

基于单极性驻极体薄膜的振动能俘获研究

马星晨 叶瑞丰 张添乐 张晓青

Vibration energy harvesting with uni-polar electret film

Ma Xing-Chen Ye Rui-Feng Zhang Tian-Le Zhang Xiao-Qing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 177701 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.177701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.177701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I17>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

铌镁酸铅-钛酸铅铁电阴极电子发射特性

Electron emission from $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ ferroelectric cathode

物理学报.2015, 64(24): 247701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.247701>

交联聚丙烯压电驻极体的压电性能及振动能量采集研究

Piezoelectric property of cross-linked polypropylene piezoelectret and its application in vibration energy harvester

物理学报.2015, 64(17): 177701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.177701>

钛酸钡纳米颗粒铁电性临界尺寸的理论分析

Theoretical analysis on ferroelectricity critical dimension of BaTiO_3 nanoparticles

物理学报.2015, 64(17): 177702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.177702>

聚(偏氟乙烯-三氟乙烯)纳米薄膜极化反转与疲劳特性

Study of ferroelectric switching and fatigue behaviors in poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) copolymer nano-films

物理学报.2015, 64(16): 167701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.167701>

极化电压对聚丙烯压电驻极体膜压电性能的影响

Influence of polarization voltage on piezoelectric performance of polypropylene piezoelectret films

物理学报.2014, 63(15): 157703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.157703>

基于单极性驻极体薄膜的振动能俘获研究*

马星晨 叶瑞丰 张添乐 张晓青†

(同济大学物理科学与工程学院, 上海市特殊人工微结构材料及技术重点实验室, 上海 200092)

(2016年5月15日收到; 2016年6月25日收到修改稿)

利用电晕充电方法成功制备了单极性交联聚丙烯 (IXPP) 驻极体膜, 并设计、制备了基于该驻极体膜的振动能采集器. 通过表面电位的测量, 研究了 IXPP 驻极体膜的电荷储存稳定性; 通过测量振动能采集器样品的准静态和动态电荷灵敏度, 考察了能量采集器的机电耦合性能, 研究了能量采集器在 {3-3} 模式下对环境振动能的俘获. 结果表明, 用 -13 kV 的电晕电压与 -2.0 kV 的栅极电压给单面镀铝电极的 IXPP 样品充电, 在实验室环境下放置 15 天后获得 -680 V 稳定的表面电位; 利用准静态方法测量器件样品的电荷灵敏度, 在 1.3 kPa 压强下, 样品的准静态电荷灵敏度 M 高达 1800 pC/N; 对于有效面积为 13 cm² 的能量采集器, 当振子质量为 42.2 g, 在共振频率 70 Hz 处, 样品在最佳负载电阻 80 M Ω 附近的输出功率为 5 μ W.

关键词: 单极性驻极体薄膜, 交联聚丙烯, 振动能采集器, 能量俘获

PACS: 77.84.-s, 77.55.-g, 84.60.-h

DOI: 10.7498/aps.65.177701

1 引言

近年来, 无线传感器网络、可植入式生物传感器以及便携式或可穿戴式电子设备实现了迅速的发展, 这些设备的电源依旧依赖于传统电池, 但是一旦器件数目庞大, 或安置在恶劣环境, 更换电池就成为昂贵或不可能完成的工作. 因此, 人们越来越迫切需要能够采集周围环境各种能源 (例如太阳能、热能、振动能、风能、生物运动能等等) 并将其转变为有用电能的器件, 以实现小型电子设备的自主供电^[1-7].

单极性驻极体薄膜是一类能够长期保持极化状态并且能在周围空间激发稳定、持久静电场的一类功能电介质材料. 利用驻极体的静电场效应制备出的能量采集器可以实现环境振动能向电能转化.

本文报道一种基于单极性驻极体薄膜的振动能采集器, 该能量采集器由单面蒸镀铝电极的负极性交联聚丙烯 (IXPP) 驻极体薄膜层^[8-10]、空气层以及铜箔层构成, 研究了该采集器在 {3-3} 模式

下的振动能采集, 并将实验结果与理论值进行比较和讨论.

2 实验工作

2.1 IXPP 单极性驻极体薄膜的制备

本研究采用的原材料是厚度为 52 μ m 的 IXPP 多孔膜, 其面密度和体密度分别为 0.03 kg/m² 和 576 kg/m³, 相对介电常数为 1.7 . 首先通过真空蒸镀的方法在 IXPP 膜的一面覆上约 100 nm 厚的铝电极, 然后采用有栅控恒电压电晕充电方法对样品膜的自由面 (即没有覆电极的面) 进行极化处理, 成为单极性驻极体膜. 电晕电极 (即电晕针尖端) 与样品表面 (非电极面) 距离为 7 cm, 电晕电压为 -13 kV, 栅极电压为 -2.0 kV, 充电时间为 60 s^[11].

2.2 基于 IXPP 单极性驻极体薄膜的振动能采集器的制备

将 IXPP 驻极体膜裁剪成边长为 5 cm 的正方形, 该部分作为振动能采集器的上半部分. 选取

* 国家自然科学基金 (批准号: 11374232) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: 同济大学 2014) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: x.zhang@tongji.edu.cn

同样尺寸(即边长为5 cm的正方形),厚度和面密度分别为 $56\text{ }\mu\text{m}$ 和 300 kg/m^2 的铜箔作为下电极.从现实的器件考虑,需要一种结构支撑起上电极,本研究以两个相同尺寸(长5 cm,宽1.2 cm,厚度1 mm)的硬纸板为支撑结构,用双面胶将IXPP单极性驻极体薄膜、硬纸板以及铜箔黏结起来,成为一个振动能量采集器.由于支撑结构有一定的宽度,样品的有效面积只有 13 cm^2 .当器件表面受到垂直压力时,IXPP单极性驻极体薄膜受压弯曲,使

得气隙层被压缩,这就造成电极上感应电荷量的变化,从而在外电路中表现出短路电流或开路电压,获得一种“类压电效应”,实现机械能向电能的转换.实验中,振子是长、宽、高、质量分别为5 cm, 1 cm, 3 cm和42.2 g的长方体铝块,振子放在样品的中间位置,与样品的接触面积为 5 cm^2 .图1为基于IXPP单极性驻极体薄膜的振动能量采集器的制备过程图示及一个长方体振子放置于能量采集器样品上的情形.

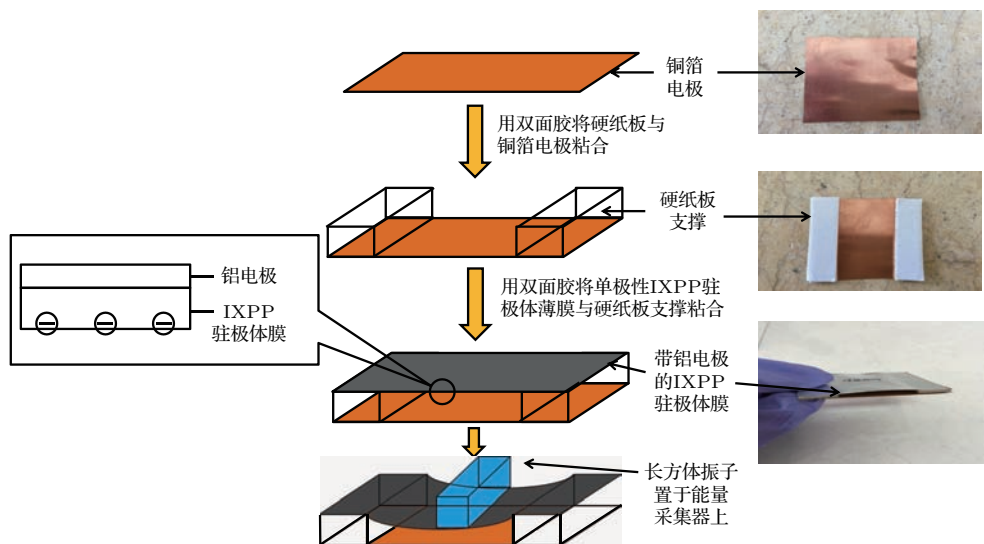


图1 (网刊彩色) 基于IXPP单极性驻极体薄膜的振动能量采集器的制备过程及一个长方体振子放置于能量采集器样品上的情形

Fig. 1. (color online) Fabrication of vibration energy harvesters based on IXPP uni-polar electret films and the condition of a cuboid seismic put on an energy harvester sample.

2.3 IXPP单极性驻极体薄膜表面电位的测量

本研究利用静电伏特计(Trek model 370)测量样品的表面电位.将样品放在静电伏特计的支撑架上,自由面朝向探头.为了使测量结果更准确,实验中测量了样品不同位置的表面电位,将其取平均值作为某一时刻样品表面电位的值.

2.4 振动能量采集器的准静态电荷灵敏度测量

压电效应反映了压电功能材料的力学量与电学量之间的相互转换关系.通常情况下采用厚度方向的准静态压电系数 d_{33} 来表征压电驻极体力学量与电学量的转换关系^[12],但本研究的实验对象是如图1所示的完整器件,而非单独的压电功能材料,因此我们采用准静态电荷灵敏度 M 来表征器件的

机电耦合性能,其测量过程类似于准静态 d_{33} 的测量.具体步骤如下:将样品置于样品架上(单面镀铝电极的IXPP膜一侧朝上,铜箔电极一侧朝下),并把重量为 m 的砝码加在样品上,然后迅速将砝码移去,通过静电计(Keithley 6514)可直接检测出在砝码卸载过程中,样品上下电极感应电荷的变化量 Q ,利用公式 $M = Q/(mg)$ 计算准静态电荷灵敏度 M 的数值,其中 g 为重力加速度.实验中为了消除加载过程对测量数据的影响, Q 值均是在移去砝码大约10 s后读取的.通过改变加在样品上的砝码质量,可获得样品准静态电荷灵敏度的压强特性.

2.5 振动能量采集器俘获振动能的测量

图2为测量振动能量采集器输出能量的装置^[7].如图所示,样品放在振动台上,铜箔电极一侧朝下,质量为 m 的振子放在样品上,即与IXPP

薄膜一侧接触, 并且将样品与不同的负载电阻相连. 由信号发生器产生的不同频率的信号经过功率放大器放大后驱动振动台, 利用电荷放大器测量振动过程中流经不同负载 R_L 的电荷量 [7,13,14], 同时采用替代的方法用振动计 (VM-6370) 测量加速度 a .

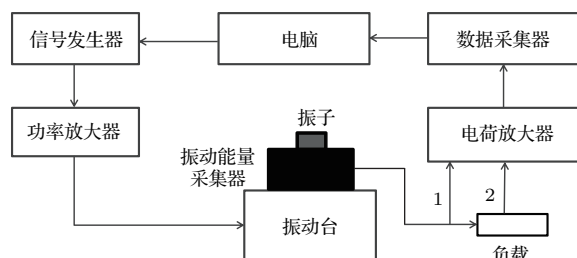


图2 动态电荷灵敏度和能量采集测试系统的示意图 (线路1, 动态电荷灵敏度测试; 线路2, 能量采集测试 [7])

Fig. 2. Schematic for measurements of the dynamic sensitivity and the output power from energy harvesters: line 1 is for the measurements of dynamic sensitivity; line 2 is for the measurements of energy harvesting [7].

3 结果与讨论

3.1 交联聚丙烯 (IXPP) 单极性驻极体薄膜的储电性能

图3是在实验室环境中单面镀铝电极且电晕充电完成的IXPP样品 (具体制备过程见2.1节) 表面电位随时间的变化关系. 由图3中可以看出, 三个样品的表面电位在初始阶段都有一个非常明显的衰减过程, 但是之后 (大约为7天) 趋于平缓. 三个样品在经过15天后, 其表面电位分别降至初始值的60%, 46%, 53%, 稳定后的表面电位值分别为-633, -540, -680 V. 驻极体薄膜的表面电位与有效表面电荷密度的关系为 [15]

$$\frac{\sigma}{\varepsilon_r \varepsilon_0} = \frac{V}{r}, \quad (1)$$

其中 σ 是驻极体的有效表面电荷密度; ε_r 是相对介电常数; ε_0 是真空介电常数; V 是表面电位; r 是厚度. 本实验中所用的IXPP驻极体薄膜的介电常数为1.7, 则由(1)式得到稳定后的驻极体薄膜的有效表面电荷密度分别为0.25, 0.22, 0.27 mC/m².

通常, 器件电极上的电荷密度越大, 其采集的能量可能会越多, 然而电荷密度过大会引起气隙层被反复压缩过程中的击穿, 这显然在实际器件设计中需要避免. 本研究中通过理论推导确定合理的电

荷密度, 以保障器件在使用过程中的稳定性. 由高斯定理得

$$-\varepsilon_r E + \varepsilon_1 E_1 = \sigma / \varepsilon_0, \quad (2)$$

其中 E 代表驻极体中的电场强度; ε_1 代表气隙层的相对介电常数; E_1 代表气隙层中的电场强度. 根据基尔霍夫第二定律可得

$$r \cdot E + S \cdot E_1 = 0, \quad (3)$$

其中 S 代表气隙层的厚度. 由(2)式和(3)式可得到气隙层中的电场强度为

$$E_1 = \frac{\sigma \cdot r}{\varepsilon_0 \varepsilon_r S + \varepsilon_1 \varepsilon_0 r}, \quad (4)$$

根据电压与电场大小的关系, 由(4)式可得到气隙层内电压大小为

$$V_1 = E_1 \cdot S = \frac{r \cdot S \cdot \sigma}{\varepsilon_0 (\varepsilon_r S + r)}, \quad (5)$$

其中 V_1 代表气隙层内的电压.

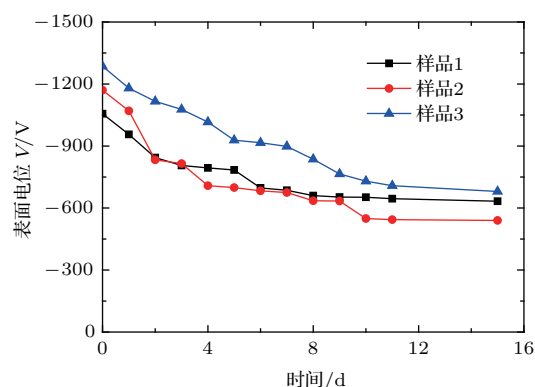


图3 三个IXPP单极性驻极体薄膜样品表面电位随时间的变化关系

Fig. 3. Surface potential as a function of time for three IXPP electret samples.

帕邢定律是表征均匀电场条件下气体间隙击穿电压、间隙距离和气压间关系的定律, 其函数形式是

$$V_2 = \frac{apd}{\ln(pd) + b}, \quad (6)$$

其中 V_2 是击穿时电压的数值; p 为标准大气压 101 kPa; d 是上下两电极的距离; a 和 b 是常数, 和气体的成分有关. 在标准气压下, $a = 4.36 \times 10^7$ V/(atm·m), $b = 12.8$.

将实验中测得的单极性IXPP驻极体薄膜的厚度 52 μm、相对介电常数1.7以及稳定后的驻极体薄膜有效表面电荷密度 0.27 mC/m² 代入(5)式中, 可以绘制气隙中电压与气隙厚度的关系图,

并将其与帕邢曲线((6)式对应的曲线)绘制在一起,得到图4.可以发现当驻极体表面电荷密度为 0.27 mC/m^2 时,气隙厚度在 $1\text{--}1000 \mu\text{m}$ 的变化区间,都不会发生击穿现象.因此,本研究中样品的电荷密度在器件的使用过程中是稳定的.

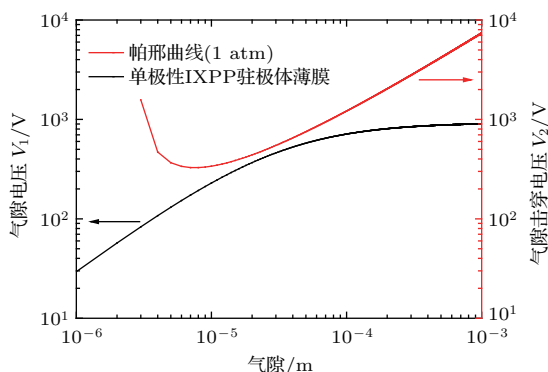


图4 (网刊彩色) 帕邢曲线和器件气隙电压 V_1 与气隙厚度的关系曲线 IXPP 单极性驻极体薄膜的厚度、相对介电常数、表面电荷密度分别为 $52 \mu\text{m}$, 1.7, 0.27 mC/m^2
Fig. 4. (color online) Paschen curve and gap voltage of energy harvesters as a function of the thickness of gap. The thickness, relative dielectric constant and effective surface charge density of the IXPP electret films are $52 \mu\text{m}$, 1.7, 0.27 mC/m^2 , respectively.

3.2 基于IXPP单极性驻极体薄膜的振动能量采集器的性能

在基于单极性驻极体薄膜的能量采集器的实际应用中,器件的电荷灵敏度是评价器件性能优劣的重要指标之一.图5是在完全相同的条件下制备的三个振动能量采集器样品(具体制备过程见2.1节和2.2节)的准静态电荷灵敏度 M 与压强的关系曲线.实验的压强测量范围是 $0.2\text{--}6 \text{ kPa}$,在该小压强范围内,样品的准静态电荷灵敏度与压强之间存在一定的非线性关系,其电荷灵敏度的数值变化范围大约为32%,这种非线性关系可能与器件样品电极上的感应电荷密度随气隙厚度变化关系的非线性有关.我们做进一步的公式推导,根据

$$\sigma_i = -\varepsilon_0 \varepsilon_1 E_1, \quad (7)$$

其中 σ_i 代表下电极(即铜箔电极)的表面电荷密度; ε_1 代表气隙层的相对介电常数,本研究中气隙为空气层,所以 $\varepsilon_1 = 1$,由(4)式与(7)式可得样品下电极的表面电荷密度为

$$\sigma_i = -\frac{\sigma \cdot r}{\varepsilon_r S + r}, \quad (8)$$

可以发现当驻极体的有效表面电荷密度 σ 、相对介电常数 ε_r 、厚度 r 一定时,样品下电极的表面电荷密度 σ_i 与气隙层的厚度 S 存在一定的反比关系.当用不同质量的砝码去测样品的准静态电荷灵敏度时,样品的气隙层被压缩的厚度不同,上下两电极感应电荷的变化量就会不同,并且在 σ , ε_r , r 一定的条件下,下电极的表面电荷密度 σ_i 随气隙层厚度 S 的变化关系为非线性,这可能是准静态电荷灵敏度对压强有依赖性原因之一.从图5中还可以看出,在这个小的压强范围内,样品的电荷灵敏度大约在 $800\text{--}2500 \text{ pC/N}$ 之间.

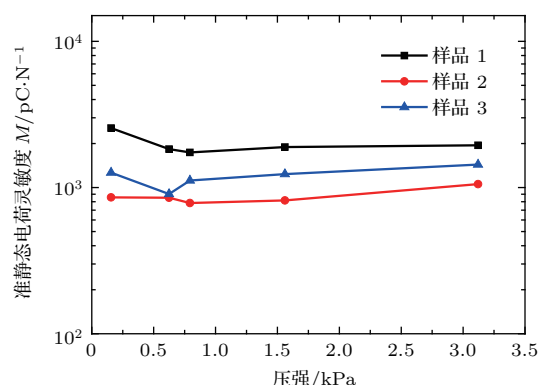


图5 (网刊彩色) 三个能量采集器样品准静态电荷灵敏度 M 与压强的关系图

Fig. 5. (color online) Quasi-static sensitivity as a function of applied pressure for three energy harvester samples.

3.3 基于IXPP单极性驻极体薄膜的振动能量采集器的能量俘获研究

图6为振动能量采集器样品的动态电荷灵敏度曲线.不同的负载电阻跨接在样品的上下电极上,测量在不同的振动频率下流过负载电阻的电荷量,可以得到样品在不同负载电阻条件下的动态电荷灵敏度曲线.测试所用的样品在 1.3 kPa 压强下的准静态电荷灵敏度 M 为 1800 pC/N ,在 1 kHz 下的电容值为 28 pF .从图6可以看出,在发生谐振之前,样品的电荷灵敏度随着振动频率的增加而逐渐增大,这主要是由样品在小压强范围内的非线性效应引起的.在实验中,信号发生器产生固定输出电压的信号,并经过功率放大器放大后驱动振动台.由于不同频率下的输出信号电压值一定,但振动台的振动加速度与振动频率有关,导致样品所受到的动态力随频率发生变化.从图中还可以发现,样品的谐振频率出现在 60 Hz ,在该频率下,样品在空载时的电荷灵敏度高达 3254 pC/N ,共振频率之后,

不论负载电阻为多少, 样品的电荷灵敏度都急剧下降. 在共振频率与匹配负载的条件下, 样品有最大的输出功率. 利用公式

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{Y_3 A}{tm}}, \quad (9)$$

其中 Y_3 为样品厚度方向的杨氏模量, A 为样品有效面积, t 为样品的厚度, m 为振子质量, 可以计算出样品的共振角频率 ω_0 [16].

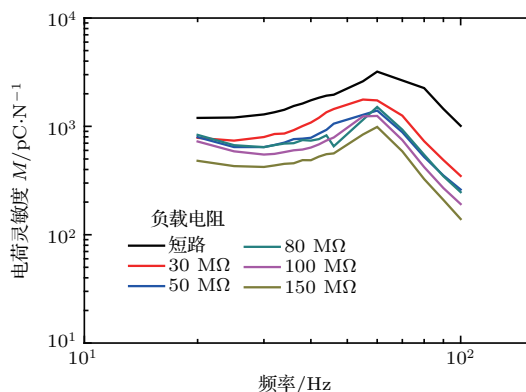


图6 (网刊彩色) 能量采集器样品在不同负载电阻条件下的电荷灵敏度 M 与振动频率的关系图. 振子是一个长方体的铝块, 它的长、宽、高分别是 5, 1 和 3 cm, 质量为 42.2 g; 样品的有效面积为 13 cm²; 所有的结果都是对一个样品进行测试得来的, 该样品的准静态电荷灵敏度在 1.3 kPa 压强下的值为 1800 pC/N.

Fig. 6. (color online) Charge sensitivity M as a function of vibration frequency at various load resistances for an energy harvester sample: The seismic is a cuboid with a length of 5 cm, a width of 1 cm and a height of 3 cm; the seismic mass is 42.2 g; the effective area of the sample is 13 cm². All results are obtained from a single sample. The quasi-static sensitivity of the sample is 1800 pC/N at an applied pressure of 1.3 kPa.

图7为振动能量采集器样品在不同负载电阻下输出功率随频率的变化关系曲线. 在短路条件下, 通过测量样品的电荷灵敏度随频率的变化关系 (见图6), 可以获得 42.2 g 振子质量条件下样品的共振角频率, 根据公式

$$R_{\text{opt}} = \frac{1}{\omega_0 C}, \quad (10)$$

其中 C 为样品的电容, 可以计算出匹配负载电阻 R_{opt} , 从图6中可得出样品的共振频率为 60 Hz, 由此可计算出该样品的最佳负载电阻为 80 MΩ. 从图7中可以看出, 在共振频率之前, 无论负载电阻为多大, 振动能量采集器的输出功率都随着频率的增加而增加; 而当高于共振频率时, 输出功率急剧

下降. 其中输出功率 P_{out} 的计算公式为 [15]

$$P_{\text{out}} = R_l I^2 = R_l \omega^2 Q_{\text{rms}}^2, \quad (11)$$

其中 R_l 为实际负载电阻, I 是流过负载的电流, ω 是振动的角频率, Q_{rms} 表示电荷量. 将其进行归一化处理, 则输出功率 P_n 为 [16]

$$P_n = P_{\text{out}} \left(\frac{g}{a} \right)^2, \quad (12)$$

其中 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 为重力加速度, a 为实际加速度的有效值. 经计算, 当负载电阻分别为 30, 50, 80, 100, 150 MΩ 时, 在共振频率处, 可以获得的最大输出功率为 2.19, 2.38, 4.44, 3.79, 3.56 μW. 我们对实验结果做了拟合处理. Pondrom 等 [17] 提出的基于压电驻极体的能量采集器在 {3-3} 振动模式下, 输出功率的表达式为

$$P_{\text{out}} = \frac{m^2 M^2 a^2 R_l \omega^2}{\left[\left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1 \right)^2 + 4 \zeta_m^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{R_l}{R_c} \right)^2 \right]}, \quad (13)$$

其中 ζ_m 为机械阻尼系数, $R_c = 1/(\omega C)$, C 为样品和寄生电容的总和.

当选用最佳负载电阻 $R_l = R_c = 1/(\omega_0 C)$, 能量采集器件在共振频率处有最大的输出功率. 从 (13) 式可以得出, 最大的输出功率值为 [17]

$$P_m = \frac{m^2 M^2 a^2 \omega_0}{8 \zeta_m^2 C}. \quad (14)$$

虽然本研究的目标不是压电驻极体, 但是若将单极性驻极体能量采集器视为一个“黑匣子”, 那么可以将它等效为一个压电系数 $d_{33} = M$ 的压电驻极体能量采集器 [18]. 利用 (13) 式对实验测得的数据进行拟合, 如图7中的实线所示, 由此获得的电荷灵敏度和机械阻尼系数分别在 1700—4500 pC/N 和 0.14—0.2 之间 (其他数据采用测量值). 由于环境振动源的频率有一定的分布, 所以希望振动能量采集器在较宽的频率范围内都能产生较大的输出功率. 本次研究采用 3 dB 带宽比来表征器件样品的带宽. 计算得出, 当负载电阻分别为 30, 50, 80, 100 和 150 MΩ 时, 3 dB 带宽比的值分别是 41.7%, 33.3%, 28.3%, 31.7% 和 28.3%.

图8是在共振频率 60 Hz 下, 能量采集器的归一化输出功率随负载电阻的变化关系曲线. 从图中可以看出, 在该振动频率下, 存在一个最佳负载电阻, 能量采集器在该负载电阻下有最大的能量输出. 其中散点为实验数据, 实线是利用 (13) 式拟合得来的. 实验结果与理论计算趋势一致.

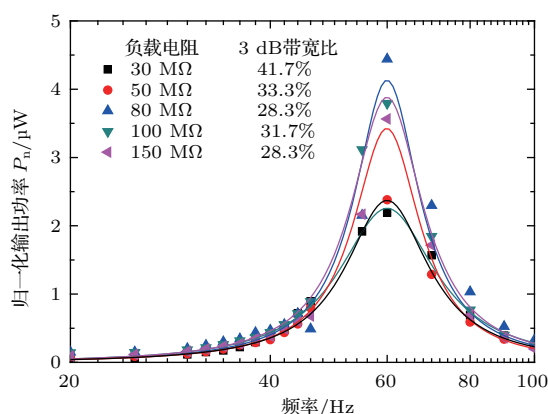


图7 (网刊彩色) 基于IXPP单极性驻极体膜的振动能量采集器在不同负载电阻下的归一化输出功率与振动频率之间的关系曲线, 其中散点为实验数据, 实线是拟合曲线
Fig. 7. (color online) Normalized output power as a function of vibration frequency for an energy harvester sample based on IXPP electret films at various load resistances. The scatter is the measured data, and the solid line is the simulation curve.

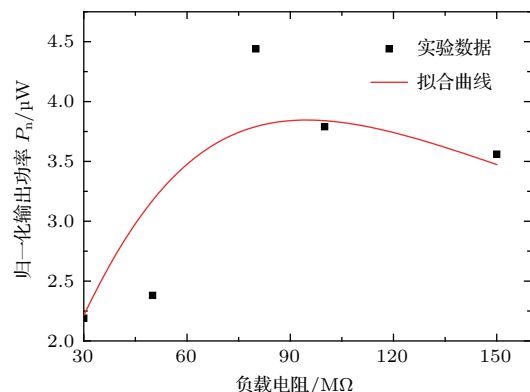


图8 振动能量采集器的归一化输出功率与负载电阻的关系曲线

Fig. 8. Normalized output power as a function of load resistance for an energy harvester sample.

图9是在不同的振子质量条件下, 振动能量采集器样品在不同振子质量所对应的最佳负载电阻附近的归一化输出功率与频率之间的关系曲线. 由图中可以看出, 当振子质量分别为13.6, 18.9, 26, 33.4, 42.2 g时, 样品的共振频率分别为70, 70, 80, 70, 70 Hz. 经计算, 其对应的最佳负载电阻分别为142, 170, 70, 80, 80 MΩ. 由以上数据发现, 随着振子质量的增加, 测量中的共振频率并未减小, 而是保持稳定, 这可能是因为随着振子质量 m 的增大, 样品气隙层的厚度随之减小, 进而使器件样品的整体厚度 t 减小. 从共振频率的计算公式 $\omega_0 = \sqrt{\frac{Y_3 A}{tm}}$ 可以看出, m 增大的同时 t 在减小, 二

者的影响可能会相互抵消, 所以样品的共振频率在不同振子质量下会保持相对稳定. 当振子质量分别为13.6, 18.9, 26, 33.4和42.2 g时, 能量采集器的3 dB带宽比分别为45.7%, 32.9%, 33.8%, 31.4%和34.2%.

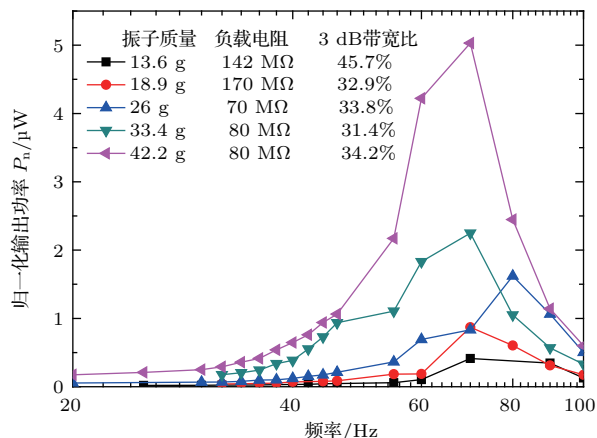


图9 (网刊彩色) 振动能量采集器在不同振子质量条件下, 在最佳负载附近的归一化输出功率与振动频率之间的关系曲线

Fig. 9. (color online) Normalized output power as a function of vibration frequency for an energy harvester sample at the optimum load resistance for various seismic masses.

图10是一个器件样品在最佳负载电阻与共振频率条件下, 归一化输出功率与振子质量之间的关系曲线, 从图中可以看出, 随着振子质量的增加, 样品的最大输出功率急剧增大, 二者呈二次方指数关系, 此结果与(13)式一致. 当振子质量为42.2 g时, 一个器件样品的输出功率达到5 μW.

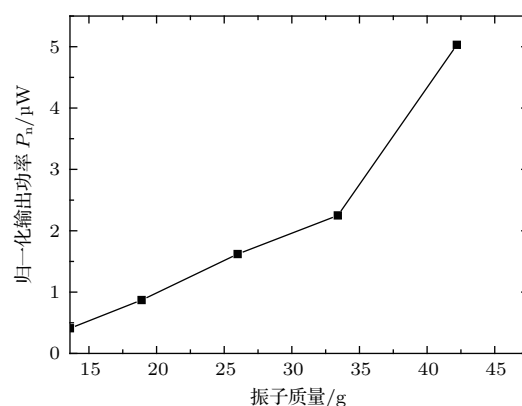


图10 振动能量采集器的归一化输出功率与振子质量的关系曲线

Fig. 10. Normalized output power as a function of seismic mass for an energy harvester sample at the optimum load resistance and resonance frequency.

4 结 论

利用电晕充电方法成功制备了单极性IXPP驻极体膜,并设计、制备了基于该驻极体膜的振动能量采集器.结果表明,用 -13 kV 的电晕电压与 -2.0 kV 的栅极电压给单面镀铝电极的IXPP样品充电,在实验室环境下放置15天后获得 -680 V 稳定的表面电位;利用准静态方法测量器件样品的电荷灵敏度,在 1.3 kPa 压强下,样品的准静态电荷灵敏度 M 高达 1800 pC/N ;对于有效面积为 13 cm^2 的振动能量采集器,当振子质量为 42.2 g ,在共振频率 70 Hz 处,样品在最佳负载电阻 $80\text{ M}\Omega$ 附近的输出功率为 $5\text{ }\mu\text{W}$.

参考文献

- [1] Cook-Chennault K A, Thambi N, Sastry A M 2008 *Smart Mater. Struct.* **17** 043001
- [2] Anton S R, Sodano H A 2007 *Smart Mater. Struct.* **16** R1
- [3] Mitcheson P D, Yeatman E M, Rao G K, Holmes A S, Green T C 2008 *Proc. IEEE* **96** 1457
- [4] Guan M J, Liao W H 2007 *Smart Mater. Struct.* **16** 498
- [5] Wu S H, Du L D, Kong D Y, Ping H Y, Fang Z, Zhao Z 2014 *Chin. Phys. B* **23** 044302
- [6] Wu L M, Zhang X Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 177701 (in Chinese) [武丽明, 张晓青 2015 物理学报 **64** 177701]
- [7] Zhang X, Wu L, Sessler G M 2015 *AIP Adv.* **5** 77185
- [8] Zhang X, Zhang X W, You Q, Sessler G M 2014 *Macromol. Mater. Eng.* **299** 290
- [9] Zhang X, Huang J, Chen J, Wan Z, Wang S, Xia Z 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 2901
- [10] Zhang X, Pan D, Wang X, Cao G, Sun Z, Xia Z 2011 *J. Electrostat.* **69** 554
- [11] Cao G X, Zhang X Q, Sun Z L, Wang X W, Lou K X, Xia Z F 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6514 (in Chinese) [曹功勋, 张晓青, 孙转兰, 王学文, 娄可行, 夏钟福 2010 物理学报 **59** 6514]
- [12] Hillenbrand J, Sessler G M 2000 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **7** 537
- [13] Kressmann R 2001 *J. Appl. Phys.* **90** 3489
- [14] Hillenbrand J, Sessler G M 2004 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **11** 72
- [15] Sessler G M 1987 *Electrets-Introduction* (Berlin: Springer) p1
- [16] Anton S R, Farinholt K M, Erturk A 2014 *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **25** 1681
- [17] Pondrom P, Hillenbrand J, Sessler G M, Börs J, Melz T 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 172901
- [18] Hillenbrand J, Pondrom P, Sessler G M 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 183902

Vibration energy harvesting with uni-polar electret film*

Ma Xing-Chen Ye Rui-Feng Zhang Tian-Le Zhang Xiao-Qing[†]

(Shanghai Key Laboratory of Special Artificial Microstructure Materials and Technology, School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(Received 15 May 2016; revised manuscript received 25 June 2016)

Abstract

Electronic devices are highly demanded commodities and will continue increasing in popularity in the near future, all of which require powers in one way or another. A challenge that arises in remote or inconvenient locations is access to reliable power sources. Energy harvesting technology is critical in the development of self-powered electronic devices. In this paper we present a novel approach to vibration energy harvesting, which is based on uni-polar electret film. Uni-polar electret film is of a flexible polymeric material which can exhibit permanent polarization and induce durable electric field. In this study, real charge electret films are prepared by using the negative corona charging one-side metalized irradiation cross-linked polypropylene (IXPP) films. Vibration energy harvesters based on such electret films are designed and fabricated. The charge stability in IXPP electret film is investigated by measuring the surface potential of sample. The electromechanical properties of the energy harvester sample are tested by measuring quasi-static and dynamic sensitivities. The energy harvesting from vibrations by using the energy harvester sample, at various vibration frequencies, load resistances, and seismic mass values, is also studied. The results show that as the IXPP film is charged with a corona voltage of -13 kV, grid voltage of -2.0 kV and charging time of 60 s, the stable surface potential of -680 V is obtained after 15-day storage in the laboratory environment. The quasi-static sensitivity of energy harvester sample is 1800 pC/N at a pressure of 1.3 kPa. At an optimum load resistance of 80 M Ω and a resonance frequency of 70 Hz, a maximum output power of 5 μ W is obtained for an energy harvester sample with an effective area of 13 cm² and a seismic mass value of 42.2 g.

Keywords: uni-polar electret films, cross-linked polypropylene, vibration energy harvester, energy harvesting

PACS: 77.84.-s, 77.55.-g, 84.60.-h

DOI: 10.7498/aps.65.177701

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11374232) and the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China (Grant No. Tongji University 2014).

[†] Corresponding author. E-mail: x.zhang@tongji.edu.cn