一种基于双极性驻极体的多气隙结构微振动能量采集器

李超, 陈钢进*, 陈许敏, 张庆贺, 朱煊

杭州电子科技大学驻极体及其应用实验室, 杭州 310018

* 联系人, E-mail: cgjin@hdu.edu.cn

2018-09-25 收稿, 2018-11-01 修回, 2018-11-21 接受, 2019-03-22 网络版发表

国家自然科学基金(51177032)资助

摘要 为实现物联网的自驱动供电, 本研究提出一种基于双极性驻极体的多气隙结构微振动能量采集器, 驻极体材料为三明治型双极性复合驻极体膜. 其基本结构单元为驻极体薄膜被放置在由微型弹簧支撑的两个振动电极中间所形成的双气隙结构. 这种双气隙结构等同于两个对称的可变电容. 利用驻极体所产生的静电场在电容中产生原始电势差, 在振动激励下使电势差发生变化, 实现电荷的流动, 将振动能转变成电能. 对能量采集器性能的测试结果表明, 在振动频域30~180 Hz范围内存在一个谐振频率和最大输出功率. 最大输出功率与振动强度、气隙数、驻极体膜的面积和电场强度呈正相关. 当振动强度为0.5 N时, 在负载电阻为55 M Ω 时, 四气隙结构能量采集器在谐振频率97 Hz处的最大输出功率达到了59.12 μ W.

关键词 自驱动供电, 微振动能量采集器, 驻极体, 多气隙结构

微振动能量采集器是一种将大自然中广泛存在的振动能转化为电能的装置, 由于其具有体积小、重量轻、能量密度高等特点, 已成为物联网自驱动系统用微电源研究的热点^[1~3]. 驻极体是一类能够长期储存空间电荷和偶极电荷的电介质材料^[4]. 驻极体基微振动能量采集器是由驻极体和与之相对应的金属电极构成. 驻极体所产生的静电场, 会在对应电极上感应出极性相异的电荷, 在驻极体与电极之间产生原始电势差, 这样的结构等效为一个可变电容. 在外界振动激励下驻极体与电极之间产生相对位移, 带动电容存储着的电荷量发生改变, 实现电荷在外电路上的流动, 将振动能转化成电能^[5]. 与电磁式和压电式能量采集器相比, 驻极体基微振动能量采集器具有制作工艺简单、灵敏度高、能量采集效率高等特点, 在微型化、集成化物联网自驱动系统供电方面具有独特优势^[6].

近年来, 为了提高驻极体基微振动能量采集器

件的输出功率, 研究人员尝试着采用不同的器件结构. 如加州理工大学Lo等人^[7]在底层玻璃衬底上安装数对交叉梳齿的金属电极并在上面放置一层柔性驻极体材料CYTOP. 实验结果表明在频率为60 Hz时输出功率达到2.267 μ W. Kong等人^[8]通过离子液体流动来实现振动能量采集, 得到了0.221 μ W的最大输出功率. 周军课题组^[9]发展了纤维基驻极体能量采集器, 将PTFE驻极体与工作电极碳纳米纤维直接接触缠绕, 在6 Hz拉伸频率及2.15%拉伸率下, 获得了11.22 nA的电流输出. Basset等人^[10]提出了硅弹簧振动能量采集结构, 在加速度0.25 g、频率250 Hz时输出功率为61 nW. Naruse等人^[11]将微型球应用到能量采集器结构中, 在2 Hz的低频振动、0.4 g加速度时, 输出功率达到了40 μ W. Perez等人^[12]提出了一种基于驻极体的低频静电风力涡轮能量采集器, 当风速提高到10 m/s时, 输出功率高达1.8 mW, 对应的功率密度为111 μ W/cm³. Wang等人^[13]提出了一种偏离平

引用格式: 李超, 陈钢进, 陈许敏, 等. 一种基于双极性驻极体的多气隙结构微振动能量采集器. 科学通报, 2019, 64: 1094~1102

Li C, Chen G J, Chen X M, et al. A bipolar electret-based micro-vibration-driven energy harvester with multi-air-gap structure (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 1094~1102, doi: 10.1360/N972018-01054

面变距离的闭合式静电能量采集装置, 在外部负载为 $13.4\text{ M}\Omega$ 的情况下, 当以 96 Hz 的低频施加 1 g 加速度的振动时, 实现了 $0.15\text{ }\mu\text{W}$ 的功率输出. Hillenbrand等人^[14]提出了类似于压电式的驻极体能量采集器结构, 在频率约 2 kHz 、加速度 1 g 下的输出功率达 $8\text{ }\mu\text{W}$. 以上结构都是采用单面镀电极驻极体以及形成单一气隙的方式, 仅仅利用了驻极体的单一电场. 本课题组基于前期研制的三明治型双极性复合驻极体膜, 构建了双气隙微振动能量采集器, 对实验结果表明, 在振动强度为 0.5 N 时可以得到 $14.1\text{ }\mu\text{W}$ 的功率输出^[15].

本文利用三明治型复合驻极体膜能产生双极性电场的优势, 设计制作了具有高能量采集效率和输出功率的多气隙串联结构能量采集器. 依据可变电容原理, 推导得到了器件的输出电流和输出电压方程, 并通过实验测试了器件的输出特性.

1 实验

1.1 双极性驻极体膜的制备

多气隙微振动能量采集器用的双极性驻极体膜采用课题组前期报道的三明治型FEP/THV/FEP复合膜^[16], 薄膜厚度为 $265\text{ }\mu\text{m}$. FEP(fluoroethylenepropylene)是四氟乙烯和六氟丙烯共聚物, 来自美国杜邦公司; THV(tetrafluoroethylene-hexafluoropropylene-vinylidene)为美国Dyneon公司生产的四氟乙烯、六氟丙烯、偏氟乙烯三元共聚物.

为了赋予FEP/THV/FEP复合膜以稳定的驻极体性能, 通过电晕注极和热注极两种方式的组合对复合膜进行充电. 电晕注极装置如图1(a)所示, 直流稳态高压电场由常州扬子电子有限公司生产的YD2665型耐压测试仪提供. 热注极时, 在图1(b)所示装置的

样品表面盖一铝片, 并与上电极相连接, 在维持一定电场强度的条件下, 给样品升温. 为了测量样品的电荷存储稳定性, 注极后的样品被保存在恒温恒湿干燥箱中, 存储条件为: 温度 25°C , 相对湿度 45% .

1.2 驻极体膜表面电场的测量

注极后的FEP/THV/FEP复合膜驻极体表面电场的大小采用表面电位表征. 表面电位测量采用Guatek公司生产的PG201W可移动半自动化操作平台. 其中静电计为美国TREK公司生产的347系列静电计, 测量区间 $\pm 3\text{ kV}$, 采用非接触补偿法测量. 测试台规格: 行程 $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$, 解析度 $0.5\text{ }\mu\text{m}$, 精度 $\pm 7\text{ }\mu\text{m}$; 重复性 $\pm 4\text{ }\mu\text{m}$. 测量时静电计探头与样品表面距离保持在 2.0 mm .

1.3 能量采集器的构建

基于驻极体的多气隙微振动能量采集器是将如图2所示的结构放置在特定框架中构成. 具体制备过程为: 利用3D打印技术制成器件框架, 框架材料采用聚乳酸(ploy(lactic acid), PLA)树脂, 整体尺寸为 $4\text{ cm}\times 4\text{ cm}\times 8\text{ cm}$, 壁厚为 0.3 cm ; 先在框架内部底座固定一片厚度为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的铜片作为工作电极, 然后在电极上安装4个微型金属弹簧(弹性系数 25 N mm^{-1}); 依次放置驻极体薄膜和金属弹簧, 最后在弹簧上放置工作电极; 以此类推, 形成多气隙结构. 器件参数为: 驻极体膜和电极(铜片)面积根据实验需要设定, 电极与驻极体膜距离(弹簧高度)为 3 mm . 图2为不同气隙结构示意图.

1.4 能量采集器输出性能测量

微振动能量采集器输出性能测试系统主要由振动发生、微弱电信号测量和波形检测3部分构成, 整

图1 (网络版彩色)注极实验装置示意图. (a) 电晕注极; (b) 热注极

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of charging device. (a) Corona charging; (b) thermal charging

图2 (网络版彩色)多气隙微振动能量采集器结构示意图. (a) 单气隙; (b) 双气隙; (c) 四气隙; (d) 多气隙

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of micro-vibration-driven energy harvester. (a) Single-air-gap; (b) double-air-gaps; (c) four-air-gaps; (d) multi-air-gaps

体结构如图3所示. 振动发生装置利用英国Piezotest公司生产的PM300精密压电测试仪(High-precision PiezoMeter System)的振动台, 该振动台可产生频率范围30~300 Hz、振幅范围0~10 mm、作用力范围为0.05~0.5 N的振动源. 微弱电信号测量装置利用美国Keithley公司生产的6517B静电计, 直流电流测量范围为10 nA~20 mA、直流电压测量范围1 μ V~100 V. 测试前, 先将能量采集器置于振动台夹具中, 根据器件高度调节上下夹具距离. 在外加负载电阻为55 M Ω 情况下, 记录不同频率和振动强度下的输出性能.

2 多气隙驻极体微振动能量采集器能量采集原理分析

图4(a)为四气隙驻极体微振动能量收集器的电路图. 其核心部分为图4(b)~(e))所示的“工作电极/驻极体薄膜/工作电极”构成的三明治双气隙结构单元, 四气隙结构为双气隙单元叠加而成. 本研究所用的驻极体薄膜为课题组前期研制的双极性复合驻极体

膜, 在驻极体的上下表面能表现出相异的电极性^[17]. 在双气隙单元中, 上下两片工作电极在驻极体膜电场的诱导下, 能感应出不同极性的电荷, 这样驻极体膜与上下工作电极之间就等效为二个串联的可变电容器, 四气隙结构就等同于4个串联的可变电容器. 当外加驱动力如振动使驻极体膜与工作电极之间发生相对位移时, 在工作电极极板上的感应电荷量会发生变化. 驻极体薄膜与工作电极相对距离减小时, 电荷变化量 ΔQ 为正值, 反之则为负值. 将上下工作电极用导线引出时, 在外电路上就会维持一定的电势差, 并有电流流过, 完成微振动能向电能的转换. 当驻极体膜发生循环振动时, 在外接电路中形成的是交流电, 其波形如图4(e)所示. 通过整流芯片, 可实现直流电的连续输出.

在单气隙情况下, 其输出电流 I 计算式推导如下:

$$I = \frac{\partial Q(t)}{\partial t} = V \frac{\partial C(t)}{\partial t}, \quad (1)$$

其中 V 为驻极体膜表面电位. $C(t)$ 为可变电容随时间

图3 (网络版彩色)微振动能量采集器输出性能测试系统

Figure 3 (Color online) Output characteristics measuring system for energy harvester

变化的电容值:

$$C(t) = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{g(t)}, \quad \frac{\partial Q(t)}{\partial t} = \epsilon_0 \epsilon_r S g(t)^{-2} \frac{\partial g(t)}{\partial t}, \quad (2)$$

S 为工作电极的面积. ϵ_0 和 ϵ_r 为真空和气隙层材料的相对介电常数,在本研究中气隙层为空气,因此 $\epsilon_r \approx 1$.将(2)式代入,并当气隙距离 $g(t)$ 的变化服从 $g(t) = g_0 \sin(2\pi ft)$ 时,式(1)可表示为

$$I = \frac{-2\pi f V S \epsilon_0 \epsilon_r \cos(2\pi ft)}{g_0 \sin^2(2\pi ft)}. \quad (3)$$

由式(3)可得出,采集器输出电流与驻极体膜面积 S 和表面电位 V 成正比,并具有线性相关性.采集器输出电流与工作电极间的距离 g_0 成反比.

当系统的负载电阻为 R 时,单气隙结构的输出功率可用如下公式计算:

$$P = I^2 R. \quad (4)$$

3 采集器输出特性测试结果和分析

3.1 驻极体电场稳定性

前期双气隙结构能量采集器的实验结果已经表明,驻极体薄膜的表面电位高低和稳定性是决定驻极体基微振动能量采集器输出特性的关键因素^[17].面积为4 cm×4 cm的驻极体膜表面电位稳定性和电位分布测试结果列于图5.其中,图5(a)为充电后500 h内的平均表面电位跟踪测试结果.结果显示,在充电后前150 h内,表面电位会发生一定程度的衰减,之后趋于稳定.图5(b)显示,充电后5 h内充电面和非充电面的平均表面电位分别是-3412和3315 V.图5(c)为存储350 h后测得的平均表面电位,充电面和非充电面的表面电位值分别为-1420和1640 V,显示出非常好的静电场稳定性.由图5(b)和(c)还可看出,充电后5 h内,除膜的边缘电场较弱外,大部分区域静电

图4 (网络版彩色)四气隙能量采集器电路图(a)和双气隙能量采集过程示意图((b)~(e))

Figure 4 (Color online) Circuit of micro-vibration-driven energy harvester with four air gaps (a) and the schematic diagram of the process converting micro-vibration energy into electricity ((b)~(e))

图5 (网络版彩色)双极性驻极体膜充电后的表面电位变化. (a) 双极性驻极体膜上、下表面的平均表面电位随存储时间的变化; (b) 充电后 5 h 驻极体膜上、下表面的电位分布图; (c) 充电后 350 h 驻极体膜上、下表面的电位分布图

Figure 5 (Color online) Surface potential of dipolar electret membrane as a function of storage time. (a) The average surface potential on the top and bottom surface of electret membrane as a function of storage time; (b) 5 h after charged, the distribution of surface potential on the top and bottom surface of electret membrane; (c) 350 h after charged, the electret potential distribution on the top and bottom surface of electret membrane

场分布均匀. 随着存储时间的延长, 表面电位整体分布趋于均匀.

3.2 杰出的电荷采集性能和稳定性

为了研究驻极体电场对输出功率的影响, 在外加负载电阻为55 MΩ情况下, 测定了驻极体膜的表面电位大小和面积对能量采集器输出功率的影响. 由于四气隙需两片双极性驻极体薄膜, 4个面的表面电位都不完全相同, 为直观地反映驻极体静电场的影响, 采用加权平均法对表面电位进行取值, 即平均表面电位: $U = (|U_1| + |U_2| + |U_3| + |U_4|) / 4$. 其中, 表面电位 U_1 , U_2 , U_3 和 U_4 是对薄膜表面一定面积扫描后得到的平均值. 当振动强度 $F=0.5$ N时, 对驻极体膜的表面电位大小对能量采集器输出功率测试结果表明, 随着表面电位的增加, 输出功率显著增加. 当驻极体膜表面电位为600, 1150和2150 V时, 输出功率分别为1.60, 15.05和59.12 μW. 表面电位从600~2150 V增加3.6倍时, 输出功率从1.60 μW增加到59.12 μW, 增加了37倍.

在保持同样的测试条件下, 测试了四气隙结构驻极体薄膜面积对输出功率的影响. 为保证实验结果的可比性, 大小不同的薄膜来自同一样品, 其表面电位的均值为 2100 ± 50 V. 测试结果表明, 随薄膜面积的增加, 最大功率显著增加. 当薄膜面积为2 cm×2 cm, 3 cm×3 cm和4 cm×4 cm时, 输出功率分别为10.05, 30.18和59.12 μW. 薄膜面积增大4倍时, 其输出功率增加了近6倍. 器件功率随驻极体膜表面电位

和驻极体膜面积增加的原因可以归结为驻极体膜与采集电极之间可变电容的电容增加所致. 由于驻极体膜表面电位的增加和面积的增大, 工作电极上的感应电荷量增加, 采集器工作过程中电容变化量增加, 因而功率增大.

为了评估多气隙结构能量采集器的工作稳定性, 测试了采用面积为4 cm×4 cm、表面电位为2150 V的驻极体膜组装而成的四气隙结构能量采集器的输出功率随存储时间的变化. 结果表明, 组装60 d后, 在外加负载电阻为55 MΩ情况下, 经1000多次振动测试后, 输出功率由刚组装时的59.12 μW, 变为58.26 μW, 仅衰减了0.86 μW, 显示出了非常好的稳定性.

3.3 振动强度对输出特性的影响

影响能量采集器输出特性的因素很多, 其中外界环境提供给采集器的振动强度是一个重要因素. 为此在保持微振动系统振动幅度不变的情况下, 在谐振频率处, 测定了振动强度对采集器开路电压和电流的影响, 结果如图6所示. 为确保不同数量气隙下实验结果的可比性, 不同气隙结构中驻极体膜的表面电位控制在 1200 ± 50 V范围内. 图6显示, 开路电压和电流都随振动强度的增加而增大, 随气隙数的增加而增加, 呈现正线性相关性. 开路电压和电流随驱动力的增加而提高, 并具有线性相关性. 图6的结果表明, 随气隙数增加, 斜率增大, 这说明提高幅度增大. 气隙数的增加, 对电流的影响比电压更敏感.

图6 (网络版彩色)振动强度对能量采集器输出短路电流(a)和开路电压(b)的影响

Figure 6 (Color online) Influence of vibration intensity on short-circuit current (a) and open-circuit voltage (b) of harvester

显然, 这是开路电压与内阻有关所致.

3.4 能量采集器输出特性与振动频率的相关性

不同气隙结构能量采集器在不同振动强度作用下开路电压与振动频率的关系如图7所示. 由图可看出, 在频域30~180 Hz范围内, 存在一个最大开路电压和短路电流, 此时的频率称为谐振频率. 在谐振频率两侧, 开路电压很低. 由图7结果还可看出, 随振动强度的增加, 谐振频率向低频方向移动. 单气隙和双气隙结构, 共振峰位左移明显, 而四气隙位移很小. 其原因可能是当驱动力和振幅保持不变的情况下, 引起弹簧形变所致. 单气隙和双气隙器件的气隙数量少, 在同样的振动强度和振幅作用下, 引起弹簧形变的程度大, 因此共振频率位移明显. 而对四气隙而言, 同样的振动强度和振幅被分散给4个气隙, 弹簧形变程度就小, 因而共振频率位移小. 而且, 弹簧的形变还可能引起驻极体膜与工作电极之间所形成

图7 (网络版彩色)不同振动强度作用下开路电压随振动频率的变化. (a) 单气隙; (b) 双气隙; (c) 四气隙

Figure 7 (Color online) Open-circuit voltage as a function of vibration frequency under different vibration intensity. (a) Single-air-gap; (b) double-air-gap; (c) four-air-gap

的可变电容的电容值及工作电极上感应电荷量的变化速度发生改变.

为进一步考察影响谐振频率的因素, 在外加振动强度 $F=0.5\text{ N}$ 时测定了单气隙、双气隙和四气隙微振动能量采集器的振动频率与短路电流 I 或开路电压 U 之间的相关性, 结果示于图8. 为确保不同气隙数量下实验结果的可比性, 不同气隙结构中驻极体膜

图8 (网络版彩色)短路电流(a)和开路电压(b)随振动频率的变化
Figure 8 (Color online) Short circuit current (a) and open-circuit voltage (b) as a function of vibration frequency

的表面电位控制在 1200 ± 50 V范围内. 由图8可以看出, 相同气隙采集器的开路电压和短路电流值在测量频域30~180 Hz范围内的谐振频率相同. 以四气隙为例, 在短路电流和开路电压的峰值 $1.9 \mu A$ 和 126.3 V处, 谐振频率都是 $f=97$ Hz. 这一结果显示, 短路电流和开路电压随振动频率的变化是同步的. 图8结果还显示, 单气隙、双气隙和四气隙的谐振频率分别在100, 103, 97 Hz处, 说明不同气隙采集器的谐振频率差异很小.

为了考察气隙之间振动弹簧的弹性对谐振频率的影响, 测定了不同气隙条件下弹簧压缩尺寸对短路电流的影响, 结果如图9所示. 由于在单气隙情况下, 弹簧压缩尺寸变化量在微米量级时, 短路电流的变化就不稳定. 另外, 双气隙和四气隙采集器而言, 弹簧压缩尺寸变化太大时, 短路电流的变化也变得不稳定. 因此, 图9只列出了双气隙和四气隙采集器在弹簧压缩尺寸1 mm时的测试结果. 由图9可看出, 弹簧被压缩1 mm时, 双气隙采集器的谐振频率由未

图9 (网络版彩色)不同弹簧压缩尺寸下短路电流随振动频率的变化. (a) 双气隙; (b) 四气隙
Figure 9 (Color online) Short-circuit current as a function of vibration frequency under different spring size. (a) Double-air-gap; (b) four-air-gap

压缩时的65 Hz移动到100 Hz, 移动了35 Hz; 最大短路电流从 $0.33 \mu A$ 增加到 $0.51 \mu A$, 增加了 $0.18 \mu A$. 四气隙采集器的谐振频率由未压缩时的75 Hz移动到100 Hz, 移动了25 Hz; 最大短路电流从 $0.73 \mu A$ 增加到 $1.38 \mu A$, 增加了 $0.65 \mu A$. 采集器弹簧压缩尺寸对谐振频率及对应的最大短路电流的影响非常敏感, 弹簧压缩时谐振频率向高频方向移动, 最大短路电流增加.

压缩时的65 Hz移动到100 Hz, 移动了35 Hz; 最大短路电流从 $0.33 \mu A$ 增加到 $0.51 \mu A$, 增加了 $0.18 \mu A$. 四气隙采集器的谐振频率由未压缩时的75 Hz移动到100 Hz, 移动了25 Hz; 最大短路电流从 $0.73 \mu A$ 增加到 $1.38 \mu A$, 增加了 $0.65 \mu A$. 采集器弹簧压缩尺寸对谐振频率及对应的最大短路电流的影响非常敏感, 弹簧压缩时谐振频率向高频方向移动, 最大短路电流增加.

4 结论

本文提出的基于多气隙结构的驻极体基微振动能量采集器, 其核心部分为“工作电极/驻极体薄膜/工作电极”构成的三明治型双气隙单元, 四气隙结构为双气隙单元叠加而成. 对构建的多气隙结构微振动能量采集器的输出特性测定结果表明, 在振动频域30~180 Hz范围内, 存在一个最大输出功率, 相应的频率称为谐振频率, 在谐振频率两侧的低频和低频区, 开路电压和短路电流都相对较低, 因而输出功率很小.

实验结果与理论分析均表明,最大开路电压和短路电流与振动强度、驻极体面积和电场及气隙数呈正相关性.最大开路电压和短路电流与振动强度具有线性相关性.当振动强度为0.5 N时,四气隙结构能量采集器在谐振频率97 Hz处的最大开路功率为236.47 μW ,在

负载电阻为55 M Ω 时,最大输出功率为59.12 μW .

谐振频率随振动强度的增加,向低频方向移动,单气隙采集器移动幅度最大,四气隙采集器移动幅度很小.谐振频率对采集器弹簧压缩尺寸的变化非常敏感,但气隙数不同时差异很小.

参考文献

- 1 Wang Z L. Sustainable self-sufficient power source for micro/nano-systems: A new field in energy research (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2011, 55: 2472–2475 [王中林. 微纳系统中的可持续自供型电源: 能源研究中的新兴领域. 科学通报, 2011, 55: 2472–2475]
- 2 Zhang Z, Liao Q L, Yan X Q, et al. Schottky junction based self-powered photodetectors and their performance modulation by multifield coupling effect (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 1276–1287 [张铮, 廖庆亮, 闫小琴, 等. 肖特基型自驱动光电探测器件及其多场耦合性能调控. 科学通报, 2016, 61: 1276–1287]
- 3 Suzuki Y, Miki D, Edamoto M, et al. A MEMS electret generator with electrostatic levitation for vibration-driven energy-harvesting applications. *J Micromech Microeng*, 2010, 20: 104002
- 4 Yang Z H, Wang J, Zhang J W. A high-performance micro electret powergenerator based on microball bearings. *J Micromech Microeng*, 2011, 21: 065001
- 5 Xia Z F. Electret (in Chinese). Beijing: Science Press, 2001 [夏钟福. 驻极体. 北京: 科学出版社, 2001]
- 6 Yang B, Lee C, Kotlanka R K. A MEMS rotary comb mechanism for harvesting the kinetic energy of planar vibrations. *J Micromech Microeng*, 2010, 20: 065011
- 7 Lo H, Whang R, Tai Y C. A simple micro electret power generator. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, Hyogo, Japan, 2007. 859–862
- 8 Kong W, Cheng L, He X, et al. Electret-based microfluidic power generator for harvesting vibrational energy by using ionic liquids. *Microfluid Nanofluid*, 2015, 18: 1299–1307
- 9 Zhong J W, Zhang Y, Zhong Q Z, et al. Fiber-based generator for wearable electronics and mobile medication. *ACS Nano*, 2014, 8: 6273–6280
- 10 Basset P, Galayko D, Paracha A M, et al. A batch-fabricated and electret-free silicon electrostatic vibration energy harvester. *J Micromech Microeng*, 2009, 19: 115025
- 11 Naruse Y, Matsubara N, Mabuchi K. Electrostatic micro power generation from low-frequency vibration such as human motion. *J Micromech Microeng*, 2009, 19: 094002
- 12 Perez M, Boisseau S, Gasnier P, et al. A cm scale electret-based electrostatic wind turbine for low-speed energy harvesting applications. *Smart Mater Struct*, 2016, 25: 045015
- 13 Wang F, Hansen O. Electrostatic energy harvesting device with out-of-the-plane gap closing scheme. *Sensor Actuat A Phys*, 2014, 2: 131–137
- 14 Hillenbrand J, Pondrom P, Sessler G M. Electret transducer for vibration-based energy harvesting. *Appl Phys Lett*, 2015, 106: 1–4
- 15 Chen G J, Li Y F, Xiao H M, et al. A micro-vibration-driven energy harvester based on a flexible bipolar electret membrane with high output power. *J Mater Chem A*, 2017, 5: 4150–4155
- 16 Chen G J, Lei M F, Xiao H M, et al. Unique charge storage characteristics of FEP/THV/FEP sandwich electret membrane polarized by thermally charging technology. *Chin Phys Lett*, 2014, 31: 127702
- 17 Xiao H M, Chen G J, Chen X M, et al. A flexible electret membrane with persistent electrostatic effect and resistance to harsh environment for energy harvesting. *Sci Rep*, 2017, 7: 8443

Summary for “一种基于双极性驻极体的多气隙结构微振动能量采集器”

A bipolar electret-based micro-vibration-driven energy harvester with multi-air-gap structure

Chao Li, Gangjin Chen^{*}, Xumin Chen, Qinghe Zhang & Xuan Zhu

Laboratory of Electret and Application, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

^{*} Corresponding author, E-mail: cgjin@hdu.edu.cn

Micro mechanical energy harvester as a kind of micro power source for micro electro mechanical systems (MEMS) has been paid considerable attention. Electret-based vibration energy harvester (E-MVEH) has been a research highlight due to its high sensitivity, simplicity and compatibility to the fabrication process of MEMS. In this manuscript, a novel E-MVEH with multiple-air-gap structure based on bipolar electrets is comparatively investigated. The E-MVEH with single-air-gap structure consists of an electret membrane (EM) with an electrode on one surface and a counter-electrode supported by means of micro-springs. The E-MVEH with double air gaps is made of a bipolar electret membrane put in the middle of two counter-electrodes that are supported by means of micro-springs. It is essentially equivalent to two variable capacitors in series. The E-MVEH with four air gaps consists of two double-air-gaps E-MVEH in parallel connection. When an external vibration causes a relative displacement between the electret membrane (EM) and the counter-electrode, the capacitance varies, leading to re-organization of the charges on the counter-electrode. Thus, an alternating current is generated and the vibration energy is converted into electric energy. This alternating current can be changed into direct current through a full bridge rectifier.

The bipolar EM used in this study is a sandwich FEP/THV/FEP perfluoropolymer EM reported previously by our group. It can display persistent and strong electrostatic field with both polarities on the top and bottom surface, respectively.

The experimental results of the output characteristic for the proposed E-MVEH show that there exists a resonant frequency in the vibration frequency range of 30–180 Hz, at which the open-circuit voltage and short-circuit current and hence the output power reach their respective maximum. The resonant frequency moves towards the low frequency with increasing vibration intensity, whereas the effect of air-gap number on the resonant frequency is rather small. On the basis of experimental results and theoretical analysis, the maximum output power is positively correlated to the vibration driving force, the surface potential and the area of the electret membrane, and the air-gap number. When the surface potential of the electret membrane is 1200 ± 50 V, the maximum output power is only $0.19 \mu\text{W}$ for single-air-gap structure and reaches $27.02 \mu\text{W}$ for the four-air-gap structures under a vibration driving force of 0.5 N and a load resistance of $55 \text{ M}\Omega$. For the four-air-gap structures, the maximum output power increases to $59.12 \mu\text{W}$ when the surface potential of the electret membrane increases to 2150 V . The multi-air-gap energy harvester fabricated with bipolar electret membrane can produce larger variable capacitance; therefore, the output power is significantly enhanced. This novel E-MVEH provides an up-to-date strategy for the design of self-powered sensor systems.

self-driven power supply, micro-vibration energy harvester, electrets, multiple variable capacitor structure

doi: 10.1360/N972018-01054