

**ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ**



Phạm Duy Linh

**Thiết kế, chế tạo máy tráng phủ màng mỏng
ứng dụng trong linh kiện chuyển đổi điện năng**

KHÓA LUẬN TỐT NGHIỆP ĐẠI HỌC HỆ CHÍNH QUY

Ngành: Vật lý kỹ thuật

HÀ NỘI - 2025

**ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ**



Phạm Duy Linh

**Thiết kế, chế tạo máy tráng phủ màng mỏng
ứng dụng trong linh kiện chuyển đổi điện năng**

KHÓA LUẬN TỐT NGHIỆP ĐẠI HỌC HỆ CHÍNH QUY

Ngành: Vật lý kỹ thuật

Cán bộ hướng dẫn: TS. Nguyễn Tuấn Cảnh

CN. Nguyễn Minh Đoàn

HÀ NỘI - 2025

Lời cảm ơn

Trước hết, tôi xin gửi lời tri ân sâu sắc đến các thầy cô giáo của trường Đại học Công Nghệ nói chung và đặc biệt là các thầy cô trong khoa Vật lý kỹ thuật đã tận tình giảng dạy, truyền đạt những kiến thức quý báu trong suốt quá trình học tập tại trường. Tôi đặc biệt cảm ơn thầy Nguyễn Tuấn Cảnh – người đã tận tâm hướng dẫn, chỉ bảo, và hỗ trợ tôi trong suốt quá trình thực hiện đồ án tốt nghiệp. Những lời khuyên, sự chỉ dẫn tận tình và sự hỗ trợ của thầy đã giúp tôi hoàn thiện đồ án này. Mặc dù đã cố gắng hết sức, nhưng do hạn chế về mặt thời gian và kiến thức, đồ án tốt nghiệp của tôi chắc chắn vẫn còn những thiếu sót. Tôi rất mong nhận được ý kiến đóng góp từ các thầy cô và bạn bè để có thể hoàn thiện hơn trong tương lai.

Cuối cùng, tôi xin được gửi lời cảm ơn sâu sắc đến gia đình, những người thân đã nuôi tôi khôn lớn, trưởng thành hôm nay. Cảm ơn cha, mẹ, chị gái đã luôn động viên và là điểm tựa tinh thần giúp tôi vượt qua những khó khăn, thử thách.

Lời cam đoan

Tôi xin tuyên bố rằng công trình nghiên cứu trong luận văn này là kết quả của quá trình học tập, nghiên cứu và làm việc nghiêm túc của riêng tôi. Tôi khẳng định rằng tất cả nội dung được trình bày trong luận văn này chưa từng được nộp để lấy bằng cấp hoặc chứng chỉ tại cơ sở giáo dục đại học này hoặc bất kỳ cơ sở giáo dục đại học nào khác. Tôi hiểu rằng bất kỳ hành vi sao chép, sử dụng trái phép, hoặc không trung thực nào đối với tài liệu trong luận văn này mà không có sự ghi nhận thích đáng đều vi phạm các quy tắc về đạo đức học thuật, và tôi hoàn toàn chịu trách nhiệm trước các hành vi này.

Bằng lời cam đoan này, tôi mong muốn thể hiện cam kết về sự trung thực, minh bạch, cũng như tinh thần trách nhiệm cao nhất của tôi đối với công trình nghiên cứu này.

Hà Nội, ngày .. tháng .. năm 2025

Sinh viên

Phạm Duy Linh

Tóm tắt

Trong những năm gần đây, chúng ta có thể dễ dàng bắt gặp (IOT¹) trong cuộc sống hằng ngày, chẳng hạn như hệ thống cửa hàng tự động động cho đến máy bay tự lái. Việc sử dụng IOT cho các hệ thống đang được phát triển rộng rãi và em muốn sử dụng công nghệ IOT này áp dụng cho một mô hình tự động hóa về chủ đề "Thiết kế, chế tạo máy tráng phủ màng mỏng ứng dụng trong linh kiện chuyển đổi điện năng". Công nghệ này đóng vai trò quan trọng trong việc chế tạo các lớp vật liệu mỏng, đồng đều và chất lượng cao, đáp ứng các yêu cầu khắt khe trong sản xuất linh kiện chuyển đổi năng lượng, đặc biệt là nanogenerator – thiết bị có khả năng chuyển đổi năng lượng cơ học thành điện năng. Blade coating là một trong những phương pháp tráng phủ màng mỏng phổ biến nhờ tính đơn giản, độ chính xác và hiệu suất cao trong việc kiểm soát độ dày của lớp màng. Trong bối cảnh các linh kiện chuyển đổi năng lượng, đặc biệt là nanogenerator, ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực như cảm biến tự cấp nguồn, thiết bị đeo thông minh và hệ thống thu hoạch năng lượng (energy harvesting), việc nghiên cứu và chế tạo một hệ thống máy tráng phủ đáp ứng yêu cầu kỹ thuật hiện đại là vô cùng cần thiết. Đồ án này hướng đến việc tạo ra một thiết bị tráng phủ hiệu quả, đồng thời cung cấp nền tảng công nghệ để nghiên cứu sâu hơn về vật liệu và thiết bị năng lượng mới.

Hệ thống máy tráng phủ blade coating được thiết kế và chế tạo thành công, đáp ứng các tiêu chuẩn kỹ thuật về độ chính xác, tính linh hoạt và khả năng vận hành tự động. Lớp màng mỏng được tráng phủ có độ đồng đều cao, độ dày được kiểm soát ở mức nano/micromet, đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật của linh kiện nanogenerator. Linh kiện nanogenerator được chế tạo từ màng phủ cho thấy hiệu suất chuyển đổi năng lượng tốt, chứng minh tiềm năng ứng dụng trong các thiết bị thu hoạch năng lượng và cảm biến tự cấp nguồn.

khóa luận không chỉ mang lại giải pháp kỹ thuật hiệu quả cho việc chế tạo màng mỏng trong sản xuất linh kiện chuyển đổi năng lượng, mà còn mở ra tiềm năng nghiên cứu và ứng dụng công nghệ blade coating trong các lĩnh vực khác như cảm biến, y tế và điện tử thông minh. Với những kết quả đạt được, đồ án tạo tiền đề quan trọng cho việc phát triển các công nghệ năng lượng bền vững trong tương lai.

Từ khóa: *IOT, blade coating, nanogenerator, phương pháp tráng phủ màng mỏng, dữ liệu đánh giá*

¹Internet of Things

Abstract

In recent years, we can easily encounter the Internet of Things (IoT¹) in daily life, from automated retail systems to autonomous drones. The use of IoT in various systems is expanding rapidly, and I aim to apply this technology to an automation model with the theme: "Design and fabrication of a thin-film coating machine for energy conversion components." This technology plays a crucial role in producing thin, uniform, and high-quality material layers that meet the stringent requirements of energy conversion component manufacturing, particularly nanogenerators—devices capable of converting mechanical energy into electrical energy.

Blade coating is one of the most widely used thin-film coating techniques due to its simplicity, precision, and high efficiency in controlling film thickness. As energy conversion components, especially nanogenerators, are increasingly applied in fields such as self-powered sensors, wearable technology, and energy harvesting systems, the research and development of a coating machine that meets modern technical requirements is essential. This project aims to create an efficient coating device while providing a technological foundation for further research into new materials and energy devices.

The blade coating system has been successfully designed and fabricated, meeting technical standards for precision, flexibility, and automated operation. The coated thin film exhibits high uniformity, with thickness controlled at the nano/micrometer level, ensuring the technical requirements of nanogenerator components. Nanogenerators fabricated from the coated film demonstrate good energy conversion efficiency, proving their potential applications in energy harvesting devices and self-powered sensors.

This thesis not only provides an effective technical solution for thin-film fabrication in energy conversion component production but also opens up research and application opportunities for blade coating technology in other fields such as sensors, medical devices, and smart electronics. With the achieved results, this project lays a crucial foundation for the development of sustainable energy technologies in the future.

Keywords: *IoT, blade coating, nanogenerator, thin-film coating method, evaluation data*

¹Internet of Things

Mục lục

Lời cảm ơn

Lời cam đoan i

Tóm tắt ii

Abstract iii

Mục lục iv

Danh sách hình vẽ vi

Danh sách bảng vii

Danh mục các từ viết tắt viii

Mở đầu 1

Chương 1 Giới thiệu 3

1.1 Bối cảnh và lý do thực hiện đề tài 3

1.2 Mục tiêu của đề án 4

1.3 Phạm vi nghiên cứu 6

Kết luận Chương 1 7

Chương 2 Cơ sở lý thuyết và tổng quan công nghệ 9

2.1 Cơ sở lý thuyết về tráng phủ màng mỏng (blade coating) 9

2.1.1 Các phương pháp được sử dụng để chế tạo vật liệu nano 11

2.1.2 Các phương pháp phủ màng mỏng 14

2.2 Nanogenerator và Ứng dụng Thực tiễn 16

2.2.1 Định nghĩa và Nguyên lý Hoạt động của Nanogenerator 16

2.2.2 Blade Coating trong Chế tạo Nanogenerator 17

2.2.3 Các Vật Liệu Sử Dụng trong Nanogenerator 17

2.2.4 Ứng dụng Thực tiễn của Nanogenerator Chế tạo bằng Blade Coating	18
2.2.5 Kết Luận	18
2.3 Tổng quan về công nghệ IoT	19
2.3.1 Khái niệm IOT	19
2.3.2 Cơ sở kỹ thuật của IoT	22
2.4 Giao tiếp UART giữa ESP và Arduino	24
Kết luận Chương 2	25
Chương 3 Thiết kế, chế tạo máy tráng phủ màng mỏng ứng dụng trong linh kiện chuyển đổi điện năng	26
3.1 Thiết kế cấu trúc thiết bị	26
3.1.1 Yêu cầu kỹ thuật của hệ thống máy tráng phủ	26
3.1.2 Thiết kế cấu trúc hệ thống	27
3.2 Quy trình chế tạo và lắp ráp	29
3.3 Quy trình kiểm thử và đánh giá sản phẩm	30
3.3.1 Kiểm thử hiệu năng quá trình tráng phủ	30
3.3.2 So sánh với sản phẩm thương mại	30
3.3.3 Phân tích dữ liệu và đề xuất cải tiến	30
Kết luận Chương 3	31
Chương 4 Ứng dụng máy tráng phủ trong linh kiện chuyển đổi điện năng	32
4.1 Thử nghiệm và đánh giá hiệu quả	32
4.1.1 Thí nghiệm trên linh kiện nanogenerator	32
4.2 Đánh giá hiệu quả chuyển đổi năng lượng	34
4.3 Thảo luận	35
Kết luận Chương 4	35
Kết luận	36
Tài liệu tham khảo	38

Danh sách hình vẽ

1.1	Smart TENG và các ứng dụng đa dạng	4
1.2	bladecoating	5
1.3	Triboelectric Nanogenerators	6
2.1	Phương pháp tráng phủ doctor blade	9
2.2	Cấu trúc cơ bản của máy phát điện ma sát nano.	16
2.3	Phương pháp Doctor Blade Coating.	17
2.4	“Internet of Things”	19
2.5	Ứng dụng nhà thông minh với IOT	21
2.6	Ví dụ về mqtt	22
2.7	Ví dụ về http	23
2.8	Ví dụ về xmpp	23
2.9	Giao tiếp UART	24
3.1	Dao tráng phủ (Doctor blade)	27
3.2	Thiết kế hệ thống bàn làm việc bladecoating	28
3.3	Giao diện người dùng và lấy data	29

Danh sách bảng

2.1	So sánh các kỹ thuật solution processing trong phủ màng mỏng . . .	15
-----	--	----

Danh mục các từ viết tắt

STT	Từ viết tắt	Cụm từ đầy đủ	Cụm từ tiếng Việt
1	IOT	Internet of Things	Internet vạn vật
2	TENG	Triboelectric Nanogenerator	công nghệ chuyển đổi nguồn năng lượng cơ học từ tự nhiên thành năng lượng điện
3	API	Application Programming Interface	giao diện lập trình ứng dụng
4	UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter	Bộ truyền nhận dữ liệu không đồng bộ
5	DB	Database	cơ sở dữ liệu
6	BEM	Block – Element – Modifier	tiêu chuẩn quy ước đặt tên
7	FM	Feature Model	Mô hình hệ thống
8	CONFIG	Configuration	Cấu hình sản phẩm
9	SUT	System Under Test	Hệ thống đang kiểm thử
10	SBPL	Spectrum-Based Fault Localization	Kỹ thuật khoanh vùng lỗi
11	RT	Random Testing	Kỹ thuật sinh ca kiểm thử ngẫu nhiên
12	SBT	Search-Based Testing	Kỹ thuật sinh ca kiểm thử dựa trên thuật toán tìm kiếm
13	BMD	Benchmark Dataset	Bộ dữ liệu đánh giá

Mở đầu

Trong bối cảnh toàn cầu đang hướng tới phát triển các nguồn năng lượng sạch và bền vững, nhu cầu thu hoạch năng lượng từ các nguồn tự nhiên như chuyển động, rung động, gió, và các dạng năng lượng cơ học khác đã trở thành một lĩnh vực nghiên cứu đầy triển vọng. Các hệ thống nanogenerator, với khả năng chuyển đổi năng lượng cơ học từ môi trường thành điện năng, được xem là một giải pháp tiềm năng để cung cấp nguồn điện cho các thiết bị điện tử và các ứng dụng vi mạch [1, 2].

Tuy nhiên, hiệu suất chuyển đổi của nanogenerator phụ thuộc rất lớn vào chất lượng của lớp màng mỏng được tạo ra trên bề mặt của thiết bị. Một lớp màng mỏng đồng nhất, có cấu trúc bề mặt mịn màng và kiểm soát chính xác độ dày là yếu tố then chốt để tối ưu hóa hiệu suất thu năng lượng [3]. Trong quá trình chế tạo, việc áp dụng các kỹ thuật tráng phủ hiện đại trở nên cần thiết để đảm bảo các đặc tính bề mặt đạt yêu cầu kỹ thuật.

Doctor Blade Coating là một trong những phương pháp tráng phủ được nghiên cứu rộng rãi nhờ tính đơn giản, hiệu quả và khả năng kiểm soát độ dày của lớp màng một cách chính xác [4]. Tuy nhiên, hiện nay việc ứng dụng phương pháp này trong chế tạo nanogenerator còn hạn chế, chủ yếu do thiếu các thiết bị tráng phủ chuyên dụng có khả năng tự động hóa và duy trì sự đồng nhất trong quá trình sản xuất.

Do đó, nghiên cứu này đề xuất thiết kế và chế tạo một máy tráng phủ Doctor Blade Coating chuyên dụng, tích hợp các công nghệ điều khiển tự động và thu thập dữ liệu qua IoT, nhằm tạo ra các lớp màng mỏng có chất lượng cao cho nanogenerator. Qua đó, hiệu suất chuyển đổi năng lượng của nanogenerator được kỳ vọng sẽ được cải thiện đáng kể, góp phần thúc đẩy sự phát triển của các hệ thống tự cấp nguồn và ứng dụng trong IoT.

Các mục tiêu nghiên cứu cụ thể bao gồm:

1. Phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng lớp màng mỏng trong quá trình tráng phủ.
2. Thiết kế mô hình và cấu trúc của máy tráng phủ Doctor Blade Coating.

3. Chế tạo và thử nghiệm máy, đánh giá hiệu suất tạo lớp màng trên nanogenerator.
4. Tích hợp hệ thống IoT để giám sát và điều khiển quá trình tráng phủ theo thời gian thực.

Kết quả của nghiên cứu kỳ vọng sẽ mở ra hướng đi mới trong sản xuất các nanogenerator có hiệu suất cao, từ đó góp phần vào sự phát triển bền vững của nguồn năng lượng sạch trong kỷ nguyên công nghệ số.

Chương 1

Giới thiệu

Trong chương này sẽ giới thiệu về hệ thống sản phẩm doctor blade coater được tích hợp công nghệ IOT và những ứng dụng của nó trong sơn phủ màng mỏng áp dụng cho nền công nghiệp phần mềm hiện nay. Hơn nữa, cấu trúc của một hệ thống BladeCoating cũng được trình bày chi tiết kèm theo một quy trình xây dựng hoàn thiện. Cuối cùng là khảo sát màng mỏng được chế tạo bởi sản phẩm có hình thái học bề mặt và chất lượng của màng mỏng.

1.1 Bối cảnh và lý do thực hiện đề tài

Trong thời đại công nghiệp 4.0 nhu cầu về các thiết bị điện tử nhỏ gọn, tiết kiệm năng lượng, và thân thiện với môi trường đang ngày càng tăng cao. Các công nghệ chuyển đổi năng lượng, đặc biệt là công nghệ nanogenerator, đóng vai trò quan trọng trong việc thu hoạch năng lượng từ các nguồn như áp lực, rung động, hoặc nhiệt độ để cung cấp năng lượng cho các thiết bị điện tử. Điều này không chỉ góp phần giảm thiểu sự phụ thuộc vào nguồn năng lượng truyền thống mà còn mở ra hướng phát triển bền vững cho xã hội. Nanogenerator dựa trên các hiệu ứng như piezoelectric và triboelectric yêu cầu các màng mỏng có tính chất cơ học, điện tử và hóa học đặc biệt để đảm bảo hiệu suất chuyển đổi năng lượng tối ưu. Trong đó, quá trình tạo màng mỏng chất lượng cao đóng vai trò then chốt, ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng hoạt động và hiệu quả chuyển đổi năng lượng của linh kiện. Vì vậy, việc phát triển các công nghệ tráng phủ màng mỏng tiên tiến, chính xác, và tiết kiệm chi phí là một nhu cầu cấp thiết. [5]



Hình 1.1: Smart TENG và các ứng dụng đa dạng

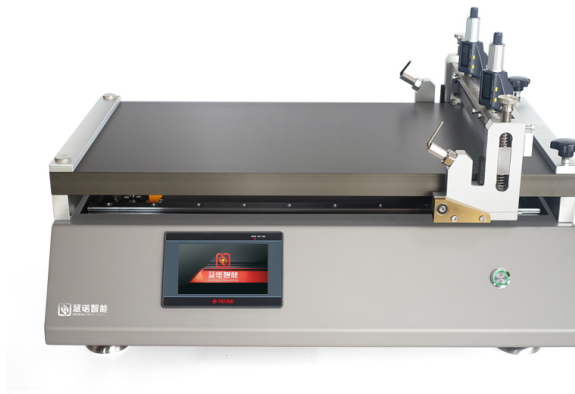
Máy blade coating được xem là một trong những phương pháp hiệu quả và dễ triển khai để tráng phủ màng mỏng với độ dày đồng đều và khả năng kiểm soát cao. Phương pháp này không chỉ đáp ứng được các yêu cầu khắt khe về kỹ thuật mà còn giúp giảm chi phí sản xuất so với các phương pháp khác như spin coating hay dip coating. Tuy nhiên, hiện nay, việc ứng dụng máy blade coating trong sản xuất nanogenerator tại Việt Nam vẫn còn nhiều hạn chế, do sự thiếu hụt các thiết bị được thiết kế tối ưu hóa và khả năng tích hợp công nghệ hiện đại.

Cùng với sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ Internet of Things (IoT), việc tích hợp IoT vào máy blade coating sẽ mang lại nhiều lợi ích vượt trội, như giám sát và điều khiển quá trình từ xa, lưu trữ dữ liệu, và phân tích hiệu suất hoạt động theo thời gian thực. Điều này không chỉ nâng cao hiệu quả sản xuất mà còn giảm thiểu rủi ro và sai sót trong quá trình vận hành. [3]

1.2 Mục tiêu của đề án

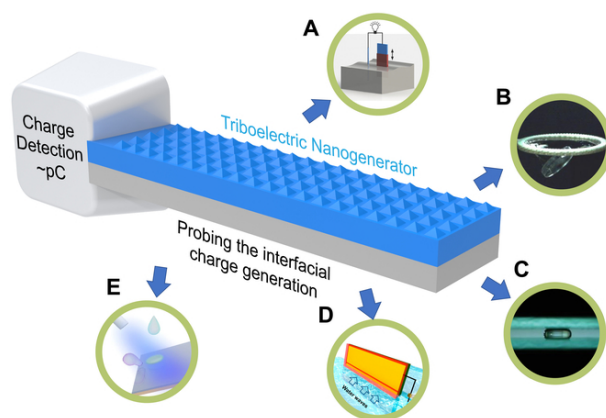
Mục tiêu của đề án này là thiết kế và chế tạo một hệ thống máy tráng phủ màng mỏng sử dụng phương pháp *Blade Coating*, với mục đích ứng dụng trong sản xuất các linh kiện chuyển đổi điện năng, như pin mặt trời và các thiết bị năng lượng tái

tạo khác. Tôi sẽ tập trung vào việc nghiên cứu và phát triển quy trình tráng phủ nhằm đảm bảo chất lượng và độ đồng đều của màng phủ, từ đó nâng cao hiệu quả chuyển đổi năng lượng của các linh kiện. Trong quá trình thiết kế, các yếu tố quan trọng như kích thước và hình dạng của lưỡi dao tráng phủ, tốc độ tráng phủ, độ dày của màng mỏng, và các điều kiện môi trường sẽ được tính toán và tối ưu hóa sao cho phù hợp với các yêu cầu kỹ thuật cụ thể của từng loại linh kiện.



Hình 1.2: bladecoating

Bên cạnh đó, việc chế tạo máy tráng phủ với các bộ phận cơ khí chính xác đảm bảo khả năng hoạt động ổn định và hiệu quả trong suốt quá trình sản xuất. Các vật liệu và công nghệ chế tạo sẽ được lựa chọn kỹ lưỡng, với mục tiêu tạo ra một hệ thống máy có độ bền cao, tiết kiệm năng lượng và chi phí vận hành thấp. Máy tráng phủ sẽ được kiểm tra và đánh giá kỹ lưỡng về hiệu suất hoạt động, bao gồm độ chính xác trong việc điều khiển độ dày màng phủ và khả năng duy trì chất lượng màng trong các điều kiện sản xuất khác nhau.



Hình 1.3: Triboelectric Nanogenerators

Một trong những mục tiêu quan trọng của đề án là nghiên cứu khả năng ứng dụng của màng mỏng tráng phủ trong các linh kiện chuyển đổi năng lượng. Các linh kiện này phải đáp ứng các tiêu chí kỹ thuật như độ dẫn điện cao, độ bám dính tốt, và khả năng chống oxy hóa, nhằm đảm bảo hiệu quả sử dụng lâu dài trong các hệ thống năng lượng tái tạo. Đề án sẽ nghiên cứu kỹ các yếu tố ảnh hưởng đến các tính chất vật lý và hóa học của màng mỏng, đồng thời tìm cách tối ưu hóa quy trình tráng phủ để đạt được những kết quả tốt nhất.

Cuối cùng, dự án sẽ đóng góp vào sự phát triển của công nghệ sản xuất linh kiện năng lượng tại Việt Nam, tạo ra những sản phẩm với chi phí hợp lý và khả năng ứng dụng rộng rãi trong các ngành công nghiệp chuyển đổi điện năng. Những kết quả đạt được từ đề án này sẽ là cơ sở cho việc nghiên cứu, phát triển các công nghệ sản xuất năng lượng tái tạo bền vững và hiệu quả hơn trong tương lai.

1.3 Phạm vi nghiên cứu

"Thiết kế, chế tạo máy tráng phủ màng mỏng (Blade Coating) ứng dụng trong linh kiện chuyển đổi điện năng" chủ yếu tập trung vào các khía cạnh liên quan đến quy trình tráng phủ chế tạo màng mỏng có độ dày đồng đều và tự động hóa quy trình của người sử dụng, thiết kế và chế tạo máy móc, cũng như các ứng dụng của màng mỏng trong các linh kiện chuyển đổi điện năng. Nghiên cứu này không chỉ giới hạn trong việc xây dựng máy móc và quy trình mà còn mở rộng tới việc tối ưu hóa các yếu tố tác động đến hiệu suất của hệ thống, đặc biệt là chất lượng màng phủ và khả năng chuyển đổi điện năng của các linh kiện sử dụng màng mỏng.

Cụ thể, phạm vi nghiên cứu sẽ bao gồm các bước từ việc nghiên cứu lý thuyết về phương pháp Blade Coating, thiết kế các bộ phận cơ khí của máy tráng phủ, cho đến việc thử nghiệm và đánh giá hiệu suất hoạt động của máy móc chế tạo. Ngoài ra, các yếu tố như vật liệu, thông số kỹ thuật của quy trình tráng phủ (tốc độ tráng phủ, độ dày màng phủ, độ đồng đều của màng phủ) sẽ được phân tích chi tiết, nhằm đảm bảo đạt được chất lượng cao và khả năng ứng dụng thực tế trong ngành năng lượng.

Ngoài các khía cạnh kỹ thuật về máy móc và quy trình, phạm vi nghiên cứu còn mở rộng đến việc ứng dụng của màng mỏng trong các linh kiện chuyển đổi điện năng, đặc biệt là trong các công nghệ năng lượng tái tạo như pin mặt trời, pin lithium-ion, và các thiết bị điện tử khác. Các linh kiện này sẽ được nghiên cứu và thử nghiệm trong môi trường thực tế để đánh giá các đặc tính quan trọng như độ dẫn điện, độ bám dính, khả năng chống oxy hóa, và hiệu quả chuyển đổi năng lượng. Các thử nghiệm này sẽ giúp xác định được độ bền và tuổi thọ của linh kiện khi sử dụng màng mỏng tráng phủ, cũng như các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu suất chuyển đổi điện năng của chúng.

Phạm vi nghiên cứu cũng bao gồm việc khảo sát và đánh giá các quy chuẩn, tiêu chuẩn kỹ thuật hiện hành về sản xuất linh kiện điện tử và các yêu cầu đối với màng mỏng trong các ứng dụng này. Điều này sẽ giúp đảm bảo rằng các sản phẩm chế tạo từ máy tráng phủ màng mỏng không chỉ đạt yêu cầu về kỹ thuật mà còn phù hợp với các quy định và tiêu chuẩn trong ngành công nghiệp điện tử, năng lượng. Cuối cùng, nghiên cứu sẽ kết luận về khả năng ứng dụng và tiềm năng của công nghệ Blade Coating trong sản xuất linh kiện chuyển đổi điện năng tại Việt Nam, từ đó đề xuất các giải pháp cải tiến và phát triển công nghệ này trong tương lai.

Kết luận Chương 1

Trong chương này, khái niệm về sản phẩm máy tráng phủ doctor blade coater được giới thiệu đầy đủ và hướng tới chế tạo màng mỏng sử dụng bladecoating để cho ra hình thái học bề mặt có độ phủ đồng đều và không có khuyết tật trên bề mặt màng.

Chương tiếp theo sẽ trình bày những kiến thức nền tảng về máy tráng phủ màng mỏng và các phương pháp tráng phủ màng mỏng ứng dụng trong chế tạo màng

mỏng

Chương 2

Cơ sở lý thuyết và tổng quan công nghệ

Phương pháp blade coating là một trong những kỹ thuật phổ biến để tráng phủ màng mỏng, đặc biệt trong các ứng dụng nghiên cứu và phát triển các vật liệu mới như màng perovskite trong các tế bào quang điện (solar cells). Phương pháp này sử dụng một lưỡi dao để phân phối dung dịch tiền chất đều trên bề mặt để, tạo thành một lớp màng mỏng. Đặc điểm nổi bật của phương pháp này là khả năng tạo ra các lớp màng có độ dày đồng đều, dễ kiểm soát và có thể mở rộng cho các ứng dụng công nghiệp.

2.1 Cơ sở lý thuyết về tráng phủ màng mỏng (blade coating)

Blade coating là một kỹ thuật tráng phủ màng mỏng phổ biến và quan trọng, đặc biệt trong các nghiên cứu và sản xuất các vật liệu tiên tiến như màng perovskite cho tế bào quang điện (solar cells). Kỹ thuật này đã được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực, từ nghiên cứu cơ bản cho đến sản xuất công nghiệp, nhờ vào khả năng tạo ra những lớp màng mỏng đồng đều, kiểm soát được độ dày của màng và có thể áp dụng quy mô lớn. Blade coating giúp tạo ra các lớp phủ mỏng trên bề mặt để bằng cách sử dụng một lưỡi dao (blade) di chuyển qua dung dịch tiền chất được đặt trên bề mặt, từ đó phân phối dung dịch đều trên toàn bộ bề mặt và tạo ra một lớp màng mỏng.

Hình 2.1: Phương pháp tráng phủ doctor blade

Quá trình tráng phủ trong blade coating có thể được điều chỉnh thông qua nhiều yếu tố khác nhau, chẳng hạn như tốc độ di chuyển của lưỡi dao, nhiệt độ của dung dịch, tốc độ bay hơi của dung môi, và độ nhớt của dung dịch tiền chất. Việc kiểm soát các yếu tố này có thể tạo ra những lớp màng có chất lượng rất cao, với độ đồng đều và tính chất phù hợp cho các ứng dụng đặc biệt. Bên cạnh đó, phương pháp này còn có ưu điểm là dễ dàng tích hợp với các kỹ thuật khác, chẳng hạn như

xử lý nhiệt nhanh (rapid thermal processing), phương pháp lăn cuộn (roll-to-roll), hay phương pháp xử lý hơi dung môi (solvent annealing), giúp tối ưu hóa quá trình sản xuất màng mỏng trong quy mô công nghiệp.

Phương pháp blade coating đặc biệt được quan tâm trong việc chế tạo các màng perovskite, một loại vật liệu có tiềm năng lớn trong lĩnh vực năng lượng mặt trời, nhờ vào khả năng hấp thụ ánh sáng mạnh và dễ chế tạo. Màng perovskite, khi được tráng phủ đồng đều và có cấu trúc tinh thể tốt, có thể cải thiện hiệu suất của tế bào quang điện, từ đó tạo ra những sản phẩm có hiệu suất chuyển đổi năng lượng cao. Chính vì vậy, nghiên cứu và phát triển các phương pháp tráng phủ màng mỏng như blade coating là một trong những hướng đi quan trọng trong ngành công nghiệp năng lượng tái tạo, đặc biệt là trong việc sản xuất tế bào quang điện perovskite.

Một trong những yếu tố quan trọng trong quá trình blade coating là việc lựa chọn dung môi và kiểm soát quá trình bay hơi của dung môi trong khi tráng phủ. Dung môi không chỉ có vai trò hòa tan các tiền chất mà còn ảnh hưởng đến độ nhớt và khả năng trải đều của dung dịch trên bề mặt. Sự bay hơi của dung môi trong suốt quá trình tráng phủ cũng ảnh hưởng lớn đến sự hình thành và phát triển tinh thể của màng, từ đó ảnh hưởng đến chất lượng và hiệu suất của màng perovskite. Do đó, việc điều chỉnh các điều kiện như nhiệt độ và tốc độ bay hơi của dung môi đóng vai trò cực kỳ quan trọng trong việc tối ưu hóa quá trình sản xuất màng mỏng chất lượng cao.

Ngoài ra, blade coating còn được sử dụng để cải thiện khả năng tạo màng mỏng trong các ứng dụng khác như màn hình hiển thị, pin mặt trời và các vật liệu điện tử. Do tính linh hoạt của phương pháp này, nó có thể được áp dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau, từ nghiên cứu phát triển cho đến sản xuất thương mại. Với những ưu điểm như tính đồng đều, khả năng kiểm soát độ dày và dễ dàng mở rộng quy mô, blade coating đang ngày càng chứng tỏ được vai trò quan trọng của mình trong ngành công nghiệp sản xuất màng mỏng, đặc biệt là trong ngành năng lượng tái tạo.

Trong bối cảnh hiện nay, khi nhu cầu sử dụng năng lượng tái tạo ngày càng tăng cao, việc phát triển các công nghệ chế tạo tế bào quang điện hiệu quả và tiết kiệm chi phí là vô cùng cần thiết. Phương pháp blade coating không chỉ giúp tạo ra các màng quang điện perovskite có hiệu suất cao mà còn mở ra triển vọng sản xuất

các tế bào quang điện quy mô lớn với chi phí hợp lý, góp phần quan trọng vào việc phát triển nguồn năng lượng sạch cho tương lai.

2.1.1 Các phương pháp được sử dụng để chế tạo vật liệu nano

Phương pháp chế tạo "từ trên xuống"

Phương pháp nghiền cơ học hoặc phân tán chất lỏng Nghiền cơ học và phân tán chất lỏng là hai phương pháp điển hình của công nghệ nano "từ trên xuống" (top-down). Ban đầu, các phương pháp này chủ yếu được sử dụng để thu nhận bột kim loại với kích thước hạt cỡ micron. Tuy nhiên, khi chuyển sang cỡ hạt nano, hiệu quả của chúng suy giảm đáng kể do chi phí năng lượng để vượt qua sức căng bề mặt trong quá trình hình thành bề mặt hạt nano trở nên rất lớn.

Ngoài ra, phương pháp nghiền cơ học khó có thể thu nhận các hạt nano có phổ phân bố kích thước hẹp. Do đó, ngày nay phương pháp này khó có thể cạnh tranh với các phương pháp hóa-lý "từ dưới lên" (bottom-up), nơi hạt nano được tạo ra từ các nguyên tử hoặc phân tử riêng lẻ.

Phương pháp lắng đọng chân không vật lý (Physical Vapor Deposition - PVD) Công nghệ PVD gồm ba giai đoạn chính: hóa hơi vật liệu, vận chuyển chất hơi đến bề mặt đế và ngưng tụ. Vật liệu được hóa hơi ở nhiệt độ từ 500 - 1200°C, sau đó ngưng tụ trên bề mặt đế lạnh tạo thành bột nano.

Để giảm động năng của các nguyên tử hóa hơi và tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình ngưng tụ, phương pháp này được thực hiện trong môi trường khí trơ như He hoặc Ar, dưới áp suất không cao (khoảng 10^3 Pa).

Phương pháp lắng đọng chân không hóa học (Chemical Vapor Deposition - CVD) Trong phương pháp CVD, tiền chất được hóa hơi, sau đó các nguyên tử hóa hơi khuếch tán đến bề mặt đế đã được đốt nóng để phản ứng với các nguyên tử hóa hơi của chất khác, tạo ra sản phẩm rắn dưới dạng hạt nano. Các thành phần bay hơi không tham gia được loại bỏ ra ngoài.

Phương pháp laze bóc lớp (Laser Ablation) Phương pháp này sử dụng xung laser để bốc hơi vật liệu, sau đó vật liệu được ngưng tụ tạo thành hạt nano. Khác

với PVD, quá trình laze bóc lớp được thực hiện với bia rắn ngâm trong dung dịch. Các hạt nano thu được dưới dạng dung dịch keo, cho phép tiếp tục chiếu laser nhiều lần để giảm kích thước hạt.

Phương pháp chế tạo "từ dưới lên"

Phương pháp "từ dưới lên" bao gồm việc hình thành vật liệu nano từ các nguyên tử hoặc ion riêng lẻ. Đây là phương pháp phát triển rất mạnh mẽ do tính linh hoạt và chất lượng sản phẩm cao. Phần lớn vật liệu nano ứng dụng trong nông nghiệp hiện nay được chế tạo bằng phương pháp này.

Phương pháp "từ dưới lên" có thể là phương pháp vật lý, phương pháp hóa học hoặc kết hợp cả hai.

Phương pháp vật lý "từ dưới lên" Phương pháp vật lý tạo vật liệu nano từ nguyên tử bằng các kỹ thuật chuyển pha. Nguyên tử được hình thành thông qua các quá trình như bốc bay nhiệt (đốt, phún xạ, phóng điện hồ quang).

Quá trình chuyển pha: vật liệu được nung nóng rồi làm nguội nhanh để thu được trạng thái vô định hình; sau đó tiếp tục xử lý nhiệt để chuyển pha từ vô định hình sang tinh thể (phương pháp nguội nhanh).

Phương pháp hóa học "từ dưới lên" Phương pháp hóa học tạo vật liệu nano từ các ion. Phương pháp này rất đa dạng, tùy thuộc vào vật liệu cụ thể mà lựa chọn kỹ thuật phù hợp.

Có hai nhóm chính:

- Phương pháp tạo từ pha lỏng: khử hóa học, kết tủa, sol-gel, ...
- Phương pháp tạo từ pha khí: nhiệt phân, khử hóa học, ...

Phương pháp hóa học cho phép tạo ra các hạt nano, dây nano, ống nano, màng nano, bột nano với kích thước và hình dạng có thể kiểm soát.

Phương pháp kết hợp "từ dưới lên" Phương pháp kết hợp sử dụng cả nguyên lý vật lý và hóa học, ví dụ như: điện phân, ngưng tụ từ pha khí, kết tủa có hỗ trợ năng lượng sóng vi ba hoặc siêu âm. Phương pháp này có thể tạo ra các hạt nano,

dây nano, ống nano, màng nano, bột nano.

Đối với các nước đang phát triển, do hạn chế về trang thiết bị vật lý đắt tiền, các nhà khoa học thường ưu tiên các phương pháp hóa học "từ dưới lên" để chế tạo vật liệu nano phục vụ trong nông nghiệp.

Chế tạo vật liệu nano bằng phương pháp hóa học "từ dưới lên"

Phương pháp sol-gel Phương pháp sol-gel dựa trên các phản ứng đa trùng ngưng từ các chất vô cơ, bao gồm bốn giai đoạn chính: thủy phân, đa trùng ngưng, sấy và phân hủy nhiệt.

Ban đầu, tiền chất kim loại hoặc alkoxide được thủy phân với nước hoặc cồn. Tiếp theo, quá trình đa trùng ngưng xảy ra, giải phóng nước và cồn, tạo ra polymer vô cơ lắng xuống dưới dạng kết tủa. Độ phân tán của kết tủa có thể kiểm soát thông qua thành phần dung dịch, pH và nhiệt độ. Cuối cùng, sản phẩm được sấy khô và phân hủy nhiệt để loại bỏ các thành phần hữu cơ còn sót lại. Phương pháp này chủ yếu dùng để chế tạo các nano oxit kim loại.

Phương pháp kết tủa hóa học Phương pháp kết tủa hóa học được thực hiện trong dung dịch nước, cho phép tạo ra các hạt nano đa lớp bằng cách kiểm soát nồng độ ion và độ axit của môi trường phản ứng.

Phương pháp này cho phép thay đổi độ dày của lớp nano nhất định (ví dụ: lớp HgS bên trong lớp CdS) bằng cách hòa tan và tái kết tủa ion Cd^{2+} , từ đó thu nhận các hạt nano có kích thước hẹp, phù hợp để chế tạo các cảm biến ứng dụng trong nông nghiệp.

Phương pháp ngưng tụ plasma hóa học Phương pháp này sử dụng dòng khí nóng để khử kim loại từ hợp chất. Trong buồng plasmatron, plasma được tạo ra bởi dòng điện hồ quang cường độ lớn, với nhiệt độ từ 4000 - 10000°C. Một dòng khí khử (như hydro hoặc khí đốt tự nhiên) được đưa vào buồng để thực hiện phản ứng khử.

Sau khi khử, tiền chất chuyển thành hạt nano kim loại dạng ngưng tụ. Phương pháp này đặc biệt hiệu quả để thu nhận các hạt nano kim loại có nhiệt độ nóng chảy cao như Ni, Mo, W [6].

2.1.2 Các phương pháp phủ màng mỏng

Spin Coating

Spin coating là kỹ thuật phổ biến trong phòng thí nghiệm, trong đó dung dịch được đặt lên bề mặt chất nền và sau đó quay với tốc độ cao để tạo ra hiệu ứng ly tâm loại bỏ dung môi dư thừa. Phương pháp này cho phép tạo ra các lớp màng mỏng đồng nhất với độ dày có thể kiểm soát bằng tốc độ quay và thời gian quay. Tuy nhiên, spin coating gặp khó khăn khi cần mở rộng quy mô sản xuất do lãng phí dung dịch và giới hạn trên kích thước của chất nền [7].

Doctor Blade Coating

Doctor blade coating (hay meniscus coating) sử dụng một thanh dao kéo dung dịch trên bề mặt chất nền để tạo ra màng mỏng. Ưu điểm của phương pháp này là khả năng kiểm soát độ dày của màng rất tốt, phù hợp cho các quy trình sản xuất công nghiệp như roll-to-roll. Tuy nhiên, quá trình này đòi hỏi dung dịch có độ nhớt ổn định và sự kiểm soát chính xác các thông số vận hành [4, 7].

Slot-Die Coating

Slot-die coating là kỹ thuật tiên tiến cho sản xuất quy mô lớn, sử dụng một khe hở để đẩy dung dịch trực tiếp lên chất nền di chuyển. Phương pháp này cho phép tạo ra các màng mỏng liên tục với độ đồng nhất cao và khả năng kiểm soát tốt độ dày của lớp màng. Slot-die coating được xem là một giải pháp lý tưởng cho sản xuất điện tử hữu cơ, pin mặt trời và các ứng dụng yêu cầu sản xuất liên tục[7].

Inkjet Printing

Inkjet printing là kỹ thuật in mực số, cho phép in trực tiếp dung dịch lên chất nền theo thiết kế định sẵn. Phương pháp này giúp giảm thiểu chất thải và cung cấp độ phân giải cao. Tuy nhiên, việc kiểm soát độ dày của màng in qua inkjet printing vẫn là một thách thức, và chi phí thiết bị thường cao hơn so với các phương pháp khác[7].

Spray Coating

Spray coating sử dụng áp suất khí nén để phun dung dịch lên chất nền, cho phép phủ các bề mặt không phẳng và đạt được lớp màng đồng nhất. Ưu điểm của phương pháp này là chi phí thấp và khả năng phủ rộng, nhưng kiểm soát độ dày của lớp màng có thể không cao như các kỹ thuật khác[7].

So sánh và đánh giá

Bảng 2.1 tổng hợp các tiêu chí chính khi so sánh các phương pháp phủ màng mỏng:

Bảng 2.1: So sánh các kỹ thuật solution processing trong phủ màng mỏng

Phương pháp	Đồng nhất màng	Kiểm soát độ dày	Khả năng mở rộng	Chi phí
Spin Coating	Cao	Tốt	Hạn chế	Thấp
Doctor Blade Coating	Cao	Rất tốt	Tốt	Trung bình
Slot-Die Coating	Cao	Rất tốt	Rất tốt	Trung bình - Cao
Inkjet Printing	Trung bình	Hạn chế	Trung bình	Cao
Spray Coating	Trung bình	Tùy biến	Tốt	Thấp - Trung bình

Từ bảng 2.1, có thể nhận định rằng trong các kỹ thuật solution processing, phương pháp **Doctor Blade Coating** mang lại nhiều ưu điểm vượt trội, đặc biệt là về khả năng kiểm soát độ dày của lớp màng mỏng và đồng nhất của màng [4]. Cụ thể:

- **Đồng nhất và kiểm soát độ dày:** Doctor Blade Coating cho phép tạo ra các lớp màng mỏng có độ đồng nhất cao với khả năng kiểm soát độ dày tốt hơn so với các phương pháp như spin coating hoặc inkjet printing. Điều này rất quan trọng đối với các ứng dụng yêu cầu hiệu suất cao như nanogenerator, nơi lớp màng đồng nhất góp phần tối ưu hóa quá trình thu hoạch năng lượng.
- **Khả năng mở rộng sản xuất:** So với spin coating, Doctor Blade Coating

được áp dụng hiệu quả trong các quy trình sản xuất công nghiệp, đặc biệt là trong các hệ thống roll-to-roll. Phương pháp này giúp giảm thiểu lãng phí dung dịch và dễ dàng kiểm soát quy trình sản xuất với chi phí đầu tư hợp lý.

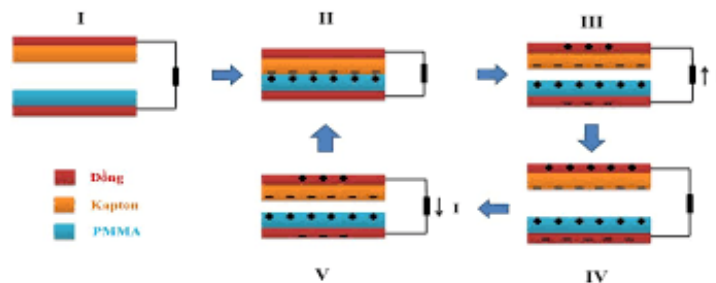
- **Tính ổn định và hiệu quả kinh tế:** Với khả năng kiểm soát chính xác các thông số vận hành (như tốc độ di chuyển của dao tráng, độ nhớt của dung dịch), phương pháp này không chỉ đảm bảo chất lượng lớp màng mà còn tối ưu hoá chi phí sản xuất, điều này rất phù hợp với yêu cầu của dự án nghiên cứu trong khóa luận.

Những yếu tố trên đã tạo nền tảng cho việc lựa chọn phương pháp Doctor Blade Coating trong nghiên cứu này, nhằm phát triển một quy trình phủ màng mỏng ổn định, hiệu quả và dễ mở rộng, từ đó nâng cao hiệu suất của các nanogenerator và đáp ứng các yêu cầu khắt khe của các ứng dụng IoT hiện đại.

2.2 Nanogenerator và Ứng dụng Thực tiễn

2.2.1 Định nghĩa và Nguyên lý Hoạt động của Nanogenerator

Nanogenerator (NG) là một thiết bị thu năng lượng từ môi trường, chuyển đổi năng lượng cơ học như rung động, chuyển động hay gió thành năng lượng điện thông qua hiệu ứng piezoelectric hoặc triboelectric [8]. Nguyên lý hoạt động của nanogenerator dựa trên khả năng tạo ra điện áp khi vật liệu bị biến dạng cơ học, từ đó khai thác được năng lượng từ các chuyển động cơ học nhỏ nhất trong tự nhiên [9].



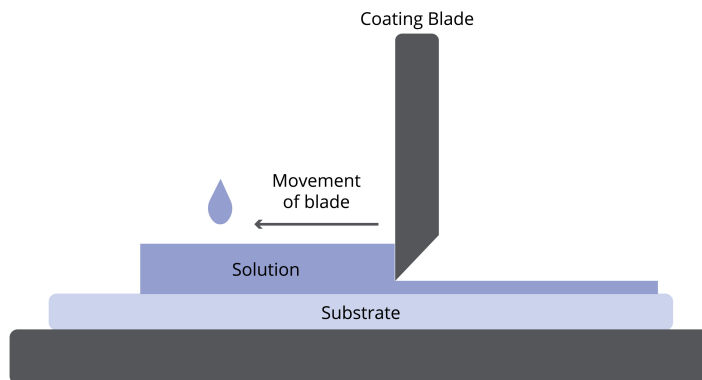
Hình 2.2: Cấu trúc cơ bản của máy phát điện ma sát nano.

2.2.2 Blade Coating trong Chế tạo Nanogenerator

Blade coating (hay còn gọi là Doctor Blade Coating) là kỹ thuật tráng phủ màng mỏng bằng cách sử dụng một lưỡi dao để kéo dung dịch tiền chất trên bề mặt chất nền. Phương pháp này cho phép tạo ra các lớp màng mỏng có độ đồng nhất cao và kiểm soát chính xác độ dày của màng, điều này đóng vai trò quan trọng trong việc tối ưu hóa hiệu suất chuyển đổi năng lượng của nanogenerator [4].

Việc áp dụng blade coating giúp:

- **Kiểm soát độ dày và đồng nhất:** Lớp màng được tạo ra có cấu trúc mịn và đồng đều, làm tăng khả năng chuyển đổi năng lượng khi vật liệu bị biến dạng.
- **Khả năng mở rộng sản xuất:** Phương pháp này thích hợp cho quy trình sản xuất liên tục, đặc biệt là trong các hệ thống roll-to-roll, giúp giảm thiểu lãng phí dung dịch và tối ưu chi phí sản xuất.



Hình 2.3: Phương pháp Doctor Blade Coating.

2.2.3 Các Vật Liệu Sử Dụng trong Nanogenerator

Trong quá trình chế tạo nanogenerator, một số vật liệu piezoelectric và triboelectric được sử dụng phổ biến bao gồm:

- **PVDF (Polyvinylidene Fluoride):** Một polymer áp điện có khả năng chuyển đổi năng lượng tốt và tính linh hoạt cao.
- **$BaTiO_3$ (Barium Titanate):** Vật liệu gốm với hiệu suất piezoelectric cao.

- **ZnO (Zinc Oxide):** Được sử dụng dưới dạng nanowire, giúp tăng diện tích tiếp xúc và hiệu quả chuyển đổi.

Blade coating cho phép điều chỉnh các tham số như nồng độ dung dịch, tốc độ di chuyển của dao và điều kiện bay hơi của dung môi, từ đó tối ưu hóa cấu trúc màng vật liệu, góp phần nâng cao hiệu suất của nanogenerator.

2.2.4 Ứng dụng Thực tiễn của Nanogenerator Chế tạo bằng Blade Coating

Các nanogenerator được chế tạo bằng phương pháp blade coating có thể được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực như:

- **Thu Năng Lượng Từ Chuyển Động:** Thiết bị có thể thu năng lượng từ các nguồn cơ học như rung động của máy móc, chuyển động của con người, gió hoặc sóng biển, phục vụ cho các hệ thống cảm biến không dây và IoT [?].
- **Cảm Biến Thông Minh:** Tích hợp nanogenerator vào các cảm biến áp suất, gia tốc và thiết bị đeo giúp các cảm biến tự cấp nguồn, giảm sự phụ thuộc vào nguồn điện truyền thống.
- **Ứng dụng Y Tế:** Các thiết bị theo dõi sức khỏe đeo trên cơ thể có thể sử dụng nanogenerator để thu năng lượng từ chuyển động tự nhiên của cơ thể, từ đó kéo dài thời gian hoạt động mà không cần sạc pin.
- **Hệ Thống Năng Lượng Tái Tạo:** Nanogenerator có thể tích hợp vào các hệ thống thu năng lượng nhỏ gọn như đèn LED ngoài trời hoặc các thiết bị giám sát môi trường, giúp tối ưu hóa việc sử dụng năng lượng từ các nguồn tái tạo.

2.2.5 Kết Luận

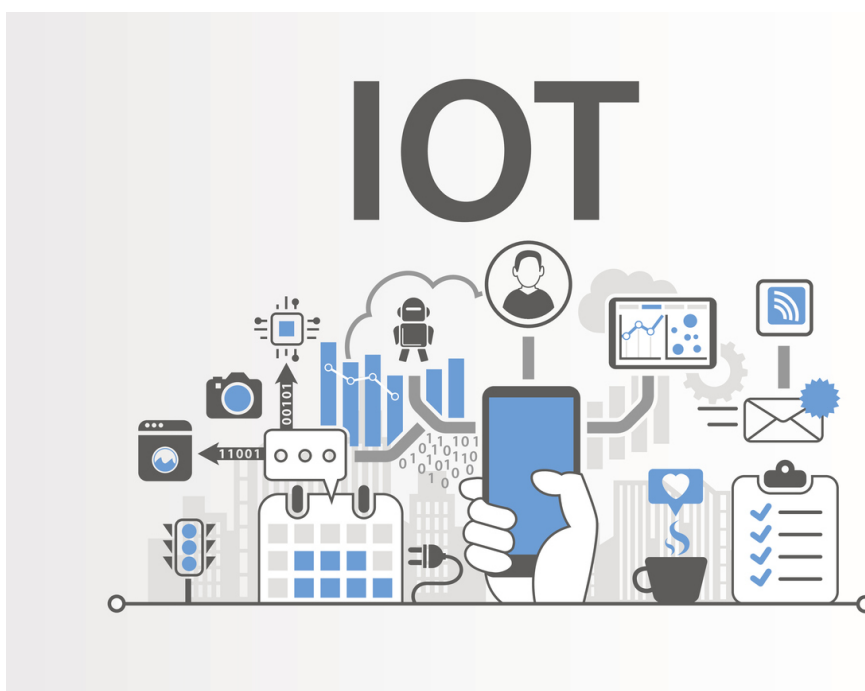
Việc ứng dụng blade coating trong chế tạo nanogenerator mang lại nhiều lợi ích vượt trội, đặc biệt là về kiểm soát độ dày và đồng nhất của lớp màng mỏng. Điều này không chỉ giúp cải thiện hiệu suất chuyển đổi năng lượng mà còn tạo điều kiện thuận lợi cho sản xuất công nghiệp với chi phí hợp lý. Nghiên cứu này mở ra hướng đi mới trong việc tối ưu hóa quá trình phủ màng mỏng, từ đó góp phần thúc đẩy

sự phát triển của các hệ thống thu năng lượng tự cấp nguồn và các ứng dụng IoT hiện đại.

2.3 Tổng quan về công nghệ IoT

2.3.1 Khái niệm IOT

Internet of Things (IoT) là thuật ngữ dùng để chỉ các đối tượng có thể được nhận biết cũng như sự tồn tại của chúng trong một kiến trúc mạng tính kết nối. Đây là một viễn cảnh trong đó mọi vật, mọi con vật hoặc con người được cung cấp các định danh và khả năng tự động truyền tải dữ liệu qua một mạng lưới mà không cần sự tương tác giữa con người-với-con người hoặc con người-với-máy tính. IoT tiến hoá từ sự hội tụ của các công nghệ không dây, hệ thống vi cơ điện tử (MEMS) và Internet. Cụm từ này được đưa ra bởi Kevin Ashton vào năm 1999. Ông là một nhà khoa học đã sáng lập ra Trung tâm Auto-ID ở đại học MIT



Hình 2.4: “Internet of Things”

Internet of Things (IoT) là một mô hình công nghệ mang tính biến đổi, kết nối các vật dụng và thiết bị hàng ngày với Internet, cho phép chúng thu thập, trao đổi và phân tích dữ liệu theo thời gian thực. Về cốt lõi, IoT đại diện cho sự hội tụ

của thế giới vật lý và kỹ thuật số, nơi các cảm biến, bộ truyền động và công nghệ truyền thông được nhúng vào các vật thể, cho phép chúng tương tác với nhau và với con người. Mạng thiết bị được kết nối này trải rộng trên nhiều ứng dụng, từ nhà thông minh và thiết bị đeo cho đến tự động hóa công nghiệp và thành phố thông minh.[10]

Công nghệ IoT dựa vào một số thành phần chính để hoạt động hiệu quả. Đầu tiên, các cảm biến và bộ truyền động đóng vai trò là lớp nền tảng, thu thập dữ liệu từ môi trường (ví dụ: nhiệt độ, chuyển động hoặc ánh sáng) và thực hiện các hành động dựa trên dữ liệu đó. Những thiết bị này thường nhỏ, chi phí thấp và tiết kiệm năng lượng, khiến chúng trở nên lý tưởng để triển khai rộng rãi. Thứ hai, kết nối là điều cần thiết để truyền dữ liệu giữa các thiết bị và hệ thống tập trung. IoT tận dụng nhiều giao thức truyền thông khác nhau, bao gồm Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, mạng di động (4G/5G) và Mạng diện rộng công suất thấp (LPWAN), để đảm bảo truyền dữ liệu liền mạch trên nhiều môi trường khác nhau. Thứ ba, xử lý và phân tích dữ liệu đóng một vai trò quan trọng trong việc rút ra những hiểu biết có ý nghĩa từ lượng dữ liệu khổng lồ do các thiết bị IoT tạo ra. Điện toán đám mây và điện toán biên thường được sử dụng để xử lý và lưu trữ dữ liệu, trong đó điện toán biên cho phép đưa ra quyết định nhanh hơn bằng cách xử lý dữ liệu gần nguồn hơn. Cuối cùng, giao diện người dùng cho phép con người tương tác với các hệ thống IoT, thường thông qua các ứng dụng di động, bảng điều khiển web hoặc trợ lý giọng nói.

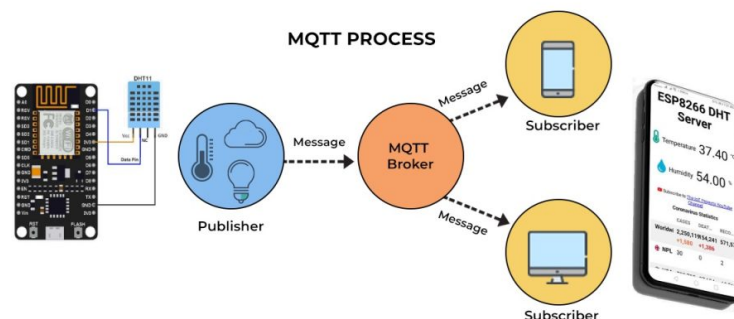
Các ứng dụng của IoT rất rộng lớn và tiếp tục mở rộng trong các ngành công nghiệp. Trong nhà thông minh, IoT cho phép tự động hóa hệ thống chiếu sáng, sưởi ấm, hệ thống an ninh và thiết bị, nâng cao sự tiện lợi và tiết kiệm năng lượng. Trong chăm sóc sức khỏe, các thiết bị đeo và hệ thống giám sát từ xa giúp bệnh nhân và nhà cung cấp dịch vụ chăm sóc sức khỏe theo dõi các dấu hiệu quan trọng và quản lý các tình trạng mãn tính hiệu quả hơn. Trong nông nghiệp, các kỹ thuật canh tác chính xác dựa trên IoT sẽ tối ưu hóa việc tưới tiêu, bón phân và giám sát cây trồng, giúp tăng năng suất và bảo tồn tài nguyên. Trong môi trường công nghiệp, Internet vạn vật công nghiệp (IIoT) hỗ trợ bảo trì dự đoán, tối ưu hóa chuỗi cung ứng và giám sát máy móc theo thời gian thực, cải thiện năng suất và giảm thời gian ngừng hoạt động. Ngoài ra, IoT đóng vai trò then chốt trong việc phát triển các thành phố thông minh, nơi cơ sở hạ tầng được kết nối, như đèn giao

bị từ các nhà sản xuất khác nhau. Ngoài ra, khả năng mở rộng của hệ thống IoT phải được giải quyết để phù hợp với sự tăng trưởng theo cấp số nhân của các thiết bị được kết nối, dự kiến sẽ đạt tới hàng chục tỷ trong những năm tới. Cuối cùng, mức tiêu thụ năng lượng của các thiết bị IoT, đặc biệt là các thiết bị chạy bằng pin, đặt ra thách thức về tính bền vững, thúc đẩy nhu cầu về các thiết kế tiết kiệm năng lượng và giải pháp năng lượng tái tạo.

2.3.2 Cơ sở kỹ thuật của IoT

Trong IoT, các thiết bị phải giao tiếp được với nhau (D2D¹). Dữ liệu sau đó phải được thu thập và gửi tới máy chủ (D2S²). Máy chủ cũng có thể chia sẻ dữ liệu với nhau (S2S³), hoặc cung cấp lại cho các thiết bị để phân tích các chương trình, hoặc cho người dùng. Các giao thức có thể dùng trong IoT là:

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport): Giao thức nhẹ dựa trên mô hình publish/subscribe, rất thích hợp cho các thiết bị có tài nguyên hạn chế và môi trường mạng không ổn định.



Hình 2.6: Ví dụ về mqtt

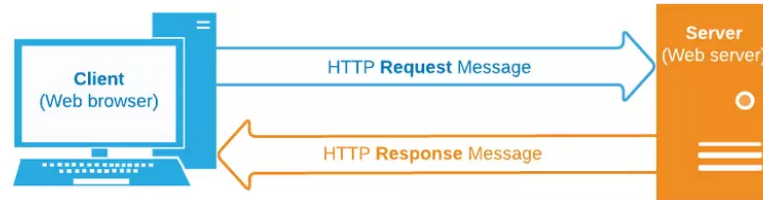
CoAP (Constrained Application Protocol): Được thiết kế cho các thiết bị IoT có tài nguyên hạn chế, hoạt động trên giao thức UDP và hỗ trợ các thao tác cơ bản (GET, POST, PUT, DELETE) tương tự HTTP nhưng tối ưu hoá cho môi trường nhạy cảm về tài nguyên.

¹Direct-to-Device

²Direct-to-Server

³Server-to-Server

HTTP/HTTPS: Mặc dù nặng hơn so với MQTT hay CoAP, HTTP/HTTPS vẫn được sử dụng rộng rãi nhờ tính tương thích cao và khả năng bảo mật (đặc biệt với HTTPS).

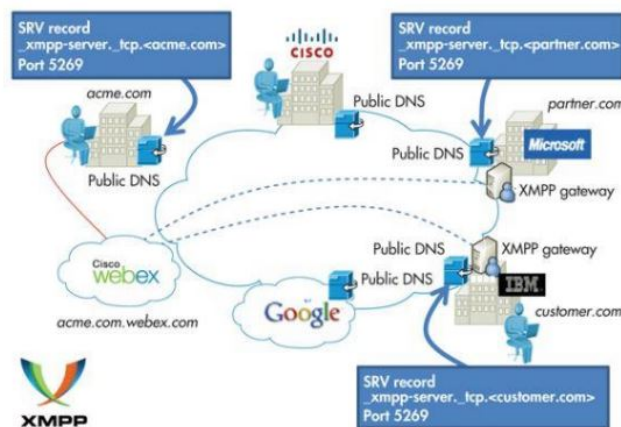


Hình 2.7: Ví dụ về http

AMQP (Advanced Message Queuing Protocol): Được sử dụng trong các hệ thống doanh nghiệp, đảm bảo độ tin cậy cao khi truyền tải tin nhắn theo mô hình publish/subscribe.

DDS (Data Distribution Service): Giao thức thời gian thực, thích hợp cho các ứng dụng yêu cầu độ trễ thấp và hiệu suất cao.

XMPP (Extensible Messaging and Presence Protocol): Ban đầu được phát triển cho ứng dụng nhắn tin, XMPP cũng được ứng dụng trong IoT nhờ tính mở và khả năng mở rộng.



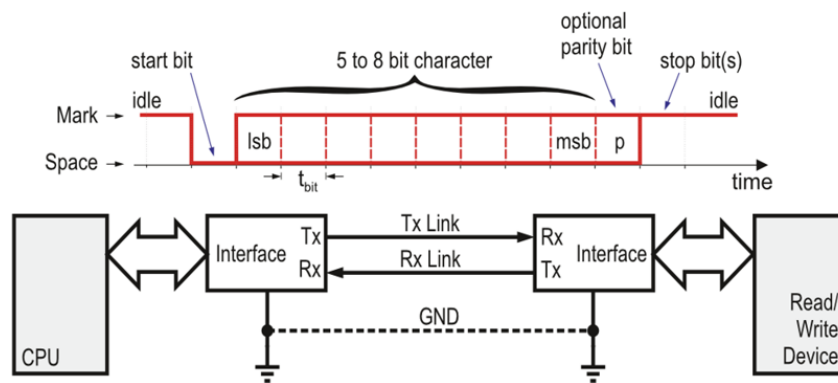
Hình 2.8: Ví dụ về xmpp

2.4 Giao tiếp UART giữa ESP và Arduino

UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) là một giao thức truyền thông nối tiếp bất đồng bộ được sử dụng phổ biến trong các hệ thống nhúng. Dưới đây là các đặc điểm và ứng dụng của giao tiếp UART:

Đặc điểm của giao tiếp UART

- **Bất đồng bộ:** Dữ liệu được truyền đi không cần đồng bộ hóa bằng tín hiệu đồng hồ chung. Các bên gửi và nhận cần cấu hình cùng tốc độ truyền (baud rate) để đảm bảo dữ liệu được giải mã chính xác.
- **Truyền nối tiếp:** Dữ liệu được gửi từng bit qua một kênh truyền với hai chân chính: TX (truyền) và RX (nhận).
- **Đơn giản và hiệu quả:** UART là giao thức dễ triển khai, phù hợp cho giao tiếp giữa các thiết bị có tài nguyên hạn chế như ESP và Arduino.



Hình 2.9: Giao tiếp UART

Ứng dụng của giao tiếp UART trong hệ thống ESP-Arduino

Trong nhiều dự án IoT, giao tiếp UART giữa ESP và Arduino được sử dụng để:

- Truyền dữ liệu cảm biến từ Arduino lên ESP để xử lý và chuyển tiếp dữ liệu lên server hoặc ứng dụng đám mây.

- Gửi lệnh điều khiển từ ESP về Arduino nhằm điều khiển các module ngoại vi hoặc các thiết bị điều khiển như động cơ.
- Đảm bảo tốc độ truyền phù hợp cho các ứng dụng yêu cầu giao tiếp dữ liệu liên tục mà không gây quá tải cho các thiết bị.

Kết luận Chương 2

Trong chương này, các kiến thức về kiểm thử phần mềm đã được nhắc lại cùng với một số kĩ thuật như phân tích tĩnh và phân tích động. Tiếp đó, phần nội dung còn trình bày cụ thể về các bài toán gặp phải khi thực hiện kiểm thử một hệ thống dòng sản phẩm trong thực tế.

Dựa trên những hiểu biết đó, chương tiếp theo sẽ đi sâu vào việc kết hợp các kĩ thuật đã nêu để xây dựng giải pháp tự động sinh bộ dữ liệu hỗ trợ kiểm thử cho hệ thống dòng sản phẩm.

Chương 3

Thiết kế, chế tạo máy tráng phủ màng mỏng ứng dụng trong linh kiện chuyển đổi điện năng

Chương này trình bày quá trình thiết kế và chế tạo máy tráng phủ màng mỏng sử dụng phương pháp Doctor Blade Coating. Mục tiêu của chương là xây dựng một hệ thống tráng phủ có khả năng kiểm soát độ dày và đồng nhất của lớp màng, từ đó tối ưu hiệu suất chuyển đổi năng lượng của linh kiện như nanogenerator. Để đạt được điều này, nghiên cứu tập trung vào hai khía cạnh chính: (i) thiết kế cấu trúc và các yêu cầu kỹ thuật của máy, (ii) quy trình hoàn thiện và kiểm thử sản phẩm.

3.1 Thiết kế cấu trúc thiết bị

3.1.1 Yêu cầu kỹ thuật của hệ thống máy tráng phủ

Để sản xuất các lớp màng mỏng đạt chất lượng cao, hệ thống máy tráng phủ cần đáp ứng các yêu cầu sau:

- **Kiểm soát độ dày và đồng nhất:** Hệ thống phải có khả năng điều chỉnh độ dày của lớp màng trong khoảng nano/micrometer với sai số nhỏ, đảm bảo tính đồng nhất trên toàn bộ bề mặt sản phẩm.
- **Độ ổn định và tính lặp lại:** Quá trình tráng phủ cần được duy trì ổn định qua nhiều lần vận hành, sao cho mỗi lần chạy đều cho ra lớp màng có đặc tính vật lý và hóa học tương đồng.
- **Tích hợp điều khiển tự động và giám sát IoT:** Hệ thống cần được trang bị bộ điều khiển chính xác, sử dụng Arduino Uno kết hợp với driver TB6600 để điều khiển động cơ bước, đồng thời tích hợp module ESP8266 để thu thập dữ liệu và giám sát quá trình sản xuất từ xa. Các cảm biến (bao gồm cảm biến

hiệt độ) và màn hình LCD sẽ cung cấp thông tin trạng thái và các thông số quan trọng cho người vận hành.

- **Khả năng mở rộng:** Hệ thống cần có thiết kế phù hợp với quy trình sản xuất công nghiệp (ví dụ: roll-to-roll) để có thể mở rộng quy mô sản xuất mà không làm giảm chất lượng lớp màng.

3.1.2 Thiết kế cấu trúc hệ thống

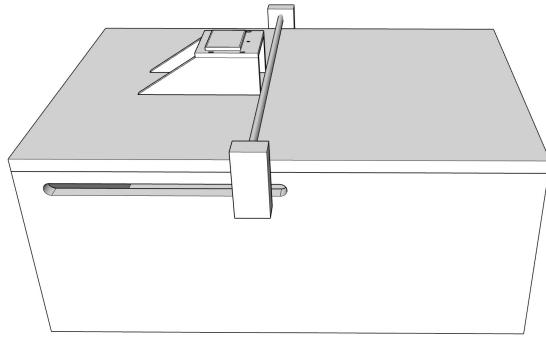
Thiết kế cơ khí

Phần cơ khí của máy tráng phủ được thiết kế nhằm đảm bảo khả năng điều chỉnh chính xác tốc độ và khoảng cách của dao tráng trên bề mặt chất nền. Các yếu tố quan trọng bao gồm:



Hình 3.1: Dao tráng phủ (Doctor blade)

- **Hệ thống dao tráng (Blade):** Lưỡi dao được thiết kế với góc nghiêng có thể điều chỉnh, cho phép kiểm soát độ dày của lớp màng khi kéo dung dịch trên bề mặt. Hình 3.1 minh họa dao tráng sử dụng trong hệ thống.



Hình 3.2: Thiết kế hệ thống bàn làm việc bladecoating

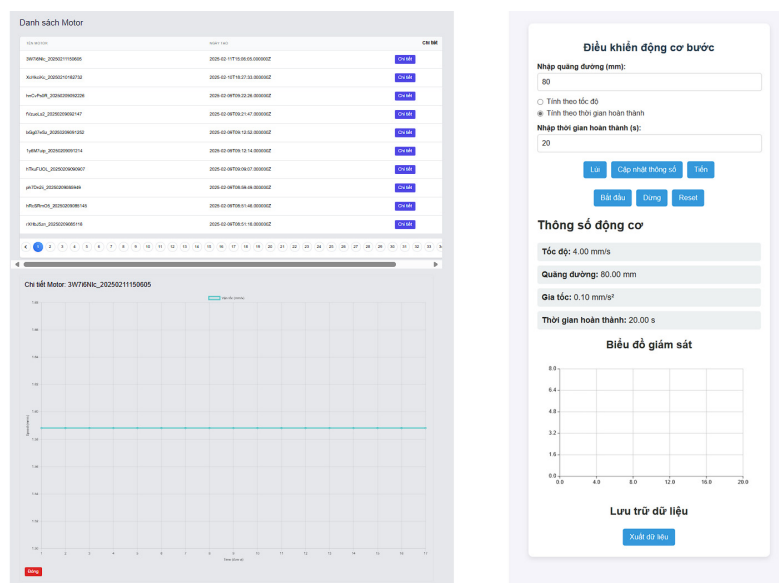
- **Bàn làm việc:** Hệ thống di chuyển chất nền với tốc độ ổn định, đảm bảo phân bố đồng đều của dung dịch trên toàn bộ bề mặt. Hình 3.2 cho thấy bản thiết kế sơ bộ của hệ thống blade coating.
- **Cơ cấu điều chỉnh:** Bao gồm các bộ phận điều chỉnh khoảng cách giữa dao và bề mặt, cũng như điều chỉnh áp lực của dao lên chất nền. Các bộ phận này được gia công từ vật liệu kỹ thuật nhằm đảm bảo độ bền và tính chính xác cao.

Thiết kế hệ thống điều khiển và tích hợp IoT

Để đạt được khả năng giám sát và điều khiển tự động, hệ thống được thiết kế tích hợp phần cứng và phần mềm với các thành phần chính sau:

- **Bộ điều khiển:** Arduino Uno được sử dụng làm bộ điều khiển trung tâm để xử lý các tín hiệu từ cảm biến và điều khiển động cơ bước thông qua driver TB6600. Việc sử dụng Arduino giúp đơn giản hóa quá trình lập trình và kiểm soát.
- **Động cơ bước và driver TB6600:** Động cơ bước đảm bảo chuyển động chính xác, trong khi driver TB6600 cung cấp dòng điện ổn định và khả năng điều khiển tốc độ linh hoạt, giúp duy trì quá trình tráng phủ mượt mà.
- **Cảm biến:** Cảm biến nhiệt độ được tích hợp để theo dõi nhiệt độ của dung dịch và bề mặt chất nền trong quá trình tráng phủ, đảm bảo các điều kiện môi trường ổn định.

- **Module IoT:** ESP8266 được sử dụng để kết nối hệ thống với Internet, cho phép gửi dữ liệu quá trình đến hệ thống giám sát từ xa và nhận các lệnh điều khiển.
- **Giao diện người dùng:** Được tích hợp nhằm hiển thị các thông số vận hành như tốc độ, nhiệt độ, và trạng thái của hệ thống, giúp người vận hành theo dõi quá trình một cách trực quan.



Hình 3.3: Giao diện người dùng và lấy data

3.2 Quy trình chế tạo và lắp ráp

Quá trình chế tạo máy tráng phủ được thực hiện qua các bước sau:

1. **Phân tích và thiết kế:** Dựa trên các yêu cầu kỹ thuật, tiến hành mô phỏng và vẽ bản vẽ kỹ thuật chi tiết của các bộ phận cơ khí, mạch điều khiển và hệ thống IoT.
2. **Chế tạo các bộ phận:** Gia công các bộ phận cơ khí từ kim loại hoặc nhựa kỹ thuật theo bản vẽ đã được phê duyệt. Đặc biệt, các bộ phận liên quan đến cơ cấu dao tráng và hệ thống định vị phải đạt độ chính xác cao.
3. **Lắp ráp hệ thống:** Kết hợp các bộ phận cơ khí với hệ thống điện tử, bao gồm động cơ bước, driver TB6600, Arduino Uno, cảm biến nhiệt độ, ESP8266

và màn hình LCD. Quá trình này đòi hỏi sự phối hợp chặt chẽ giữa các nhóm cơ khí, điện và phần mềm.

4. **Tích hợp phần mềm:** Phát triển phần mềm điều khiển và giám sát, bao gồm giao diện người dùng trên màn hình LCD và hệ thống IoT để truyền tải dữ liệu theo thời gian thực.

3.3 Quy trình kiểm thử và đánh giá sản phẩm

Sau khi hoàn thiện lắp ráp, hệ thống được đưa vào quy trình kiểm thử toàn diện với các bước sau:

3.3.1 Kiểm thử hiệu năng quá trình tráng phủ

- **Đo lường độ đồng nhất và kiểm soát độ dày:** Sử dụng các thiết bị đo quang học và vi điện tử để đánh giá tính đồng nhất của lớp màng và kiểm soát độ dày trong khoảng nano/micrometer.
- **Đo hiệu suất chuyển đổi năng lượng:** Các mẫu nanogenerator chế tạo từ lớp màng tráng phủ được đưa vào thử nghiệm, trong đó điện áp và dòng điện đầu ra được đo lường khi mẫu bị tác động bởi các chuyển động cơ học có tần số và cường độ khác nhau.

3.3.2 So sánh với sản phẩm thương mại

- **Đánh giá chỉ số kỹ thuật:** So sánh các thông số như điện áp, dòng điện và hiệu suất chuyển đổi của nanogenerator chế tạo với các sản phẩm thương mại hiện có.
- **Phân tích chi phí:** Đánh giá hiệu quả kinh tế của quy trình blade coating, từ đó so sánh chi phí sản xuất và khả năng mở rộng quy mô sản xuất.

3.3.3 Phân tích dữ liệu và đề xuất cải tiến

1. **Thu thập và phân tích dữ liệu:** Sử dụng hệ thống IoT để thu thập dữ liệu theo thời gian thực trong quá trình thử nghiệm. Dữ liệu được phân tích định

lượng nhằm xác định mối tương quan giữa các thông số quá trình (như tốc độ tráng, nhiệt độ, độ nhớt của dung dịch) với hiệu suất chuyển đổi năng lượng.

2. **Đề xuất giải pháp cải tiến:** Dựa trên kết quả phân tích, xác định các yếu tố cần được cải tiến trong cơ cấu máy, quy trình chế tạo, hoặc phần mềm điều khiển nhằm nâng cao chất lượng lớp màng và hiệu suất sản phẩm.

Kết luận Chương 3

Qua quá trình thiết kế, chế tạo và kiểm thử, hệ thống máy tráng phủ màng mỏng đã cho thấy khả năng tạo ra các lớp màng với độ đồng đều cao và kiểm soát chính xác độ dày. Các kết quả thử nghiệm ban đầu chỉ ra rằng thiết bị có thể đáp ứng được yêu cầu kỹ thuật của các linh kiện chuyển đổi điện năng, đồng thời mở ra hướng phát triển cho các quy trình sản xuất công nghiệp tích hợp IoT.

Chương 4

Ứng dụng máy tráng phủ trong linh kiện chuyển đổi điện năng

Chương này trình bày ứng dụng của máy tráng phủ màng mỏng trong sản xuất linh kiện chuyển đổi điện năng. Nghiên cứu tập trung vào các thí nghiệm thực tế, đánh giá hiệu quả của lớp màng mỏng trong việc chuyển đổi năng lượng và thảo luận về các kết quả thử nghiệm. Qua đó, đánh giá khả năng ứng dụng của công nghệ blade coating trong sản xuất các thiết bị năng lượng tái tạo như nanogenerator.

4.1 Thử nghiệm và đánh giá hiệu quả

4.1.1 Thí nghiệm trên linh kiện nanogenerator

Để đánh giá hiệu suất chuyển đổi năng lượng của nanogenerator được chế tạo thông qua quá trình tráng phủ bằng máy blade coating, chúng tôi tiến hành một chuỗi thí nghiệm toàn diện bao gồm các bước sau:

Chuẩn bị mẫu

- **Chế tạo mẫu:** Các mẫu nanogenerator được sản xuất với các thông số tráng phủ khác nhau, bao gồm việc điều chỉnh độ dày và mức độ đồng nhất của lớp màng mỏng. Các biến số như nồng độ dung dịch tiền chất, tốc độ di chuyển của lưỡi dao và điều kiện môi trường (nhiệt độ, độ ẩm) được kiểm soát chặt chẽ để tạo ra các mẫu với đặc tính khác nhau.
- **Đánh dấu và phân loại:** Mỗi mẫu được gắn mã số và phân loại theo các thông số tráng phủ cụ thể, đảm bảo tính nhất quán trong quá trình thử nghiệm và thuận tiện cho việc so sánh kết quả.

Tiến hành thử nghiệm

- **Thiết lập thí nghiệm cơ học:** Các mẫu nanogenerator được đặt trên một khung kiểm tra cơ học chuyên dụng, được trang bị cảm biến đo lực và gia tốc. Hệ thống này tạo ra các chuyển động cơ học đa dạng (chẳng hạn như rung, dao động và tác động áp lực) nhằm mô phỏng các điều kiện hoạt động thực tế.
- **Đo lường điện:** Trong quá trình tác động, các thông số điện đầu ra như điện áp và dòng điện được đo lường bằng các thiết bị đo chuẩn và có độ chính xác cao. Các thông số này phản ánh hiệu suất chuyển đổi năng lượng của mẫu nanogenerator.
- **Thu thập dữ liệu qua IoT:** Hệ thống IoT tích hợp trên thiết bị thu thập dữ liệu theo thời gian thực. Các thông số như điện áp, dòng điện, tần số và biên độ chuyển động được lưu trữ tự động vào cơ sở dữ liệu để phục vụ cho quá trình phân tích sau này.

Phân tích dữ liệu và đánh giá hiệu suất

- **Phân tích thống kê:** Dữ liệu thu thập được được xử lý và phân tích để xác định các chỉ số hiệu suất của nanogenerator, như hiệu suất chuyển đổi năng lượng, độ ổn định đầu ra và mối quan hệ giữa các thông số thí nghiệm với hiệu quả hoạt động của sản phẩm.
- **So sánh với tiêu chuẩn:** Hiệu suất của các mẫu nanogenerator được so sánh với các giá trị tiêu chuẩn từ tài liệu khoa học và các sản phẩm thương mại, giúp xác định những cải tiến cần thiết trong quy trình tráng phủ.
- **Đánh giá độ bền:** Thí nghiệm được lặp lại qua nhiều chu kỳ để kiểm tra độ ổn định và tuổi thọ của các mẫu, từ đó đánh giá khả năng duy trì hiệu suất chuyển đổi năng lượng qua thời gian.

Kết quả thu được từ quá trình thí nghiệm sẽ cung cấp cái nhìn toàn diện về mối quan hệ giữa các tham số quá trình tráng phủ (độ dày, đồng nhất, điều kiện môi trường) và hiệu suất chuyển đổi năng lượng của nanogenerator. Qua đó, các dữ

liệu này làm cơ sở để tối ưu hóa quy trình sản xuất nhằm đạt được lớp màng mỏng chất lượng cao, đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật của linh kiện chuyển đổi điện năng.

4.2 Đánh giá hiệu quả chuyển đổi năng lượng

Kết quả thu được từ các thí nghiệm cho thấy rằng hiệu suất chuyển đổi năng lượng của nanogenerator phụ thuộc rất mạnh vào chất lượng của lớp màng mỏng được tráng phủ bằng máy blade coating. Cụ thể:

- **Độ đồng nhất và kiểm soát độ dày:** Các mẫu nanogenerator mà lớp màng mỏng được tráng phủ với độ đồng nhất cao và độ dày được kiểm soát chặt chẽ cho thấy hiệu suất chuyển đổi năng lượng vượt trội. Các dữ liệu đo lường cho thấy rằng mẫu có lớp màng mỏng đồng nhất cho ra điện áp và dòng điện đầu ra ổn định hơn so với các mẫu có độ dày không đồng đều. Điều này chứng tỏ rằng sự đồng nhất của lớp màng là một yếu tố then chốt để tối ưu hóa quá trình chuyển đổi năng lượng từ cơ học sang điện năng.
- **Giám sát và phân tích qua IoT:** Hệ thống thu thập dữ liệu được tích hợp với công nghệ IoT cho phép theo dõi các thông số quan trọng của quá trình thử nghiệm theo thời gian thực, bao gồm điện áp, dòng điện, và tần số của các chuyển động tác động đến mẫu. Dữ liệu thu được không chỉ giúp xác định hiệu suất chuyển đổi năng lượng mà còn cung cấp các thông số kỹ thuật cần thiết để đánh giá chất lượng của từng linh kiện. Phân tích dữ liệu cho thấy mối tương quan chặt chẽ giữa các thông số quá trình (như tốc độ tráng, nhiệt độ và điều kiện môi trường) với hiệu suất hoạt động của nanogenerator.
- **So sánh với sản phẩm thương mại:** Qua việc so sánh các kết quả thí nghiệm với các sản phẩm thương mại hiện có, nanogenerator chế tạo bằng máy blade coating được đánh giá có khả năng cạnh tranh cao về cả hiệu suất chuyển đổi năng lượng và chi phí sản xuất. Các mẫu sản xuất từ hệ thống của chúng tôi cho thấy điện áp và dòng điện đầu ra đạt mức tương đương hoặc vượt trội so với một số sản phẩm thương mại tiêu chuẩn, đồng thời chi phí sản xuất được tối ưu hóa nhờ vào quy trình tráng phủ hiệu quả và khả năng mở rộng quy mô sản xuất.

Nhìn chung, các kết quả này khẳng định rằng việc sử dụng máy blade coating

không chỉ giúp tạo ra các lớp màng mỏng có chất lượng vượt trội mà còn cải thiện đáng kể hiệu suất chuyển đổi năng lượng của nanogenerator. Qua đó, hệ thống sản xuất sử dụng phương pháp này hứa hẹn sẽ góp phần tạo ra các thiết bị năng lượng tự cấp nguồn có hiệu quả cao, giảm thiểu sự phụ thuộc vào nguồn điện truyền thống và đáp ứng tốt các yêu cầu của các ứng dụng IoT và các hệ thống năng lượng tái tạo hiện đại.

4.3 Thảo luận

Kết quả thử nghiệm đã chỉ ra rằng:

1. Quá trình tráng phủ bằng blade coating có khả năng tạo ra các lớp màng mỏng với cấu trúc tinh thể tốt, góp phần nâng cao hiệu suất chuyển đổi năng lượng của nanogenerator.
2. Việc tích hợp hệ thống IoT vào quy trình thử nghiệm không chỉ giúp theo dõi liên tục các thông số mà còn cung cấp dữ liệu cần thiết để tối ưu hóa quy trình sản xuất.
3. Một số hạn chế của máy tráng phủ hiện tại, chẳng hạn như sự phụ thuộc vào điều kiện môi trường và tính ổn định của dung dịch, cần được cải tiến trong các nghiên cứu sau này.

Kết luận Chương 4

Qua các thí nghiệm và đánh giá, ứng dụng của máy tráng phủ màng mỏng trong chế tạo linh kiện chuyển đổi điện năng đã chứng minh được tiềm năng cải thiện hiệu suất của các thiết bị nanogenerator. Việc tối ưu hóa quy trình tráng phủ, kết hợp với giám sát và điều khiển tự động qua IoT, không chỉ giúp giảm chi phí sản xuất mà còn mở ra cơ hội ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực năng lượng tái tạo và các thiết bị điện tử thông minh.

Kết luận

Trong đề tài này, chúng tôi đã đề xuất và triển khai một giải pháp thiết kế, chế tạo máy tráng phủ màng mỏng ứng dụng trong linh kiện chuyển đổi điện năng, với trọng tâm là nanogenerator. Qua quá trình nghiên cứu, thiết kế, chế tạo và kiểm thử, các kết quả đạt được cho thấy:

- **Hiệu quả của quy trình tráng phủ:** Hệ thống máy tráng phủ sử dụng phương pháp Doctor Blade Coating cho phép tạo ra các lớp màng mỏng có độ đồng nhất cao và độ dày được kiểm soát chính xác. Điều này góp phần tối ưu hóa hiệu suất chuyển đổi năng lượng của nanogenerator, từ đó nâng cao hiệu quả thu năng lượng trong các ứng dụng thực tiễn.
- **Tích hợp công nghệ IoT:** Việc tích hợp các cảm biến và module IoT vào hệ thống máy tráng phủ đã giúp giám sát và điều khiển quá trình sản xuất theo thời gian thực. Qua đó, người vận hành có thể theo dõi chính xác các thông số quá trình, đưa ra các điều chỉnh kịp thời nhằm duy trì chất lượng của lớp màng và đảm bảo tính ổn định của hệ thống.
- **Tiềm năng ứng dụng rộng rãi:** Các kết quả thí nghiệm cho thấy nanogenerator chế tạo từ lớp màng mỏng tráng phủ bằng máy blade coating có hiệu suất chuyển đổi năng lượng cao, đáp ứng được yêu cầu của các linh kiện chuyển đổi điện năng trong các hệ thống thu năng lượng tự cấp nguồn, cảm biến tự động và các ứng dụng IoT. Điều này mở ra cơ hội ứng dụng của công nghệ này trong sản xuất các thiết bị điện tử, năng lượng tái tạo và các hệ thống điện tử thông minh.
- **Khả năng mở rộng và cải tiến:** Mặc dù hệ thống máy tráng phủ hiện tại đã đạt được các tiêu chuẩn kỹ thuật ban đầu, nhưng vẫn tồn tại một số hạn chế, như sự phụ thuộc vào điều kiện môi trường và tính ổn định của dung dịch tiền chất. Các hướng nghiên cứu tiếp theo có thể tập trung vào tối ưu hóa các thông số quá trình, cải tiến cấu trúc máy và tích hợp thêm các công nghệ kiểm soát tự động tiên tiến để nâng cao chất lượng sản phẩm.

Tóm lại, đề tài đã đóng góp vào việc phát triển một giải pháp kỹ thuật hiệu quả cho quá trình phủ màng mỏng trong chế tạo linh kiện chuyển đổi điện năng, đặc biệt

là nanogenerator. Các kết quả đạt được không chỉ khẳng định vai trò của phương pháp Doctor Blade Coating trong việc tạo ra lớp màng mỏng đồng nhất, mà còn chứng minh được tiềm năng ứng dụng của hệ thống tích hợp IoT trong việc giám sát và điều khiển quy trình sản xuất. Hy vọng rằng, các kết quả nghiên cứu của đề tài sẽ tạo nền tảng cho các nghiên cứu tiếp theo và đóng góp vào sự phát triển bền vững của công nghệ năng lượng tái tạo và các ứng dụng điện tử thông minh trong tương lai.

Tài liệu tham khảo

- [1] Internet of things. <https://www.ibm.com/think/topics/internet-of-things>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [2] Syed Nasimul Alam. A nanogenerator converts mechanical or vibrational energy into electrical energy using piezoelectric, triboelectric and pyroelectric effects. *Journal not available*, Year not available. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352507X23000434>.
- [3] Nanogenerators: An introduction. In *Nanogenerators*. Year not available. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978012821548700004X>.
- [4] Doctor blade coating. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/doctor-blade-coating>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [5] Nanogenerators: a new paradigm in blue energy harvesting. In *Nanogenerators*. Year not available. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128217092000049>.
- [6] Các phương pháp chế tạo vật liệu nano. <http://www.nanophuckhang.com/2020/12/cac-phuong-phap-che-tao-vat-lieu-nano.html>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [7] Thin film deposition: Comparing coating methods. <https://www.ossila.com/pages/solution-processing-techniques-comparison>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [8] Máy phát nano triboelectric như công nghệ năng lượng mới cho các hệ thống tự cung cấp năng lượng và như cảm biến cơ học và hóa học chủ động. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24079963/>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [9] Triboelectric nanogenerators as flexible power sources. <https://www.nature.com/articles/s41528-017-0007-8>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [10] What is internet of things (iot): Overview and explanation. <https://aloo.co/blog/what-is-internet-of-things-iot-overview-and-explanation>, 2025. Accessed: February 20, 2025.