

DOI: 10.3901/JME.2009.09.238

基于微机电系统的振动能量采集器件设计分析*

李林¹ 郭隐彪¹ 陈旭远²

(1. 厦门大学机电工程系 厦门 361005;
2. 厦门大学萨本栋微机电中心 厦门 361005)

摘要: 微能量采集器中电容式采集器易与 IC 工艺集成, 目前已知的传统电容式微能量采集器都需要外加电压, 这在很大程度上限制电容式微能量采集器的实际使用。针对该问题, 基于微机电系统工艺, 提出功函数原理电容式微能量采集器, 给出采用两种不同金属作为电容极板电极的采集器原理模型设计, 并建立相应系统数学模型, 计算大致悬臂梁长度的设置与范围, 使用有限元模拟软件 ANSYS 进行进一步分析与优化设计。在此理论基础设计出的新型振动能量采集器, 可克服传统电容式微能量采集器需要外界提供电源这一缺点。

关键词: 微能量采集器 功函数 微机电系统

中图分类号: TG156

Design and Analysis of Vibration Energy Collector Based on MEMS

LI Lin¹ GUO Yinbiao¹ CHEN Xuyuan²

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005;
2. Pen-Tung Sah Micro-Electro-Mechanical Systems Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005)

Abstract: The traditional electrostatic converters need separated voltage source which is very difficult in the practice. A new vibration-powered electrostatic converter with the principle of work functions is presented. The design of the converter is based on MEMS technology, and adopts two kinds of different metal as the electrode plates of the capacitor. The math model is established to determine the parameters of cantilever beam. And with the aid of the finite element software, this model is tested and the dimension is modified to ensure that the electrostatic converter can work optimally. This new method gets rid of the dependence on additional voltage source. The process flow is developed and the prototype collector is successfully produced.

Key words: Micro energy collector Work functions MEMS

0 前言

基于微机电系统 (Micro electro mechanical systems, MEMS) 工艺的器件或系统, 具有体积小、质量轻、功耗小等特点, 使得它对于能量供给部分的尺寸有严格的要求。要实现无线传输与真正意义上的微型化及智能化, 能量的自给是关键。在结合 MEMS 工艺的基础上, 出现了利用热能、生物能、

振动能等能量采集器, 利用能量采集技术采集转换环境中存在的各种能源以供给器件工作, 其中振动能量采集是当前研究热点。

振动能量转换采集器大致分为三种形式: 电磁式, 压电式与电容式。英国 Southampton 大学研究小组开发了振动能量采集阵列, 通过悬臂梁尺寸不同, 可采集频率在 50~300 Hz 范围的振动, 可产生最大 4 mW 电能, 未见报道具体尺寸与工艺流程^[1]。香港大学亦开展了电磁式能量采集器件设计及工艺研究。UC Berkeley 大学一直在研究开发使用压电材料转换成电能的器件, SHAD^[2]实现了体积为 1 cm³ 的能量采集器, 可产生 120 μW 的稳定能量。已有

* 福建省科技重大专项/专题 (2006HZ0002-4)、福建省创新团队和福建省自然科学基金(E0610032)资助项目。20081204 收到初稿, 20090614 收到修改稿

研究表明，电磁式能量转换采集器尺寸大，且制作永久性磁极存在一定的难度，成本高^[3-5]。压电式能量转换采集器的重点在于压电材料与传统的硅工艺的融合比较难，而传统电容式能量转换采集器必须有外界电压输入，需要复杂的电路，这对工艺的要求更高，且成本提高，但是电容制作工艺成熟稳定^[6-10]。为克服微型能量采集器件的实际应用限制，本文采用不同的两种金属作为电容极板电极，由于不同金属存在不同的功函数。通过导线将两种金属连接，而产生一个稳定的电压，它的优点在于不需要复杂的附加电路就存在稳定的电压。两极板之间距离的改变使得电容发生改变，产生电流输出，实现将振动源转换成电能。

1 采集器设计原理

1.1 原理设计

对于金属而言，功函数是指一个电子从费米能级上升到金属表面静止状态(即真空能级)所需的能量。功函数越小则表明电子由金属内部迁移到金属表面所需要的能量越少，即电子越容易由内部迁移到表面。

不同的金属材料的极板具有不同的功函数。在真空中不相互接触时能量级为 E_V 。当两极板紧密接触时或者通过外部的传导介质相互导通时，费米能级需要达到平衡，由于不同金属的费米能级不相同，所以费米能级达到平衡就会产生电流。费米能级低的材料产生电子向费米能级高的材料移动，使得费米能级高的金属极板成为负电极，而费米能级低的金属极板成为正电极，即功函数大的带负电，而功函数小的带正电。由此可知，两极板之间产生电压差 V ，如图 1 所示，两不同电极金属材料的功函数分别为 ϕ_1 与 ϕ_2 ，费米能级为 E_{F1} 与 E_{F2} 。

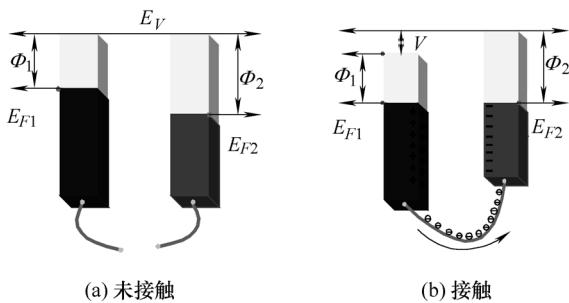


图 1 不同功函数的金属之间接触原理示意图

为了使 V 较大，需要选择功函数相差较大的两种金属作为电极，几种常见金属的功函数如下表所示。考虑到 MEMS 工艺兼容性，本设计两电极的材

料分别采用铝与铂。铝的功函数为 4.08 eV，与铂的功函数 6.35 eV 产生的电压差为 2.27 V。

物质	铝	银	铜	镍	铬	铂
功函数 ϕ	4.08	4.26	4.45	4.50	4.60	6.35

1.2 模型设计

如图 2 所示，振动能量采集器是一个具有可动极板的平板电容结构，可动极板与质量块连接，且质量块与支撑结构连接，任何复杂的机械结构都可以简化成弹簧加质量块的模型。质量块和悬臂梁组成了质量弹性系统，阻尼来源于运动过程中系统能量的损失，它可能是空气对物体的阻力或弹簧内部微小塑性变形等造成(微传感器与微执行器全书)。固定极板当外界的振动信号源作用于能量采集器时，可动电极随着振动源而发生受迫振动，使得铝极板与铂不动极板的距离发生改变，从而使得两极板之间的电容发生改变。根据功函数原理，不同金属两极板接触存在一个稳定的电压，由于极板之间通过外部导线连接，等同与两个极板直接接触。所以当极板间电容发生改变时，产生可变电流 $Q(t)$ ，其表达式为 $Q(t) = VC(t)$ ，式中 V 为电压， $C(t)$ 为随时间变化电容。这样实现了将振动信号转化成电流信号，即将振动能量转换成电能。

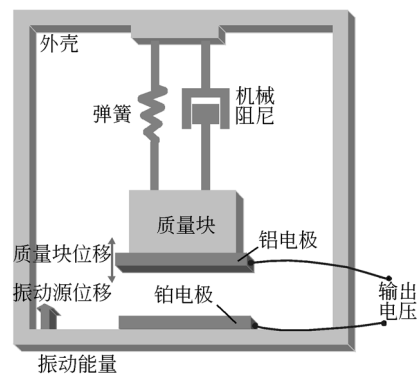


图 2 振动能量采集器原理示意图

2 系统数学模型

可变电容的方程式为

$$C(t) = \epsilon \frac{A}{d - x(t)} \tag{1}$$

式中 $C(t)$ 为随时间变化的可变电容的电容值， ϵ 为极板之间的介电常数， A 为极板相对面积， d 为两极板之间的距离， $x(t)$ 为由于外界振动源而产生相应的位移。充满电荷的电极的移动产生电荷的移动，从而产生电流驱动外部的负载 R_L ，从能量采集器输

出的电流等于产生的电压差与 R_L 成一定的比例关系, 电流可以被直接消耗或存储。

用数学表达式模拟能量采集器的非线性, 有

$$m\ddot{x}(t) + b_m\dot{x}(t) + kx(t) - V(t) = m\ddot{y}(t) \quad (2)$$

式中 m 表示质量块以及与其粘结的电极的质量, b_m 表示阻尼系数, k 表示弹性系数, $V(t)$ 表示电压值, $y(t)$ 表示振动位移。

能量采集器的结构设计为多个悬臂梁与质量块连接, 对于悬臂梁理论, 主要假设臂末端的偏移量比臂长小。设悬臂梁的长度为 L , 宽为 a , 厚为 δ , 弹性模量为 E , 密度为 ρ 。受到均匀分布载荷 p , 当质量块相当小时, 偏移量

$$w(p, x) = \frac{px^2}{24EI} (6L^2 - 4Lx + x^2) \quad (3)$$

最大应力为

$$\sigma = \frac{pL^2\delta}{4I} \quad (4)$$

式中 I 为弯矩惯量, 定义为

$$I = \frac{a\delta^3}{12} \quad (5)$$

当一个均匀力 F 施加到悬臂梁表面时, 载荷 p 等于力 F 与宽度 a 之比

$$p = \frac{F}{a} \quad (6)$$

对于施加于悬臂梁末端的点载荷 Q , 得出的偏移量

$$w(p, x) = \frac{Qx^2}{6EI} (3L - x) \quad (7)$$

最大应力为

$$\sigma = \frac{QL\delta}{2I} \quad (8)$$

悬臂梁的基模共振频率为

$$f_0 = 0.161 \frac{\delta}{L^2} \left(\frac{E}{\rho} \right)^{1/2} \quad (9)$$

需要注意的是 f_0 并不依赖于悬臂梁的宽度。单晶硅的弹性模量为

$$E = 165 \text{ GPa}$$

密度

$$\rho = 2.33 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

泊松比为 0.3, 最大许用应力

$$[\sigma] = 7 \text{ GPa}$$

安全系数为

$$n = 3$$

即允许的最大应力

$$[\sigma]_{\max} = \frac{[\sigma]}{n} = 2.33 \text{ GPa}$$

因此在已知一定频率下, 可得出相应的悬臂梁宽度与长度。

当质量块的质量 m 不可忽视时, 由瑞利法可知固有频率的公式为

$$2\pi f_0 = \sqrt{\frac{\frac{3EI}{l^3}}{m + \frac{33}{140}m'l}} \quad (10)$$

式中 m' 为悬臂梁质量。悬臂梁相对于质量块的质量小很多, 可以忽略不计悬臂梁的质量, 且结构设计中存在 8 根悬臂梁, 假设每根悬臂梁受力均等, 均为 $m/8$, 可得

$$2\pi f_0 = \sqrt{\frac{3Ea\delta^3/12l^3}{m/8}} \quad (11)$$

由上述分析可知大致悬臂梁长度的设置与范围, 使用有限元模拟软件 ANSYS 进行进一步分析。

3 模拟分析与优化设计

3.1 采集器结果设计

在确定采集器质量块等其他参数的情况下, 其中悬臂梁的厚度为 SOI 晶片器件层的厚度, 所以重点设计在于悬臂梁长度和宽度的确定。

设定悬臂梁的宽度为 $300 \mu\text{m}$, 同侧两个悬臂梁互相靠近边的距离 $S_p = 4000 \mu\text{m}$, 改变悬臂梁的长度, 如图 3 所示, 随着长度的增加, 一阶与二阶频率下降, 且一阶与二阶之间的频率间距变小。

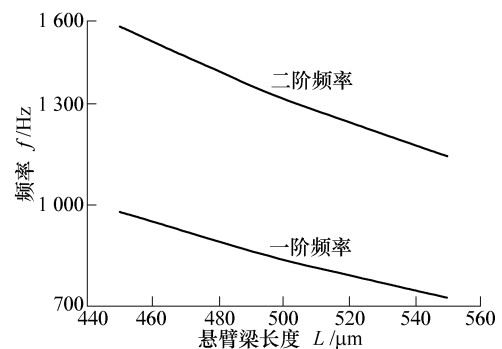


图 3 悬臂梁长度与固有频率关系大致趋势

设定悬臂梁的长度为 $500 \mu\text{m}$, 同侧两个悬臂梁互相靠近边的距离为 $S_p = 4000 \mu\text{m}$, 改变悬臂梁的长度, 如图 4 所示, 随着宽度的增加, 一阶与二阶频率上升, 且一阶与二阶之间的频率间距变大。

设定悬臂梁长为 $450 \mu\text{m}$, 宽为 $300 \mu\text{m}$, 改变同侧两个悬臂梁互相靠近边的距离 S_p , 如图 5 所示。随着 S_p 增大, 一阶与二阶之间的频率间距变大。

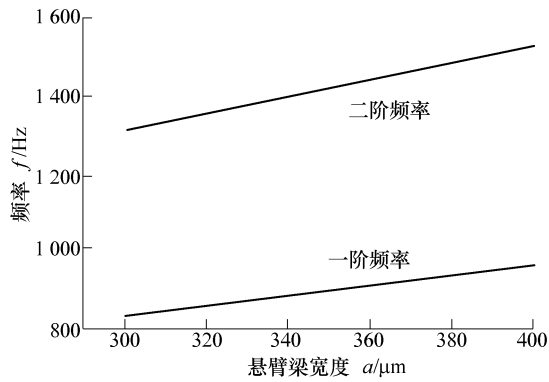


图 4 悬臂梁宽度与固有频率关系大致趋势图

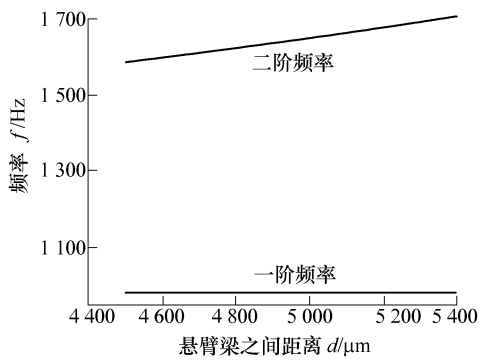


图 5 悬臂梁之间的距离与固有频率之间的关系图

设定悬臂梁长为 450 μm，如图 6 所示，同时改变悬臂梁的宽度与 S_p ，观察一阶与二阶频率变化。

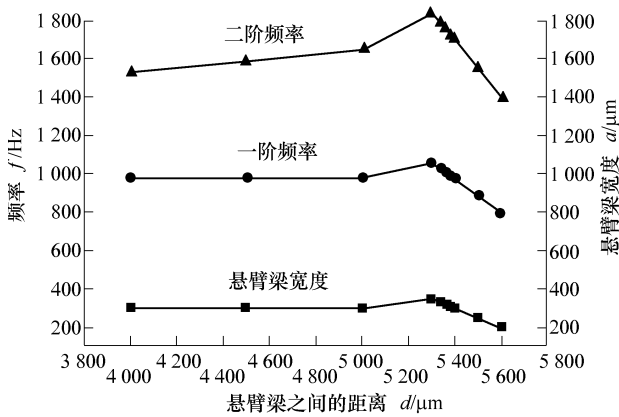


图 6 固有频率与悬臂梁宽度和 S_p 之间的关系图

经过分析，确定悬臂梁的尺寸：宽度为 310 μm， $S_p=5\ 380\ \mu\text{m}$ ，模拟得出一阶频率为 998.26 Hz，二阶频率为 1 730.9 Hz，差距为 732.64 Hz。

3.2 系统模拟分析

如图 7 所示，模拟分析的主要对象为悬臂梁与质量块的振动模式，其他部分只是起到支撑与限制作用，所以可以简化结构，在分析过程中施加固定边界条件便可。有限元模型的网格的划分对于后续分析计算有较大的影响，网格规则与否和粗细不同都会使得得到的固有频率和固有振型有一定的差

异。为得到良好的有限元分析结构，需要细化悬臂梁的细节，质量块的网格可以相应较粗。具体网格划分结果如图 8 所示。

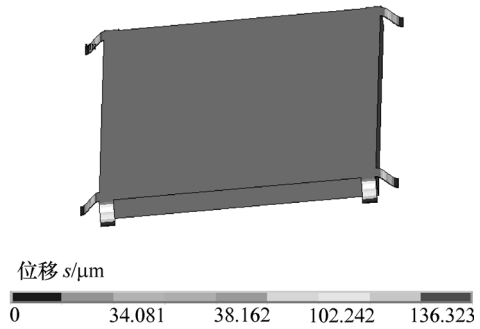


图 7 能量采集器的 ANSYS 模态分析结果

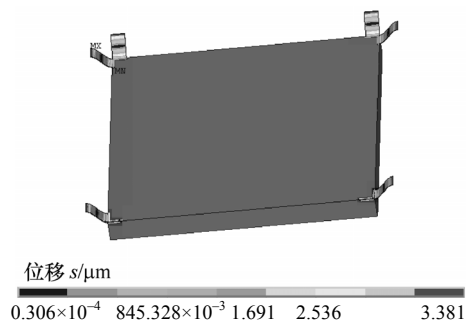


图 8 一个重力加速度的等效力结果分布

如图 9 所示，在施加 50 个重力加速度情况下，产生的最大应力为 190 MPa，小于硅允许的最大应力 2.33 GPa。最大位移为 12.457 μm，由于实际情况为质量块的振动幅度被上下层玻璃限制于 6 μm，所以可知在 50 个重力加速度情况下，能量采集器可以安全工作。

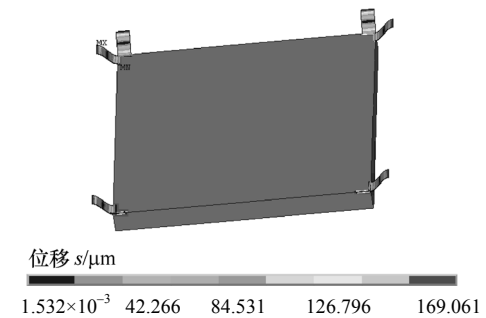


图 9 50 个重力加速度的等效力结果分布

4 采集器工艺分析

采集器为玻璃—绝缘层上硅膜 (Silicon-on-insulator, SOI)—玻璃三层结构组合，采用阳极键合的方式，形成三明治结构。质量块，悬臂梁及可动电极 Al 结构部分在 SOI 晶片上构造，上层玻璃结构为不可动电极 Pt 与防止两极板粘结的柱子，同时

上下层玻璃结构都具有一定深度的凹槽，它不仅以限制质量块振动幅度，保证悬臂梁振动时不会超过硅的最大应力强度，而且起到一定的保护作用。具体器件截面如图 10 所示。整体器件的工艺流程在厦门大学萨本栋微机电中心完成。最后完成的器件如图 11 所示。

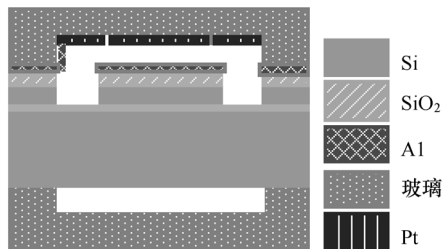


图 10 采集器截面示意图

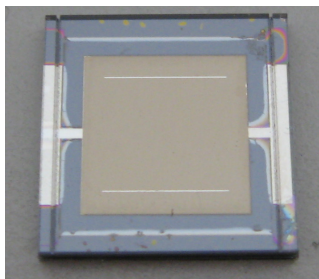


图 11 振动能量采集器

5 结论

在汽车传感器、高端动力设备性能监测、无线传感网络等领域，日趋要求传感器器件微型化、集成化，基于 MEMS 的微型能量采集器具有能量采集功能且无需外接电路，随着其技术成熟与完善，必将得到广泛应用。本文以克服传统电容式微能量采集器需外接电源为目的，开展了基于 MEMS 技术的功函数电容式微能量采集器设计分析。

(1) 进行了数学模型分析、优化设计及工艺等基础性研究，设计出了基于悬臂梁与质量块结构微振动能量采集器，

(2) 分析了不同悬臂梁参数对器件性能的影响，给出了能量采集器悬臂梁参数优化设计结果，并最终实现了器件的制备，为振动能量采集器真正实用化打下了良好基础。

参 考 文 献

[1] GLYNNE J P, TUDOR M J, BEENY S P, et al. An

electromagnetic vibration-powered generator for intelligent sensor systems[J]. *Sensor and Acuator A*, 2004,110: 344-349.

- [2] SHAD Round. Energy scavenging for wireless sensor nodes with a focus on vibration to electricity conversion[D]. Berkeley: University of California, 2000.
- [3] SHAD Roundy, WRIGHT P K, RABAEY J. A study of low level vibration as a power source for wireless sensor nodes[J]. *Computer Communication*, 2003, 26: 1 131-1 144.
- [4] BEEBY P, TUDOR M J, WHITE N M. Energy harvesting vibration sources for Microsystems applications[J]. *Meas. Sci. Tech.*, 2006,17: R175-R195.
- [5] NIRMAL K M, RAHMAN R A, SALMAN M L. Experimental investigation of vibration power flow in thin technical orthotropic plates by the method of vibration intensity[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 285: 669-695.
- [6] KOUKHARENKO E, BEEBY S, TUDOR M J, et al. MEMS vibration powered electromagnetic generator for wireless sensor applications[J]. *Journal of Microsystem Technologies*, 2006, 12: 1 071-1 077.
- [7] SAHA C R, O'DONNELL T, LODER H, et al. Optimization of an electromagnetic energy harvesting device[J]. *IEEE Trans. on Magn.*, 2006, 42(10): 3 509-3 511.
- [8] DESPESSE G, JAGER T, CHAILLOUT J J, et al. Design and fabrication of a new system for vibration energy harvesting[J]. *Sensors Actuators A*, 2001, 92: 335-342.
- [9] KULAH H, NAJAFI K. An electromagnetic micro power generator for low-frequency environmental vibrations[C]// *Micro Electro Mechanical Systems*, 17th IEEE Conf. on MEMS, Maastricht, 2004: 237-240.
- [10] MIZUNO M, CHETWYND D. Investigation of a resonance microgenerator[J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2003, 13: 209-216.

作者简介：李林，女，1983 年出生。主要研究方向为基于 MEMS 器件能量采集。

E-mail: xiaoshu1983383@gmail.com

郭隐彪，男，1962 年出生，教授。研究方向为微纳米加工与检测。

E-mail: guoyb@xmu.edu.cn