稳定热源中的热释电能量采集通过主动压电热开关

*Jun Usami**、*Yuki Okamoto**、*Shimpei Saito*、*Saeko Tachikawa*、*Soumei Baba*、*Takeshi Fujii*、*Sucheta Gorwadkar*、*Natsumi Makimoto* 和 *Takeshi Kobayashi*日本产业技术综合研究所（AIST），日本

摘要

本研究展示了利用PZT/Si双晶悬臂梁中的主动压电热开关，从稳定热源中进行热释电能量采集。相同的PZT层同时用作机械致动器和热释电能量转换元件。双输出电极可实现热释电信号与压电信号的分离。实验上证明了在最高达110 Hz的频率以及低至5 K的温差下进行热释电能量采集的可行性。通过将实验结果与根据独立测量的热释电系数预测的响应进行比较，并结合瞬态热仿真，确定动态界面传热是限制高频运行的关键因素。本研究展示了一种紧凑型微机电系统方案，可利用低品位稳定热源实现更高频率的热释电能量采集。

关键词

热能采集、热释电效应、压电热开关、废热回收

引言

环境中以及各种设备产生的低品位热能十分丰富，但由于其温度相对较低，且与周围环境的温差较小，如何有效利用仍然颇具挑战。热电发电机作为一种已得到广泛研究的固态能量转换器件，在温差较小时输出功率也会迅速下降，因为其在匹配负载条件下的最大输出功率大致与温差的平方成正比 [1]。相比之下，热释电能量转换利用材料随时间变化的温度产生电能，为从低温、小温差热源中采集能量提供了另一种途径 [2]。

热释电能量转换本质上需要温度随时间变化。一种实用应用是直接收集自然波动的热源，例如人体呼吸 [3]。相比之下，要从更普遍的稳定热源中持续收集能量，就需要集成一种机制，周期性地改变热释电材料的温度。为此，研究人员提出并通过实验验证了利用热机械结构产生自持温度循环的被动方法 [4]–[6]。这些被动系统通常要求温差达到几十开尔文甚至更高。外部驱动热循环方法也已展现出较高的热释电能量收集性能，彰显了其实现高效热电转换的潜力 [2], [7],[8]。这两种方法都需要额外机制来产生温度循环；更重要的是，正如图 1 所总结的那样，其热循环频率通常较低，约为 1 Hz 或更低。相对较低的工作频率至少部分归因于热释电材料和器件结构的热弛豫时间，以及热切换机制的响应时间。对于每个循环的能量转换量一定的情况，平均采集功率会随工作频率提高而增加，因此更高频率的运行对提升热释电功率输出十分重要。然而，利用稳定热源产生的高频温度调制来实现热释电能量收集，尚未得到充分的实验验证；限制这种高频运行的因素也仍不明确。

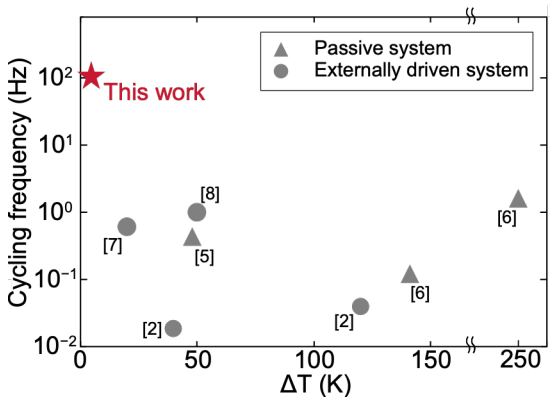

图 *1*：此前报道的热释电能量收集系统 *[2], [5]–[8]* 与本研究在热循环频率以及热源与冷源之间温差方面的比较。

本研究展示了利用主动式 MEMS 热开关从稳定热源中收集热释电能量，该热开关可产生周期性温度调制。为将工作频率扩展至更高范围，我们采用了紧凑型薄膜微机电系统结构，以同时实现较短的热弛豫时间和快速的机械响应。此外，单层锆钛酸铅（PZT）薄膜兼作压电致动器和热释电能量转换元件，从而无需单独的致动器，即可在简单的集成结构中实现热切换和能量转换。实验中，我们将热释电响应与同时产生的压电信号分离，证实在低至 5 K 的温差和高达 110 Hz 的频率下均可实现热释电工作。

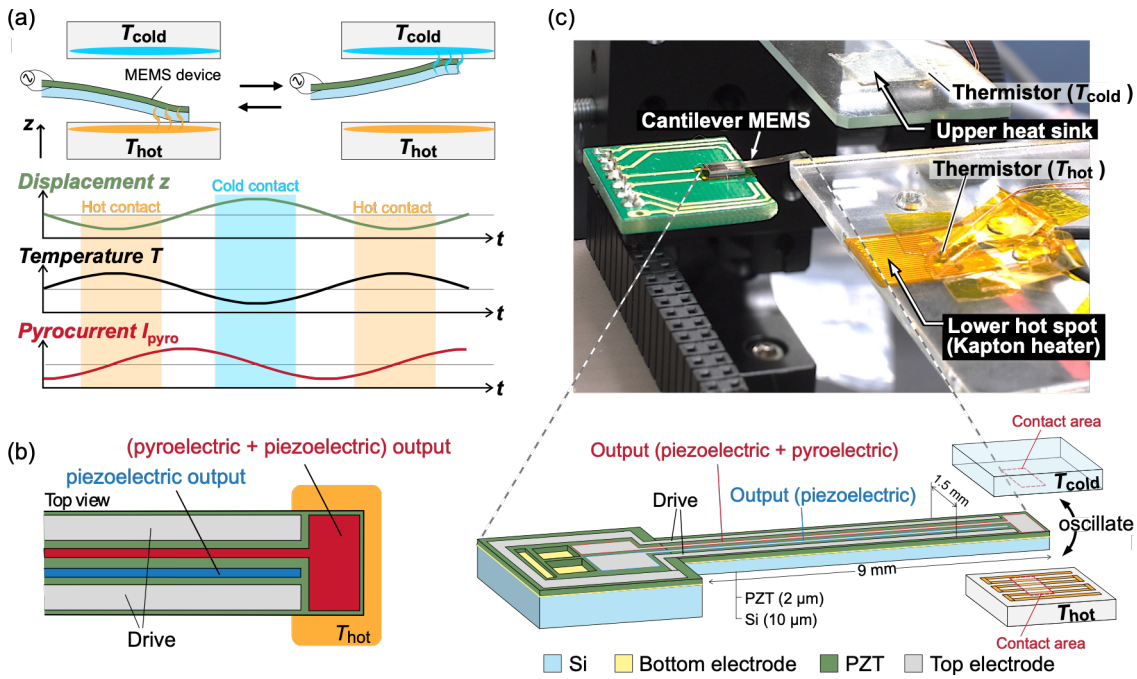

图 2：（a）用于热释电能量收集的主动式微机电系统热开关的工作原理，展示从压电悬臂梁位移到周期性温度调制和热释电流生成的过程。（b）用于分离热释电响应和压电响应的电极配置，包括驱动电极、参考压电输出电极，以及带有热接触垫的（热释电 + 压电）输出电极。（c）实验装置的照片和示意图，其中悬臂梁周期性地与下方热源和上方散热器接触。

此外，通过将测得的频率依赖性与根据独立测得的 PZT 薄膜热释电系数所预测的响应进行比较，并结合瞬态热仿真，我们确定动态接触界面上的热传递是限制高频工作的关键因素。这些结果表明，采用双功能压电–热释电 MEMS 架构，可行地将稳定热源的热释电能量收集扩展至更高频率的工作范围；同时也揭示了热界面瓶颈，必须解决这一问题，才能进一步提高工作频率和输出功率。

器件概念与设计

所提出的器件为铁电体/硅悬臂梁，在单一结构中结合了压电驱动和热释电发电（图 2a）。压电驱动使下方的稳定热源与上方的散热器之间的热接触周期性切换，从而在铁电层中产生周期性温度变化。这些温度变化同时产生周期性热释电电流，使同一铁电层既可作为驱动器，也可作为能量转换元件。

由于悬臂梁弯曲会产生叠加在热释电响应上的压电电流，因此除驱动电极外，还设计了两个输出电极来分离这两种贡献（图 2b）。其中一个输出电极连接到悬臂梁尖端的热接触垫，该接触垫会周期性地与加热器和散热器接触，因此会经历温度变化。另一个输出电极没有热接触垫，用作压电响应的参考端。因此，通过两者之差提取热释电贡献，

$$I_{pyro} \approx I_{(pyro+piezo)} - I_{piezo}. \quad (1)$$

实验装置

悬臂梁由厚度为 10 μ 2 m 的 μ 硅层、厚度为 m 的锆钛酸铅（PZT）层和电极组成。该悬臂梁由商用 PZT 电容器/绝缘体上硅晶圆（I-PEX Inc.）制成。依次对顶电极、PZT层和底电极进行图案化和刻蚀，随后进行背面硅刻蚀并去除埋氧层，以释放悬臂梁。

悬臂梁器件置于薄膜加热器（下方热源）与硅芯片（上方散热器）之间，并通过热敏电阻（G10K3976B1，TE Connectivity）监测热库温度，如图 2c 所示。图 3a 展示了热库间温差（ΔT）与加热器功率的关系。ΔT 随加热器功率线性增加，证实可通过加热器功率对 ΔT 进行系统调控。

对锆钛酸铅的热释电系数进行了独立测量，以确定材料层面的热释电响应，并将其用于与器件输出进行比较。图 3b 显示了通过周期性加热直接测得的直流偏压相关热释电系数 [9]–[11]。锆钛酸铅薄膜表现出极化切换，并具有朝负电压方向的印记效应。在未进行电极化的生长态下，已经观察到较大的热释电系数

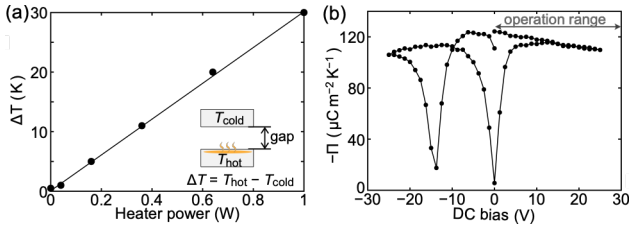

图 *3*：（*a*）测得的冷热储热器之间的温差 *ΔT* 与加热器功率的关系。插图说明了 $\Delta T = T_{hot} - T_{cold}$ 的定义。（*b*）直接测得的锆钛酸铅薄膜热释电系数的直流偏压依赖性。箭头表示器件运行期间使用的 *0–30 V* 电压范围。

过程，这与外延薄膜的优先极化状态一致。极化切换后，热释电响应已充分饱和；在更高电压下仅略有下降，这可能与介电贡献有关 [12]。在本研究采用的 0 至 +30 V 范围内，即在 15 V 直流偏置上叠加 15 V 正弦电压，平均热释电系数约为 $\Pi = -115\ \mu C\ m^{-2}\ K^{-1}$。

结果与讨论

图4a显示了在5 Hz下运行期间具有代表性的时域电流信号。红色和蓝色曲线分别表示来自（热释电 + 压电）输出电极和压电输出电极的响应，加热器功率为1 W。因此，两者的差值可用于估算热释电信号。

与加热器关闭测量结果的比较也支持这一热释电贡献。黑色曲线显示了加热器关闭时来自（热释电 + 压电）输出电极的信号。黑色曲线几乎与蓝色压电信号重合，表明红色曲线中观察到的额外电流主要源于周期性热接触诱导的热释电响应。

图4b显示了在5 Hz运行期间测得的两个输出电极电流幅值随 Δ*T*的变化关系。如预期，热释电信号随Δ*T*增加而增强。图4c显示了在 $\Delta T = 30$ K下测得的电流幅值随频率（*f*）的变化关系，表明在1–110 Hz范围内，随着频率增加，热释电信号增强，这与薄型锆钛酸铅/Si微机电系统结构的快速热响应一致。

我们注意到，当加热器关闭时，（热释电+ 压电）输出信号与压电输出信号并不完全重合。造成这种差异的原因可能有两个。首先，由于上方散热器比下方热源更容易受到环境气流的影响，即使在加热器关闭时，仍测得一个小的温差$\Delta T = 0.5$ K。其次，热接触垫可能产生额外的压电响应，而压电输出电极中不存在该响应。

接下来，我们对测得的电流进行定量评估。通过相减两个输出信号得到的热释电电流幅值，在 1 Hz 和 $\Delta T = 30$ K 时为 11.25 nA。扣除估算的热接触垫所产生的额外压电贡献后，热释电电流幅值为 10.25 nA。该值与计算所得的 12.75 nA 幅值较为吻合，后者由

$$I_{pyro,calc} = -\Pi\, A\, dT/dt, \quad (2)$$

其中，*A*为热接触垫的面积，*dT/dt*表示PZT温度变化率的幅值。假设PZT在两个热库温度之间进行正弦温度调制，

$$dT/dt = 2\pi f \Delta T / 2. \quad (3)$$

这一致性表明，该器件能够按照设计同时实现压电驱动热交换和热释电流生成。理想情况下，只要PZT在每个周期内都经历两个热库之间的完整温度变化范围，根据公式（2）和（3），热释电电流幅值应随频率线性增加。然而，在较高频率下，测得的电流幅值小于公式（2）所预期的数值。例如，在10 Hz下，测得的热释电电流幅值为36.48 nA，比计算值127.46 nA约小70%。

为阐明频率较高时响应受到抑制的原因，我们使用 COMSOL Multiphysics 模拟了热接触后的瞬态热响应（图 4d）。通过改变悬臂梁与加热器之间的面积比热接触热阻，$R_{th,c}$（范围为 250 至 4000 $mm^2\ K\ W^{-1}$），计算了悬臂梁与薄膜加热器接触后锆钛酸铅区域的温度变化。随着热接触热阻增大，温度上升变慢，表明高频运行时锆钛酸铅的有效温度变化范围减小。尤其是在高工作频率下，每个周期的热接触时间会短于热弛豫时间，导致锆钛酸铅无法充分接近冷热储热器的温度，从而降低其有效温度调制幅度。

实验观察到的高频下热释电响应受抑制现象，与在$R_{th,c}$ 约为 $10^3\ mm^2\ K\ W^{-1}$ 或更高时计算得到的瞬态热响应一致。尽管实际接触条件（包括接触持续时间）尚不确定，但 10 Hz 时的半周期为 0.05 s，而与热储热器的实际接触时间应更短。在此类条件下，当$R_{th,c} > 1000\ mm^2\ K\ W^{-1}$时，热弛豫会显著不完全。这些结果表明，高频热释电能量收集不仅受到机械驱动速度和器件内部热传导的限制，也受到动态接触界面处热传递的限制。因此，改善动态热接触对于确保每个周期中具有足够的温度变化范围，并进一步提高高频下的输出功率至关重要。

结论

本研究表明，主动压电热开关可在 1–110 Hz 的宽频率范围内，利用稳定热源实现热释电能量收集，且所需温差低至 5 K。一个

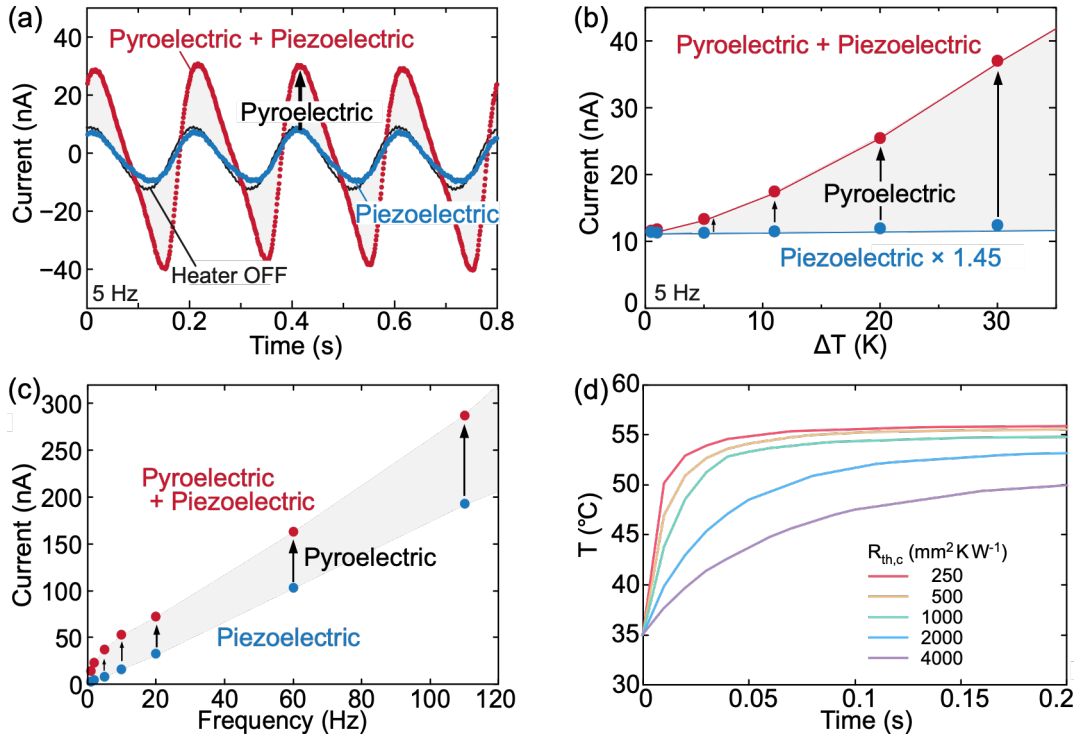

图4：器件级热释电响应。（*a*）在 *5 Hz* 下测得的时域电流信号，显示了热释电+ 压电响应（红色）、参考端压电响应（蓝色）和加热器关闭响应（黑色）的组合。（*b*）*5 Hz* 下输出振幅的 ΔT 依赖性。（*c*）在 $\Delta T = 30$ *K* 下输出振幅的频率依赖性。（*d*）不同热接触电阻条件下，*PZT* 在热接触后的模拟瞬态热响应。

锆钛酸铅薄膜兼作压电致动器和热释电能量转换元件，以简单的集成结构实现温度调制和热释电能量转换。频率依赖响应和瞬态热仿真进一步表明，动态接触界面处的热传递是限制高频运行的关键因素。这些结果为利用主动控制的热释电微机电系统回收低品位热能开辟了新途径，也为进一步提高工作频率和输出功率提供了设计指导。

致谢

本研究中的器件制备得到了 AIST 的 APARCHE 支持。本研究得到了 JST ACT-X（项目编号：JPMJAX23K3）和 JSPS KAKENHI（项目编号：JP23K13668、JP25K01644）的支持。

参考文献

[1] R. Dhawan 等，“具有高功率密度和电压密度的 $Si_{0.97}Ge_{0.03}$ 微电子热电发电机”，《自然·通讯》，第 11 卷，4362，2020 年。[2] P. Lheritier 等，“采用非线性热释电模块实现大能量采集”，《自然》，第 609 卷，第 718–721 页，2022 年。[3] H. Xue 等，“可穿戴热释电纳米发电机与自供电呼吸传感器”，《纳米能源》，第 38 卷，第 147–154 页，2017 年。[4] S. R. Hunter 等，“热释电热能采集及新型基于微机电系统的谐振能量转换技术综述”，载于《国际光学工程学会会议论文集 *8377*》，《能量采集与存储材料、器件及应用 *III*》，2012 年。[5] S. K. T. Ravindran 等，“自持式微型热机械-热释电发电机”，《应用物理快报》，第 99 卷，104102，2011 年。[6] T. Saito、Y. Kawai 和 T. Ono，“基于铁电材料与热机械开关组合的热释电/压电能量转换器”，《日本电气学会传感与微机电系统汇刊》，第 134 卷，158，2014 年 6 月，第 154 号，第 – 页。[7] G. Cha 和 Y. S. Ju，“利用基于液体的可切换热界面进行热释电能量收集”，《传感器与执行器*A*：物理》，第 189 卷，第 100–107 页，2013 年。[8] K. Zou 等，“利用铁电聚合物复合材料进行电子冷却和能量采集”，《自然·通讯》，第 15 卷，6670，2024 年。[9] S. Pandya 等，“薄膜中热释电效应和电热效应的直接测量”，《物理评论应用》，第 7 卷，034025，2017 年。[10] J. Usami 等，“通过直流极化增强 $Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$ 薄膜中热释电性的方向性”，《应用物理快报》，第 126 卷，092902，2025 年。[11] J. Usami 等，“不可翻转畴和内部偏压在电热效应与热释电效应中的作用”，《日本应用物理学杂志》，第 64 卷，09SP03，2025 年。[12] J. Usami、Y. Hiranaga 和 H. Yamada，“量化 $LiTaO_3$ 中介电贡献对热释电性的影响”，《日本应用物理学杂志》，第 65 卷，第 5 期，050903，2026 年。

联系方式

*J.U.，电话：+81-8022161934；j-usami@aist.go.jp *Y.O.，电话：+81-8022497903；yuki.okamoto@aist.go.jp