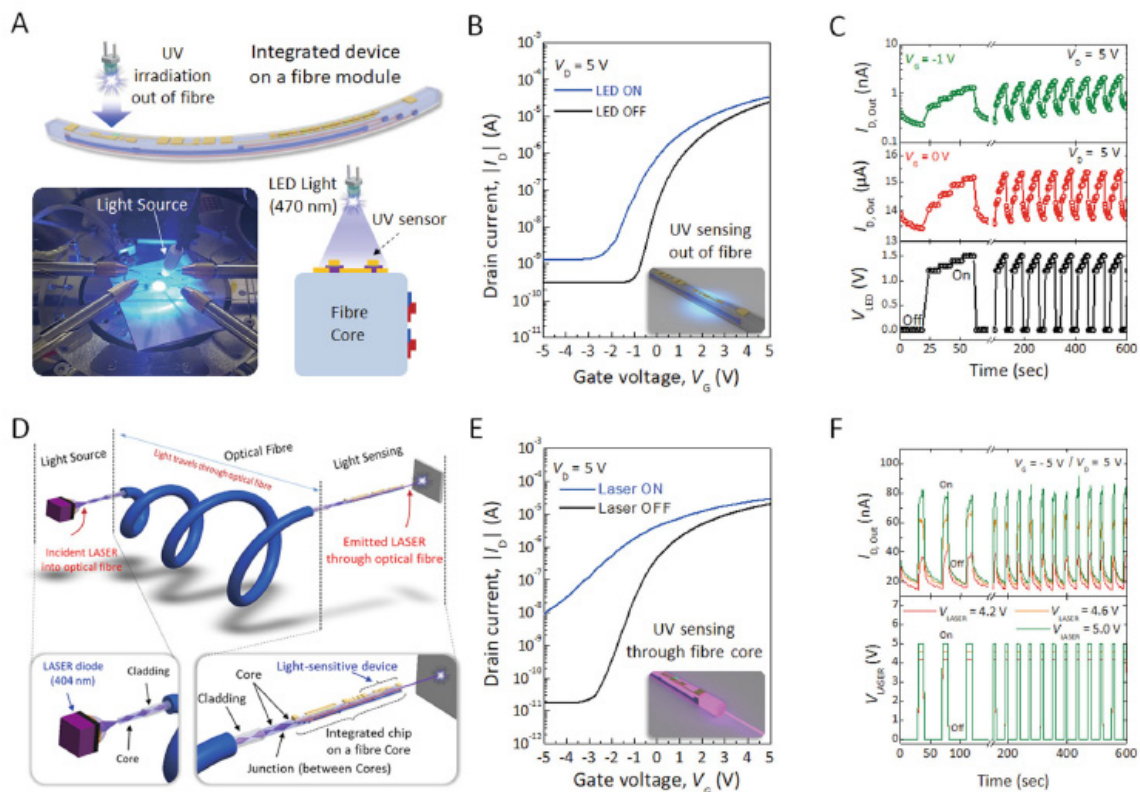


案例七：将多个电子元件集成到微纤维上，以实现新兴的电子纺织品平台

Integration of multiple electronic components on a microfiber towards an emerging electronic textile platform

本文提出了一种集成电子纤维平台，可直接在单根微纤维基底表面制造多种电子器件组件，如晶体管、反相器、环振荡器和热电偶。作者通过在直径 150 微米的熔融硅纤维上集成基本电子器件和传感器，展示了该方法在高密度电子纺织应用中的潜力。关键创新包括使用无掩膜光刻技术和毛细管辅助涂覆方法，精确在非平面纤维表面图案化电子组件。该集成纤维展现出多种电子功能，包括紫外检测、电信号开关和温度感测，突显了该平台在未来可穿戴和智能纺织系统中的前景。

本文使用 Keithley 的 4200 参数分析仪和泰克的示波器 DPO2002B 测量其电流 - 电压特性。



- [1] Jingxin Zhao, Yan Zhang, Yinan Huang, Jixun Xie, Xiaoxin Zhao, Chaowei Li, Jingyi Qu, Qichong Zhang, Juan Sun, Bing He, Qiulong Li, Conghua Lu,* Xinhua Xu, Weibang Lu, Liqiang Li, and Yagang Yao; 3D Printing Fiber Electrodes for an All-Fiber Integrated Electronic Device via Hybridization of an Asymmetric Supercapacitor and a Temperature Sensor; Adv. Sci. 2018, 5, 1801114
- [2] Pengfei Deng, Yanbin Wang, Ruizhe Yang, Zijian He, Yuanqiu Tan, Zhihong Chen, Jun Liu, and Tian Li; Self-Powered Smart Textile Based on Dynamic Schottky Diode for Human-Machine Interactions; Adv. Sci. 2023, 10, 2207298
- [3] Zhi Zhang, Peiyun Li, Miao Xiong, Liang Zhang, Jupeng Chen, Xun Lei, Xiran Pan, Xiu Wang, Xin-Yu Deng, Weiyu Shen, Zi Mei, Kai-Kai Liu, Guangchao Liu, Zhen Huang¹, Shixian Lv, Yuanlong Shao, Ting Lei; Continuous production of ultratough semiconducting polymer fibers with high electronic performance; Sci. Adv. 10, eadk0647 (2024) 3 April 2024
- [4] Piotr K. Szewczyk, Tommaso Busolo, Sohini Kar-Narayan, and Urszula Stachewicz; Wear-Resistant Smart Textiles Using Nylon-11 Triboelectric Yarns; ACS Appl. Mater. Interfaces 2023, 15, 56575 – 56586
- [5] Nehal Ali. El-Refaie Kenawy, A. A.Wadoud and M. I. Elhadary; Wearable Electrospun Piezoelectric Mats Based on a PVDF Nanofiber–ZnO@ZnS Core–Shell Nanoparticles Composite for Power Generation; 2023, 13, 2833.
<https://doi.org/10.3390/nano13212833>
- [6] Rainer Frank, Lisa-MariaWittmann, Tobias Kleffel, Benedikt Roth, Knut Graichen and Dietmar Drummer; Investigating the Integration of Nonwoven Carbon Fibers for Mechanical Enhancement in Compression Molded Fiber-Reinforced Polymer Bipolar Plates; 2023, 15, 3891.
<https://doi.org/10.3390/polym15193891>
- [7] Sunbin Hwang, Minji Kang, Aram Lee, Sukang Bae, Seoung-Ki Lee, Sang Hyun Lee, Takhee Lee, Gunuk Wang & Tae-Wook Kim; Integration of multiple electronic components on a microfiber towards an emerging electronic textile platform; (2022) 13:3173
<https://doi.org/10.1038/s41467-022-30894-4>

