

静电式同位素辐射能量收集器的研究*

王翔¹⁾²⁾ 张强²⁾ 陈然斌²⁾ 邓志强¹⁾²⁾ 伞海生^{1)2)†}

1) (厦门大学物理与机电工程学院, 厦门 361005)

2) (厦门大学萨本栋微纳米科学技术研究院, 厦门 361005)

(2013年7月12日收到; 2013年9月30日收到修改稿)

针对目前无线传感网络节点对长寿命微能源的需求, 提出了将同位素辐射能量转换为电能的静电式振动能量收集原理. 该原理利用同位素 $^{63}\text{Ni}\beta$ 辐射能实现平行板悬浮-质量块结构的自由阻尼振动, 并通过可变电容电路实现充-放电振荡循环, 从而实现电能的转换. 通过分析运动状态和能量转化过程, 给出了结构的运动状态和能量输出方程, 并使用 Matlab/Simulink 对输出特性进行了数值模拟和基于 Ansys 的结构优化设计. 根据仿真和优化的结构尺寸设计出了满足最大平均输出功率的微电子机械器件结构. 结果表明: 所设计的结构在一阶固有频率为 500 Hz, 两极板间距离为 75 μm , 外接电阻为 90 k Ω 时平均输出功率最大为 0.416 μW , 转化效率 8.25%.

关键词: 能量收集, 同位素 ^{63}Ni , 静电式, 振动能量

PACS: 85.85.+j, 84.60.Bk

DOI: 10.7498/aps.63.028501

1 引言

迅速发展的无线传感网在环境监测、结构健康监测、植入式医疗监测、汽车胎压监测等方面有广阔的应用前景, 但是目前这些应用的主要瓶颈是自给能源. 通过收集环境能量 (如振动能、电磁辐射能、热能和生物能) 转换成可用的电能, 为微型传感器节点提供能量成为当前研究的热点^[1-4]. 在众多的环境能量中, 同位素辐射能是一种较特殊的能量, 通常被用于航天航空领域和无人值守环境下的器件供电. 同位素辐射能具有能量密度高 ($\sim 10^5$ kJ/m³) 和半衰期长的特点 (如镍-63 (^{63}Ni) 的半衰期可达 100 年)^[2]. 目前, 利用同位素 β 辐射直接转换电能的技术已被广泛研究^[3-6], 然而利用同位素 β 辐射伏特效应的直接转化电池存在转化效率低、驱动电流小和寿命短 (半导体辐射损伤) 的缺点, 其实用化很难实现. 2008 年, Lal 等^[7] 利用同位素 β 辐射能实现压电悬梁的充-放电振荡循环, 实现了从核能到机械能再到电能的转换, 转

换效率达到 6% 左右, 其微瓦能量的输出对微器件的实际应用有很重要的意义. 然而, 压电薄膜经过大量周期性加载后会疲劳损伤, 具体表现为随着循环加载次数的增加, 压电陶瓷的剩余极化强度降低, 压电常数大幅降低^[8], 其结果是器件的硅基悬梁尚未疲劳破坏之前, 压电薄膜却因疲劳破坏丧失能量转换功能. 此外, 普遍使用的溶胶凝胶工艺制备压电材料的方法与硅基微电子机械系统 (MEMS) 的工艺兼容性较差, 因此器件制备工艺难度大, 可靠性低. 为了提高器件工作的可靠性并简化器件制造工艺, 本文提出了一种新的静电式的能量收集微结构, 该结构避免了压电材料的使用, 利用硅基悬浮平板可变电容结构实现同位素辐射能由振动向电能的转换.

2 工作原理与模型的建立

同位素辐射静电式能量收集器的原理如图 1 所示. 根据 MEMS 构造工艺, 其结构设计如

* 国家自然科学基金 (批准号: 51075344, 61274120)、厦门市科技计划 (批准号: 3502Z20123008) 和福建省高校产学研合作科技重大项目 (批准号: 2013H6023) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: sanhs@xmu.edu.cn

图 1(a) 所示, 为玻璃-硅-玻璃“三明治”结构, 其上层为玻璃晶圆制备出带平面固定极板的凹腔; 中层为绝缘体上硅 (SOI) 晶圆制备出带平面动极板的悬臂梁-质量块结构; 下层为玻璃晶圆制备的带同位素辐射源的凹腔. 上下玻璃晶圆通过硅-玻璃阳极键合实现真空封装.

该能量收集器的机电模型如图 1(b) 所示. 该模型为当有外界振动或外力作用于悬臂梁-质量块系统时, 由弹性系数 k 、阻尼 b_m 和质量 m 组成弹簧-质量块系统发生有阻尼的自由振动. 随着与质量块相连的可动电容极板的振动, 导致上下极板之间的电容发生变化. 如果在可变电容两端加载一个恒定电压 V_b , 随着电容的变化会在回路中产生交变电流, 电流作用于负载电阻 R , 从而实现振动的机械能向电能的转化 [9].

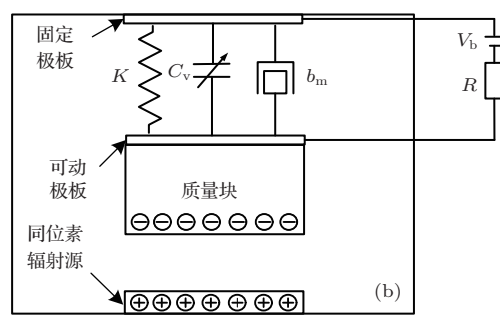
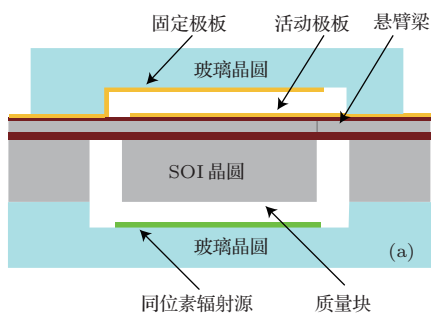


图 1 静电式同位素辐射能量收集器工作原理图 (a) MEMS 设计结构; (b) 机电模型

图 2(a) 为振动能量收集结构等效电路. 由于电容的存在, 直流电源并不消耗电能. 系统所收集的振动能量全部转化为交流电作用于负载 R . 上下极板之间的可变电容 $C(t)$ 随时间变化可表达为

$$C(t) = \epsilon \frac{S}{g_0 - x(t)}, \quad (1)$$

其中 ϵ 为介电常数, S 为平行板的面积, g_0 为两平行板之间的初始距离, $x(t)$ 为动极板随时间变化的位移函数. 随着动极板位移的变化, 电容发生变化, 产生的电流 $i(t)$ 可以被表达为

$$\begin{aligned} i(t) = \dot{q}(t) &= \frac{V_R}{R} = \frac{V_b - V_C}{R} = \frac{V_b}{R} - \frac{q(t)}{C(t)R} \\ &= \frac{V_b}{R} - \frac{q(t)(g_0 - x(t))}{\epsilon S R}, \end{aligned} \quad (2)$$

上式中, V_C 为可变电容之间的电压. 因此, 系统的输出功率为

$$P = i^2(t)R. \quad (3)$$

联立 (1), (2) 和 (3) 式可得:

$$P(t) = \frac{V_b^2}{R} + \frac{q(t)^2(g_0 - x(t))^2}{\epsilon^2 S^2 R}$$

图 1 显示的振动能量收集器的最大优势在于不但可以收集外部环境的振动能量, 同时还能利用结构本身集成的同位素及其 β 辐射能致动自身结构, 致使器件在安静的外部环境下仍能转换自身的振动能量为外界提供电能. 本结构中的同位素源衰变所释放的带负电的 β 粒子会在质量块底部附着并积累, 同时由于释放带负电 β 粒子使同位素母核带正电. 随着正负带电粒子的不断堆积, 质量块和同位素源之间的电场力也不断增大, 导致质量块受电场力的作用不断向下移动并最终与放射源接触. 这时, 正负带电粒子发生中和, 电场力消失, 质量块被释放并发生自由阻尼振动. 值得注意的是, 在本结构中, 高能 β 辐射作用于质量块底部, 因此质量块受到的辐射损伤对结构的整体力学性能不产生影响, 同样也不会影响器件的能量转换性能.

$$- \frac{2V_b q(t)(g_0 - x(t))}{\epsilon S R}. \quad (4)$$

图 2(b) 为同位素辐射能收集结构等效电路. 放射源 ^{63}Ni 发生 β 衰变放射出带负电的 β 粒子被质量块底部收集, 所以把放射过程等效为电流 I 的恒流源. 质量块收集 β 粒子后, 质量块和放射源之间形成一个电容 C_{rad} . 当整个系统工作于真空中时, 漏电阻 R_l 为无穷大, 所以漏电流可以忽略不计 [10]. 由 ^{63}Ni 的 β 衰变规律可得:

$$I = e(1 - \alpha)A_{\text{Ni}}S_{\text{Ni}}, \quad (5)$$

(5) 式中 e 为电子电量, α 为 β 粒子的反射率, A_{Ni} 和 S_{Ni} 分别为 ^{63}Ni 的放射性活度和平面面积. 电容收集的电荷电量 $q_{\text{rad}}(t)$ 为

$$q_{\text{rad}}(t) = (1 - \alpha)It. \quad (6)$$

设 T 为质量块放电的周期, 定义其为从 $t = 0$ 到质量块和放射源接触时的时间. 从上式中可推导出电容 C_{rad} 间电场力 F_{rad} 的表达式为

$$F_{\text{rad}} = \frac{(q_{\text{rad}}(t))^2}{2\epsilon S} = \frac{(\alpha I)^2(t - nT)^2}{2\epsilon S}, \quad (7)$$

其中 n 表示周期数. 列平衡方程有:

$$F_{\text{var}} + F_{\text{spring}} = G + F_{\text{rad}}, \quad (8)$$

式中 F_{spring} 为接触时悬臂梁的弹力, G 为质量块的重力. F_{var} 为动极板和定极板之间的静电力, 其表达式为

$$F_{\text{var}} = \frac{q(t)^2}{2\epsilon S} = \frac{V_b^2 \epsilon S}{2(g_0 - x(t))^2}. \quad (9)$$

联立 (7), (8), (9) 式可解得 T 为

$$T = \sqrt{\left[\frac{(V_b)^2 \epsilon S}{2(g_0 + h)^2} + kh - G \right] \frac{2\epsilon S}{(\alpha I)^2}}, \quad (10)$$

式中 h 为质量块和放射源之间的初始距离. 从方程 (10) 可得周期 T 与弹性系数 k 及初始距离 g_0 的关系, 如图 3 所示.

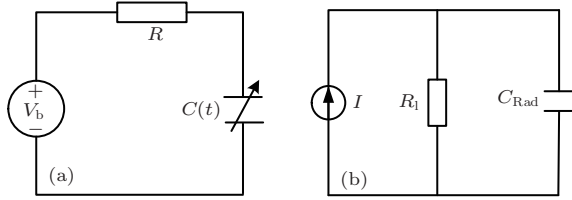


图 2 能量收集结构等效电路图 (a) 振动能量收集结构等效电路; (b) 同位素辐射能收集结构等效电路

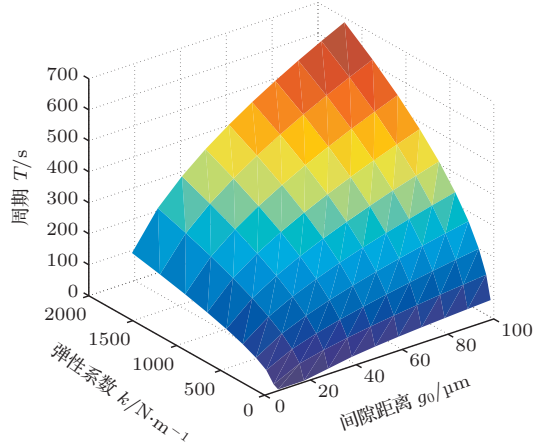


图 3 周期 T 与弹性系数 k 及初始距离 g_0 的关系

对于弹簧质量块系统, 其动态方程为

$$m\ddot{x} + b_m\dot{x} + kx = F_{\text{var}} - F_{\text{rad}} - G, \quad (11)$$

式中系统的机械阻尼 $b_m = m\omega/Q_m$, 弹簧系数 $k = m\omega^2$. 联立 (1)–(11) 式可得系统的动态方程组, 根据此方程组进行系统能量转化和收集的仿真.

3 数值仿真与结构设计优化

使用 Matlab 软件中的 Simulink 模块进行动态数值仿真. 设计质量块的尺寸参数为 $6000 \mu\text{m}$

$\times 6000 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m}$, 而仿真所需其他参数由表 1 给出.

表 1 能量收集器结构参数

符号	参数名称	数值	单位
p	质量块密度	2.3	g/cm^3
V_{in}	外加电压	1.5	V
S	平板面积	36	mm^2
I	辐射电流	75	pA
Q_m	机械品质因素	10^5	
ϵ	介电常数	8.854×10^{-12}	F/m

图 4 显示了当负载电阻 $R = 100 \text{ k}\Omega$ 时, 平均输出功率同初始距离 g_0 及结构的一阶固有频率 f 的关系. 图 4 中的插图为使用的悬臂结构.

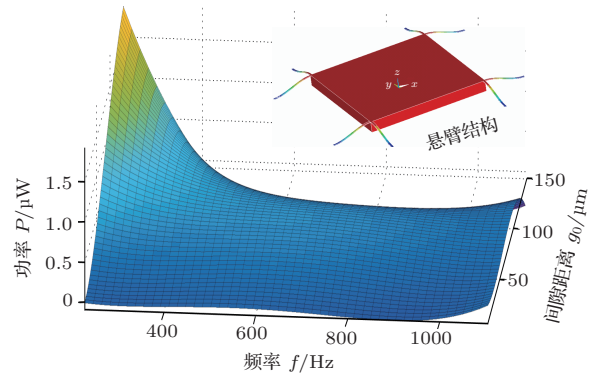


图 4 仿真所得功率 P 同 g 及 f 的关系 (插入图为悬臂结构)

由仿真可知当 $g_0 = 100 \mu\text{m}$, $f = 200 \text{ Hz}$ 时平均输出功率 $\bar{P}$ 取得最大值 $\bar{P} = 1.83 \mu\text{W}$, 但由此造成悬臂结构尺寸偏大和电场力偏小的限制. 所以根据结构优化设计的要求取 $g_0 = 75 \mu\text{m}$, $f = 500 \text{ Hz}$. 由于阻抗匹配对输出功率有显著影响, 为此我们模拟了负载电阻 R 同平均输出功率 $\bar{P}$ 之间的关系, 如图 5 所示.

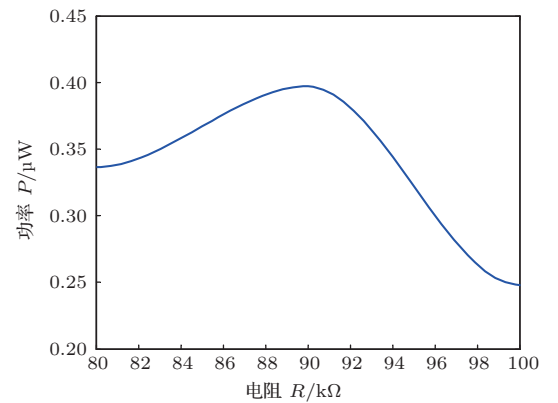


图 5 输出功率与负载电阻的关系

从图5可以发现, 当 $g_0 = 75 \mu\text{m}$, $f = 500 \text{ Hz}$, $R = 90 \text{ k}\Omega$ 时平均功率可取到最大值为 $\bar{P} = 0.416 \mu\text{W}$.

当质量块和上极板间的初始距离 $g_0 = 75 \mu\text{m}$, 外界电阻 $R = 90 \text{ k}\Omega$, 系统固有频率 $f = 500 \text{ Hz}$, 仿真时间 $t = 30 \text{ s}$ 时, 能量收集器的质量块位移 S 和输出功率 P 随时间 t 变化的关系如图6所示.

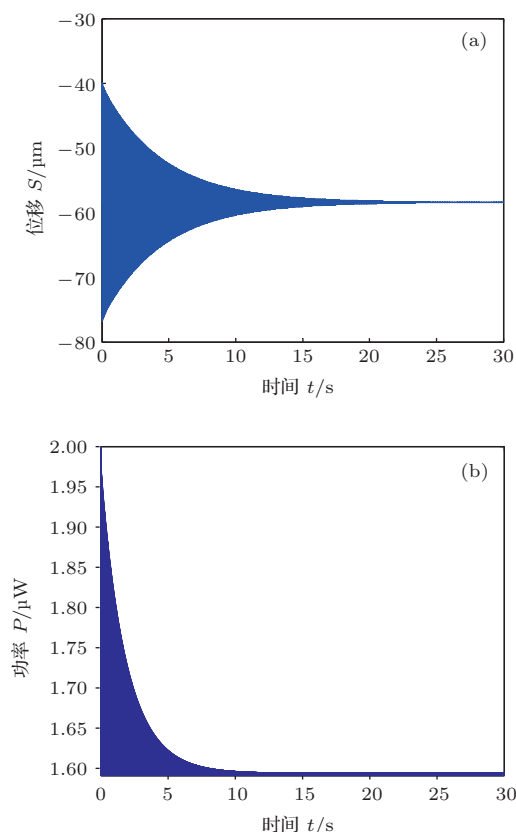


图6 能量收集器的质量块位移和输出功率与时间的关系 (a) 位移随时间的变化; (b) 功率随时间的变化

该系统结构的能量转换效率可通过 $\eta = \bar{P}_{\text{max}}/P_{\text{rad}}$ 来计算. 放射源 ^{63}Ni 的放射功率 P_{rad} 可根据下式计算^[10]:

$$P_{\text{rad}} = NE_{\text{av}}, \quad (12)$$

其中 N 为放射源放射出的粒子个数, 而 E_{av} 为每个粒子的放射功率. 根据上式可以计算得出转换效率 $\eta = 8.25\%$.

根据上述的结构用有限元结构仿真软件Ansys优化结构尺寸. 仿真求得在悬臂梁长度为 $2000 \mu\text{m}$, 宽度为 $100 \mu\text{m}$, 厚度为 $30 \mu\text{m}$, 质量块的长度为 $6000 \mu\text{m}$, 厚度为 $507 \mu\text{m}$ 时系统的一阶固有频率 $f = 500 \text{ Hz}$, 一阶模态为上下振动, 能够

满足能量收集器的动态运动要求.

4 结 论

利用同位素 β 粒子辐射能实现平行板悬浮-质量块结构的自由阻尼振动, 并通过可变电容电路实现充-放电振荡循环从而实现电能的转换. 通过仿真可知, 优化结构在一阶固有频率 $f = 500 \text{ Hz}$, 两极板间距离 $g_0 = 75 \mu\text{m}$, 外接电阻 $R = 90 \text{ k}\Omega$ 时得到输出功率 $\bar{P} = 0.416 \mu\text{W}$, 其转换效率高达 8.25% . 静电式同位素辐射能量收集器与压电式同位素能量收集器相比能量转化效率高, 且容易与MEMS工艺兼容, 有潜力成为微系统和微器件的长寿命能源^[11-13].

参考文献

- [1] Fan K Q, Jia J Y, Zhu Y M, Zhang X Y 2011 *Chin. Phys. B* **20** 043401
- [2] He C, Fu X, Xu F, Wang J, Zhu K, Du C, Liu Y 2012 *Chin. Phys. B* **21** 054207
- [3] Lin H B, Cao M S, Yuan J, Wang D W, Zhao Q L, Wang F C 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4323
- [4] Fan K Q, Ming Z F, Xu C H, Chao F B 2013 *Chin. Phys. B* **22** 104502
- [5] Yao S L, Song Z J, Wang X, San H S 2012 *Appl. Radiat. Isot.* **70** 2388
- [6] Duggirala R, Li H, Lal A 2009 *Appl. Phys. Lett.* **92** 154104
- [7] Cheng Z J, San H S, Chen X Y, Liu B, Feng Z H 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 078401
- [8] Guo H, Yang H, Zhang Y 2007 *20th IEEE International Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2007)* Kobe Japan, April 2-6, 2007 p867
- [9] Gao H, Luo S Z, Zhang H M, Wang H Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 176101 (in Chinese)[高晖, 罗顺忠, 张华明, 王和义 2012 物理学报 **61** 176101]
- [10] Lal A, Duggirala R, Hui L 2005 *IEEE Pervas. Comput.* **4** 53
- [11] Vijay D P, Desu S B 1993 *J. Electrochem. Soc.* **140** 2640
- [12] Roundy S, Wright P K, Rabaey J M 2003 *Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks* (Boston M A: Kluwer Academic Publishers) p341
- [13] Li Y F, Cheng Z J, San H S, Duo Y X 2010 *5th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems* Xiamen China, January 20-23, 2010 p78

Radioisotope energy conversion using electrostatic vibration-to-electricity converters^{*}

Wang Xiang¹⁾²⁾ Zhang Qiang²⁾ Chen Ran-Bin²⁾ Deng Zhi-Qiang¹⁾²⁾ San Hai-Sheng¹⁾²⁾†

1) (*Department of Mechanical and Electrical Engineering, School of Physical and Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China*)

2) (*Pen-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China*)

(Received 12 July 2013; revised manuscript received 30 September 2013)

Abstract

Wireless sensor nodes deployed at remote and inaccessible locations need long lifetime power sources to prevent cost prohibitive periodic replacement. In this work, we present a radioisotope ^{63}Ni energy converter using radioisotope-powered electrostatic vibration-to-electricity conversion. Free damped vibration happening in a suspended parallel plate structure with a mass enables a variable capacitance, which can be used to realize the generation of electricity energy by an external circuit. The MATLAB/Simulink is used to simulate the vibration and output power, and the Ansys is used to optimize the structure design. The results show that the optimized design structure with a first-order natural frequency of 500 Hz, a plate gap of 75 μm , and an external resistance of 90 $\text{k}\Omega$ can generate an average output power of 0.416 μW and conversion efficiency of 8.25%.

Keywords: energy scavenging, isotopes ^{63}Ni , electrostatic converter, vibration energy

PACS: 85.85.+j, 84.60.Bk

DOI: 10.7498/aps.63.028501

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51075344, 61274120), the Science and Technology Program of Xiamen, China (Grant No. 3502Z20123008), and Fujian Province Major Projects on University-Industry Cooperation in Science and Technology, China (Grant No. 2013H6023).

† Corresponding author. E-mail: sanhs@xmu.edu.cn