

Nghiên cứu chế tạo thử nghiệm máy phát điện ma sát nano dựa trên hai vật liệu Teflon và nhôm công nghiệp

Phan Hải^{1, 2*}, Phan Nguyễn Hòa¹, Hồ Anh Tâm², Nguyễn Hữu Đức², Phạm Đức Thắng^{1, 2}

¹Khoa Vật lý Kỹ thuật và Công nghệ nano, Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội, 144 Xuân Thủy, phường Dịch Vọng Hậu, quận Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

²Phòng Thí nghiệm Trọng điểm Công nghệ Micro-Nano, Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội, 144 Xuân Thủy, phường Dịch Vọng Hậu, quận Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 13/9/2021; ngày chuyển phản biện 15/9/2021; ngày nhận phản biện 6/10/2021; ngày chấp nhận đăng 11/10/2021

Tóm tắt:

Máy phát nano dựa trên hiệu ứng ma sát điện là thiết bị có khả năng chuyển đổi năng lượng từ cơ năng thành điện năng nhờ sự kết hợp của hiện tượng nhiễm điện do cọ sát và cảm ứng tĩnh điện. Điều này giúp mở ra một trang mới cho năng lượng nhân tạo để tiến tới chế tạo nguồn năng lượng tích hợp cho các thiết bị tự cấp nguồn, cảm biến chủ động hay thậm chí là phát triển mạng lưới năng lượng quy mô lớn. Trong nghiên cứu này, các tác giả đã chế tạo thử nghiệm thành công máy phát điện ma sát nano (Triboelectric nanogenerator - TENG) cấu hình tiếp xúc dọc sử dụng vật liệu Polytetrafluoroethylene (PTFE) và nhôm công nghiệp. Máy phát điện được chế tạo có thể sản sinh hiệu điện thế và cường độ dòng điện tức thời tương ứng là 145 V và 8,5 μ A. Công suất tối đa đạt 510 μ W ở lực tác động vuông góc là 11 N.

Từ khóa: chế độ tiếp xúc dọc, máy phát điện ma sát nano, nhôm, PTFE.

Chỉ số phân loại: 2.2

1. Mở đầu

Nhu cầu của con người về năng lượng ngày càng cao trong khi trữ lượng năng lượng hóa thạch truyền thống ngày càng giảm và sẽ cạn kiệt trong tương lai không xa. Để giải quyết vấn đề này, nhiều công nghệ sản sinh năng lượng nhân tạo đã được nghiên cứu và áp dụng như năng lượng thủy điện, nhiệt điện, sinh học, mặt trời và năng lượng nguyên tử. Mặc dù quá trình nghiên cứu và ứng dụng của năng lượng nhân tạo vào cuộc sống con người đã được tiến hành từ rất lâu, nhưng tỷ lệ đóng góp của chúng vào tổng năng lượng tiêu thụ của con người vẫn rất khiêm tốn. Chính vì vậy, việc phát triển hơn nữa các công nghệ năng lượng nhân tạo hiện có, đồng thời tìm kiếm những công nghệ sản sinh/chuyển đổi năng lượng mới là một thách thức.

Máy phát điện cũng đã được sử dụng từ rất lâu, đây là các thiết bị biến đổi cơ năng thành điện năng và thông thường chúng hoạt động dựa trên nguyên lý cảm ứng điện từ. Trong những năm gần đây, khái niệm máy phát điện micro-nano được đề cập đến như là một công nghệ năng lượng nhân tạo đầy tiềm năng với khả năng biến đổi năng lượng cơ/nhiệt phát sinh từ sự thay đổi quy mô nhỏ về mặt vật lý thành điện năng. TENG là một trong số những giải pháp nổi bật đó, đã được nghiên cứu và xây dựng thành công năm 2012 bởi F.R. Fan và cs (2012) [1]. Hoạt động dựa trên hiệu ứng ma sát điện và cảm ứng tĩnh điện, TENG đã được nghiên cứu để áp dụng thu năng lượng từ sóng biển [2-4], gió [5-7], vận động của cơ thể người [8-11], chế tạo các loại cảm biến chủ động [11-15]... một cách hiệu quả.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã sử dụng vật liệu PTFE (Teflon) và nhôm công nghiệp để chế tạo thử nghiệm TENG theo cấu hình tiếp xúc dọc. Cấu trúc này của máy phát điện có thể sản sinh hiệu điện thế 145 V và cường độ dòng điện tức thời là 8,5 μ A ở lực tác động là 23 N.

2. Thực nghiệm

2.1. Chế tạo vật liệu ma sát điện có cấu trúc nano bề mặt

Tín hiệu lõi ra của TENG dựa vào lượng điện tích tạo ra bởi quá trình ma sát giữa chúng. Lượng điện tích này phụ thuộc vào diện tích cọ sát giữa bề mặt hai lớp vật liệu. Ở trạng thái ban đầu của nhà sản xuất, bề mặt của mỗi loại vật liệu có cấu trúc nhất định ở kích thước khảo sát là vài trăm micro trở xuống. Tuy nhiên, các kỹ thuật ăn mòn hóa/lý có thể tạo nên các cấu trúc kích cỡ micro-nano trên bề mặt các vật liệu tương ứng, khi đó, diện tích tiếp xúc giữa hai lớp vật liệu sẽ tăng lên đáng kể. Khi đó, lượng điện tích phân cực sinh ra bởi hiện tượng cọ sát giữa chúng sẽ tăng lên đáng kể.

Để phục vụ mục đích này, công nghệ ăn mòn Plasma (ICP-RIE) được sử dụng để tiêu hình hóa bề mặt màng PTFE, trong khi công nghệ khắc laser công nghiệp được dùng để tạo bề mặt micro trên lá nhôm.

Tiểu hình hóa bề mặt màng PTFE bằng công nghệ ăn mòn Plasma ICP-RIE: màng PTFE chiều dày 100 μ m (VIBASIA), diện tích 4,95 cm x 4,95 cm, được rung siêu âm với Aceton trong vòng 10 phút. Sau đó, PTFE được tiếp tục rung siêu âm với Ethanol trong 10 phút. Nước cất được

*Tác giả liên hệ: Email: phanhai53@gmail.com

Investigation and fabrication triboelectric nanogenerator using commercial Polytetrafluoroethylene and Aluminum

Hai Phan^{1,2*}, Nguyen Hoa Phan¹, Anh Tam Ho²,
Huu Duc Nguyen², Duc Thang Pham^{1,2}

¹Faculty of Engineering Physics and Nanotechnology,
University of Engineering and Technology, Vietnam National University, Hanoi,
144 Xuan Thuy Street, Dich Vong Hau Ward, Cau Giay District, Hanoi, Vietnam
²Key Laboratory for Micro and Nano Technology, University of Engineering and Technology,
Vietnam National University, Hanoi,
144 Xuan Thuy Street, Dich Vong Hau Ward, Cau Giay District, Hanoi, Vietnam

Received 13 September 2021; revised 6 October 2021; accepted 11 October 2021

Abstract:

Triboelectric nanogenerator (TENG) is an energy technology that can convert mechanical energy into electricity based on the conjunction of triboelectric friction and electrostatic induction. TENG possesses a high potential as an alternative artificial energy source to develop the integrated power source device, active sensor, or massive scale power source. In this research, the vertical contact triboelectric nanogenerators using commercial grade Polytetrafluoroethylene (PTFE) and Aluminum were successfully fabricated. It performs the output voltage and current of 145 V and 8.5 μ A, respectively. Moreover, the maximum power of 510 μ W was observed at the external contact force of 11 N.

Keywords: Aluminum, contact separation mode, PTFE, triboelectric nanogenerator.

Classification number: 2.2

sử dụng để làm sạch màng PTFE trước khi được rung siêu âm trong dung dịch Isopropanol. Màng PTFE sau khi làm sạch được giữ khô ở điều kiện phòng, sau đó được ăn mòn với thông số thiết bị như ở bảng 1.

Bảng 1. Các thông số ăn mòn bề mặt PTFE.

Áp suất (Torr)	O ₂ (sccm)	CF ₄ (sccm)	Ar (sccm)	Nguồn ICP (W)	Nguồn CCP (W)	Thời gian ăn mòn (phút)
0,2	15	30	10	100	400	20

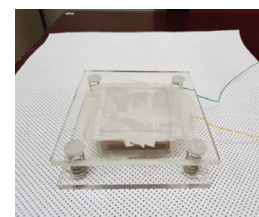
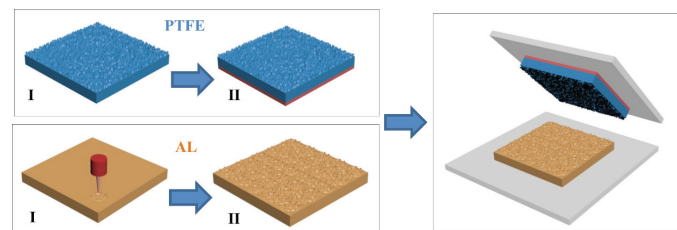
Chế tạo điện cực đồng: nhằm chế tạo lớp tụ có khả năng bắt tín hiệu điện ra theo hiện tượng cảm ứng tĩnh điện của lớp PTFE, vật liệu đồng (Cu) được lựa chọn để làm lớp điện cực này và công nghệ chế tạo được sử dụng là phun xạ

(Sputtering). Màng Teflon sau khi được ăn mòn bề mặt bởi phương pháp plasma được làm sạch theo quy trình nêu trên. Lớp điện cực đồng được phun lên mặt ngoài của PTFE ở các thông số sau: lưu lượng dòng khí Ar là 40 sccm, áp suất buồng khi hoạt động xấp xỉ 5×10^3 Torr, công suất phun 40 W trong 30 phút.

Xử lý bề mặt lá nhôm bằng công nghệ khắc laser công nghiệp: các chùm tia laser mang năng lượng lớn sẽ tạo nhiệt tại bề mặt tiếp xúc làm cho vật liệu nóng lên và chảy ra hoặc đục các lỗ trên vật liệu tùy vào lập trình xử lý đã được cài đặt cho việc gia công. Nhờ vậy, máy cắt laser có thể cắt các đường nét một cách chính xác và tinh xảo hơn hẳn phương pháp gia công thủ công truyền thống bằng tay hoặc máy tiện, máy cắt khắc. Lá nhôm công nghiệp có chiều dày 200 μ m sau khi được làm sạch bằng quy trình nêu trên được khắc theo cấu trúc lưới bởi máy laser công nghiệp dưới thông số tốc độ khắc 1000 mm/s, công suất 30 W và tần số 20 KHz.

2.2. Lắp đặt TENG

Màng Al và PTFE 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, 4 lò xo được dính ở 4 góc để tạo ra cấu trúc đàn hồi với khoảng cách giữa 2 lớp vật liệu xấp xỉ 5 mm. Hình dạng thực tế của thiết bị được thể hiện ở hình 1.



Hình 1. Quy trình lắp ráp và hình ảnh TENG PTFE/Al đã lắp ráp thành công.

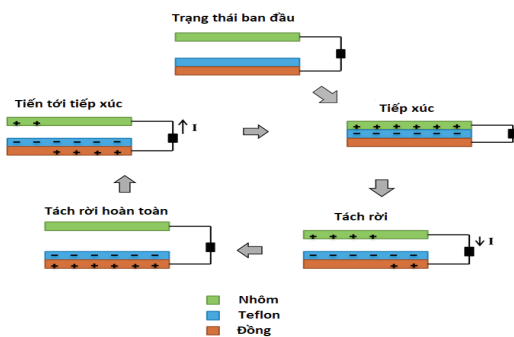
2.3. Khảo sát cấu trúc bề mặt vật liệu và hiệu năng của TENG

Cấu trúc bề mặt vật liệu được khảo sát bằng kính hiển vi điện tử quét (Scanning electron microscope - SEM) Jeol 6490 JED 2300. 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.

3. Kết quả và bàn luận

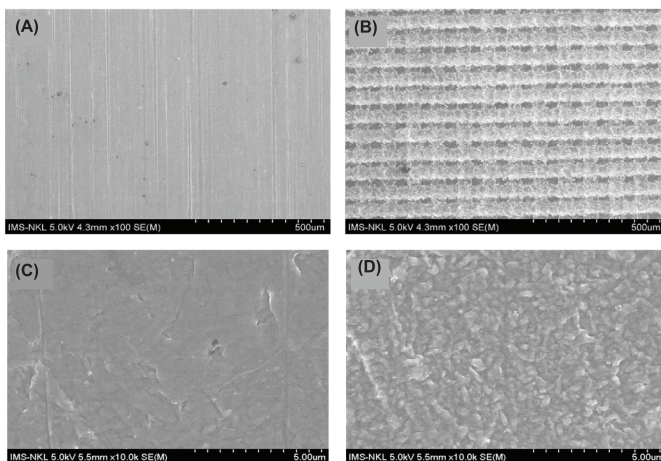
3.1. Nguyên lý hoạt động

Quá trình hoạt động của TENG PTFE/Al được biểu diễn ở hình 2. Khi ở trạng thái ban đầu trên các điện cực chưa xuất hiện điện tích, một ngoại lực tác động làm cho TENG bắt đầu hoạt động, khi 2 điện cực tiếp xúc hoàn toàn với nhau, điện tích xuất hiện trên bề mặt Al và PTFE do quá trình ma sát điện. Khi các điện cực bắt đầu tách rời, một hiệu điện thế xuất hiện do khoảng cách giữa 2 điện cực được thiết lập, khi đó các điện tích bắt đầu tách rời nhau và các electron có xu hướng dịch chuyển từ điện cực Cu về Al, lúc đó một dòng điện xuất hiện chạy từ điện cực Al xuống điện cực Cu. Khi TENG trở về trạng thái nguyên bản, hiệu điện thế tức thời đạt giá trị cực đại. Tiếp tục nhấn TENG, khoảng cách của các điện cực giảm dần, dẫn tới hiệu điện thế tức thời giảm, điện thế ở điện cực Cu lớn hơn điện thế ở Al, do đó các electron dẫn có xu hướng di chuyển từ điện cực Al về Cu, tạo ra một dòng điện ngược tức thời, giảm số lượng điện tích cảm ứng. Khi 2 tấm Al và PTFE tiếp xúc lại, các điện tích cảm ứng sẽ được trung hòa.



Hình 2. Nguyên lý hoạt động của TENG Cu:PTFE/Al.

3.2. Cấu trúc bề mặt vật liệu PTFE và Al

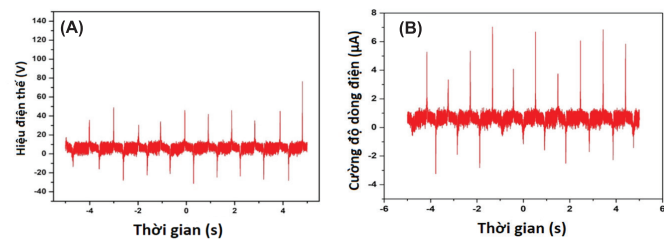


Hình 3. Ảnh SEM bề mặt. (A) Nhôm trước khi ăn mòn bằng laser; (B) Nhôm sau khi ăn mòn bằng laser; (C) PTFE trước khi ăn mòn Plasma; (D) PTFE sau khi ăn mòn Plasma.

Hình 3 (A và B) thể hiện cấu trúc bề mặt màng Al đã bị ăn mòn bằng laser. Như vậy, khi được xử lý bề mặt bằng phương pháp khắc laser cho thấy sự biến đổi rõ ràng ở bề mặt của các miếng nhôm. Các rãnh được ăn mòn có kích cỡ khoảng 30-50 µm. Các chi tiết tiểu hình hóa xuất hiện rõ ràng so với bề mặt nhôm không bị ăn mòn. Từ hình 3 (C và D) nhận thấy, bề mặt của miếng PTFE bị ăn mòn đã tạo thành các cấu trúc dạng hạt và khối có kích cỡ xấp xỉ 200 nm. Độ nhấp nhô của bề mặt thể hiện trong ảnh SEM.

3.3. Hiệu điện thế và cường độ dòng điện tức thời

Đồ thị hình 4A biểu hiện hiệu điện thế sinh ra bởi thiết bị ma sát nano Cu:PTFE/Al dưới lực tác động 5 N với tần số khảo sát là 1 Hz. 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 50 V. Ở điều kiện khảo sát này, cường độ dòng điện tức thời sinh ra xấp xỉ đạt 7 µA (hình 4B).

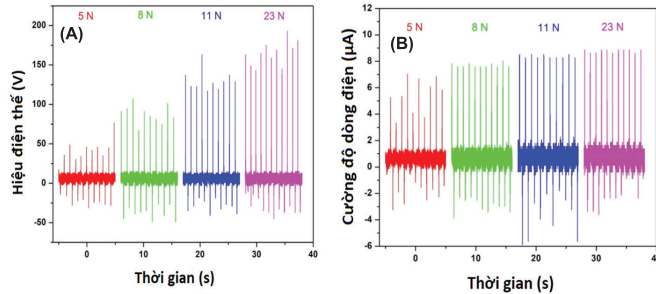


Hình 4. Hiệu điện thế (A) và cường độ dòng điện (B) sinh ra dưới lực tác dụng 5 N với tần số 1 Hz.

3.4. Hiệu điện thế, dòng điện sinh ra của TENG dưới tác động của ngoại lực khác nhau

Sự phụ thuộc của tín hiệu đầu ra theo ngoại lực tác động cũng được nghiên cứu. Hình 5 biểu thị hiệu điện thế tương ứng với lực tác động xấp xỉ lần lượt là 5, 8, 11 và 23 N. Qua đồ thị ta có thể thấy, với lực tác động 5 N, hiệu điện thế trung bình sinh ra xấp xỉ 50 V; với lực tác động 8 N, hiệu điện thế trung bình sinh ra xấp xỉ 70 V; với lực tác động 11 N, hiệu điện thế trung bình sinh ra xấp xỉ 110 V; với lực tác động 23 N, hiệu điện thế trung bình sinh ra xấp xỉ 145 V. Ta có thể đưa ra kết luận rằng, cùng tần số 1 Hz với lực tác động càng mạnh thì máy phát điện sẽ sinh ra hiệu điện thế càng lớn. Khảo sát dòng điện với lực tương ứng khác nhau (hình 5B) cho thấy dòng điện được sản sinh do TENG càng lớn khi ngoại lực tác dụng càng lớn: với lực tác dụng 5 N, dòng trung bình sinh ra xấp xỉ 4 µA; với lực tác dụng 8 N, dòng trung bình sinh ra xấp xỉ 7 µA; với lực tác dụng 11 N, dòng trung bình sinh ra xấp xỉ 7,5 µA và với lực 23 N, dòng trung bình sinh ra xấp xỉ 8,5 µA. Điều này có thể giải thích là vì khi ta tác động lực càng mạnh, diện tích tiếp xúc của bề

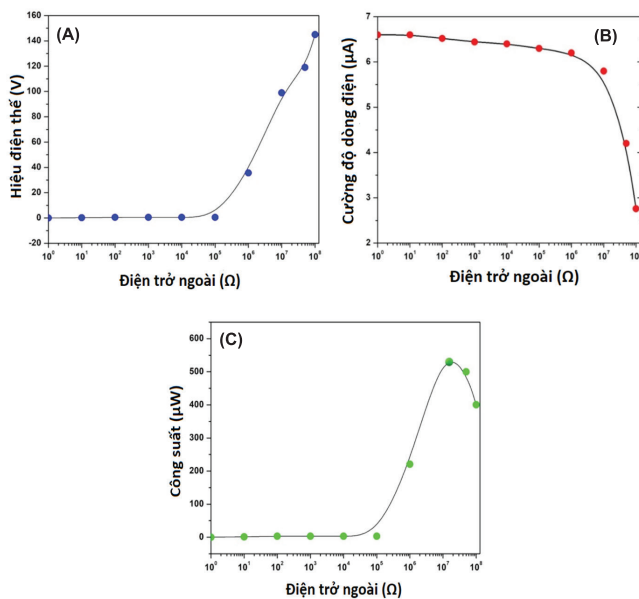
mặt địa phương PTFE và Al càng lớn, lúc đó các điện tích trái dấu sẽ sinh ra trên bề mặt màng càng nhiều, dẫn tới việc hình thành điện thế lớn khi hai bề mặt tách xa nhau.



Hình 5. Hiệu điện thế (A) và cường độ dòng điện (B) sinh ra bởi các lực tương ứng khác nhau.

3.5. Khảo sát sự phụ thuộc giữa tín hiệu đầu ra của TENG với điện trở

Nhằm thử nghiệm khả năng ứng dụng thực tế, tín hiệu đầu ra của hiệu điện thế được khảo sát cùng với các giá trị điện trở tăng dần ở mức ngoại lực tác dụng là 11 N. Nhìn vào kết quả thực nghiệm ở hình 6A ta thấy, với giá trị điện trở tăng dần (từ 100 đến $10^8 \Omega$), giá trị hiệu điện thế máy phát điện sản sinh ra cũng tăng dần (từ 0 đến xấp xỉ 150 V). Trong khi đó, kết quả hình 6B cho thấy, với giá trị điện trở tăng dần (từ 10 đến $10^8 \Omega$) thì dòng điện được sinh ra trong mạch sẽ giảm dần (từ 6,7 xuống xấp xỉ 2,5 μA). Khi TENG hoạt động, các điện tích sinh ra trong quá trình ma sát điện sẽ di chuyển trong mạch và bị giữ lại ở hai đầu điện trở nếu



Hình 6. Đồ thị thể hiện sự phụ thuộc của hiệu điện thế (A), cường độ dòng điện (B) và công suất (C) vào giá trị của điện trở.

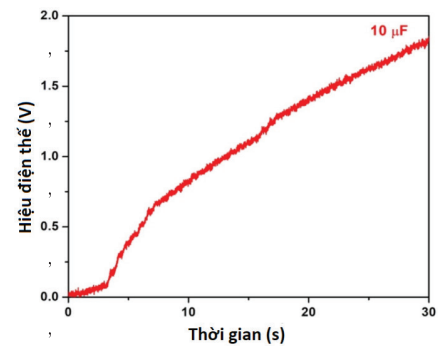
có điện trở ở trong mạch, dẫn tới giá trị của dòng điện sẽ bị suy hao dần nếu điện trở có trở kháng lớn và hiệu điện thế sẽ tăng lên. Giá trị của dòng điện và hiệu điện thế tỷ lệ với nhau.

Với các giá trị hiệu điện thế và dòng đo được trong quá trình thực nghiệm, ta vẽ được đồ thị ảnh hưởng của điện trở ngoài đến giá trị năng lượng của TENG. Năng lượng của TENG được tính dựa theo công thức $P=U.I$. Hình 6C thể hiện các giá trị năng lượng đo được trong quá trình làm thực nghiệm.

Nhìn vào đồ thị ở hình 6C ta có thể thấy, giá trị lớn nhất của công suất mà máy phát điện sản sinh ra với ngoại lực tác động 11 N là xấp xỉ 510 μW ở giá trị điện trở ngoài là $10^7 \Omega$.

3.6. Sử dụng TENG để nạp tụ điện

Trong quá trình thực nghiệm, nhóm nghiên cứu đã tiến hành sử dụng TENG Cu:PTFE/Al nạp tụ điện ($C=10 \mu F$) với lực tác động là 11 N ở tần số xấp xỉ 3 Hz. Hình 7 thể hiện kết quả của quá trình nạp tụ điện. Theo thời gian hoạt động tăng dần, TENG đã nạp được cho tụ điện ($C=10 \mu F$) một hiệu điện thế với giá trị tăng từ 0 đến xấp xỉ 1,8 V trong thời gian 30 giây.



Hình 7. Đồ thị thể hiện giá trị điện áp được nạp vào tụ điện theo thời gian.

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã tiến hành xử lý bề mặt điện cực Cu, Al, bề mặt điện môi PTFE. Sau khi xử lý bề mặt của các màng này, diện tích bề mặt tiếp xúc của các màng vật liệu đã được gia tăng đáng kể, dẫn tới hiệu suất làm việc của TENG Cu:PTFE/Al tốt hơn. Nghiên cứu đã tiến hành đo tín hiệu đầu ra của TENG với ngoại lực tác động khác nhau. Hiệu điện thế lớn nhất thu được trong quá trình thực nghiệm xấp xỉ 145 V và dòng điện lớn nhất thu được xấp xỉ 8,5 μA với lực tác động là 23 N. Công suất lớn nhất thu được khi kích thích hoạt động của TENG với ngoại lực 11 N là 510 μW . TENG Cu:PTFE/Al đã được sử dụng thành công để nạp tụ điện và làm nguồn cung cấp năng

lượng cho đèn LED. Việc chế tạo TENG Cu:PTFE/Al khá đơn giản, chi phí vật liệu không quá đắt so với các máy phát điện thông thường nhưng hiệu suất thu được lớn không kém so với máy phát điện thông thường. Trong tương lai, TENG sẽ là một hướng nghiên cứu được kỳ vọng cho sự phát triển của ngành khoa học năng lượng.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu được tài trợ một phần từ đề tài khoa học và công nghệ cấp Đại học Quốc gia Hà Nội (mã số QG.19.21). Các tác giả xin trân trọng cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] F.R. Fan, Z.Q. Tian, Z.L. Wang (2012), “Flexible triboelectric generator”, *Nano Energy*, **1**(2), pp.328-334, DOI: 10.1016/j.nanoen.2012.01.004.
- [2] X. Yang, S. Chan, L. Wang, et al. (2018), “Water tank triboelectric nanogenerator for efficient harvesting of water wave energy over a broad frequency range”, *Nano Energy*, **44**, pp.388-398, DOI: 10.1016/j.nanoen.2017.12.025.
- [3] H. Phan, P.N. Hoa, H.A. Tam, et al. (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), pp.84-91, DOI: 10.1016/j.jsamd.2020.11.003.
- [4] T.X. Xiao, T. Jiang, J.X. Zhu, et al. (2018), “Silicone-based triboelectric nanogenerator for water wave energy harvesting”, *Appl. Mater. Interfaces.*, **10**(4), pp.3616-3623, DOI: 10.1021/acsami.7b17239.
- [5] B. Chen, Y. Yang, Z.L. Wang (2018), “Scavenging wind energy by triboelectric nanogenerators”, *Adv. Ener. Mat.*, **8**(10), DOI: 10.1002/aenm.201702649.
- [6] M.L. Seol, J.H. Woo, S.B. Jeon, et al. (2015), “Vertically stacked thin trielectric nanogenerator for wind energy harvesting”, *Nano Energy*, **14**, pp.201-208, DOI: 10.1016/j.nanoen.2014.11.016.
- [7] H. Yong, J. Chung, D. Choi, et al. (2016), “Highly reliable wind-rolling triboelectric nanogenerator operating in wide wind speed range”, *Scientific Report*, **6**, DOI: 10.1038/srep33977.
- [8] H. Phan, D.M. Shin, S.H. Jeon, et al. (2017), “Aerodynamic and aero-elastic flutters driven triboelectric nanogenerators for harvesting broadband airflow energy”, *Nano Energy*, **33**, pp.476-484.
- [9] H. Phan, P.N. Hoa, H.A. Tam, et al. (2020), “Multi-directional triboelectric nanogenerator based on industrial Q-switched pulsed laser etched Aluminum film”, *Extreme Mechanics Letters*, **40**, DOI: 10.1016/j.eml.2020.100886.
- [10] X. Chen, T. Jiang, Y. Yao, et al. (2016), “Stimulating acrylic elastomers by a triboelectric nanogenerator - Toward self-powered electronic skin and artificial muscle”, *Adv. Func. Mater.*, **26**(27), DOI: 10.1002/adfm.201600624.
- [11] C. He, W. Zhu, B. Chen, et al. (2017), “Smart floor with integrated triboelectric nanogenerator as energy harvester and motion sensor”, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, **9**(31), pp.26126-26133.
- [12] H. Guo, X. Pu, J. Chen, et al. (2018), “A highly sensitive, self-powered triboelectric auditory sensor for social robotics and hearing aids”, *Science Robotics*, **3**(20), DOI: 10.1126/scirobotics.aat2516.
- [13] X. Meng, Q. Cheng, X. Jiang, et al. (2018), “Triboelectric nanogenerator as a highly sensitive self-powered sensor for driver behavior monitoring”, *Nano Energy*, **51**, pp.721-727.
- [14] Z. Lin, J. Chen, X. Li, et al. (2017), “Triboelectric nanogenerator enabled body sensor network for self-powered human heart-rate monitoring”, *ACS Nano*, **11**(9), DOI: 10.1021/acsnano.7b02975.
- [15] X. Fan, J. Chen, J. Yang, et al. (2015), “Ultrathin, rollable, paper-based triboelectric nanogenerator for acoustic energy harvesting and self-powered sound recording”, *ACS Nano*, **9**(4), pp.4236-4243, DOI: 10.1021/acsnano.5b00618.