

文章编号 1004-924X(2013)03-0694-07

横向电磁式振动能量采集器的设计与制作

李 伟^{1,2}, 车录锋^{1*}, 王跃林¹

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 传感技术联合国家重点实验室
微系统技术重点实验室, 上海 200050; 2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 基于微机电系统(MEMS)设计了一种结构新颖的横向电磁式振动能量采集器,用于把周围环境中振动的机械能转化为电能。该能量采集器主要由两块长方形永磁体、螺旋铜线圈、质量块-弹性梁振动系统及衬底等构成。选用有限元分析软件对器件结构参数进行了仿真分析与优化,并利用电镀技术制作螺旋铜线圈, KOH 湿法腐蚀和深反应离子刻蚀(DRIE)技术制作质量块-弹性梁振动系统,然后与永磁体一起组成了体积大约为 100 mm³ 的能量采集器样机。对制作好的电磁式振动能量采集器样机的振动特性测试表明:质量块-弹性梁振动系统的一阶固有频率为 241 Hz;在频率为 241 Hz、加速度为 2.8 ms⁻² 的外界振动激励下,负载两端产生的交流电压峰峰值为 9.2 mV。另外调节质量块和弹性梁的参数,还可以得到不同固有频率的能量采集器。该能量采集器实现了从机械能到电能的转化,对无线传感器件的发展和應用很有意义。

关键词: 电磁式能量采集器; 振动能量采集器; 横向振动; 微机电系统(MEMS)

中图分类号: TP212.12; TN409 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132103.0694

Design and fabrication of transverse electromagnetic vibration energy harvester

LI Wei^{1,2}, CHE Lu-feng^{1*}, WANG Yue-lin¹

(1. *Science and Technology on Micro-system Laboratory, State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*
** Corresponding author, E-mail: lfche@mail.sim.ac.cn*

Abstract: A transverse electromagnetic vibration energy harvester based on Micro-electro-mechanical System(MEMS) was designed to convert the vibration mechanical energy around our environments to electrical powers. It mainly consisted of two vertically polarized rectangle permanent magnets, a mass-spring vibration system with a copper coil and a substrate. The structure parameters of system were analyzed and optimized by Finite Element Analysis (FEA), and a harvester prototype was fabricated. During the fabrication of the harvester, electroplating technology was employed to fabricate a spiral copper coil, KOH wet etching and Deep Reaction Ion Etching(DRIE) technology were employed to fabricate mass-spring vibration system, then the harvester prototype was formed together with permanent magnets. The volume of the harvester was about 100 mm³. The test results for vibration characteristics show that the natural frequency of the mass-spring vibration system is 241 Hz. The electro-

收稿日期:2012-11-02;修订日期:2012-11-27.

基金项目:中国科学院上海微系统与信息技术研究所青年创新基金资助项目(No. 2010QNCX01)

magnetic vibration energy harvester can generate a peak-peak voltage of 9.2 mV at an external acceleration of 2.8 ms^{-2} and frequency of 241 Hz. Furthermore, by adjusting the parameters of mass-spring vibration system, the harvester with different natural frequencies can be obtained. The harvester can convert the mechanical energy to the electrical energy and have significance for the development and application of the wireless sensor devices.

Key words: electromagnetic energy harvester; vibration energy harvester; transverse vibration; Micro-electric-mechanical System(MEMS)

1 引言

微能源是保证微系统独立工作的重要基础部件,是微机电系统(MEMS)主要的研究方向之一。由于微系统功耗逐渐降低,利用环境振动能为其提供能量将成为一种新型的能源形式。振动能广泛存在于各种生产和生活设备中,目前将环境中振动的机械能转换成电能的能量采集器主要有3种:静电式能量采集器、压电式能量采集器和电磁式能量采集器。静电式能量采集器易于与微系统集成,但它并不能自供应电能,其开始工作时还需要外接电源进行极板驱动才能实现相应功能;压电式能量采集器虽具有高的输出电压,但其制作工艺很难与微机械加工技术兼容^[1-3]。电磁式能量采集器结构简单,工作原理也不复杂,不像静电式那样需要外接电源,它完全是自供应能量的,而且在大多数情况下可以用微机械加工技术制作。

在国内外已经开展的研究中,虽然已经有很多种电磁式振动能量采集器实验样机研制成功,但它们多采用组装式工艺或粘连手段等传统的机械加工方法制作,器件的体积较大,并且加工精度不高^[4-6]。王佩红等人报道了一种电磁式能量采集器,该能量采集器在频率为 55 Hz,加速度为 $14.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的振动条件下产生了 18 mV 的峰值电压。但是该器件各部件(包括永磁体、平面弹簧、支撑结构和衬底等)之间的组装及定位是一个难点^[7]。E. Koukharenko 等人提出了一种“三明治”结构的电磁式能量采集器,该能量采集器在频率 1.615 kHz,加速度 $3.924 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的振动条件下最大输出功率为 104 nW,该能量采集器虽然采用硅材料制作,但是固有频率很大,输出功率很小,在实际环境中很难得到应用^[8]。

本文提出利用 MEMS 技术,依据机械振动和

电磁感应理论,将永磁体、振动系统、微型平面线圈等部件集成在一起构成一种电磁式的振动能量采集器。首先利用电镀技术在质量块表面制作平面螺旋铜线圈,利用 KOH 湿法腐蚀和 DRIE 技术制作出质量块-弹性梁振动系统,然后与 2 块磁极方向相反放置的永磁体组合形成一个横向振动的微型电磁式能量采集器。文中对采集器进行了测试与分析。

2 结构与工作原理

图 1 为设计的微型电磁式振动能量采集器的结构示意图,整个器件由 2 块长方形永磁体、螺旋铜线圈、质量块-弹性梁振动系统及衬底等构成。平面螺旋铜线圈制作在质量块上表面,与质量块-弹性梁振动系统一起运动,2 块长方形 NdFeB (35) 永磁体($B_r=1.2 \text{ T}$)位于平面螺旋线圈的正上方,并且磁极方向相反,这种结构避免了将永磁体粘帖在薄膜或平台上作为质量块相对复杂的传统方法^[6-7,9],采集器体积较小,制作方法简单。所设计的电磁式振动能量采集器在结构上主要有以下 2 个优点:(1)振动系统在水平方向振动,并且阻尼很小,振幅较大;(2)两块永磁体并列位于平面螺旋铜线圈的正上方,并且磁极方向相反,在相同的振幅下产生的感应电动势更高。

设计的能量采集器的工作原理为:当有平行于质量块表面方向的外界振动作用到衬底上时,

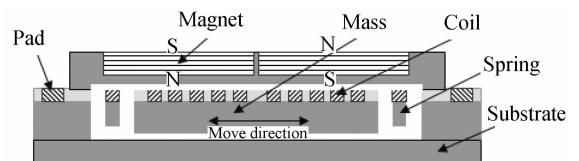


图 1 电磁式振动能量采集器结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of electromagnetic energy harvester

质量块-弹性梁振动系统会发生受迫振动,导致质量块带动平面螺旋铜线圈在水平方向振动,2 块永磁体保持固定不动,永磁体和线圈之间发生相对运动,致使线圈中的磁通量发生变化,根据法拉第电磁感应原理,线圈中就会产生感应电动势。尤其当外界振动的频率与振动系统的固有频率相等时,振动系统会出现共振现象,质量块出现最大的振幅,即相对于永磁体的位移最大,线圈中的磁通量变化最大,此时产生的感应电动势也达到最大值。

3 仿真分析

为了使质量块-弹性梁振动系统的固有频率较低,并且确保在共振时不被破坏,利用 Ansys 有限元分析软件对振动系统进行了仿真分析并且优化。在质量块尺寸保持不变的条件下,通过改变弹性梁的长度、宽度和厚度,利用 Ansys 软件仿真分析及实际的工艺条件最终得到振动系统的参数如表 1 所示。图 2 为振动系统的一阶振型图,从图中可以看出,其一阶固有频率为 250.4 Hz,质量块平行于永磁体所在平面水平振动。在理想情况下,对振动系统进行谐响应分析,当在质量块水平方向施加 $0.249 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的加速度时,质量块-弹性梁振动系统在 250.4 Hz 发生谐振,其振幅最大为 $236 \mu\text{m}$,振幅与频率的关系曲线如图 3(a)所示。当质量块的位移为 $236 \mu\text{m}$ 时,对质量

块-弹性梁振动系统进行应力分析,弹性梁上的应力分布如图 3(b)所示,从图 3(b)中可以看出,最大应力发生在弹性梁的弯曲处,其最大应力为 147 MPa,远小于硅的断裂强度,一般硅的断裂强度为 0.5 GPa,也就是说,质量块-弹性梁振动系统能够正常工作而不被破坏。表 1 给出了永磁体和线圈的具体参数,永磁体与线圈之间的间隙为 $150 \mu\text{m}$ 。对永磁体和线圈进行优化设计可以有效提高能量采集器的输出性能,本文主要为了验证能量采集器的结构以及制作方法的可靠性,未对永磁体和线圈的尺寸进行仿真和优化设计,关于永磁体及线圈的仿真分析方法可参考本人和本课题组的另 2 篇文章^[10-11]。

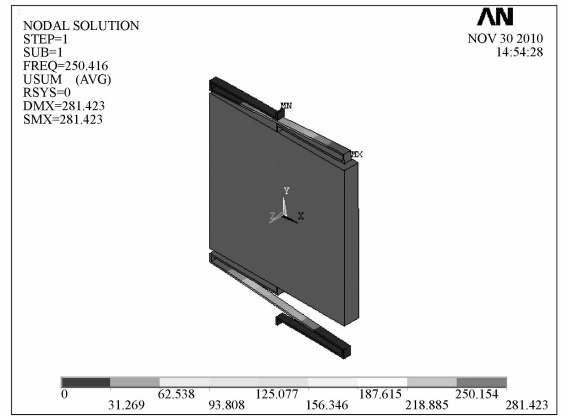
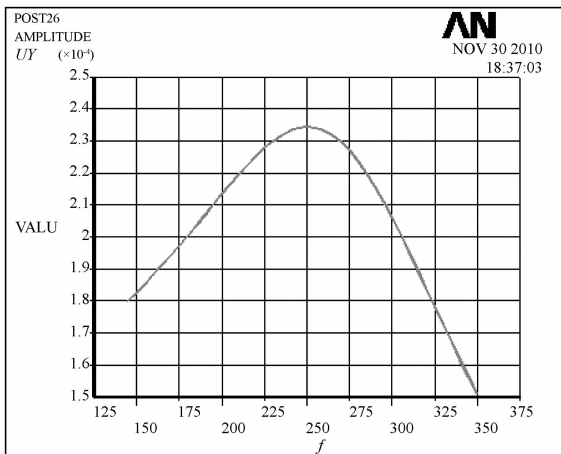
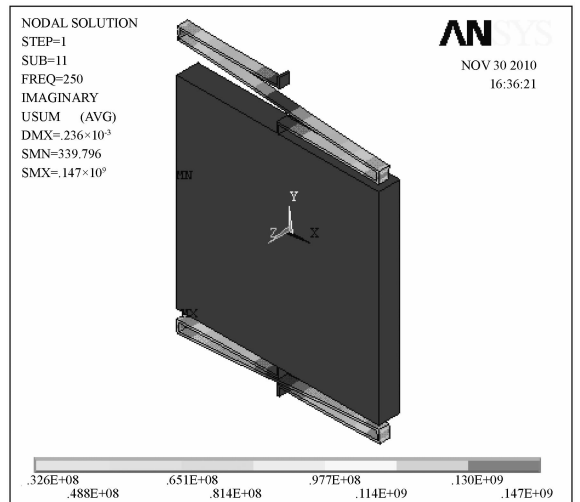


图 2 质量块-弹性梁振动系统一阶振型图
Fig. 2 First mode shape of mass-spring system



(a) 振动幅度与频率的关系曲线图
(a) Harmonic analysis results



(b) 应力分布图
(b) Stress simulation results

图 3 质量块-弹性梁谐响应分析结果

Fig. 3 Simulation results of mass-spring system

表1 电磁能量采集器的结构参数

Tab. 1 Structure parameters of electromagnetic energy harvester (μm)

	Length	Width	Thickness
Mass	4 000	4 000	420
Spring	8 000	43	200
Coil	—	40	20
Magnet	4 300	2 500	1 500

4 器件制作

电磁能量采集器采用 MEMS 微加工技术制作,其中的平面螺旋线圈采用厚光刻胶和电镀技术制作,线圈与衬底之间以及线圈与电极引线之间采用二氧化硅作为绝缘材料,质量块-弹性梁振动系统采用 KOH 湿法腐蚀和 DRIE 技术制作,详细的

制作工艺流程见本课题组的另一篇文章^[10]。其中,弹性梁的厚度在制作过程中可以根据需要调节,制作出的质量块-弹性梁振动系统的 SEM 如图 4 所示,图 5 为采用电镀技术制作的平面螺旋线圈,线圈的匝数为 23 匝,弹性梁及其上的电极引线 SEM 如图 6 所示,图 7 为装配完成的能量采集器实物图。振动系统制作完成后,将带有凹坑的上盖板与振动系统对准并固定,最后将磁极方向相反的两块长方形永磁体固定于上盖板上表面的凹坑内。制作的能量采集器尺寸为 $7.2\text{ mm} \times 6.0\text{ mm} \times 2.3\text{ mm}$,体积约为 100 mm^3 。与其它电磁能量采集器相比,器件制作方面主要有以下两个优点:(1)由于永磁体位于质量块-弹性梁系统的上盖板的凹坑内,因此对于永磁体的固定非常方便;(2)永磁体作为非共振结构,在一定程度上可以增大永磁体的体积,进而使输出电压增加^[12-13]。

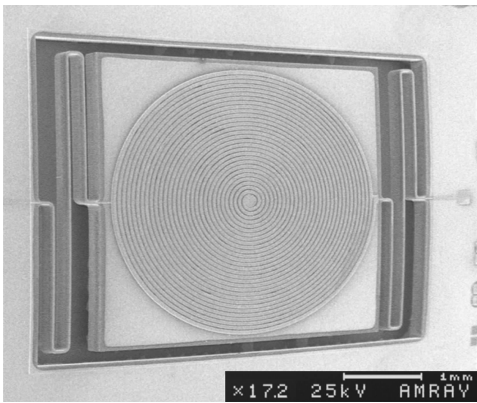


图4 质量块-弹性梁振动系统的 SEM

Fig. 4 SEM of fabricated mass-spring system

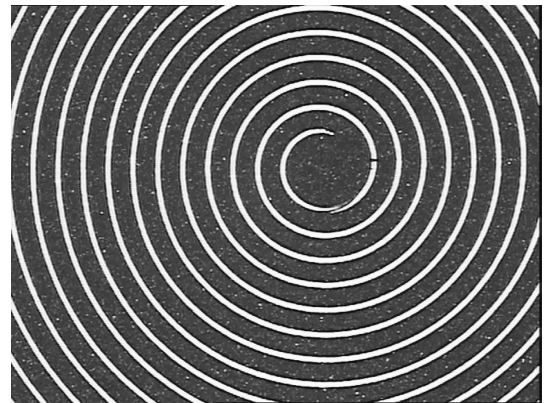


图5 平面螺旋线圈

Fig. 5 Photo of plane spiral coil

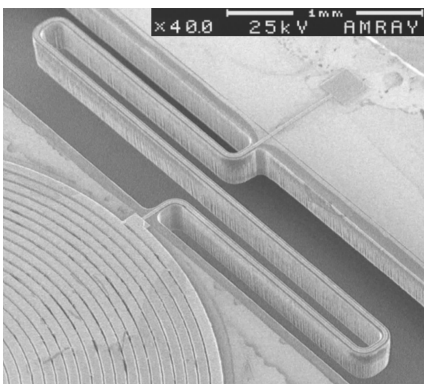


图6 弹性梁及其上的电极引线

Fig. 6 SEM of spring and its electrode

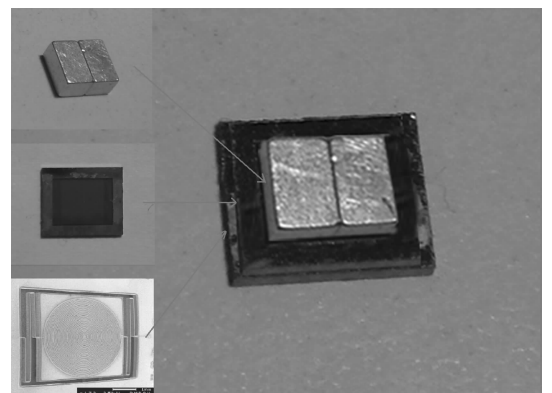


图7 装配完成的能量采集器

Fig. 7 Assembled energy harvester

5 测试与分析

制作的电磁能量采集器采用 B&K 测试系统 (包括 4808 振动台、功率放大器、信号发生器等) 进行测试, 测试系统如图 8 所示, 参考标准加速度传感器 (B&K4371) 固定于振动台上用于测量输入的加速度值, 被测的能量采集器固定在与参考加速度传感器相对应的位置。信号发生器可以为采集器样机提供任意波形、任意强度的振动激励, 经过功率放大器提供给振动台, 参考加速度传感器和被测试能量采集器的输出信号通过信号发生器可以实时传给计算机系统, 所有操作由 B&K 测试软件统一控制。

首先测试能量采集器的固有频率, 通过频率扫描得出能量采集器在不同的频率点的电压输出幅度值如图 9 所示, 从图 9 中可以看出, 在振动频率为 241 Hz 时, 能量采集器的输出幅度最大, 因此可以得出能量采集器的固有频率为 241 Hz。当振动台的振动频率与能量采集器的固有频率相同即为 241 Hz, 共振幅度最大。由于外界振动加速度不同会使质量块产生不同的共振幅度, 而共振幅度的大小决定了采集器输出电压的大小。当外界振动加速度为 $2.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 时, 可以得出能量采集器的输出电压波形如图 10 所示, 从图 10 可以看出能量采集器的输出电压峰峰值为 9.2 mV。与其它同类测试结果相比 (如 C. B. Williams 等人^[9]; E. Koukharenko 等人^[8]; Santosh Kulkarni 等人^[14]), 产生的输出电压相对较高。当外界振动加速度大于 $2.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 后, 感应电压输出增加很小, 出现“饱和”现象, 如图 11 所示, 因此测试中输入的振动加速度选为 $2.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

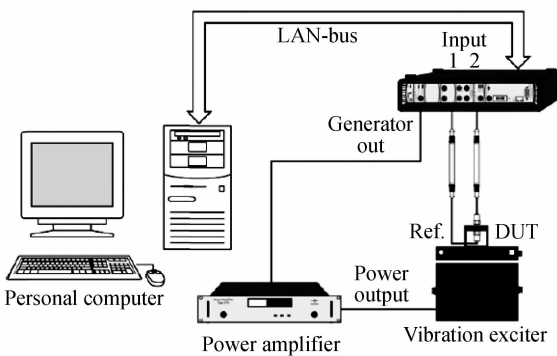


图 8 能量采集器的测试系统示意图

Fig. 8 Measurement system of energy harvester

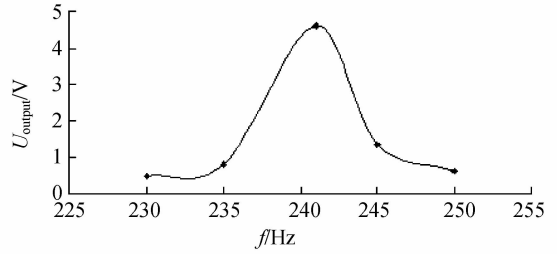


图 9 能量采集器的输出电压与振动频率的关系

Fig. 9 Relationship between output voltage and vibration frequency

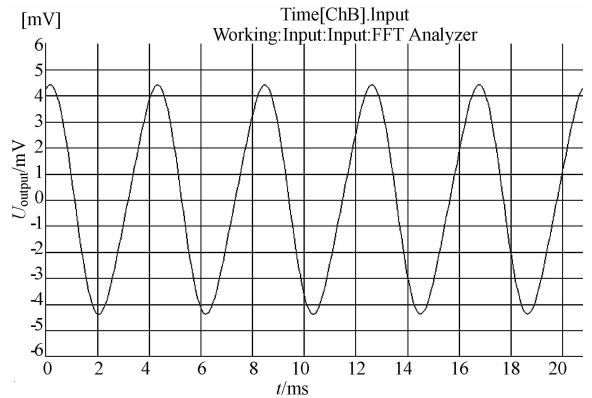


图 10 能量采集器的输出电压

Fig. 10 Output voltage of energy harvester

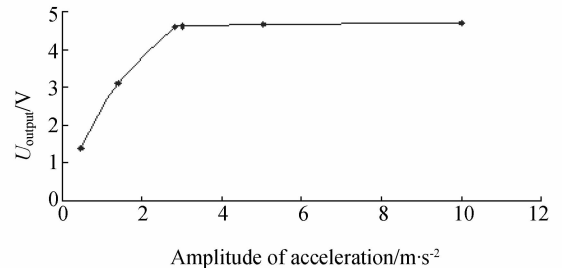


图 11 能量采集器的输出电压与振动加速度幅度的关系

Fig. 11 Relationship between output voltage and amplitude of acceleration

利用自由落杆装置进行能量采集器可靠性的测试, 将能量采集器固定于自由落杆顶端, 并且使其工作方向与自由落体方向相同, 冲击后标准传感器输出的冲击波形如图 12 所示, 根据冲击加速度计算公式: $a = \frac{V \times 10^3}{A \cdot S}$ (A : 放大倍数, $A = 20$; S : 标准传感器的灵敏度, $S = 0.65 \mu\text{V/g}$) 可知, 当冲击

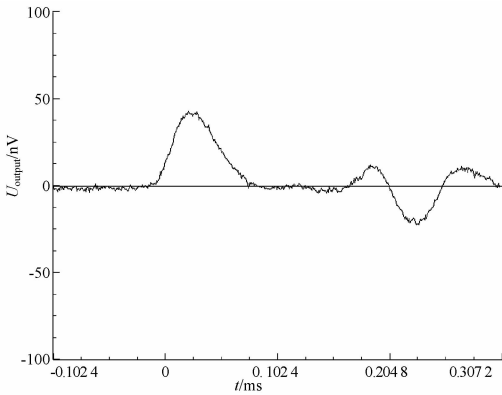


图12 标准传感器输出波形

Fig.12 Output waveform of standard sensor after shock

加速度峰值达到 $3\ 786\ g$ 时,被测能量采集器工作正常。

6 结 论

基于 MEMS 技术,本文设计了一种能够把水平方向振动的机械能转化为电能的横向电磁式振动能量采集器,该采集器主要包括永磁体、线圈、质

量块-弹性梁振动系统及衬底等。2 块磁极方向相反的永磁体位于线圈的正上方,这在一定程度上可以增加永磁体的体积,而永磁体的体积越大,磁能积越大,从而提高了器件的机械能-电能转换效率。制作了实验样机,并进行了振动特性测试。实验样机主要采用电镀技术、KOH 湿法腐蚀和 DRIE 技术等 MEMS 微加工技术制作,得到的实验样机体积约为 $100\ \text{cm}^3$ 。振动特性测试表明:质量块-弹性梁振动系统的一阶固有频率为 $241\ \text{Hz}$,在频率为 $241\ \text{Hz}$ 、外界振动加速度为 $2.8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 激励下,负载两端产生的交流电压最大,其峰峰值为 $9.2\ \text{mV}$ 。另外,通过调节质量块和弹性梁的参数,如长度、宽度和厚度等,可以得到不同固有频率的能量采集器,固有频率为 $100\ \text{Hz}$ 以下能量采集器也完全可以实现。

目前制作的能量采集器仍有许多不足之处,需要进一步进行的研究工作包括:(1)对永磁体和线圈进行详细的优化设计;(2)提高线圈的深宽比(如制作深度为 $40\sim 80\ \mu\text{m}$ 的线圈结构),以及制作双层线圈等;(3)进一步优化能量采集器结构,如设计双面上下对称的线圈和永磁体结构;4)设计宽工作频段结构以期在工作频带内都有较高的能量输出等。

参考文献:

[1] 贺学锋,杜志刚,赵兴强,等.悬臂梁式压电振动能量采集器的建模及实验验证[J].光学精密工程,2011,19(8):1771-1778.
HE X F, DU ZH G, ZHAO X Q, *et al.*. Modeling and experimental verification for cantilevered piezoelectric vibration energy harvester [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8):1771-1778. (in Chinese)

[2] 张杨键,伞海生. MEMS 复合式振动能量采集器[J].光学精密工程,2009,17(6):1262-1266.
ZHANG Y J, SAN H SH. MEMS hybrid power-generator from vibration energy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6):1262-1266. (in Chinese)

[3] 阚君武,唐可洪,王淑云,等.压电悬臂梁发电装置的建模与仿真分析[J].光学精密工程,2008,16(1):72-75.
KAN J W, TANG K H, WANG SH Y, *et al.*. Modeling and simulation of piezoelectric cantilever generators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16

(1):72-75. (in Chinese)

[4] 王佩红,刘慧婷,杨卓青,等.基于 MEMS 技术的三明治型电磁式微振动能量采集器[J].纳米技术与精密工程,2010,8(6):510-515.
WANG P H, LIU H T, YANG ZH Q, *et al.*. Sandwiched electromagnetic vibration energy harvester based on MEMS technology [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2010, 8(6):510-515. (in Chinese)

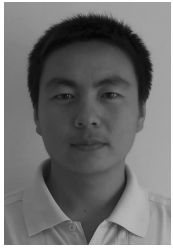
[5] BEEBY S P, TORAH R N, TUDOR M J, *et al.*. A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2007, 17:1257-1265.

[6] SARI I, BALKAN T, KULAH H. An electromagnetic micro power generator for low-frequency environmental vibrations based on the frequency up conversion technique [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2010, 19:14-27.

[7] WANG P H, TANAKA K, SUGIYAMA S, *et al.*. A micro electromagnetic low level vibration energy harvester based on MEMS technology [J].

- Microsystem Technologies*, 2009, 15:941-951.
- [8] KOUKHARENKO E, BEEBY S P, TUDOR M J, *et al.*. Microelectromechanical systems vibration powered electromagnetic generator for wireless sensor applications [J]. *Microsystem Technologies*, 2006, 12:1071-1077.
- [9] WILLIAMS C, SHEARWOOD C, HARRADINE M, *et al.*. Development of an electromagnetic micro-generator [J]. *IEEE Proc.-Circuits Devices Syst.* 2001, 148:337-342.
- [10] WANG P, LI W, CHE L F. Design and fabrication of a micro electromagnetic vibration energy harvester [J]. *Journal of Semiconductors*, 2011, 32(10):104009-1-104009-4.
- [11] LI W, LIANG J Q, LIANG ZH ZH, *et al.*. Design and fabrication of a micro-optic switch [J]. *Optics Express*, 2008, 16(9):6324-6330.
- [12] WANG P, TANAKA K, SUGIYAMA S, *et al.*. A micro electromagnetic low level vibration energy harvester based on MEMS technology [J]. *Microsyst Technol.*, 2009, 15:941-951.
- [13] SARI I, BALKAN T, KULAH H. An electromagnetic micro power generator for wideband environmental vibrations [J]. *Sensors and Actuators A*, 2008, 145-146:405-413.
- [14] KULKARNI S, KOUKHARENKO E, TORAH R, *et al.*. Design, fabrication and test of integrated micro-scale vibration-based electromagnetic generator [J]. *Sensors and Actuators*, 2008, 145-146:336-342.

作者简介:



李 伟(1982—),男,吉林榆树人,博士研究生,2006年于吉林大学获得学士学位,2009年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事 MEMS 能量采集器及 MEMS 加速度传感器等方面的研究。E-mail: liwei211@mail.sim.ac.cn



王跃林(1959—),男,江西南昌人,博士,研究员,博士生导师,1982年于浙江大学获得学士学位,1985年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,1989年于清华大学获得博士学位,主要从事集成微光机电系统方面的研究。E-mail: ylwang@mail.sim.ac.cn

导师简介:



车录锋(1971—),男,河南安阳人,博士,研究员,博士生导师,1993年于长春理工大学获得学士学位,1996年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,1999年于浙江大学获得博士学位,主要从事微传感器与执行器及其相关 MEMS 技术方面的研究。E-mail: lfche@mail.sim.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)