

文章编号: 1672-2892(2011)01-0096-05

MEMS 永磁振动发电机的设计、制作和测试

王佩红^{1,2}, 赵小林¹, 戴旭涵¹, 汪忠柱²

(1.上海交通大学 微纳科学技术研究院, 上海 200240; 2.安徽大学 物理与材料科学学院, 安徽 合肥 230039)

摘要: 提出了一种基于微电子机械系统技术的微型永磁振动发电机。该发电机能够采集自然界中存在的机械振动能并转换成电能。它主要包括 1 个固定的双层铜线圈和 1 个由永磁体和硅基平面弹簧构成的拾振系统。采用体硅微加工和微电镀技术制作硅基平面弹簧和微线圈。组装成功的样机 A 和样机 B 的区别在于线圈的尺寸不同。样机 B 中线圈面积为样机 A 中线圈面积的 28%。测试表明, 样机 A 和 B 的固有频率分别为 222 Hz 和 247 Hz。在加速度为 1 g 的振动激励下, 样机 A 在共振状态下产生的最大感应电压和最大负载功率分别为 51 mV 和 5.89 μ W。但是, 在相同的振动激励下, 样机 B 产生的最大感应电压和最大负载功率分别为 62 mV 和 6.4 μ W, 相对于样机 A, 分别提高了 21.6% 和 8.7%。文中最后对线圈尺寸不同引起的输出性能不同给予了解释。

关键词: 微机电系统; 振动发电机; 永磁; 微加工技术; 铜线圈; 镍弹簧

中图分类号: TN403; TM382

文献标识码: A

Design, fabrication and performance test of a micromachined permanent magnet vibration-based power generator

WANG Pei-hong^{1,2}, ZHAO Xiao-lin¹, DAI Xu-han¹, WANG Zhong-zhu²

(1. Research Institute of Micro/Nanometer Science and Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. School of Physics and Material Science, Anhui University, Hefei Anhui 230039, China)

Abstract: This paper presents a permanent magnet vibration-based power generator based on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) technology. It can scavenge vibration energy and convert it into electrical power. It includes a fixed micro coil and a movable permanent magnet attached on a nickel planar spring integrated with silicon frame. The two-layer copper micro coil and nickel planar spring on silicon are fabricated using bulk-silicon micromachining and microelectroplating technique. Two prototypes with different coils and same magnet-spring system are assembled and tested. Prototype A can generate maximal load voltage of 51 mV and load power of 5.89 μ W at 222 Hz resonant frequency and 9.8 m/s^2 acceleration. At the resonant frequency of 247 Hz, prototype B generates maximum load voltage of 62 mV and load power of 6.4 μ W for acceleration of 9.8 m/s^2 . The coil's area of 6.25 mm^2 in prototype B is only 28% of that of 22.56 mm^2 in prototype A, however, the load voltage and load power are increased by 21.6% and 8.6%, respectively. The analysis about the difference of output performance of two prototypes is also given in this paper.

Key words: Micro Electro Mechanical Systems; vibration-based power generator; permanent magnet; micromachining technique; micro coil; nickel planar spring

在过去的十几年中, 微电子技术、微机电系统和超大规模集成电路技术等取得了很大的进展。随之出现了各种各样的微型传感器/执行器和微系统, 它们体积小, 功耗低, 可以广泛地应用于环境检测、医学植入、无线传感网络等。但是, 如何有效地为这些新型器件供电成为它们发展的一大障碍。传统的供电方式, 包括电池和有线电源, 由于具有寿命短、体积大、需要反复充电或替换、不能无线连接等缺点, 无法满足上述新型器件对电源的特殊要求^[1]。因此, 必须开发一种可自我维持的新型电源来取代传统的供电方式, 从而为各种微型无线器件有

效供电。能量采集技术是替代传统供电方式的最有前途的方法之一^[2-3]。该技术能够从自然界环境中自动采集各种能量然后再转换成电能从而对外供电。作为一种典型的能量采集技术, 永磁振动发电机^[4]利用电磁感应原理可以把自然界中存在的大量机械振动能转换为电能, 受到越来越多的重视。从 1996 年起, 包括国内的重庆大学、香港中文大学、上海交通大学以及国外的英国 Southampton 大学、美国 Florida 大学、日本 Canon 公司等都在从事这方面的研究工作^[5-11]。但是, 他们研制的永磁振动发电机存在较多缺点, 多数采用传统机械加工技术制作导致体积较大, 或由于采用硅质弹簧导致成本较高, 同时输出性能也无法满足目前微型无线传感器件的功耗需求。本工作给出了一种基于微机电系统(MEMS)技术的微型永磁振动发电机, 主要包括 1 个双层铜线圈、硅基镍平面弹簧和 NdFeB 永磁体。本课题组首次提出采用微电镀技术制作镍平面弹簧的方法, 具有成本低、制作方法简单易行等特点。采用体硅微加工和微电镀技术制作出 2 种线圈参数不同的永磁振动发电机实验样机, 并对它们的输出电性能进行了详细的测试。同时, 对 2 个样机之间由于线圈参数不同导致输出电性能不同给予了解释。

1 设计

图 1 给出了永磁振动发电机的三维结构示意图和横截面示意图。该设计主要包括 1 个由 NdFeB 永磁体和平面镍弹簧构成的拾振系统和用于产生电压的双层铜线圈。NdFeB 永磁体位于线圈正上方, 平面镍弹簧集成制作在硅支撑体之上。当有外界垂直于弹簧所在平面的振动作用于该发电机时, 拾振系统会产生振动甚至共振, 永磁体和线圈之间产生相对位移, 根据法拉第电磁感应定理, 线圈中产生感应电动势和感应电流。该设计主要有以下优点: 1) 选用电镀镍材料制作平面弹簧, 一方面在于电镀镍具有较低的杨氏模量和较高的屈服强度, 另一方面利用电镀方法制作弹簧具有简单易行、成本低、弹簧形状可任意变化等优点; 2) 平面弹簧弹性臂的螺旋型设计能够增加其长度, 从而有利于降低弹簧弹性系数, 以方便采集低频振动; 3) 使用平面型弹簧有利于降低整个器件的体积; 4) 集成制作镍弹簧于硅支撑体之上, 可以降低器件后期装配的复杂程度。

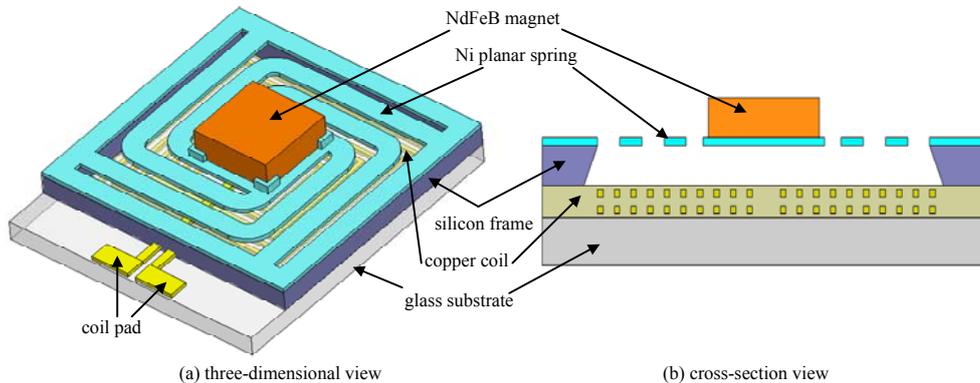
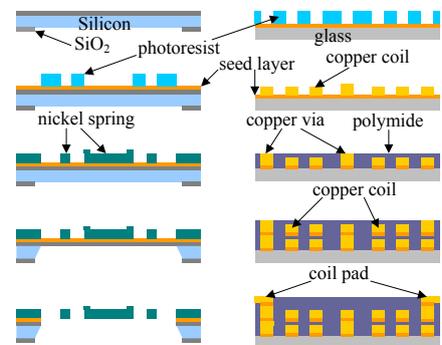


Fig.1 Three-dimensional schematic (a) and cross-section (b) of the electromagnetic vibration energy scavenger
图 1 微型永磁振动发电机的结构

2 制作

该微型永磁振动发电机中的硅基平面镍弹簧和双层铜线圈均采用微细加工技术制作, 相应的工艺流程见图 2。硅基镍弹簧的主要制作工艺如下: 1) 图形化双面氧化硅片的背部并去除 SiO_2 , 为最终弹簧的释放开出窗口; 2) 在硅片正面溅射 Cu/Cr 种子层后甩胶并光刻; 3) 电镀镍平面弹簧; 4) 从背部湿法刻穿 Si 基底; 5) 湿法刻蚀 SiO_2 层和种子层, 释放平面镍弹簧。双层铜线圈的主要制作工艺如下: 1) 在玻璃基底上溅射 Cu/Cr 种子层后甩胶并光刻; 2) 电镀第 1 层铜线圈和铜过孔; 3) 去种子层后甩涂聚酰亚胺并固化研磨抛光; 4) 重复上述步骤制作第 2 层铜线圈; 5) 电镀线圈引脚。利用上述微细加工工艺制作得到的双层铜线圈和硅基平面镍弹簧的实物见图 3。

在完成双层铜线圈和硅基平面镍弹簧的制作后, 再将它们与 NdFeB 永磁体一起组装成永磁振动发电机, 见图 3。根据有限元仿真优化的结果, 发电机样机中各个结构的具体参数如下: 镍弹簧的弹性臂宽度和间距分别为 $500 \mu\text{m}$



(a) nickel planar spring on silicon frame (b) double-layer copper coil
Fig.2 Fabrication processes of microspring and coil
图 2 微弹簧和线圈的加工工艺流程图

和 $200\ \mu\text{m}$ ，厚度为 $25\ \mu\text{m}$ 。弹簧中间平台的尺寸为 $2.5\ \text{mm}\times 2.5\ \text{mm}\times 0.025\ \text{mm}$ 。NdFeB 永磁体的尺寸为 $2\ \text{mm}\times 2\ \text{mm}\times 1\ \text{mm}$ ，质量为 $31.2\ \text{mg}$ 。为了分析线圈的结构参数对振动发电机输出性能的影响，电镀制作了 2 种尺寸不同的微线圈 A 和 B，它们的具体结构参数见表 1。从该表可以看出，线圈 B 的面积只有线圈 A 面积的四分之一左右。根据线圈的不同，也制作出 2 个不同的发电机实验样机，与线圈对应，分别称为样机 A 和样机 B。

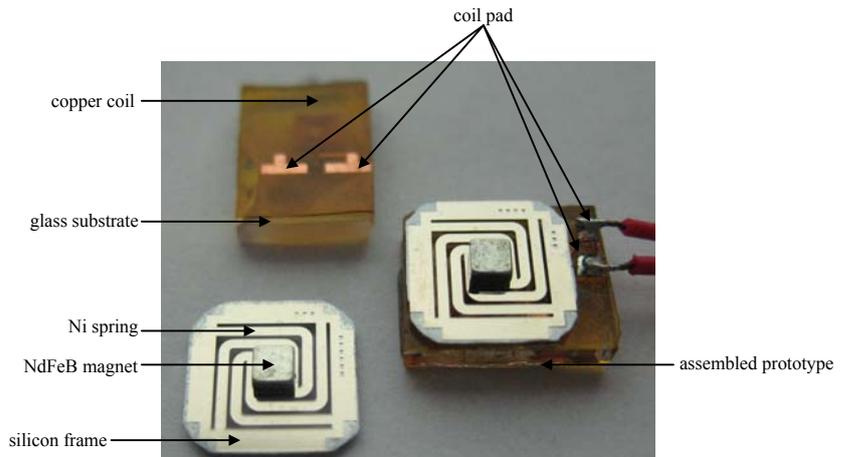


Fig.3 Photographs of the fabricated micro coil, nickel spring with silicon frame and assembled energy scavenger prototype

图 3 双层铜线圈、硅基镍平面弹簧以及组装完毕的微型永磁发电机样机

表 1 线圈 A 和 B 的具体结构参数

Table 1 Structure parameters of coil A and coil B

	inner/outside length/mm	area/ mm^2	turns	number of layer	linewidth/gap/ μm	height of single layer/ μm	resistance/ Ω
coil A	1.8/4.75	22.56	30	2	25/25	25	30.8
coil B	0.7/2.5	6.25	30	2	12/18	15	40.4

3 测试

用于微型永磁振动发电机性能测试的测试系统见图 4。制作好的发电机样机首先被固定到激振台上的加速度传感器表面，保证采集器样机与激振台一起运动。由波形发生器(Agilent 33220A)、功率放大器(SINOCERA YE5872)和激振台(SINOCERA JZK-5)构成的激振系统，可以为采集器样机提供任意波形、任意强度的振动激励。由压电加速度传感器(SINOCERA CA-YD-1107)和振动计(SINOCERA YE5932A)构成的振动监测系统可以实时给出激振台提供的振动的加速度、速度和位移。示波器(Agilent MSO 6034A)用于测试负载两端的电压大小并可以对扫频信号做 FFT 变换，从而找到最大电压对应的频率。

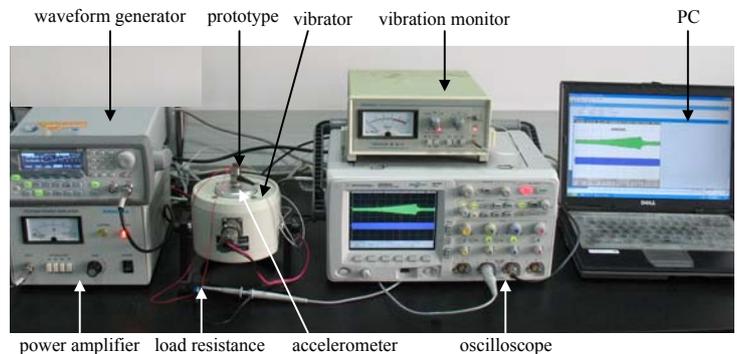


Fig.4 Photograph of the experimental testing setup

图 4 测试系统实物图

首先利用扫频激励的方法确定发电机样机拾振系统的固有频率。当波形发生器提供的正弦扫频信号经过功率放大器传递给激振器时，受迫振动就会施加到实验样机上，线圈中会产生感应电压。图 5 给出了在样机 A 的共振点附近负载上的电压-时间关系曲线及其傅里叶变换的结果。该图表明，随着激励频率的增加，线圈中产生的感应电压逐渐增加，在系统产生共振时电压最大。随后迅速衰减。FFT 变换结果表明，电压最大值时对应的激励频率为 $222\ \text{Hz}$ ，从而表明样机 A 的固有频率为 $222\ \text{Hz}$ 。同理，可以测到样机 B 的固有频率为 $247\ \text{Hz}$ 。两样机的固有频率稍有区别，可能是由于样机的装配误差或永磁体的质量略微不同导致。

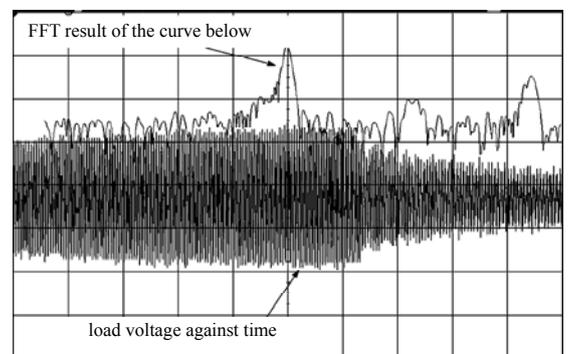


Fig.5 Load voltage versus time from the swept frequency process of prototype A and its FFT result

图 5 样机 A 在共振附近时线圈中产生的电压与时间的关系曲线及其 FFT 变换曲线

测试得到的实验样机的负载两端的感应电压峰值与激励频率之间的关系曲线见图 6，测试时输入振动的加速度恒为 $1\ \text{g}$ ($1\ \text{g}=9.8\ \text{m/s}^2$)。由图可见，在 $0\ \text{Hz}\sim 300\ \text{Hz}$ 的频率范围内，每个实验样机都只出现 1 次共振现象，因此

对应的感应电压只有 1 个极值。样机 A 和样机 B 的共振频率分别为 223.2 Hz 和 247.5 Hz, 与前面扫频测试结果基本一致。对应的感应电压峰峰值分别为 51 mV 和 62 mV。虽然线圈 B 只有线圈 A 的四分之一, 但是, 对应的发电机在相同的条件下输出电压却增加了 21.6%。由此可看出微线圈的结构参数对振动发电机输出性能有很大影响。

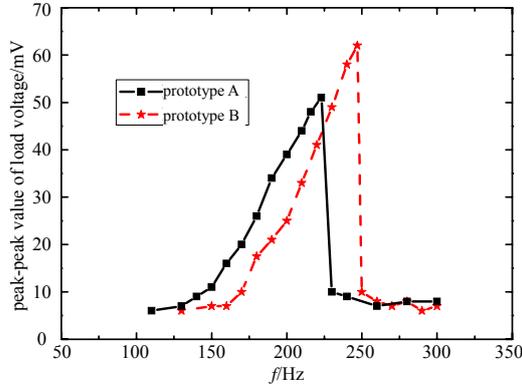


Fig.6 Test results of peak-peak value of load voltage versus input frequency of two prototypes under the vibration with 1 g acceleration

图 6 在加速度为 1 g 的振动激励下两样机产生的感应电压峰峰值与输入激励频率的关系曲线

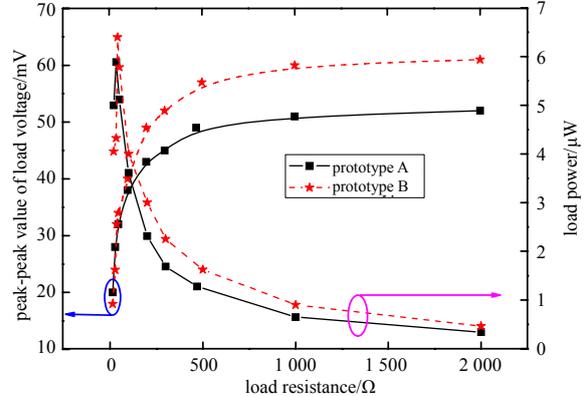


Fig.7 Load voltage and load power versus load resistance of two prototypes measured at resonant conditions

图 7 样机 A、样机 B 在共振条件下测得的负载电压和负载功率与负载电阻的关系

图 7 给出了测量得到的负载电阻对永磁振动发电机的负载电压的影响。从图中可以看出, 当负载电阻小于 300 Ω 时, 负载电压随负载电阻迅速增加, 而后缓慢增加至一稳定值。对样机 A 和样机 B 而言, 该稳定值分别为 51 mV 和 62 mV, 与之对应的负载电阻为 2 k Ω 。因为 2 k Ω 已经远大于线圈内阻, 所以上述 2 个稳定值即为图 6 所示的极值。

负载功率可以根据式(1)计算得到:

$$P_{\text{load}} = \frac{V_{\text{pp}}^2}{4 \times R_{\text{load}}} \quad (1)$$

式中: P_{load} 为负载功率; V_{pp} 为负载电压的峰峰值; R_{load} 为负载电阻值。

根据式(1)计算得到的 2 个实验样机的负载电阻对负载功率的影响也示于图 7。由该图可知, 开始阶段负载功率随负载电阻增加而增加, 当负载电阻等于线圈内阻时, 负载功率达到最大值, 然后负载功率迅速减小。样机 A 和样机 B 产生的最大负载功率分别为 5.89 μW 和 6.4 μW 。

从上述测试结果可以看出, 虽然样机 B 中的微线圈面积仅为样机 A 中线圈面积的 28%, 但是相对于样机 A, 样机 B 的负载电压和负载功率的最大值却分别增加了 21.6% 和 8.7%。原因可能在于, 当线圈面积比永磁体磁极面积大许多时, 磁力线在穿过线圈后又穿入线圈。结果导致穿过较大线圈的磁通量减小, 从而导致感应电压减小。关于线圈尺寸对永磁振动发电机输出性能影响的有限元仿真和详细理论分析的工作正在进行中。

4 结论

本文给出了一种基于 MEMS 技术的微型永磁振动发电机的设计、制作、测试及分析。该发电机主要由 NdFeB 永磁体、硅基镍平面弹簧和双层铜线圈构成。采用体硅微加工和微电镀等微细加工技术制作出 2 种线圈参数不同的实验样机 A 和 B, 它们包含的线圈面积分别为 22.56 mm² 和 6.25 mm²。测试表明, 样机 A 和样机 B 的固有频率分别为 222 Hz 和 247 Hz。另外, 在加速度为 1 g 的振动激励下, 样机 A 在共振状态下产生的最大感应电压和最大负载功率分别为 51 mV 和 5.89 μW 。虽然样机 B 中的线圈面积只有样机 A 中线圈面积的 28%, 但是, 相同测试条件下其产生的最大感应电压和最大负载功率分别为 62 mV 和 6.4 μW , 相对于样机 A, 分别提高了 21.6% 和 8.7%。

参考文献:

- [1] 任青毅, 叶超, 黄雷, 等. 基于变频器的变频调压交流电源[J]. 信息与电子工程, 2009, 7(6): 581-583. (REN Qingyi, YE Chao, HUANG Lei, et al. An inverter-based variable-frequency voltage-regulating AC source[J]. Information and Electronic Engineering, 2009, 7(6): 581-583.)

- [2] Paradiso J A,Starner T. Energy scavenging for mobile and wireless electronics[J]. IEEE pervasive computing, 2005,4(1):18-27.
- [3] Roundy S,Wright P K,Rabaey J. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes[J]. Computer Commun., 2003,26(11):1130-1144.
- [4] Roundy S. On the effectiveness of vibration-based energy harvesting[J]. Journal of intelligent material systems and structures, 2005,16(10):809-823.
- [5] Williams C B,Yates R B. Analysis of a micro-electric generator for Microsystems[J]. Sensors and Actuators A, 1996,52(1):8-11.
- [6] Kulkarni S,Koukharenko E,Torah R,et al. Design, fabrication and test of integrated micro-scale vibration-based electromagnetic generator[J]. Sensors and Actuators A, 2008,145-146:336-342.
- [7] 温中泉,温志渝,陈光焱,等. 微型振动式发电机振子系统的理论计算及仿真[J]. 光学精密工程, 2003,11(1):45-48. (WEN Z Q,WEN Z Y,CHEN G Y,et al. Calculation and simulation of spring-mass system for micro vibration power generator[J]. Optics and Precision Engineering, 2003,11(1):45-48.)
- [8] Wang P,Tanaka K,Sugiyama S,et al. A micro electromagnetic low level vibration energy harvester based on MEMS technology[J]. Microsyst Technol., 2009,15(6):941-951.
- [9] Ching N N H,Wong H Y,Li Wen J,et al. A laser-micromachined multi-modal resonating power transducer for wireless sensing systems[J]. Sensors and Actuators A, 2002,97-98:685-690.
- [10] Beeby S P,Torah R N,Tudor M J,et al. A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2007,17(7):1257-1265.
- [11] Pan C T,Hwang Y M,Hu H L,et al. Fabrication and analysis of a magnetic self-power microgenerator[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2006,304(1):394-396.

作者简介:



王佩红(1978-), 男, 安徽省阜阳市人, 讲师, 博士, 主要研究方向为 PowerMEMS 及微细加工技术.email:wangph168@hotmail.com.

赵小林(1953-), 男, 上海市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为微机电系统和微细加工技术.

戴旭涵(1974-), 男, 福建省人, 副教授, 博士, 主要研究方向为电磁MEMS器件和微加工技术.

汪忠柱(1977-), 男, 安徽人, 副教授, 博士, 主要研究方向为新型永磁材料制备和磁性微波吸收材料的优化设计与研制.

(上接第 95 页)

作者简介:



董洁(1967-), 女, 四川省绵阳市人, 助理工程师, 主要从事环境试验检测技术等.email:wyong000506@sina.com.

文勇(1974-), 男, 四川省绵阳市人, 高级工程师, 主要从事环境试验检测技术.

洪建忠(1968-), 男, 四川省绵阳市人, 高级工程师, 主要从事力学分析与机械设计.

聂飞(1978-), 男, 四川省绵阳市人, 硕士, 主要从事嵌入式测试系统设计和数字图像处理技术.