

Máy phát điện ma sát nano: Một giải pháp năng lượng tiềm năng

Triboelectric nanogenerator: A prominent energy solution

Phan Hải^{1*}, Phan Nguyễn Hoà¹, Hồ Anh Tâm¹, Phạm Đức Thắng¹

¹Trường Đại học Công nghệ, ĐHQG-HN, Việt Nam

*Tác giả liên hệ, Email: phanhai@vnu.edu.vn

THÔNG TIN

DOI: 10.46223/HCMCOJS.tech.vi.17.1.2080.2022

Ngày nhận: 21/10/2021

Ngày nhận lại: 17/11/2021

Duyệt đăng: 30/11/2021

TÓM TẮT

Cuộc cách mạng công nghiệp lần thứ tư và sự phổ biến rộng rãi của các hệ thống kết nối vạn vật IoT, nhu cầu về những thiết bị có độ linh động cao và tự cấp nguồn được cực kỳ lưu tâm. Vào năm 2012, một công nghệ chuyển đổi năng lượng mới có tên Máy phát điện ma sát nano (TENG) đã được phát minh ra bởi nhóm của Wang (được trích dẫn trong Fan, Tian, & Wang, 2012). Máy phát điện ma sát nano là thiết bị có thể chuyển đổi một cách hiệu quả các nguồn năng lượng cơ học lãng phí quanh con người thành điện năng. Dựa trên sự hợp tác của hiện tượng nhiễm điện do cọ sát và cảm ứng tĩnh điện, các nhà nghiên cứu đã phát triển bốn cấu hình cơ bản của TENG là: cấu hình tiếp xúc dọc, cấu hình trượt, cấu hình đơn điện cực và cấu hình điện cực treo. Trong bài báo này, các kiến thức cơ bản, vật liệu và ứng dụng của TENG được thảo luận cơ bản. Ngoài ra, mô hình tiếp xúc dọc cơ bản của máy phát điện ma sát nano được áp dụng để lắp ráp thử nghiệm máy phát điện ma sát nano sử dụng màng sợi nano PVC và nhôm thương phẩm. Tín hiệu đầu ra cho kết quả khả quan với hiệu điện thế 31.7V và dòng điện 6.2μA ở ngoại lực 10N.

ABSTRACT

The depletion of classic energy and high demand of human require the invention of novel energy source. Therefore, many of artificial energy sources had been developed. Moreover, in the era of fourth industrial revolution and operation of IoT systems, the need for high mobility and self-powered devices are strongly focused. In 2012, a new energy conversion technology named triboelectric nanogenerator (TENG) which possess the prominent potential energy solution had been invented by Wang group (được trích dẫn trong Fan, Tian, & Wang, 2012). This nanogenerator can effectively convert wasted mechanical energy into electricity. By the cooperation of contact electrification and electrostatic induction, researcher developed four popular concepts: vertical contact mode, sliding mode, single electrode mode and freestanding mode. In this paper, a shot fundamental theory, material and application are reviewed in detail. In addition, the vertical contact mode triboelectric generator using commercial PVC and aluminum nanofiber films was investigated. The output signal gives positive results with a voltage of 31.7V and a current of 6.2μA at an external force of 10N.

Từ khóa:

cảm ứng tĩnh điện; máy phát điện nano; ma sát điện

Keywords:

electrostatic induction; TENG; triboelectric

1. Mở đầu

Các nguồn năng lượng nhân tạo đóng vai trò rất quan trọng trong cuộc sống loài người. Trong vài thập kỷ gần đây, nhiều công nghệ chuyển đổi/thu năng lượng đã được phát minh và áp dụng vào cuộc sống nhưng vẫn chưa thể đáp ứng được nhu cầu ngày càng tăng của con người. Vậy nên, việc tìm ra những công nghệ năng lượng nhân tạo mới luôn là những thách thức to lớn. Vào năm 2012, Wang và cộng sự đã nghiên cứu và chế tạo thành công máy phát điện nano dựa vào hiệu ứng ma sát điện (Triboelectric Nanogenerator - TENG) đầu tiên (được trích dẫn trong Fan & ctg., 2012). Đây là thiết bị có khả năng chuyển đổi các năng lượng cơ học xung quanh thành điện năng với nguyên lý dựa trên hiệu ứng ma sát điện và cảm ứng tĩnh điện. Với các ưu điểm như chi phí thấp, hiệu năng cao, chế tạo đơn giản, đa dạng vật liệu, ... TENG được định hướng phát triển nghiên cứu và thể hiện tiềm năng lớn trong chuyển đổi năng lượng từ các nguồn chuyển động của con người (He & ctg., 2017; Niu và cộng sự, 2014; Yan, Lu, Song, & Xiao, 2018), gió (Chen, Yang, & Wang, 2018; Phan & ctg., 2017), sóng nước (Yong, Chung, Choi, Jung, & Lee, 2016), âm thanh (Mi & ctg., 2018). Ngoài ra, TENG còn thể hiện được sự ưu việt trong việc chế tạo nguồn điện tích hợp trong các thiết bị tự cấp nguồn, các cảm biến chủ động và nhiều hơn thế nữa (Guo, Pu, & Wang, 2018). TENG dường như là một ứng viên nặng ký cho công nghệ năng lượng trong thời đại sử dụng cho hệ kết nối vạn vật (IOT) và các thiết bị di động tích hợp đa năng.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi nghiên cứu về các khái niệm cơ bản của máy phát điện dựa trên hiệu ứng ma sát điện. Đồng thời, lắp đặt thử nghiệm máy phát điện ma sát nano sử dụng cặp vật liệu nhôm và màng PVC cấu thành từ các sợi nano PVC. Thiết bị thử nghiệm này sản sinh hiệu điện thế 5.7V và cường độ dòng điện $0.4\mu\text{A}$. Kết quả này cho thấy tiềm năng của công nghệ ma sát điện, hứa hẹn mở ra những kỳ vọng và thách thức mới để tiến tới phát triển những ứng dụng thực tế trong tương lai.

2. Hiệu ứng ma sát điện và máy phát điện ma sát nano

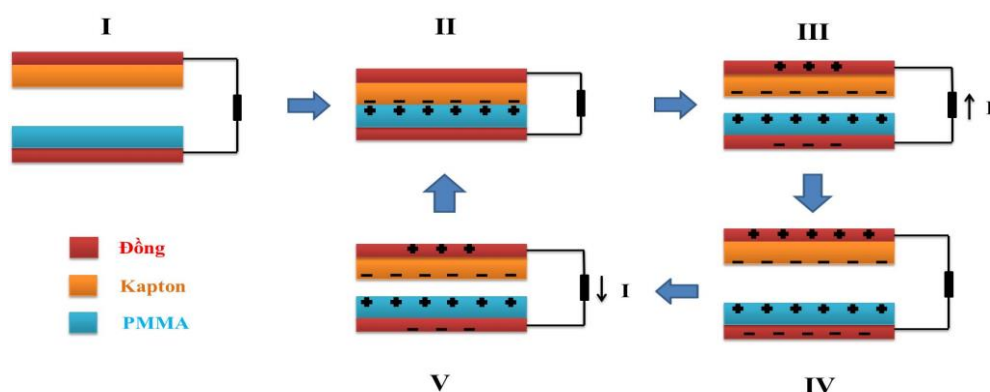
2.1. Hiệu ứng ma sát điện

Khi nhắc đến hiệu ứng ma sát điện (Triboelectric effect) là nhắc đến một hiệu ứng vật lý cổ điển mà mỗi chúng ta đều được học ở những bài giảng vật lý đầu tiên. Hiện tượng đó được mô tả đơn giản là hiện tượng vật liệu trở nên nhiễm điện khi nó cọ sát với một vật liệu khác. Hiệu ứng này được biết đến hàng ngàn năm. Mặc dù đây là một trong những trải nghiệm thường gặp nhất các hiệu ứng mà mỗi người chúng ta chắc chắn sẽ thấy mỗi ngày, cơ chế đằng sau hiện tượng ma sát điện vẫn đang được nghiên cứu. Người ta cho rằng hai vật liệu khác nhau tiếp xúc với nhau, liên kết hóa học được hình thành giữa một số phần của hai bề mặt, được gọi là độ bám dính, và điện tích di chuyển từ vật liệu này sang vật liệu khác để cân bằng hóa điện của chúng. Các điện tử được chuyển có thể là các electron hoặc có thể là các ion/phân tử. Khi tách ra, một số nguyên tử có khuynh hướng giữ thêm các electron, và một số xu hướng cho chúng đi, có thể tạo ra các điện tử triboelectric trên bề mặt.

2.2. Máy phát điện nano dựa trên hiệu ứng ma sát điện

Máy phát điện ma sát nano, có nhiều ưu điểm, chẳng hạn như công suất đầu ra lớn, chi phí thấp, sản xuất đơn giản và hiệu suất chuyển đổi cao. Wang và các đồng nghiệp đã phát triển nhiều TENG khác nhau, cơ bản dựa trên sự kết hợp giữa hiệu ứng triboelectric và cảm ứng tĩnh điện (được trích dẫn trong He & ctg., 2017). Các nhà nghiên cứu đã thiết kế một số TENG nổi bật, nơi mật độ năng lượng của khu vực có thể đạt tới 500W/m^2 và hiệu suất tổng chuyển đổi tương ứng khoảng 85% (He & ctg., 2017). Với nhu cầu ngày càng tăng đối với các thiết bị điện tử linh hoạt, chẳng hạn như thiết bị điện tử đeo được, màn hình uốn cong và da điện tử, TENG linh hoạt khi nguồn điện đã được nghiên cứu rộng rãi. Vật liệu phù hợp và cấu trúc tối ưu là hai yếu tố chính, có thể ảnh hưởng đến hiệu suất đầu ra và độ ổn định cơ học của TENG linh hoạt.

Mô hình cơ bản đầu tiên của máy phát điện ma sát nano được trình bày trong Hình 1. Dựa trên hiệu ứng ma sát điện, TENG được thiết kế cơ bản sử dụng hai loại vật liệu khác nhau là PMMA và Kapton được sắp xếp đối diện nhau. Ở mặt còn lại của chúng là hai lớp đồng có vai trò là điện cực được nối với nhau bởi một mạch kín. Ở trạng thái ban đầu (I), chưa có điện tích ở bề mặt của hai lớp polyme. Khi có một lực ngoài tác động làm cho Kapton và PMMA tiến đến tiếp xúc với nhau, lúc đó, bề mặt kapton sẽ nhiễm điện âm trong khi bề mặt PMMA sẽ nhiễm điện dương (II). Tiếp theo, khi ngoại lực biến mất, hai lớp vật liệu có xu hướng tách rời nhau về trạng thái ban đầu. Lúc này, điện tích trên hai bề mặt cọ sát sẽ hình thành một hiệu điện thế giữa chúng. Vì vậy, để cân bằng được hiệu điện thế này, một dòng điện có hướng từ điện cực bên dưới hướng lên điện cực phía trên như trong trạng thái (III). Khi Kapton và PMMA đã trở về vị trí ban đầu, dòng electron từ dưới lên trên đã dịch chuyển xong và thiết lập trạng thái cân bằng điện thế trong mạch kín, vì thế, dòng điện trong mạch đã biến mất (IV). Quy trình làm việc của máy phát điện nano tiếp tục khi ngoại lực xuất hiện trở lại làm cho Kapton và PMMA có xu hướng tiến sát lại nhau. Khi chúng bắt đầu dịch chuyển (V), hiệu điện thế giữa hai bề mặt cọ sát thay đổi theo chiều hướng ngược lại dẫn tới một dòng điện có chiều từ điện cực bên trên hướng về điện cực bên dưới. Dòng điện này sẽ biến mất khi trạng thái cân bằng điện thế trong mạch được thiết lập trở lại là lúc Kapton và PMMA tiếp xúc hoàn toàn trở lại với nhau. Với vòng lặp tuần hoàn như vậy, dòng điện sẽ được sản sinh liên tục dưới dạng xung xoay chiều cho tới khi ngoại lực ngừng tác dụng lên thiết bị.



Hình 1. Cấu trúc cơ bản của máy phát điện ma sát nano

Nguồn: Kết quả phân tích dữ liệu của nhóm nghiên cứu

Máy phát điện ma sát nano có tất cả 04 cơ chế hoạt động được trình bày trong Hình 2 như sau:

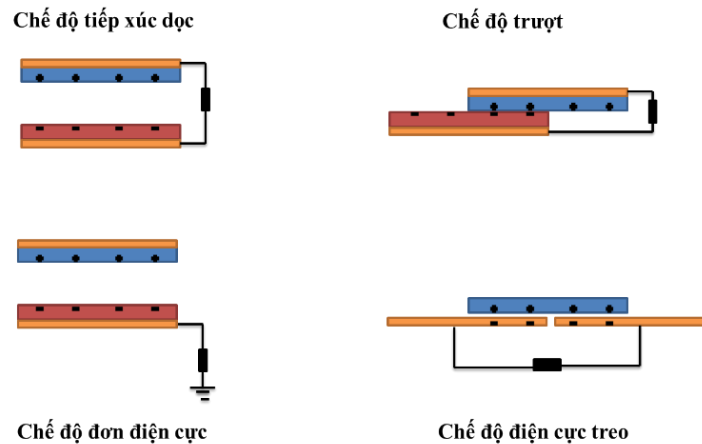
- Chế độ tiếp xúc dọc: Khi hai vật liệu có tính chất ma sát điện khác nhau được cọ sát sẽ xuất hiện điện tích trái dấu ở bề mặt tiếp xúc của chúng. Khi hai lớp vật liệu này bắt đầu tách xa nhau sẽ xuất hiện hiệu điện thế hai bề mặt đó. Khi đó một dòng điện sẽ xuất hiện giữa hai điện cực để nhằm cân bằng hiệu điện thế trong mạch kín.

- Chế độ trượt: Cũng là hai vật liệu ma sát điện khác nhau nhưng ở đây là chúng trượt lên nhau. Khi đó, sự phân cực điện tích sẽ sản sinh do sự thay đổi về điện tích tiếp xúc và cũng đồng thời sinh ra sự sai khác về hiệu điện thế cực đã được nối qua mạch ngoài và sinh ra dòng điện.

- Chế độ đơn điện cực: đây là thiết kế khi một trong hai loại vật liệu ma sát điện có tính di động cao và không thể kết nối được với điện cực. Khi một vật thể làm bởi vật liệu có tính chất ma sát điện khác cọ sát với lớp vật liệu có phủ điện cực được nối đất hoặc với điện cực tham chiếu thì sẽ xuất hiện sự tái phân bố điện tử ở trên điện cực hiện tại dẫn tới sự trao đổi điện tử giữa nó với điện cực tham chiếu hoặc đất. Sự trao đổi điện tử đó là nguyên nhân dẫn tới sự sản sinh dòng điện.

- Chế độ điện cực treo: đây là chế độ mà hai điện trở kim loại khác nhau để gần nhau ở phía bên dưới một lớp cách điện và có kích thước bằng với kích cỡ của phần vật liệu tạo tương tác

ma sát điện bên trên. Khi lớp cách điện cọ sát với phần vật liệu ma sát điện sẽ tạo ra sự phân cực điện thể bất đối xứng. Điều này dẫn tới phải có dòng điện dịch chuyển giữa hai điện cực nhằm cân bằng sự phân bố điện tử địa phương.

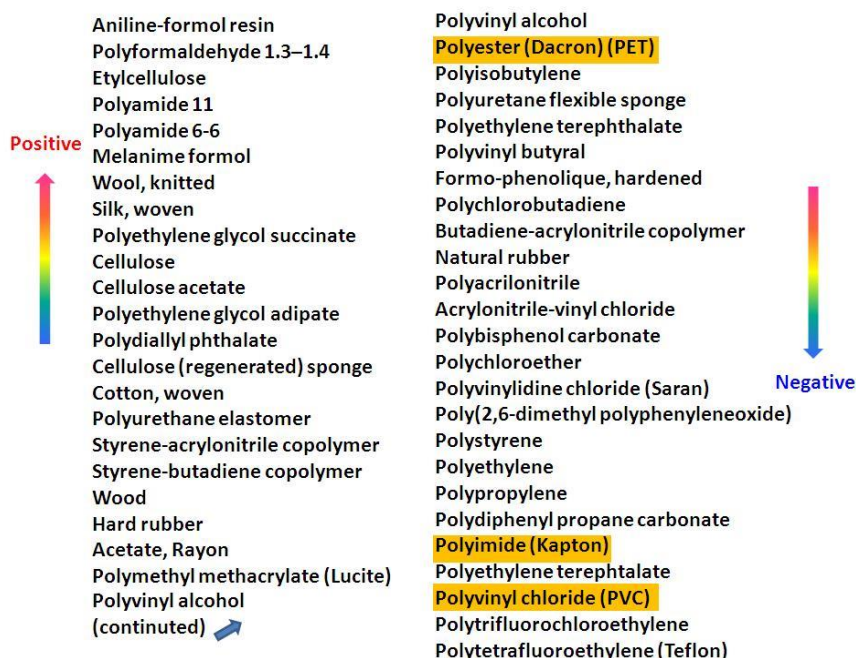


Hình 2. Bốn cấu trúc cơ bản của máy phát điện ma sát nano

Nguồn: Tác giả thiết kế

2.3. Vật liệu ma sát điện

Tất cả các loại vật liệu mà con người biết đến đều có tính chất ma sát điện bao gồm từ kim loại cho đến polymer, các loại vải sợi, gỗ, ... Vì vậy, mỗi loại vật liệu đó đều có thể là những đối tượng vật liệu phù hợp cho các nghiên cứu về TENG trong các trường hợp cụ thể và cũng khẳng định được sự lựa chọn vật liệu cho ứng dụng máy phát điện ma sát nano là vô cùng phong phú. Hình 4 là danh sách các loại vật liệu ma sát điện phổ biến. Trong đó, có rất nhiều loại vật liệu chúng ta dễ dàng gặp thường ngày như PVC, nhôm, đồng, cao su. Qua đó cho thấy sự thuận lợi khi phát triển các nghiên cứu về công nghệ máy phát điện ma sát nano.



Hình 3. Các loại vật liệu ma sát điện

Nguồn: Fan và cộng sự (2012)

2.4. Các phương pháp gia tăng hiệu suất

Các nghiên cứu thực nghiệm và lý thuyết về TENG đã chỉ ra rằng mật độ điện tích ma sát điện là yếu tố chính ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất của TENG. Để gia tăng được mật độ điện tích ma sát điện, các phương thức thường được sử dụng là: xử lý thành phần vật liệu, tăng diện tích tiếp xúc địa phương và thay đổi điều kiện môi trường.

Xử lý thành phần vật liệu:

Xử lý nhóm chức hóa học bề mặt là phương thức mà ở đó thay đổi các nhóm chức phủ trên bề mặt ma sát nhằm tăng cường khả năng bắt giữ điện tích của bề mặt vật liệu xuyên suốt quá trình ma sát điện (Wang, Zi, Zhou, & Wang, 2016).

Phương pháp tăng diện tích tiếp xúc bằng biến tính bề mặt:

Diện tích tiếp xúc địa phương giữa hai lớp vật liệu có thể tăng lên đáng kể khi xử lý biến tính bề mặt bằng cách tạo các cấu trúc micro-nano trên bề mặt chúng. Khi đó, hai lớp vật liệu có thể tiếp xúc sâu hơn, cọ sát nhiều hơn do cấu trúc bề mặt cho phép mức độ tiếp xúc cao hơn như vậy các cấu trúc bề mặt đã được khai thác phải kể đến như nanowires, cấu trúc bề mặt hình khối, hình kim tự tháp, sợi nano. Các công nghệ xử lý cấu trúc bề mặt được sử dụng đến như ăn mòn hóa học (Yang, Chan, Wang, & Daoud, 2018), ăn mòn plasma - tia điện tử (Myeong & ctg., 2015; Zhang & ctg., 2016), laser (Phan, Phan, Ho, Pham, & Nguyen, 2020; Phan, Phan, Ho, & Pham, 2021), ... Tất cả các phương pháp kể đến đều gia tăng đáng kể hiệu suất của TENG từ 1.5 tới 21 lần.

Phương pháp thay đổi điều kiện môi trường:

Phương pháp này đề cập tới các yếu tố ảnh hưởng trong môi trường hoạt động của TENG như nhiệt độ hay áp suất, độ ẩm (Chen & ctg., 2018; Yang & ctg., 2018).

3. Chế tạo thử nghiệm máy phát điện ma sát nano sử dụng vật liệu sợi nano Polyvinyl chloride và nhôm công nghiệp

3.1. Chế tạo màng sợi nano PVC bằng electrospinning

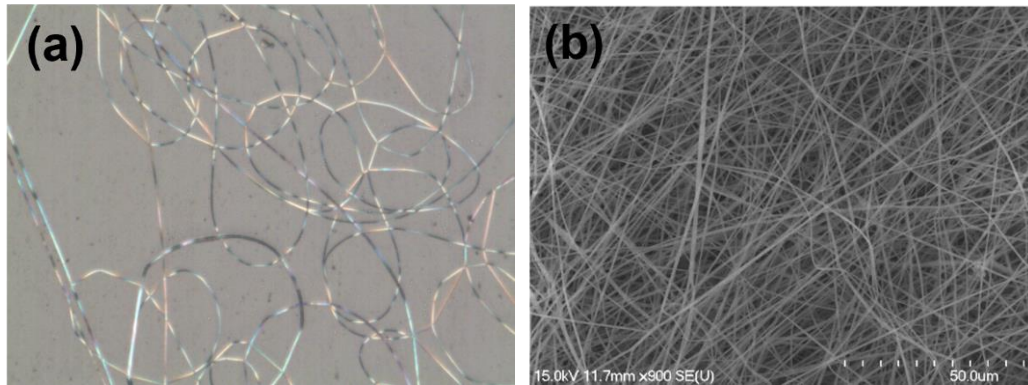
Nhằm gia tăng diện tích tiếp xúc địa phương giữa PVC và nhôm, màng PVC cấu thành bởi các sợi nano được chế tạo bằng công nghệ electrospinning để lắng đọng vật liệu PVC có cấu trúc dạng sợi nano lên bề mặt lá nhôm. Dung dịch PVC được chuẩn bị bằng cách hòa tan bột PVC (15wt%, $M_w = 80,000$, Aldrich) trong hỗn hợp Tetrahydrofuran và N, N-dimethylformamide theo tỉ lệ khối lượng 3:7. Hỗn hợp được trộn ở nhiệt độ 40°C trong vòng 6h bằng công cụ khuấy từ. Quá trình tạo màng PVC bằng electrospinning được tiến hành ở điều kiện độ ẩm xấp xỉ 65%, tốc độ dung dịch 0.5 mL.h⁻¹, hiệu điện thế 13kV và khoảng cách đầu xi lanh tới lá nhôm là 15cm. Màng PVC sau khi được tạo thành sẽ được sấy khô ở nhiệt độ 45°C trong 30 phút.

3.2. Lắp đặt thử nghiệm thiết bị

Màng Al và PVC sau khi tiểu hình hóa bề mặt được sử dụng để lắp ráp TENG ở cấu hình cơ bản. Các điện cực nối với dây dẫn điện bằng keo dẫn điện, sau đó chúng được dính chặt lên các miếng Arcrylic sao cho các mặt được tiểu hình hóa hướng vào nhau. Sau đó 04 lò xo được dính ở 04 góc để tạo ra cấu trúc đàn hồi với khoảng cách giữa hai lớp vật liệu xấp xỉ 5mm.

3.3. Đo đạc và khảo sát

Cấu trúc bề mặt vật liệu được khảo sát bằng kính hiển vi điện tử quét (Scanning Electroscopie Microscopy - SEM) Jeol 6490 JED 2300; kính hiển vi MLB 2000T. Tín hiệu đầu ra gồm có hiệu điện thế, cường độ dòng điện được khảo sát lần lượt bởi giao động ký và máy khuếch đại dòng SR 570.



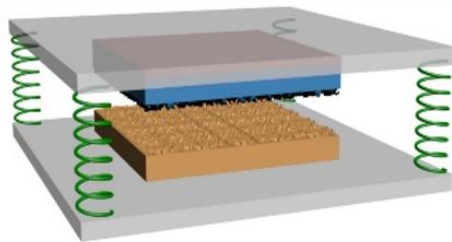
Hình 4. Bề mặt màng PVC tạo bởi sợi nano PVC bằng phương pháp electrospinning: (a) dưới kính hiển vi khi đang lắng đọng và (b) ảnh SEM sau khi đã sấy khô

Nguồn: Data của tác giả

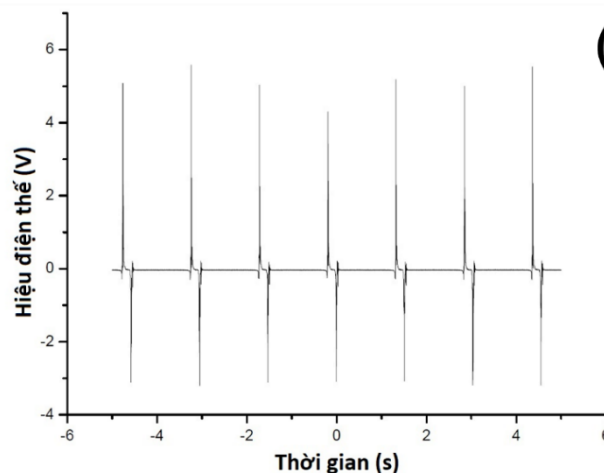
Hình 4 cho thấy các sợi PVC được tạo thành có độ đồng đều cao. Các hạt dung dịch không xuất hiện đảm bảo điều này. Các sợi PVC sau khi sấy khô có kích cỡ từ 200nm - 600nm

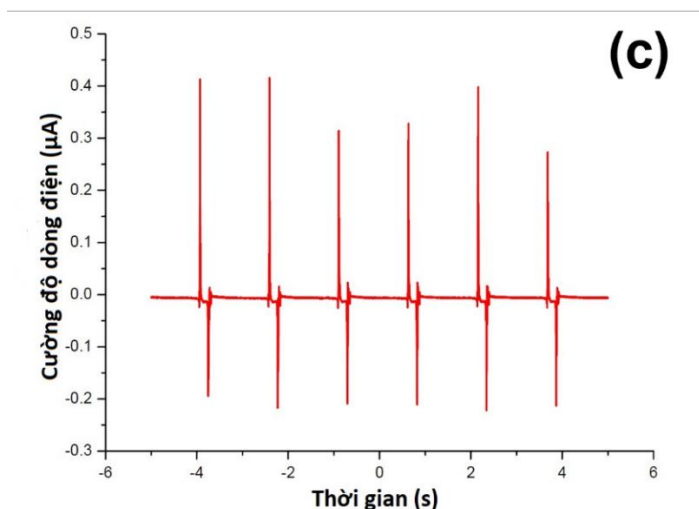
Cấu trúc máy phát điện nano đơn giản sử dụng PVC và nhôm được thể hiện trong Hình 5a. Đồ thị 5b và 5c biểu hiện hiệu điện thế và cường độ dòng điện sinh ra bởi thiết bị ma sát nano Al: PVC/Al dưới lực tác động là 2N với tần số khảo sát là 0.7Hz. Từ đồ thị này ta có thể thấy rằng, trong quá trình thực nghiệm khi được kích hoạt bởi một ngoại lực và tần số xác định, máy phát sẽ tạo ra được một hiệu điện thế với giá trị trung bình xấp xỉ 5.7V. Ở điều kiện khảo sát này, cường độ dòng điện tức thời sinh ra xấp xỉ đạt 0.4μA (Hình 5). Kết quả này phản ánh phù hợp với nghiên cứu của Mi và cộng sự (2018). Trong nghiên cứu này, Mi và cộng sự (2018) đã chế tạo màng sợi PVDF bằng công nghệ quay điện-electrospinning để thiết kế máy phát điện ma sát nano đạt hiệu điện thế lên tới ~ 20V.

(a)



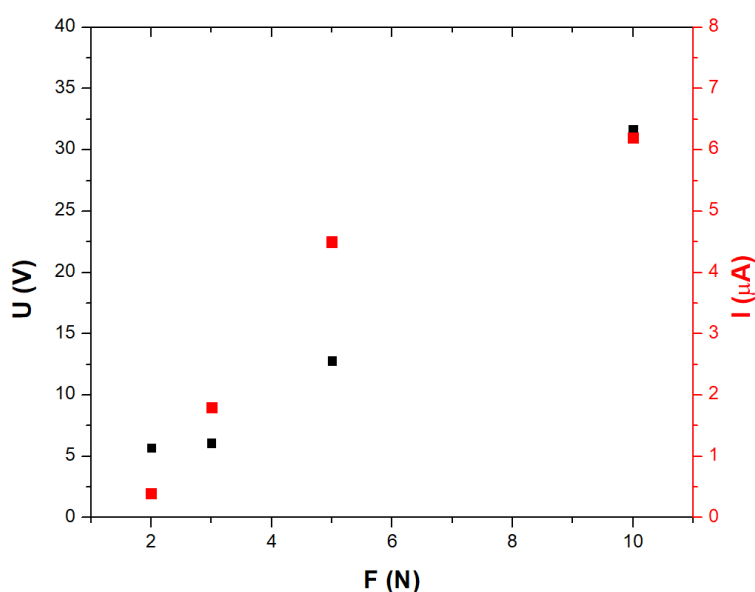
(b)





Hình 5. (a) Cấu trúc máy phát điện ma sát nano đã lắp ráp, (b) hiệu điện thế sinh ra bởi thiết bị ma sát nano dưới lực tác động là 2N, và (c) cường độ dòng điện sinh ra bởi thiết bị ma sát nano dưới lực tác động là 2N

Nguồn: Data của tác giả



Hình 6. Tín hiệu đầu ra dưới ngoại lực tác động khác nhau

Nguồn: Data của tác giả

Sự phụ thuộc của tín hiệu đầu ra theo ngoại lực tác động cũng được khảo sát. Hình 6 biểu thị hiệu điện thế tương ứng với lực tác động xấp xỉ lần lượt là 2N, 3N, 5N, 10N. Qua đồ thị ta có thể thấy rằng, với lực tác động 2N, hiệu điện thế trung bình sinh ra xấp xỉ 5.7V; với lực tác động 3N, hiệu điện thế trung bình sinh ra xấp xỉ 6.1V; với lực tác động 5N, hiệu điện thế trung bình sinh ra xấp xỉ 12.8V; và với lực tác động 10N, hiệu điện thế trung bình sinh ra xấp xỉ 31.7V. Như vậy, cùng tần số 0.7Hz với lực tác động càng mạnh thì máy phát điện sẽ sinh ra hiệu điện thế càng lớn. Tương tự như thế, dòng trung bình sinh ra xấp xỉ 0.4μA; 1.8μA, 4.5μA, 6.2μA tương ứng với các giá trị ngoại lực như trên. Điều này có thể giải thích là vì khi chúng ta tác động lực càng mạnh, diện tích tiếp xúc của bề mặt địa phương PVC và Al sẽ càng lớn, lúc đó các điện tích trái dấu sẽ sinh ra trên bề mặt màng càng nhiều dẫn tới việc hình thành điện thế lớn khi hai bề mặt tách xa nhau.

5. Kết luận

Với nghiên cứu này, nhóm nghiên cứu đã nghiên cứu các kiến thức cơ bản về máy phát điện ma sát nano. Đồng thời tiến hành lắp ráp thử nghiệm thiết bị sử dụng cặp vật liệu sợi nano PVC và nhôm. Trong đó, màng PVC được chế tạo bằng công nghệ electrospinning. Khảo sát tín hiệu đầu ra của thiết bị cho kết quả ấn tượng với hiệu điện thế 5.7V cùng dòng điện 0.4 μ A ở ngoại lực 2N. Lực tác động càng cao thì tín hiệu điện đầu ra càng lớn, cụ thể, thiết bị cho tín hiệu đầu ra là 31.7V và 6.2 μ A ở điều kiện ngoại lực 10N.

Bởi vì tính chất mới và tiềm năng ứng dụng lớn của máy phát điện ma sát nano, chủ đề này đã thu hút được sự đầu tư nghiên cứu của khoa học thế giới. Phát triển được các thiết bị tiêu thụ điện năng thấp nhưng có những tính chất cơ học tốt như linh hoạt, đa dạng, độ bền cao, tuổi thọ dài, có thể hoạt động được ở những điều kiện môi trường đặc thù. Theo các nghiên cứu, các hướng ứng dụng chính của TENGs có thể chia ra làm bốn lĩnh vực khác nhau bao gồm: nguồn năng lượng quy mô micro-nano cho hệ thống các thiết bị tự cấp nguồn; cảm biến chủ động cho các ứng dụng y - sinh, tầm soát người - máy, tương tác người - máy; hệ thống thiết bị thu năng lượng cơ học tần số thấp; và nguồn điện cho các ứng dụng cao thế.

LỜI CẢM ƠN

Công trình này được tài trợ một phần từ đề tài KHCN cấp ĐHQG-HN, Mã số đề tài: QG.19.21.

Tài liệu tham khảo

- Chen, B., Yang, Y., & Wang, Z. L. (2018). Scavenging wind energy by triboelectric nanogenerators. *Advanced Energy Materials*, 8(10), Article 1702649.
- Chen, X., Jiang, T., Yao, Y., Xu, L., Zhao, Z., & Wang, Z. L. (2016). Stimulating acrylic elastomers by a triboelectric nanogenerator - Toward self-powered electronic skin and artificial muscle. *Advanced Function Materials*, 26(27), 4906-4913. doi:10.1002/adfm.201600624
- Fan, F. R., Tian, Z. Q., & Wang, Z. L. (2012). Flexible triboelectric generator. *Nano Energy*, 1(2), 328-334.
- Guo, H., Pu, X., & Wang, Z. L. (2018). A highly sensitive, self-powered triboelectric auditory sensor for social robotics and hearing aids. *Science Robotics*. doi:10.1126/scirobotics.aat2516
- He, C., Zhu, W., Chen, B., Xu, L., Jiang, T., Han, C. B., ... Wang, Z. L. (2017). Smart floor with integrated triboelectric nanogenerator as energy harvester and motion sensor. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(31), 26126-26133.
- Mi, H. Y., Jing, X., Zheng, Q., Fang, L., Huang, H. X., Turng, L. S., & Gong, S. (2018). High-performance flexible triboelectric nanogenerator based on porous aerogels and electrospun nanofibers for energy harvesting and sensitive self-powered sensing. *Nano Energy*, 48, 327-336.
- Myeong, L. S., Jong, H. W., Seung, B. J., Daewon, K., Sang, J. P., Jae, H., & Yang, K. C. (2015). Vertically stacked thin trielectric nanogenerator for wind energy harvesting. *Nano Energy*, 14, 201-208.
- Niu, S., Zhou, Y. S., Wang, S., Liu, Y., Lin, L., Bando, Y., & Wang, Z. L. (2014). Simulation method for optimizing the performance of an integrated triboelectric nanogenerator energy harvesting system. *Nano Energy*, 8, 150-156.

- Phan, H., Phan, H. N., Ho, T. A., & Pham, T. D. (2021). Q-switched pulsed laser direct writing of aluminum surface micro/nanostructure for triboelectric performance enhancement. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 6(1), 84-91.
- Phan, H., Phan, H. N., Ho, T. A., Pham, T. D., & Nguyen, D. H. (2020). Multi-directional triboelectric nanogenerator based on industrial Q-switched pulsed laser etched Aluminum film. *Extreme Mechanics Letters*, 40, Article 100886.
- Phan, H., Shin, D. M., Jeon, S. H., Kang, T. Y., Han, P., Kim, G. H., ... Hong, S. W. (2017). Aerodynamic and aeroelastic flutters driven triboelectric nanogenerators for harvesting broadband airflow energy. *Nano Energy*, 33, 476-484.
- Wang, S., Zi, Y., Zhou, Y. S., & Wang, Z. L. (2016). Molecular surface functionalization to enhance the power output of triboelectric nanogenerators. *Journal of Materials Chemical A*, 10(4), 3728-3734. doi:10.1039/c5ta10239a
- Xiao, T. X., Jiang, T., Zhu, J. X., Liang, X., Xu, L., Shao, J. J., ... Wang, Z. L. (2018). Silicone-Based triboelectric nanogenerator for water wave energy harvesting. *Applied Materials & Interfaces*, 10(4), 3616-3623.
- Yan, S., Lu, J., Song, W., & Xiao, R. (2018). Flexible triboelectric nanogenerator based on cost-effective thermoplastic polymeric nanofiber membranes for body motion energy harvesting with high humidity-resistance. *Nano Energy*, 48, 248-255.
- Yang, X., Chan, S., Wang, L., & Daoud, W. A. (2018). Water tank trioelectric nanogenerator for efficient harvesting of water wave energy over a broad frequency range. *Nano Energy*, 44, 388-398.
- Yong, H., Chung, J., Choi, D., Jung, D., & Lee, S. (2016). Highly reliable wind-rolling triboelectric nanogenerator operating in wide wind speed range. *Scientific Report*, 6(1), Article 33977. doi:10.1038/srep33977
- Zhang, L. M., Han, C. B., Jiang, T., Zhou, T., Hui, L. X., & Wang, Z. L. (2016). Multilayer wavy-structured robust triboelectric nanogenerator for harvesting water wave energy. *Nano Energy*, 22, 87-94.

