



驻极体式微型发电机的研究进展

杨兆辉, 王婧, 张锦文*

北京大学微电子学研究院, 微米/纳米加工技术国家级重点实验室, 北京 100871

* E-mail: zhangjinwen@pku.edu.cn

收稿日期: 2011-06-23; 接受日期: 2011-11-16

国家重点基础研究发展计划(“973”计划) (批准号: 2009CB320300)资助项目

摘要 随着电子系统的尺寸不断减小, 研制体积小、重量轻、能量密度高并且能够持续供能的微型发电机将对电子系统具有重要意义. 振动能在日常环境中广泛存在, 振动能微型发电机是将振动能转化成能给电子系统供能的装置. 驻极体式微型发电机是振动能采集微型发电机的一种, 是目前微能源研究的热点之一. 本文主要从驻极体材料及注极方法、振动能拾取方式和转换效率的提高 3 个方面介绍了驻极体式微型发电机的最新进展.

关键词

驻极体
微型发电机
振动能采集

1 引言

随着电子系统的尺寸不断减小, 研制体积小、重量轻、能量密度高并且能够持续供能的微能源系统将对电子系统具有重要的意义. 微能源技术具有多学科交叉的特点, 其涉及材料学、电磁场学、热力学、机械、和空气动力学等多门学科, 因此, 它的发展也会带动相关学科在微尺度领域中的快速发展. 微能源主要分为自身能量消耗式和环境能量拾取式微型发电机两大类. 自身能量消耗式微型发电机的种类很多, 主要包括微型化学能电池^[1]、微型锂电池^[2]和微型燃料电池^[3]等. 它们具有比能量高、电压高和工作温度范围宽等优点. 但是, 其需要更换或是进行燃料的补充, 这在一些应用场合是难以达到或是不可能实现的, 例如植入和分布式网络系统. 环境能量拾取式微型发电机是把环境中的能量源转化成电子系统能应用的电能, 主要包括微太阳能电池^[4]、微型热电池^[5]和微型振动式发电机^[6]等. 这些环境能量不仅可可持续再生, 增加了网络的使用寿命或者网络容量, 而且经济、安全和环保.

微型振动式发电机主要利用电磁、静电、压电等效应, 通过振动能拾振装置将外部的机械振动能转换成电能, 适用于各种存在振动的环境中, 可为无线传感器节点或低功耗微型电子设备供电. 根据能量转换原理的不同, 微型振动式发电机分为电磁式、压电式、静电式 3 种类型^[7-10]. 电磁式微型发电机是利用电磁感应现象, 将机械能转化为电能, 通常利用永磁体和导体之间的相对运动产生电能. 其最为常用和成熟, 但电压值很小, 须增加线圈数或者是增大磁场来提高电压, 但是这两者都会受到芯片的尺寸限制. 压电式微型发电机是利用压电材料受到压力作用时会在两端面间出现电压的性质将机械能转化为电能. 其功率密度较大, 但是串联阻抗大. 静电式微型发电机是通过改变电容来产生电能. 三者相比, 无论结构还是材料前两者都难以与微加工工艺兼容. 而静电式功率密度中等, 其微型可变电容可以通过相对成熟的硅微加工技术制作.

从 20 世纪末开始, 机械、电气、材料等领域的很多研究人员展开了对微型振动式发电机的探索研究^[11-17]. 驻极体式微型发电机是静电式发电机中的

研究热点,它是利用驻极体在电容之间产生原始电压差,存储着一定电荷量的电容在振动激励下产生相对位移,实现电荷的流动,即通过改变电容将振动能产生电能.这种发电机的优点是无需外加电源,并且易于用微加工工艺制作.本文将从驻极体材料及注极方法、振动能拾取方式、转换效率的提高等3个方面阐述驻极体式微型发电机的研究现状和发展趋势.

2 驻极体及注极方法

驻极体是指能够长期存储空间电荷和(或)偶极电荷的电介质材料,主要通过光在热的条件下对电介质两端施加高电场或者通过电晕和电子束注入等方式使驻极体表面沉积电荷.驻极体分为有机驻极体和无机驻极体.有机驻极体具有电荷密度高、稳定性好等优点,因此研究初期驻极体式发电机主要集中在有机驻极体,主要包括聚四氟乙烯(PTFE,俗称特氟龙 Teflon)、氟化乙丙烯共聚物(FEP)和聚偏氟乙烯(PVDF)等.其中, Teflon 是一种典型的有机驻极体,它不仅电荷密度及稳定性高,而且即使在高湿环境下,沉积电荷也能显示长寿命,常用在驻极体式微发电机中^[18].

2005 年,日本东京大学提出的一种全氟树脂(CYTOP)为驻极体材料的发电机^[19].该发电机采用高性能的聚合驻极体材料 CYTOP 提供电荷. CYTOP 材料与 Teflon AF 相比它的优点在于: 1) CYTOP 有更大的击穿电压,为 110 kV/mm,所以表面电荷密度的理论限制是 Teflon AF 的 5 倍; 2) 很容易制作厚度为 20 μm 的 CYTOP 薄膜; 3) CYTOP 材料和 MEMS 工艺相兼容.他们最近报道是在 CYTOP 薄膜里添加硅烷耦合试剂,得到 1.5 mC/cm^2 的高表面电荷密度,是 Teflon AF 的 3 倍,在 20 Hz 振动频率下,得到 0.7 mW 的功率,是之前报道的 2.5 倍^[20]. 2008 年, Lo 等人^[21]提出二聚对二甲苯(Parylene HT)作为驻极体材料的发电机. Parylene HT 可以在室温下通过化学气相沉积方法得到,并且可以用氧等离子刻蚀图形化,与微加工工艺兼容性较好,它的表面电荷密度为 3.69 mC/m^2 .

Teflon 和 CYTOP 等都属于有机驻极体,虽然性能优异,但是难以图形化,且与 IC 工艺兼容性较差.而硅基无机驻极体(如 SiO_2 和 Si_3N_4)具有高电荷稳定

性并且与标准 IC 和 MEMS 工艺兼容的优点^[22].因其出色的电荷存储性能和电荷保持性能,双层 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 膜驻极体材料得到了较为深入的研究和广泛的应用.热氧化层击穿电压可达 10 MV/cm,其表面电荷密度可达 1.8 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$,可经受较高的温度(例如 300 $^\circ\text{C}$)和湿度(例如 95%RH).针对传统热氧化、APCVD、LPCVD 等工艺生长温度高、生长速率慢、残余应力大及只能生长于耐高温衬底上等问题,本研究组提出使用 PECVD 工艺在玻璃衬底上制备 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 双层驻极体的方法^[23],结果显示其电注极性能与高温生长材料类似.

除了驻极体材料方面的改进,最近在对驻极体电注极方法上也有了新进展. Genda 等人^[24]在 2004 年提出了一种新的对驻极体电注极的方法.普通的电注极方法是电晕电注极法,但它不适用于微型化的驻极体,因为电晕离子不能到达尺寸很小的驻极体表面,如图 1 所示.对于微型驻极体,他们提出应该采用接触电注极的方法.这种方法是在 2 种材料之间完成电荷转移,即将覆盖有一层 SiO_2 驻极体的硅片浸在水银中,在水银与驻极体之间加电,电子从水银转移到了 SiO_2 层,迅速将样品取出完成电注极.这种方法可以对 5 μm 宽的驻极体进行电注极.

普通电晕注极方法及接触注极方法都无法在芯片封装后对驻极体进行电注极.根据这一缺点, Hariwara 等人^[25]开发了一种新的注极方法.他们利用软 X 射线穿透封装外壳实现了 CYTOP 材料的电注极(如图 2(a)所示),注极后的 CYTOP 表面电荷分布均匀性、电荷稳定性和可控性(如图 2(b)所示)都和传统注极方法不相上下.

3 振动能拾取方式

驻极体式微型发电机的振动能拾取结构主要有弹簧或悬臂梁与质量块结构、收集电极与驻极体直接接触结构以及微型球与质量块结构三类.

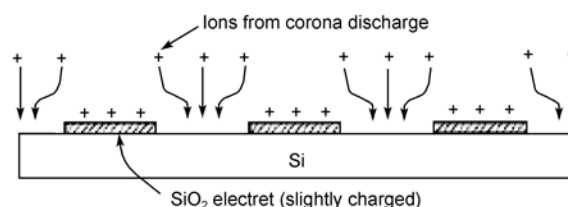


图 1 微型驻极体的电晕电注极过程示意图

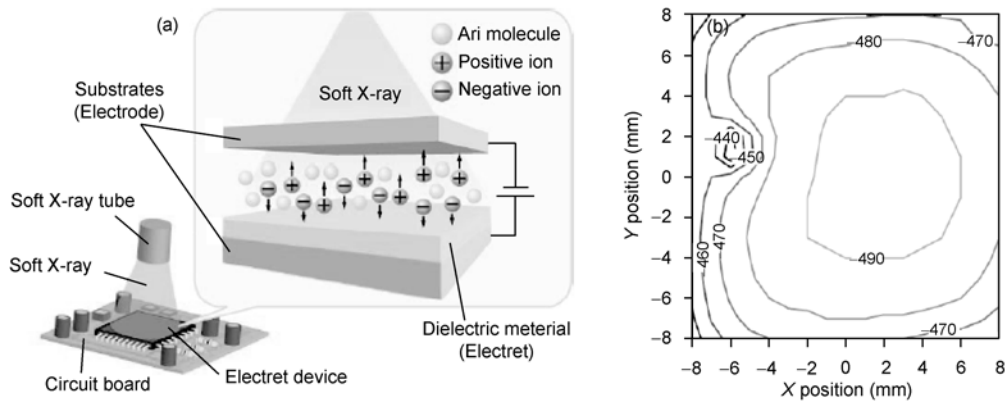


图 2 (a)软 X 射线注极方法示意图; (b) 用软 X 光射线注极方法得到的电势分布图

微型振动式发电机通常采用硅作为结构材料^[26]. 图 3 是 Basset 等人^[27]提出的一种硅弹簧结构的静电式微型发电机, 其特点是结构面积小, 转化能量部分面积只有 $11\text{ mm} \times 6\text{ mm}$. 在频率 250 Hz 、加速度 0.25 g 的共振振动下, 输出功率为 61 nW , 外电路的负载阻抗为 $60\text{ M}\Omega$. 这种弹簧或悬臂梁式发电机只有在共振频率附近才能得到较大的输出功率, 因此它的带宽严重影响它的频率应用范围. 为了增大这类发电机的带宽, Nguyen 和 Halvorsen 提出了一种非线性弹簧结构^[28], 用有限元仿真它的频响曲线, 而实际发

电机正在制作中.

硅等杨氏模量大的材料作为弹簧或悬臂梁结构的微型发电机共振频率比较高, 一般为几百或几千 Hz . 为了拾取较低频率振动能量, 日本东京大学研制出以柔性材料 Parylene(聚对二甲苯)为弹簧的静电式微型振动发电机(如图 4 所示)^[29]. 这种发电机以低频振动为能量来源, 静电换能部分采用基于 MEMS 工艺加工制造. 柔性材料 Parylene 可以有效降低微发电机的工作频率, 同时增大了质量块的移动位移. 该种发电机在 21 Hz 振动下, 得到 0.5 mm 大的位移,

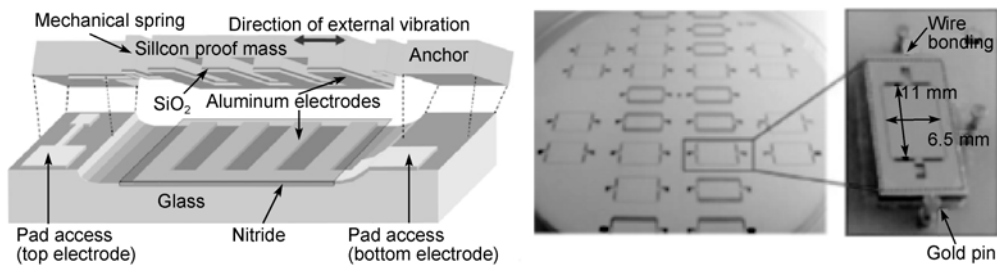


图 3 硅基静电式微型发电机 3D 示意图及实物图

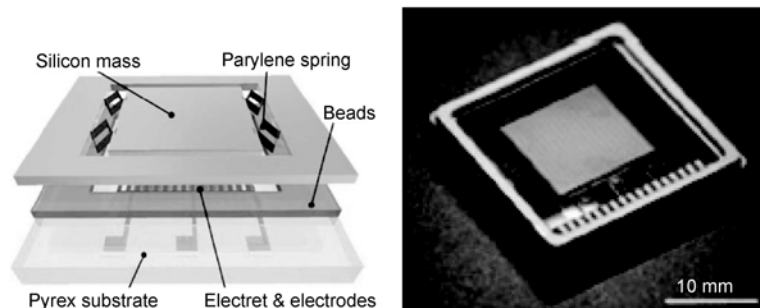


图 4 静电式发电机结构示意图及实物图

输出功率为 $12 \mu\text{W}$ 。

由于微型发电机的尺寸有限, 通过增大质量块质量来增大发电机的带宽是比较困难的. 图 5 是 Kiziroglou 等人^[30]提出的一种新型发电机结构, 采用外加自由旋转金属质量柱解决这个问题. 玻璃衬底上的条形金属电极是可变电容的固定板, 自由旋转金属质量柱是可变电容的可动板. 这种结构的优点是不需要弹簧或悬臂梁结构, 可有效增大位移范围, 克服弹簧或悬臂梁结构位移小的缺点; 在一次运动周期内, 输出几个脉冲波形, 而不是只有一个. 加州理工大学 Hsi-wen Lo 等人^[31]也提出了一种新型结构的驻极体式微型发电机以降低频率及增大工作带宽 (如图 6 所示). 下层玻璃衬底上有数对交叉梳齿金属电极, 在其上面有一层 CYTOP 柔性材料驻极体, 上层玻璃上有金属电极条, 直接放置在驻极体上, 金属电极条感生与所对的驻极体相同的电荷量, 相当于图形化驻极体; 上层玻璃随着外界振动水平运动, 则可看成驻极体的图形化水平运动. 该发电机在 60 Hz 时输出功率为 $2.267 \mu\text{W}$.

Ghodssi 等人^[32]研制了一种微型球作为轴承的制动器, 观察了微型球滚动的动态行为及槽壁的磨损情况, 证明微型球是可动微型器件的理想轴承, 可以提供稳定支撑并减小摩擦阻力. Naruse 等人^[33]将微型球应用到微型发电机中 (如图 7 所示), 不仅适用于低频且带宽大, 而且避免软梁导致的静电吸合问题. 它

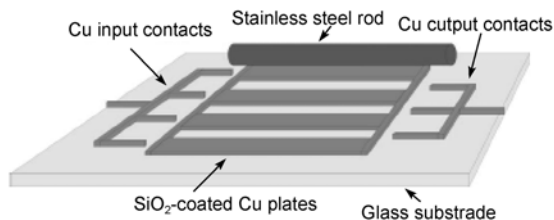


图 5 自由旋转质量柱式发电机

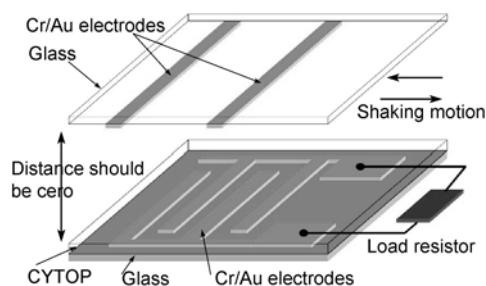


图 6 Hsi-wen Lo 等人提出的发电机

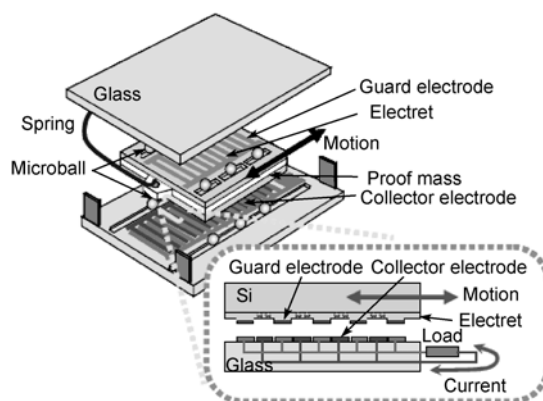


图 7 低频微型静电式结构示意图

以玻璃作为衬底材料, 用激光方法刻蚀深槽, 将微型球放置于槽内, 通过槽的深度控制驻极体与金属电极之间的间距. 这种微型发电机能提供的最大位移为 15 mm , 在低频振动 (2 Hz) 下, 振动加速度为 0.4 g 时, 输出功率为 $40 \mu\text{W}$. 本研究组提出一种全硅衬底的微型球支撑驻极体式微发电机^[34] (如图 8 所示). 其用微型球作为支撑代替悬臂梁结构; 基于硅各向异性腐蚀形成 (111) 晶面侧壁 V 型深槽, 由于该晶面光滑, 微型球在其上滚动可以减小摩擦, 能被极微弱的振动激励, 提高振动灵敏度. 同时, 这种结构没有共振频率, 可以跟随意频率随其振动, 增加工作带宽. 在频率为 20 Hz , 加速度为 0.7 g 时, 输出功率为 $5.93 \mu\text{W}$; 其工作频率低至 1 Hz , 带宽至少为 $1 \sim 100 \text{ Hz}$, 并可拾取加速度低至 0.05 g 的微弱振动.

弹簧或悬臂梁与质量块结构的驻极体式发电机的特点是在共振频率附近可以放大振动幅度, 得到较高的输出功率. 但在其他频率端, 它的振动幅度很

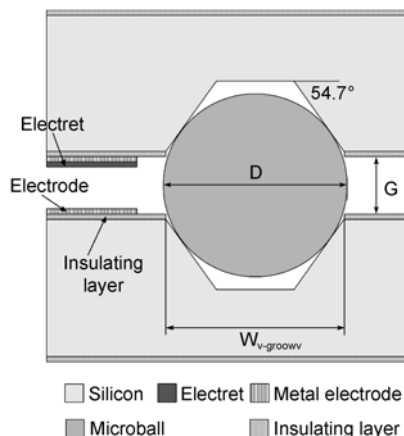


图 8 V 型槽处截面图

低, 拾取的能量很低或几乎拾取不到能量. 以硅等杨氏模量大的材料为弹簧或悬臂梁的微型发电机的共振频率一般很高, 为几百或几千 Hz, 适合应用于高频分量大的环境中, 如机床、汽车引擎及火车等, 而普通环境下高频分量比较少. 以 Parylene 等人杨氏模量小的柔性材料为弹簧或悬臂梁的微型发电机的共振频率可以降低到几十 Hz, 幅度可以达到亚毫米量级, 而微型球与质量块结构可以在几 Hz 下拾取能量, 位移可以达到毫米甚至十几毫米, 适用于日常生活等低频分量大的环境中.

4 转换效率的提高

提高输出功率是发电机始终如一的研究热点, 各国研究人员在这方面做了大量努力, 主要思路包括提高电容的变化量、减小振动时的静电阻力以及平面内多方向拾取能量等.

电容的变化量是影响发电机输出功率即振动能转化成电能的效率的主要因素之一. 为了在有限的体积中提高电容的变化量, 进而提高其转换效率, Sterken 等人^[35]分别在 1999 年和 2001 年提出了一种梳齿状平动可变电容器的驻极体式微型发电机. 梳齿状平面可变电容器被驻极体极化, 带有一定电荷. 当振动块相对于固定端运动引起电容极板间距离的变化改变了梳齿电容值, 引起电容极板的电荷通过外电路在动静梳齿极板之间的重新分布, 外电路上形成电流. 梳齿电容可以在较小面积下增大电容值, 提高发电机的输出功率, 并提高其转换效率. 但是由于工艺造成的梳齿结构不对称, 加上梳齿上的静电力很大, 以至梳齿偏离平衡位置后很容易在静电力作用下发生变形, 甚至产生静电吸合现象. Zhang 等人^[36]在普通梳齿结构上进一步改进提高输出功率(如图 9 所示). 首先用多层梳齿电容-质量块结构堆叠在一起, 而后在结构中间嵌入金属块增加质量块的密度. 保证在发电机体积相同的条件下, 这种新型结构相对于 DRIE 刻蚀方法得到的传统单层硅结构具有更高的电容值及输出功率.

唐彬等人^[37]对梳齿状质量块(电极)的驻极体微型发电机进行了计算和模拟分析. 通过理论计算, 优化了影响发电机性能的主要结构参数, 这些参数包括叉指个数、间隙、驻极体厚度. 考虑到工艺可实现的情况, 当叉指的个数是 50, 叉指的宽度是 100 μm ,

驻极体面电荷密度为 0.4 mC/m^2 , 上电极与驻极体之间的间隙是 5 μm , 驻极体的厚度是 10 μm 时, 在共振频率为 100 Hz, 振幅为 100 μm 时, 最大输出功率为 250 μW .

在振动能转换为电能的过程中, 收集电极与驻极体之间的静电力会阻碍它们之间的相对位移, 减小电容的变化量, 进而影响发电机的输出功率. Miki 等人^[38]设计了一种相位相差 180° 的收集电极结构(如图 10 所示), 以有效地减小收集电极与驻极体之间的静电力, 从而提高动能的转换效率. 该结构两侧与中间的收集电极金属条数相同, 相位相差 180°. 当收集电极随着外界的振动左右运动时, 两侧与中间的静电力正好大小相等方向相反, 抵消了阻碍收集电极运动的静电力, 因此增大了运动位移, 更大的电容变化量能提高发电机的输出功率. 在振动频率为 63 Hz, 加速度为 2 g 时, 此发电机的输出功率为 1 μW . Tsutsumino 等人^[39]在驻极体之间加入金属电极, 减小收集电极与驻极体之间的间隙引起的边缘电场的影响, 从而增大电容变化量(如表 1 所示).

当外界振动方向与微型发电机的质量块运动方向一致时, 才能有效地提取振动能; 而当两者之间有一定的角度时, 只有质量块运动方向上的振动能分

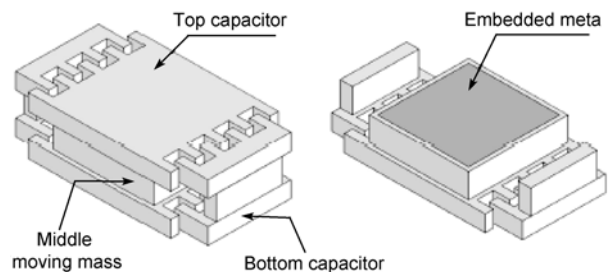


图 9 Zhang 等人制作的发电机示意图

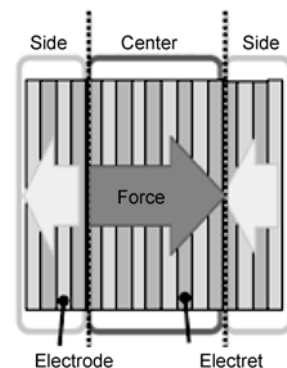


图 10 发电机的收集电极结构

表 1 有金属电极、无金属电极及理论值的电容变化量的对比

Area overlap	Electrode with metal (pF)	Electrode without metal (pF)	Theoretical value (pF)
100%	39.8	22.4	17.7
0%	25.4	2.3	0.0

量才能被拾取, 其他方向的振动能量会损失掉. Hoffmann 等人^[40]提出了一种可自动调整方向的微型发电机模型. 当外界振动方向与质量块的运动方向有一定夹角时, 这个微型发电机可自我纠正角度, 使质量块的运动方向与振动方向一致, 从而使发电机的效率最大化. 当发电机的体积为 8 cm^3 , 质量块为 100 g , 封装质量为 100 g , 振动方向与质量块的运动方向夹角为 50° 时, 这个发电机模型需要用 5 s 纠正角度, 使运动方向与器件装置振动方向一致. Yang 等人^[41]提出了一种可拾取二维平面内各个方向振动的微型发电机, 其 1/6 结构示意图和实物图如图 11 所示. 这个发电机系统由 6 个阶梯形弹簧及 12 对梳齿电容组成, 在 SOI 衬片上用反应离子深刻蚀(DRIE)技术得到所需结构, 结构的体积为 $7.5\text{ mm}\times 7.5\text{ mm}\times 0.7\text{ mm}$. 在 110 Hz 的振动频率和 2.5 g 的加速度下, 可以获得 $0.35\text{ }\mu\text{W}$ 的输出功率.

5 总结

振动能在日常环境中广泛存在, 微型振动式发电机不仅体积小、能量密度大、寿命长, 而且经济、安全和环保. 驻极体式微型发电机无需外加电源、结构简单且易于小型化, 相对于压电式及电磁式发电机具有更好的微加工工艺兼容性, 可作为低功耗电子系统和无线传感网络的供能装置, 是一种非常有

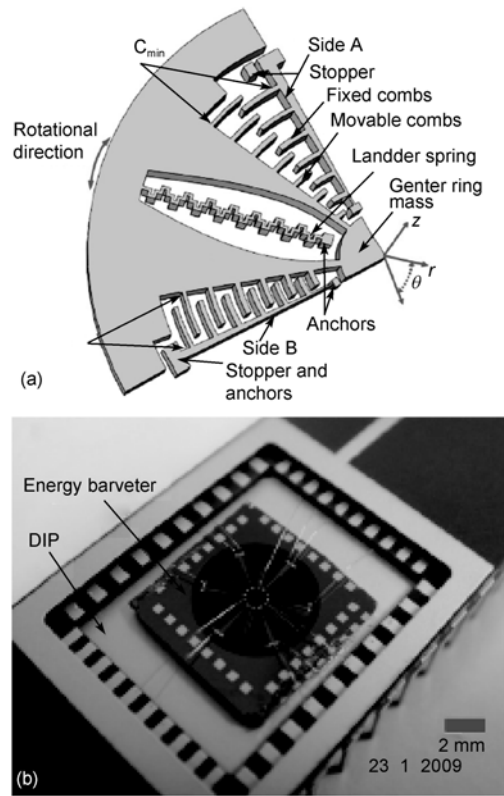


图 11 二维平面任意方向振动式发电机

(a) 1/6 结构示意图; (b) 实物图

前景的微能源. 有机驻极体材料性能优异, 但是需要材料和加工工艺进一步开发和改进, 使其易于图形化, 加强其微加工工艺兼容性. 另外, 图形化微型驻极体的性能也有待于从注极方法、尤其是结构设计方面予以提高. 日常生活中的振动能拾取是目前的主要研究热点, 虽然已经有了多种结构设计, 但是输出功率以及转换率的提高依然需要大量的努力.

参考文献

- 1 Epstein A H, Senturia S D, Anathasuresh G, et al. Power MEMS and microengines. *Transducers*, 1997, 2: 753-756
- 2 Neudecker B J, Zuh R A, Bates J B. Lithium silicon tinoxynitride (LiSiTON): High-performance anode in thin-film lithiumion batteries for microelectronics. *J Power Sources*, 1999, 11: 27-32
- 3 Kamarudin S K, Daud W R W, Ho S L, et al. Overview on the challenges and developments of micro-direct methanol fuel cells (DMFC). *J Power Sources*, 2007, 163: 743-754
- 4 Grätzel M. Photoelectrochemical cells. *Nature*, 2001, 414: 338-344
- 5 赵建云, 朱东生, 周泽广, 等. 温差发电技术的研究进展及现状. *电源技术*, 2010, 34: 310-313
- 6 Mizuno M, Chetwynd D. Investigation of a resonance microgenerator. *J Micromech Microeng*, 2003, 13: 209-216
- 7 Leland E S, Lai E M, Wright P K. A self-powered wireless sensor for indoor environmental monitoring. In: *Wireless Networking Symposium*, Austin, USA: Wireless Networking and Communications Group, 2004
- 8 Mitcheson P D, Green T C, Yeatman E M. Power processing circuits for electromagnetic, electrostatic and piezoelectric inertial energy scavengers. *Microsyst Technol*, 2006, 13: 1629-1635

- 9 Glynne-Jones P, Tudor M J, Beeby S P, et al. An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems for intelligent sensor systems. *Sensors Actuators A: Phys*, 2004, 110: 344–349
- 10 Kouharenko E, Beeby S P, Tudor M J, et al. Microelectromechanical systems vibration powered electromagnetic generator for wireless sensor applications. *Microsyst Technol*, 2006, 12: 1071–1077
- 11 Kulah H, Najafi K. An electromagnetic micro power generator for low-frequency environmental vibrations. In: *Micro Electro Mechanical Systems—17th IEEE Conference on MEMS*, Maastricht, The Netherlands, 2004. 237–240
- 12 Huang W S, Tzeng K E, Cheng M C, et al. Design and fabrication of a vibrational micro-generator for wearable MEMS. In: *Proc Eurosensors XVII*, Barcelona, Spain, 2003. 695–697
- 13 Pérez-Rodríguez A, Serre C, Fondevilla N, et al. Design of electromagnetic inertial generators for energy scavenging applications. In: *Proc Eurosensors XIX*, Barcelona, Spain, 2005. MC5
- 14 Beeby S P, Torah R N, Tudor M J, et al. A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting. *J Micromech Microeng*, 2007, 17: 1257–1265
- 15 陈璞. 基于 MEMS 技术的微型电源的研究. 硕士学位论文. 南京: 南京理工大学, 2009
- 16 张福学, 王丽坤. 现代压电学. 北京: 科学出版社, 2001
- 17 Beeby S P, Tudor M J, White N M. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Meas Sci Technol*, 2006, 17: R175–R195
- 18 Boland J, Chao Y H, Suzuki Y, et al. Micro electret power generator. In: *Proc 16th IEEE Int Conf Micro Electro Mechanical Systems*, Kyoto, Japan, 2003. 538–41
- 19 Tsutsumino T, Suzuki Y, Kasagi N, et al. High-performance polymer electret for micro seismic generator. *Power MEMS*, Tokyo, Japan, 2005. 9–12
- 20 Sakane Y, Suzuki Y, Kasagi N. The development of a high-performance perfluorinated polymer electret and its application to micro power generation. *J Micromech Microeng*, 2008, 18: 104011
- 21 Lo H, Tai Y. Parylene-based electrets power generators. *J Micromech Microeng*, 2008, 18: 104006
- 22 Amjadi H, Thielemann C. Silicon-based inorganic electrets for application in micromachined devices. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul*, 1996, 3: 494–498
- 23 Zhang J, Zou X, Zhang Y. Improvement on the performance of the PECVD $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ double-layer electrets. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul*, 2011, 18: 456–462
- 24 Genda T, Tanaka S, Esashi M. Micro-patterned electret for high power electrostatic motor. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, Maastricht, Netherland, 2004. 470–473
- 25 Hagiwara K, Honzumi M, Goto M, et al. Novel through-substrate charging method for electret generator using soft X-ray irradiation. *Power MEMS*, Washington DC, USA, 2009. 173–176
- 26 Yang Z, Wang J, Zhang J. A micro power generator using PECVD $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ double-layer as electret. *Power MEMS*, Sendi, Japan, 2008. 317–320
- 27 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
- 28 Nguyen D S, Halvorsen E. Wideband vibration energy harvesting utilizing nonlinear springs. *Power MEMS*, Washington DC, USA, 2009. 411–414
- 29 Edamoto M, Suzuki Y, Kasagi N, et al. Low-resonant-frequency micro electret generator for energy harvesting application. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, Sorrento, Italy, 2009. 1059–1062
- 30 Kiziroglou M E, He C, Yeatman E M. Rolling Rod Electrostatic microgenerator. *IEEE Trans Indust Electron*, 2009, 56: 1101–1108
- 31 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 (MEMS)*, Hyogo, Japan, 2007. 859–862
- 32 Ghalichechian N, Modafe A, Lang J H, et al. Dynamic characterization of a linear electrostatic micromotor supported on microball bearings. *Sensors Actuators A*, 2007, 136: 416–503
- 33 Naruse Y, Matsubara N, Mabuchi K. Electrostatic micro power generation from low-frequency vibration such as human motion. *J Micromech Microeng*, 2009, 19: 094002
- 34 Yang Z, Wang J, Zhang J. A high-performance micro electret power generator based on microball bearings. *J Micromech Microeng*, 2011, 21: 065001
- 35 Sterken T, Fiorini P, Baert K, et al. An electret-based electrostatic u-generator. *Transducers*, 2003, 2: 1291–1294
- 36 Zhang G, Ye Z. Feasibility of a multi-layer electrostatic micro energy harvester for higher power output. *Power MEMS*, Washington DC, USA, 2009. 340–343
- 37 唐彬, 温中泉, 温志渝, 等. 基于 MEMS 微型振动式发电机的计算与模拟分析. *微纳电子技术*, 2007, 9: 881–891
- 38 Miki D, Honzumi M, Suzuki Y, et al. MEMS electret generator with electrostatic levitation. *Power MEMS*, Washington DC, USA, 2009. 169–172
- 39 Tsutsumino T, Suzuki Y, Kasagi N, et al. Efficiency evaluation of micro seismic electret power generator. In: *Proceedings of Sensor Symposium*, Takamatsu, Japan, 2006. 521–524
- 40 Hoffmann D, Spremann D, Folkmer B, et al. A novel concept for self-aligning generators. *Power MEMS*, Washington DC, USA, 2009. 304–307
- 41 Yang B, Lee C, Kotlanka R K, et al. A MEMS rotary comb mechanism for harvesting the kinetic energy of planar vibrations. *J Micromech Microeng*, 2010, 20: 065011