

基于织构表面的摩擦静电发电机制备及其输出性能研究

程广贵 张伟 方俊 蒋诗宇 丁建宁 Noshir S.Pesika 张忠强 郭立强 王莹

Fabrication of triboelectric nanogenerator with textured surface and its electric output performance

Cheng Guang-Gui Zhang Wei Fang Jun Jiang Shi-Yu Ding Jian-Ning Noshir S. Pesika Zhang Zhong-Qiang Guo Li-Qiang Wang Ying

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 060201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.060201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.060201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I6>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

雪崩倍增 GaAs 光电导太赫兹辐射源研究进展

Research progress on avalanche multiplication GaAs photoconductive terahertz emitter

物理学报.2015, 64(22): 228702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.228702>

表面镀金 SU-8 微柱的低频电动旋转特征

Electrorotation characteristics of gold-coated SU-8 microrods at low frequency

物理学报.2013, 62(20): 200702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.200702>

冷动力喷涂法制备钨和钨合金涂层及其涂层的计算模拟

Experimental study of tungsten and tungsten alloy coating produced by cold gas dynamic spray and tungsten particles calculation and simulation

物理学报.2012, 61(2): 020207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.020207>

基于织构表面的摩擦静电发电机制备 及其输出性能研究*

程广贵^{1)2)†} 张伟¹⁾ 方俊¹⁾ 蒋诗宇¹⁾ 丁建宁^{1)2)‡} Noshir S.Pesika³⁾
张忠强¹⁾ 郭立强¹⁾ 王莹²⁾

1) (江苏大学微纳米科学技术研究中心, 镇江 212013)

2) (常州大学江苏省光伏科学与工程协同创新中心, 常州 213164)

3) (杜兰大学分子与生物工程系, 新奥尔良, 70118, 美国)

(2015年12月9日收到; 2015年12月27日收到修改稿)

摩擦电纳米发电机 (TENG) 是基于摩擦生电和静电感应复合原理将机械能转换为电能的一种新型能源获取方式. 本文采用模板法制备了几种不同参数的聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 微圆柱结构, 并组装成 TENG, 实验研究了接触区表面积、外加载荷对 TENGs 输出性能的影响. 结果表明, 圆形微柱阵列的存在有效提高了 TENG 的作用面积及电输出性能, 相同载荷下, 电输出随微柱间距离减小而增加, 在间距为 15 μm 、载荷为 5 N 时, 输出的平均开路电压和短路电流分别为 88 V 和 15 μA , 是同等条件下、微柱间距为 50 μm 电输出的 1.5 倍以上; 电输出随载荷增加呈准线性增加, ANSYS 软件模拟载荷作用下 PDMS 微圆柱织构的变形行为, 结果表明, 压力作用下, 微圆柱主要发生压缩变形, 基底的变形导致微柱与上电极之间产生侧向摩擦, 从而产生更多电荷, 提升了电输出性能.

关键词: 摩擦电纳米发电机, 摩擦生电, 微柱, ANSYS

PACS: 02.70.Dh, 87.80.Ek, 45.20.dg, 28.50.Ma

DOI: 10.7498/aps.65.060201

1 引言

化石能源的枯竭和日趋严重的环境问题, 迫切需要发展新的能源获取方式^[1]. 近年来风能、水力能、太阳能等^[2]应用研究得到了飞速发展, 获取自然界中机械能转化为电能的研究是另一个研究热点^[3,4], 发展比较成熟的主要有基于压电、电磁效应的机械能-电转换方法, 然而这些方法的装置通常结构复杂、对材料要求较高^[5]. 摩擦起电现象发现于几个世纪以前, 国内外学者已开展了大量研究工作^[6-8], 在静电复印、静电除尘、静电纺丝等^[9]领域得到了广泛应用, 王中林等^[10]于2012年基于摩擦

生电和静电感应复合原理, 提出一种新型的能源获取形式——摩擦电纳米发电机 (TENG), 该装置可以应用于收集风能^[11]、潮汐能^[12]、人体运动的机械能等^[13]将其转化为电能, 其具有制备方法简单、质量轻、易集成、输出功率高等特点, 可以为个人消费电子、植入芯片、传感器检测^[14]等提供能源. 不同的制备工艺、结构优化和相关的理论研究表明, TENG 装置的输出性能很大程度上取决于参与作用的聚合物表面电荷密度^[15], 选择电负性差异较大的材料和对聚合物接触表面进行拓扑修饰成为提升 TENGs 输出性能的主要途径^[10,16-19]. 不同的物理^[20,21]和化学修饰^[22]方法表明, 聚合物表面进行拓扑修饰后, 聚合物表面粗糙度和两摩擦层接

* 国家自然科学基金 (批准号: 51335002, 11472117) 和清华大学摩擦学国家重点实验室开放基金 (批准号: SKLTKF14A01) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ggcheng@ujs.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: dingjn@ujs.edu.cn

触面积增大, 提升了 TENG 电输出, 但作用机理尚无定论.

本文采用模板法, 选用柔韧性好、成本低的聚二甲硅氧烷 (PDMS) 为原料, 制备了几种不同参数的 PDMS 微柱阵列, 并以此为作用表面制造了摩擦电纳米发电机, 研究了不同 PDMS 膜表面结构和载荷作用下的电输出性能, 借助 ANSYS 模拟软件分析了织构表面摩擦发电机理.

2 实验

2.1 PDMS 膜的制备及形貌表征

将光刻胶旋涂在干净的 Si 片上, 利用掩膜版在光刻机上完成紫外曝光, 制成几种不同面积占有率的微孔阵列, 微孔直径为 $90\ \mu\text{m}$, 孔深 $30\ \mu\text{m}$; 随后将 PDMS (Sylgard184, Dow Corning) 弹性体和固化剂按质量比 10 : 1 均匀混合, 真空脱气 20 min, 再将 PDMS 混合液旋涂于 Si 模板表面, 旋涂速率 $360\ \text{r}/\text{min}$, 旋涂时间 50 s; 为了便于揭膜, 旋涂前先在硅模板表面自组装聚十八烷基三氯硅烷 (OTS) 膜, 以降低硅模板表面能; 接着将涂有 PDMS 混合液的模板真空脱气 20 min, 取出放在烘胶台上, 在 $100\ ^\circ\text{C}$ 下固化 1 h; 最后将 PDMS 膜剥离硅模板.

采用 JSM-7001 F 扫描电子显微镜观察 PDMS 膜微观表面形貌.

2.2 TENG 装置制备和电信号的测量

本摩擦电纳米发电机 (TENG) 是典型的垂直接触分离模式, 由两块 $30\ \text{mm} \times 30\ \text{mm}$ 的聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 基底通过固定在角落里的四个微弹簧组成“三明治”结构, 如图 1 (c) 所示. 以 $22\ \text{mm} \times 22\ \text{mm} \times 0.5\ \text{mm}$ 的抛光 Al 箔作为上下电极, Al 箔固定在上基底上, 作为上电极和上接触面; PDMS 膜与 Al 箔贴合后固定于下板, Al 箔为下电极. 图 1 (d)–(f) 给出了三种不同微柱阵列的形貌图, 直径和高度都为 $90\ \mu\text{m}$ 和 $30\ \mu\text{m}$, 微柱间距 (L) 分别为 15, 25 和 $50\ \mu\text{m}$; 两个 PMMA 板上电极与 PDMS 膜之间的间隙为 1.5 mm; 上下电极用铜导线引出便于后续测量. 采用 YE1311 D 低频扫频信号发生器控制 JZK-1 型激振器作为动力源对 TENG 进行加载, 实现 PDMS 膜和上电极之间的周期性接触和分离, 从而在外电路产生电势差和电流. 开路电压通过商用泰克示波器 (Tektronix TBS1102B) 测量; 为获取电流, 将 $1\ \text{M}\Omega$ 的电阻作为负载串入 TENG 两端, 采集电阻两端电压并转换成电流.

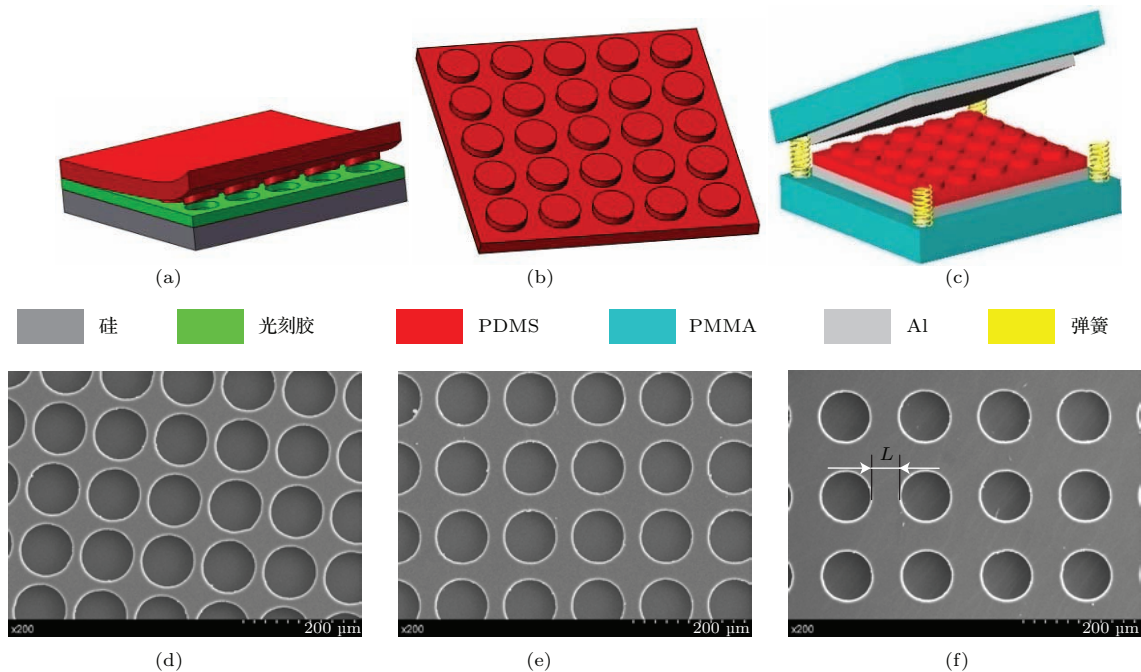


图 1 (网刊彩色)(a) PDMS 旋涂于硅模板表面; (b) 表面分布微柱阵列的 PDMS 膜; (c) TENG 装置示意图; (d)–(f) 微柱间距分别为 15, 25 和 $50\ \mu\text{m}$

Fig. 1. (color online) (a) Liquid PDMS spinning-coated on Si mold; (b) PDMS surface with micro rods; (c) schematic diagram and of TENG; (d)–(f) micro rods with different distance, namely 15, 25 and $50\ \mu\text{m}$ respectively.

3 结果与讨论

3.1 TENG 工作机制

TENG 是基于接触生电和静电感应复合原理将机械能转换成电能, 当绝缘体聚合物与另一聚合物或金属电极接触时, 由于电子结构的不同, 电子会在接触界面处发生转移, 使其中一个物体如 PDMS 表面带负电荷, 另一个物体表面带正电荷, 当两物体分开后, 由于静电感应原理, 与聚合物相连的另一金属电极中电子便通过外部电路流出, 从而产生电输出. 图 2 阐释了 TENG 电能产生的过程. 在图 2(a) 所示的初始位置, 上电极与 PDMS 膜之间未接触, 无电荷产生或者转移, 当垂直方向的载荷施加到上基底时, 上电极与 PDMS 膜之间相互紧密接触并相互滑动, 由于 PDMS 膜表面微柱结构的存在产生压缩变形和相对运动, 从而在上电极与 PDMS 膜内表面产生等量且电性相反的摩擦电电荷. 如不考虑边缘效应^[17], 摩擦电电荷均匀分布在

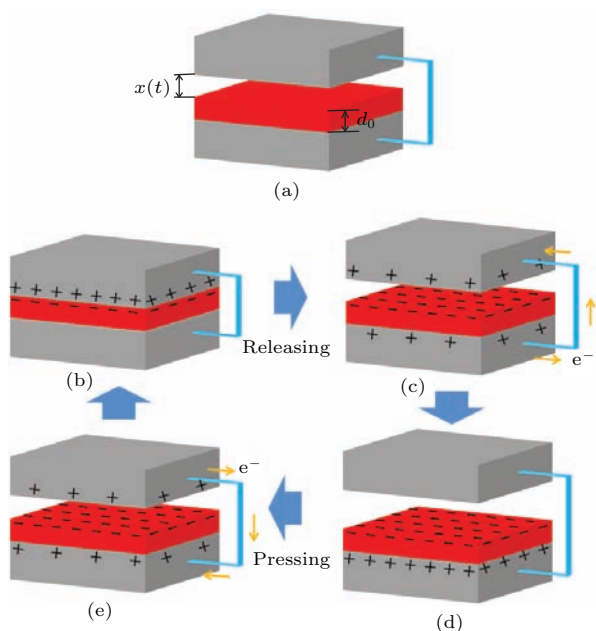


图 2 (网刊彩色) TENG 工作原理图 (a) 初始位置; (b) 外部载荷施加后上电极与 PDMS 接触; (c) 外部载荷撤去后上电极与 PDMS 分开; (d) 上电极恢复到初始位置; (e) 外部载荷再次施加

Fig. 2. (color online) Working principle of TENG: (a) The original position; (b) external load brings the upper electrode into contact with the PDMS; (c) when the external load is withdrawn, the two contact surfaces separate with each other; (d) the upper electrode returns back to the initial status; (e) the external load is applied again.

上电极和 PDMS 膜内表面表面^[23,24]. 由于 Al 与 PDMS 在摩擦电序列中差异很大^[25], Al 在接触摩擦过程中更易失电子, 电子从上电极流向 PDMS, 致使上电极表面带正电荷而 PDMS 膜表面带负电荷 (图 2(b)). PDMS 的优秀绝缘特性可有效保存电荷^[26], 这保证了电能产生的连续性. 在此阶段, 由于静电平衡, 上电极与 PDMS 膜之间没有电势差, 外电路没有电流产生. 当外力撤去时, 上电极与 PDMS 膜在 4 个微弹簧的回复力作用下分离, 从而在两表面形成电势差, 驱动电子通过外电路从下电极流向上电极, 以平衡上电极表面的正电荷 (图 2(c)). 当两接触面恢复到初始位置时, 上电极表面的正电荷被完全中和, 下电极表面产生等量的感应正电荷 (图 2(d)). 当外力再次施加到上基底时, 产生相反的电荷转换过程 (图 2(e)), 因而在外电路产生相向的电荷.

3.2 微柱面积占有率对 TENG 的影响

TENG 装置通过激振器施加 20 Hz 周期性载荷冲击, PDMS 膜面积为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 开路电压 (V_{oc}) 和短路电流 (I_{sc}) 用于表征 TENG 输出特性. 当微柱间距为 $15 \mu\text{m}$ 的 PDMS 样品 (如图 1(d)) 在 1 N 载荷作用下, V_{oc} 和 I_{sc} 平均值分别为 30 V 和 $4.8 \mu\text{A}$, 呈交流特性, 分别对应上电极与 PDMS 膜之间相互接触与分离状态, 如图 3(a) 和图 3(b) 所示. 为了确认获得的电信号为 TENG 产生, 将连接示波器表笔导线的极性交换, 发现测得的 V_{oc} 与 I_{sc} 的峰值相反, 如图 3(c) 和图 3(d) 所示, 表明信号由 TENG 装置产生.

接触区的微柱数量是影响 TENGs 输出的一个重要因素, 图 4(a) 和图 4(b) 给出了当载荷为 1 N 时, PDMS 膜表面三种不同微柱阵列 (间距分别为 15, 25 和 $50 \mu\text{m}$) 的性能输出. V_{oc} 分别达到 30 V, 20 V 和 16 V, 而 I_{sc} 平均值为 4.8, 2.8 及 $1.8 \mu\text{A}$. 这主要是两方面的原因: 第一, 微柱结构的存在使接触区的表面积显著增加, 这为电荷提供了更多的存储空间, 并且电荷在微柱侧表面及间隙底部发生了重新排列, 为了验证该设想, 我们撤去四个微弹簧, 使上电极铝片与间距为 $15 \mu\text{m}$ 的 PDMS 微柱阵列保持接触, 然后施加 1 N 载荷, 发现加载时仍然有电压输出, 如图 4(d) 所示; 图 4(c) 为相同尺寸的无织构 PDMS 表面在压力作用下的输出, 可见, 相同载荷下有微柱的 PDMS 织构表面产生约为 2 V 左右的 V_{oc} , 比无织构光滑 PDMS 表面产生电压高

出2.8倍左右;第二, TENG可以被视为一个平板电容, 电容量的大小直接影响TENGs电输出, 而微柱随载荷施加发生压缩变形, 微柱间距变小, 微柱间

空气量降低, 提升了微柱结构的相对介电常数, 因此提升了装置的电容量^[27], 增加了PDMS膜表面电荷密度^[28], 进而提高了电输出.

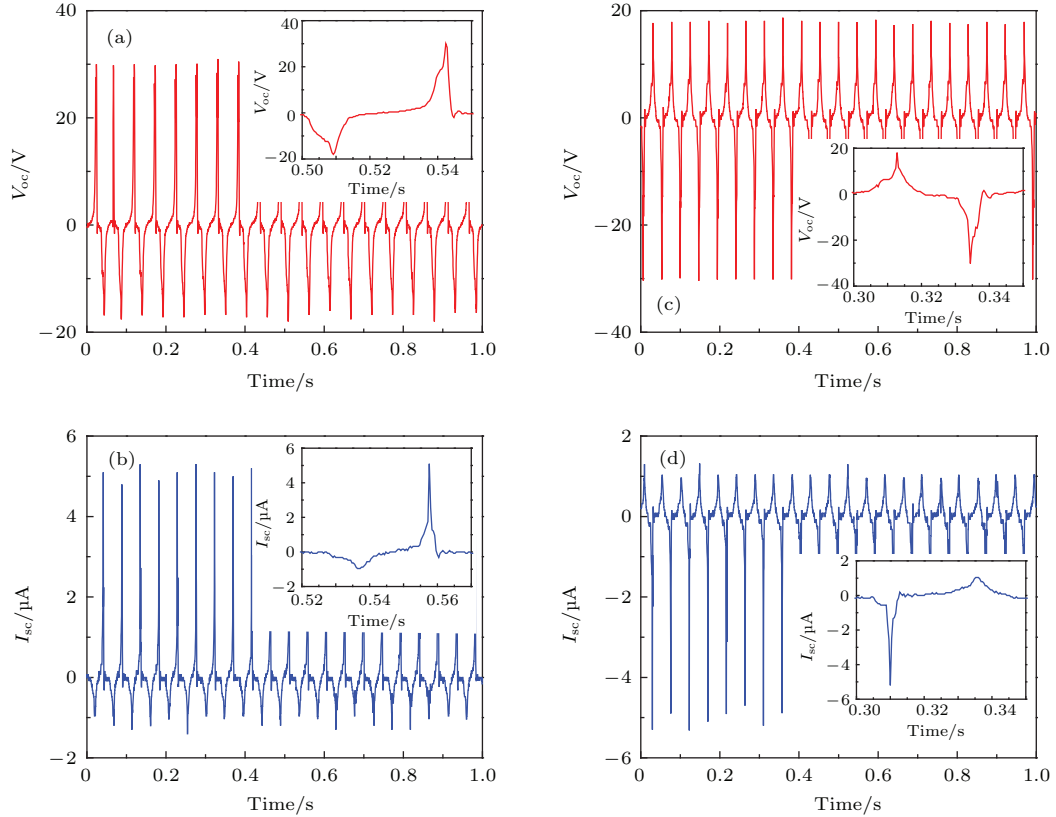


图3 1 N外力下, TENG的电输出正接状态下的(a) V_{oc} 和(c) I_{sc} ; 反接状态下的(b) V_{oc} 和(d) I_{sc}

Fig. 3. Investigation on the performance of TENG under 1 N: (a) Open-circuit voltage and (b) short-circuit current with forward connection; (c) open-circuit voltage and (d) short-circuit current with reverse connection.

本装置是典型的导体——介电层类、接触分离式“三明治”结构摩擦电纳米发电机, 根据 $V-Q-X$ 关系^[15]可得:

$$V_{oc} = \frac{\sigma x(t)}{\varepsilon_0} \quad (1)$$

$$I_{sc} = \frac{s\sigma d_0 v(t)}{(d_0 + x(t))^2}, \quad (2)$$

其中 σ 是PDMS膜表面电荷密度, $x(t)$ 是上电极与PDMS膜之间的距离, ε_0 是真空介电常数, s 是上电极面积, d_0 是PDMS膜的厚度, $v(t)$ 是上电极相对于PDMS膜的移动速度.

从(1)和(2)式可以看出, 对于特定的装置, V_{oc} 和 I_{sc} 与 σ 有关, 而对于选定的聚合物材料, σ 主要受表面粗糙度影响. 在开路状态下, 外电路无电子转移, 上下电极之间转移电荷量为零. 由(1)式可以看出, 在移动距离一定的情况下, V_{oc} 只与聚

合物表面的电荷密度成线性关系. 对相同直径和高度的微柱尺寸, PDMS膜结构表面相对于光滑的PDMS膜, 具有更大的粗糙度, 随着上电极在载荷的作用下与PDMS膜接触后, PDMS膜表面产生更多的摩擦电荷, 增加了电荷密度 σ , 因而提升了输出 V_{oc} . 同理, 根据(2)式可以看出, I_{sc} 同样受 σ 影响, σ 随着PDMS膜表面粗糙度增加而增加. 且本TENG电信号输出通过示波器内部电容两端聚集的电荷测量, 外电路转移的电子越多, 电信号的输出越大^[29], 且TENG的短路电流 I_{sc} 很大程度上也取决于电路中的电荷转移量 $A\Delta\sigma$ (其中 $\Delta\sigma$ 是上电极静电电荷密度, A 是PDMS膜与上电极之间的实际接触面积), 由电荷转移与平衡可得^[30]:

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma}{1 + d_0/x(t)\varepsilon_0}, \quad (3)$$

其中 d_0 和 ε_0 为常数, 分别为250 μm 和2.6^[31], 而

σ 由于 PDMS 绝缘特性不变, 因而 $\Delta\sigma$ 由 $x(t)$ 决定. 从图 5 可以看出, 即使 PDMS 膜厚度达到 300 μm , 当上电极与 PDMS 膜之间的距离大于 1.2 mm 时, $\Delta\sigma/\sigma$ 的比值快速趋于饱和 [16,31], 两接触面之间的

实际接触面积 A 成为影响电输出的重要因素. 因为微柱间距小的 PDMS 膜在同等条件下与上电极之间的实际接触面积 A 更大, 外电路中转移的电荷量更多, 由此提升了 I_{sc} .

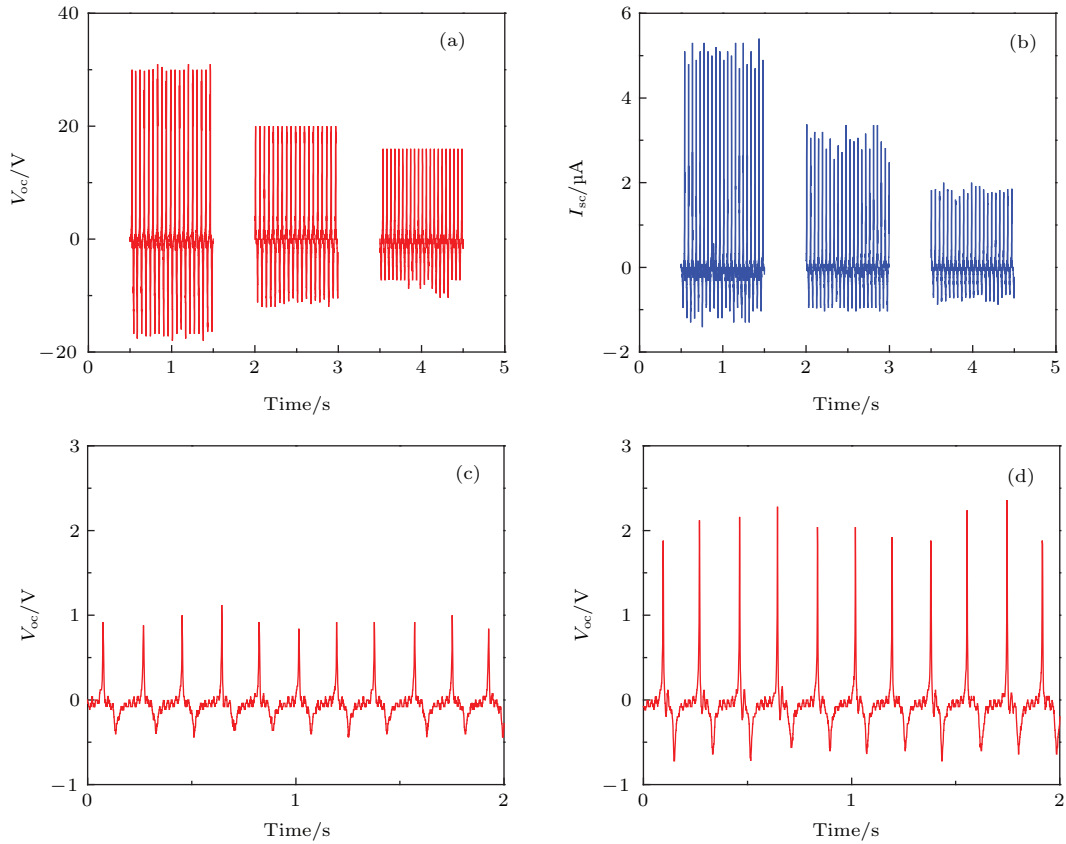


图 4 微柱间距为 15, 25 和 50 μm 在 1 N 作用下的 (a) V_{oc} 和 (b) I_{sc} ; 1.5 N 载荷作用下光滑 (c) 和微柱间距为 15 μm (d) 的 PDMS 的 V_{oc}

Fig. 4. (a) Open-circuit voltage and (b) short-circuit current of TENG with different microrod distance (15, 25 and 50 μm) under 1 N; (c) open-circuit voltage and (d) short-circuit current of flat PDMS and PDMS containing micro rods ($L = 15 \mu\text{m}$).

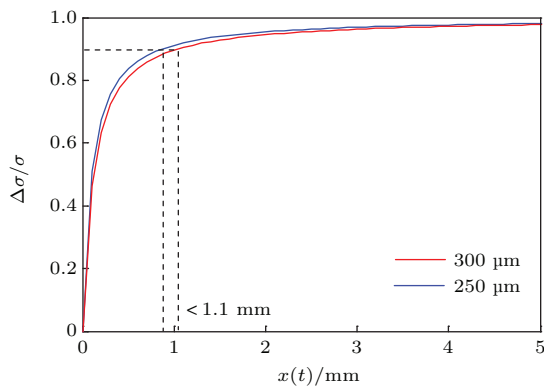


图 5 (网刊彩色) 转移电荷密度与摩擦电电荷密度比值随间隙之间的关系

Fig. 5. (color online) Relationship of the ratio between transferred charge density ($\Delta\sigma$) and triboelectric charge density (σ) with the distance.

3.3 载荷对 TENG 电输出的影响

图 6 (a) 和图 6 (b) 分别给出了 3 种不同间距的 PDMS 微柱阵列膜电输出, 由图可见, 在 1 N 的微小力的作用下 V_{oc} 和 I_{sc} 差异不大, 但随着载荷的增加, 三种不同的 PDMS 膜电输出随着载荷成准线性增加, 当载荷为 5 N 时, 微柱间距为 15 μm 的 PDMS 织构表面 V_{oc} 和 I_{sc} 增长速度最快, 最大值分别为 88 V 和 15 μA , 相比于光滑的 PDMS 提升了 2.2 倍和 2.7 倍, 且光滑的 PDMS 产生的电输出有明显的饱和趋势; 间距为 50 μm 的 PDMS 膜 V_{oc} 和 I_{sc} 增长速度最慢, 产生的 V_{oc} 和 I_{sc} 最小, 分别为 60 V 和 5.6 μA , 与微柱间距为 15 μm 两者之间 V_{oc} 和 I_{sc} 分别相差了 1.5 倍和 2.6 倍. 可见织构表面可以显

著提高输出电压和电流值, 且接触区的微柱数量越多电流增加越快. 载荷为 5 N 时, 根据电容两端电压与电流之间的关系, 假设电容不变, 则电流与电压随时间的变化率成正比, 而微柱的存在提高了接触表面的抗黏附性能, 从而加快了上电极恢复到初始位置的速度, 由 (2) 式可以看出, 提升了电流, 而速度的大小并不影响电压. 电压随微柱间距减

小而增加的原因, 除了存储电荷的表面积增加之外, 微柱及底部 PDMS 在压力作用下发生变形, 使微柱在发生压缩变形的同时还发生侧向弯曲变形, 与上金属铝表面摩擦进一步产生静电荷, 为揭示织构在压力作用下的变形, 在 ANSYS 中建立微柱阵列模拟分析 PDMS 织构表面微柱随载荷分布与变形.

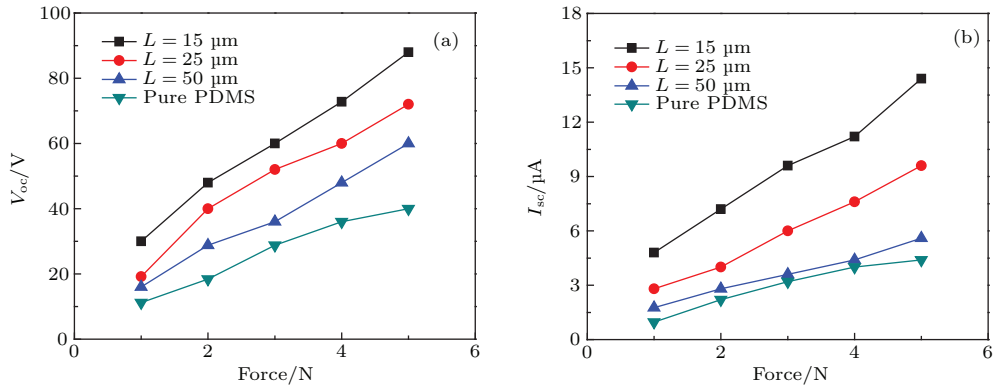


图 6 (网刊彩色) TENG 的 V_{oc} 和 I_{sc} 与载荷之间的关系

Fig. 6. (color online) The dependence between V_{oc} and I_{sc} with external load.

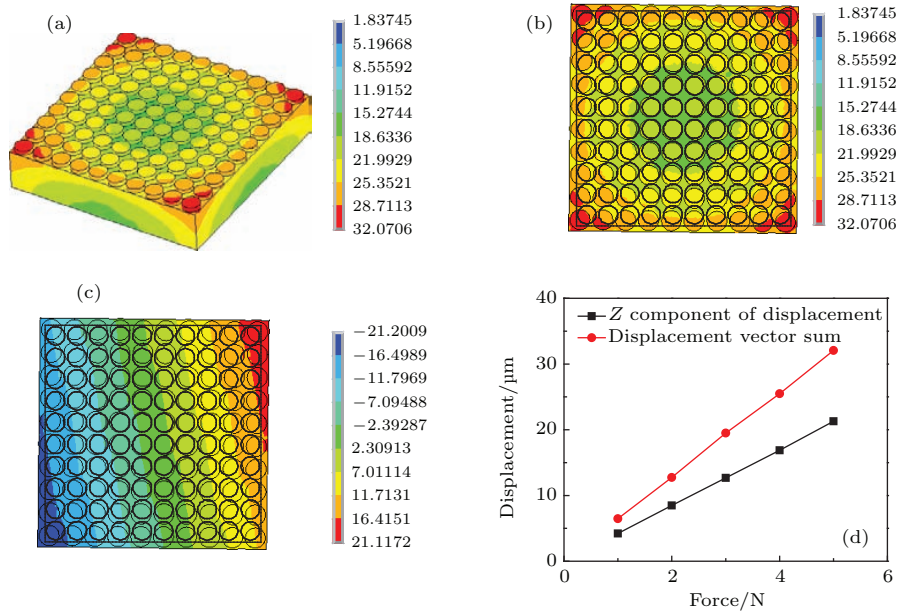


图 7 (网刊彩色) 微柱间距为 15 μm 的 PDMS 膜受 5 N 载荷下变形 ANSYS 分析结果 (a) 变形矢量和; (b) 微柱受载荷作用下变形前后对比; (c) 微柱受载荷作用下 ±X 轴变化对比; (d) 变形量与载荷之间的关系

Fig. 7. (color online) ANSYS analysis of deformation for micro rods on PDMS film verse external force: (a) Displacement vector sum; (b) deformed shape with undeformed edge; (c) ±X component of displacement; (d) the relationship between displacement vector sum and Z component of displacement verse external load.

选取微柱间距为 15 μm 的 PDMS 膜作为模拟对象, 建立高度 30 μm 的 100 个微柱阵列, PDMS 材料的泊松比和弹性模量分别为 0.47 [32] 和 750 kPa [33]. 模拟结果如图 7 所示. 从图 7(a) 可

以看出, 在 5 N 作用下, PDMS 膜发生了压缩弹性变形, 变形主要分布在微柱上, 且离中心位置越远, 变形量越大; 图 7(b) 给出了微柱阵列受载荷变形俯视图, 虚线为变形前微柱阵列所处位置, 可以看

出, PDMS膜表面微米柱阵列在载荷作用下发生了 $\pm X$ 和 $\pm Y$ 轴方向变形, PDMS膜整体面积向外变形扩大(这也是我们选择上下电极比PDMS膜面积大的原因), 并在此过程中, 微柱与上电极Al膜发生 $\pm X$ 和 $\pm Y$ 方向的滑动摩擦, 进而产生更多的摩擦电荷, 其中微柱阵列 $\pm X$ 轴方向变形结果如图7(c)所示. 图7(d)给出了 $-Z$ 轴方向变形和变形矢量和与载荷之间的关系, 可见PDMS织构表面变形随着载荷的增加呈线性上升, 变形量主要分布在 $-Z$ 轴方向, 5 N载荷作用下的 $-Z$ 轴方向变形和变形矢量和分别为21.30 μm 和32.07 μm , 是1 N载荷作用下的5.04倍和4.96倍; 同时可以看出 $-Z$ 轴方向变形和变形矢量和之间的差值越来越大, 表明随着载荷的增加, XY 平面的变形逐渐增加, 产生的摩擦电荷也越多; 而从图7(a)和图7(b)可以看出主要变形分布在微柱上, 由公式 $m = \rho HS$ (m 为每根微米柱的质量; ρ 为PDMS密度; H 为微米柱高度; S 为微米柱上表面面积)可知, S 在微米柱的压缩过程中变大, 结合(3)式可得电输出随之增加.

4 结 论

我们成功制作了可以获取微小载荷的三明治型摩擦电发电机. 系统地分析了不同PDMS膜表面拓扑结构的电输出, 由于织构表面的存在, 单位面积内微柱的数量越多, 接触区的表面积越大, 提供电荷存储的空间越多, 显著提高了摩擦发电机的输出电压和电流, 间隔为15 μm 的电输出是间隔为50 μm 的电输出的1.5倍以上; TENG的电输出随载荷增加而增加; ANSYS软件模拟了PDMS膜表面微米柱在载荷作用下的变化规律, 结果表明, 微柱主要发生了压缩变形, 微米柱直径变大, 同时整个PDMS膜发生了弹性变形, 5 N载荷作用下 Z 轴变形量和变形矢量和是1 N载荷作用下变形的5.04倍和4.96倍, 导致微米柱在压缩变形的同时与上电极之间发生了侧向摩擦, 提升了电输出. 我们认为, 本工作可以为TENG工作原理提供基本的理论基础, 采用微柱结构作为一种有效的结构模型可以提升TENG装置的电输出.

参考文献

- [1] Dresselhaus M S, Thomas I L 2001 *Nature* **414** 332
- [2] Peng L, Mei Y, Chen S F, Zhang Y P, Hao J Y, Deng L L, Huang W 2015 *Chin. Phys. B* **24** 115202

- [3] Mao Y C, Zhao P, McConohy G, Yang H, Tong Y X 2014 *Adv. Energy Mater.* **4** 175
- [4] Wang Z L, Zhu G, Yang Y, Wang S H, Pan C F 2012 *Mater. Today* **15** 32
- [5] Shen D, Park J H, Noh J H, Choe S Y, Kim S H, Kim D J 2009 *Sens. Actuators A* **154** 103
- [6] Horn R G, Smith D T 1992 *Science* **256** 362
- [7] Yang W M, Lin C J, Liao J, Li Y Q 2013 *Chin. Phys. B* **22** 097202
- [8] Lian Z J 2010 *Chin. Phys. B* **19** 058202
- [9] Zhang M Q, Wang Y H, Dong P Y, Zhang J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 238102 (in Chinese) [张明琪, 王育华, 董鹏玉, 张佳 2012 物理学报 **23** 238102]
- [10] Fan F R, Tian Z Q, Wang Z L 2012 *Nano Energy* **1** 328
- [11] Yang Y, Zhu G, Zhang H L, Chen J, Zhong X D, Lin Z H, Su Y J, Bai P, Wen X N, Wang Z L 2013 *ACS Nano* **7** 9461
- [12] Lin Z H, Cheng G, Lin L, Lee S, Wang Z L 2013 *Angew. Chem. Int. Ed* **52** 1
- [13] Zhang H L, Yang Y, Hou T C, Su Y J, Hu C G, Wang Z L 2013 *Nano Energy* **2** 1019
- [14] Wu Y, Jing Q S, Chen J, Bai P, Bai J J, Zhu G, Su Y J, Wang Z L 2015 *Adv. Funct. Mater.* **25** 2166
- [15] Niu S M, Wang S H, Lin L, Liu Y, Zhou Y S, Hu Y F, Wang Z L 2013 *Energy Environ. Sci.* **6** 3576
- [16] Li W, Sun J, Chen M F 2014 *Nano Energy* **3** 95
- [17] Zhang C, Tang W, Han C B, Fan F R, Wang Z L 2014 *Adv. Mater.* **26** 3580
- [18] Jie Y, Wang N, Cao X, Xu Y, Li T, Zhang X J, Wang Z L 2015 *ACS Nano* **9** 8376
- [19] Wang X F, Niu S M, Yin Y J, Yi F, You Z, Wang Z L 2015 *Adv. Energy Mater.* 1501467
- [20] Lee S M, Lee Y, Kim D, Yang Y, Lin L, Lin Z H, Hwang W B, Wang Z L 2013 *Nano Energy* **2** 1113
- [21] Zhang X S, Han M D, Wang R X, Zhu F Y, Li Z H, Wang W, Zhang H X 2013 *Nano Lett.* **13** 1168
- [22] Zhang X S, Han M D, Wang R X, Meng B, Zhu F Y, Sun X M, Hu W, Wang W, Li Z H, Zhang H X 2013 *Nano Energy* **4** 123
- [23] Watson P K, Yu Z Z 1997 *J. Electrostat.* **40** 67
- [24] Castle G S P 1997 *J. Electrostat.* **40** 13
- [25] Davies D K 1969 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **2** 1533
- [26] Saurenbach F, Wollmann D, Terris B D, Diaz A F 1992 *Langmuir* **8** 1199
- [27] Lee K Y, Chun J S, Lee J H, Kim K N, Kang N R, Kim J Y, Kim M H, Shin K S, Gupta M K, Baik J M, Kim S W 2014 *Adv. Mater.* **26** 5037
- [28] He X M, Guo H Y, Yue X L, Gao J, Xi Y, Hu C Q 2015 *Nanoscale* **7** 1896
- [29] Tang W, Meng B, Zhang H X 2013 *Nano Energy* **2** 1164
- [30] Zhong J W, Zhong Q Z, Fan F R, Zhang Y, Wang S H, Hu B, Wang Z L 2013 *Nano Energy* 2491
- [31] Wang S, Lin L, Wang Z L 2012 *Nano Lett.* **12** 6339
- [32] Seghir R, Arscott S 2015 *Sensor Actuat. A: Phys.* **230** 33
- [33] Lötters J C, Olthuis W, Veltink P H, Bergveld P 1997 *J. Micromech. Microeng.* **7** 145

Fabrication of triboelectric nanogenerator with textured surface and its electric output performance*

Cheng Guang-Gui^{1)2)†} Zhang Wei¹⁾ Fang Jun¹⁾ Jiang Shi-Yu¹⁾ Ding Jian-Ning^{1)2)‡}
 Noshir S. Pesika³⁾ Zhang Zhong-Qiang¹⁾ Guo Li-Qiang¹⁾ Wang Ying²⁾

1) (*Micro/Nano Science & Technology Center, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*)

2) (*Jiangsu Collaborative Innovation Center of Photovoltaic Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China*)

3) (*Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Tulane University, New Orleans, LA 70118, USA*)

(Received 9 December 2015; revised manuscript received 27 December 2015)

Abstract

Contact electrification between insulators, manifesting as static or triboelectricity is a well-known effect. The triboelectric nanogenerator (TENG) which is based on the contact triboelectricification and electrostatic induction provides a promising route for harvesting ambient mechanical energy and converting it into electric energy. The TENG which is due to its unique properties such as simple structures, low cost, high electric density etc. , can offset or even replace the traditional power source for small portable electronics, sensors and so on. So far, the influence of factors on the output performance of TENG is still trapped in unsettled questions and under debate. In this paper, we prepare several textured polydimethylsiloxane (PDMS) films with micro rod array by model method and fabricate a TENG with a size of 22 mm × 22 mm. The electric generation can be achieved with a cycled process of contact and separation between a polymer and metal electrode (PDMS and aluminum respectively in this study). Several influences as the surface structure and external load on the electrical output of the TENG are systematically studied by integrating use of experimental tests and ANSYS simulation. Results show that the existence of micro rod array on the PDMS films effectively enlarges the contact area and provides more surfaces for charge storage and hence improve the output performance of TENG. When keeping the external load constant, the output increases with decreasing distance between micro rods. When the external load is 5 N and the distance is 15 μm, the average output voltage and current as high as 88 V and 15 μA can be achieved respectively, which is 1.5 times higher than the output generated when the distance is 50 μm. The electrical output increases quasilinearly with the increase of the external load. Simulation results show that the micro rods of PDMS films are mainly compressed by normal load, which results in a bigger diameter of micro rods. The deformations of PDMS substrate leads to the lateral friction between the micro rods and the upper electrode, which produces more charges because of the friction. For 5 N normal load, the deformations of PDMS substrate and micro rods contribute to the sum of displacement vector and the deformations along Z-axis are 32.7 μm and 21.3 μm respectively, and are 4.96 and 5.04 times higher than the deformation at the load of 1 N. All the results in an enlarging surface area and the larger output correspondingly. Not only does this work present a new type of generator with micro rods on the PDMS surface, which can be an effective method to improve the electrical output of TENG, but also offers a unique point of view for further understanding of the working principle of TENG.

Keywords: TENG, electrification, micro rods, ANSYS

PACS: 02.70.Dh, 87.80.Ek, 45.20.dg, 28.50.Ma

DOI: 10.7498/aps.65.060201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51335002, 11472117), and the Tribology Science Fund of State Key Laboratory of Tribology, China (Grant No. SKLTKF14A01).

† Corresponding author. E-mail: ggcheng@ujs.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: dingjn@ujs.edu.cn