

基于LTCC工艺的高密度单通孔双旋横向温差发电器件设计

郝海淳, 贾宏志

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2026年2月18日; 录用日期: 2026年3月11日; 发布日期: 2026年3月20日

摘要

本文基于低温共烧陶瓷(LTCC)工艺, 提出一种高密度并行排列的单通孔双螺旋横向温差发电机(TEG)结构。该结构热电臂采用螺旋环绕式横向布局, 温差冷热源在纵向通过短距离高导热银柱交替排列在热电偶两侧, 减少热流在非发电区域的扩散损耗。为解决单螺旋横向热电阵列存在的低功率密度问题, 通过构建高密度双螺旋热电单元级联架构, 共享上下电极实现整体并行发电, 有效提升能量收集效率。实验结果表明所制备的160对热电偶双螺旋横向TEG其输出电压可达213.8 mV。在温差为200 K的测试条件下, 所提器件的功率输出可达1328.7 μ W。与传统单螺旋横向TEG相比, 该双螺旋电感型TEG的发电性能提升幅度达72.83%。本工作为大功率器件或芯片的原位供能提供额外解决方案。

关键词

双螺旋横向温差发电器件, 塞贝克效应, LTCC

Design of a High-Density Lateral Thermoelectric Generator with Single-Via and Double-Spiral Based on LTCC Technology

Haichun Hao, Hongzhi Jia

College of Optoelectronic Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: February 18, 2026; accepted: March 11, 2026; published: March 20, 2026

Abstract

In this work, based on the Low Temperature Co-fired Ceramic (LTCC) technology, we propose a high-density parallel-arranged single-via double-spiral lateral Thermoelectric Generator (TEG) structure. The thermoelectric arms of this structure adopt a spiral-wound lateral layout, and the cold and heat sources are alternately arranged on both sides of the thermocouples through short-distance high-thermal-conductivity silver pillars in the longitudinal direction, which suppresses the diffusion loss of heat flux in non-power-generating regions. To address the intrinsic low power density issue of the single-spiral lateral thermoelectric array, we construct a high-density cascaded architecture of double-spiral thermoelectric units. This architecture realizes overall parallel power generation through shared upper and lower electrodes, and effectively improves the energy harvesting efficiency. Experimental results demonstrate that the fabricated double-spiral lateral TEG integrated with 160 pairs of thermocouples achieves an output voltage of up to 213.8 mV. Under a test temperature difference (ΔT) of 200 K, the proposed device delivers a maximum output power of 1328.7 μW . Compared with the conventional single-helix lateral TEG, the power generation performance of this double-helix inductive TEG is improved by 72.83%. This work provides an alternative technical solution for the in-situ power supply of high-power devices and chips.

Keywords

Double-Spiral Transverse Thermoelectric Device, Seebeck Effect, LTCC

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

温差发电机(Thermoelectric Generator, TEG)是一种基于塞贝克效应实现能量直接转换的器件,可将各类场景中产生的废热高效转化为电能。该器件属于固态电子器件,因具备运行无噪音、无运动部件、维护便捷等显著优势,已逐渐成为缓解能源浪费、降低碳排放的关键技术路径之一,在电子系统废热回收、可穿戴设备自主供电及物联网节点能源自给等前沿领域展现出广阔的应用潜力[1]-[3]。然而,传统热电器件长期受限于热传导效率低下、接触阻抗偏高及系统集成度不足等核心技术瓶颈,极大地制约了其在高密度、高功率电子系统中的实际工程应用,难以满足现代电子设备对高效能量回收的迫切需求[4]。

现有 TEG 器件多采用纵向热电偶阵列结构,其热源与冷源分别布置于器件的两侧,运行过程中需依赖较大的温差驱动电能输出。这种结构设计不仅会增加器件内部的热应力,提升器件失效的风险,还会因热流路径单一导致温度梯度的利用率偏低,进一步影响热电转换效能[5][6]。此外,传统制造工艺虽可实现 TEG 器件的微型化制备,但受限于材料兼容性较差、工艺流程复杂等问题,难以与高功率电子器件(如射频模块、处理器芯片等)实现高效共集成,限制了其在集成电子系统中的应用范围。尤为突出的是,热电偶与金属互连结构之间存在的接触阻抗问题,会显著降低器件内部的电流密度,进而限制 TEG 器件的输出功率密度,成为制约其性能提升的重要因素[7][8]。低温共烧陶瓷(Low Temperature Co-fired Ceramic, LTCC)技术凭借其低热膨胀系数、优异的多层互连能力及良好的高频特性,为 TEG 器件的微型化制备与系统集成提供了全新的技术路径[9]。Piotr 等人首次利用 LTCC 技术研制出由 450 个热电偶构成的横向热

电器件, 该器件在 135°C 温差条件下实现了 0.45 V 的输出电压和 0.13 mW 的输出功率。但该结构受限于长距离冷热源的设计形式, 导致单元热电偶无法有效获取最大热驱动温差, 进而使得器件功率密度仅为 0.26 mW/cm³ [10]。然而, 由于热电单元排布松散, 填充因子偏低引发热短路, 导致器件存在一定程度的热能损耗, 影响了其整体发电效能。为降低器件热损耗, Jaziri 等人通过引入内置腔体结构, 设计了一种短距离高密度横向热电发电机[11]。该器件采用 Ag/AgPd 作为热电偶材料, 实验结果表明, 所设计的 Ag/AgPd 基 TEG 器件输出电压达到 945 mV, 最大输出功率为 306.4 μW, 热驱动能力较传统结构平均提高了 160%。但在结构设计上, 受限于平面化布局的局限性, 难以充分发挥 LTCC 技术的集成优势, 其发电密度仍有一定的提升空间。

本研究提出了一种高密度并行排列的单通孔双螺旋横向热电器件, 该结构耦合了横向热电与纵向热流的热电传输路径, 减少热流在非发电区域的扩散损耗, 有效降低器件的热阻。通过仿真与实验相结合的方式, 对制备的热电样片进行了性能验证, 并重点讨论了所提 TEG 的发电能力。

2. 双螺旋横向 TEG 的理论和设计

2.1. 热理论

塞贝克效应是 TEG 实现热能向电能直接转换的核心理论基础。该效应的微观本质在于温度梯度场作用下, 材料内部载流子的定向迁移行为当两种异质导体或半导体材料连接构成闭合回路, 且两接点间存在温度梯度时, 高温端的载流子(电子或空穴)会在热激发作用下获得充足动能, 进而向低温端发生扩散, 最终导致回路内部电荷分布失衡, 形成稳定的电势差, 此电势差即为塞贝克电压[12]。如图 1(a)所示, 具体而言, 在单一均质材料内部, 载流子的统计分布严格遵循费米-狄拉克分布, 温度的波动会直接导致其能带内载流子的分布状态发生改变[13]。而在由两种异质材料组成的热电偶结构中, 由于不同材料在热导率、禁带宽度及载流子浓度等关键物理参数上存在固有差异, 热平衡状态下两种材料的接触面两侧会出现载流子浓度不均衡的现象, 进而诱发电势产生。热电偶的核心构成是两种塞贝克系数相反的异质材料, 且两种材料的末端需进行有效连接以形成完整回路[14]。由于塞贝克效应, 两个 TCs 端之间出现温度梯度 $\Delta T = T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}$, 产生电压, 表示为:

$$V_{\text{out}} = N\alpha_{pn}\Delta T \quad (1)$$

式中 N 为连接热电偶的个数, α_{pn} 为形成热电偶的 P 型材料和 N 型材料的塞贝克系数($\alpha_{pn} = \alpha_p - \alpha_n$), 产生的电动势的效果如图 1(b)所示。当热电偶串联时, 总内阻与它们的数量 N 成正比, 串联 TCs 数量的增加会导致 TEG 内阻的上升, 其表示为:

$$R_{\text{TEG}} = N \left(\frac{\rho_p L_p}{S_p} + \frac{\rho_n L_n}{S_n} + 2 \frac{\rho_c L_c}{S_c} \right) \quad (2)$$

式中, ρ_p 、 ρ_n 、 ρ_c 分别为 P 型材料和 N 型材料和金属接触点的电阻率。 L_p 和 L_n 是热流穿过的热电偶臂长, L_c 是接触长度。 S_p 、 S_n 、 S_c 分别为 P、N 型热电偶和触点截面积。发电机的输出功率为:

$$P = V_{\text{out}}^2 \frac{R_L}{(R_{\text{TEG}} + R_L)^2} \quad (3)$$

其中 R_L 和 R_{TEG} 分别为外负载和内阻。如果负载电阻与内部 TEG 的电阻 R_{TEG} 匹配, 则最大输出功率表示为:

$$P = \frac{V_{\text{out}}^2}{4R_{\text{TEG}}} \quad (4)$$

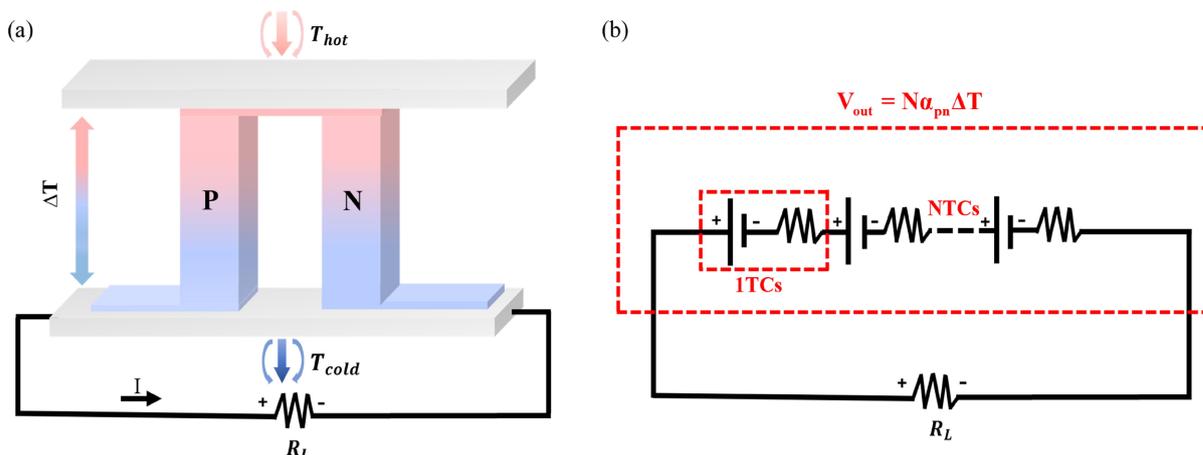


Figure 1. (a) Basic principle of TEG; (b) Equivalent circuit
图 1. (a) TEG 基本原理; (b) 等效电路

2.2. 单通孔双螺旋横向 TEG 设计

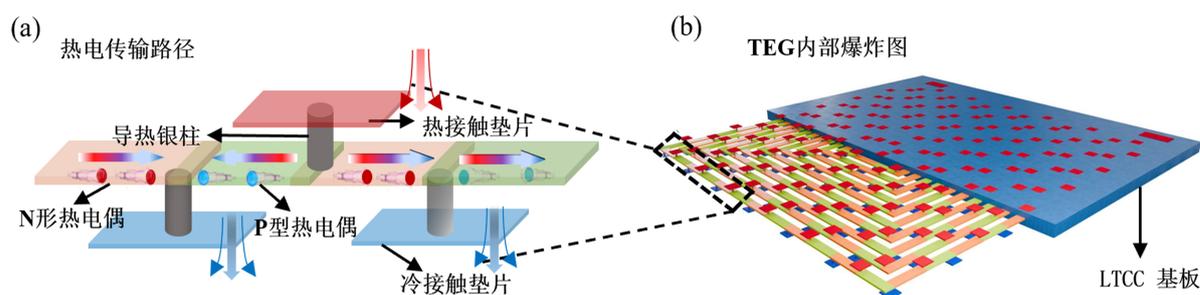


Figure 2. The overall structure of the double-spiral lateral thermoelectric device; (a) Current series and heat flow parallel transverse TEG cell structure; (b) 3D exploded structure diagram

图 2. 双螺旋横向热电器件的整体结构; (a) 电流串联和热流并联横向 TEG 单元结构; (b) 3D 爆炸结构图

Table 1. Thermoelectric parameters of the material

表 1. 标材料的热电参数

材料	塞贝克系数 S [$\mu\text{V}/\text{K}$]	热导率 λ [$\text{W}/\text{K}\cdot\text{m}$]	电导率 ρ [$\mu\Omega\cdot\text{m}$]	电阻温度系数 $\alpha \times 10^{-3}$ [K^{-1}]
Ag	+1.5	271.1	<0.04	1.83×10^{-3}
AgPd	-6~-7	146.4	<0.4	0.35×10^{-3}
LTCC	-	3.3	-	-

基于 LTCC 工艺, 设计并提出了一种高密度单通孔双螺旋横向热电器件(TEG)结构, 其整体构型如图 2 所示。该结构将 N 型与 P 型热电材料交替排布, 形成正反双螺旋热电偶阵列。其中, 热源与冷源通过高导热银柱分别布置于单级热电偶的两侧, 共享冷热源形成的温差高效作用于热电臂单元, 构建了热电转换的最短温差传递路径, 避免热流在非发电区域扩散, 从而降低热损耗, 该基础热电单元结构如图 2(a) 所示。基于上述热电单元为核心, 通过向外扩展延伸, 构建形成高密度并行排布的矩阵式双螺旋热电单元级联架构, 多个热电单元能够并行工作, 形成整体并行发电系统。大幅提升器件的热电单元集成度与整体发电能力, 完整的器件阵列结构如图 2(b) 所示。为使热量能够高效聚集于热电偶级联区域, 从而在热电臂两端构建最大化温差, 设计了带空气腔槽的柱体铝板结构作为测试用冷热源, 该结构对称布置于

热电基板的上下两侧。同时, 在双螺旋结构的中点连接处, 通过缩短单组螺旋热电臂的长度, 与另一组螺旋热电臂形成互补环绕式布线, 直至基板可布线区域得到充分利用。该设计可最大化挖掘器件中心区域的布线空间潜力, 实现热电单元的高密度集成, 进而提升器件单位面积发电能力。热电器件所用热电材料数据来自 Comsol 仿真数据库, 核心性能参数详见表 1。

3. 单通孔双螺旋横向 TEG 性能仿真

为确保模型能够准确反映器件的实际工作状态, 本研究构建了热传导模型与电性能模型。其中, 热传导模型用于描述 TEG 内部的温度分布与热量传递过程, 电性能模型则重点分析器件内部电场分布及电流产生的动态特性。通过对两类模型进行耦合分析, 可深入揭示 TEG 的热电转换效率与总输出功率变化规律。此外, 基于严谨的设计方案与先进的仿真手段, 采用有限元仿真技术对器件整体结构及相关工艺参数进行数值模拟, 进而对设计与工艺细节进行优化, 包括导热路径设计、热电偶材料厚度、金属线路结构等。本研究选取 Ag 与 AgPd 分别作为 N 型和 P 型材料, 其具有较高的塞贝克系数和电导率, 可显著降低器件串联电阻, 减少焦耳热损耗, 在低温差下仍可实现高电流密度输出。同时 Ag/AgPd 的抗氧化性、抗电迁移能力优异, 在长期热循环工作中性能衰减减小, 满足微能源器件的长期可靠性需求。传统 Ni 与 Ag 浆料界面势垒高, 接触阻抗大, 烧结易氧化, 长期热循环易分层。在实验评估样片的热电性能之前, 为了验证器件发电能力, 通过 Multiphysics 有限元分析软件 Comsol 对其进行建模仿真, 如图 3(a)~(b) 所示。仿真过程主要采用“热电效应”和“电磁热”物理场模拟在无内热产生和稳态热传递情况下器件的电势分布和热流传输路径。将冷端温度设置为 293.2 K 的恒定温度, 热端温度每 20 K 逐级递增, 直到温差达到 200 K。如图 3(b) 所示器件两侧的温度($\Delta T = 200$ K)和 TEG 内部的电动势分布情况。

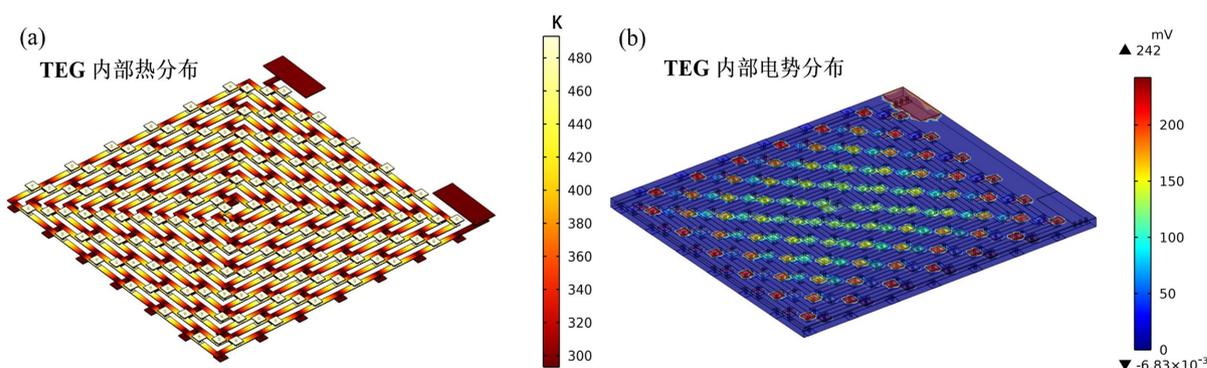


Figure 3. (a) Simulation of TEG internal heat flux distribution; (b) Simulation of TEG internal Electromotive Force (EMF)

图 3. (a) TEG 内部热流分布的仿真; (b) TEG 内部电动势的仿真

4. TEG 制备

单通孔双螺旋横向 TEG 的制备工艺流程如图 4 所示。首先, 选取与热电材料具有良好兼容性的 DP951 生瓷带作为器件基板, 将其切割为矩形片, 单层切片厚度控制为 0.095 mm。为消除生瓷带内部应力、避免后续工艺中出现翘曲现象, 将切割后的生瓷带置于 350 K 环境下进行预热处理。接着, 采用紫外激光打孔技术在每层基板上制备单通孔阵列, 设定孔径为 0.3 mm、孔间距为 1.3 mm, 以保证热流路径的均匀分布。采用厚膜丝网印刷工艺, 将高导电性 Ag 浆料分两次填充至通孔内部, 以此消除填充过程中产生的气泡, 确保通孔导电性能稳定。借助精密丝网印刷机, 在基板表面分别印刷 P 型(Ag)与 N 型(AgPd)热电偶材料, 印刷厚度为 5 μm , 线宽精度严格控制在 ± 3 μm 范围内。热电偶采用双螺旋排布方式, 螺旋间距为 0.3 mm。最后, 将完成印刷的各层基板按照设计要求有序堆叠, 采用等静层压技术确保层间结合紧密

且无错位偏差。将堆叠后的基板置于氮气保护气氛中进行烧结处理, 烧结过程中瓷带内部的玻璃相发生结晶反应, 可有效抑制基板体积收缩, 最终形成致密的多层陶瓷结构。值得注意的是, 每层基板均设计有交替分布的通孔阵列, 分别对应热源与冷源通道, 其中上层通孔与热源侧热电偶相连, 下层通孔与冷源侧热电偶对接, 从而构建形成垂直热耦合路径。通过光学定位系统结合预刻对准标记, 实现各层基板的精准堆叠; 利用 LTCC 基板内部的绝缘层对热流与电流路径进行有效隔离, 减少寄生热损耗, 进而提升器件的能量转换效率。

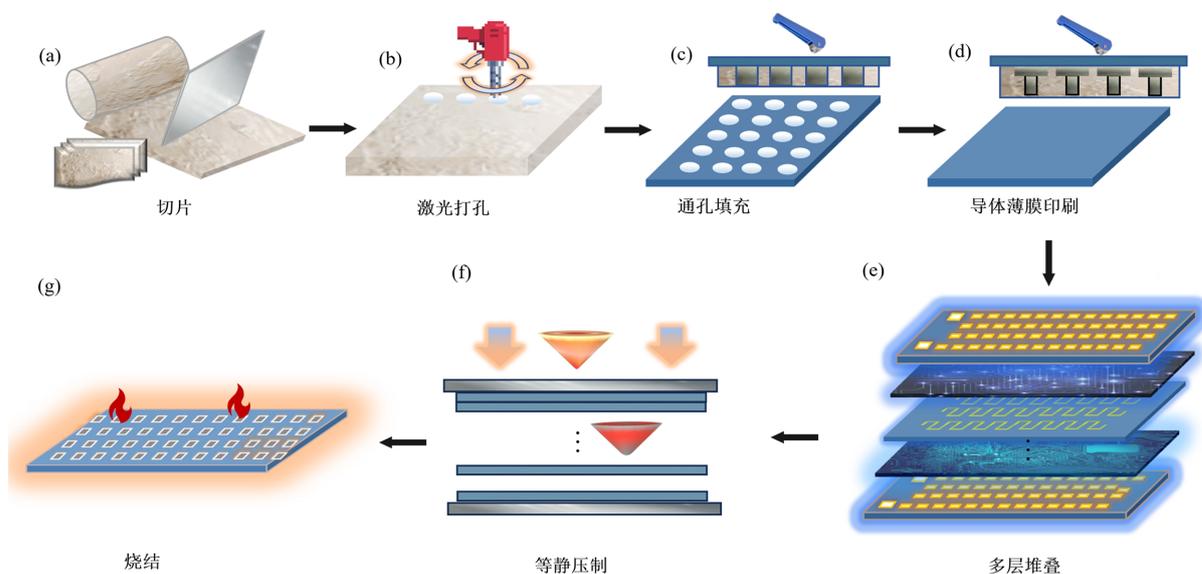


Figure 4. LTCC manufacturing process. (a) Slice delamination; (b) Laser drilling; (c) Thick-film screen printing for via filling; (d) Thick-film printing of thermocouples (TCs); (e) Stacking between layers; (f) Isostatic pressure lamination; (g) Sintering
图 4. LTCC 工艺制造流程; (a) 切片分层; (b) 激光打孔; (c) 厚膜丝网印刷填充; (d) 厚膜印刷 TCs; (e) 层间堆叠; (f) 等静层压; (g) 烧结

5. 结果与讨论

5.1. 实验设置

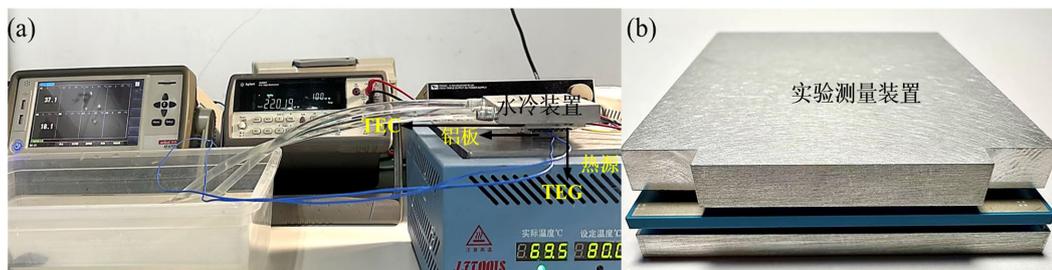


Figure 5. (a) Cross-sectional view of the TEG measurement device; (b) TEG sample with sandwich structure
图 5. (a) TEG 测量装置剖面图; (b) 三明治结构的 TEG 样片

基于 LTCC 工艺, 本研究成功制备出双螺旋横向温差发电机(TEG)样片。图 5(a)展示了该器件的测试环境配置, 测试过程中采用针对性设计的热电测量系统以保障数据准确性, 热源选用温度范围可调的 JF-966B 微加热平台, 冷源则由 LCC12-10 型热电制冷器(TEC)与电源输出功率 48 W、流速 12 L/min 的水冷系统组合构成; 温度测量采用 Anbai AT4708 热电偶温度计, 精准采集器件两侧的温度差值, 开路电压则

通过 Agilent 34405A 型数字万用表进行检测。为进一步提升热电性能测试的精准度, 设计了两款带有柱体空气腔槽且存在厚度差异的铝板, 将其分别加载于 TEG 样片两侧。铝板表面的柱腿结构与 TEG 冷、热端的靶银垫片形成匹配的腔槽对应结构, 确保热流定向传输。同时, 对铝板表面进行氧化处理, 避免其与 TEG 金属表面直接接触引发电短路; 在铝板与 TEG 的连接处额外涂抹电绝缘导热膏, 既保障热传导效率, 又能二次规避短路风险。图 5(b)为实验测试装置的细节示意图。

5.2. 输出电压与电压密度

通过仿真模拟与实验测试, 图 6 呈现了单通孔双螺旋横向 TEG 的开路电压及单位面积输出电压密度特性。如图 6(a)所示在 $0\text{ K} < \Delta T < 160\text{ K}$ 的温差区间内, 该结构的仿真输出电压与实验测试结果误差较小。而当温差 $\Delta T > 160\text{ K}$ 时, 两者间的偏差逐渐凸显, 这一现象主要归因于实验过程中接触热阻引发的能量损耗, 进而造成输出电压的衰减。图 6(b)给出了在 $\Delta T = 200\text{ K}$ 的测试条件下, 仿真得出的最大输出电压为 240 mV 。实验测得的最大输出电压达 213.8 mV , 相较于传统单螺旋结构, 分别提升 123.8 mV 与 96.6 mV 。单位面积发电性能双螺旋横向 TEG 的电压密度为 21.2 mV/cm^2 , 计算所得电压因子为 $0.11\text{ mV}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 。单螺旋结构, 其电压密度仅为 12.6 mV/cm^2 , 对应的电压因子为 $0.057\text{ mV}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 。对比结果表明, 所提双螺旋结构的单位面积输出电压密度与电压因子, 较单螺旋结构分别提升 68.25% 和 92.98% 。单螺旋 TEG 采用传统单向 S 形单螺旋排布, 热电臂沿基板平面单向螺旋环绕, 电极分别位于螺旋的起点与终点, 存在固有的电极环绕布线问题, 在相同基板面积下, 热电单元的填充密度远低于双螺旋结构。在两类结构测试环境和热电材料保持一致情况下, 双螺旋结构仍展现出更高的输出电压水平, 这表明, 高密度双螺旋热电单元级联架构有效延长了热流传输路径, 同时短距离高导热银柱与上下电极共享设计实现了整体并行发电, 显著降低了纵向温差导致的热损耗, 进而提升了热传导效率。综上, 这种具备更高热电偶(TCs)集成度的双螺旋结构, 其发电能力较传统单螺旋结构实现了实质性增强。

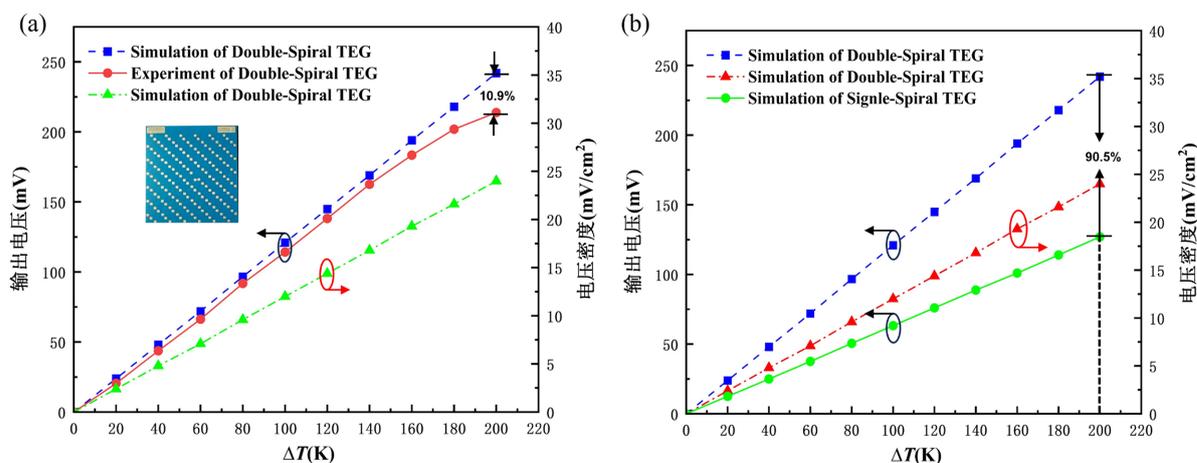


Figure 6. (a) Output voltage and voltage density of the Double-Spiral TEG; (b) Comparison of output voltage between the Double-Spiral TEG and the Single-Spiral TEG

图 6. (a)双螺旋 TEG 的输出电压和电压密度; (b)双螺旋 TEG 与单螺旋 TEG 的输出电压进行比较

5.3. 发电能力分析

器件输出功率与功率密度的仿真及实测计算结果如图 7(a)所示。在 $\Delta T = 200\text{ K}$ 的温差条件下, 本文所提双螺旋结构的仿真最大输出功率可达 $1742.9\text{ }\mu\text{W}$, 相较于传统单螺旋结构的 $1008.1\text{ }\mu\text{W}$, 绝对输出功率提升 $738.4\text{ }\mu\text{W}$, 相对增幅达 72.9% ; 对应器件功率因子为 $0.004\text{ }\mu\text{W/cm}^2\cdot\text{K}^{-2}$, 较单螺旋结构的 0.0025

$\mu\text{W}/\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$ 提升 60%。为明确器件的内阻特性与最优工作区间, 本文通过仿真对负载电阻进行全范围扫描, 结果表明所提器件达到最大输出功率时的匹配负载为 $8.6\ \Omega$ 。保持电流恒定, 等待器件达到热稳态计算得到 200 K 的温差条件下器件有效 ZT 为 0.0015。在该匹配负载条件下, 所提结构的实验实测输出功率为 $1328.7\ \mu\text{W}$ 。为在提升器件发电能力的同时抑制内阻的过快增长, 本文所提双螺旋结构选用 Ag 与 PdAg 作为热电偶功能材料, 该设计可构建低势垒金属-半导体界面与高效载流子输运通道, 从而有效降低器件的串联阻抗。图 7(b) 给出了在相同温差条件下, 传统单螺旋 TEG 的输出功率密度仅为 $100.1\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 而本文所提双螺旋 TEG 的输出功率密度可达 $173\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 单位面积输出功率密度的提升幅度达 72.9%。该性能提升的核心机理在于, 高密度单穿孔双螺旋热电阵列的结构设计可有效提高器件内部热电单元的填充密度, 进而显著增强器件的单位面积发电强度。

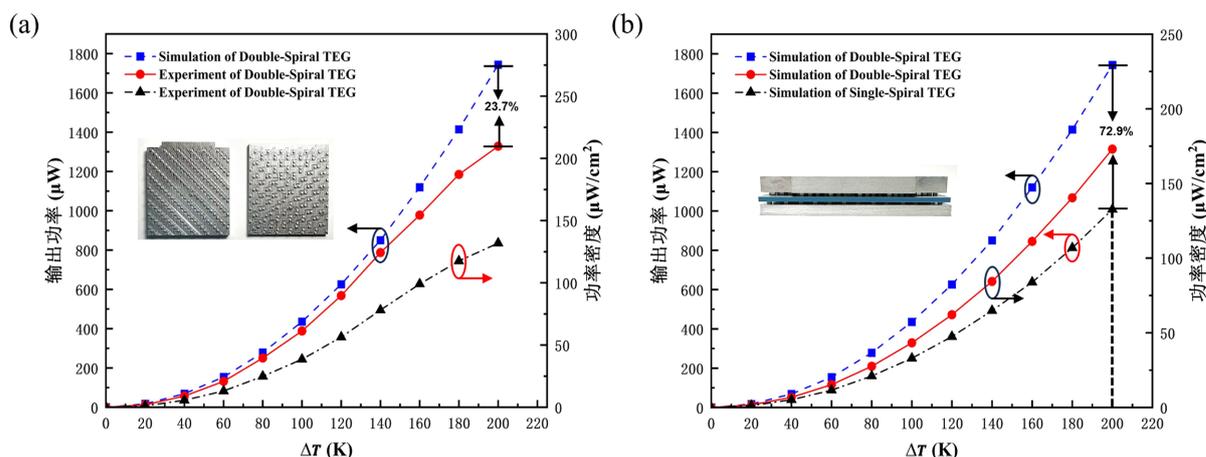


Figure 7. (a) Output power and power density of the Double-Spiral TEG; (b) Comparison of output power between the Double-Spiral TEG and the Single-Spiral TEG

图 7. (a) 双螺旋 TEG 的输出功率和功率密度; (b) 双螺旋 TEG 与单螺旋 TEG 的性能比较

6. 结论

本文围绕横向热电发电机(TEG)的性能优化与高密度集成设计开展研究, 提出了一种高密度并行排布的双螺旋横向 TEG 结构。针对性解决了传统横向 TEG 热损耗高、发电单元集成度不足的核心瓶颈。为有效抑制器件热损耗, 该结构在纵向维度设计了基于短距离高导热银柱的交错式冷热源排布方案。同时通过横向矩阵布局的双螺旋热电单元级联架构, 实现上下电极的共享复用, 构建形成高密度并行发电单元, 显著强化了器件的发电能力。实验测试结果表明, 在 200 K 温差条件下, 搭载 160 对热电偶的目标器件可实现 213.8 mV 的输出电压与 $1328.7\ \mu\text{W}$ 的输出功率, 对应最大电压密度达 $21.2\ \text{mV}/\text{cm}^2$, 最大功率密度可达 $131.9\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。本研究工作可为大功率芯片及各类电子器件的原位微能源俘获场景提供一套可行的技术方案, 同时为与横向热电器件的微型化、高密度集成设计提供了新的研究参考。

参考文献

- [1] Luo, D., Qiu, Y., Yang, S. and Yang, X. (2025) A Novel Y-Type Thermoelectric Generator Configuration for the Fluid Waste Heat Recovery. *Applied Thermal Engineering*, **270**, Article ID: 126226. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126226>
- [2] Hasan, M.N., Muthalif, A.G.A., Saleh, T., Zhang, Z. and Mohamed Ali, M.S. (2024) Monolithic Carbon Nanotube Film Thermoelectric Generator. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **71**, 1179-1184. <https://doi.org/10.1109/ted.2023.3346828>

-
- [3] Su, Y., Yu, D., Ruan, W. and Jia, N. (2022) Development of Compact Millimeter-Wave Antenna by Stacking of Five Glass Wafers with through Glass Vias. *IEEE Electron Device Letters*, **43**, 934-937. <https://doi.org/10.1109/led.2022.3168877>
- [4] Yan, J., Liao, X., Ji, S. and Zhang, S. (2019) A Novel Multi-Source Micro Power Generator for Harvesting Thermal and Optical Energy. *IEEE Electron Device Letters*, **40**, 349-352. <https://doi.org/10.1109/led.2018.2889300>
- [5] Luo, S., Wang, C., She, Z., Su, W. and Yan, Z. (2024) Y-Type Flexible Micro Thermoelectric Generator Using Novel Encapsulation Structure for Power Enhancement. *Energy Conversion and Management*, **301**, Article ID: 117950. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117950>
- [6] Sun, M. and Liao, X. (2023) Research on Photothermal Co-Analysis Model of a Thermoelectric-Photoelectric Power Generator. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **70**, 3335-3340. <https://doi.org/10.1109/ted.2023.3264840>
- [7] Hu, G., Madusanka, P., Dhawan, R., Xie, W., Debord, J., Tran, T., *et al.* (2019) Scaling of Power Generation with Dopant Density in Integrated Circuit Silicon Thermoelectric Generators. *IEEE Electron Device Letters*, **40**, 1917-1920. <https://doi.org/10.1109/led.2019.2947357>
- [8] Hoshina, T., Tomita, M., Matsuki, T. and Watanabe, T. (2024) Operating Temperature Dependency of Power Generation Capacity in Silicon Planar-Integrated Microthermoelectric Generators. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **71**, 2624-2630. <https://doi.org/10.1109/ted.2024.3362770>
- [9] Laurenzi, M.L., Antar, Y.M.M., Freundorfer, A.P., Clenet, M. and Jovic, S. (2021) Miniaturized Dual-Band Power Splitter in LTCC for GNSS Applications. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, **31**, 1187-1190. <https://doi.org/10.1109/lmwc.2021.3081825>
- [10] Markowski, P. (2014) Thermoelectric Energy Harvester Fabricated in Thick-Film/LTCC Technology. *Microelectronics International*, **31**, 176-185. <https://doi.org/10.1108/mi-11-2013-0077>
- [11] Jaziri, N., Müller, J., Müller, B., Boughamoura, A., Gutzeit, N., Mezghani, B., *et al.* (2021) Low-Temperature Co-Fired Ceramic-Based Thermoelectric Generator with Cylindrical Grooves for Harvesting Waste Heat from Power Circuits. *Applied Thermal Engineering*, **184**, Article ID: 116367. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116367>
- [12] Miao, Z., Hao, Z., Luo, G.Q., Gao, L., Wang, J., Wang, X., *et al.* (2018) 140 GHz High-Gain LTCC-Integrated Transmit-Array Antenna Using a Wideband SIW Aperture-Coupling Phase Delay Structure. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **66**, 182-190. <https://doi.org/10.1109/tap.2017.2776345>
- [13] Li, X., Chen, L., Yu, Z., He, L. and Lee, J. (2024) Performance Test and Prediction on a Radial Π -Type Annular Thermoelectric Generator Directly Exposed to an Automotive Pipe for Waste Heat Recovery. *Applied Thermal Engineering*, **251**, Article ID: 123621. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123621>
- [14] Uematsu, Y., Ishibe, T., Kozuki, S., Mano, T., Ohtake, A., Miyazaki, H.T., *et al.* (2024) Film Thermoelectric Generator of Multiple 2-D Electron Gas. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **71**, 4834-4840. <https://doi.org/10.1109/ted.2024.3412863>