

# 用于射频能量收集的织物基整流器制备及性能优化

付毅<sup>a,b</sup> 郭雯静<sup>a,b</sup> 刘思浩<sup>a,b</sup> 胡吉永<sup>a,b</sup>

东华大学 a. 纺织学院, b. 纺织面料技术教育部重点实验室, 上海 201620

**摘要:** 柔性整流器是可穿戴射频能量收集系统中的核心组件。研究采用电喷印技术和定制开发的紫外固化导电油墨, 设计并制备了小型化、共面化的织物基整流器。通过仿真优化及试验验证, 所制备的整流器在 0.915 GHz 频段下具有良好的阻抗匹配特性, 在 -10~10 dBm 的输入功率范围内, 整流效率均不低于 30%, 最高可达 60.8%, 在距离信号发射器 0.98 m 处可至少输出 1 mW 的直流功率。

**关键词:** 整流器; 电喷印; 可穿戴; 织物基底; 整流效率

中图分类号: TS 893

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2025)10-0001-07

## Preparation and performance optimization of fabric-based rectifiers for radio frequency energy harvesting

Fu Yi<sup>a,b</sup>, Guo Wenjing<sup>a,b</sup>, Liu Sihao<sup>a,b</sup>, Hu Jiyong<sup>a,b</sup>

a. College of Textiles, b. Key Laboratory of Textile Science & Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China

**Abstract:** Flexible rectifiers are the core components in wearable radio frequency energy harvesting systems. Electro-inkjet printed technology and custom-developed UV-curable conductive ink were adopted to design and fabricated a miniaturized and coplanar fabric-based rectifier. Through simulation optimization and experimental verification, the fabricated rectifier exhibited excellent impedance matching characteristics at the frequency band of 0.915 GHz. Within the input power range from -10 dBm to 10 dBm, the rectification efficiency was not lower than 30%, and it could reach up to 60.8%. When it was 0.98 m away from the signal transmitter, it could output at least 1 mW of direct current power.

**Keywords:** rectifier; electro-inkjet print; wearable; fabric base; rectification efficiency

可穿戴电子设备使人类与科技的交互方式发生转变。续航时间短、充电不便且体积受限的传统化学电池, 已逐渐无法满足可穿戴电子设备可持续发

展的需求。射频能量收集<sup>[1]</sup> (radio frequency energy harvesting, RFEH) 系统是一种将环境中的射频能量回收并为负载供能的技术。与来自太阳光和人造光

基金项目: 上海市自然科学基金(22ZR1400800)

收稿日期: 2025-03-14

作者简介: 付毅, 男, 2000 年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电子纺织品

通信作者: 胡吉永, 教授, hujy@dhu.edu.cn

的光能、来自振动和身体运动的动能,以及来自体温和废热的热能相比,射频能量是一种绿色高效的环境能源,适用场景广泛,且随时可用。此外,由于RFEH系统具有体积小、质量轻的特点,可有效实现便携式功能及可穿戴应用<sup>[2]</sup>,能够在规定的公众环境射频曝光限值( $\leq 0.4 \text{ W/m}^2$ )下<sup>[3]</sup>,为低功耗传感器<sup>[4-5]</sup>和物联网设备<sup>[6-7]</sup>供电。

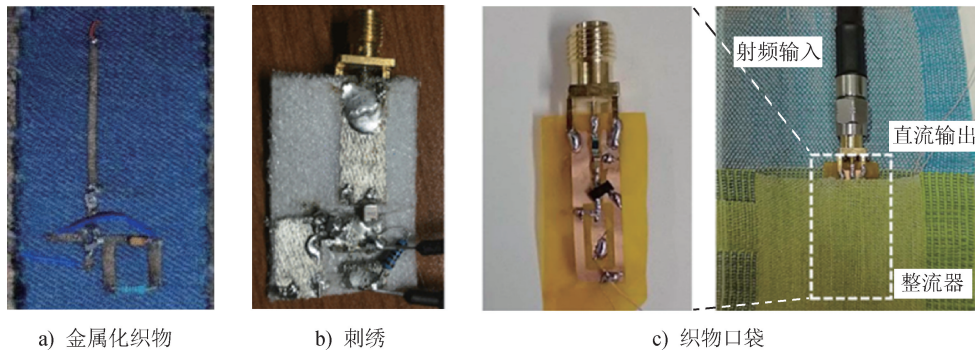


图1 不同制备工艺的织物基整流器  
Fig. 1 Fabric-based rectifiers formed with different preparation processes

电路是整流器柔性化的关键,其由介质基底和导体构成。射频电路通常要求介质基底具有较高的介电常数和较低的损耗,以满足电路小型化和低损耗的要求<sup>[11]</sup>。相较于常见的印刷电路板(printed circuit board, PCB),织物的介电常数较低,一般在3以下<sup>[12]</sup>。Hu等<sup>[13]</sup>探讨了织物结构和材料成分在高频(1.1 GHz)条件下对介电常数和损耗角正切值的影响。Monti等<sup>[8]</sup>采用牛仔布作为基底搭建整流器,其介电常数为1.67,损耗角正切值为0.023,厚度为0.5 mm,整流效率达到50%。

织物基整流器电路则要求导体电阻低、高频传输损耗小,可通过刺绣、丝网印刷、喷墨打印和金属化织物等方法实现该要求。Shahariar等<sup>[14]</sup>利用丝网印刷技术,以非织造布为基底制备共面波导(coplanar waveguide, CPW),设计和优化后的传输线在0.5~7.0 GHz的频率范围工作良好,插入损耗低于3 dB。Lopez-Garde等<sup>[15]</sup>将镀铜织物切割成电路图案粘贴在毛毡上制造织物基整流器,镀铜织物薄层电阻低至 $0.05 \Omega/\square$ ,整流效率达到56%。Vital等<sup>[10]</sup>采用刺绣法设计了一种基于纺织品的可穿戴整流器,其电路损耗与硬质PCB相当,最高可实现70%的整流效率。现有研究已通过多种工艺实现了织物基整流器的制备,但仍存在尺寸大和结构一致

性差等问题。整流器是RFEH系统中不可或缺的重要组成部分,主要负责将交流电(AC)转换为直流电(DC)。典型整流器的制造通常采用硬质板材,这将影响可穿戴设备的舒适性。而织物固有的柔韧和舒适特征,是整流器柔性化的理想基材。过去十年,相关研究提出了基于纺织品的整流器(图1)<sup>[8-10]</sup>,也证实了织物基整流器的可行性。

性差等问题。

电流体喷墨打印(电喷印)技术<sup>[16]</sup>是一种无接触、无压力且无印版的数码印刷技术,适合在复杂多孔织物表面打印高分辨率的导电图案,可有效减少尺寸并获得稳定的电路,如图2所示。基于织物结构特点,本研究提出了一种利用电喷印技术和紫外固化导电油墨的织物基整流器制备方案,并通过仿真与实测验证织物基整流器的基本功能。

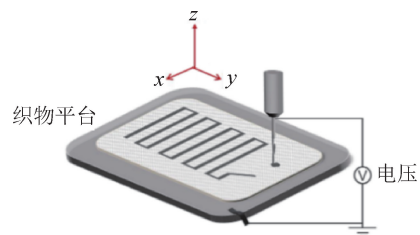


图2 电喷印织物电路  
Fig. 2 Electro-inkjet printed fabric circuit

## 1 材料与制备

### 1.1 材料选择与准备

#### 1.1.1 织物基材

选择织物作为电喷印基材时应当充分考虑其表面的打印适应性。结合应用及制备需求,选取组织

结构较紧密的涤纶平纹布作为打印基底,其基本参 数见表 1。

表 1 织物基本参数

Tab. 1 Basic parameters of the fabric

织物结构	经密/[根·(10 cm) <sup>-1</sup> ]	纬密/[根·(10 cm) <sup>-1</sup> ]	面密度/(g·m <sup>-2</sup> )	厚度/mm	介电常数	损耗角正切值
平纹	550	320	100	0.24	1.5	0.09

打印前对织物依次进行平整化处理、乙醇去污处理和抗静电剂浸渍处理,以提高基材的打印适应性。首先将平整的涤纶平纹布裁剪成 15 cm×15 cm 的试样,浸泡在无水乙醇中 2 h,以达到去污效果,接着用去离子水进行清洗,最后将织物置于质量分数为 1%的抗静电剂水溶液中浸泡 2 min,取出后整理平整,烘干备用。

### 1.1.2 导电油墨

电喷印技术使用的紫外固化导电油墨具有良好的打印适应性和附着力,同时可在一定程度上改善织物表面形态的粗糙和不平整。其主要由导电填料、聚合物、溶剂和添加剂组成,表 2 列出了具体的导电油墨配方。

表 2 导电油墨配方

Tab. 2 Conductive ink formula

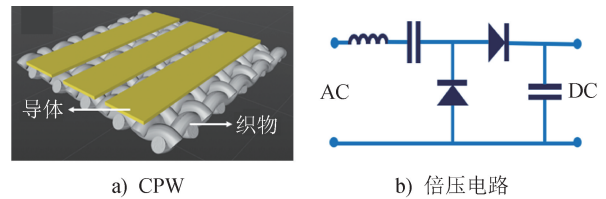
油墨材料	质量分数/%
纳米银 (Ag)	20.0
聚氨酯丙烯酸酯 (PUA)	32.0
三羟甲基丙烷三丙烯酸酯 (TMPTA)	19.2
三丙二醇二丙烯酸酯 (TPGDA)	19.2
光引发剂 (1173)	8.0
硅烷偶联剂 (KH-560)	1.2
消泡剂 (BYK-A555)	0.4

首先将除纳米银外的导电油墨材料混合均匀,高速搅拌 4 h,然后将纳米银(粒径 50 nm)加入上述混合体系中,继续高速搅拌 12 h,得到适用于电喷印技术的导电油墨。通常,导电油墨需要在使用前超声 0.5 h 以去除内部气泡使状态达到稳定。

### 1.1.3 整流电路结构及集总元件

选用 CPW 作为传输线结构。CPW 中心导体与接地金属面位于同一平面,以便集总元件安装,无需对基板进行打孔等操作,如图 3 所示。此外,介质基底的介电常数与损耗角正切值对 CPW 结构信号传输影响较小。整流电路选择倍压整流方式,只需 2 个电容和 2 个二极管即可实现更高的输出电压和整流效率,其是结构复杂性和输出性

能之间的良好折中。串联电感或并联电容可以有效调节电路的输入阻抗。所以整流器包含 5 个集总元件,如表 3 所示。整流二极管是整流器的关键部件,必须在低导通电压和低漏电流下才能实现高效率。肖特基二极管作为其中一种,因导通电压小且输入功率低时灵敏度高,成为整流器二极管的优选。同时,电感和电容均选择 0402 型封装,它们均具有较小的尺寸,有利于提高织物基整流器的整体弯曲柔软性。



a) CPW b) 倍压电路

图 3 整流电路结构及元件布置示意

Fig. 3 Schematic diagram of rectifier circuit structure and component layout

表 3 集总元件规格特征

Tab. 3 Specifications and characteristics of lumped components

集总元件	型号或参数	封装类型	规格尺寸	数量
二极管	SMS7630	SC-79	1.6 mm×0.8 mm×0.6 mm	2
电容	100 pF	0402	1.0 mm×0.5 mm×0.5 mm	2
电感	15 nH	0402	1.0 mm×0.5 mm×0.5 mm	1

## 1.2 电喷印工艺设计

根据整流器的电路设计要求,传输线需具有一定的宽度,所以采用相邻打印轨迹油墨拼接成形的方案,如图 4 所示。实际电路由数条平行的打印轨迹拼接而成,要求油墨均匀拼接成形,表面导体成形外观良好,清晰连续。根据预试验制定拼接间距为 0.35 mm,相应电喷印工艺参数如表 4 所示。



图 4 相邻打印轨迹的油墨拼接成形过程

Fig. 4 Ink splicing and forming process of adjacent print tracks

表 4 电喷印工艺参数

参数	数值
电压/kV	3
喷头高度/mm	4
供液速度/(mL·h <sup>-1</sup> )	1
基板移动速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	10
针头孔径/mm	0.23
相对湿度/%	55±5
温度/℃	20±2

打印完毕后静置,待织物表面油墨扩散达到稳定后,使用紫外固化仪照射 15 s,随后浸泡在 1 mol/L 的 NaCl 溶液中进行化学烧蚀,再经过紫外固化 45 s 后,干燥得到织物电路样品,测得表面导体方阻为 (0.30±0.03) Ω/□。最后,使用 Conduction CD-02

导电银胶将集总元件、负载电阻安装于织物电路相应位置。

## 2 仿真与实测

### 2.1 仿真验证

由于织物基底的介电性能和电喷印导体的电导率均不及 PCB,故利用 Advanced Design System (ADS)对织物基整流器进行仿真,如图 5 所示,输入织物基底和导体材料基本结构参数和电学参数,验证其可行性,并对传输线尺寸和集总元件参数进行优化。输入端阻抗设置为 50 Ω,输入射频 (radio frequency, RF) 频率设置为 0.915 GHz,输入功率可调节,负载电阻设置为 1 200 Ω。

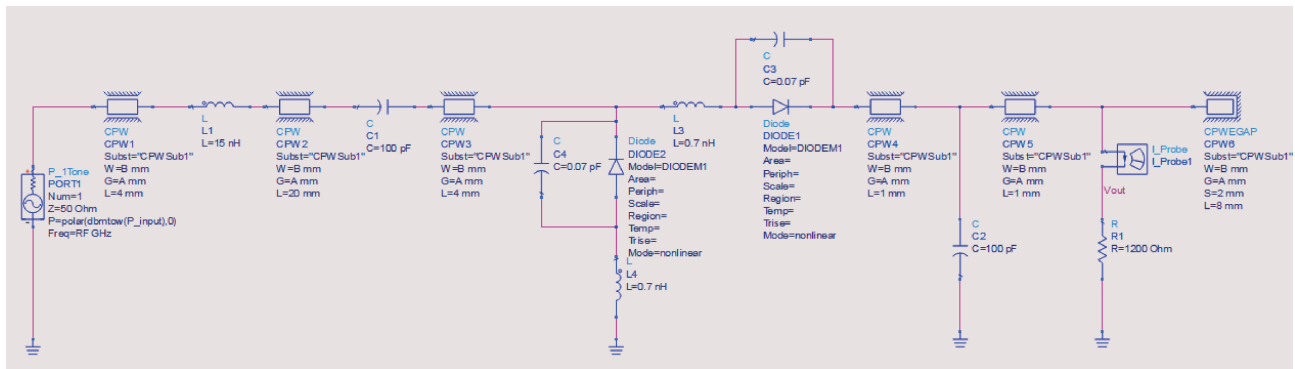


图 5 仿真电路模型

Fig. 5 Simulation circuit model

在仿真中进行优化设计,使用反射系数( $S_{11}$ )和整流效率表征整流器性能。优化结果如图 6a)所示, $S_{11}$  在 0.915 GHz 时为 -14.8 dB,同时 10 dB 带宽(即  $S_{11}$  小于 -10 dB 的频率带宽)为 0.35 GHz,说明仿真电路在设计频率下阻抗匹配良好。此时,输

入 RF 功率为 -10~10 dBm 时的整流效率如图 6b)所示,结果表明,当输入 RF 功率在 -3~7 dBm 时,整流效率可达 50% 以上,5 dBm 时最高(为 62.5%)。结果证明,仿真设计的织物基整流器具有优异的性能,可进一步制备加以验证。

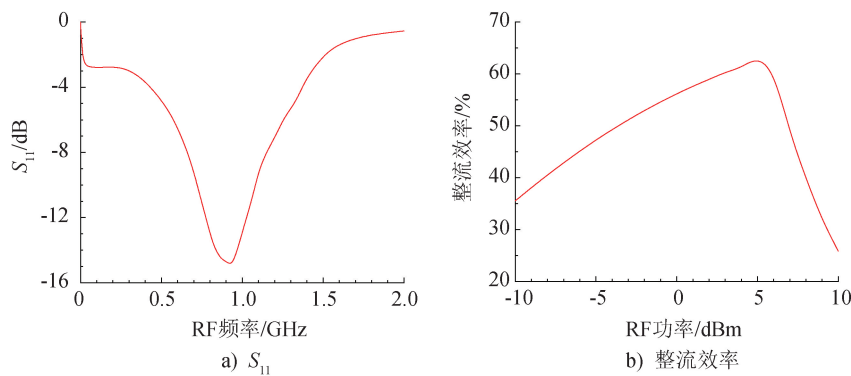


图 6 仿真优化结果

Fig. 6 Results of simulation optimization

## 2.2 性能测试

根据仿真模型进行织物基整流器的制备,安装螺旋形连接器以便于测试,如图 7 所示。织物基整流器(不包含螺旋形连接器)实际长 4.7 cm,宽 1.0 cm,最厚处达 2.0 mm,质量约 0.2 g。织物基整流器的性能评价指标一般包括  $S_{11}$ 、输出功率和整流效率等。此外,作为 RFEH 系统的一部分,整流器需要连接到整个系统中进行试验。

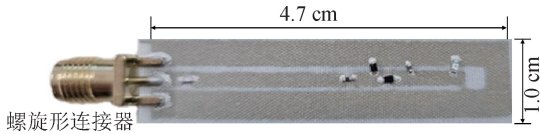


图 7 织物基整流器  
Fig. 7 Fabric-based rectifier

使用 KEYSIGHT E5071C 网络分析仪测试织物基整流器的  $S_{11}$  并与仿真结果对比,如图 8 所示。仿真所得整流器的 10 dB 带宽为 0.35 GHz,实测值为 0.26 GHz,较仿真值缩小 25.7%,同时实测谐振点也较仿真值低 0.06 GHz。实测值与仿真值产生偏差的原因可能有:软件仿真无法准确模拟出织物基底的实际结构形态;连接元件的导电银胶在高频下产生寄生效应;各集总元件本身存在误差。在 0.915 GHz 时  $S_{11}$  实测值为 -12.5 dB,已知  $S_{11}$  小于 -10 dB 表明整流器回波损耗较小,说明 RF 信号可有效输入整流器。

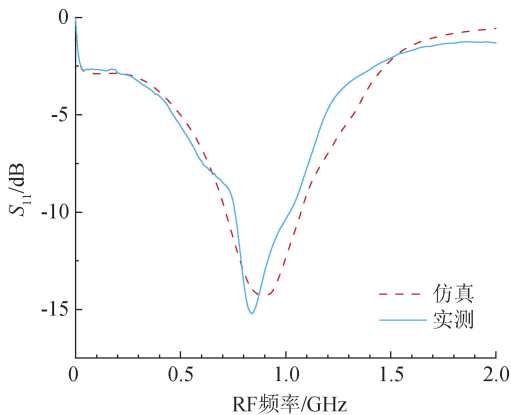


图 8 仿真与实测  $S_{11}$   
Fig. 8 Simulation and measurement of  $S_{11}$

使用 POWERCAST P2110-EVAL-01 射频能量收集套件中的 0.915 GHz 射频发射器和偶极子天线搭建测试装置。0.915 GHz 射频发射器作为信号源,利用内置天线发射电磁波。织物基整流器与

PCB 偶极子天线相连接,用于 RF 信号的接收与转换。使用 PROVA-901 万用表测量负载两端的电压,如图 9 所示。通过调整射频发射器与偶极子天线之间的距离,获得偶极子天线理论接收 RF 功率。根据 Friis 传输公式<sup>[17]</sup>,计算偶极子天线理论上所能接收到的功率。鉴于偶极子天线的损耗极小,可以将其理论接收功率视为整流器输入功率( $P_{in}$ )。通过万用表测量负载两端的电压和电阻,计算整流器的直流输出功率( $P_{out}$ )。由此,整流效率( $E_{ff}$ )可通过计算式计算: $E_{ff} = (P_{out}/P_{in}) \times 100\%$ 。

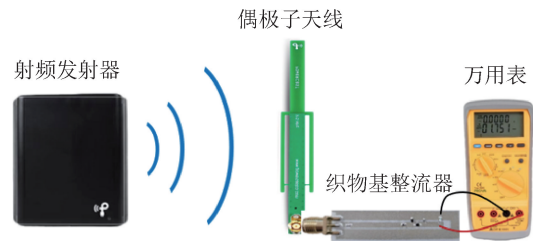


图 9 RFEH 测试装置  
Fig. 9 RFEH testing device

试验选择天线的理论接收功率在 -10、-5、0、5 和 10 dBm(天线距离信号发射器分别为 5.54、3.11、1.75、0.98 和 0.55 m)。负载电阻实测值为 1 140  $\Omega$ ,负载上输出电压和功率如图 10 所示。随着输入功率的增加,整流器负载上的输出电压和功率也随之增大,在 10 dBm 输入时功率可输出 2.19 V 电压和 4.21 mW 功率,在距离发射器约 0.98 m 处(即整流器输入功率为 5 dBm 时)可输出直流功率 1 mW 以上。



图 10 输出电压和功率  
Fig. 10 Output voltage and power

将实测整流效率与仿真结果进行比较,如图 11 所示。在输入功率为 0 dBm 时,实测织物基整流器平均整流效率可达到最大(60.8%),并且在 5 种不同的

输入功率下均能达到 30% 以上的整流效率。实测与仿真结果中最优整流效率的输入功率不相同, 实测值在 0 dBm 时整流效率达到峰值, 并且在 10 dBm 时实测整流效率明显优于仿真结果。分析产生差异的原因可能有: 实测回波损耗与仿真存在差异; 测试环境条件的限制和干扰; 电压测量设备的误差。

将该电喷印织物基整流器与其他研究中的可穿戴整流器进行对比, 结果见表 5。本研究成功采用电喷印工艺制得织物基整流器, 该整流器具有更好的结构一致性, 同时实现了共面化和较小的尺寸, 拥有高达 60.8% 的整流效率。

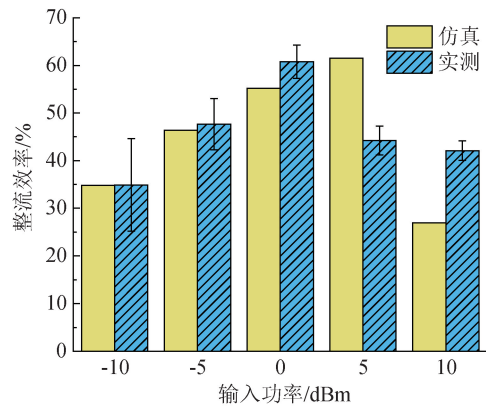


图 11 仿真与实测整流效率

Fig. 11 Simulation and measurement of rectification efficiency

表 5 织物基整流器的研究结果对比

Tab. 5 Comparison of research results of fabric-based rectifiers

来源	工作频率/GHz	导体材料	基底材料	制备工艺	传输线结构	尺寸	整流效率/%
本文	0.915	纳米银油墨	涤纶平纹布	电喷印	共面波导	4.7 cm×1.0 cm×0.2 cm	60.8
[8]	0.850~0.920	镀铜尼龙非织造布	牛仔布	切割	微带线	—	50.0
[15]	2.450	镀铜涤纶机织物	毛毡	切割	微带线	—	56.0
[18]	0.360	镀银铜丝	牛仔布	刺绣	微带线	10.0 cm×4.0 cm	77.2
[10]	2.450	镀银铜丝	欧根纱	刺绣	微带线	2.2 cm×1.8 cm	70.0
[19]	22~24	铜	聚酰亚胺	光刻	微带线	1.6 cm×3.3 cm	12.7
[9]	0.915	铜	聚酰亚胺	光刻	共面波导	—	80.0

### 3 结束语

研究采用轻薄柔软的织物基材实现了整流器的柔性化设计, 通过采取共面化和小型化的电路设计策略, 利用电喷印技术和紫外固化导电油墨, 完成了织物基整流器的制备, 并将其成功应用于射频能量收集系统中, 实测输出最大直流功率达 4 mW 以上, 最高整流效率为 60.8%。但本研究也存在不足, 如在仿真中没有模拟织物基底的实际结构形态, 今后研究可从此角度探究织物结构对整流器的影响。



### 参考文献

[1] RAMALINGAM L, MARIAPPAN S, PARAMESWARAN P, et al. The advancement of radio frequency energy harvesters (RFEHs) as a revolutionary approach for solving energy crisis in wireless communication devices; a

review[J]. IEEE Access, 2021, 9: 106107-106139.

[2] YAMADA Y. Textile materials for wireless energy harvesting[J]. Electronic Materials, 2022, 3(4): 301-331.

[3] 国家市场监督管理总局 环境保护部. 电磁环境控制限值: GB 8702—2014[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015: 6.

[4] CHEN X, WANG Y, LIU Z, et al. A 0.8- $\mu$ W 18.6-ppm/ $^{\circ}$ C Sub-1-V CMOS current reference with process-variation compensation using body-biasing technique [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2023, 58(7): 1985-1995.

[5] 李浩宇, 王海楼, 魏发云, 等. 柔性可穿戴湿度传感器的研究进展[J]. 产业用纺织品, 2023, 41(9): 1-12.

[6] KIM J, PARK S, LEE M, et al. A 28 nm CMOS bio-impedance sensor with 0.8  $\mu$ W/channel and 0.15% FSD error for wearable IoT health monitoring[J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2022, 16(4): 678-689.

[7] LIU Q, CHEN W, ZHOU Y, et al. A 0.3 V 1.2  $\mu$ W CIM-based always-on voice activity detector with 96% accuracy for IoT edge devices[J]. IEEE Transactions on

- Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2024, 32 (3): 432-441.
- [ 8 ] MONTI G, CORCHIA L, TARRICONE L. UHF wearable rectenna on textile materials [ J ]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61 (7): 3869-3873.
- [ 9 ] WAGIH M, HILLIER N, YONG S, et al. RF-powered wearable energy harvesting and storage module based on e-textile coplanar waveguide rectenna and supercapacitor [ J ]. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, 2021, 2: 302-314.
- [ 10 ] VITAL D, BHARDWAJ S, VOLAKIS J L. Textile-based large area RF-power harvesting system for wearable applications [ J ]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(3): 2323-2331.
- [ 11 ] HAYAVADANA J, 葛怡. 电工业和电化学工业用的纺织品 [ J ]. 产业用纺织品, 1995, 13(2): 41-44.
- [ 12 ] SALVADO R, LOSS C, GONÇALVES R, et al. Textile materials for the design of wearable antennas: a survey [ J ]. Sensors, 2012, 12(11): 15841-15857.
- [ 13 ] HU J Y, JIANG H Y, TU H T, et al. Influence of woven fabric specification and yarn constitutions on the dielectric properties at ultrahigh frequency [ J ]. Materials Research Express, 2017, 4(11): 116308.
- [ 14 ] SHAHARIAR H, JUR J S. Correlation of printing faults with the RF characteristics of coplanar waveguides (CPWs) printed on nonwoven textiles [ J ]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 273: 240-248.
- [ 15 ] LOPEZ-GARDE J M, DEL-RIO-RUIZ R, LEGARDA J, et al. 2×2 textile rectenna array with electromagnetically coupled microstrip patch antennas in the 2.4 GHz WiFi band [ J ]. Electronics, 2021, 10(12): 1447.
- [ 16 ] 马国栋, 郭雯静, 胡吉永. 高密机织物表面特性对电喷印电线成形质量影响 [ J ]. 丝绸, 2022, 59(10): 58-65.
- [ 17 ] FRIIS H T. A note on a simple transmission formula [ J ]. Proceedings of the IRE, 1946, 34(5): 254-256.
- [ 18 ] VITAL D, GAIRE P, BHARDWAJ S, et al. An ergonomic wireless charging system for integration with daily life activities [ J ]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(1): 947-954.
- [ 19 ] WAGIH M, HILTON G S, WEDDELL A S, et al. Broadband millimeter-wave textile-based flexible rectenna for wearable energy harvesting [ J ]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(11): 4960-4972.

## 2026 年《棉纺织技术》征订启事

《棉纺织技术》是由陕西省纺织科学研究院有限公司和中国纺织信息中心主办,全国棉纺织科技信息中心、陕西棉纺织技术期刊社有限公司编辑出版,国内外公开发行的专业技术月刊。期刊兼顾科研、教学、生产需要,坚持理论与实践相结合、技术与经济相结合、普及与提高相结合、当前与长远相结合、国内与国外相结合的办刊方针,形成了兼具“前瞻性、适用性、操作性”的独特风格。期刊荣获“第三届国家期刊奖提名奖”,连续被选列为“中国科技核心期刊”,入选首批“中国科技期刊卓越行动计划梯队期刊”、《纺织领域高质量科技期刊分级目录》T2 级。已被美国《化学文摘》、英国《科学文摘》、俄罗斯《文摘杂志》、EBSCO 数据库等收录,在国内外具有广泛的学术影响力。

《棉纺织技术》报道纺织领域先进技术,范围涉及纤维材料、纺织工程、纺织装备、技术性纺织品、纺织数字化、纺织检测、企业管理等创新成果。办刊严谨,审稿高效,服务细致,热忱欢迎广大纺织科技人

员踊跃投稿、订阅。

《棉纺织技术》官方投稿网址 <http://www.mfzjs.com>。

微信订阅号为“棉纺织技术”,可在线订购书籍、在线支付、在线投稿和互动,欢迎关注!

《棉纺织技术》期刊通过邮政局向全国发行,邮发代号 52-43,亦可向编辑部直接订阅,纸质刊每册 20 元,全年 240 元。电子刊每册 10 元,全年 120 元。地址:西安未央区浐灞三路 789 号秦创原科控浐灞创新园 E 座 901 室

邮编:710016 E-mail:sf-mfzjs@ctsti.cn

电话:(029)83553538,83553571

订阅专线:15529232520

银行付款

户名:陕西棉纺织技术期刊社有限公司

账号:611899991010003557935

开户行:交通银行西安城西支行

