

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA
KHOA ĐIỆN



ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP
NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỆN
CHUYÊN NGÀNH: HỆ THỐNG ĐIỆN

ĐỀ TÀI:

ĐÁNH GIÁ CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN
VIỆC KIỂM SOÁT SỰ TRUYỀN NĂNG LƯỢNG
CỦA TIA PLASMA

Giảng viên hướng dẫn : PGS.TS NGUYỄN HỒNG VIỆT PHƯƠNG
Cán bộ hướng dẫn : NGUYỄN THÀNH LONG
Sinh viên thực hiện : TRẦN MINH TÂN – 20DCLC3 – 105200245
: ĐẶNG TRUNG HIẾU – 20DCLC4 – 105200264

Đà Nẵng, 06 / 2025

TÓM TẮT

I. Thông tin chung

Tên đề tài: Đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến việc kiểm soát sự truyền năng lượng của tia plasma.

Sinh viên thực hiện:

- | | | |
|--------------------|----------------------------|--------------|
| 1. Trần Minh Tân | Mã số sinh viên: 105200245 | Lớp: 20DCLC3 |
| 2. Đặng Trung Hiếu | Mã số sinh viên: 105200264 | Lớp: 20DCLC4 |

II. Tóm tắt đồ án

Đồ án này nghiên cứu và đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến việc kiểm soát sự truyền năng lượng của tia plasma được tạo ra trong môi trường khí Nitơ ở điều kiện áp suất khí quyển, sử dụng nguồn cao tần là máy biến áp Neon. Các đặc tính phân tích được có thể cung cấp thông tin quan trọng để cải thiện các ứng dụng hiện tại và phát triển mới trong nhiều lĩnh vực.

Đồ án cũng đề cập đến các phương pháp thường được sử dụng để đo lường đặc tính của ống phóng điện sử dụng khí Nitơ và máy biến áp Neon. Các phương pháp này đóng vai trò quan trọng trong xác định và đánh giá các đặc tính phóng điện.

Các thí nghiệm đã tạo ra plasma trong môi trường khí Nitơ ở tần số cao. Các đặc tính điện học của mô hình đã được thu thập và phân tích, đánh giá. Từ đó làm cơ sở cho các ứng dụng thực tiễn của tia plasma.

NHIỆM VỤ ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

Họ và tên sinh viên: Trần Minh Tân Số thẻ SV: 105200245 Lớp: 20DCLC3

Họ và tên sinh viên: Đặng Trung Hiếu Số thẻ SV: 105200264 Lớp: 20DCLC4

Khoa: Điện - Ngành: Kỹ thuật Điện

1. *Tên đề tài đồ án:*

Đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến việc kiểm soát sự truyền năng lượng của tia plasma

2. *Đề tài thuộc diện:* ☐ Có ký kết thỏa thuận sở hữu trí tuệ đối với kết quả thực hiện

3. *Các số liệu và dữ liệu ban đầu:*

4. *Nội dung các phần thuyết minh và tính toán:*

Chương 1: Phóng điện trong chất khí và tổng quan về plasma

Chương 2: Thiết lập mô hình thí nghiệm

Chương 3: Thực hiện thí nghiệm và phân tích kết quả

5. *Các bản vẽ, đồ thị (ghi rõ các loại và kích thước bản vẽ):*

Không có

6. *Họ tên người hướng dẫn:* PGS.TS Nguyễn Hồng Việt Phương

Nguyễn Thành Long

7. *Ngày giao nhiệm vụ đồ án:* 19/02/2025

8. *Ngày hoàn thành đồ án:* 09/06/2025

Đà Nẵng, ngày ... tháng ... năm 2025

Trưởng Bộ môn

Người hướng dẫn

LỜI CẢM ƠN

Trong suốt thời gian thực hiện và hoàn thành đồ án này, chúng em đã nhận được sự giúp đỡ và hướng dẫn tận tình của các Thầy, các Cô trong Khoa Điện Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng. Chúng em xin gửi lời cảm ơn chân thành và sâu sắc tới các Thầy Cô trong Khoa đã giảng dạy và truyền đạt những kiến thức cần thiết, những kinh nghiệm quý báu cho chúng em có thể thực hiện đồ án này.

Trước tiên chúng em xin chân thành cảm ơn thầy PGS.TS. Nguyễn Hồng Việt Phương, ông Nguyễn Thành Long cùng với sự giúp đỡ của TS. Trương Thị Hoa, là những người đã từng bước hướng dẫn, giúp đỡ chúng em trong quá trình thực hiện đề tài đồ án tốt nghiệp của mình.

Để có được kết quả như ngày hôm nay, chúng em rất biết ơn gia đình và những người thân trong gia đình đã động viên, khích lệ, tạo mọi điều kiện thuận lợi nhất về vật chất lẫn tinh thần trong suốt quá trình học tập cũng như quá trình thực hiện đề tài tốt nghiệp này.

Trong quá trình học tập, cũng như trong quá trình làm đồ án tốt nghiệp không thể tránh khỏi những thiếu sót, em rất mong được sự góp ý quý báu của tất cả các thầy cô giáo cũng như tất cả các bạn để đồ án tốt nghiệp của em được hoàn thiện hơn.

Một lần nữa chúng em xin chân thành cảm ơn và kính chúc quý thầy cô dồi dào sức khỏe và thành công trong cuộc sống.

Đà Nẵng, ngày ... tháng ... năm 2025
Sinh viên thực hiện

Trần Minh Tân

Đặng Trung Hiếu

CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan:

1. Những nội dung trong đồ án này là do chúng tôi thực hiện dưới sự hướng dẫn của thầy PGS.TS. Nguyễn Hồng Việt Phương, ông Nguyễn Thành Long và TS. Trương Thị Hoa.
2. Mọi tham khảo dùng trong đồ án đều được trích dẫn rõ ràng tên tác giả, tên công trình, thời gian, địa điểm công bố.
3. Nếu có những sao chép không hợp lệ, vi phạm, tôi xin chịu hoàn toàn trách nhiệm.

Đà Nẵng, ngày ... tháng ... năm 2025
Sinh viên thực hiện

Trần Minh Tân

Đặng Trung Hiếu

MỤC LỤC

Tóm tắt

Nhiệm vụ đồ án tốt nghiệp

Lời cảm ơn.....	i
Cam đoan	ii
Danh sách các bảng biểu	vi
Danh sách các hình ảnh	vii
Danh sách các cụm từ viết tắt.....	x

Trang

MỞ ĐẦU.....	1
--------------------	----------

Chương 1: PHÓNG ĐIỆN TRONG CHẤT KHÍ VÀ TỔNG QUAN VỀ PLASMA	2
---	----------

1.1 Tổng quan về phóng điện trong chất khí.....	2
--	----------

1.2 Các dạng ion hóa xảy ra trong chất khí.....	3
--	----------

1.2.1 Ion hóa va chạm	3
-----------------------------	---

1.2.2 Ion hóa quang (photoionization)	5
---	---

1.2.3 Ion hóa nhiệt.....	6
--------------------------	---

1.2.4 Ion hóa bề mặt.....	6
---------------------------	---

1.3 Năng lượng ion hóa.....	7
------------------------------------	----------

1.4 Các phản ứng xảy ra trong môi trường chất khí bị ion hóa	7
---	----------

1.5 Quá trình hình thành phóng điện trong chất khí	9
---	----------

1.5.1 Sự hình thành phóng điện trong chất khí	9
---	---

1.5.2 Quá trình hình thành thác điện tử.....	10
--	----

1.5.3 Quan hệ giữa dòng điện và điện áp trong chất khí.....	14
---	----

1.6 Các dạng phóng điện trong chất khí và các yếu tố ảnh hưởng đến phóng điện trong chất khí	15
---	-----------

1.6.1 Các dạng phóng điện trong chất khí.....	15
---	----

1.6.2 Các yếu tố ảnh hưởng đến phóng điện trong chất khí.....	16
---	----

1.7 Phóng điện trong điện trường đồng nhất	18
1.7.1 Mô tả điện trường đồng nhất.....	18
1.7.2 Quá trình phóng điện trong điện trường đều.....	19
1.7.3 Điện áp phóng điện xuyên thủng khoảng cách khí trong điện trường đều ..	19
1.8 Phóng điện trong chất khí ở điện trường không đều.....	21
1.8.1 Mô tả điện trường không đều	21
1.8.2 Quá trình phóng điện trong điện trường không đều.....	23
1.8.3 Điều kiện phóng điện trong điện trường không đều	23
1.9 Tổng quan về Plasma và phân loại plasma.....	24
1.9.1 Tổng quan về plasma	24
1.9.3 Sự liên hệ giữa plasma và phóng điện chất khí.....	27
1.10 Plasma lạnh và các hình thức tạo plasma lạnh	27
1.10.1 Plasma lạnh	27
1.10.2 Các hình thức tạo plasma lạnh	28
1.11 Một số nguồn điện sử dụng để tạo ra plasma lạnh	32
1.12 Một số ứng dụng của tia plasma (Plasma Jet)	33
1.12.1 Ứng dụng trong y tế	33
1.12.2 Ứng dụng trong nông nghiệp	34
1.12.3 Ứng dụng trong xử lý bề mặt	34
Chương 2: THIẾT LẬP MÔ HÌNH THÍ NGHIỆM.....	37
2.1. Giới thiệu chung.....	37
2.1.1 Plasma phóng điện màn chắn điện môi DBD	37
2.1.2 Plasma tia (Plasma jet)	41
2.1.4. Một số loại khí làm việc thường sử dụng trong việc tạo ra plasma lạnh	43
2.2. Mô hình thí nghiệm ống phóng tia plasma dùng nguồn Neon tần số cao...47	
2.3. Thiết bị sử dụng cho mô hình thí nghiệm	49
2.3.1. Nguồn sơ cấp.....	49
2.3.2. Máy biến áp Neon	49
2.3.3. Thiết bị đo, giám sát sử dụng trong mô hình	50

2.3.4. Thiết bị đo cao áp P5122, TEKTRONIK P6015A.....	52
2.3.5. Oscilloscope (Máy hiển thị sóng): Tektronix MDO3022	53
2.3.6. Tụ điện cao áp	54
2.3.7. Điện trở shunt.....	55
2.3.8 Hệ thống khí.....	57
Chương 3: THỰC HIỆN THÍ NGHIỆM VÀ PHÂN TÍCH KẾT QUẢ.....	59
3.1. Sơ đồ và điều kiện thí nghiệm	59
3.2 Đặc tính điện học ống phóng tia Plasma với lưu lượng khí Nitơ 1 slm	62
3.2.1 Phân tích kết quả thí nghiệm.....	62
3.2.2 Ảnh hưởng của biên độ điện áp nguồn đến số lần phóng điện và xung phóng điện cao nhất	67
3.2.3. Ảnh hưởng của biên độ điện áp nguồn đến công suất tiêu tán trên mục tiêu	69
3.2.4 Ảnh hưởng của biên độ điện áp nguồn đến năng lượng nguồn cung cấp trong một chu kỳ.....	71
3.3 Đặc tính điện học ống phóng tia Plasma với lưu lượng khí Nitơ 3 slm	74
3.3.1 Phân tích kết quả thí nghiệm.....	74
3.3.2 Ảnh hưởng của biên độ điện áp nguồn đến số lần phóng điện và xung phóng điện cao nhất	77
3.3.3. Công suất tiêu tán trên mục tiêu.....	78
3.3.4 Năng lượng nguồn cung cấp trong một chu kỳ.....	80
3.4 Phân tích kết quả và đánh giá đặc tính điện học ống phóng tia plasma giữa lưu lượng 1 slm và 3 slm.....	82
3.4.1 Về số xung dòng phóng điện.....	82
3.4.2 Về độ lớn của xung dòng phóng điện lớn nhất	83
3.4.3 Về năng lượng nguồn cấp	83
KẾT LUẬN.....	85
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	87
PHỤ LỤC	

DANH SÁCH CÁC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1: Điện áp phóng điện xuyên thủng chất khí	21
Bảng 2.1: Các mức năng lượng ion hóa của khí Nitơ	44
Bảng 2.2: Các mức năng lượng ion hóa của khí Argon	46
Bảng 2.3: Bảng thông số nguồn sơ cấp sử dụng trong mô hình thí nghiệm	49
Bảng 2.4: Bảng thông số máy biến áp Neon sử dụng trong mô hình thí nghiệm	50
Bảng 2.5: Bảng thông số thiết bị đo sử dụng trong mô hình thí nghiệm	52
Bảng 2.6: Bảng thông số kỹ thuật của thiết bị đo cao áp P5122	53
Bảng 2.7: Bảng thông số kỹ thuật của thiết bị đo cao áp TEKTRONIX P6015A	53
Bảng 2.8: Bảng thông số kỹ thuật của tụ điện.....	54
Bảng 2.9: Thông số kỹ thuật của điện trở Shunt	56
Bảng 2.10: Bảng thông tin chi tiết về thiết bị sử dụng trong mô hình thí nghiệm	56
Bảng 3.1: Điều kiện thí nghiệm với nguồn Neon tần số cao.....	61
Bảng 3.2: Số xung dòng phóng điện trên từng biên độ điện áp ($I_{pđ} \geq 10 \text{ mA}$)	67
Bảng 3.3: Độ lớn của xung dòng phóng điện lớn nhất trên từng biên độ điện áp.....	68
Bảng 3.4: Năng lượng tiêu tán qua từng cấp điện áp (Phụ lục 3.2)	70
Bảng 3.5: Giá trị năng lượng nguồn cung cấp trong một chu kỳ thí nghiệm khí Nitơ lưu lượng 1 slm ứng với từng cấp điện áp E (μJ)	73
Bảng 3.6: Số lần phóng điện trên từng biên độ điện áp ($I_{pđ} \geq 10 \text{ mA}$)	77
Bảng 3.7: Độ lớn của xung dòng phóng điện lớn nhất trên từng biên độ điện áp.....	77
Bảng 3.8: Năng lượng tiêu tán qua từng biên độ điện áp	79
Bảng 3.9: Giá trị năng lượng nguồn cung cấp trong một chu kỳ thí nghiệm khí Nitơ lưu lượng 3 slm ứng với từng cấp điện áp E (μJ)	80

DANH SÁCH CÁC HÌNH ẢNH

Hình 1.1: Phóng tia lửa điện trong không khí	2
Hình 1.2: Quá trình hình thành phóng điện	9
Hình 1.3: Phương trình trên trục thời gian	10
Hình 1.4: Quá trình hình thành các thác điện tử	11
Hình 1.5: Thác điện tử thứ cấp	12
Hình 1.6: Thác điện tử và sự biến dạng của điện trường	12
Hình 1.7: Đặc tính Volt – Ampe của chất khí	15
Hình 1.8: Các dạng phóng điện trong chất khí	15
Hình 1.9: Điện trường đồng nhất	18
Hình 1.10: Quan hệ $U_{ct} = f(\delta s)$ và $E_{ct}/\delta = f(\delta s)$ đối với không khí	20
Hình 1.11: Đường cong Paschen của một số chất khí	21
Hình 1.12: Phân bố điện trường không đều	22
Hình 1.13: Các trạng thái cơ bản của vật chất	25
Hình 1.14: Phân loại Plasma	25
Hình 1.15: Sơ đồ tạo plasma bằng phóng điện qua điện môi	28
Hình 1.16: Sơ đồ tạo plasma bằng phóng điện bề mặt	28
Hình 1.17: Sơ đồ tạo plasma bằng phóng điện vàng quang	29
Hình 1.18: Sơ đồ tạo plasma bằng nguồn vi sóng	30
Hình 1.19: Sơ đồ nguyên lí plasma tia	31
Hình 1.20: Sơ đồ tạo Plasma bằng phóng điện hồ quang lướt	31
Hình 1.21: Phương pháp điều trị vết mổ bằng plasma lạnh	34
Hình 1.22: Kích thích hạt giống nảy mầm bằng plasma	34
Hình 1.23: Bảo quản thực phẩm bằng plasma	34
Hình 1.24: Xử lí bề mặt bằng plasma	35
Hình 1.25: Cấu tạo của hệ thống xử lý khí thải bằng plasma	35
Hình 1.26: Ứng dụng xử lý khí thải	35
Hình 1.27: Ứng dụng xử lý nước, xử lý khí thải	36
Hình 2.1: Cấu trúc phóng điện màn chắn điện môi	38
Hình 2.2: Tia plasma tạo ra từ phóng điện màn chắn điện môi	39
Hình 2.3: Sơ đồ cấu hình điển hình của lò phản ứng DBD	39
Hình 2.4: Dạng sóng điển hình của điện áp giữa hai điện cực ($v(t)$), điện áp khe hở phóng điện ($v_g(t)$), điện áp phóng điện ($v_b(t)$), dòng điện trong mạch	40
Hình 2.5: Cấu hình của ống phóng tia Plasma	41
Hình 2.6: Sơ đồ nguyên lý của mô hình thí nghiệm	47

Hình 2.7: Sơ đồ đi dây của mô hình thí nghiệm.....	47
Hình 2.8: Cấu tạo ống phóng tia plasma	48
Hình 2.9: Hình ảnh mô hình thí nghiệm.....	48
Hình 2.10: Nguồn vô cấp 1 pha.....	49
Hình 2.11: Máy biến áp Neon.....	50
Hình 2.12: Nguyên lý hoạt động của biến dòng.....	51
Hình 2.13: Kích thước máy biến dòng điện	51
Hình 2.14: Hình ảnh máy biến dòng điện.....	51
Hình 2.15: Sơ đồ mạch bộ chia áp.....	52
Hình 2.16: Que đo cao áp TEKTRONIX P6015A (HV 1000:1)	53
Hình 2.17: Máy hiển thị sóng	53
Hình 2.18: Kết nối Oscilloscope với máy tính	54
Hình 2.19: Tụ lọc dùng trong mô hình thí nghiệm.....	55
Hình 2.20: Điện trở shunt	56
Hình 2.21: Hình ảnh sơ đồ bình khí nén khí Nitơ	57
Hình 3.1: Sơ đồ nguyên lý của mô hình thí nghiệm.....	59
Hình 3.2: Sơ đồ đi dây của mô hình thí nghiệm.....	60
Hình 3.3: Hình ảnh mô hình thí nghiệm sử dụng nguồn Neon tần số cao	61
Hình 3.4: Hình ảnh phóng điện tạo ra tia plasma khi thí nghiệm.....	62
Hình 3.5: Hình ảnh máy hiển sóng đo và lấy dữ liệu thí nghiệm.....	62
Hình 3.6: Hình ảnh từ máy hiển sóng ứng với biên độ điện áp $V_{pp}=9\text{ kV}$	62
Hình 3.7: Đặc tính V-A của tia plasma ứng với biên độ điện áp nguồn $V_{pp}=9\text{ kV}$	63
Hình 3.8: Hình ảnh từ máy hiển sóng ứng với biên độ điện áp $V_{pp}=9,8\text{ kV}$	64
Hình 3.9: Đặc tính V-A của tia plasma ứng với biên độ điện áp nguồn $V_{pp}=9,8\text{ kV}$	64
Hình 3.10: Dạng sóng giữa điện áp nguồn và dòng phóng điện qua điện trở Shunt được đo ở các biên độ điện áp khác nhau tương ứng (a) 10,6 kV; (b) 11,4 kV; (c) 12,2 kV; (d) 13 kV; (e) 13,8 kV; (f) 14,6 kV; (g) 15,4 kV và (h) 16,2 kV.....	65
Hình 3.11: Cơ chế phóng điện màn chắn điện môi với 4 giai đoạn	66
Hình 3.12: Cơ chế phóng điện màn chắn điện môi với 4 giai đoạn trong một chu kỳ.....	66
Hình 3.13: Kết quả xử lý tính xung trên ứng dụng của cấp điện áp 9 kV.....	67
Hình 3.14: Biểu đồ sự phụ thuộc biên độ điện áp đến số xung dòng phóng điện.....	68
Hình 3.15: Biểu đồ thể hiện ảnh hưởng biên độ điện áp tới độ lớn xung dòng phóng điện lớn nhất	68
Hình 3.16 Đường Lissajous và giá trị thu được ở cấp điện áp 9 kV	69
Hình 3.17 Đường Lissajous và giá trị thu được ở cấp điện áp 9,8 kV	69

Hình 3.18: Sự thay đổi công suất tiêu tán trên mục tiêu xử lí qua từng biên độ điện áp	70
Hình 3.19: Hộp chức năng Gadgets trên phần mềm	71
Hình 3.20: Hộp chức năng Integray trên phần mềm	71
Hình 3.21: Cài đặt chức năng cho phần mềm thực hiện tính toán	72
Hình 3.22: Năng lượng trong 2 nửa chu kì biên độ điện áp 9 kV	72
Hình 3.23: Năng nguồn cung cấp ứng với biên độ điện áp nguồn 9 kV	72
Hình 3.24: Ảnh hưởng của biên độ điện áp nguồn tới năng lượng nguồn cung cấp cho hệ thống trong một chu kỳ	73
Hình 3.25: Hình ảnh từ máy hiện sóng ứng với biên độ điện áp $V_{pp} = 9$ kV	74
Hình 3.26: Đặc tính V-A của tia plasma ứng với biên độ điện áp nguồn $V_{pp} = 9$ kV	74
Hình 3.27: Hình ảnh từ máy hiện sóng ứng với biên độ điện áp $V_{pp} = 9,8$ kV	75
Hình 3.28: Đặc tính V-A của tia plasma ứng với biên độ điện áp nguồn $V_{pp} = 9,8$ kV	75
Hình 3.29: Dạng sóng giữa điện áp nguồn và dòng phóng điện qua điện trở Shunt được đo ở các biên độ điện áp khác nhau tương ứng (a) 10,6 kV; (b) 11,4 kV; (c) 12,2 kV; (d) 13 kV; (e) 13,8 kV; (f) 14,6 kV; (g) 15,4 kV và (h) 16,2 kV	76
Hình 3.30: Biểu đồ sự phụ thuộc biên độ điện áp đến số xung dòng phóng điện	77
Hình 3.31: Biểu đồ thể hiện ảnh hưởng biên độ điện áp tới độ lớn xung dòng lớn nhất	78
Hình 3.32: Đường Lissajous và giá trị thu được ở cấp điện áp 9 kV	78
Hình 3.33: Đường Lissajous và giá trị thu được ở cấp điện áp 9,8 kV	78
Hình 3.34: Sự thay đổi công suất tiêu tán trên mục tiêu xử lí qua từng biên độ điện áp	79
Hình 3.35: Năng lượng trong 2 nửa chu kì biên độ điện áp 9 kV	80
Hình 3.36: Năng nguồn cung cấp ứng với biên độ điện áp nguồn 9 kV	80
Hình 3.37: Ảnh hưởng của biên độ điện áp nguồn tới năng lượng nguồn cung cấp cho hệ thống trong một chu kỳ	81
Hình 3.38: Quá trình bắn phá điện cực của ion trong điện môi	81
Hình 3.39: Số xung phóng điện giữa lưu lượng 1 slm và 3 slm	82
Hình 3.40: Độ lớn của xung phóng điện lớn nhất giữa lưu lượng 1 slm và 3 slm	83
Hình 3.41: Năng lượng nguồn cấp giữa lưu lượng 1 slm và 3 slm	84

DANH SÁCH CÁC CỤM TỪ VIẾT TẮT

CP	: Cold Plasma
DBD	: Dielectric Barrier Discharge
SDBD	: Surface Dielectric Barrier Discharge
CD	: Corona Discharge
HV	: High Voltage
MW	: Micro Wave
PJ	: Plasma Jet
GAD	: Gliding Arc Discharge
AC	: Alternating Current – Dòng điện xoay chiều
RF	: Radio Frequency
UV	: Ultraviolet – tia cực tím
AOT	: Advanced Oxidation Technology
ROS	: Reactive Oxygen Species
E	: Năng lượng trung bình của các hạt (eV)
N ₂	: Nitrogen
Ar	: Argon
He	: Helium

MỞ ĐẦU

Trong lĩnh vực khoa học và công nghệ, plasma là một trạng thái vật chất đặc biệt, với các ứng dụng phong phú trong công nghiệp, y học, và nghiên cứu vật liệu. Đặc biệt, plasma áp suất khí quyển ngày càng được chú trọng nhờ khả năng hoạt động hiệu quả mà không yêu cầu hệ thống chân không phức tạp, đồng thời mang lại hiệu quả cao trong xử lý bề mặt, khử trùng, và kiểm soát ô nhiễm. Việc nghiên cứu sâu hơn về đặc tính điện học của plasma sẽ góp phần nâng cao hiệu quả ứng dụng của nó trong nhiều lĩnh vực.

Đề tài nghiên cứu này tập trung vào việc tạo tia plasma ở áp suất khí quyển bằng phương pháp phóng điện màn chắn điện môi, sử dụng máy biến áp Neon. Phương pháp cho phép tạo ra tia plasma ổn định với các thông số dễ kiểm soát, giúp khảo sát chi tiết hơn các đặc tính điện học của plasma khi thay đổi các yếu tố như lưu lượng khí, điện áp nguồn xoay chiều và tần số. Mục tiêu của nghiên cứu không chỉ dừng lại ở việc làm rõ các yếu tố ảnh hưởng đến plasma mà còn hướng tới tối ưu hóa quá trình tạo plasma cho các ứng dụng thực tiễn.

Plasma đã và đang thu hút sự quan tâm lớn từ các nhà khoa học bởi khả năng hoạt động trong điều kiện thông thường mà không yêu cầu hệ thống chân không phức tạp. Plasma được xem là công cụ hữu ích trong nhiều lĩnh vực, từ xử lý bề mặt vật liệu đến các ứng dụng y sinh. Ở lĩnh vực công nghiệp, plasma hỗ trợ làm sạch, cải thiện đặc tính cơ học, hoặc tăng độ bền hóa học của các vật liệu. Trong y học, plasma đã được ứng dụng trong khử trùng, điều trị tổn thương mô mềm, và nghiên cứu các phản ứng sinh học ở cấp độ tế bào. Sự kết hợp giữa các ưu điểm khoa học và tiềm năng ứng dụng giúp plasma trở thành một chủ đề nghiên cứu không ngừng phát triển.

Đề tài hy vọng sẽ không chỉ mở ra các hướng đi mới trong lĩnh vực plasma, mà còn tạo nền tảng vững chắc cho các ứng dụng khoa học và công nghệ dựa trên plasma trong tương lai.

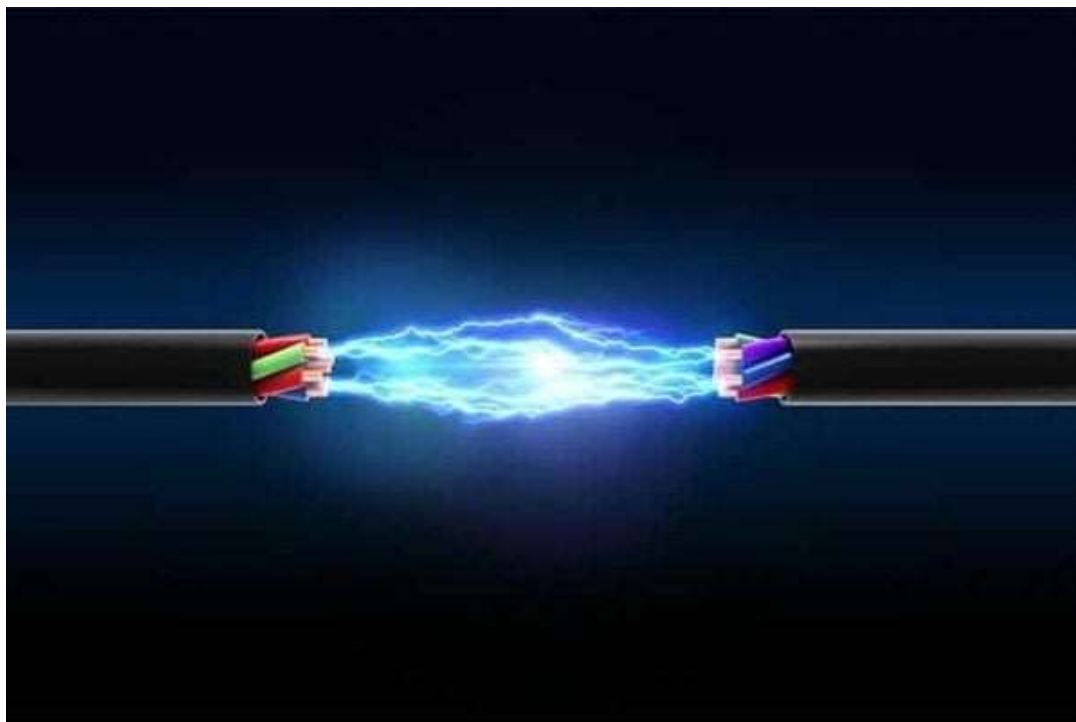
Chương 1: PHÓNG ĐIỆN TRONG CHẤT KHÍ VÀ TỔNG QUAN VỀ PLASMA

1.1 Tổng quan về phóng điện trong chất khí

Phóng điện trong chất khí là toàn bộ các hiện tượng dẫn đến sự xuất hiện dòng điện xuyên qua khoảng cách không khí dưới tác dụng của điện trường.

Phóng điện trong chất khí xảy ra khi dòng điện chạy qua chất khí, tạo ra các hiệu ứng ánh sáng và nhiệt đặc trưng. Thông thường, chất khí là chất cách điện, nhưng dưới tác động của một điện trường đủ mạnh hoặc các yếu tố khác, chất khí có thể bị ion hóa, tạo ra các hạt mang điện (ion dương, ion âm và electron tự do), từ đó dòng điện có thể chạy qua.

Phóng điện là hiện tượng quan trọng với nhiều ứng dụng công nghệ. Phóng điện đã được nghiên cứu từ giữa thế kỷ 19, khi người ta dùng ống phóng điện chứa đầy không khí và đặt một điện áp vào đủ lớn tạo ánh sáng. Phóng điện đã quen thuộc với chúng ta trong tự nhiên qua các hiện tượng từ cực quang, đến tia sét đi kèm giông bão. Về mặt công nghệ, phóng điện đã tìm thấy ở các ứng dụng khác nhau, từ đèn huỳnh quang, hàn, bảng hiệu quảng cáo bằng đèn neon cho đến bugi đánh lửa và các dụng cụ khử trùng. Các nhà nghiên cứu tiếp tục tìm ra những ứng dụng mới, đặc biệt là trong lĩnh vực y tế, từ làm sạch và chữa lành vết thương cho đến các ứng dụng nha khoa.



Hình 1.1: Phóng tia lửa điện trong không khí

1.2 Các dạng ion hóa xảy ra trong chất khí

Ion hóa là điều kiện tiên quyết để hiện tượng phóng điện trong chất khí có thể diễn ra. Khi các hạt trong chất khí bị ion hóa, chúng trở thành các hạt mang điện tự do (ion dương, ion âm và electron), cho phép dòng điện di chuyển qua môi trường vốn dĩ cách điện. Có 4 cơ chế ion hóa chính: ion hóa va chạm, ion hóa quang, ion hóa nhiệt, ion hóa bề mặt.

1.2.1 Ion hóa va chạm

Trong vật lý phóng điện, va chạm giữa các hạt là một hiện tượng rất quan trọng, các va chạm có thể chia thành va chạm đàn hồi và va chạm không đàn hồi

a. Va chạm đàn hồi là va chạm mà các nguyên tử sẽ văng ra khỏi nhau mà không có bất kỳ thay đổi nào về trạng thái bên trong của chúng. Điều này có nghĩa là động năng và động lượng được bảo toàn.

Phương trình bảo toàn động lượng

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}_1' + m_2 \vec{v}_2' \quad (1.1)$$

Phương trình bảo toàn năng lượng (động năng)

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \quad (1.2)$$

Giả sử một phân tử chuyển động va chạm với phân tử đứng yên, trong chuyển động nhiệt vận tốc của điện tử (electron) lớn hơn rất nhiều so với vận tốc của các ion, xem các ion là đứng yên nên $V_2 = 0$. Như vậy phân tử 1 (điện tử):

$$v_1' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1 \quad ; \quad W_1' = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 \quad (1.3)$$

Phân tử 2 (ion):

$$v_2' = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1 \quad ; \quad W_1' = \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \quad (1.4)$$

Trường hợp 1: Va chạm các nguyên tử, phân tử có khối lượng xấp xỉ nhau ($m_1 \approx m_2$)

$$v_1' = 0; W_1' = 0; v_2' = v_1; W_2' = W_1 \quad (1.5)$$

Va chạm giữa ion và nguyên tử/phân tử xảy ra chuyển toàn bộ động năng từ phân tử 1 sang phân tử 2

Trường hợp 2: Va chạm giữa điện tử có khối lượng m_1 và ion, các phân tử có khối lượng m_2 (với $m_2 \gg m_1$)

$$v_1' = \frac{-m_2}{m_2} v_1 = -v_1 \quad ; \quad W_1' = W_1 \quad (1.6)$$

$$v_2' = \frac{2m_1}{m_2} v_1 \approx 0 \quad ; \quad W_2' \approx 0 \quad (1.7)$$

Va chạm giữa điện tử và phân tử/nguyên tử làm cho điện tử tích lũy động năng

b. Va chạm không đàn hồi là va chạm mà các nguyên tử có thể dính vào nhau hoặc thay đổi trạng thái bên trong của chúng. Điều này có thể dẫn đến sự hình thành các phân tử mới hoặc thay đổi trạng thái năng lượng, thường dẫn đến giải phóng hoặc hấp thụ năng lượng.

Từ phương trình bảo toàn động lượng (1.1) và phương trình bảo toàn năng lượng (1.2), ta có:

W_i : năng lượng chuyển đổi có thể dạng nhiệt hoặc năng lượng để ion hóa

$$W_i = \frac{1}{2}m_1(v_1^2 - v_1'^2 - \frac{m_2}{m_1}v_2'^2) \quad (1.8)$$

Từ

$$v_2' = \frac{m_1v_1 - m_2v_1'}{m_2} \quad ; (v_2 \approx 0) \quad (1.9)$$

Thế vào

$$W_i = \frac{1}{2}m_1(v_1^2 - v_1'^2 - \frac{m_1}{m_2}(v_1 - v_1')^2) \quad (1.10)$$

Xác định W_i max bằng $\frac{dW_i}{dv_1'} = 0$

$$0 - 2v_1' - \frac{m_1}{m_2}(0 - 2v_1 + 2v_1') = 0 \quad (1.11)$$

$$2v_1' = \frac{m_1}{m_2}(2v_1 + 2v_1') \quad (1.12)$$

Sau khi va chạm hai phân tử di chuyển cùng vận tốc

$$v_1' = \frac{m_1v_1}{m_1 + m_2} \quad (1.13)$$

$$v_2' = \frac{m_1v_1}{m_1 + m_2} = v_1' \quad (1.14)$$

Suy ra:

$$W_i^{max} = \frac{1}{2}m_1v_1^2 \frac{m_2}{m_1 + m_2} \quad (1.15)$$

Trường hợp 1: Va chạm các nguyên tử, phân tử có khối lượng xấp xỉ nhau ($m_1 \approx m_2$)

$$W_i^{max} = \frac{1}{4}m_1v_1^2 \quad (1.16)$$

Các nguyên tử, phân tử chỉ có thể chuyển $\frac{1}{2}$ động năng thành W_i

Trường hợp 2: Va chạm giữa điện tử có khối lượng m_1 và ion, các phân tử có khối lượng m_2 (với $m_2 \gg m_1$)

$$W_i^{max} = \frac{1}{2}m_1v_1^2 \quad (1.17)$$

Các điện tử chỉ có thể chuyển toàn bộ động năng thành W_i

Quá trình ion hóa là phần quan trọng trong phóng điện tối (townsend) và các giai đoạn phóng điện tiếp theo. Các electron tự do (thường xuất hiện từ hiện tượng bức xạ hoặc từ các phát xạ ở điện cực âm) va chạm với các phân tử khí trung hòa và truyền đủ năng lượng để tạo ra các cặp electron – ion mới. Cơ chế này được tăng cường dưới điện trường cao giúp các electron tự do đạt đến vận tốc và năng lượng cần thiết.

$$W = \frac{mv^2}{2} \geq W_i \quad (1.18)$$

Trong đó: m - là khối lượng của các hạt (ion, electron, nguyên tử, phân tử)
 v - tốc độ của hạt
 W_i - Năng lượng ion hóa
 W - Năng lượng của hạt

1.2.2 Ion hóa quang (photoionization)

Đây là hiện tượng ion hóa xảy ra khi các phân tử khí hấp thụ photon có năng lượng đủ lớn (thường trong dải tia cực tím hoặc tia X), từ đó khiến các electron rời khỏi nguyên tử. Trong phóng điện vàng quang hoặc các quá trình plasma không cân bằng, quang ion hóa có vai trò quan trọng trong việc tạo ra các hạt electron ban đầu.

Năng lượng cần thiết để ion hóa:

$$W = hf \geq V \quad (1.19)$$

Phương trình kích thích

$$hf + A \xrightarrow{hf < V_i} A^* \quad (1.20)$$

Phương trình ion hóa

$$hf + A \xrightarrow{hf \geq V_i} A^+ + e^- \quad (1.21)$$

Trong đó: $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ (J.s) hằng số Planck

f - Tần số của bức

V_i - Năng lượng ion hóa

A^* - Nguyên tử ở trạng thái kích thích

A^+ - Nguyên tử ở trạng thái ion hóa

Với

$$f = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow hf = \frac{hc}{\lambda} \geq V_i \Leftrightarrow \lambda \leq \frac{hc}{V_i} \quad (1.22)$$

Khi một photon có năng lượng đủ lớn va chạm với một nguyên tử hoặc phân tử, nó có thể gây ra ion hóa bằng cách tách ra một hoặc nhiều electron ra khỏi nguyên tử, phân tử trung hòa. Khi electron bị tách ra, nguyên tử hoặc phân tử ban đầu trở thành một dạng

hạt mang điện tích dương hoặc điện tích âm tùy thuộc vào việc electron bị mất hoặc thêm vào.

1.2.3 Ion hóa nhiệt

Ở nhiệt độ rất cao, các phân tử khí có thể tự động ion hóa do năng lượng nhiệt đủ lớn. Quá trình này quan trọng trong các điều kiện plasma nhiệt, nơi mà nhiệt độ cao duy trì sự ion hóa trong chất khí.

Năng lượng nhiệt và nhiệt độ cần thiết để xảy ra quá trình ion hóa:

$$W = \frac{3}{2}kT \geq W_i \quad (1.23)$$

Trong đó: T - nhiệt độ tuyệt đối của chất khí ($^{\circ}K$)

$k = 1,37 \cdot 10^{-23} J/K$ - hằng số Boltzmann

Khi nhiệt độ tăng lên đủ cao, các electron trong nguyên tử hoặc phân tử sẽ nhận được đủ năng lượng để vượt qua lực hấp dẫn của hạt nhân và bị tách ra. Kết quả là nguyên tử hoặc phân tử ban đầu trở thành một ion và một electron tự do. Quá trình này thường xảy ra trong các ứng dụng liên quan đến điện tử, chẳng hạn như trong thiết bị phát điện tử nóng, trong đó nhiệt độ cao được sử dụng để tạo ra electron tự do từ các vật liệu.

1.2.4 Ion hóa bề mặt

Ion hóa bề mặt là một hiện tượng trong đó các electron bị tách ra từ bề mặt của một vật thể, chẳng hạn như một kim loại, khi nhiệt độ tăng lên đủ cao hoặc khi nó tiếp xúc với một chất khác có khả năng tạo ra các ion. Hiện tượng này thường xảy ra ở nhiệt độ thấp hơn so với ion hóa nhiệt trong nguyên tử hoặc phân tử.

$$h\nu = W_i + \Delta W_k \quad (1.24)$$

Trong đó: h - là hằng số Plank, $h = 6,5 \cdot 10^{-27} J/s$

ΔW_k - là sự chênh lệch tổng năng lượng của phân tử trước và sau khi va chạm.

Trong ion hóa bề mặt, các electron bị tách ra từ bề mặt của vật thể do sự tương tác giữa bề mặt và các phân tử khác hoặc các ion trong môi trường. Điều này có thể xảy ra khi nhiệt độ tăng lên hoặc khi có sự tiếp xúc với một chất khác có khả năng chấp nhận electron từ bề mặt vật thể.

Ion hóa bề mặt thường được sử dụng trong các thiết bị và ứng dụng liên quan đến điện tử và quang học, cũng như trong nghiên cứu về tương tác giữa các bề mặt và vật chất xung quanh. Hiện tượng này có ý nghĩa trong việc nghiên cứu về các hiện tượng

trên bề mặt, phân tích bề mặt của các vật liệu và trong các thiết bị như cảm biến và các loại quá trình điện tử.

1.3 Năng lượng ion hóa

Năng lượng ion hóa là năng lượng cần thiết để tách electron ra khỏi nguyên tử ở trạng thái cơ bản. Dạng năng lượng này ký hiệu là I , đơn vị là kJ/mol. Năng lượng ion này được phân chia ra làm nhiều loại và được gọi theo thứ tự xuất hiện như năng lượng ion hóa thứ nhất, thứ 2, thứ 3,...

Năng lượng ion hóa thứ nhất là một dạng năng lượng cần thiết để tách electron thứ nhất ra khỏi nguyên tử, ký hiệu là I_1 . Khi bán kính nguyên tử càng lớn, lực liên kết giữa hạt nhân và electron ngoài cùng càng nhỏ nên electron bứt ra khỏi nguyên tử càng dễ dàng, năng lượng cần để bứt electron ra khỏi nguyên tử càng nhỏ. Tiếp đó năng lượng ion hóa thứ 2 (I_2), thứ 3 (I_3) là dạng năng lượng cần thiết để tách electron thứ 2, thứ 3 ra khỏi các ion tương ứng và giá trị của chúng lớn hơn I_1 .

Năng lượng của các hạt cơ bản như electron, photon, proton thường rất nhỏ so với các năng lượng trong các hệ thống vĩ mô. Khi sử dụng joules, các giá trị này sẽ rất nhỏ và khó đo đếm. Do đó, việc sử dụng eV giúp làm giảm số lượng chữ số thập phân và dễ dàng làm việc với các con số này.

Electronvolt là năng lượng mà một electron nhận được khi nó di chuyển qua một hiệu điện thế là 1 volt. Một electron có một điện tích e (với giá trị khoảng 1.602×10^{-19} coulombs) và khi điện tích e bị đẩy qua một hiệu điện thế 1 volt, nó sẽ nhận được một năng lượng bằng 1 eV.

$$E = eV \quad (1.25)$$

Trong đó: E là năng lượng (eV)

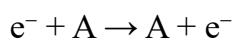
e là điện tích của electron ($e = 1.602 \times 10^{-19}$ C)

V là hiệu điện thế (V)

Do đó: $1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-19}$ joules (J)

1.4 Các phản ứng xảy ra trong môi trường chất khí bị ion hóa

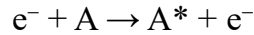
a. Các phản ứng xảy ra trong môi trường chất khí khi có va chạm giữa electron và các phân tử trung hòa.



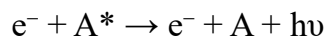
Khi e^- tương tác với nguyên tử trung hòa A xảy ra va chạm đàn hồi, kết quả phân tử A vẫn trung hòa. Phản ứng này giúp tạo ra các electron nhiệt.



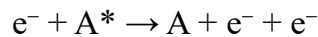
Khi e^- tương tác với nguyên tử trung hòa A xảy ra va chạm không đàn hồi và dẫn tới phản ứng ion hóa, phản ứng trao đổi năng lượng làm cho electron trong nguyên tử A đủ năng lượng để thoát ra tạo thành e^- thứ cấp, kết quả phản ứng là ion A^+ , các e^- thứ cấp. Phản ứng này giúp tăng độ dẫn điện.



Khi e^- va chạm không đàn hồi với nguyên tử trung hòa A, năng lượng trao đổi giữa e^- và A chưa đạt mức năng lượng ion hóa nên xảy ra phản ứng kích thích, phản ứng trao đổi năng lượng tuy nhiên năng lượng cung cấp chưa đủ để làm electron trong nguyên tử A thoát ra, kết quả là nguyên tử A bị kích thích, tuy nhiên trạng thái này không thể tồn tại lâu vì nguyên tử có xu hướng trở về trạng thái bền vững ban đầu và giải phóng năng lượng dưới dạng bức xạ.

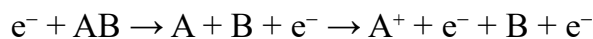


Phản ứng này tạo ra hiệu ứng phát sáng có thể nhận thấy được.

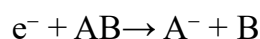


Khi e^- tiếp tục tương tác với nguyên tử A đang bị kích thích xảy ra phản ứng ion hóa bước 2, nguyên tử A đang bị kích thích được cung cấp đủ năng lượng làm cho electron thoát ra, kết quả tạo ra các e^- thứ cấp và nguyên tử A trung hòa.

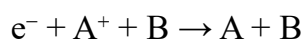
Phản ứng ion hóa bước 2 giống với phản ứng ion hóa, tuy nhiên phản ứng ion hóa bước 2 chỉ xảy ra với phân tử khí đa nguyên tử.



Khi e^- tương tác với phân tử AB xảy ra phản ứng phân mảnh ion hóa phân ly, e^- tương tác lần lượt với từng nguyên tử trong phân tử AB, kết quả tạo ra các e^- thứ cấp, ion A^+ và nguyên tử B.

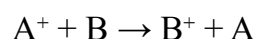


Hoặc phản ứng kết hợp phân ly, kết quả tạo ra ion A^- và nguyên tử B.

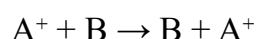


Khi e^- tương tác với ion A^+ và nguyên tử B xảy ra phản ứng tái hợp môi trường, ion dương A^+ kết hợp với e^- để tạo ra nguyên tử trung hòa, kết quả sau phản ứng là hai nguyên tử A và B trung hòa. Môi trường bị suy giảm vì không có e^- tự do.

b. Các phản ứng xảy ra trong chất khí khi có sự va chạm giữa nguyên tử ion và các phân tử đơn nguyên tử trung hòa



Khi ion A^+ tương tác với nguyên tử trung hòa B xảy ra phản ứng trao đổi điện tích, kết quả tạo ra ion B^+ và nguyên tử trung hòa A.



Khi ion A^+ tương tác với nguyên tử trung hòa B xảy ra phản ứng tán xạ, kết quả vẫn tạo ra ion A^+ và nguyên tử trung hòa B.



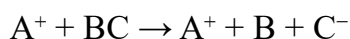
Hoặc ion A^+ tương tác với nguyên tử trung hòa B xảy ra phản ứng kích thích, kết quả tạo ra ion A^+ , e^- tự do và nguyên tử B bị kích thích.



Hoặc ion A^+ tương tác với nguyên tử trung hòa B xảy ra phản ứng ion hóa, các electron nguyên tử B được cung cấp đủ năng lượng để thoát ra ngoài, kết quả tạo ra 2 ion dương A^+ , B^+ và e^- tự do.



Khi nguyên tử A tương tác với nguyên tử B đang bị kích thích xảy ra phản ứng ion hóa Penning, electron trong nguyên tử A và nguyên tử B đang bị kích thích được cung cấp đủ năng lượng để thoát ra tạo thành các e^- tự do, kết quả tạo ra các phân tử đơn nguyên tử A^+ , B^+ và e^- tự do.



Khi ion A^+ tương tác với phân tử trung hòa BC xảy ra phản ứng phân mảnh, phân tử BC được cung cấp đủ năng lượng tách ra thành nguyên tử B và ion âm C^- , kết quả tạo ra ion A^+ , C^- và nguyên tử B.



Khi e^- tương tác với ion A^+ và nguyên tử B xảy ra phản ứng tái tạo môi trường, ion A^+ nhận thêm electron để quay trở về trạng thái trung hòa, kết quả tạo ra nguyên tử A và B

1.5 Quá trình hình thành phóng điện trong chất khí

1.5.1 Sự hình thành phóng điện trong chất khí

Các chất khí không phải là chất cách điện lí tưởng chỉ chứa các phân tử trung hòa, trong chất khí luôn tồn tại một số ion và điện tử tự do. Bình thường các điện tích và điện tử tự do này luôn ở trong trạng thái chuyển động nhiệt. Khi có điện trường bên ngoài tác động chúng sẽ chuyển động theo phương của điện trường và tạo nên dòng điện dẫn trong điện môi.



Hình 1.2: Quá trình hình thành phóng điện

Song song với sự phát sinh của điện tử kèm theo sự phát sinh của ion dương với cùng số lượng và các điện tích này sẽ tập hợp thành các thác điện tử.

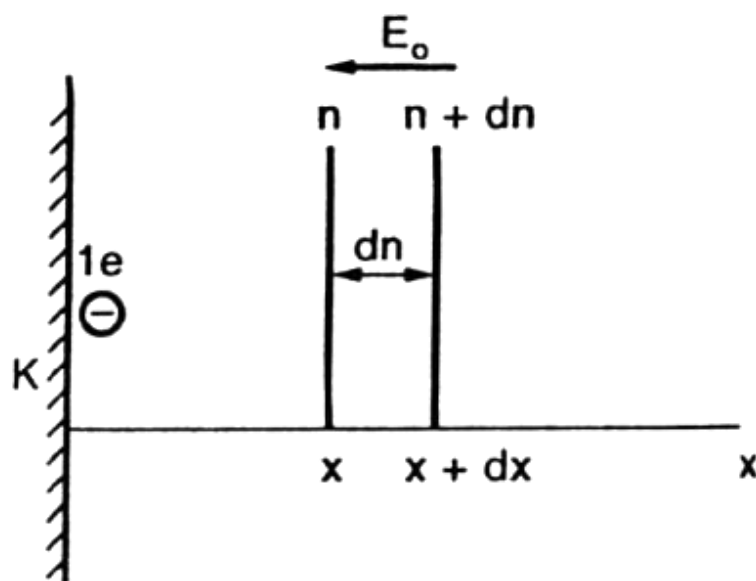
Các electron do có khối lượng nhẹ hơn rất nhiều so với nguyên tử nên di chuyển với tốc độ nhanh đồng thời dễ khuếch tán phân bố trong khoảng không gian tương đối rộng. Còn các ion dương nặng di chuyển chậm cho nên tập trung ở phía sau.

$$(V_{ion+} = \frac{1}{100} V_{e-}) \quad (1.26)$$

Dưới tác dụng của điện trường thì các electron âm càng ngày càng được kéo dài ra cho đến lúc nó nối liền khoảng cách giữa các điện cực. Lúc đó thác sẽ tự triệt tiêu bởi vì các điện tích khác dấu đã được trung hòa trên các điện cực đối diện.

Quá trình này chưa thể gọi là phóng điện được bởi vì chưa hình thành dòng liên tục giữa các cực. Do đó để hình thành phóng điện trong chất khí thì cần có đủ hai quá trình đó là ion hoá chất khí và hình thành thác điện tử.

1.5.2 Quá trình hình thành thác điện tử



Hình 1.3: Phương trình trên trục thời gian

Giả thuyết ban đầu ở phía âm cực có tồn tại một điện tử tự do. Dưới tác dụng của điện trường, điện tử tự do sẽ dịch chuyển về phía cực dương. Trong quá trình di chuyển đó sẽ gây ion hoá và chạm với các phân tử khí trung hoà với hệ số ion hoá va chạm α . Các điện tử thứ cấp mới sinh ra này lại tiếp tục dịch chuyển, cũng gây nên hiện tượng ion hoá va chạm, hay là số điện tử sinh ra giữa hai bản cực càng ngày càng nhiều.

Phương trình toán của quá trình hình thành thác điện tử:

Giả sử ở tọa độ x có n điện tử, ở tọa độ $x+dx$ có $n+dn$ điện tử. Như vậy số điện tử sinh ra trong quãng đường dx là:

$$dn = n \cdot \alpha \cdot dx \Rightarrow \frac{dn}{n} = \alpha \cdot dx \Rightarrow n = e^{\alpha \cdot x} \quad (1.27)$$

$$\alpha = f(p, E) \quad (1.28)$$

Trong đó: p là áp suất không khí

E là cường độ điện trường

α là hệ số ion hóa và chạm điện tử

Tách các biến số và lấy tích phân theo n từ 1 đến n và theo x từ 0 đến x

$$\int_1^n \frac{dn}{n} = \int_0^x \alpha \cdot dx \quad (1.29)$$

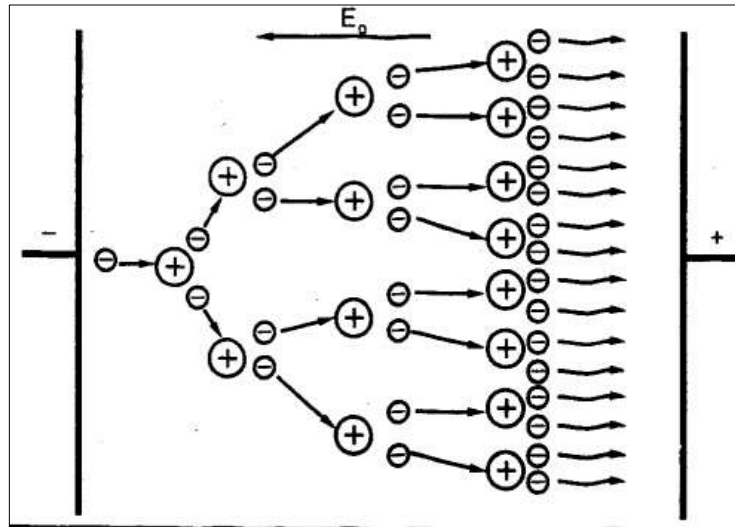
Sẽ xác định được

$$n = e^{\int_0^x \alpha \cdot dx} \quad (1.30)$$

Nếu p, E là hằng số thì α cũng là hằng số

$$n = e^{\int_0^x \alpha \cdot dx} \quad (1.31)$$

Như vậy qui luật tăng điện tích là qui luật hàm số mũ. Song song với quá trình sinh điện tử cũng sinh ra các ion dương cùng khối lượng và chúng tập hợp lại tạo thành thác điện tử.



Hình 1.4: Quá trình hình thành các thác điện tử

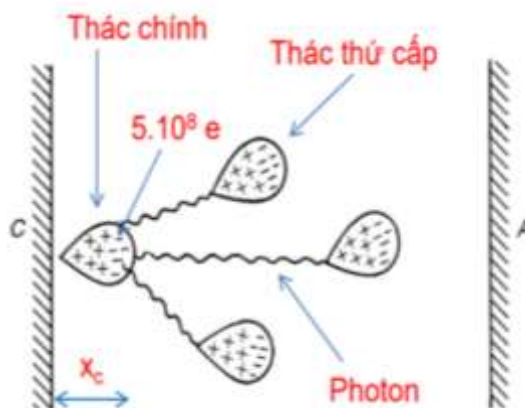
Cứ sau mỗi lần va chạm ion hóa lại xuất hiện thêm một điện tử tự do. Các điện tử mới xuất hiện cũng được gia tốc bởi điện trường và cũng tham gia vào quá trình ion hóa và chạm chất khí, do đó số điện tử tự do tăng lên theo cấp số nhân (hình 1.4).

Dòng điện tử tăng lên ở ạt này được gọi là thác điện tử. Số điện tử tự do nhẹ, có tốc độ lớn và dễ khuếch tán sẽ dồn về phía đầu thác và tỏa rộng, còn các ion dương có khối lượng lớn, tốc độ chậm phân bố rải rác và thu hẹp dần từ thân thác đến đuôi thác.

Quá trình ion hoá chất khí sẽ đưa đến sự hình thành thác điện tích trong khu vực giữa hai điện cực. Nếu tiếp tục tăng điện áp thác điện tích phát triển mạnh, khi mật độ

điện tích đủ lớn sẽ gây nên sự phóng điện trong điện môi khí tạo thành dòng plasma nối liền giữa hai điện cực.

Lý thuyết phóng điện dòng điện tử được Reather (1964) đưa ra rằng khi số lượng điện tử tại đầu thác chính đạt 5.10^8 làm điện trường E tăng cao dẫn đến phát tán photon từ đó xảy ra ion hóa quang, quang điện tử và cùng dẫn đến các thác thứ cấp. Thác thứ cấp gắn liền với thác chính tạo kênh dẫn plasma dẫn điện tốt phát triển nhanh về phía điện cực đối diện



Hình 1.5: Thác điện tử thứ cấp

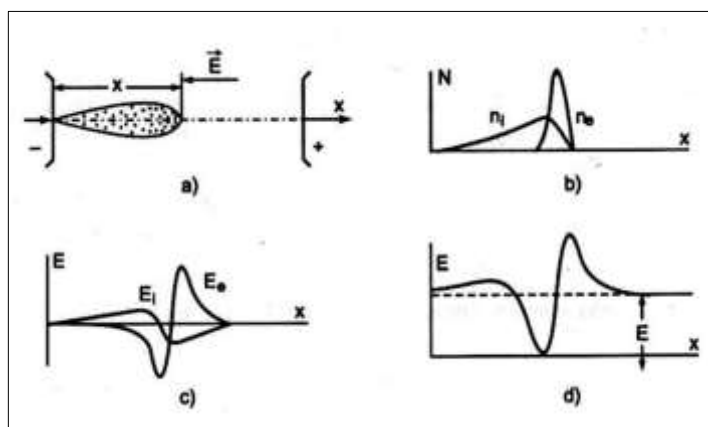
Điều kiện chuyển từ thác điện tử sang dòng điện tử là:

$$E_r = \frac{5,27 \times 10^{-7} \alpha \exp(\alpha x_c)}{(x_c/p)^{1/2}} \text{ (V/cm)} \quad (1.32)$$

Điều kiện áp dụng: Áp suất khí quyển hoặc cao hơn và $Pd > 1000 \text{ mmHg.cm}$
(P: áp suất, d: khoảng cách)

Hiện tượng xảy ra khi thời gian phóng điện nhỏ: 10^{-8}s (phóng điện Townsend: 10^{-5}s) và chỉ cần một thác điện tử duy nhất có thể phát triển thành phóng điện đánh thủng

Để xem xét, chúng ta xét quá trình ion hoá chất khí giữa hai điện cực với nguồn điện áp một chiều (Hình 1.6). Điện trường bên ngoài $\vec{E}$ có chiều từ cực dương (+) đến cực âm (-).



Hình 1.6: Thác điện tử và sự biến dạng của điện trường

Hình 1.6a: Do điện tử bé và nhẹ nên có tốc độ lớn và dễ khuếch tán đẩy về phía đầu thác và rải trên khoảng không gian rộng. Các ion dương có khối lượng lớn nên di chuyển với tốc độ chậm hơn phân bố ở khu vực thân và đuôi thác.

Hình 1.6b: Sự phân bố điện tử tự do (n_e) và ion dương (n_i).

Hình 1.6c: Thác điện tử tạo nên điện trường phụ E_e và E_i làm biến dạng điện trường ngoài E .

Hình 1.6d: Tổng điện trường bên ngoài E và các điện trường phụ. Ta thấy đầu thác điện trường tăng nhiều nhưng phía sau đầu thác trường giảm đột ngột.

Đầu thác điện trường tăng cao hơn điện trường ngoài để dễ dàng gây nên ion hóa phân khí tiếp theo từ đó tạo nên các thác điện tử mới hướng về phía điện cực đối diện.

Mặt khác do điện trường trường tăng cao làm cho các phân tử khí ở gần bị kích thích dẫn đến khi trở lại trạng thái bình thường sẽ trả lại năng lượng dưới dạng photon. Đồng thời, phía sau đầu thác do trường giảm đột ngột nên xảy ra hiện tượng kết hợp nên trả lại năng lượng dưới dạng photon.

Các photon này có khả năng gây nên ion hóa quang các phân tử khí hoặc giải thoát điện tử từ bề mặt điện cực làm tăng số lượng điện tích và để kế tiếp vào thác điện tử đầu tiên.

Dưới tác dụng của điện trường, thác điện tử càng được phát triển và kéo dài ra. Khi tiếp cận các điện cực, các điện tích của thác sẽ trung hòa trên điện cực cuối cùng kết thúc quá trình hình thành và phát triển thác điện tử. Thác điện tử chưa gọi là phóng điện vì chưa tạo nên dòng điện lưu thông liên tục giữa hai điện cực.

Để hình thành phóng điện cần phải xuất hiện các điện tử mới để hình thành các thác mới, các điện tử này phải được hình thành ngay từ các quá trình xảy ra trong khe hở mà không phải do các nhân tố ion hóa bên ngoài và phải xuất hiện trước khi thác thứ nhất kết thúc. Điện tử thứ cấp được phát sinh do:

- Sự bắn phá của ion dương vào cực âm để giải thoát điện tử (ion hóa bề mặt).
- Ion hóa quang trong nội bộ chất khí (do bức xạ của thác thứ nhất).
- Hiệu ứng quang giải thoát điện tử từ bề mặt cực âm cathode (do bức xạ của thác thứ nhất).

Khi thác điện tích có mật độ ion lớn (khoảng 10^{12} ion/cm³) và gần tiếp cận với cực dương anode, toàn bộ điện áp giữa 2 điện cực dồn đặt lên một khe hở hẹp, tại đó cường độ điện trường lớn làm bứt các ion dương từ cực dương chuyển động theo chiều ngược lại của thác điện tử.

Khi chúng hòa nhập làm một sẽ gây nên phóng điện chọc thủng chất khí tạo thành dòng plasma kết thúc bằng quá trình phóng điện.

1.5.3 Quan hệ giữa dòng điện và điện áp trong chất khí

Trong điện môi khí tồn tại song song

Quá trình ion hóa tự nhiên: là quá trình biến đổi nguyên tử thành ion dương và điện tử tự do do các nguồn năng lượng tự nhiên gây ra. Quá trình này luôn xảy ra trong điện môi khí.

Quá trình tái hợp: là quá trình kết hợp giữa các điện tích trái dấu tạo thành phân tử trung hòa.

Trạng thái cân bằng của điện môi đạt được khi số điện tích xuất hiện do ion hóa cân bằng với số điện tích bị tái hợp.

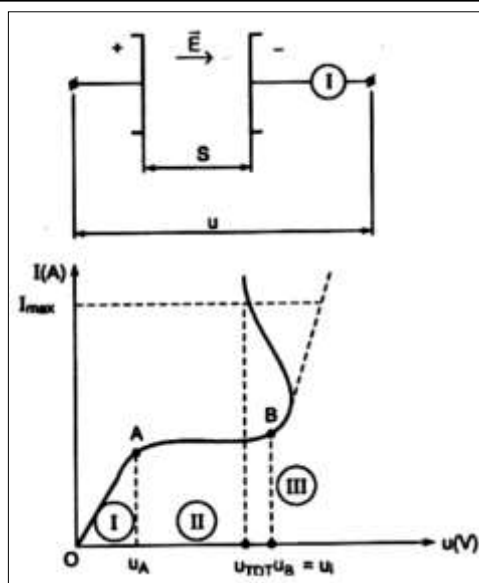
Dưới tác dụng của điện trường bé, các điện tích được sinh ra bởi quá trình ion hóa tự nhiên sẽ chuyển động tạo nên dòng điện dẫn trong điện môi khí: “*dòng điện dẫn không tự duy trì*”. Dòng điện này hoàn toàn phụ thuộc vào các nguồn năng lượng tự nhiên.

Khi cường độ điện trường đặt lên điện môi đủ lớn, những điện tích có trong điện môi nhận được năng lượng và tăng tốc độ chuyển động, khi va chạm với phân tử trung hòa sẽ gây nên ion hóa va chạm. Khi đó, số lượng điện tích tạo nên tăng theo hàm số mũ và dẫn đến dòng điện dẫn tăng. Các điện tích trong dòng điện này chủ yếu được tạo ra bởi ion hóa va chạm (do năng lượng của điện trường), không còn phụ thuộc các yếu tố tự nhiên, nên gọi là “*dòng điện dẫn tự duy trì*”.

Cho điện áp một chiều tác dụng lên hai điện cực, tăng dần trị số điện áp.

Qua hình 1.7 chúng ta thấy trong giai đoạn từ O đến A ($u = 0 + u_A$) các ion và điện tử tự do có sẵn trong chất khí (do yếu tố ion hoá bên ngoài) dưới tác dụng của điện trường sẽ chuyển động về các điện cực và tạo nên dòng điện. Khi điện áp (u) tăng thì cường độ điện trường giữa hai điện cực có khoảng cách (s) sẽ tăng ($E = \frac{u}{s}$), lực tác dụng lên các điện tích sẽ tăng lên ($\vec{F} = q\vec{E}$), do vậy tốc độ chuyển động của các điện tích tăng và dòng điện sẽ tăng tuyến tính theo định luật Ohm (Vùng I). Ở trong vùng I các điện tích dương và âm có thể kết hợp với nhau thành phân tử trung hoà. Ở điểm A có điện áp cao, tốc độ chuyển động của các điện tích lớn, quá trình tăng của dòng điện chấm dứt vì toàn bộ các điện tích đều đạt tới điện cực.

Giai đoạn từ A đến B là giai đoạn bão hoà ($u = u_A + u_B$). Trong vùng II này dòng điện vẫn được duy trì nhưng không tăng là do số lượng điện tích sinh ra bởi nhân tố ion hoá bên ngoài có hạn. Tốc độ chuyển động của các điện tích khá cao, có bao nhiêu điện tích sinh ra thì có bấy nhiêu điện tích đi về các điện cực hết (không còn sự kết hợp) và dòng điện đạt trị số bão hoà.



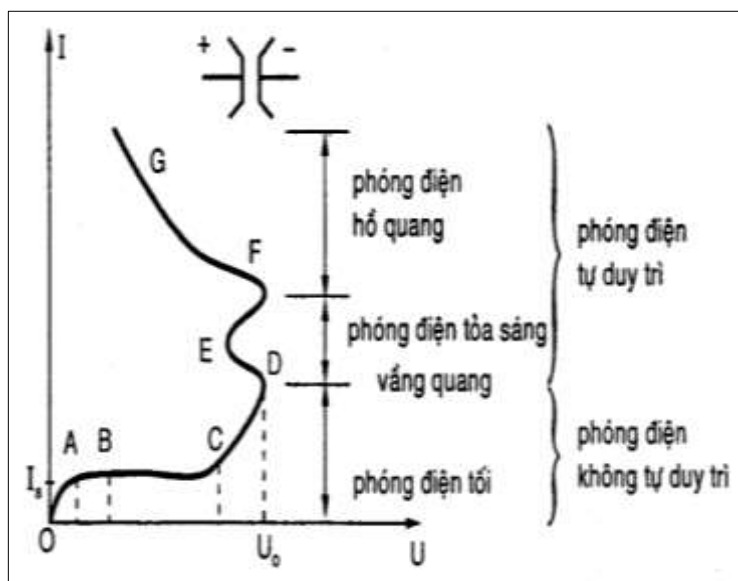
Hình 1.7: Đặc tính Volt – Ampe của chất khí

Giai đoạn sau điểm B ($u > u_B = u_i$): Nếu cho điện áp tiếp tục tăng, cường độ điện trường tăng cao và tốc độ chuyển động của các điện tích khá lớn, khi va chạm với phân tử trung hoà sẽ gây nên ion hoá mãnh liệt. Số lượng điện tích tăng lên theo hàm số mũ, do đó dòng điện tăng vọt lên và gây phóng điện giữa hai điện cực [4].

1.6 Các dạng phóng điện trong chất khí và các yếu tố ảnh hưởng đến phóng điện trong chất khí

1.6.1 Các dạng phóng điện trong chất khí

Phóng điện trong chất khí không phải là một hiện tượng xảy ra đồng nhất, mà nó trải qua nhiều giai đoạn tùy thuộc vào cường độ điện trường và mức độ ion hóa. Các giai đoạn chính của phóng điện trong chất khí bao gồm:



Hình 1.8: Các dạng phóng điện trong chất khí

a. Phóng điện tối (Dark discharge – đoạn AC)

Ở mức điện áp rất thấp, chỉ có một số ít electron và ion tự do tồn tại trong chất khí. Lượng dòng điện qua chất khí nhỏ đến mức không thể quan sát được bằng mắt thường, và không có ánh sáng phát ra. Đây được gọi là phóng điện âm thầm. Dù dòng điện rất yếu, các hạt ion vẫn có thể tương tác với các bề mặt và tạo ra các hiện tượng vi mô khác nhau.

b. Phóng điện vàng quang (Corona discharge – đoạn CD)

Phóng điện vàng quang là một dạng phóng điện đặc biệt chỉ tồn tại trong điện trường không đồng nhất và xuất hiện trong khu vực xung quanh điện cực. Dạng phóng điện này không hoàn toàn vì dòng plasma không nối liền giữa 2 điện cực và do đó không có dòng điện lớn. Phóng điện vàng quang chưa làm mất hẳn tính chất cách điện của khe hở nhưng cũng không nên để gây phóng điện vàng quang vì có nhiều tác hại khác. Phóng điện vàng quang cũng có thể quan sát bằng mắt thường và dễ dàng thấy trên đường dây tải điện cao áp khi thời tiết xấu

c. Phóng điện tỏa sáng (Glow discharge – đoạn DEF)

Ở mức điện áp cao hơn nữa, sự ion hóa trở nên mạnh mẽ, và các electron va chạm với phân tử khí, kích thích chúng. Khi các phân tử khí quay trở lại trạng thái cơ bản, chúng phát ra năng lượng dưới dạng ánh sáng, tạo ra hiện tượng phát sáng mà ta thường thấy trong đèn neon hoặc ống phóng điện. Trong giai đoạn này, plasma không cân bằng xuất hiện với nhiệt độ electron cao hơn nhiệt độ ion và nguyên tử trung hòa, điều này tạo ra nhiều ứng dụng trong lĩnh vực kỹ thuật plasma không nhiệt.

d. Phóng điện hồ quang (Arc discharge – đoạn FG)

Khi điện áp tiếp tục tăng lên, dòng điện qua chất khí đạt đến một mức cao hơn nữa. Plasma nhiệt độ cao được hình thành, với cả electron và ion đều đạt nhiệt độ cao. Trong giai đoạn này, chất khí trở thành một chất dẫn điện mạnh mẽ, có thể thấy trong các ứng dụng như hàn hồ quang và cắt plasma.

e. Phóng điện tia lửa (Spark discharge – đoạn EG)

Phóng điện tia lửa là hiện tượng mà dòng điện mạnh mẽ di chuyển qua chất khí trong thời gian rất ngắn khi điện áp cao đột ngột tạo ra một đường dẫn ion hóa hoàn toàn giữa hai điện cực. Ví dụ điển hình là hiện tượng tia sét tự nhiên trong khí quyển hoặc hiện tượng phóng điện trong các thiết bị đánh lửa của động cơ.

1.6.2 Các yếu tố ảnh hưởng đến phóng điện trong chất khí

Nhiều yếu tố có thể ảnh hưởng đến quá trình phóng điện trong chất khí, bao gồm:

Áp suất của chất khí - Áp suất cao làm tăng mật độ phân tử khí, từ đó tăng tần suất va chạm giữa các hạt, tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình ion hóa. Tuy nhiên, nếu

áp suất quá cao, va chạm giữa các hạt có thể làm giảm động năng của electron, cản trở quá trình ion hóa. Ngược lại, ở áp suất rất thấp (chân không), khoảng cách giữa các phân tử khí quá lớn, làm giảm khả năng va chạm và phóng điện.

Độ ẩm - Độ ẩm có thể ảnh hưởng đến khả năng phóng điện trong không khí. Không khí ẩm hơn thường có khả năng phóng điện kém hơn so với không khí khô. Điều này do phân tử nước trong không khí có khả năng hấp thụ và dẫn điện tốt hơn so với không khí khô.

Loại khí - Khả năng ion hóa của các loại khí khác nhau có ảnh hưởng đáng kể đến quá trình phóng điện. Khí hiếm như neon và argon dễ bị ion hóa và thường được sử dụng trong các ứng dụng chiếu sáng như đèn neon. Trong khi đó, các khí khác như nitrogen và oxygen cần điện trường mạnh hơn để tạo ra hiện tượng phóng điện [4].

Cường độ điện trường - Điện trường càng mạnh, các electron càng dễ dàng đạt được động năng cao đủ để tạo ra các va chạm ion hóa. Cường độ điện trường cao có thể dẫn đến hiện tượng phóng điện tia lửa hoặc hồ quang.

Đặc tính cách điện - Loại cách điện hoặc chất khí có đặc tính cách điện khác nhau. Điều này có thể ảnh hưởng đến khả năng phóng điện. Một số cách điện dễ bị chọc thủng hơn so với các loại khác.

Nhiệt độ - Nhiệt độ của chất khí ảnh hưởng trực tiếp đến vận tốc chuyển động của các phân tử khí và do đó ảnh hưởng đến tần suất va chạm giữa các hạt mang điện và phân tử khí trung hòa. Không khí nóng thường có khả năng phóng điện tốt hơn so với không khí lạnh.

Thời gian và tần số của nguồn điện - Tần số và thời gian của điện áp áp dụng có thể ảnh hưởng đến quá trình phóng điện. Ví dụ, sự áp dụng điện áp tần số cao có thể gây ra phản ứng phóng điện khác nhau so với điện áp tần số thấp.

Hình dạng và khoảng cách giữa các điện cực - Hình dạng của các điện cực và khoảng cách giữa chúng đóng vai trò quan trọng trong việc xác định cường độ điện trường và do đó ảnh hưởng đến hiện tượng phóng điện.

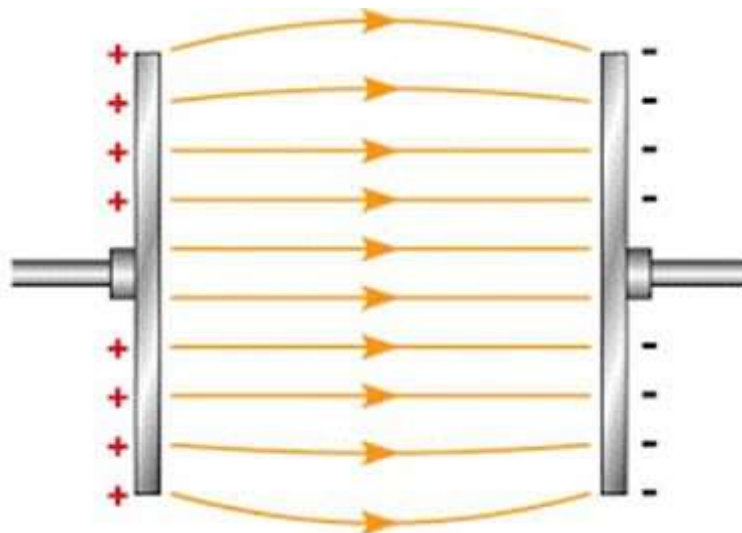
Điện cực có dạng đầu nhọn hoặc mép sắc tạo ra điện trường không đều, làm tăng cường độ điện trường tại các khu vực có bán kính cong nhỏ. Điều này dẫn đến phóng điện mạnh mẽ hơn tại các điểm nhọn hoặc mép sắc so với các vùng còn lại của điện cực. Đây là cơ chế chính trong hiện tượng phóng điện vàng quang.

Khoảng cách giữa các điện cực càng ngắn, cùng một độ lớn điện áp cường độ điện trường càng lớn, điều này có thể dẫn đến hiện tượng phóng điện sớm hơn. Ngược lại, khi khoảng cách giữa các điện cực lớn, điện áp cần thiết để gây ra phóng điện sẽ tăng lên. Mối quan hệ giữa khoảng cách và điện áp phóng điện được điều chỉnh bởi định luật Paschen.

1.7 Phóng điện trong điện trường đồng nhất

1.7.1 Mô tả điện trường đồng nhất

Điện trường đều là điện trường mà vectơ cường độ điện trường tại mọi điểm đều có cùng phương, cùng chiều, và cùng độ lớn; đường sức điện là những đường thẳng song song cách đều. Điện trường trong một điện môi đồng chất nằm ở giữa hai bản kim loại phẳng đặt song song với nhau và điện tích bằng nhau, trái dấu là một điện trường đều.



Hình 1.9: Điện trường đồng nhất

Khi phóng điện xảy ra: chất khí chuyển từ chất cách điện sang chất dẫn điện trên kênh phóng điện.

Thời gian phóng điện dao động trong khoảng ns đến μs .

Dòng điện trong chất khí là do sự chuyển động của các điện tích (điện tử và ion) dưới tác động của điện trường.

Sự phóng điện phụ thuộc rất lớn vào loại chất khí, áp suất, và nhiệt độ nhưng phụ thuộc rất ít vào vật liệu làm điện cực, điện tích chuyển động được tạo ra từ môi trường không khí.

Ở áp suất thấp: để duy trì phóng điện trong chất khí việc giải thoát điện tử dựa vào ion hóa bề mặt âm cực do ion hóa dương và các photon bức xạ của thác thứ nhất.

Ở áp suất cao: điện tử thứ cấp được tạo nên bởi sự ion hóa quang khối khí, sau khi thác thứ nhất kết thúc, điện tử thác mới bị điện tích dương của thác thứ nhất kéo về và vì điện trường trong không gian điện tích khối không khí lớn nên các điện tử dễ hút vào và phân tử trung tính trở thành ion âm. Các ion âm cùng với ion dương có sẵn tạo thành dòng plasma. Quá trình phóng điện hoàn toàn khi dòng plasma phát triển nối liền giữa các điện cực.

1.7.2 Quá trình phóng điện trong điện trường đều

Ion hóa ban đầu - Khi áp suất không khí giảm hoặc điện trường tăng, electron tự do va chạm với các phân tử khí trung hòa, gây ra ion hóa và tạo ra các cặp electron-ion. Đây là giai đoạn đầu tiên của quá trình phóng điện.

Tăng cường ion hóa - Sự ion hóa tiếp tục tăng lên do các electron mới sinh ra tiếp tục va chạm và ion hóa các phân tử khí khác, dẫn đến hiện tượng *phóng điện Townsend*. Ở giai đoạn này, dòng điện trong chất khí bắt đầu tăng lên đáng kể.

Phóng điện phát sáng - Khi dòng điện đạt một mức đủ lớn, hiện tượng phóng điện phát sáng xuất hiện, tạo ra ánh sáng do sự kích thích và giải phóng năng lượng của các phân tử khí. Quá trình này có thể được thấy rõ trong các ứng dụng như đèn neon.

Hồ quang và tia lửa - Nếu điện trường tăng lên nữa, phóng điện có thể phát triển thành phóng điện hồ quang, trong đó plasma hình thành và có thể dẫn đến các hiện tượng như hàn hồ quang. Khi phóng điện xảy ra: chất khí chuyển từ chất cách điện sang chất dẫn điện trên kênh phóng điện. Thời gian phóng điện dao động trong khoảng ns đến μs . Dòng điện trong chất khí là do sự chuyển động của các điện tích (điện tử và ion) dưới tác động của điện trường. Sự phóng điện phụ thuộc rất lớn vào loại chất khí, áp suất, và nhiệt độ nhưng phụ thuộc rất ít vào vật liệu làm điện cực, điện tích chuyển động được tạo ra từ môi trường không khí.

1.7.3 Điện áp phóng điện xuyên thủng khoảng cách khí trong điện trường đều

Trong điện trường đồng nhất, khi điều kiện phóng điện tự duy trì được thực hiện thì sẽ dẫn đến phóng điện xuyên thủng khoảng cách khí, tức là điện áp phóng điện xuyên thủng U_{ct} bằng điện áp phóng điện tự duy trì U_0 . Do đó có thể xác định điện áp phóng điện xuyên thủng từ điều kiện phóng điện tự duy trì.

$$\alpha s = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) \quad (1.33)$$

Biết

$$\alpha = A_0 \cdot \delta \cdot \exp\left(-\frac{A_0 U_i}{E_{ct}/\delta}\right) \quad (1.34)$$

Trong đó: α : Hệ số ion hóa va chạm ion.

A_0 : Hệ số tỉ lệ, không đổi đối với một chất khí nhất định ($1/cm$).

γ : Độ lệch chuẩn.

δ : Mật độ tương đối của chất khí.

U_i : Điện áp đánh thủng lần thứ i , kV.

U_{ct} : Điện áp phóng điện xuyên thủng khoảng cách khí.

Với: E_{ct} – cường độ điện trường lúc phóng điện xuyên thủng, trong trường đồng nhất $E_{ct} = \frac{U_{ct}}{s}$

Như vậy:

$$\alpha s = A_0 \cdot \delta_s \cdot \exp\left(-\frac{A_0 U_i \delta_s}{U_{ct}}\right) = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) \quad (1.35)$$

Từ đó suy ra điện áp xuyên thủng khoảng cách khí.

$$U_{ct} = \frac{A_0 U_i (\delta_s)}{\ln A_0 \cdot (\delta_s) / \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)} = f(\delta_s) \quad (1.36)$$

Biểu thức này cho thấy: Trong điện trường đồng nhất, điện áp phóng điện xuyên thủng khoảng cách khí là hàm của tích số mật độ chất khí với chiều dài khoảng cách khí.

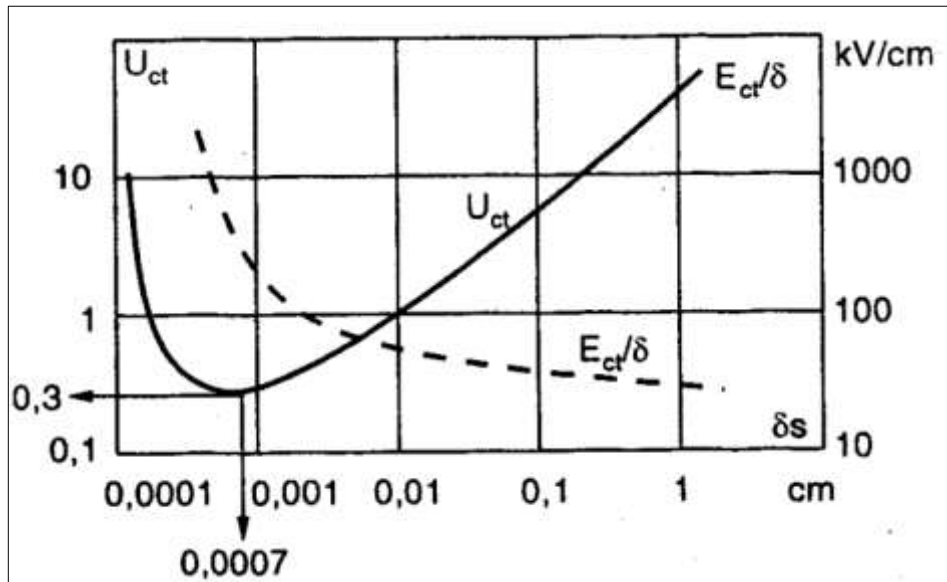
Quy luật này đã được Paschen (bác học Đức 1865 - 1947) xác định bằng thực nghiệm nên được gọi là quy luật Paschen. Ở một nhiệt độ xác định, mật độ khí ở tỉ lệ với áp suất khí p, do đó định luật Paschen trong trường hợp này được phát biểu: Trong điện trường đồng nhất, điện áp phóng điện xuyên thủng khoảng cách khí là hàm của tích số áp suất chất khí nhân với chiều dài khoảng cách khí.

$$U_{ct} = f(p, S) \quad (1.37)$$

Trong đó: p là áp suất khí

S là khoảng cách giữa hai điện cực

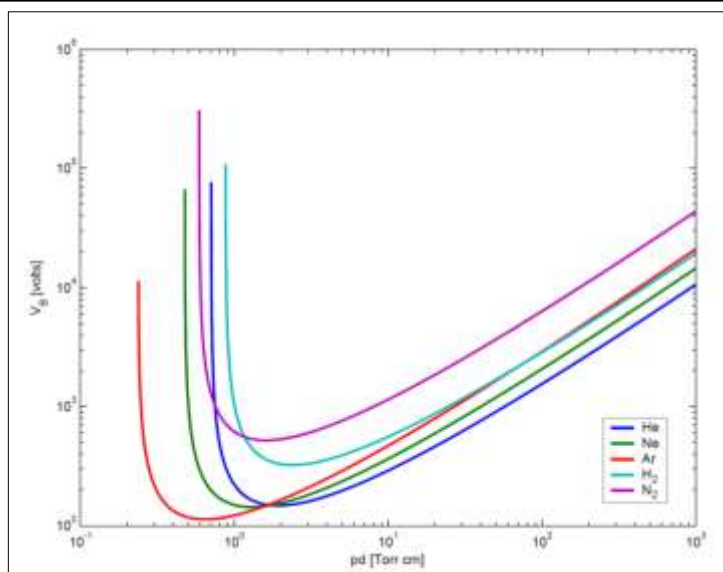
U_{ct} : Điện áp xuyên thủng khoảng cách khí



Hình 1.10: Quan hệ $U_{ct} = f(\delta_s)$ và $E_{ct}/\delta = f(\delta_s)$ đối với không khí

Đường cong $U_{ct} = f(\delta_s)$ (Hình 1.9) đi qua một cực tiểu ở trị số δ_s tương đối bé, tương ứng với điều kiện ion hóa và chạm thuận lợi nhất, tức là lúc hệ số ion hóa và chạm điện tử α có trị số lớn nhất.

Đối với không khí điện áp phóng điện bé nhất $U_{ct \min} \approx 300V$ khi $\delta_s \approx 0,0007cm$



Hình 1.11: Đường cong Paschen của một số chất khí

Bảng 1.1: Điện áp phóng điện xuyên thủng chất khí

Gas	V_{min} (V)	p.d at V_{min} (torr-cm)
Air	327	0.567
Argon	137	0.9
Hydrogen	273	1.15
Helium	156	4.0
Cacbondioxide	420	0.51
Nitrogen	251	0.67
Nitrous oxide	418	0.5
Oxygen	450	0.7
Sulphur dioxide	457	0.33
Hydrogen Sulphide	414	0.6

Trong đó: p - Áp suất chất khí (torr).

d - khe hở điện cực (cm).

V_{min} - Điện áp phóng điện (V).

1.8 Phóng điện trong chất khí ở điện trường không đều

1.8.1 Mô tả điện trường không đều

Điện trường không đều xảy ra khi cường độ và hướng của điện trường thay đổi theo không gian. Điều này có thể do sự hiện diện của các điện cực có hình dạng khác nhau, hoặc do các yếu tố khác như độ dốc điện trường cao. Một số đặc điểm chính bao gồm:

Cường độ điện trường - Tại các vị trí khác nhau trong không gian, cường độ điện trường có thể khác nhau, dẫn đến sự phân bố lực tác động không đồng đều lên các hạt mang điện.

Tạo thành các điểm phóng điện - Các khu vực có cường độ điện trường cao hơn có thể dẫn đến sự ion hóa và phóng điện mạnh mẽ hơn, tạo ra các điểm phóng điện, đặc biệt là ở các bề mặt nhọn hoặc khe hở.

Mức độ không đều của điện trường được xác định bằng hệ số η (hệ số Schwaiger).

$$\eta = \frac{E_{\text{ave}}}{E_{\text{max}}} = \frac{U}{d} \times \frac{1}{E_{\text{max}}} \quad (1.38)$$

Với: $0 \leq \eta \leq 1$

Điện trường gần đều: $0,25 \leq \eta \leq 1$

Điện trường rất không đều: $\eta \leq 0,01$

Với E_{ave} - Điện trường trung bình.

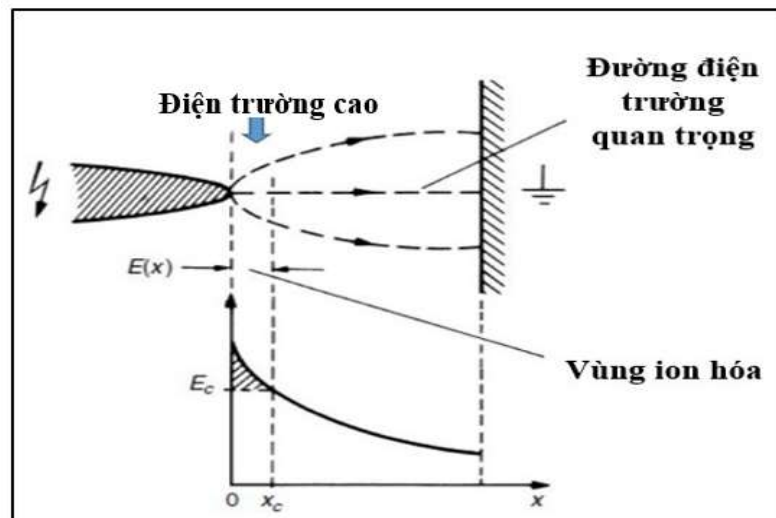
E_{max} - Điện trường cực đại.

Điện trường đều và gần đều: sự xuất hiện của hiện tượng ion hóa luôn kết thúc bằng phóng điện đánh thủng.

Điện trường không đều: phóng điện vàng quang (biểu hiện: ánh sáng và âm thanh) xảy ra trước và có thể không dẫn đến phóng điện đánh thủng.

Điện trường không đều phân tán mạnh trong các hệ thống điện cực: mũi nhọn - mũi nhọn, mũi nhọn - bản phẳng, cầu - bản phẳng...

Đường trường tới hạn (Critical Field Line) là một đường đặc trưng trên đồ thị biểu diễn sự phân bố của cường độ điện trường trong một hệ thống. Nó cho biết mức độ cường độ điện trường đạt đến giá trị tới hạn, nơi mà hiện tượng phóng điện hoặc ion hóa có thể xảy ra.



Hình 1.12: Phân bố điện trường không đều

Điện trường tới hạn là giá trị cường độ điện trường đủ lớn để kích hoạt quá trình phóng điện. Khi cường độ điện trường đạt giá trị này, các electron hoặc ion trong môi trường có đủ năng lượng để vượt qua các rào cản năng lượng, dẫn đến va chạm ion hóa, tạo thành nhiều hạt tích điện và duy trì quá trình phóng điện.

1.8.2 Quá trình phóng điện trong điện trường không đều

Tích lũy điện tích - Trong các khu vực có cường độ điện trường cao, electron và ion có thể bị tích lũy, dẫn đến sự ion hóa mạnh mẽ hơn và tạo ra hiện tượng phóng điện corona.

Sự hình thành của plasma - Tại các điểm có cường độ điện trường cực đại, electron có thể gia tăng động năng đến mức tạo ra plasma, dẫn đến phóng điện hồ quang hoặc tia lửa. Điều này thường xảy ra trong các hệ thống điện cao thế.

Sự phát sinh của tia lửa - Tia lửa xảy ra khi điện trường đủ mạnh để vượt qua khoảng cách giữa hai điện cực, dẫn đến phóng điện nhanh chóng và mạnh mẽ. Tia lửa thường có thể tạo ra các sóng âm và ánh sáng mạnh, thường được quan sát trong các hiện tượng tự nhiên như sét.

1.8.3 Điều kiện phóng điện trong điện trường không đều

Hệ số ion hóa:

$$\alpha = p \cdot f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (1.39)$$

Điều kiện phóng điện Townsend (thác điện tử) được hiệu chỉnh như sau:

Khi thác điện tử phát triển qua toàn bộ khoảng cách khí (d) với trường đồng nhất thì số lượng điện tử trong thác bằng $\exp(\alpha d)$ và số lượng ion dương bằng $[\exp(\alpha d) - 1]$. Nếu vì là số điện tử được giải phóng khỏi bề mặt âm cực bởi một ion dương ($\gamma < 1$) thì toàn bộ số điện tử thứ cấp được giải phóng khỏi bề mặt âm cực bởi tất cả số ion dương của thác bằng $\gamma[\exp(\alpha d) - 1]$. Để có phóng điện tự duy trì, số điện tử thứ cấp này ít nhất phải bằng 1.

$$\gamma[\exp(\alpha d) - 1] = 1 \quad (1.40)$$

$$\gamma[\exp(\int_0^d \alpha(x) dx) - 1] = 1 \quad (1.41)$$

$$\exp(\int_0^d \alpha(x) dx) = 1 + \frac{1}{\gamma} \quad (1.42)$$

$$\int_0^d \alpha(x) dx = \ln(1 + \frac{1}{\gamma}) \quad (1.43)$$

Với γ : Hệ số ion hóa thứ hai (xác xuất để sinh ra một điện tử tự do một ion dương va đập vào Cathode).

d : Khe hở điện cực.

E : Cường độ điện trường.

p : Áp suất chất khí.

$\alpha(x)$: Hệ số ion hóa va chạm.

$x(\text{cm})$: Khoảng cách khí.

Trường hợp tổng quát, điều kiện xảy ra phóng điện trong điện trường không đều.

$$\exp\left(\int_0^{x_c < d} \alpha(x) dx\right) \approx 10^8 \quad (1.44)$$

Với: $\alpha(x)$ - Hệ số ion hóa va chạm, phụ thuộc vào cường độ điện trường tại mỗi điểm x .

x_c - Khoảng cách tới hạn từ điện cực phát ra điện tử đến điểm xảy ra hiện tượng ion hóa đủ lớn

d - Khoảng cách tổng từ cực phát điện tử đến cực còn lại.

Điều kiện này cho biết để xảy ra phóng điện, số electron tạo ra trong quá trình nhân lên theo cấp số nhân phải đủ lớn (khoảng 10^8).

Hoặc:

$$\left(\int_0^{x_c < d} \alpha(x) dx\right) \approx 18 \div 20 \quad (1.45)$$

Phương trình biểu diễn tổng số điện tử thứ cấp được tạo ra trong quá trình điện tử di chuyển từ 0 đến điểm x_c . Khi tổng số điện tử đạt ngưỡng $18 \div 20$, quá trình phóng điện tự duy trì sẽ bắt đầu

Cường độ điện trường tại đầu thác khi chuyển từ thác điện tử sang dòng điện tử.

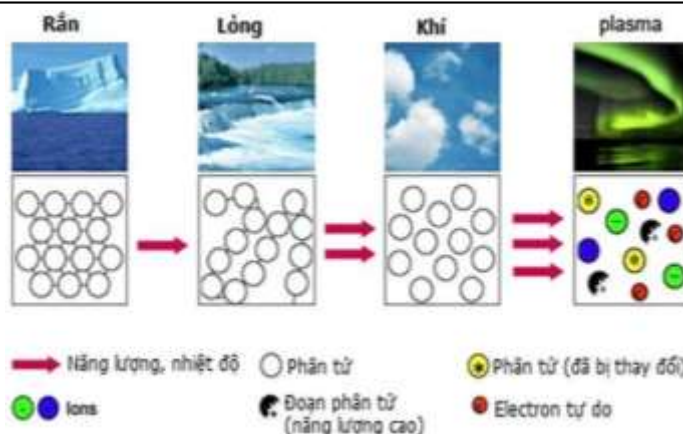
$$E_r = \frac{5,27 \times \alpha_{x_c} \exp\left(\int_0^{x_c} \alpha dx\right) \left(\frac{V}{cm}\right)}{\left(\frac{x_c}{p}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (1.46)$$

Cường độ điện trường E_r tại đầu thác phải đủ lớn để kích thích và duy trì quá trình ion hóa. Dòng điện tử là dòng điện được hình thành khi có sự di chuyển liên tục và ổn định của các điện tử và ion dương trong môi trường điện từ.

Phóng điện đánh thủng ở điện trường không đều trong chất khí luôn bắt đầu bằng hiện tượng phóng điện vầng quang.

1.9 Tổng quan về Plasma và phân loại plasma

1.9.1 Tổng quan về plasma

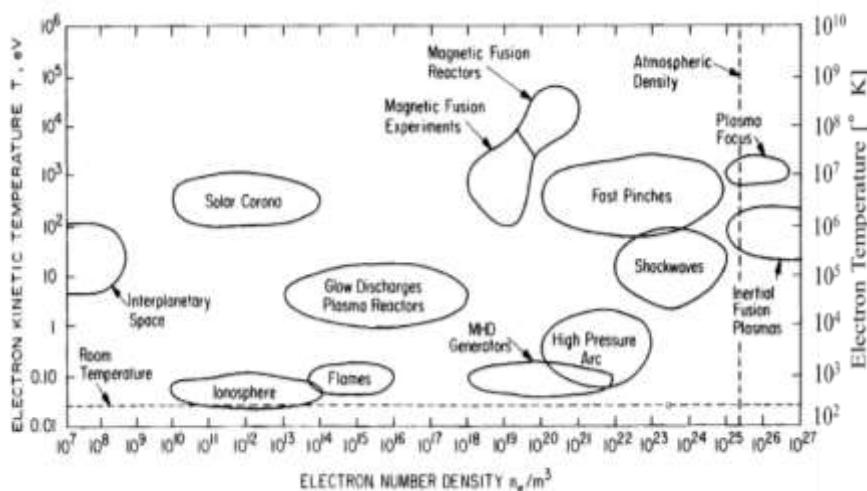


Hình 1.13: Các trạng thái cơ bản của vật chất

Plasma là một trong bốn trạng thái cơ bản của vật chất. Nó là một trạng thái ion hóa của khí, bên cạnh chất rắn, chất lỏng và chất khí. Plasma được tạo thành từ chất khí bị ion hóa bao gồm các thành phần như: ion dương, ion âm, điện tử và các phân tử hay nguyên tử trung tính..

Plasma là trạng thái thứ tư của vật chất được tạo ra khi cung cấp một lượng năng lượng đủ lớn cho chất khí. Plasma là tập hợp các hạt điện tích âm, điện tích dương và các nguyên tử trung hòa điện, trong đó số lượng điện tích âm và điện tích dương là tương đương nhau. Plasma có đặc tính của chất khí, tuy nhiên có tính dẫn điện tốt và đáp ứng mạnh với từ trường.

1.9.2 Phân loại plasma



Hình 1.14: Phân loại Plasma

Electron Kinetic Temperature T_e , eV: Nhiệt độ động học của electron T_e , đơn vị eV

Electron Number Density n_e / m^3 : Mật độ số electron n_e , đơn vị hạt/ m^3

Room Temperature: Nhiệt độ phòng

Interplanetary Space: Không gian liên hành tinh

Ionosphere: Tầng điện ly

Flames: Ngọn lửa

Solar Corona: Vàng nhật hoa

Glow Discharges / Plasma Reactors: Phóng điện phát sáng / Buồng phản ứng plasma

MHD Generators: Máy phát điện MHD (Thủy động lực học từ)

High Pressure Arc: Hồ quang điện áp suất cao

Magnetic Fusion Experiments: Thí nghiệm nhiệt hạch từ tính

Magnetic Fusion Reactors: Lò phản ứng nhiệt hạch từ tính

Fast Pinches: Nén plasma nhanh (Fast Pinch)

Shockwaves: Sóng xung kích plasma

Inertial Fusion Plasmas: Plasma nhiệt hạch quán tính

Plasma Focus: Tập trung plasma

Atmospheric Density: Mật độ khí quyển

Plasma ở trạng thái cân bằng động học có thể được phân biệt thành plasma nhiệt (electron và các phân tử khí ở cùng nhiệt độ, ($T_e = T_{ion} = T_{gas}$)) và plasma lạnh (ion dương và các phân tử khí ở nhiệt độ thấp (đôi khi nhiệt độ phòng, trong khi các electron có nhiệt độ lớn hơn nhiều ($T_e \gg T_{ion} = T_{gas}$)). Ngoài ra, plasma có thể được phân loại thành plasma tự nhiên hoặc nhân tạo. Với T_e là nhiệt độ electron, T_{ion} là nhiệt độ các ion, T_{gas} là nhiệt độ các phân tử khí trung hòa.

Trạng thái plasma bao gồm một phạm vi cực kỳ rộng của các tham số như mật độ hạt, nhiệt độ và áp suất. Do đó, người ta thường phân loại chúng theo nhiệt độ và mật độ electron (hình 1.3) các plasma nhiệt (ví dụ: corona mặt trời) có nhiệt độ có thể vượt quá 10^6 °K trong khi các plasma có mật độ tương tự trong tầng điện ly có nhiệt độ chỉ khoảng 103°K hoặc thậm chí thấp hơn. Ngọn lửa cũng là một dạng plasma, nó có mật độ và nhiệt độ electron cao hơn các phân tử khí trung hòa. Sự phóng điện phát sáng, thường được vận hành trong phạm vi áp suất từ 10^{-4} đến 1 kPa, có nhiệt độ electron có thể đạt tới 10^4 °K trong khi nhiệt độ phân tử khí chỉ ở nhiệt độ phòng. Ví dụ, trong đèn huỳnh quang, nhiệt độ electron có thể đạt tới $2,5 \times 10^4$ °K, nhưng nhiệt độ phân tử khí vẫn ở mức gần 300°K. Trong trường hợp plasma nhiệt hạch, mật độ electron và ion có thể vượt quá $10^{26} m^{-3}$, trong khi plasma lạnh ở nhiệt độ phòng, mật độ của electron chỉ khoảng $10^6 m^{-3}$ tới $10^8 m^{-3}$.

Áp suất cũng là một thông số rất quan trọng của các plasma. Ví dụ, hai trong số các hiện tượng plasma được biết đến sớm nhất là plasma trong hiện tượng sét đánh xảy ra ở áp suất tương đối cao và cực quang xảy ra ở áp suất cực kỳ thấp. Một số ví dụ về plasma được tạo ra trong phòng thí nghiệm ở áp suất thấp là plasma phóng điện xảy ra

trong nguồn sáng neon, ví dụ về plasma được tạo ra từ các phóng điện ở áp suất khí quyển như là plasma ở phóng điện hồ quang, phóng điện corona, phóng điện màn chắn.

Trong môi trường phòng thí nghiệm và trong công nghiệp, plasma cũng có thể được phân loại theo các quan điểm khác, ví dụ như theo các loại nguồn điện được sử dụng để tạo ra plasma, có plasma một chiều (DC), plasma sóng viba, plasma xung nano, hoặc dựa trên mức độ ion hóa trong plasma, thì có plasma ion hóa hoàn toàn, plasma ion hóa một phần.

1.9.3 Sự liên hệ giữa plasma và phóng điện chất khí

Một trong những phương pháp phổ biến nhất để tạo ra plasma trong phòng thí nghiệm cũng như trong công nghiệp là thông qua phóng điện trong chất khí (gas discharge). Quá trình phóng điện bắt đầu khi một điện trường đủ lớn được đặt giữa hai điện cực trong môi trường khí. Ban đầu, một số electron tự do sẵn có sẽ bị gia tốc bởi điện trường và va chạm với các phân tử khí trung hòa, từ đó giải phóng thêm electron và ion – quá trình này gọi là ion hóa va chạm. Khi quá trình này được duy trì và khuếch đại, số lượng hạt mang điện tăng lên theo cấp số nhân, tạo thành một môi trường dẫn điện, chính là plasma.

Trong những năm gần đây, plasma lạnh (NonThermal Plasma – NTP) đã thu hút sự quan tâm lớn trong cộng đồng khoa học nhờ vào đặc tính phi nhiệt và khả năng tạo ra các gốc hoạt tính mạnh mẽ ở điều kiện nhiệt độ thấp. Không giống như plasma nhiệt truyền thống – vốn yêu cầu nhiệt độ rất cao để duy trì trạng thái ion hóa và gây ra nhiều hạn chế trong xử lý vật liệu nhạy nhiệt – plasma lạnh cho phép quá trình kích hoạt hóa học xảy ra mà không làm tăng nhiệt độ của toàn bộ hệ thống khí. Đây là ưu điểm vượt trội, đặc biệt khi ứng dụng trong các lĩnh vực như y sinh học, khử trùng, xử lý môi trường, và chế tạo vật liệu tiên tiến.

1.10 Plasma lạnh và các hình thức tạo plasma lạnh

1.10.1 Plasma lạnh

Plasma lạnh hay plasma không nhiệt là một dạng plasma trong đó các electron có năng lượng cao (nhiệt độ vài eV), trong khi các ion và phân tử khí nền vẫn giữ ở mức nhiệt độ thấp gần với nhiệt độ môi trường. Plasma lạnh không làm nóng đáng kể môi trường xung quanh, nên rất an toàn để ứng dụng trong các lĩnh vực nhạy cảm như y tế, thực phẩm, môi trường.

Đặc điểm của plasma lạnh là: tạo ra các hạt năng lượng cao: electron, ion, gốc tự do, ozone (O_3), tia UV, các phân tử kích thích...; nhiệt độ tổng thể thấp: chỉ từ vài chục

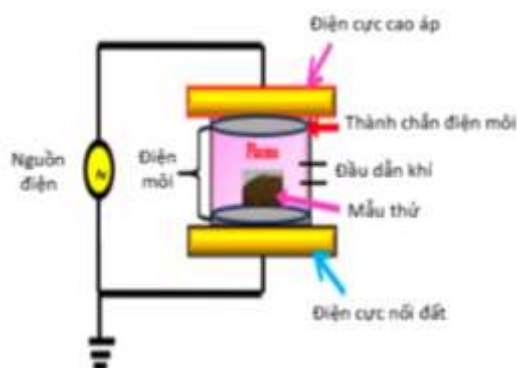
đến vài trăm °C tùy vào hệ thống, nhưng thấp hơn nhiều so với plasma nhiệt; hoạt động ở áp suất khí quyển hoặc áp suất thấp.

1.10.2 Các hình thức tạo plasma lạnh

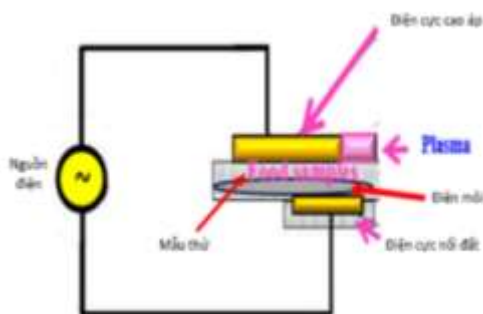
Để phóng điện tạo ra plasma lạnh cần có nguồn điện cao áp cao tần có điện áp từ vài kV đến vài chục kV (ví dụ: 2-8 kV); tần số từ 1 kHz đến vài chục kHz, vài trăm kHz, thậm chí từ vài MHz đến hàng chục MHz phụ thuộc vào phương pháp phóng điện (ví dụ phóng điện vi sóng 2,45 MHz).

Các buồng phản ứng mặc dù khác nhau về cấu tạo, nhưng bao gồm hai phần tử cơ bản: buồng phóng điện, nơi xử lý plasma diễn ra và hệ thống điện cung cấp hoạt động thích hợp của buồng. Hệ thống điện phải đảm bảo duy trì plasma trong buồng ở hiệu suất năng lượng cao.

a. Tạo plasma bằng phóng điện rào cản điện môi (DBD)



Hình 1.15: Sơ đồ tạo plasma bằng phóng điện qua điện môi



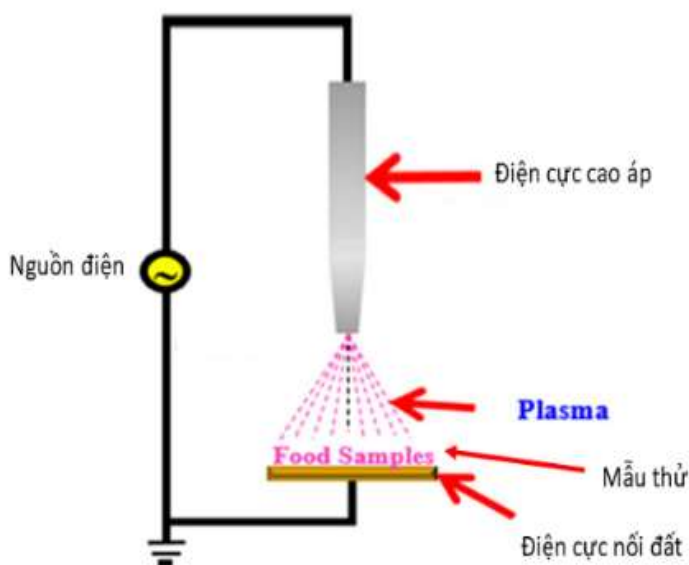
Hình 1.16: Sơ đồ tạo plasma bằng phóng điện bề mặt

Công nghệ plasma DBD đang trở nên quan trọng vì giá thành không cao, vận hành đơn giản, cấu trúc đơn giản, khả năng thích ứng và khả năng mở rộng cao. DBD (Hình 1.15) cung cấp sự linh hoạt trong cấu hình và các tùy chọn khác nhau cho vật liệu điện môi để sử dụng trong các ứng dụng khác nhau. Một biến thể của phóng điện rào cản điện môi (DBD) là phóng điện rào cản điện môi bề mặt (SDBD) (Hình 1.16), được tạo ra bằng cách cấu hình các điện cực tiếp xúc trực tiếp với vật liệu điện môi. Để mở rộng các ứng dụng tiềm năng của SDBD, các thiết kế điện cực bất đối xứng trong đó một điện

cực được cách điện trong khi điện cực kia vẫn tiếp xúc với không khí đã được phát triển, đặc biệt là để sử dụng trong các ứng dụng khí động học trên máy bay. Trong DBD, plasma được tạo ra giữa hai điện cực được phủ bằng vật liệu điện môi như thủy tinh, silic, gốm sứ hoặc nhựa. Có khoảng cách các điện cực từ 0,1 mm đến vài cm giữa các điện cực và các điện cực này được cách điện khỏi các vật liệu khác nhau như gốm sứ, polyme, thủy tinh hoặc thạch anh. Lớp điện môi ngăn chặn phóng điện hồ quang và tăng nhiệt máy quá mức để có một môi trường ổn định và được kiểm soát. Công nghệ DBD tạo ra trong môi trường nhiều loại khí khác nhau. Những tính năng này làm cho DBD trở thành một công cụ thiết thực và đáng tin cậy cho nhiều ứng dụng công nghiệp, khoa học và nghiên cứu.

DBD được coi là một trong những phương pháp tạo plasma an toàn nhất do khả năng ngăn chặn tia lửa và phóng điện hồ quang bằng cách hạn chế dòng điện. Tuy nhiên, DBD đòi hỏi điện áp cao, tùy thuộc vào khe hở điện cực hẹp, điện môi cách điện. So với plasma tạo ra bằng vi sóng, DBD tạo ra mật độ electron và nồng độ oxy nguyên tử cao hơn đồng thời giảm thiểu sự gia tăng nhiệt độ. Plasma DBD hoạt động bằng cách tạo ra các phóng điện nhỏ trong không gian chứa đầy khí giữa hai điện cực được ngăn cách bởi vật liệu điện môi. Trong một số điều kiện plasma DBD được tạo ra ở dạng các kênh/sợi vi phóng điện. Những vi phóng điện này là các kênh dòng điện dạng sợi tồn tại trong thời gian ngắn được hình thành bởi các luồng - vùng khí ion hóa lan truyền dọc theo các đường điện trường. Các vi phóng điện xảy ra không liên tục mà đặt xen kẽ trên bề mặt điện cực. Với nhiệt độ khí thấp và năng lượng electron cao, các vi phóng điện này thúc đẩy các phản ứng hóa học khác nhau cả trong pha khí và trên bề mặt điện môi.

b. Phóng điện vầng quang CD (Corona discharge)



Hình 1.17: Sơ đồ tạo plasma bằng phóng điện vầng quang

CD có thiết kế đơn giản và hoạt động hiệu quả ở áp suất khí quyển. Cấu tạo có các điện cực nhọn được gắn ở một đầu của một ống rỗng kéo dài ra ngoài để tạo điều kiện tạo ra plasma. Một vùng phản ứng được hình thành gần điểm vành nhật hoa thông qua quá trình ion hóa khí plasma qua các lỗ nhỏ của ống (Hình 1.16). Công nghệ này thân thiện với môi trường, với chi phí vận hành thấp và thiết lập đơn giản hoạt động ở cả chế độ điện áp một chiều và xung điện áp.

Mặc dù có nhiều ưu điểm, CD có một số nhược điểm, như điện tích xử lý hạn chế và ứng dụng xử lý không đồng đều. Để khắc phục nhược điểm và mở rộng phạm vi ứng dụng của CD, một cấu hình điện cực tấm đa điểm đã được phát triển. Thiết lập này tạo ra plasma tập trung và được cung cấp năng lượng bao phủ một diện tích lớn hơn so với các hệ thống DBD.

c. Tạo plasma lạnh dựa trên vi sóng Microwave (MW)



Hình 1.18: Sơ đồ tạo plasma bằng nguồn vi sóng

Máy phát plasma microway (Hình 1.18) tạo ra sóng điện từ, thường hoạt động ở tần số 2,45 GHz, để bắt đầu phóng plasma. Các sóng này tương tác với các electron trong không khí, dẫn đến va chạm không đàn hồi, truyền năng lượng và phản ứng ion hóa. Tạo plasma dựa vào trường điện từ vi sóng (MEF) để tạo ra CP thay vì có cấu tạo là các điện cực như các cấu hình khác. Cấu tạo này cho phép kiểm soát chính xác và tạo điều kiện cho việc tạo ra phóng xạ plasma có đường kính lớn, ngay cả trong điều kiện áp suất thấp. Năng lượng MW được đưa đến các buồng xử lý thông qua ống dẫn sóng, nơi mà sóng năng lượng tương tác với các electron khí để giải phóng năng lượng cho các photon có thể nhìn thấy được như tia cực tím (UV) thông qua các va chạm không đàn hồi.

Plasma MW mang lại một số lợi ích, bao gồm tạo ra hiệu quả các loại phản ứng trong khí ion hóa, làm cho nó đặc biệt hiệu quả trong việc khử trùng và khử nhiễm bề mặt. Mặc dù có khả năng đầy hứa hẹn, việc áp dụng rộng rãi công nghệ plasma dựa vào nguồn MW bị hạn chế bởi chi phí vận hành cao và nhu cầu bảo trì.

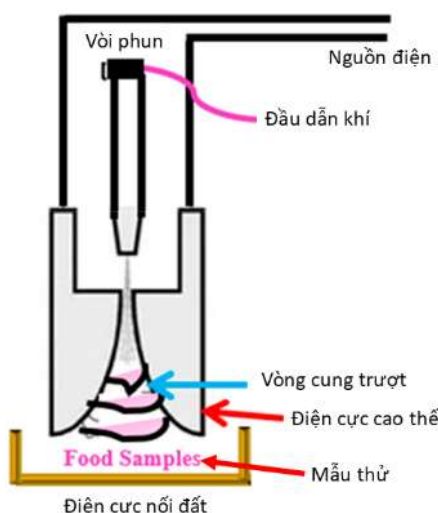
d. Tia Plasma (PJ)



Hình 1.19: Sơ đồ nguyên lý plasma tia

Phóng điện tia plasma có cấu hình khác nhau, thường sử dụng nguồn điện xoay chiều cao áp để tạo ra plasma. Cấu hình phổ biến nhất bao gồm các điện cực được sắp xếp theo cấu hình đồng trục, cho phép khí chảy qua hệ thống (Hình 1.19). Sóng vô tuyến, thường ở khoảng tần số 13,56 MHz, kích thích hệ thống, với điện cực trung tâm được nối đất trong khi điện cực bên ngoài tăng tốc các electron tự do. Những electron này va chạm với các phân tử khí, tạo ra một loạt các phản ứng. Một số loại khí được sử dụng làm điện môi, thường là khí hiếm, plasma được tạo ra được dẫn ra ngoài vùng điện cực, cung cấp các loại phản ứng đến vật liệu mục tiêu, chẳng hạn như bảo quản thực phẩm. Thiết lập này đảm bảo hoạt động ổn định, đồng nhất và đồng đều ở áp suất môi trường xung quanh, làm cho công nghệ tia plasma có hiệu quả cao cho các ứng dụng khác nhau. Tia plasma mang lại lợi thế là có thể áp dụng trực tiếp và nó có thể được sử dụng hiệu quả trong các khu vực hạn chế hoặc nhỏ. Tuy nhiên hệ thống có do chi phí cao liên quan đến việc duy trì lưu lượng khí cần thiết.

f. Phóng điện hồ quang lướt (GAD)



Hình 1.20: Sơ đồ tạo Plasma bằng phóng điện hồ quang lướt

Hệ thống bao gồm hai điện cực giống hệt nhau được định vị với một khe hở hẹp ở một đầu mở rộng dần về phía đầu đối diện. Một ống được đưa vào phần hẹp hơn cung cấp khí làm việc và tốc độ dòng chảy được điều chỉnh bằng đồng hồ đo lưu lượng khí (Hình 1.20). Khi các hạt tích điện va chạm với cực âm, nhiệt độ của chúng tăng lên, thúc đẩy sự giải phóng nhiệt của các electron. Sự hiện diện của một điện trường mạnh tạo điều kiện cho sự phát thải này. Plasma GAD được phân loại là plasma khá nóng do mật độ năng lượng và nhiệt độ khí vừa phải, nằm giữa plasma lạnh và nhiệt độ. Mặc dù công nghệ này cho thấy tiềm năng cho các ứng dụng sấy khô, nhưng nghiên cứu về việc sử dụng và hiệu quả của nó vẫn còn hạn chế.

1.11 Một số nguồn điện sử dụng để tạo ra plasma lạnh

Để tạo ra plasma lạnh, người ta sử dụng nhiều loại nguồn điện khác nhau, mỗi loại có các đặc điểm kỹ thuật riêng và phù hợp với các mục tiêu ứng dụng cụ thể.

a. Nguồn điện xoay chiều tần số cao

Nguồn AC, đặc biệt là ở tần số cao (từ vài kHz đến hàng trăm kHz), là một trong những nguồn thông dụng nhất để tạo plasma lạnh trong điều kiện khí quyển. Cơ chế hoạt động chủ yếu dựa trên sự tạo ra điện trường dao động giữa hai điện cực, trong đó một hoặc cả hai điện cực được phủ lớp cách điện (dielectric). Khi điện trường đủ lớn, nó sẽ vượt ngưỡng đánh thủng và hình thành các vi phóng điện nhỏ (microdischarges) trong vùng plasma, đây chính là đặc điểm của plasma kiểu DBD (Dielectric Barrier Discharge). Loại plasma này có nhiệt độ electron cao nhưng nhiệt độ khí thấp, rất phù hợp cho xử lý các vật liệu nhạy cảm với nhiệt như thực phẩm, màng mỏng polymer hoặc tế bào sống. Hoạt động ở điều kiện khí quyển, không cần buồng chân không. Ưu điểm của nguồn điện xoay chiều tần số cao là hệ thống thiết kế đơn giản, tiết kiệm năng lượng, dễ kiểm soát năng lượng đầu ra và nhiệt độ, phân bố plasma đồng đều trên diện rộng.

b. Nguồn điện một chiều

Nguồn DC được sử dụng phổ biến trong môi trường áp suất thấp (chân không hoặc bán chân không). Khi một điện áp một chiều được cấp giữa hai điện cực trong buồng kín, các electron tự do được gia tốc và va chạm với các phân tử khí để tạo ra phóng điện phát sáng – thường được gọi là glow discharge. Nguồn DC thường tạo ra plasma ổn định do tần số không thay đổi, chi phí thấp và phù hợp với các ứng dụng trong xử lý bề mặt, khắc plasma, mạ điện chân không, đặc biệt trong ngành điện tử và vật liệu. Tuy nhiên, loại plasma được tạo từ nguồn điện một chiều này không thích hợp để sử dụng ở áp suất khí quyển do khả năng đánh thủng điện kém hơn so với các dạng plasma khác.

c. Nguồn điện xung cao áp

Nguồn xung cao áp là loại nguồn tạo ra các xung điện áp rất ngắn (nano- hoặc micro-giây) nhưng với biên độ điện áp rất cao (5–30 kV), thường sử dụng trong các hệ thống plasma hoạt động ở áp suất khí quyển. Các xung này tạo ra các dòng phóng điện mạnh, được sử dụng để tạo ra gốc tự do hoạt tính ($\bullet\text{OH}$, $\bullet\text{O}$, $\text{NO}\bullet$) và bức xạ UV. Loại plasma tạo từ nguồn điện xung cao áp rất mạnh và hiệu quả trong việc diệt khuẩn, khử mùi, khử độc, xử lý nước ô nhiễm, hoặc phân hủy hợp chất hữu cơ độc hại. Ưu điểm lớn nhất của hệ thống này là khả năng điều khiển chính xác năng lượng plasma, hạn chế hiện tượng phát nhiệt cục bộ.

d. Nguồn vi ba

Nguồn vi ba sử dụng sóng điện từ có tần số cao, phổ biến là 2.45 GHz (giống như trong lò vi sóng), để tạo plasma thông qua việc làm dao động và gia tốc các electron tự do trong khí. Không giống như các nguồn khác, microwave plasma không cần điện cực, giúp giảm nguy cơ nhiễm bẩn và tăng độ bền của hệ thống. Plasma vi ba thường có mật độ electron rất cao và khả năng ion hóa mạnh, nên thường được sử dụng trong tổng hợp vật liệu nano, xử lý khí độc, hoặc phân hủy CO_2 và VOCs ở quy mô công nghiệp. ưu điểm của nguồn vi ba là tạo ra plasma ổn định, tinh khiết và giảm hao mòn điện cực, nâng cao tuổi thọ của hệ thống

e. Nguồn tần số vô tuyến

Nguồn RF, phổ biến nhất là ở tần số 13.56 MHz, là một nguồn cao cấp được sử dụng trong nhiều hệ thống plasma chân không. Có hai kiểu plasma chính được tạo ra bởi RF: Capacitively Coupled Plasma (CCP), nơi plasma hình thành giữa hai điện cực phẳng và Inductively Coupled Plasma (ICP), nơi plasma được tạo ra bởi cuộn dây cảm ứng mà không cần tiếp xúc trực tiếp với điện cực. RF plasma cho phép điều khiển chính xác nhiệt độ, mật độ và năng lượng plasma, rất thích hợp cho các ứng dụng cao cấp như lắng đọng lớp phủ mỏng (CVD), khắc vi mạch (plasma etching), phân tích nguyên tố siêu vết (ICP-MS) trong lĩnh vực vật liệu và bán dẫn.

1.12 Một số ứng dụng của tia plasma (Plasma Jet)

1.12.1 Ứng dụng trong y tế

- Trong y học

Khử trùng không khí và bề mặt: Plasma tạo ra từ phóng điện có khả năng tiêu diệt các vi sinh vật gây bệnh như vi khuẩn và virus, nhờ đó được sử dụng để khử trùng không khí và bề mặt trong các bệnh viện và phòng mổ.

Plasma lạnh từ phóng điện vầng quang được nghiên cứu để thúc đẩy quá trình lành vết thương và hỗ trợ điều trị một số loại ung thư thông qua quá trình apoptosis (chết tế bào theo chương trình)



Hình 1.21: Phương pháp điều trị vết mổ bằng plasma lạnh

1.12.2 Ứng dụng trong nông nghiệp



Hình 1.22: Kích thích hạt giống nảy mầm bằng plasma



Hình 1.23: Bảo quản thực phẩm bằng plasma

Khi hạt giống được tiếp xúc với plasma, các hạt tích điện trong plasma sẽ tác động lên bề mặt hạt giống, gây ra các hiện tượng sau:

- Tạo ra các gốc tự do: Các gốc tự do có khả năng oxy hóa các chất hữu cơ trên bề mặt hạt giống, làm giảm khả năng sống sót của vi sinh vật gây hại.
- Biến đổi cấu trúc bề mặt: Plasma có thể làm thay đổi cấu trúc bề mặt của hạt giống, tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình hấp thụ nước và trao đổi chất.
- Kích thích quá trình sinh lý: Plasma có thể kích thích các quá trình sinh lý bên trong hạt giống, như quá trình hô hấp và tổng hợp protein.

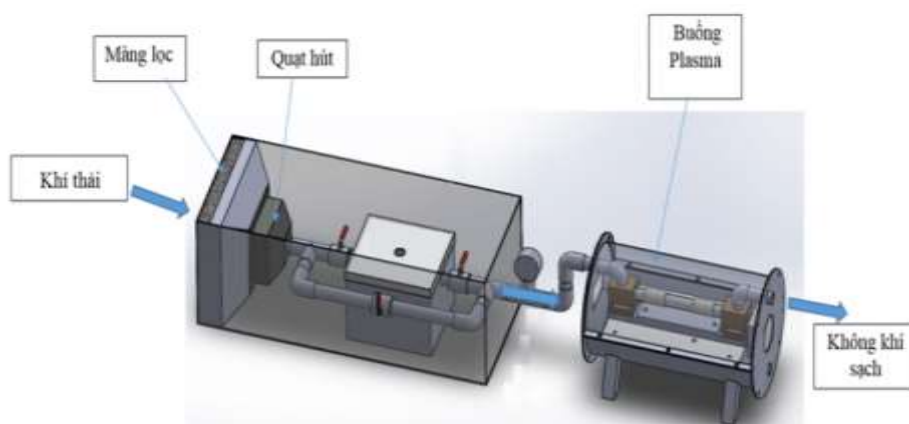
1.12.3 Ứng dụng trong xử lý bề mặt

Một ứng dụng mà DBD có thể được sử dụng thành công là để sửa đổi các đặc điểm của bề mặt vật liệu. Việc sửa đổi có thể nhắm mục tiêu vào sự thay đổi trong tính ưa nước, hoạt hóa bề mặt, đưa vào các nhóm chức năng, v.v. Các bề mặt polyme dễ được xử lý bằng DBD, trong một số trường hợp, cung cấp diện tích xử lý cao.



Hình 1.24: Xử lý bề mặt bằng plasma

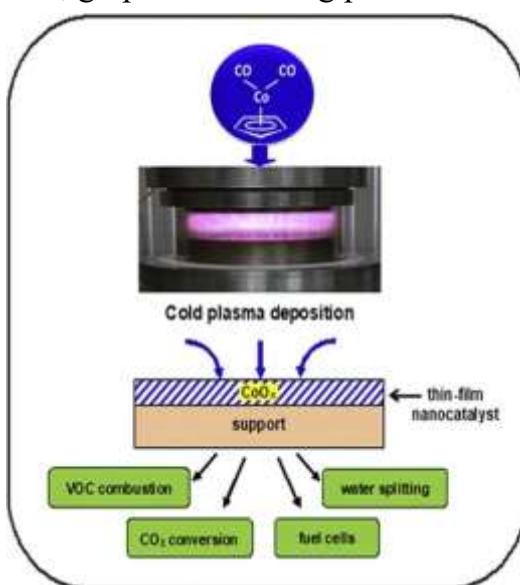
1.12.4 Ứng dụng xử lý nước, xử lý khí thải



Hình 1.25: Cấu tạo của hệ thống xử lý khí thải bằng plasma

Quá trình xử lý khí thải bằng công nghệ plasma bao gồm hai giai đoạn quan trọng:

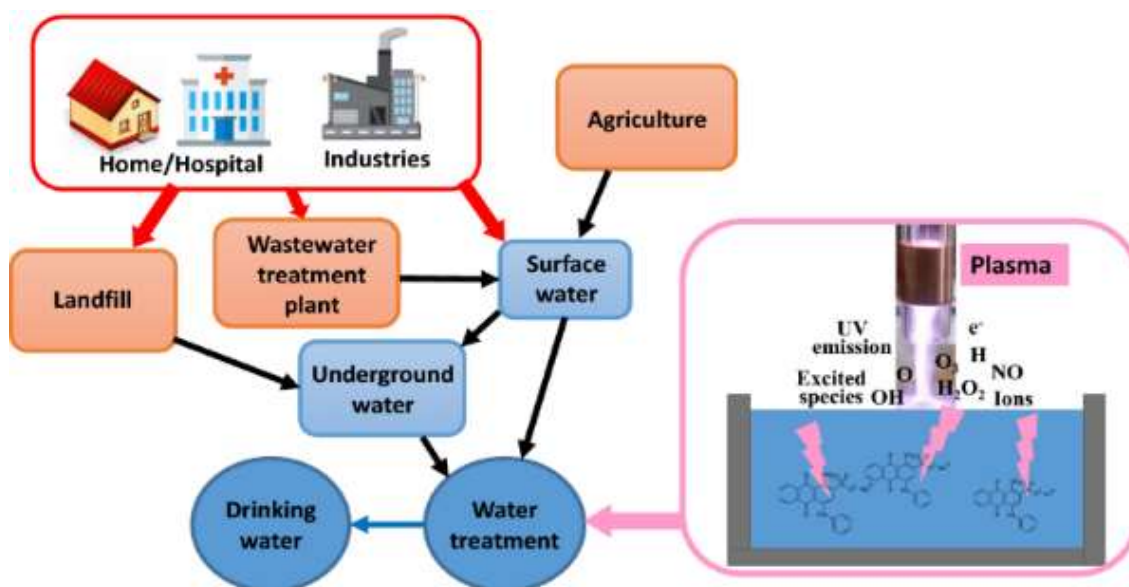
Giai đoạn thứ nhất: Lọc bụi. Trước khi khí thải được xử lý bằng công nghệ plasma cần trải qua giai đoạn lọc bụi. Giai đoạn này nhằm loại bỏ các hạt bụi và các tạp chất có kích thước lớn trong khí thải, giúp bảo vệ buồng plasma và tăng hiệu quả xử lý.



Hình 1.26: Ứng dụng xử lý khí thải

Giai đoạn thứ hai: Xử lý plasma. Giai đoạn này là giai đoạn chính của quá trình xử lý khí thải. Khí thải sau khi được lọc bụi sẽ được đưa vào buồng plasma, nơi có sự hiện diện của plasma. Plasma được tạo ra bằng cách cung cấp điện áp cao cho khí, làm cho các nguyên tử và phân tử trong khí bị ion hóa và tạo ra các hạt electron, ion tự do và các phân tử kích thích. Các hạt này có khả năng phản ứng với các chất ô nhiễm trong khí thải, như VOC, NO_x, SO_x, CO, CO₂ và các kim loại nặng, và phân hủy chúng thành các chất vô hại hoặc dễ xử lý hơn, như nước, oxy, nitơ, carbon và các hợp chất không bay hơi. Quá trình xử lý plasma có thể diễn ra ở nhiệt độ thấp hoặc cao, tùy thuộc vào loại plasma và loại khí thải.

Công nghệ Plasma giúp xử lý những thành phần gây ô nhiễm trong nước thải một cách triệt để. Ngoài ra, nó có khả năng diệt khuẩn, khử mùi nên ngày càng được nhiều doanh nghiệp sử dụng. Sự kết hợp của điện trường Plasma lạnh sẽ tạo ra các ion và electron tự do, ngoài ra còn có các tia UV, sóng điện từ ở mức 10 – 40 kV/cm. Những thành phần này sẽ bám vào các vi khuẩn trong nước và tiêu diệt chúng.



Hình 1.27: Ứng dụng xử lý nước, xử lý khí thải

DBD plasmas như một loại plasma không nhiệt điển hình là một dạng của công nghệ oxy hóa tiên tiến (AOT). Đã được chứng minh là có hiệu quả trong việc tạo ra các loại oxy phản ứng (ROS) như gốc hydroxyl (OH), có khả năng oxy hóa cao đáng kể và tiếp theo là các gốc oxy (O), ozone (O₃) và oxy già (H₂O₂) cùng với tia UV hoạt động hiệu quả trong việc loại bỏ các chất ô nhiễm từ nước mà không tạo ra các sản phẩm phụ có hại

Hiện nay, các doanh nghiệp chế biến thực phẩm, khu rửa thịt gia cầm đã và đang ứng dụng thành công quy trình xử lý nước thải bằng công nghệ Plasma.

Chương 2: THIẾT LẬP MÔ HÌNH THÍ NGHIỆM

2.1. Giới thiệu chung

Mô hình thí nghiệm ống phóng tia plasma sử dụng khí Nitơ và máy biến áp Neon được phát triển dựa trên mô hình thí nghiệm màn chắn điện môi thường bao gồm một hệ thống chứa khí Nitơ, một nguồn cung cấp điện áp, và các thiết bị cảm biến đo và ghi lại các thông số liên quan đến phản ứng phóng điện.

Mục đích thí nghiệm

Mục đích của thí nghiệm phóng điện là nghiên cứu các đặc tính điện học của hệ thống nhằm hiểu rõ hơn về cơ chế phóng điện và tối ưu hóa các thông số vận hành. Cụ thể, thí nghiệm tập trung vào việc đo đạc, phân tích xung dòng phóng điện và các yếu tố như điện áp phóng điện, dòng điện, mật độ plasma, và năng lượng, công suất tiêu tán. Kết quả thu được sẽ giúp xây dựng các mô hình mô phỏng, dự đoán hiệu suất và định hướng thiết kế hệ thống DBD cho các ứng dụng thực tế như xử lý khí thải, khử trùng, tạo ozone, và kích hoạt bề mặt vật liệu. Việc nghiên cứu các đặc tính điện học cũng là cơ sở để phát triển các nguồn điện và vật liệu điện môi phù hợp, đảm bảo tính ổn định và hiệu quả lâu dài trong các ứng dụng công nghiệp.

2.1.1 Plasma phóng điện màn chắn điện môi DBD

a. Tổng quan về phóng điện màn chắn điện môi

Phóng điện màn chắn điện môi (Dielectric Barrier Discharge-DBD) là hiện tượng phóng điện được tạo ra trong không gian khí giữa hai điện cực, trong đó ít nhất một điện cực được bao phủ bởi vật liệu điện môi. Trong tất cả các cấu hình của buồng phản ứng DBD, luôn có sự hiện diện của một hoặc nhiều lớp điện môi giữa các điện cực kim loại. Lớp điện môi đóng một vai trò quan trọng trong việc hạn chế lượng điện tích di chuyển đến các điện cực, do đó ngăn cản sự phóng điện phát triển đến phóng điện hồ quang và giữ nhiệt độ plasma ở mức nhiệt độ phòng. Điện môi là một chất cách điện và không thể truyền dẫn dòng điện một chiều, do đó nguồn điện áp xoay chiều tần số cao hoặc nguồn xung lặp tần số cao cần được sử dụng để tạo ra phóng điện DBD.

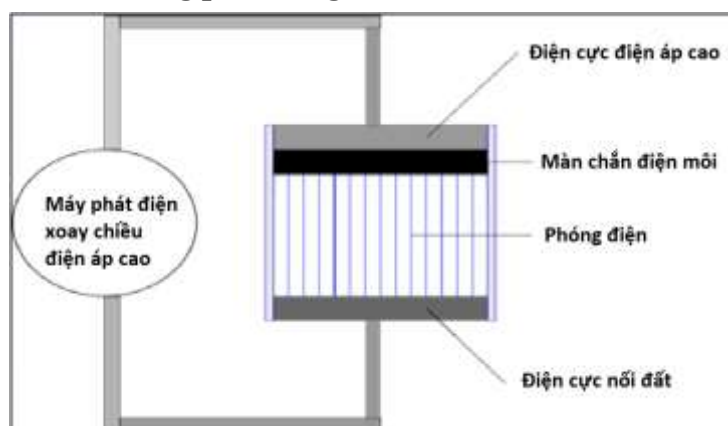
Phóng điện màn chắn điện môi (DBD) tương tự như corona xung, ở chỗ sự phát triển của nó là kết quả của việc cố gắng tìm ra giải pháp tránh hình thành hồ quang. Trong trường hợp DBD, màn chắn điện môi được sử dụng để dừng dòng điện và ngăn ngừa hình thành hồ quang.

Ngược lại với corona xung, DBD không yêu cầu nguồn điện xung phức tạp như vậy. Khe hở điện cực DBD bao gồm một hoặc nhiều lớp điện môi, nằm trong đường dẫn

dòng điện. Khoảng cách khe hở thường nằm trong khoảng từ 0,1 mm đến vài cm. Một số vật liệu điện môi có thể sử dụng là thủy tinh, thạch anh và gốm.

DBD không đồng nhất (trừ một số loại khí như heli) và bao gồm nhiều vi phóng điện tương tác, chuyển động. Một cấu hình thú vị bao gồm việc sử dụng cơ thể con người làm điện cực thứ hai (điện cực nổi DBD). Phóng điện màn chắn điện môi phù hợp nhất cho các ứng dụng nhiệt độ thấp (phòng) bao gồm khử trùng và ứng dụng y tế.

b. Cấu hình của buồng phản ứng



Hình 2.1: Cấu trúc phóng điện màn chắn điện môi

DBD thường được cấu tạo từ hai điện cực, trong đó ít nhất một điện cực được phủ một lớp cách điện. Các cấu hình phổ biến bao gồm dạng phẳng (hai tấm song song) và dạng hình trụ (các tấm đồng trục với một ống cách điện ở giữa).

Cấu trúc điển hình của thiết bị DBD trong đó một trong hai điện cực được phủ bằng vật liệu chắn điện môi. Các đường giữa điện môi và điện cực đại diện cho các sợi phóng điện, thường có thể nhìn thấy bằng mắt thường.

Trong tất cả các cấu hình của lò phản ứng DBD, luôn có sự hiện diện của một hoặc nhiều lớp điện môi giữa các điện cực kim loại. Lớp điện môi đóng một vai trò quan trọng trong việc hạn chế lượng điện tích di chuyển đến các điện cực, do đó ngăn cản sự phóng điện phát triển dẫn đến phóng điện hồ quang và giữ nhiệt độ plasma ở nhiệt độ phòng. Khi xảy ra phóng điện, lớp điện môi tại cực âm và cực dương sẽ đồng thời được tích điện bởi các ion dương và electron di chuyển tới, sự tích lũy điện tích trên lớp điện môi làm giảm điện trường trong không gian phóng điện, hệ quả là cản trở sự di chuyển điện tích về phía điện cực, và làm cho DBD trở thành sự phóng điện tự chấm dứt. Điện môi là một chất cách điện và không thể truyền dẫn dòng điện một chiều, do đó nguồn điện áp xoay chiều tần số cao hoặc nguồn xung lặp tần số cao cần được sử dụng để tạo ra phóng điện DBD.

Trong các lò phản ứng DBD lớp điện môi thường được làm bằng thủy tinh, thạch anh, gốm sứ hoặc PTFE (Teflon) với tổn thất điện môi thấp, độ bền điện môi lớn, ngoài

ra lò phản ứng DBD cần có tỷ lệ diện tích bề mặt trên thể tích lớn để thúc đẩy quá trình khuếch tán khí trong không gian phản ứng nhằm giữ cho nhiệt độ trong lò phản ứng luôn ở nhiệt độ phòng.

c. Nguyên lý hoạt động

Khi một điện áp xoay chiều cao được áp dụng giữa hai điện cực, phóng điện xảy ra trong khoảng cách giữa các điện cực. Lớp cách điện ngăn không cho dòng điện liên tục chảy qua, dẫn đến sự hình thành các vi phóng điện nhỏ và ngắn hạn.

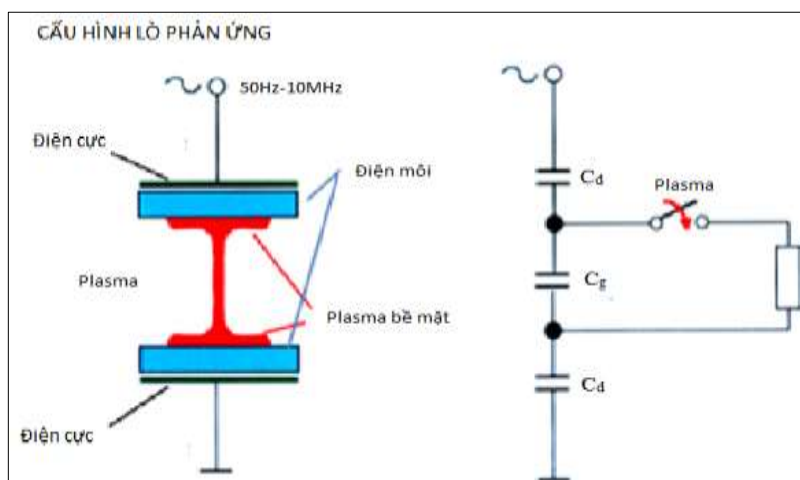
Phóng điện màn chắn điện môi được tạo ra như thế nào :



Hình 2.2: Tia plasma tạo ra từ phóng điện màn chắn điện môi

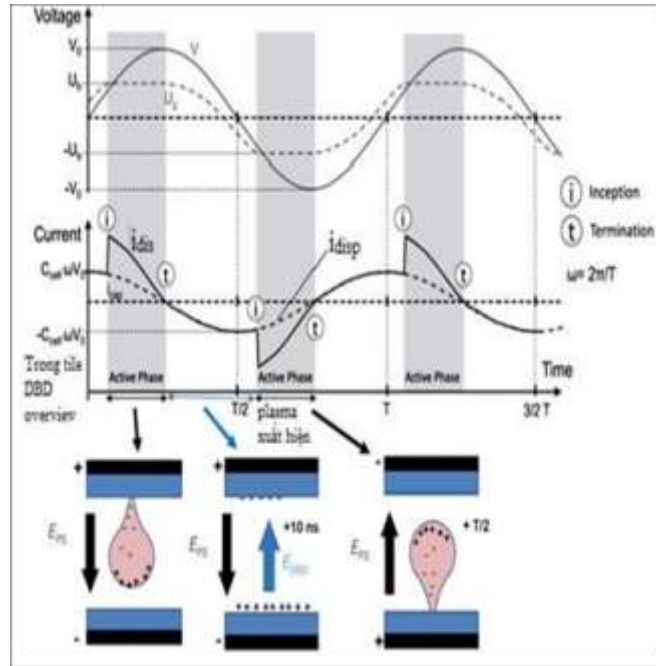
Phóng điện màn chắn điện môi được tạo ra bằng cách sử dụng các tấm mica làm điện môi, đặt trên hai tấm thép làm điện cực. Phóng điện diễn ra trong không khí bình thường, ở tần số khoảng 30 kHz, với khoảng cách phóng điện khoảng 4 mm. Chân của phóng điện là sự tích tụ điện tích trên bề mặt màn chắn.

d. Đặc tính điện học của plasma phóng điện DBD



Hình 2.3: Sơ đồ cấu hình điện hình của lò phản ứng DBD

Sơ đồ thay thế tương đương của phóng điện màn chắn DBD được mô tả như Hình 2.3. Điện áp phóng điện phụ thuộc vào tính chất khí, áp suất (mật độ) và khe hở phóng điện. Khi điện áp nhỏ hơn ngưỡng điện áp phóng điện ($V_b(t)$), lò phản ứng DBD hoạt động như một tải điện dung có điện dung tương đương là C_{DBD} bao gồm điện dung của lớp điện môi C_d và điện dung của khe hở khí C_g mắc nối tiếp với nhau, dòng điện trong thời gian này chỉ là dòng điện dung gây ra bởi sự thay đổi điện áp đặt vào lò phản ứng và tỷ lệ thuận với tốc độ của sự thay đổi này (dV/dt).



Hình 2.4: Dạng sóng điển hình của điện áp giữa hai điện cực ($v(t)$), điện áp khe hở phóng điện ($v_g(t)$), điện áp phóng điện ($v_b(t)$), dòng điện trong mạch

Khi điện áp đặt lên lò phản ứng tiếp tục tăng để đạt đến điện áp phóng điện. Sẽ xuất hiện sự ion hóa trong khe hở, sau đó phóng điện xảy ra và tạo ra một kênh dẫn điện giữa các điện cực. Phóng điện xảy ra được ký hiệu bằng cách đóng công tắc và cho phép dòng điện phóng điện (i_{dis}) chạy qua kênh plasma. Plasma phóng điện sẽ tạo ra kênh dẫn điện nối liền hai điện cực và được thay thế trên sơ đồ bằng điện trở R_p với giá trị điện trở thay đổi nhanh chóng theo thời gian. Dòng phóng điện (i_{dis}) xuất hiện giữa thời điểm bắt đầu xảy ra phóng điện (t_i) và thời điểm chấm dứt phóng điện (t) là do sự di chuyển có hướng của các điện tích trong không gian phóng điện.

Các điện tích di chuyển tới các điện cực, sau đó tích tụ trên lớp điện môi, sự tích tụ điện tích trên lớp điện môi tạo ra một điện trường $\vec{E}_{ng}$ với trường do nguồn điện áp bên ngoài $\vec{E}'_{cu}$ gây ra. Sự ngược chiều của hai dạng điện trường này làm cho tổng điện trường bên trong khe hở phóng điện không đủ để duy trì DBD và làm tắt sự phóng điện. Trong nửa chu kỳ tiếp theo khi điện áp của nguồn bên ngoài đảo ngược cực tính, điện trường do điện áp của nguồn bên ngoài sẽ cùng chiều với điện trường của lớp điện tích tích tụ trên lớp điện môi, sự phóng điện sẽ xảy ra theo chiều ngược lại. Dòng điện $i(t)$ trong mạch khi có hiện tượng phóng điện bao gồm hai dòng điện xếp chồng gồm dòng điện phóng điện (i_{dis}) có dạng xung do sự dịch chuyển có hướng của các hạt điện tích tự do, và dòng điện điện dung có dạng sóng hình sin và chậm pha hơn điện áp nguồn một góc 90 độ và được tạo ra bởi sự thay đổi điện áp giữa hai điện cực của lò phản ứng DBD (i_{disp}).

Các phương trình mô tả dòng điện $i(t)$, điện áp khe hở $v_g(t)$ và lượng điện tích $Q_p(t)$ di chuyển tới và tích lũy trên lớp điện môi trong quá trình phóng điện được thể hiện như sau:

$$v_g(t) = v(t) - \frac{1}{C_d} \int i(t) \cdot dt \quad (2.1)$$

$$i = i_{\text{dis}} + i_{\text{disp}} \quad (2.2)$$

$$i_{\text{disp}} = C_{\text{DBD}} \frac{dv}{dt} \quad (2.3)$$

$$Q_n(t) = \int i_{\text{dis}} \cdot dt \quad (2.4)$$

Công suất tức thời và công suất trung bình tiêu thụ trong mỗi chu kỳ điện áp được mô tả bằng các công thức sau:

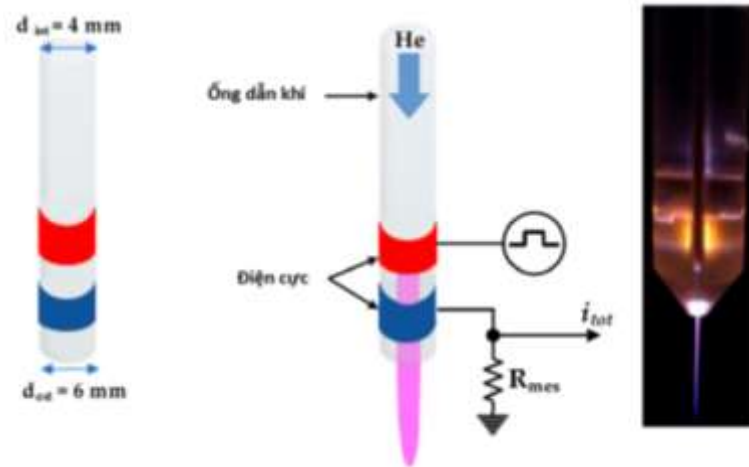
$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (2.5)$$

$$e(t) = \int p(t) \cdot dt \quad (2.6)$$

$$p_{\text{avg}}(t) = \frac{1}{T} \int p(t) \cdot dt \quad (2.7)$$

Trong các thiết bị DBD thực, các phần tử điện dung ký sinh, tổn hao dòng điện rò, tổn thất điện môi, có thể ảnh hưởng đáng kể đến dòng điện, điện tích và công suất đo được.

2.1.2 Plasma tia (Plasma jet)



Hình 2.5: Cấu hình của ống phóng tia Plasma

a. Cấu tạo

Ống dẫn khí (Tube) được làm từ vật liệu Thạch anh (quartz) hoặc thủy tinh chịu nhiệt cao. Chức năng làm buồng phản ứng chứa plasma, dẫn khí vận chuyển (thường là khí hiếm như Helium hoặc Argon), cách điện với điện cực, cho phép plasma ổn định mà không gây cháy điện. Kích thước điển hình thường là đường kính trong (d_{tanh}): ~4 mm, đường kính ngoài: ~6 mm và chiều dài hiệu dụng: ~50-100 mm tùy cấu hình

Điện cực (Electrodes) có thể có hai hoặc nhiều điện cực, được đặt bên ngoài hoặc bên trong ống tùy cấu hình. Điện cực cao áp (High-voltage electrode) được làm bằng vật liệu nhôm hoặc đồng. Được gắn bên ngoài hoặc quấn quanh phần giữa ống. Chức năng là nhận tín hiệu điện áp cao tần (RF hoặc xung) và tạo ra trường điện mạnh kích thích plasma hình thành. Điện cực nối đất (Ground electrode) được làm bằng vật liệu nhôm hoặc đồng. Thường nằm phía dưới hoặc dưới đầu phun và kết nối với mạch đo dòng qua điện trở R_{mes} . Chức năng là đóng vai trò cực đối của trường điện, giúp định hướng phóng điện và cho phép đo và điều khiển dòng plasma.

Đầu phun plasma (Nozzle) có vị trí là đầu ra mở tại đáy ống dẫn khí. Vai trò làm định hướng tia plasma, giữ cho dòng plasma ổn định, định hướng và xuyên ra ngoài không khí và có thể được tùy chỉnh để tập trung hoặc khuếch tán tia plasma.

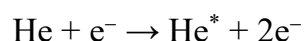
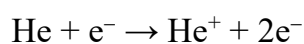
Nguồn cấp khí (Gas inlet) có vị trí là ở đầu trên ống dẫn khí. Chức năng là cung cấp dòng khí mang (He, Ar) với lưu lượng điều khiển được. Khí đi qua vùng điện cực, bị ion hóa và trở thành plasma.

Mạch điện cao tần (RF Power Supply) không nằm trực tiếp trong ống, nhưng liên kết với điện cực. Tần số phổ biến: 13.56 MHz hoặc xung điện áp cao (~kV). Chức năng là tạo trường điện đủ mạnh để duy trì plasma liên tục hoặc theo chu kỳ

b. Nguyên lý hoạt động

Ống phóng tia plasma hoạt động dựa trên nguyên lý phóng điện không nhiệt trong môi trường khí trơ (thường là khí hiếm như Helium hoặc Argon). Quá trình này được kích thích bởi một nguồn điện cao áp tần số cao (thường là sóng RF ~13.56 MHz hoặc xung điện áp cao).

Tia plasma được tạo thành từ việc cung cấp dòng khí trơ. Khí hiếm (He, Ar) được đưa vào từ đầu trên của ống với lưu lượng điều khiển được (ví dụ 1–5 L/min). Dòng khí này di chuyển theo phương trục ống, đi qua vùng điện cực và đi ra ở đầu phun. Nguồn điện áp cao (RF hoặc xung) được cấp vào điện cực kích thích (điện cực cao áp), điện cực còn lại (thường là điện cực nối đất) tạo nên vùng từ trường mạnh trong lòng ống. Vùng từ trường tạo ra này có tần số cao làm cho electron dao động mạnh. Electron tự do bị gia tốc bởi từ trường bên trong ống dẫn và chạm với phân tử khí làm xảy ra các phản ứng ion hóa, phản ứng kích thích dẫn đến phản ứng ion hóa bậc 2 sau đó.



Kết quả: tạo ra plasma lạnh, bao gồm các hạt hoạt hóa như: Ion dương (He^+), electron tự do (e^-), trạng thái kích thích (He^*) và photon tử ngoại (UV). Plasma được dòng khí mang đẩy ra ngoài đầu ống, hình thành một tia plasma định hướng (plasma

jet). Trong môi trường không khí, He^* , e^- ,... tiếp tục phản ứng với các phân tử O_2 , N_2 , H_2O trong không khí tạo ra các loài hoạt tính sinh học: gốc O, OH, NO, ROS, RNS...

2.1.4. Một số loại khí làm việc thường sử dụng trong việc tạo ra plasma lạnh

a. Một số loại khí

Khí trơ (còn gọi là khí hiếm) là các nguyên tố thuộc nhóm 18 trong bảng tuần hoàn, bao gồm Helium (He), Neon (Ne), Argon (Ar), Krypton (Kr), Xenon (Xe), và Radon (Rn). Chúng có đặc điểm là hóa trị bằng 0, ít phản ứng hóa học trong điều kiện thông thường, nhưng lại dễ dàng tạo plasma nhờ ion hóa trong điện trường cao. Dưới đây là chi tiết từng loại khí trơ được sử dụng trong plasma:

Argon (Ar): Dễ ion hóa, chi phí thấp, phổ biến nhất trong plasma lạnh. Dùng trong xử lý bề mặt, cắt kim loại, và điều trị y tế.

Helium (He): Có khả năng truyền nhiệt cao và dễ ion hóa. Thường được sử dụng trong plasma áp suất khí quyển (APPJ) để tạo plasma ổn định.

Neon (Ne): Dùng trong các ứng dụng phát sáng như đèn neon.

Krypton (Kr) và Xenon (Xe): Tạo ra tia UV mạnh, thường được sử dụng trong đèn excimer và các ứng dụng khử trùng.

Chất khí được sử dụng trong đề tài này là khí Ar (Argon) và khí N (Nito) vì đáp ứng được những tiêu chí của một môi trường thí nghiệm lý tưởng: dễ ion hóa, giá thành hợp lý, an toàn, và cho kết quả plasma ổn định.

b. Khí Nito

Nito (N) là nguyên tố hóa học thuộc nhóm phi kim trong bảng tuần hoàn các nguyên tố. Nito có mặt trong tất cả các cơ thể sống, nó cấu tạo nên nhiều hợp chất quan trọng như: axit amin, amoniac, axit nitric,... Cơ thể người chứa khoảng 3% nito theo trọng lượng.

Khí nito có công thức hoá học là N_2 . Nó có 5 điện tử trên lớp ngoài cùng nên có thể nhận nhiều electron với nhiều hoá trị khác nhau như II, III và IV.

Nito thường có dạng lỏng hoặc khí (mặc dù nito có thể đạt được thể rắn khi đóng băng ở -210°C). Trong không khí, nó tồn tại dưới dạng phân tử N_2 , không phản ứng với các loại khí khác nên được gọi là khí trơ. Nó hóa lỏng ở nhiệt độ rất thấp -196°C , trong điều kiện áp suất khí quyển. Là phân tử khí phổ biến chiếm 80% trong không khí có tính chất gần như khí trơ.

Với cấu trúc hoá học của nito, nguyên tử nito cần nhiều năng lượng hơn để phá vỡ để phản ứng với các chất khác. So với khí oxy, khí nito ít phản ứng hơn và không bắt lửa và thực hiện phản ứng đốt cháy. Đây cũng chính là lý do để ngăn các quá trình oxi

hoá chậm và nhanh nên giúp con người an toàn trong điều kiện nhiệt độ và áp suất thường

Tính chất lý – hoá của khí Nito

Tính chất vật lý: Khí Nito là chất khí không màu, không mùi, không vị. Nó có khối lượng nhẹ hơn không khí. Nito chiếm 4/5 trong không khí nhưng không có khả năng duy trì sự cháy và sự sống. Nito ít tan trong nước, những thông số đặc trưng gồm: nhiệt độ hoá lỏng ở $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, khí được ngưng tụ thành chất lỏng không màu, nhẹ hơn nước; nhiệt độ hoá rắn cũng rất thấp ở $-210\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tính chất hoá học: Nito là một hoạt chất ít tham gia các phản ứng hóa học, chỉ trong những điều kiện nhất định do phân tử chứa liên kết ba rất bền vững nên ở điều kiện thường. Nito vừa là chất khử vừa là chất oxi hoá. Các mức oxi hoá mà nito có thể có là: $-3, 0, +1, +2, +3, +4, +5$. Nó có số oxi hóa 0 nên vừa thể hiện tính oxi hóa và tính khử.

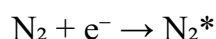
Mức năng lượng ion hóa

Bảng 2.1: Các mức năng lượng ion hóa của khí Nito

Tên mức	Năng lượng (eV)	Mô tả
$A^1\Pi_g$	~ 6.2	Mức kích thích điện tử thấp
$A^3\Sigma_u^+$	$\sim 6.2 - 7.0$	Mức phát quang phổ biến
$B^3\Pi_g$	~ 7.35	Mức được kích thích mạnh bởi plasma
$C^3\Pi_u$	~ 11.0	Mức cao
Nguỡng ion hóa ($N_2 \rightarrow N_2^+$)	15.58 eV	Mất electron

Một số phản ứng của khí Nito trong môi trường tạo plasma

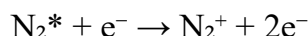
1. Kích thích điện tử (Electronic Excitation):



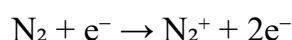
N_2 bị kích thích lên các mức điện tử cao hơn (ví dụ: $A^3\Sigma_u^+$, $B^3\Pi_g$, $C^3\Pi_u$...)

→ Sau đó có thể: Phát ra ánh sáng (UV, VIS): $N_2^* \rightarrow N_2 + h\nu$

Gây va chạm tạo ion:

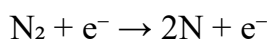


2. Ion hóa:



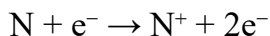
Ion hóa trực tiếp tạo ion phân tử dương. Ngưỡng năng lượng khoảng 15.58 eV

3. Phân ly (Dissociation):



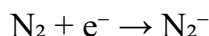
Nitơ phân tử bị tách ra thành hai nguyên tử N – đây là phản ứng rất quan trọng trong plasma hoạt hóa. Ngưỡng năng lượng khoảng 9.8 eV (cần đủ năng lượng để phá liên kết $N\equiv N$)

4. Ion hóa nguyên tử:



Nếu N_2 đã phân ly, các nguyên tử N cũng có thể bị ion hóa. Năng lượng ion hóa nguyên tử N: 14.53 eV

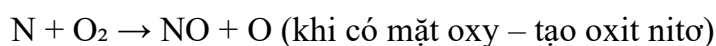
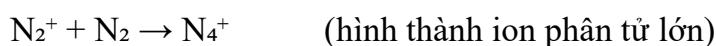
5. Tạo ion phân tử âm (hiếm):



Khó xảy ra, chỉ bền ở plasma năng lượng thấp.

6. Phản ứng thứ cấp / tạo gốc tự do:

Các phản ứng này quan trọng trong ứng dụng plasma hóa học:



c. Khí Ar (Argon)

Trong hóa học, argon là một nguyên tố hóa học nằm trong bảng tuần hoàn và có công thức hóa học là Ar. Argon có số nguyên tử khối là 18 khối lượng nguyên tử 39,948. Đây là một chất khí hiếm, trong bầu khí quyển Trái Đất thì khí argon chiếm 0,934% thể tích và 1,288% khối lượng. Argon được phân lập từ không khí bằng phương pháp chưng cất phân đoạn, phổ biến nhất là chưng cất phân đoạn đông lạnh, một quá trình cũng tạo ra nitơ tinh khiết, oxy, neon, krypton và xenon. Vỏ Trái đất và nước biển lần lượt chứa 1,2 ppm và 0,45 ppm argon.

Về bản chất, argon là khí không độc hại. Đặc biệt, khí argon không cháy nên khi sử dụng sẽ không gây nổ. Tuy nhiên, argon là khí nặng hơn không khí nhiều lần nên nó có thể tích tụ lại dưới không khí, gây ra hiện tượng thiếu oxy và khiến người sử dụng bị ngạt thở, đau đầu, chóng mặt.

Tính chất lý – hoá của khí Ar

Khí argon là khí trơ, nó không có phản ứng hóa học với các chất hóa học khác.

Nguyên tố Ar này có tính chất cụ thể như sau:

Tính chất vật lý: Ở dạng lỏng hoặc dạng rắn, argon là chất khí không màu, không mùi, không vị và không độc. Loại khí này nặng hơn không khí 1,5 lần.

Tính chất hóa học: argon là khí trơ, vậy nên nó không phản ứng với các chất hóa học khác. argon cũng không thể hòa tan kim loại dù nó ở thể lỏng hay thể rắn. Tuy nhiên, loại khí này lại có khả năng hòa tan trong nước, độ hòa tan của argon xấp xỉ với oxygen

và gấp nitrogen 2,5 lần. Một nghiên cứu cho thấy rằng, khi cho argon phản ứng với nước thì argon có thể tạo ra các mắt lưới với nước.

Mức năng lượng ion hóa

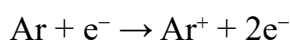
- Trạng thái cơ bản:
- + Cấu hình electron: $[\text{Ne}]3s^23p^6$
- + Mức năng lượng: 0 eV
- Một số mức kích thích

Bảng 2.2: Các mức năng lượng ion hóa của khí Argon

Cấu hình kích thích	Năng lượng (eV)	Mô tả
$3p^54s^1$	~11,55	Mức kích thích thấp
$3p^54p^1$	~13,1-13,5	Các mức cao hơn
$3p^54d^1$	~14,0-14,5	Mức kích thích rất gần ngưỡng ion hóa
Ngưỡng ion hóa	15,76 eV	Rời khỏi nguyên tử

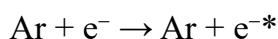
Một số phản ứng của khí Ar trong môi trường tạo plasma

1. Ion hóa do va chạm:



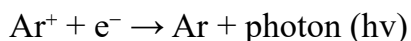
Va chạm của electron năng lượng cao với nguyên tử $\text{Ar} \rightarrow$ ion dương Ar^+ và thêm một electron tự do. Ngưỡng năng lượng yêu cầu: ≥ 15.76 eV (năng lượng ion hóa đầu tiên)

2. Kích thích điện tử:



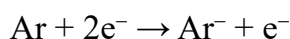
Argon bị kích thích lên mức năng lượng cao hơn (Ar là nguyên tử ở trạng thái kích thích). Ar^* rất quan trọng trong phát xạ ánh sáng (ví dụ: ánh sáng tím trong plasma Argon)

3. Tái kết hợp:



Ion Ar^+ bắt electron để trở lại trạng thái trung hòa và phát ra photon – quá trình này tạo ra phát xạ ánh sáng.

4. Tạo ion âm (rất hiếm, nhưng có thể):



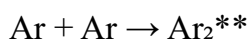
Khó xảy ra vì Ar không dễ nhận electron, nhưng có thể xảy ra tạm thời trong plasma năng lượng thấp.

5. Hình thành Ar_2^+ (ion phân tử):



Ion Ar^+ có thể va vào nguyên tử Ar tạo thành ion phân tử Ar_2^+ , phổ biến trong plasma áp suất cao.

6. Hình thành excimer Ar_2^* (một dạng trạng thái kích thích phân tử):



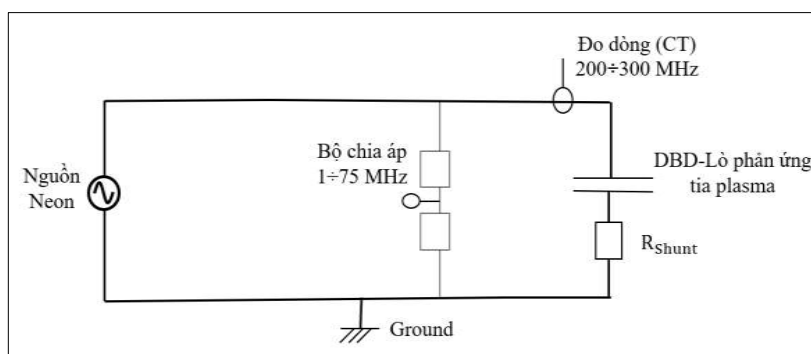
Sau đó phân rã: $\text{Ar}_2^* \rightarrow 2\text{Ar} + h\nu$ (UV photon)

Đây là cơ chế chính trong laser excimer khí Argon (ArF , Ar_2) phát tia cực tím.

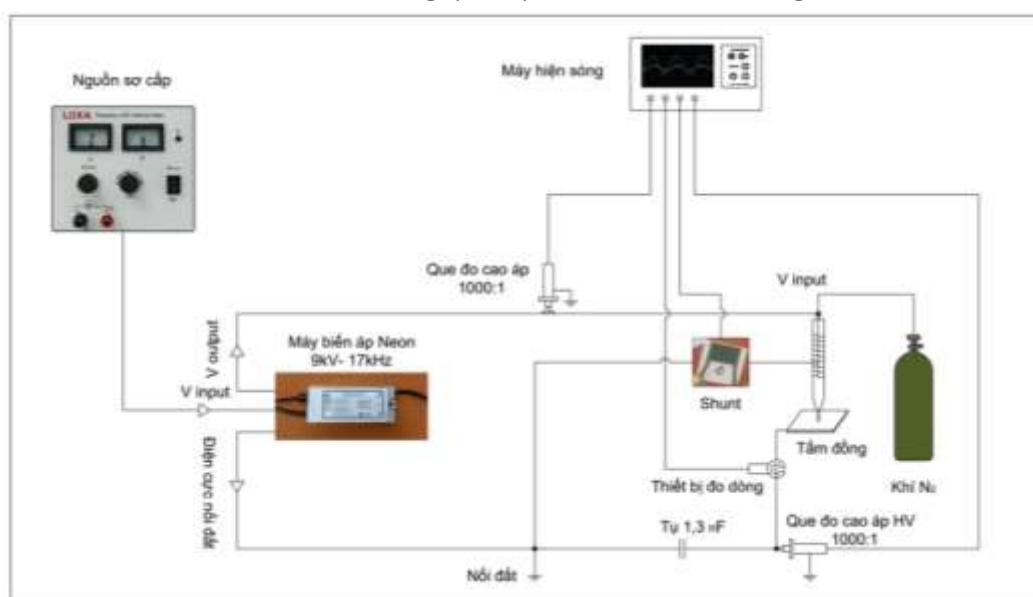
2.2. Mô hình thí nghiệm ống phóng tia plasma dùng nguồn Neon tần số cao

Thí nghiệm này được thực hiện bằng cách sử dụng mô hình ống phóng tia plasma hoạt động dựa trên nguyên lý của phóng điện DBD ở áp suất khí quyển. Nguyên lý hoạt động cũng như các thiết bị sử dụng trong mô hình được sẽ được mô tả một cách chi tiết dưới đây.

Thí nghiệm sử dụng nguồn là máy biến áp Neon vì đây là loại nguồn điện tương đối rẻ, có tần số và điện áp cao do đó khi tiến hành thí nghiệm sẽ dễ kích thích quá trình phóng điện xảy ra.

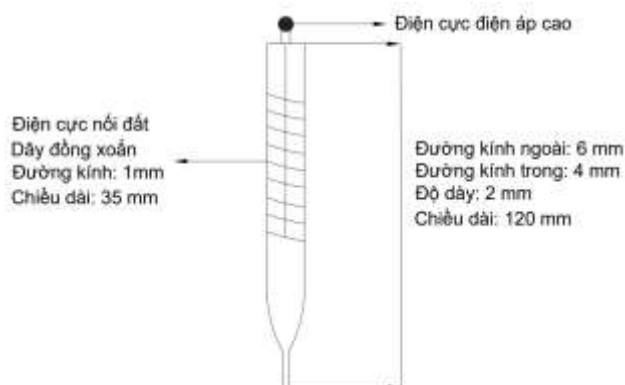


Hình 2.6: Sơ đồ nguyên lý của mô hình thí nghiệm



Hình 2.7: Sơ đồ đi dây của mô hình thí nghiệm

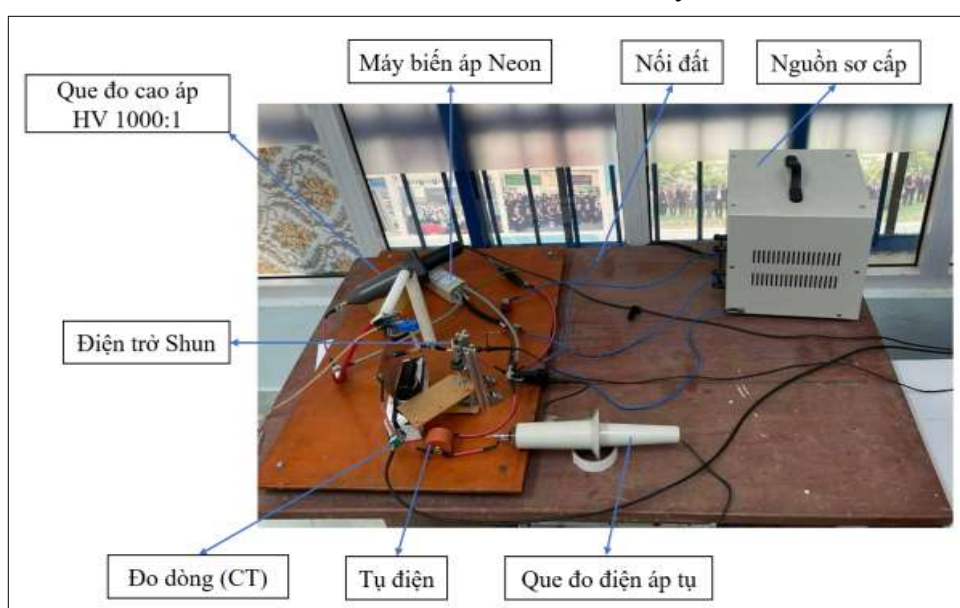
Tia plasma được tạo ra bằng cách sử dụng ống phóng điện làm buồng phản ứng. Ống phóng điện làm bằng thủy tinh có đường kính trong 4 mm, đường kính ngoài 6 mm, dài 120 mm, độ dày 2mm. Ở giữa ống phóng điện lắp một dây đồng xoắn có đường kính 1 mm và chiều dài 35 mm. Các điện cực được sử dụng trong thí nghiệm này được làm bằng một dây đồng bán kính 0,5 mm bao quanh ống phóng điện thủy tinh.



Hình 2.8: Cấu tạo ống phóng tia plasma

Plasma được tạo ra trong môi trường khí Nitơ, khí Nitơ được dẫn vào ống phóng tia plasma qua bộ điều khiển lưu lượng, tốc độ khí được sử dụng trong thí nghiệm là 1 slm và 3 slm. Điện áp và dòng điện được quan sát bằng máy hiện sóng. Hình ảnh mô hình thí nghiệm quan sát trong Hình 2.9. Đầu ra của lò phản ứng DBD, đặt một tấm đồng 40 x 40 mm để dẫn hướng plasma, khoảng cách với đầu ra ống phóng là 5 mm.

Ống phóng tia plasma hoạt động dựa trên phóng điện DBD là cơ sở tạo tia plasma lạnh có nhiều ứng dụng như việc cắt kim loại trong sản xuất, ứng dụng trong công nghệ hàng không, màn hình plasma, ứng dụng trong y học..., nên nó cần được nghiên cứu chuyên sâu và tìm hiểu về các đặc tính điện học và đó là lý do nhóm lựa chọn đề tài này.



Hình 2.9: Hình ảnh mô hình thí nghiệm

2.3. Thiết bị sử dụng cho mô hình thí nghiệm

2.3.1. Nguồn sơ cấp



Hình 2.10: Nguồn vô cấp 1 pha

Nguồn vô cấp 1 pha

Biến áp vô cấp lioa 1 pha 3,3kva, biến áp vô cấp LiOA SD - 2515, biến áp vô cấp LiOA 15A chuyên dùng cho các thí nghiệm và các nhu cầu đặc biệt.

Đặc điểm biến áp vô cấp LiOA 3,3 kVA 1 pha

Biến áp vô cấp LiOA 1 pha chuyên dùng cho các thí nghiệm và các nhu cầu đặc biệt. Điện áp đầu ra thay đổi theo ý muốn như thử dòng tải Aptomat, thử ổn áp, điều khiển tốc độ quay của động cơ.

Bảng 2.3: Bảng thông số nguồn sơ cấp sử dụng trong mô hình thí nghiệm

Các thông số kỹ thuật	Giá trị
Model	SD - 2515
Công suất tối đa so với điện áp đầu ra 220 V	3,3 kVA
Dòng tải tối đa	15 A
Điện áp vào 1 pha	220 V
Điện áp ra 1 pha thay đổi theo ý muốn	2 V – 250 V
Bảo vệ quá tải và ngắn mạch	Aptomat 15 A
Độ cách điện	> 3 MΩ ở điện áp 1 chiều 500 V
Độ bền điện	Kiểm tra ở điện áp 2000V

2.3.2. Máy biến áp Neon

Máy biến áp Neon M-5 9kV là một loại thiết bị cung cấp điện áp cao (9 kV) được sử dụng chủ yếu trong các thí nghiệm điện, nghiên cứu vật lý, hoặc trong các ứng dụng yêu cầu điện áp cao. Đây là một dạng máy biến áp cao áp trong các phòng thí nghiệm

hoặc môi trường nghiên cứu, và có thể được sử dụng để tạo ra các hiện tượng phóng điện, kiểm tra tính chịu đựng của vật liệu đối với điện áp cao, hoặc mô phỏng các điều kiện làm việc của các thiết bị điện tử trong môi trường điện áp lớn.

Bảng 2.4: Bảng thông số máy biến áp Neon sử dụng trong mô hình thí nghiệm

Các thông số kỹ thuật	Giá trị
Model	
Dòng điện	1-5 mA
Tần số	50 Hz- 60Hz
Điện áp đầu ra	9 kV
Công suất	5 – 10 W



Hình 2.11: Máy biến áp Neon

2.3.3. Thiết bị đo, giám sát sử dụng trong mô hình

Máy biến dòng điện là một loại máy biến áp chuyên dùng để giảm dòng điện lớn trong mạch điện xuống một giá trị nhỏ hơn, tỷ lệ thuận, để dễ dàng đo lường, bảo vệ và điều khiển. Máy biến dòng hoạt động dựa trên hiện tượng cảm ứng điện từ, giống như máy biến áp thông thường.

Nguyên lý hoạt động của biến dòng đo lường

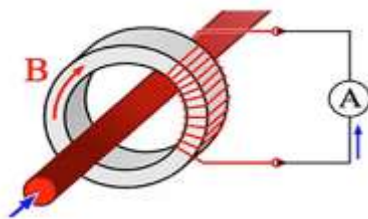
Biến dòng hoạt động dựa trên hiện tượng cảm ứng điện từ. Khi dòng điện xoay chiều chạy qua 1 dây dẫn, xung quanh nó sẽ xuất hiện một điện trường, điện trường này cảm ứng lên cuộn dây và sẽ xuất hiện một dòng điện trong đó. Tỷ lệ dòng điện này được căn cứ vào số vòng dây được cuốn trong cuộn dây biến dòng.

$$I_1 \cdot N_1 = I_2 \cdot N_2$$

Trong đó: I_1 : dòng sơ cấp

I_2 : dòng thứ cấp

N_1, N_2 : số vòng dây cuộn sơ cấp và thứ cấp



Hình 2.12: Nguyên lý hoạt động của biến dòng

Biến dòng có 2 chế độ làm việc cơ bản: Chế độ hở mạch và chế độ ngắn mạch.

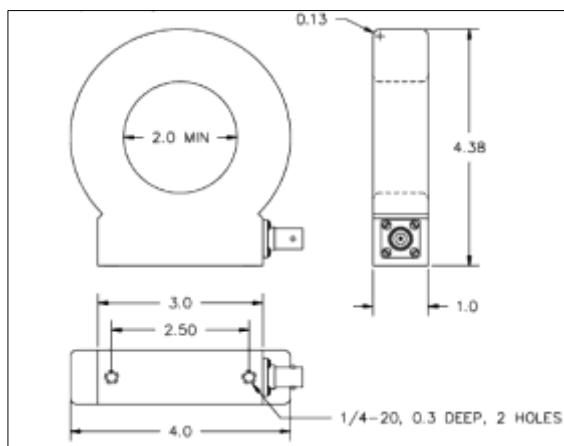
Chế độ hở mạch thứ cấp: Khi thứ cấp hở mạch, phía thứ cấp sẽ có điện áp cảm ứng với biên độ rất cao gây nguy hiểm cho người và các thiết bị thứ cấp. Để chống được hiện tượng này, người ta còn chế tạo ra biến dòng tuyến tính hay còn gọi là biến dòng có khe hở không khí.

Chế độ ngắn mạch của dòng sơ cấp: Thứ cấp có phụ tải Z_2 : Tỷ số giữa dòng ngắn mạch sơ cấp trên dòng định mức gọi là bội số dòng của máy biến dòng. Khi bội số này lớn, sai số CT tăng và sai số này còn phụ thuộc vào dòng thứ cấp hoặc tải. Thường với mạch bảo vệ, bội số dòng điện của CT dòng phải đạt giá trị sao cho sai số của nó dưới 10%.

Biến dòng có tỷ số dòng điện tỷ lệ nghịch với số vòng dây quấn nên có thể thay đổi tỷ số biến dòng bằng cách thay đổi số vòng dây quấn phía sơ cấp hoặc thứ cấp.

Mô hình thí nghiệm sử dụng biến dòng Current monitor model Pearson 6585

Current monitor 6585 là một thiết bị giám sát dòng điện có độ nhạy 0,5V/A vào 50 Ω . Nó có khả năng đo được dòng điện tối đa lên đến 500 A và dòng điện hiệu dụng tối đa lên đến 10 A.



Hình 2.13: Kích thước máy biến dòng điện Hình 2.14: Hình ảnh máy biến dòng điện

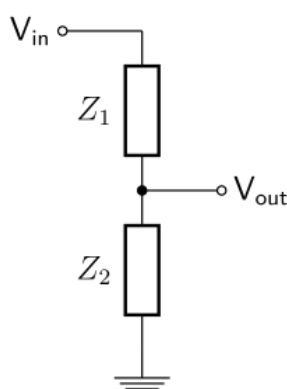
Thiết bị này được sử dụng để quan sát và đo lường dòng điện từ vài mA cho đến hàng ngàn A. Kết nối với máy hiện sóng số (Oscilloscope) qua đầu dò điện áp thụ động TPP0101 100 MHz để thu dòng điện hiển thị dưới dạng sóng.

Bảng 2.5: Bảng thông số thiết bị đo sử dụng trong mô hình thí nghiệm

Các thông số kỹ thuật	Giá trị
Model	Pearson 6585
Độ nhạy	1 V/A $\pm$ 1%
Điện kháng đầu ra	50 Ω
Dòng điện cực đại tối đa	500 A
Dòng hiệu dụng tối đa	10 A
Độ trễ	0.3% μ s
Thời gian tăng có thể sử dụng	1.5 ns
Nhiệt độ hoạt động	0-65 °C

2.3.4. Thiết bị đo cao áp P5122, TEKTRONIK P6015A

Bộ chia điện áp (còn được gọi là bộ chia điện thế) là mạch tuyến tính thụ động tạo ra điện áp đầu ra (V_{out}) bằng một phần điện áp đầu vào (V_{in}). Chia điện áp là kết quả của việc phân phối điện áp đầu vào giữa các thành phần của bộ chia.



Hình 2.15: Sơ đồ mạch bộ chia áp

Bộ chia điện áp điện trở thường được sử dụng để tạo điện áp tham chiếu hoặc để giảm độ lớn của điện áp để có thể đo được và cũng có thể được sử dụng làm bộ suy giảm tín hiệu ở tần số thấp. Đối với dòng điện một chiều và tần số tương đối thấp, bộ chia điện áp có thể đủ chính xác nếu chỉ được tạo thành từ điện trở; khi cần đáp ứng tần số trên một phạm vi rộng (chẳng hạn như trong đầu dò dao động), bộ chia điện áp có thể có các thành phần điện dung được thêm vào để bù điện dung tải.

Mô hình thí nghiệm sử dụng que đo cao áp P5122 (HV 1000:1) và TEKTRONIX P6015

Thiết bị đo cao áp sử dụng máy hiện sóng dòng MDO - 3022 kết nối với đầu dò để hiển thị dạng sóng trên máy, đầu ra que đo cao áp được gắn vào mũi cực dương, ngoài ra còn tiếp địa thiết bị để đảm bảo an toàn trong quá trình thử nghiệm.

Bảng 2.6: Bảng thông số kỹ thuật của thiết bị đo cao áp P5122

Các thông số kỹ thuật	Giá trị
Model	PINTEK P5122 (Taiwan)
Bảng thông tần số dòng DC	200 MHz
Độ suy giảm	100X
Đạt tiêu chuẩn	IEC61010-031

Thiết bị đo cao áp P5122 gồm có: 1 đầu móc lớn, 1 chì có đầu móc, 1 chì có kẹp cá sấu, 1 dụng cụ điều chỉnh.

Bảng 2.7: Bảng thông số kỹ thuật của thiết bị đo cao áp TEKTRONIX P6015A

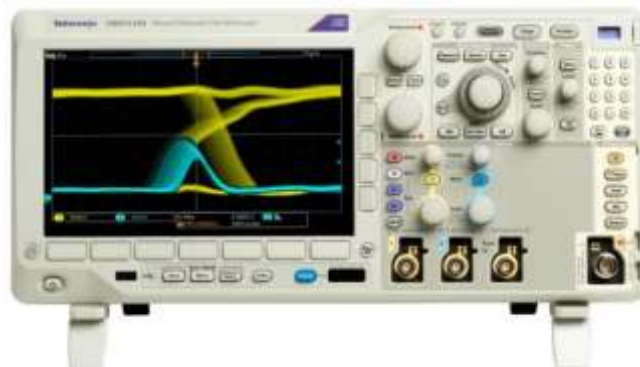
Các thông số kỹ thuật	Giá trị
Model	TEKTRONIX P6015A (USA)
Dải điện áp	20 kV DC/40 kV
Tần số	75 (MHz).
Vật liệu điện môi	Silicone

Thiết bị đo cao áp gồm có 1 đầu dò móc, 1 đầu cắm, 1 kẹp cá sấu, 1 dây nối đất, 1 hộp đựng, 1 hướng dẫn sử dụng.



Hình 2.16: Que đo cao áp TEKTRONIX P6015A (HV 1000:1)

2.3.5. Oscilloscope (Máy hiển thị sóng): Tektronix MDO3022



Hình 2.17: Máy hiển thị sóng

Các thông số kỹ thuật chung của Tektronix MDO 3022: Băng thông lên đến 200MHz, tốc độ lấy mẫu tối đa 2.5GSa/s độ chính xác cho các phép đo trực dọc 3% cho phép xem được chi tiết tín hiệu. Với công nghệ lấy mẫu độc quyền của Tektronix, tốc độ lấy mẫu ở mỗi kênh là giống nhau ở tất cả các kênh trong điều kiện hoạt động tối đa không bị chia thông số như các dòng oscilloscope khác.

Lưu dữ liệu thí nghiệm từ oscilloscope sang máy tính bằng phần mềm openchoice của Tektronix.



Hình 2.18: Kết nối Oscilloscope với máy tính

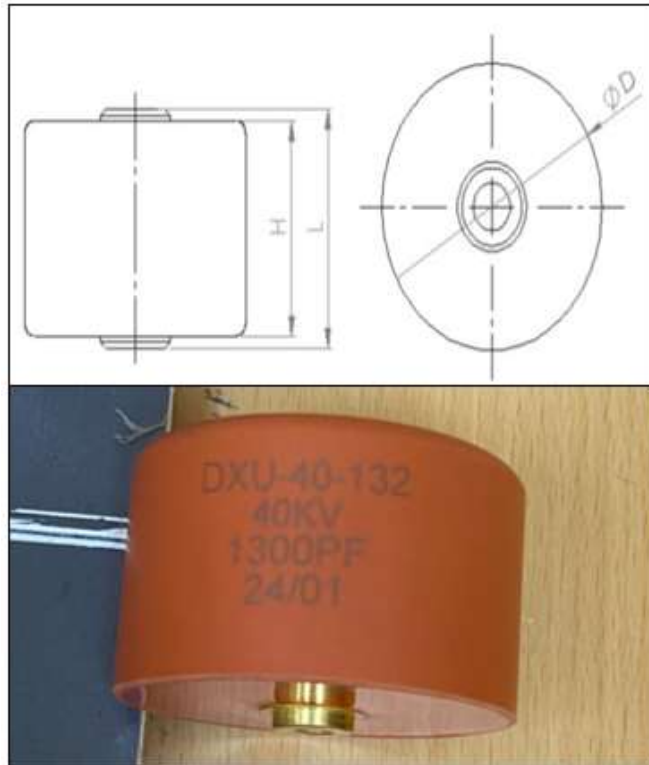
Để lưu dữ liệu thí nghiệm từ oscilloscope vào máy tính, trước tiên cần kết nối máy hiện sóng với máy tính thông qua cổng LAN. Sau đó, khởi động phần mềm OpenChoice Desktop do Tektronix cung cấp. Trong giao diện phần mềm, chọn thiết bị MDO3022 từ danh sách thiết bị được nhận diện. Tiếp theo, chọn tab Instrument Data và nhấn nút Get Screen/Image hoặc Get Data tùy thuộc vào nhu cầu lưu ảnh màn hình hoặc dữ liệu dạng số. Sau khi dữ liệu được tải về, người dùng có thể lưu lại trên máy tính dưới các định dạng như CSV, TXT hoặc hình ảnh BMP.

2.3.6. Tụ điện cao áp

Tụ điện là một linh kiện điện tử thụ động, gồm hai bản cực đặt song song và ngăn cách nhau bởi lớp điện môi. Tụ điện cao áp được kết nối với đầu ra tấm đồng mục đích giúp giám sát lượng điện tích tạo ra từ tia plasma tích lũy trên mục tiêu xử lý (tấm đồng).

Bảng 2.8: Bảng thông số kỹ thuật của tụ điện

Thông số kỹ thuật	Giá trị
Model	DXU – 40-132
Điện dung	1300 pF
Dung sai điện dung	± 10
Điện áp định mức DC	40kV
Kích thước (mm)	52D x 32L x 30H
Loại thiết bị cuối (Vít và độ dày)	M5x4mm



Hình 2.19: Tụ lọc dùng trong mô hình thí nghiệm

2.3.7. Điện trở shunt

Điện trở shunt là một linh kiện được sử dụng trong đo dòng điện. Thông thường, điện trở shunt được làm từ manganin, một loại vật liệu có độ chính xác cao và giá trị điện trở thấp. Chức năng của nó là giảm điện áp bằng cách tạo ra một đường đi thay thế có điện trở rất nhỏ. Do đó cho phép đo dòng điện một cách chính xác, không ảnh hưởng đến mạch điện chính. Điện trở Shunt được sử dụng trong điện kế để đo dòng điện lớn. Nó được kết nối song song với mạch của điện kế. Sử dụng định luật Ohm, chúng ta biết rằng điện áp rơi trên một điện trở, chia cho điện trở của điện trở đó bằng với dòng điện.

Đặc điểm của điện trở shunt có điện cảm L rất nhỏ

$$U_{sh} = R_{shi} \cdot I_{meas} \quad (2.8)$$

$$I = \frac{U_{sh}}{R_{shi}} \quad (2.9)$$

Trong đó: U_{sh} : Điện áp đặt lên

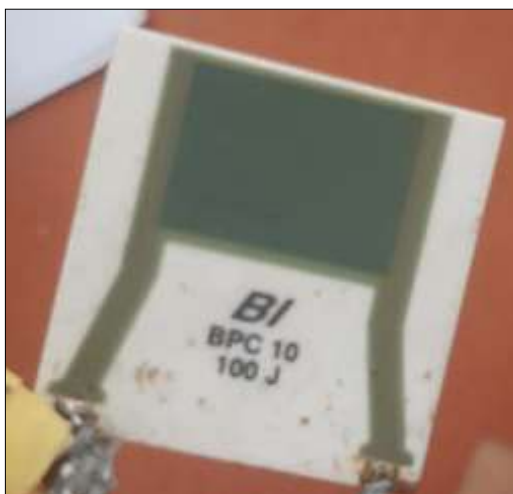
R_{shi} : Điện trở Shunt

I_{meas} : Dòng qua điện trở Shunt

Do đó, nếu chúng ta đo điện áp trên một điện trở shunt trong mạch, chúng ta có thể dễ dàng tính được dòng điện.

Bảng 2.9: Thông số kỹ thuật của điện trở Shunt

Danh mục	Thông số
Model	BI BPC 10
Công suất định mức	10W
Điện áp hoạt động max	300Vac, 500VDC
Dải điện trở	10 Ω
Dung sai	+/-5%, 1%, 2%
Nhiệt độ hoạt động	-55 - +155 °C
Điện trở cách điện	Trên 1000 M Ω



Hình 2.20: Điện trở shunt

Bảng 2.10: Bảng thông tin chi tiết về thiết bị sử dụng trong mô hình thí nghiệm

Tên thiết bị	Công ty sản xuất	Số mô hình	Số loại
Nguồn vô cấp 1 pha	LiOA	SD - 2515	-
Máy biến áp Neon	LESIP	HON0000288512K	Loại C
Máy biến dòng điện (CT)	U.R.D. CO., Ltd.	CTL-28-S90-05Z-IR1-CL1	No. 905207
Điện trở shunt	TT ELECTRONICS	BPC10100J	9432299
Tụ điện	Genvolt	DXU – 40-132	No.24/01
Thiết bị đo cao áp	TEKTRONIK	P5122, P6015A	-
Máy hiện sóng	TEKTRONIK	MD03022	-

2.3.8 Hệ thống khí



Hình 2.21: Hình ảnh sơ đồ bình khí nén khí Nitơ

a. Bình khí

Cấu tạo: vỏ thép chịu áp lực và có tem kiểm định an toàn. Có áp suất cao (thường ~150–200 bar)

Chức năng: Cung cấp khí đầu vào (thường là khí tinh khiết). Loại khí: Nitơ (N_2).

b. Bộ điều áp

Cấu tạo: Gồm hai đồng hồ đo: một đồng hồ đo áp suất bình và một đo áp suất đầu ra. Có núm điều chỉnh và van khóa an toàn.

Chức năng: Giảm áp suất khí từ bình (~200 bar) xuống mức làm việc (~1–4 bar).

Loại thường dùng: single-stage hoặc dual-stage.

c. Van khóa và ống dẫn khí

Cấu tạo van khóa: Được bố trí ở nhiều điểm: sau bình khí, trước buồng plasma...

Loại thường dùng: van kim (needle valve) hoặc van bi (ball valve).

Chức năng: Ngắt dòng khí thủ công, dùng trong bảo trì hoặc sự cố.

Cấu tạo ống dẫn khí: được làm từ TPC (Thermoplastic polyester elastomers), có nhiều kích thước khác nhau.

Chức năng: Vận chuyển khí từ nguồn đến buồng plasma.

d. Bộ điều khiển lưu lượng

Cấu tạo: là loại điều khiển thủ công. Dải điều khiển phổ biến: 1-5 slm. Có nhiều loại bộ điều khiển lưu lượng cho các loại khí khác nhau.

Chức năng: Điều chỉnh và đo chính xác lưu lượng khí đưa vào hệ thống.

Tính chất vật lý của khí Argon và Nitơ khác nhau, áp suất sẽ không giống nhau dù đồng hồ đo chỉ số là như nhau. Áp suất đo được trên đồng hồ cho Argon sẽ bị ảnh hưởng bởi sự chênh lệch giữa tỷ trọng của hai khí. Trong điều kiện lý tưởng, mỗi loại

khí nên dùng thiết bị đo lưu lượng riêng biệt, tuy nhiên do điều kiện của phòng thí nghiệm không có thiết bị đo lưu lượng cho khí Nito nên phải dùng thiết bị đo lưu lượng của khí Argon. Do đó khi sử dụng thanh đo lưu lượng hiệu chuẩn cho khí Argon để đo khí Nito, cần phải điều chỉnh lưu lượng đọc được từ thiết bị để có giá trị thực tế của khí Nito. Lưu lượng của khí Nito sẽ lớn hơn so với lưu lượng đọc được trên thiết bị đo khi hiệu chuẩn cho khí Argon, vì Nito có tỷ trọng thấp hơn. Tỷ trọng của Argon (Ar) = 1.784 g/L. Tỷ trọng của Nito (N₂) = 1.2506 g/L

Hệ số quy đổi giữa khí Argon và khí Nito được tính bằng tỉ trọng hai khí

$$K = \frac{\text{Tỷ trọng Ar}}{\text{Tỷ trọng N}_2} = \frac{1,784}{1,2506} \approx 1,426$$

Công thức quy đổi lưu lượng

Lưu lượng thực tế của khí Nito (Q_n) sẽ được quy đổi từ lưu lượng đo được trên thiết bị (Q_a) hiệu chuẩn cho khí Argon theo công thức:

$$Q_N = Q_A = Q_A \times \frac{1}{\sqrt{K}}$$

Với K=1,426 thì ta có:

$$Q_N = Q_A = Q_A \times \frac{1}{\sqrt{1,426}} \approx Q_A \times 0,835$$

Tính quy đổi lưu lượng khí Nito khi dùng thanh đo khí Argon

Với lượng 1 slm (Nito):

$$Q_N = 1 \times 0.835 = 0.835 \text{ slm (Argon)}$$

Như vậy, lưu lượng 1 slm khí Nito đo bằng thanh đo hiệu chuẩn cho Argon sẽ đọc là 0.835 slm khí Argon.

Với lưu lượng 3 slm (Nito):

$$Q_N = 3 \times 0.835 = 2.505 \text{ slm (Argon)}$$

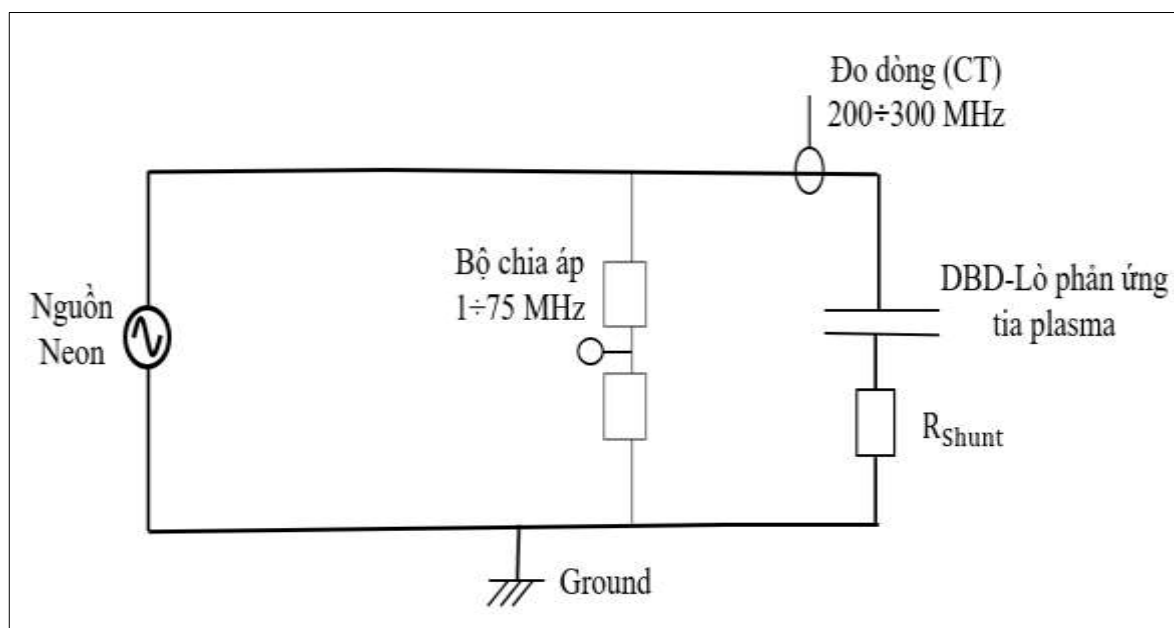
Như vậy, lưu lượng 3 slm khí Nito đo bằng thanh đo hiệu chuẩn cho Argon sẽ đọc là 2.505 slm khí Argon.

Chương 3: THỰC HIỆN THÍ NGHIỆM VÀ PHÂN TÍCH KẾT QUẢ

3.1. Sơ đồ và điều kiện thí nghiệm

Thiết lập thí nghiệm để tạo ra APPJ (Atmospheric Pressure Plasma Jet) được thể hiện trong Hình 3.1 – 3.2. Mô hình thí nghiệm được sắp xếp thành bốn phần chính: hệ thống cung cấp khí, nguồn điện, buồng phản ứng tia plasma và hệ thống thu thập dữ liệu thử nghiệm. Khí Nitơ (N_2) được sử dụng để tạo ra plasma được đưa vào vùng phóng điện từ phía trên của ống phóng và sau đó xả ra ngoài không khí ở đầu dưới. Lưu lượng khí dao động khoảng 1-3 slm. Hệ thống điện cao áp là nguồn điện cao áp hình sin hoạt động ở tần số thấp 50 Hz bao gồm nguồn điện sơ cấp và nguồn điện tăng áp của máy biến áp Neon. Nguồn điện sơ cấp là nguồn điện xoay chiều thương mại có thể điều chỉnh với biên độ điện áp đầu vào có thể thay đổi trơn tru từ 0 đến 230 V. Đầu ra của nguồn điện sơ cấp được tăng cường bằng máy biến áp tăng áp sau đó được kết nối với điện cực điện áp cao của ống phóng.

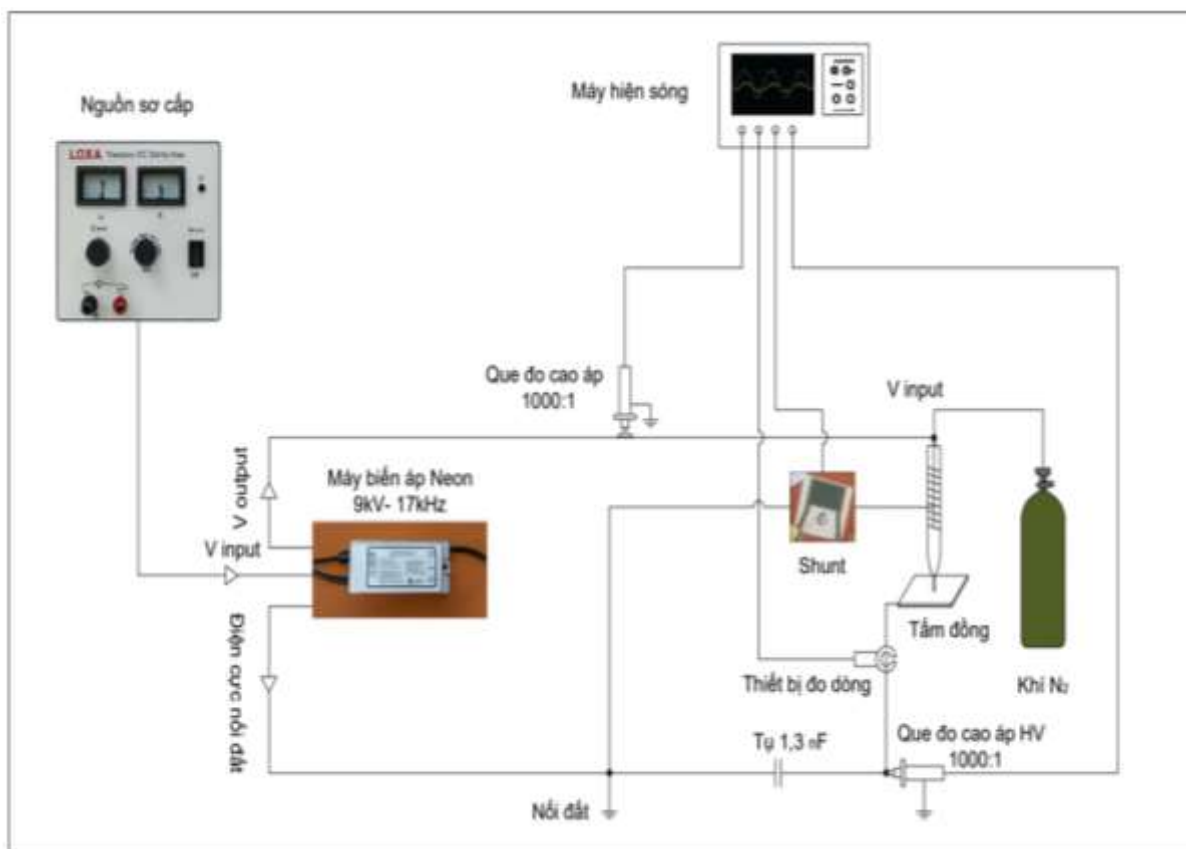
Buồng phản ứng tia plasma bao gồm một điện cực điện áp cao (HV) được đặt bên trong một ống thủy tinh đồng trục và một điện cực nối đất dưới dạng một sợi dây đồng được quấn theo hình xoắn ốc xung quanh bề mặt ngoài của ống. Điện cực cao áp là một kim vonfram dài 100 mm với đường kính 1 mm. Ống thủy tinh có đường kính ngoài là 6 mm, đường kính trong là 4 mm và chiều dài là 120 mm. Đầu cuối của điện cực cao áp được định vị cách đầu ống thủy tinh 10 mm và tấm đồng 40x40 mm được đặt ở đầu ra ống thủy tinh với khoảng cách 5 mm.



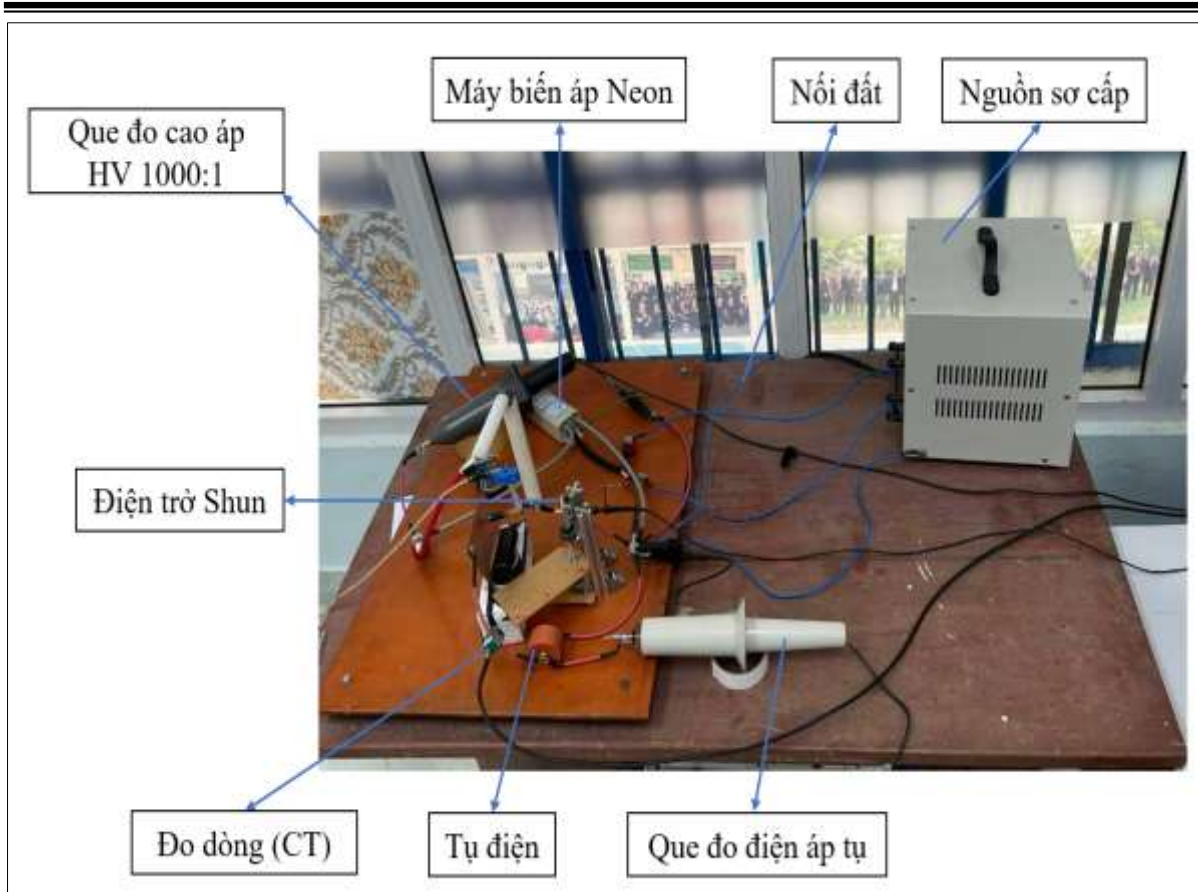
Hình 3.1: Sơ đồ nguyên lý của mô hình thí nghiệm

Hệ thống thu thập dữ liệu bao gồm một máy hiện sóng được kết nối với các đầu dò điện áp cao và các thiết bị theo dõi dòng điện. Điện áp tại điện cực nguồn được đo bằng đầu dò điện áp cao (Tektronix P6015A). Dòng phóng điện được theo dõi bằng cách sử dụng điện trở shunt 10Ω (BPC10100J) được kết nối nối tiếp giữa điện cực nối đất và điểm nối đất. Dòng phóng điện được xác định bằng cách đo độ sụt áp trên điện trở shunt và chia cho giá trị điện trở 10Ω của điện trở này. Điện trở shunt thường được làm từ manganin, một vật liệu có độ chính xác cao và giá trị điện trở thấp, và không cảm ứng. Chức năng của nó là giảm điện áp bằng cách tạo ra một dòng xoay chiều với rất ít điện trở. Do đó, nó cho phép đo dòng điện chính xác mà không ảnh hưởng đến mạch chính trong khi hạn chế dòng điện hài do điện dung ký sinh và dây dẫn gây ra.

Tiêu thụ điện năng có thể được ước tính bằng cách phân tích đường Q–V Lissajous. Đường Q–V Lissajous thu được bằng cách đặt một tấm đồng làm vật thể tương tác để thu thập điện tích truyền qua quá trình phóng và tích tụ trên lớp điện môi. Một tụ điện giám sát Capacitor monitor (CM) có điện dung 1300 pF được kết nối nối tiếp với tấm đồng để đo lượng điện tích tích tụ trên lớp điện môi sau mỗi chu kỳ phóng. Tương tự như vậy, một đầu dò điện áp (Tektronix P6015A) được sử dụng để đo độ sụt áp trên tụ điện giám sát.



Hình 3.2: Sơ đồ đi dây của mô hình thí nghiệm



Hình 3.3: Hình ảnh mô hình thí nghiệm sử dụng nguồn Neon tần số cao

Dữ liệu đã được ghi lại bằng máy hiện sóng kỹ thuật số Tektronix MDO3022-200 MHz- 2.5GS/s. Thử nghiệm đã được tiến hành với điều kiện được trình bày trong bảng 3.1.

Bảng 3.1: Điều kiện thí nghiệm với nguồn Neon tần số cao

Nguồn điện sơ cấp	0 ÷ 220 V – 50Hz
MBA Neon	9 kV – 17 kHz
Khí làm việc	Nitơ
Lưu lượng khí	1 slm và 3 slm
Áp suất	Áp suất không khí
Thời gian mẫu	500 ms
Số lượng mẫu trong 1 giây	2,5 GSa/s

Điện áp sẽ được đo tại điện cực cao áp của ống phóng điện, dòng điện được đo tại phía hạ áp nhằm hạn chế ảnh hưởng của các điện dung ký sinh tạo bởi dòng cao áp và nối đất. Các thí nghiệm được thực hiện với sự tăng dần biên độ điện áp cấp cho điện cực cao áp. Nhằm đánh giá ảnh hưởng của biên độ điện áp tới các đặc tính tia plasma.



Hình 3.4: Hình ảnh phóng điện tạo ra tia plasma khi thí nghiệm



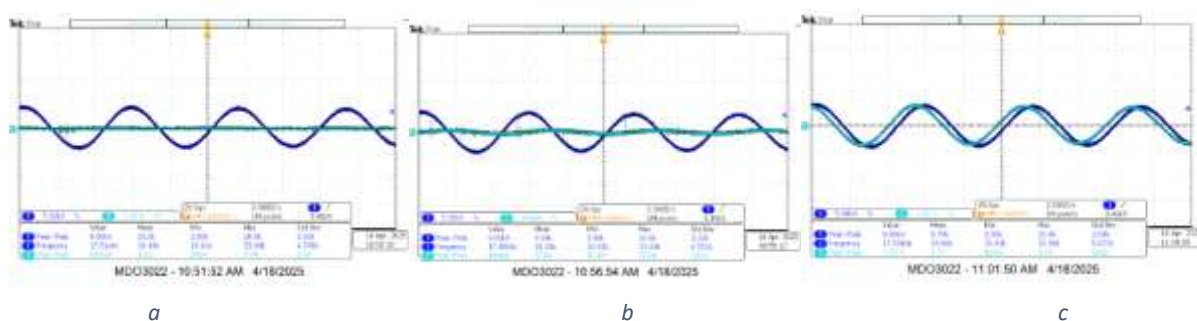
Hình 3.5: Hình ảnh máy hiện sóng đo và lấy dữ liệu thí nghiệm

3.2 Đặc tính điện học ống phóng tia Plasma với lưu lượng khí Nitơ 1 slm

3.2.1 Phân tích kết quả thí nghiệm

Các kết quả thí nghiệm được thực hiện với biên độ điện áp (V_{pp} tăng dần) và các thí nghiệm được thực hiện với $V_{pp} > 9$ kV, $V_{pp} = 9$ kV là mức biên độ điện áp bắt đầu có phóng điện tạo plasma.

Kết quả thí nghiệm ở mức điện áp $V_{pp} = 9$ kV:

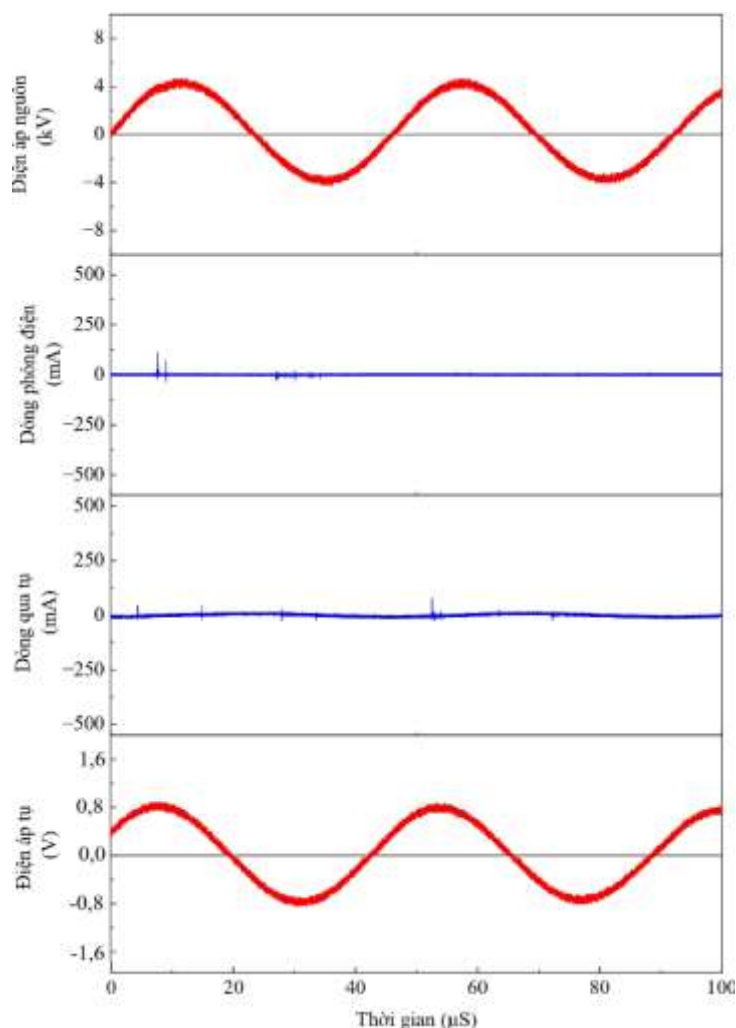


Hình 3.6: Hình ảnh từ máy hiện sóng ứng với biên độ điện áp $V_{pp} = 9$ kV

- (a) dạng sóng giữa điện áp nguồn và dòng phóng điện qua điện trở Shunt,
- (b) điện áp nguồn và dòng qua máy biến dòng điện,
- (c) điện áp nguồn và điện áp trên tụ điện giám sát

Hệ thống đo lường, và máy hiện sóng được kết nối với máy tính bằng phần mềm chuyên dụng. Các dữ liệu từ thí nghiệm được lưu trữ vào máy tính có kết nối với máy hiện sóng. Các dữ liệu được xử lý bằng phần mềm chuyên dụng và cho ra kết quả hiển

thị như Hình 3.7. Hình 3.7 thể hiện các dạng sóng tương ứng cho các đặc tính điện học của tia plasma khi biên độ điện áp nguồn cấp là $V_{pp} = 9 \text{ kV}$.



Hình 3.7: Đặc tính V - A của tia plasma ứng với biên độ điện áp nguồn $V_{pp}=9 \text{ kV}$

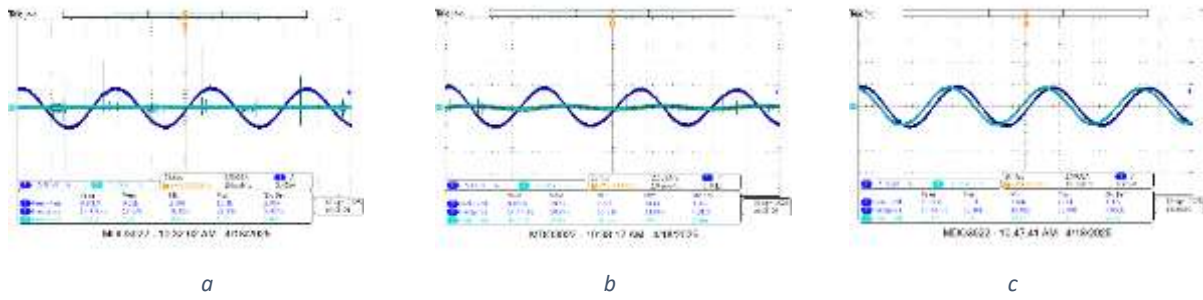
Hình 3.7 thể hiện kết quả thí nghiệm gồm điện áp nguồn, dòng phóng điện, dòng điện qua tụ đo lường, điện áp trên tụ đo lường.

Điện áp nguồn đặt lên điện cực cao áp của buồng phản ứng có biên độ $V_{pp}=9 \text{ kV}$, tần số khoảng 17 kHz , hiện tượng phóng điện xảy ra dòng phóng điện xuất hiện tại các sườn lên và sườn xuống ứng với mỗi nửa chu kỳ của điện áp nguồn. Với điện áp nguồn hình sin có $V_{pp}=9 \text{ kV}$, hình thành dòng phóng điện có giá trị lớn nhất là 112 mA .

Các điện tích của dòng tia plasma sẽ tích lũy trên tâm đồng định hướng và được đo lường bằng tụ C ($1,3 \text{ }\mu\text{F}$) thông qua các giá trị dòng và áp trên tụ.

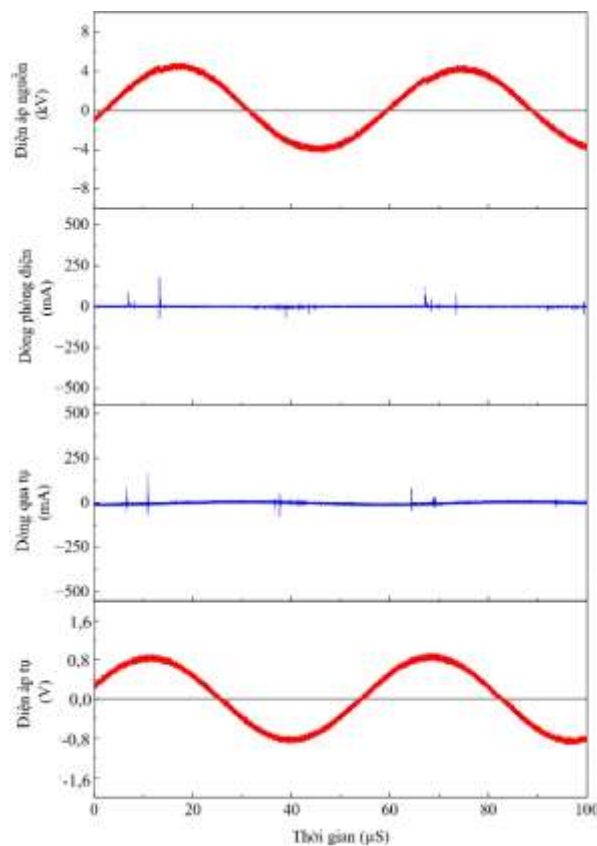
Điện áp trên tụ C cảm ứng và có dạng sóng gần giống dạng sóng điện áp nguồn từ đó tụ ghi nhận dòng điện do sự tích lũy điện trường I_{pd} .

Kết quả thí nghiệm khi tăng biên độ điện áp nguồn $V_{pp} = 9,8 \text{ kV}$:



Hình 3.8: Hình ảnh từ máy hiển sóng ứng với biên độ điện áp $V_{pp} = 9,8 \text{ kV}$

(a) dạng sóng giữa điện áp nguồn và dòng phóng điện qua điện trở Shunt, (b) điện áp nguồn và dòng qua máy biến dòng điện, (c) điện áp nguồn và điện áp trên tụ điện giám sát



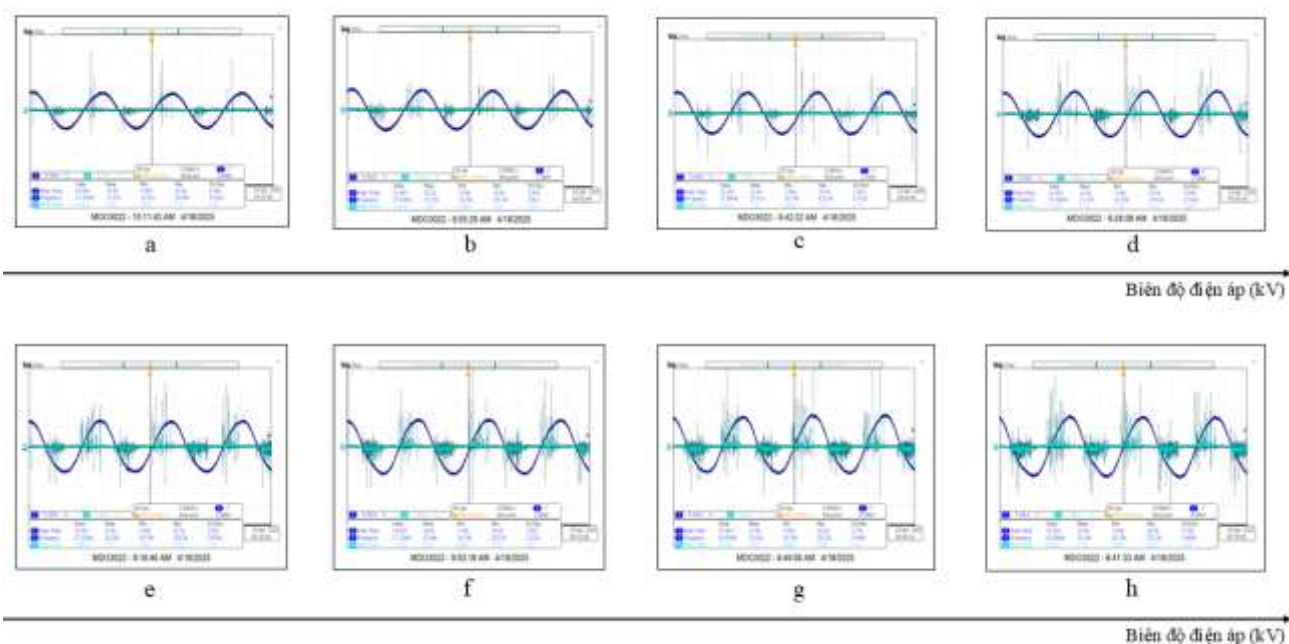
Hình 3.9: Đặc tính V-A của tia plasma ứng với biên độ điện áp nguồn $V_{pp} = 9,8 \text{ kV}$

Hình 3.9 thể hiện kết quả thí nghiệm gồm điện áp nguồn, dòng phóng điện, dòng điện qua tụ đo lường, điện áp trên tụ đo lường. Ở cấp điện áp nguồn hình sin $V_{pp} = 9,8 \text{ kV}$, hình thành dòng phóng điện có giá trị lớn nhất là 176 mA và phóng điện xảy ra.

Tương tự ở cấp điện áp $V_{pp} = 9 \text{ kV}$, phóng điện xảy ra ngay trước thời điểm điện áp nguồn đạt giá trị lớn nhất tại các sườn lên và sườn xuống của điện áp nguồn.

Tụ ghi nhận dòng điện do sự tích lũy điện tích từ dòng plasma.

Kết quả thí nghiệm ở các mức điện áp tăng dần $V_{pp} = 10,6 - 16,2 \text{ kV}$:



Hình 3.10: Dạng sóng giữa điện áp nguồn và dòng phóng điện qua điện trở Shunt được đo ở các biên độ điện áp khác nhau tương ứng (a) 10,6 kV; (b) 11,4 kV; (c) 12,2 kV; (d) 13 kV; (e) 13,8 kV; (f) 14,6 kV; (g) 15,4 kV và (h) 16,2 kV

Nhận xét

Hình 3.10 thể hiện dạng sóng điện áp nguồn và dòng phóng điện qua điện trở Shunt được đo tại các mức biên độ điện áp khác nhau, từ 10,6 kV đến 16,2 kV. Quan sát từ hình (a) đến (h), phóng điện xảy ra trước thời điểm điện áp đạt giá trị lớn nhất tại các sườn lên và sườn xuống của điện áp nguồn. Tại các sườn lên xuất hiện dòng phóng điện lớn hơn dòng phóng điện xuất hiện tại các sườn xuống.

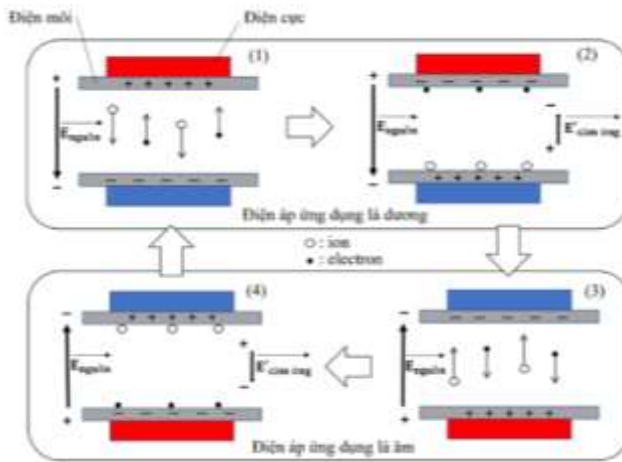
Từ phụ lục 3.3 thể hiện đặc tính V-A của các biên độ điện áp từ 10,6 kV đến 16,2 kV với lưu lượng khí 1 slm, điện áp qua tụ có dạng sóng hình sin giống với điện áp nguồn cung cấp, dòng điện đi qua tụ và dòng phóng điện tăng dần tăng dần theo từng biên độ điện áp.

Tại các biên độ điện áp càng lớn thì hình thành dòng phóng điện và xảy ra với tần suất nhiều hơn, thời gian phóng điện lâu hơn. Qua đó, có thể thấy rằng dòng phóng điện có xu hướng tăng theo biên độ điện áp.

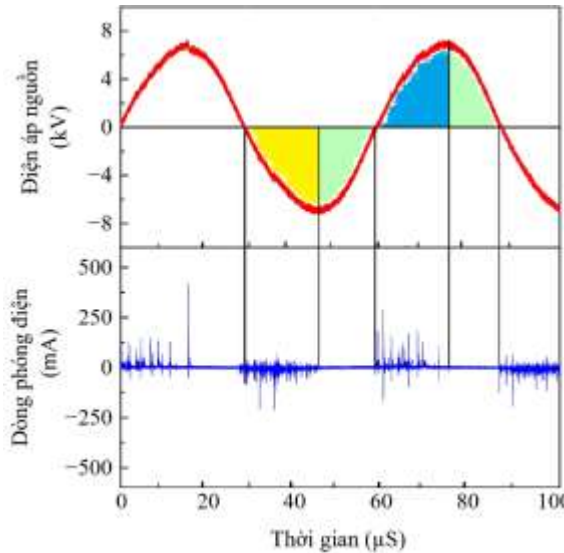
Giải thích cho sự phóng điện trong một chu kỳ

Cơ chế phóng điện màn chắn điện môi với 4 giai đoạn khác nhau, phóng điện sẽ xảy ra 2 lần trong một chu kỳ điện áp tại sườn lên và sườn xuống của đồ thị điện áp hình sin, phóng điện xảy ra ngay trước khi điện áp đạt tới giá trị cực đại. Trong trường hợp DBD được tạo ra bởi nguồn xung tần số cao, phóng điện sẽ xảy ra tại các sườn lên của

xung, sau đó, hiện tượng tích lũy điện tích trên bề mặt lớp điện môi sẽ tạo ra phóng điện thứ cấp tại sườn xuống của xung, và có chiều dòng điện ngược với chiều dòng điện của phóng điện sơ cấp tại sườn lên của xung.



Hình 3.11: Cơ chế phóng điện màn chắn điện môi với 4 giai đoạn



Hình 3.12: Cơ chế phóng điện màn chắn điện môi với 4 giai đoạn trong một chu kỳ
Điện trường cảm ứng xuất hiện do sự tích lũy điện tích trên lớp điện môi. Như vậy, để xảy ra phóng điện màn chắn điện môi thì:

$$\vec{E}_{\Sigma} = \vec{E}_{ng} + \vec{E}'_{cr} > \vec{E}_{pđ}$$

Trong đó: $\vec{E}_{\Sigma}$ là điện trường tổng

$\vec{E}_{ng}$ là điện trường nguồn cung cấp

$\vec{E}'_{cr}$ là điện trường cảm ứng

$\vec{E}_{pđ}$ là điện trường phóng điện

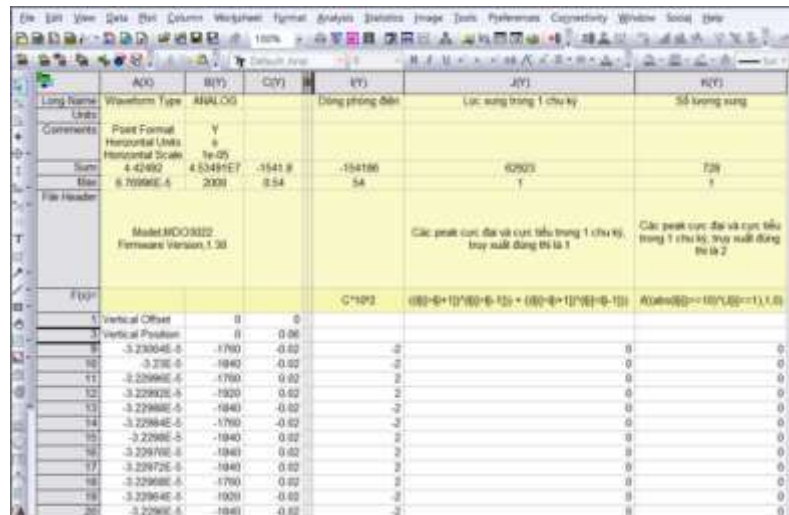
3.2.2 Ảnh hưởng của biên độ điện áp nguồn đến số lần phóng điện và xung phóng điện cao nhất

* Phương pháp xử lý tính số lượng xung và xung lớn nhất

Tính số lượng xung trong một chu kỳ: Từ dữ liệu thí nghiệm về điện áp và dòng điện thu thập được trên phần mềm, ta lập cột với các peak cực đại và cực tiểu trong 1 chu kỳ, truy xuất đúng thì là 1. Sau đó ta tiến hành lấy peak, chọn điều kiện là một và ngưỡng threshold là bao nhiêu có thể thay đổi (≥ 10 mA) dựa trên tín hiệu nhiễu nền oscilloscope). Như vậy ứng với mỗi lần phóng điện sẽ hiện giá trị là 1. Cuối cùng ta sử dụng hàm Sum để tổng hợp lại tất cả các lần phóng điện.

Để tính chọn xung lớn nhất ta sử dụng hàm Max trong phần mềm ứng với cột giá trị dòng phóng điện.

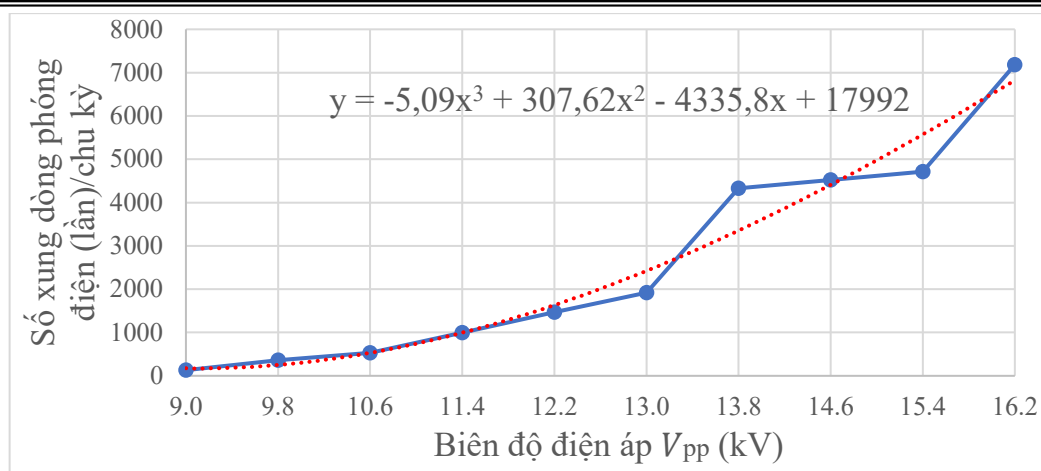
Cách chèn hàng giá trị Sum và Max: chọn File Header, kích chuột phải chọn Insert sau đó chọn User Parameters rồi chọn add 2 mục Sum và Max vào bảng dữ liệu cần tính.



Hình 3.13: Kết quả xử lý tính xung trên ứng dụng của cấp điện áp 9 kV

Bảng 3.2: Số xung dòng phóng điện trên từng biên độ điện áp ($I_{pd} \geq 10$ mA)

Biên độ điện áp V_{pp} (kV)	9	9,8	10,6	11,4	12,2	13	13,8	14,6	15,4	16,2
Số xung dòng phóng điện (lần)/chu kỳ	131	362	529	999	1466	1922	4332	4525	4716	7183



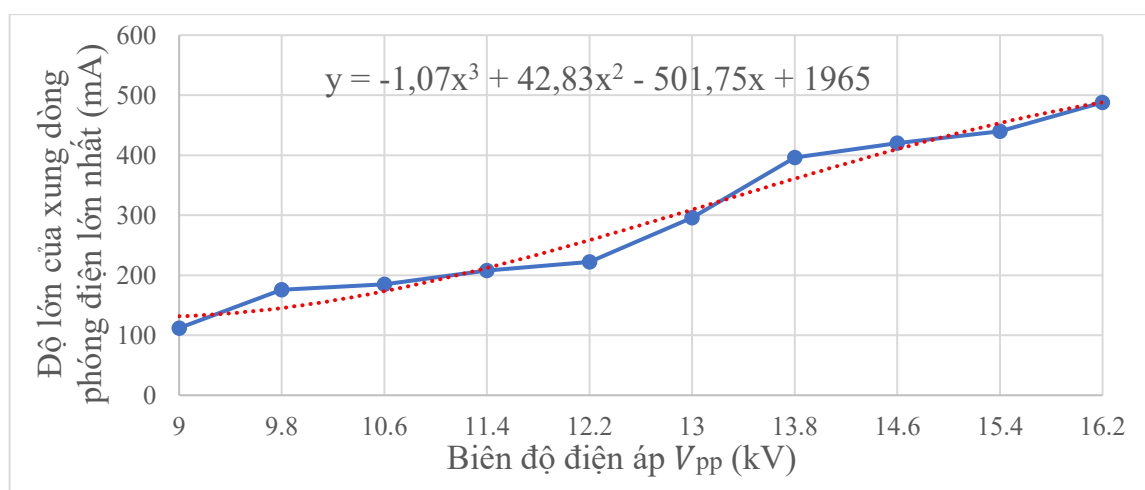
—●— : Đường cong thực nghiệm số xung dòng phóng điện (lần)/chu kỳ

..... : Đường cong nội suy bậc 3

Hình 3.14: Biểu đồ sự phụ thuộc biên độ điện áp đến số xung dòng phóng điện

Bảng 3.3: Độ lớn của xung dòng phóng điện lớn nhất trên từng biên độ điện áp

Cấp điện áp V_{pp} (kV)	9	9,8	10,6	11,4	12,2	13	13,8	14,6	15,4	16,2
Độ lớn xung dòng phóng điện lớn nhất (mA)	112	176	185	208	222	296	396	420	440	488



—●— : Đường cong thực nghiệm độ lớn của xung dòng phóng điện lớn nhất trên từng biên độ điện áp

..... : Đường cong nội suy bậc 3

Hình 3.15: Biểu đồ thể hiện ảnh hưởng biên độ điện áp tới độ lớn xung dòng phóng điện lớn nhất

Nhận xét: Mật độ xung phóng điện và giá trị lớn nhất của xung đều tăng dần theo sự tăng biên độ điện áp của nguồn.

3.2.3. Ảnh hưởng của biên độ điện áp nguồn đến công suất tiêu tán trên mục tiêu

a. Đường cong Lissajous

Để có được công suất hoạt động tiêu tán trong quá trình phóng điện, một phương pháp cụ thể được sử dụng trong vật lý plasma và kỹ thuật điện là tính toán diện tích được bao phủ bởi vòng trễ của sơ đồ Q-V, còn được gọi là hình Lissajous. Trong hệ thống DBD, điện tích trên chất điện môi thay đổi khi điện áp được áp dụng thay đổi trong chu kỳ AC và mối quan hệ này tạo thành một vòng lặp. Diện tích được bao phủ bởi vòng trễ Q-V có liên quan trực tiếp đến năng lượng tiêu tán trong mỗi chu kỳ của điện áp AC. Công suất hoạt động trung bình tiêu tán trong quá trình phóng điện plasma có thể được xác định bằng phương trình (3.1).

$$\overline{P_{DBD}} = \frac{1}{T} \oint_{Cycle} V_{DBD} dQ_M = f \cdot S \quad (3.1)$$

hoặc $E_T = S$

Với: T là chu kỳ (s)

f là tần số cung cấp điện (Hz)

S là diện tích của vòng kín trong đồ thị Lissajous.

Trong phương trình (1), điện áp trên APPJ dựa trên nguyên lý DBD có thể tính như sau:

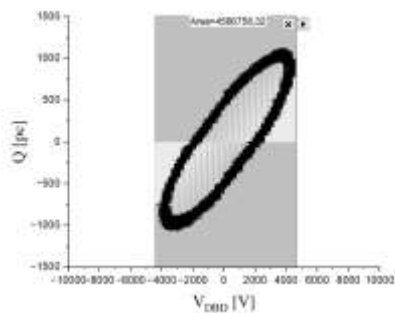
$$V_{DBD} = V_{app} - V_M \quad (3.2)$$

Điện tích trên tụ điện giám sát được tính theo công thức:

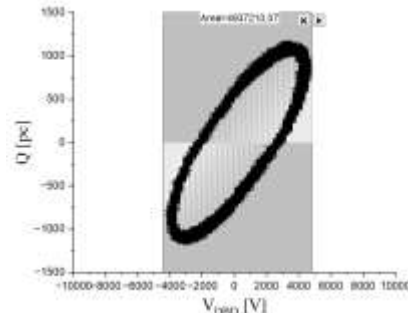
$$Q_M(t) = C_M \cdot V_{DBD}(t) \quad (3.3)$$

b. Tính toán công suất tiêu tán trên mục tiêu cho hệ thống

Từ dữ liệu thí nghiệm thu thập được ở hình 3.7 và 3.9, các đường Lissajous được vẽ như hình 3.14 và 3.15. Các dữ liệu ở các biên độ điện áp cao hơn từ 10,6 – 16,2 kV được tính toán phân tích thể hiện ở phụ lục 3.4.



Hình 3.16 Đường Lissajous và giá trị thu được ở cấp điện áp 9 kV

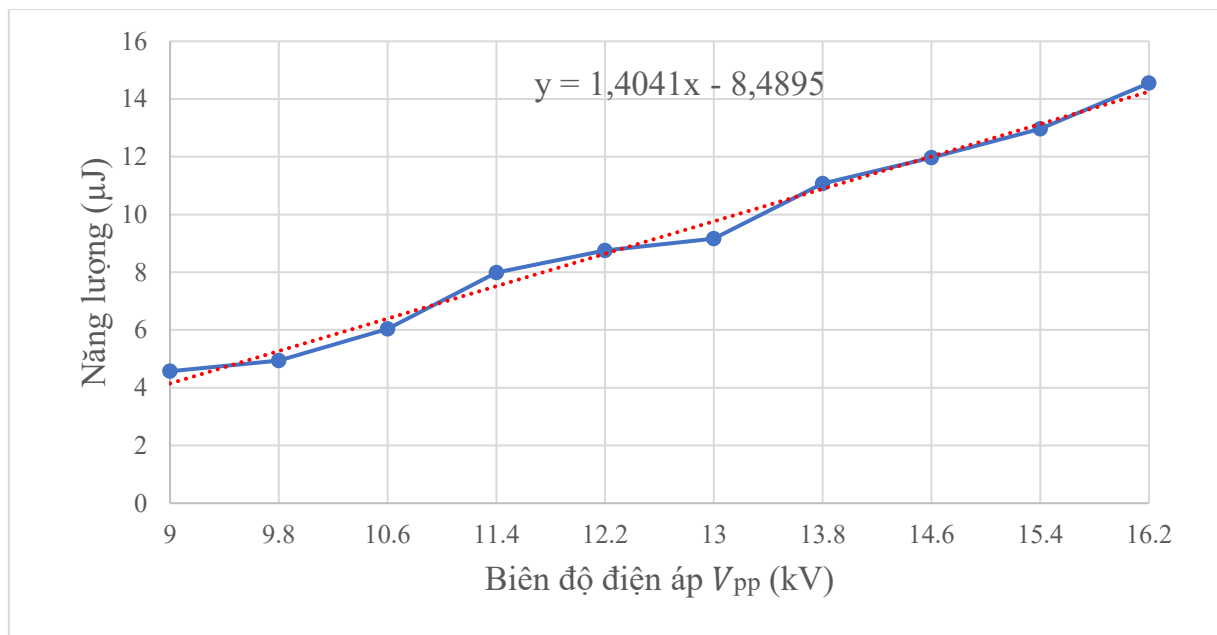


Hình 3.17 Đường Lissajous và giá trị thu được ở cấp điện áp 9,8 kV

Từ phụ lục 3.4, ta lập bảng 3.4 biểu thị mức năng lượng tiêu tán qua từng biên độ điện áp của thí nghiệm

Bảng 3.4: Năng lượng tiêu tán qua từng cấp điện áp (Phụ lục 3.2)

Biên độ điện áp V_{pp} (kV)	Area S (pJ)	Năng lượng E (μ J)
9	4566758,32	4,57
9,8	4937210,07	4,94
10,6	6035603,81	6,04
11,4	7990706,51	7,99
12,2	8749533,67	8,75
13	9166147,55	9,17
13,8	11074300,00	11,07
14,6	11968500,00	11,97
15,4	12973800,00	12,97
16,2	14554800,00	14,55



—●— : Đường cong tuyến tính năng lượng tiêu tán qua từng cấp điện áp

..... : Đường cong nội suy bậc 1

Hình 3.18: Sự thay đổi công suất tiêu tán trên mục tiêu xử lý qua từng biên độ điện áp

Nhận xét: Công suất tiêu tán tăng gần như tuyến tính theo sự thay đổi của từng biên độ điện áp

3.2.4 Ảnh hưởng của biên độ điện áp nguồn đến năng lượng nguồn cung cấp trong một chu kỳ

a. Giới thiệu một số tính năng và cách tính năng lượng nguồn cung cấp từ phần mềm

Công suất nguồn cung cấp trong một chu kỳ được tính theo công thức:

$$E = \int_0^T P dt \quad (3.4)$$

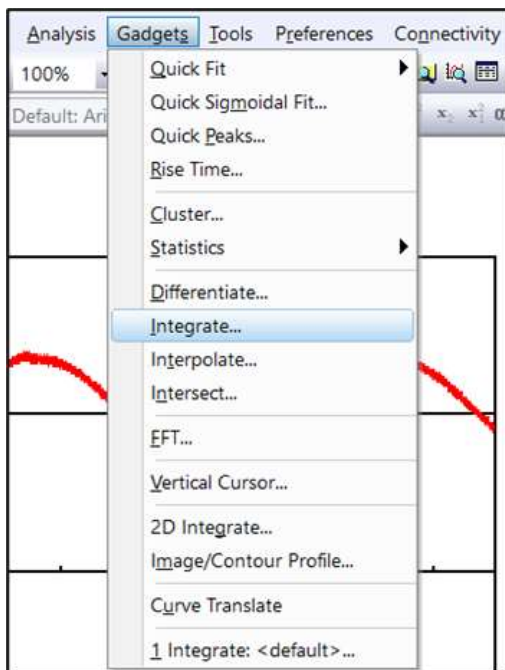
Với $P(t) = u(t).i(t)$

Năng lượng E được tính sử dụng phần mềm tính tích phân đường cong ($\int P(t)$) Gadgets là một tính năng nổi bật trong phần mềm được sử dụng để phân tích nhanh và tương tác trực tiếp với các dữ liệu được hiển thị trên đồ thị. Gadgets cung cấp nhiều công cụ giúp người dùng thực hiện các phép tính, trích xuất kết quả và hiển thị thông tin phân tích một cách nhanh chóng, trực quan.

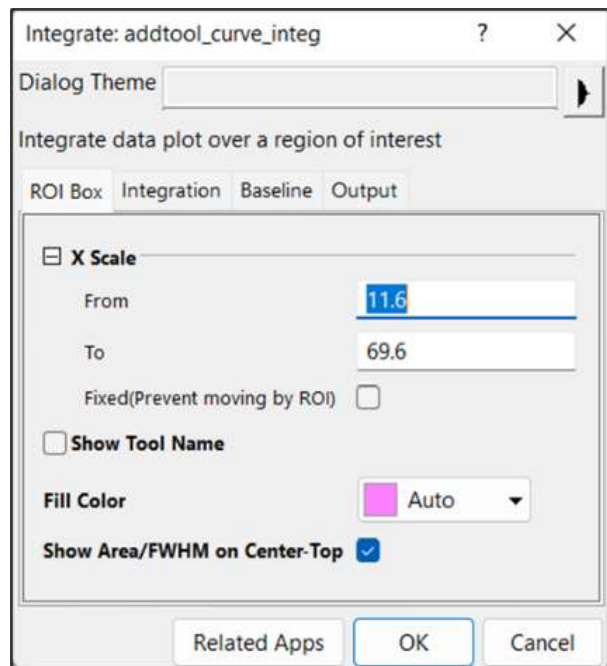
Tính năng integrate trong phần mềm: Người dùng có thể giới hạn vùng tích phân bằng cách chọn một khoảng dữ liệu hoặc một phần của đường cong. Tính năng Integrate trên phần mềm là một công cụ mạnh mẽ dùng để tính toán diện tích dưới đường cong của dữ liệu được chọn. Tính năng này rất hữu ích trong phân tích dữ liệu khoa học và kỹ thuật, đặc biệt khi làm việc với các tín hiệu, đồ thị, hoặc các phép đo thực nghiệm.

Từ biểu đồ xung đã vẽ có điện áp, dòng phóng điện và công suất ta tiến hành chọn dòng công suất để bắt đầu tính toán:

+ Đầu tiên ta chọn hộp thoại Gadgets trên thanh công cụ, sau đó ta chọn integrate

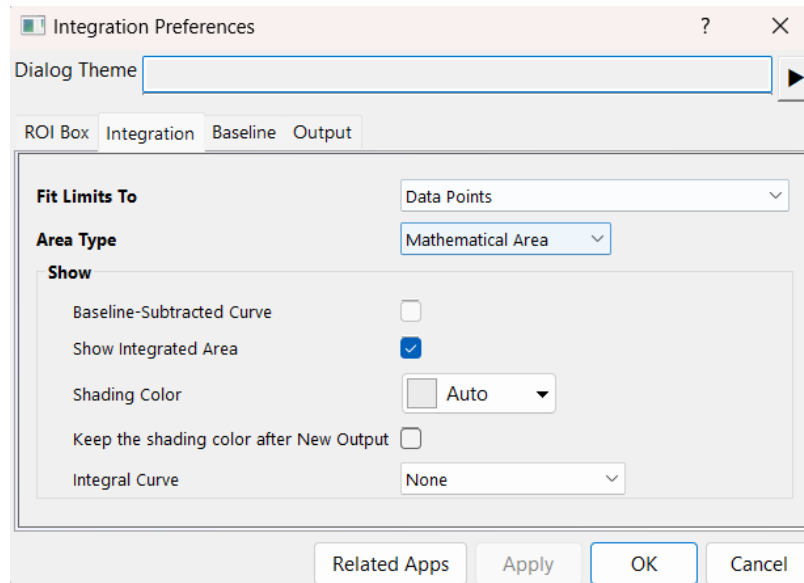


Hình 3.19: Hộp chức năng Gadgets trên phần mềm



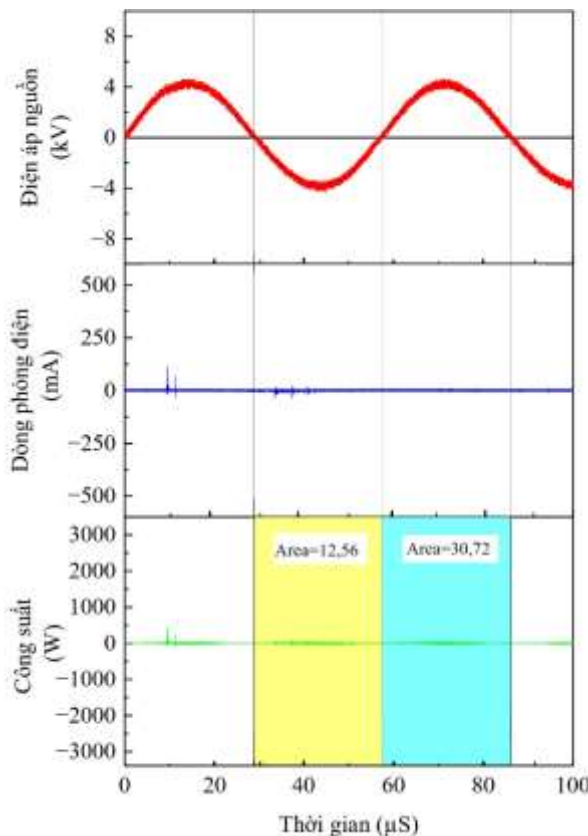
Hình 3.20: Hộp chức năng Integrate trên phần mềm

+ Tiếp theo ở mục Integration ta chọn Fit Limits To là Data Points. Ở mục Area Type ta chọn Mathematical Area xong cuối cùng ta chọn OK để hoàn tất quá trình cài đặt.

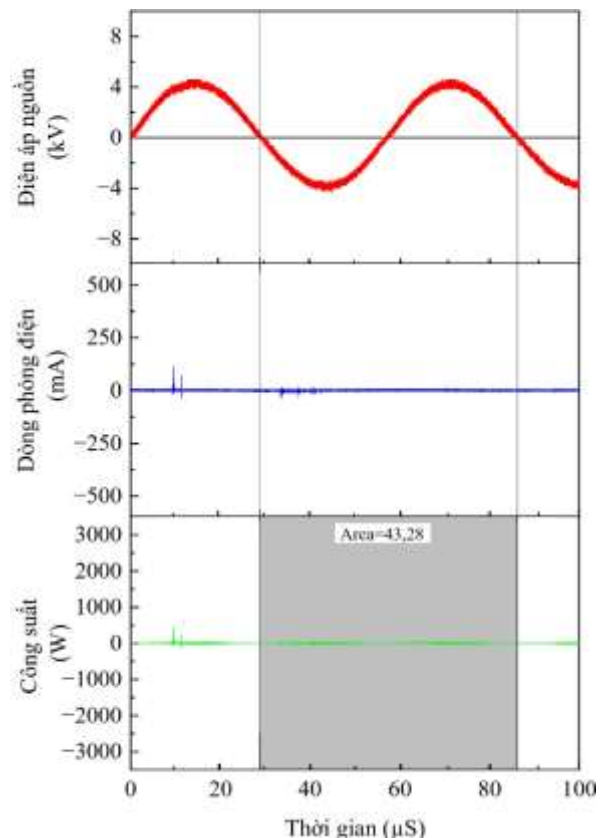


Hình 3.21: Cài đặt chức năng cho phần mềm thực hiện tính toán

b. Kết quả tính toán thu được qua từng biên độ điện áp



Hình 3.22: Năng lượng trong 2 nửa chu kì biên độ điện áp 9 kV

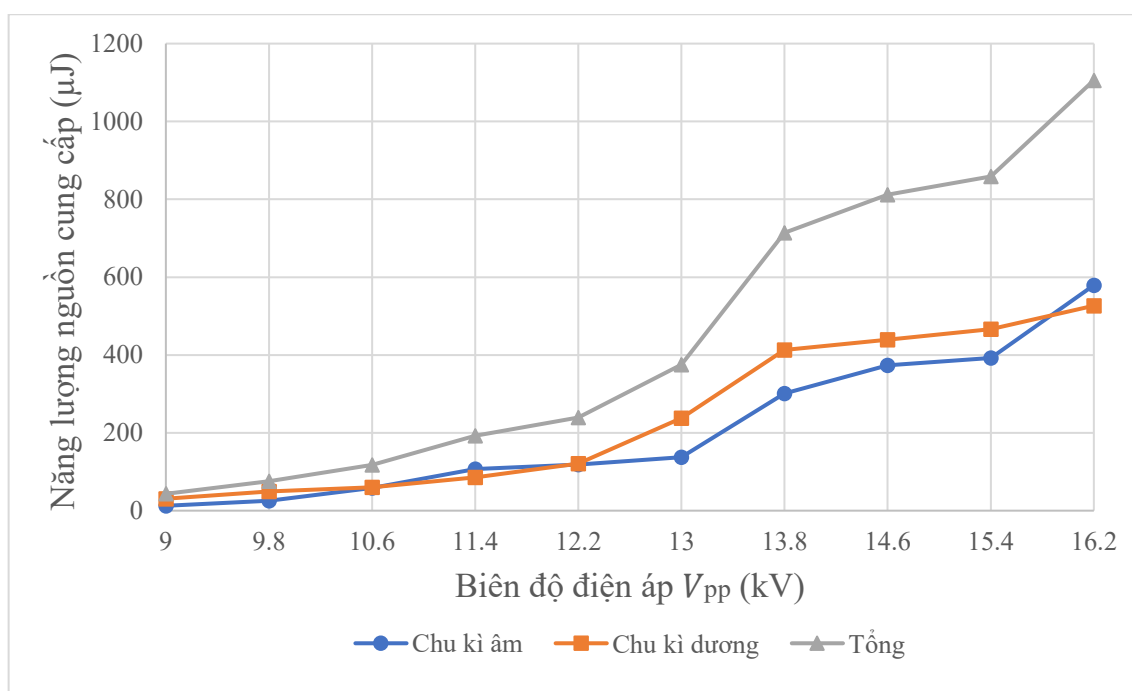


Hình 3.23: Năng lượng cung cấp ứng với biên độ điện áp nguồn 9 kV

Với các kết quả năng lượng nguồn cung cấp ở từng biên độ điện áp còn lại ta xem ở phụ lục 3.5

Bảng 3.5: Giá trị năng lượng nguồn cung cấp trong một chu kỳ thí nghiệm khí Nito lưu lượng 1 slm ứng với từng cấp điện áp E (μJ)

Biên độ điện áp V_{pp} (kV)	Chu kì âm	Chu kì dương	Tổng 1 chu kì
9	12,56	30,72	43,28
9,8	25,65	49,71	75,36
10,6	58,18	59,69	117,87
11,4	106,71	85,67	192,38
12,2	118,26	121,28	239,54
13	137,26	238,05	375,31
13,8	300,86	412,87	713,73
14,6	373,23	438,83	812,06
15,4	392,07	466,47	858,54
16,2	579,27	526,57	1105,84



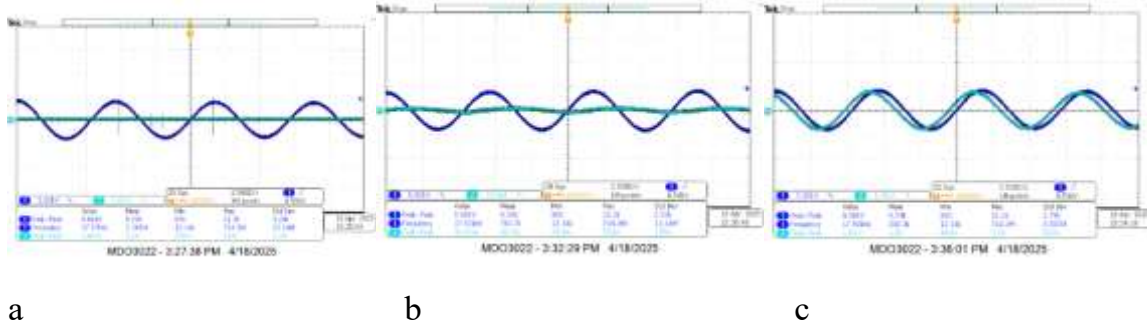
Hình 3.24: Ảnh hưởng của biên độ điện áp nguồn tới năng lượng nguồn cung cấp cho hệ thống trong một chu kỳ

Nhận xét: Năng lượng nguồn cung cấp trong một chu kỳ có xu hướng tăng khi biên độ điện áp nguồn tăng lên.

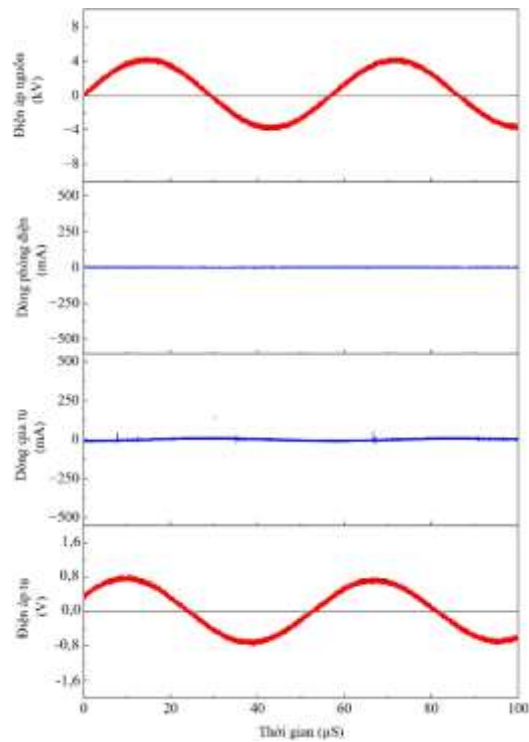
3.3 Đặc tính điện học ống phóng tia Plasma với lưu lượng khí Nitơ 3 slm

3.3.1 Phân tích kết quả thí nghiệm

Kết quả thí nghiệm ở mức điện áp $V_{pp} = 9$ kV:



Hình 3.25: Hình ảnh từ máy hiện sóng ứng với biên độ điện áp $V_{pp} = 9$ kV



Hình 3.26: Đặc tính V-A của tia plasma ứng với biên độ điện áp nguồn $V_{pp} = 9$ kV

Nhận xét:

Hình 3.24 thể hiện kết quả thí nghiệm gồm điện áp nguồn, dòng phóng điện, dòng điện qua tụ đo lường, điện áp trên tụ đo lường,

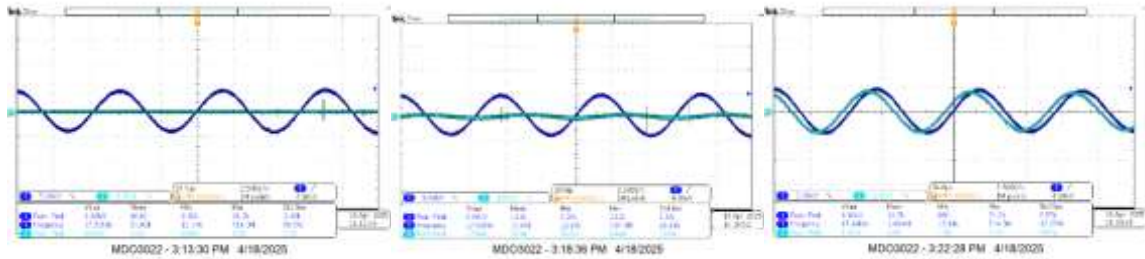
Điện áp nguồn đặt lên điện cực cao áp của buồng phản ứng có biên độ $V_{pp} = 9$ kV, tần số khoảng 25 kHz, hiện tượng phóng điện xảy ra dòng phóng điện xuất hiện tại các sườn lên và sườn xuống ứng với mỗi nửa chu kỳ của điện áp nguồn,

Với điện áp nguồn hình sin có $V_{pp} = 9$ kV, hình thành dòng phóng điện có giá trị lớn nhất là 12 mA và có hiện tượng phóng điện,

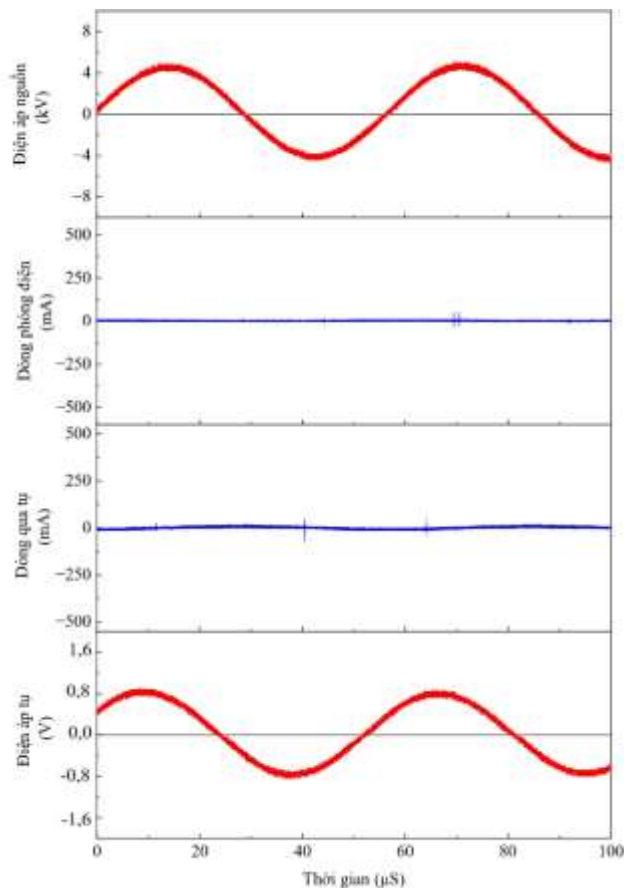
Các điện tích của dòng tia plasma sẽ tích lũy trên tấm đồng định hướng và được đo lường bằng tụ C ($1,3 \mu\text{F}$) thông qua các giá trị dòng và áp trên tụ,

Điện áp trên tụ C cảm ứng và có dạng sóng gần giống dạng sóng điện áp nguồn từ đó tụ ghi nhận dòng điện do sự tích lũy điện trường I_{pd} ,

Kết quả thí nghiệm ở mức điện áp $V_{pp} = 9,8 \text{ kV}$:



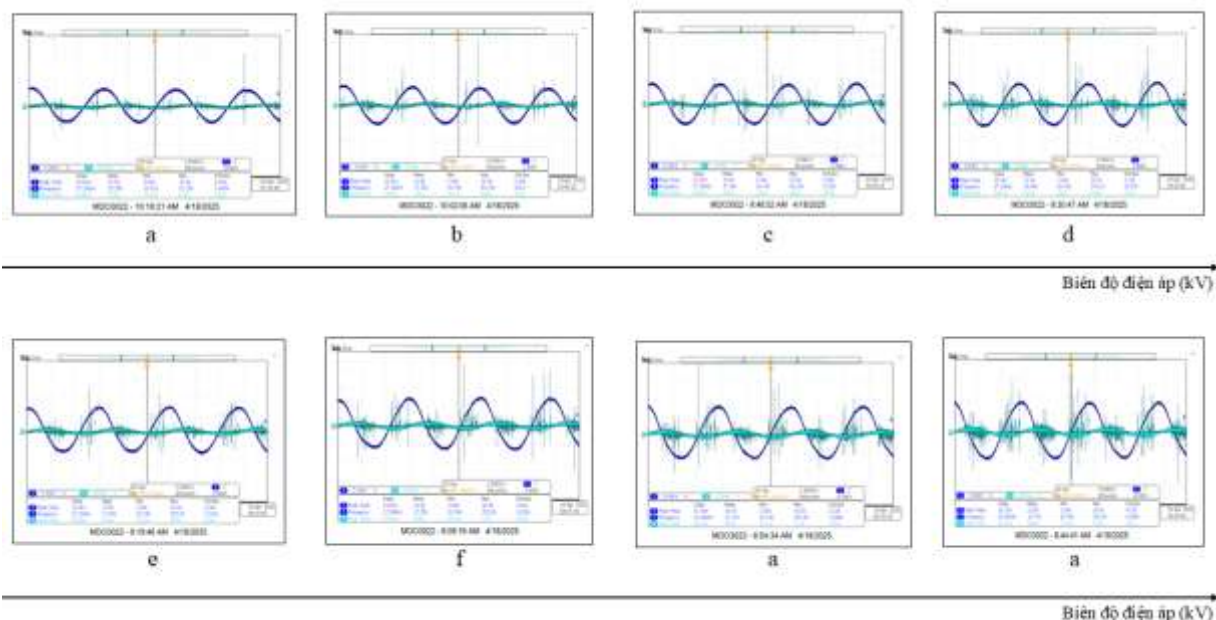
Hình 3.27: Hình ảnh từ máy hiện sóng ứng với biên độ điện áp $V_{pp} = 9,8 \text{ kV}$



Hình 3.28: Đặc tính V-A của tia plasma ứng với biên độ điện áp nguồn $V_{pp} = 9,8 \text{ kV}$

Hình 3.26 thể hiện kết quả thí nghiệm gồm điện áp nguồn, dòng phóng điện, dòng điện qua tụ đo lường, điện áp trên tụ đo lường, Ở cấp điện áp nguồn hình sin $V_{pp} = 9,8 \text{ kV}$, hình thành dòng phóng điện có giá trị lớn nhất là 52 mA và phóng điện xảy ra

Tương tự ở cấp điện áp $V_{pp} = 9$ kV, phóng điện xảy ra ngay trước thời điểm điện áp nguồn đạt giá trị lớn nhất tại các sườn lên và sườn xuống của điện áp nguồn,
Tụ ghi nhận dòng điện do sự tích lũy điện tích từ dòng plasma,
Kết quả thí nghiệm ở các mức điện áp tăng dần $V_{pp} = 10,6 - 16,2$ kV:



Hình 3.29: Dạng sóng giữa điện áp nguồn và dòng phóng điện qua điện trở Shunt được đo ở các biên độ điện áp khác nhau tương ứng (a) 10,6 kV; (b) 11,4 kV; (c) 12,2 kV; (d) 13 kV; (e) 13,8 kV; (f) 14,6 kV; (g) 15,4 kV và (h) 16,2 kV

Nhận xét:

Hình 3.27 thể hiện dạng sóng điện áp nguồn và dòng phóng điện qua điện trở Shunt được đo tại các mức biên độ điện áp khác nhau, từ 10,6 kV đến 16,2 kV. Quan sát từ hình (a) đến (h), phóng điện xảy ra trước thời điểm điện áp đạt giá trị lớn nhất tại các sườn lên và sườn xuống của điện áp nguồn. Tại các sườn lên xuất hiện dòng phóng điện lớn hơn dòng phóng điện xuất hiện tại các sườn xuống.

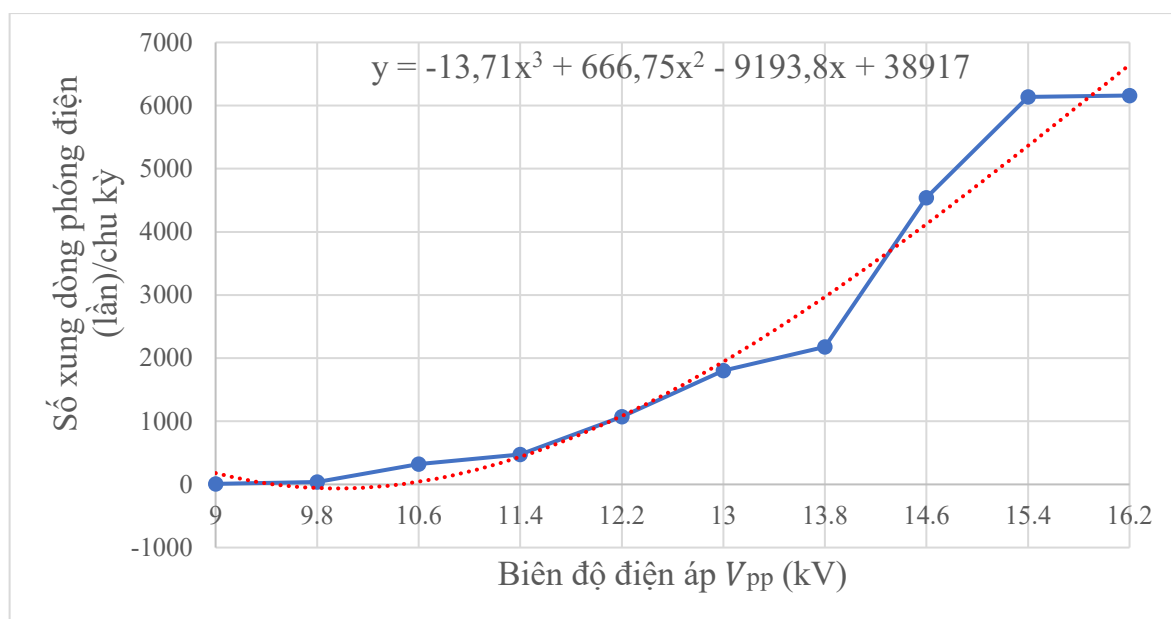
Từ phụ lục 3.3 thể hiện đặc tính V-A của các biên độ điện áp từ 10,6 kV đến 16,2 kV với lưu lượng khí 3 slm, điện áp qua tụ có dạng sóng hình sin giống với điện áp nguồn cung cấp, dòng điện đi qua tụ và dòng phóng điện tăng dần tăng dần theo từng biên độ điện áp.

Tại các biên độ điện áp càng lớn thì hình thành dòng phóng điện và xảy ra với tần suất nhiều hơn, thời gian phóng điện lâu hơn. Qua đó, có thể thấy rằng dòng phóng điện có xu hướng tăng theo biên độ điện áp.

3.3.2 Ảnh hưởng của biên độ điện áp nguồn đến số lần phóng điện và xung phóng điện cao nhất

Bảng 3.6: Số lần phóng điện trên từng biên độ điện áp ($I_{pd} \geq 10 \text{ mA}$)

Biên độ điện áp V_{pp} (kV)	9	9,8	10,6	11,4	12,2	13	13,8	14,6	15,4	16,2
Số xung dòng phóng điện (lần)/chu kỳ	9	38	322	476	1073	1800	2176	4540	6138	6159



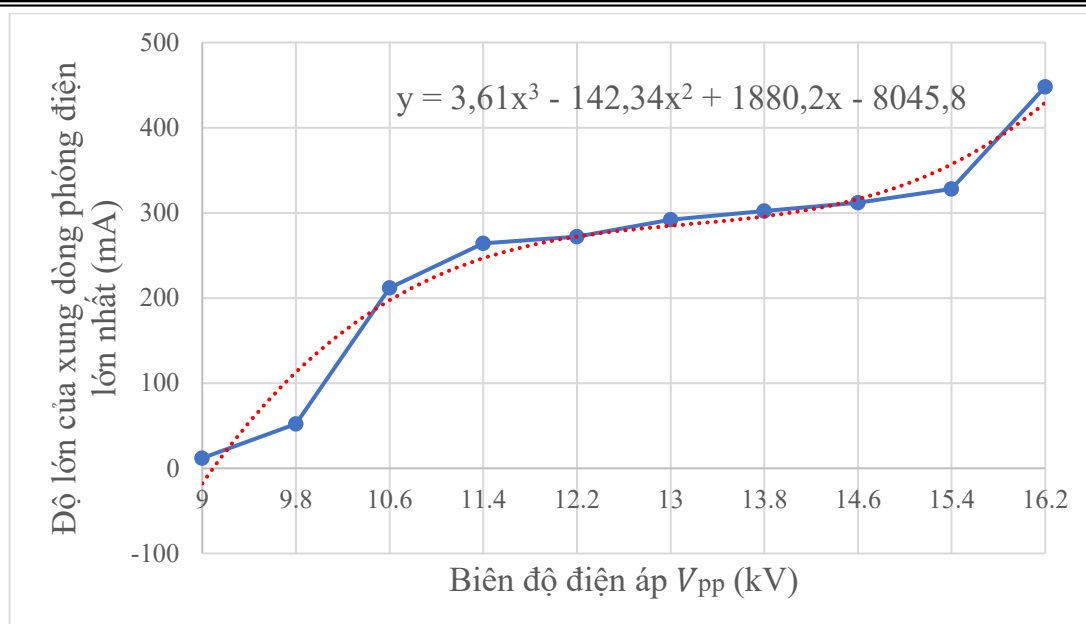
—●— : Đường cong thực nghiệm số xung dòng phóng điện (lần)/chu kỳ

..... : Đường cong nội suy bậc 3

Hình 3.30: Biểu đồ sự phụ thuộc biên độ điện áp đến số xung dòng phóng điện ($I_{pd} \geq 10 \text{ mA}$)

Bảng 3.7: Độ lớn của xung dòng phóng điện lớn nhất trên từng biên độ điện áp

Biên độ điện áp V_{pp} (kV)	9	9,8	10,6	11,4	12,2	13	13,8	14,6	15,4	16,2
Độ lớn xung dòng phóng lớn nhất (mA)	12	52	212	264	272	292	302	312	328	448



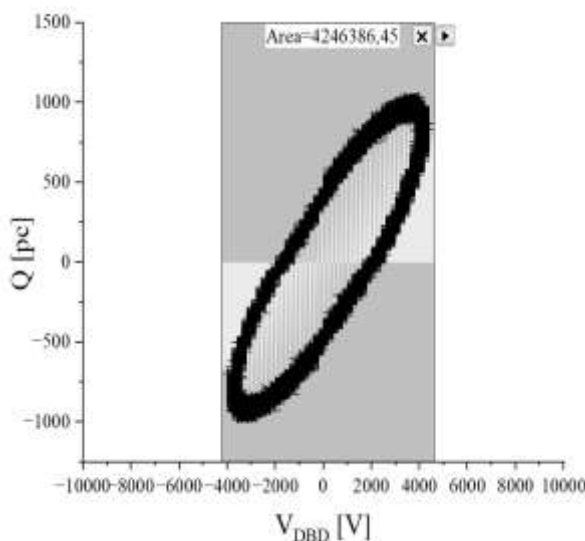
—●— : Đường cong thực nghiệm độ lớn của xung dòng phóng điện lớn nhất trên từng biên độ điện áp

..... : Đường cong nội suy bậc 3

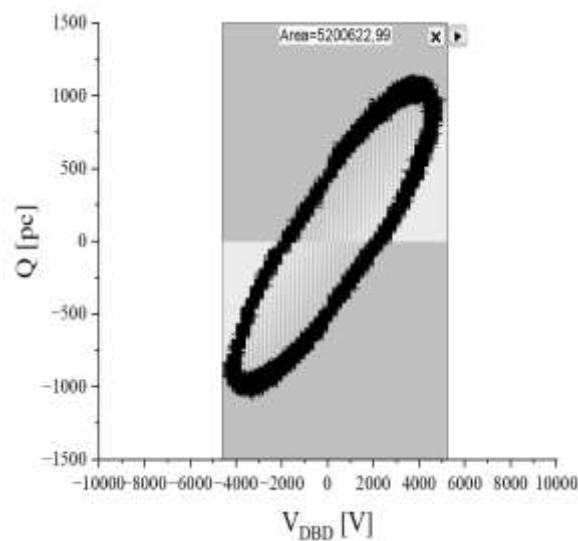
Hình 3.31: Biểu đồ thể hiện ảnh hưởng biên độ điện áp tới độ lớn xung dòng lớn nhất

Nhận xét : Mật độ xung phóng điện và giá trị lớn nhất của xung đều tăng dần theo sự tăng biên độ điện áp của nguồn.

3.3.3. Công suất tiêu tán trên mục tiêu



Hình 3.32: Đường Lissajous và giá trị thu được ở cấp điện áp 9 kV

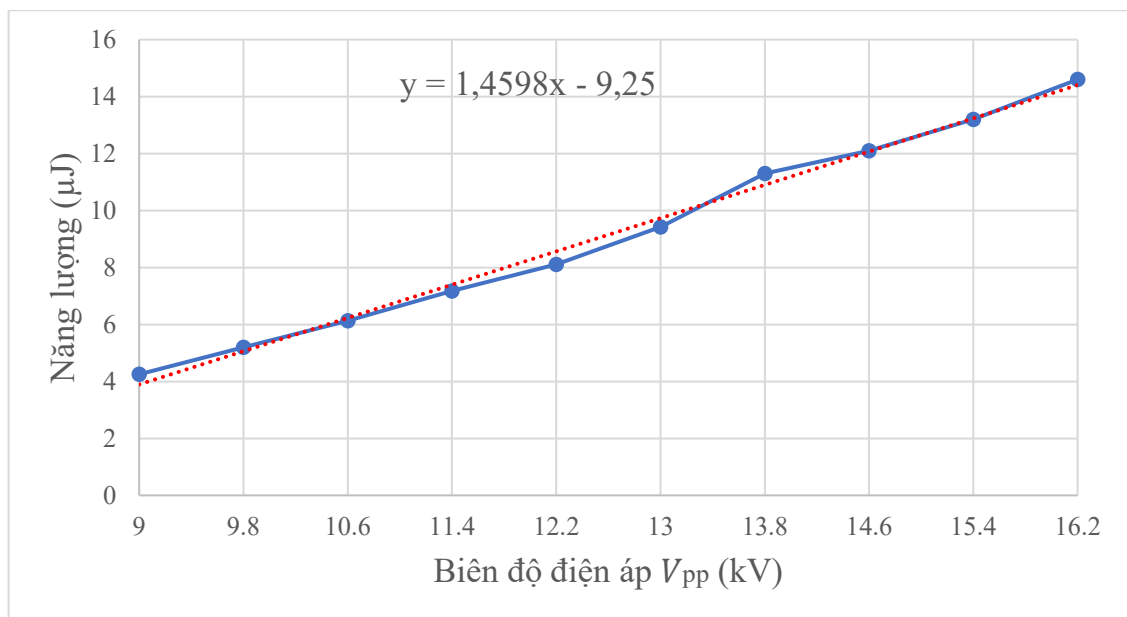


Hình 3.33: Đường Lissajous và giá trị thu được ở cấp điện áp 9,8 kV

Từ phụ lục 3.9, ta lập bảng 3.8 biểu thị mức năng lượng tiêu tán qua từng biên độ điện áp của thí nghiệm

Bảng 3.8: Năng lượng tiêu tán qua từng biên độ điện áp

Biên độ điện áp V_{pp} (kV)	Aera S (pJ)	Năng lượng (μ J)
9	4246386,45	4,25
9,8	5200622,99	5,20
10,6	6127399,76	6,13
11,4	7168511,00	7,17
12,2	8113133,20	8,11
13	9422246,42	9,42
13,8	11300000,00	11,3
14,6	12100000,00	12,1
15,4	13200000,00	13,2
16,2	14600000,00	14,6



—●— : Đường cong thực nghiệm năng lượng tiêu tán qua từng biên độ điện áp

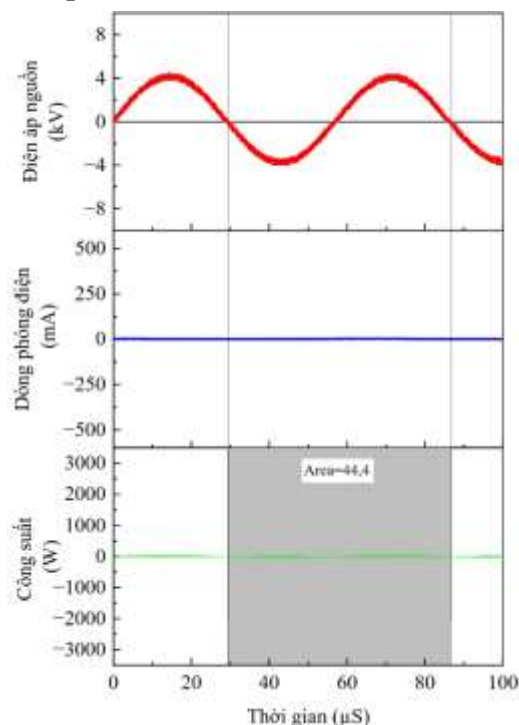
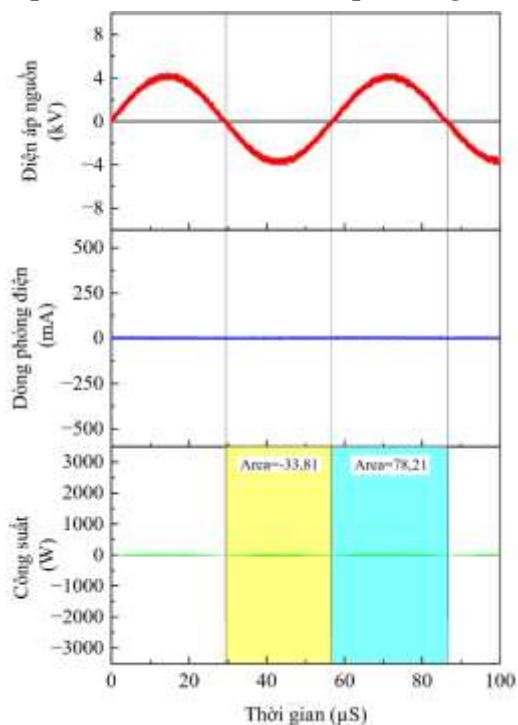
..... : Đường cong nội suy bậc 1

Hình 3.34: Sự thay đổi công suất tiêu tán trên mục tiêu xử lý qua từng biên độ điện áp

Nhận xét: Công suất tiêu tán tăng gần như tuyến tính theo sự thay đổi của từng biên độ điện áp

3.3.4 Năng lượng nguồn cung cấp trong một chu kỳ

Kết quả tính toán thu được qua từng biên độ điện áp

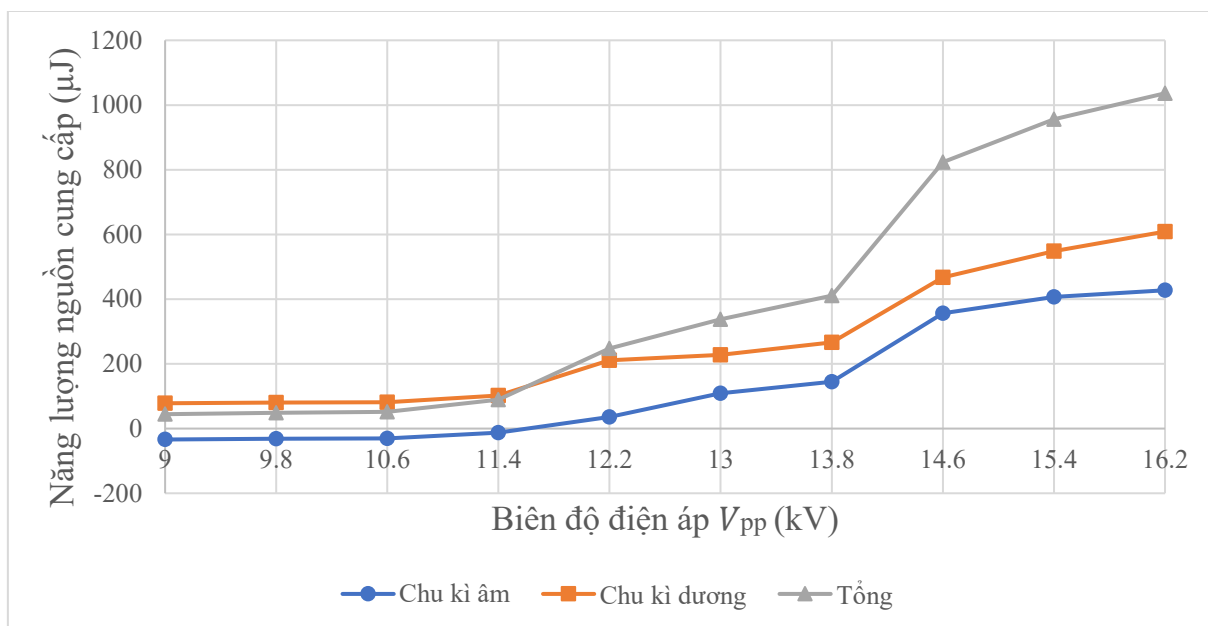


Hình 3.35: Năng lượng trong 2 nửa chu kỳ biên độ điện áp 9 kV Hình 3.36: Năng lượng nguồn cung cấp ứng với biên độ điện áp nguồn 9 kV

Với các kết quả năng lượng nguồn cung cấp ở từng biên độ điện áp còn lại ta xem ở phụ lục 3.10

Bảng 3.9: Giá trị năng lượng nguồn cung cấp trong một chu kỳ thí nghiệm khí Nitơ lưu lượng 3 slm ứng với từng cấp điện áp E (μJ)

Biên độ điện áp V_{pp} (kV)	Chu kỳ âm	Chu kỳ dương	Tổng 1 chu kỳ
9	-33,81	78,21	44,4
9,8	-31,91	80,52	48,61
10,6	-30,03	81,37	51,34
11,4	-12,88	102,31	89,43
12,2	35,92	211,38	247,3
13	109,53	227,75	337,28
13,8	144,71	266,52	411,23
14,6	356,19	466,78	822,97
15,4	406,71	548,88	955,59
16,2	427,43	608,84	1036,27

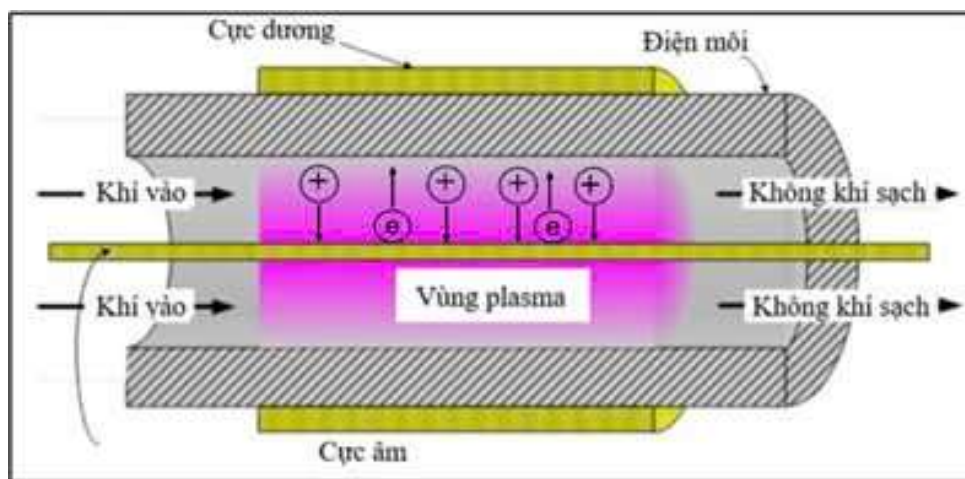


Hình 3.37: Ảnh hưởng của biên độ điện áp nguồn tới năng lượng nguồn cung cấp cho hệ thống trong một chu kỳ

Nhận xét: Năng lượng nguồn cung cấp trong một chu kỳ có xu hướng tăng khi biên độ điện áp nguồn tăng lên.

Giải thích cho việc năng lượng nguồn cung cấp có xu hướng tăng:

Năng lượng nguồn cung cấp trong hệ thống phóng điện của nửa chu kì âm lớn hơn nửa chu kì dương do cơ chế vận hành của hệ thống được giải thích như sau:



Hình 3.38: Quá trình bắn phá điện cực của ion trong điện môi

Nguồn điện tích trong không gian phóng điện là từ quá trình ion hóa các nguyên tử khí trung hòa và từ các điện tử thứ cấp được giải phóng từ bề mặt các điện cực. Ion dương có động năng lớn hơn rất nhiều so với động năng của các điện tử vì khối lượng của ion dương (hạt nhân) lớn hơn khối lượng điện tử (các electron) nhiều lần ($m^+ \approx 1800$

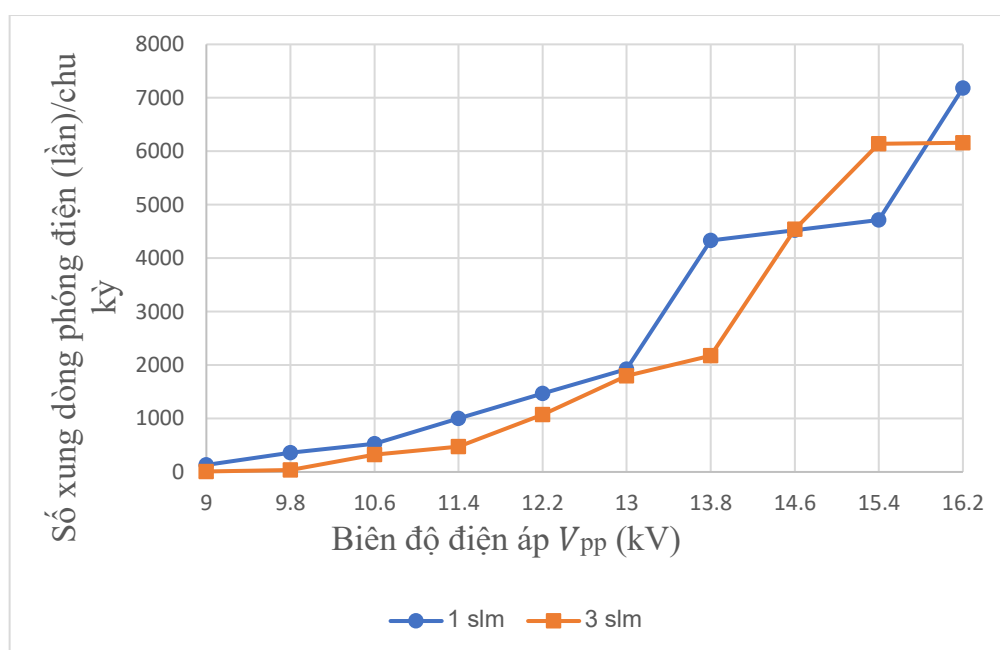
me). Điện tử được giải phóng từ bề mặt điện cực là do sự bắn phá của các ion dương với bề mặt kim loại.

Năng lượng nguồn cung cấp cho quá trình phóng điện ở nửa chu kỳ âm có giá trị cao hơn so với nửa chu kỳ dương vì ở nửa chu kỳ dương, các hạt ion dương di chuyển theo lực điện trường bắn phá vào điện môi, điện môi là chất có vùng cấm lớn đến mức ở điều kiện bình thường sự dẫn điện bằng điện tử không xảy ra, trong điện môi không có nhiều electron tự do di chuyển nên khi ion dương va chạm vào bề mặt, các điện tích dương có xu hướng tích tụ lại vị trí va chạm nên không xảy ra quá trình bắn phá điện cực và không tạo ra nhiều năng lượng trong quá trình hoạt động. Ngược lại, ở nửa chu kỳ âm các hạt ion dương có động năng lớn bắn phá điện cực kim loại, dẫn đến giải phóng electron ra khỏi bề mặt kim loại và giải phóng các điện tử tự do (các e thứ cấp) vào không gian phóng điện, nên mật độ dòng phóng điện, độ lớn dòng phóng điện lớn hơn với nửa chu kỳ dương.

3.4 Phân tích kết quả và đánh giá đặc tính điện học ống phóng tia plasma giữa lưu lượng 1 slm và 3 slm

Từ những kết quả phân tích ở các mục trên, để so sánh đặc tính điện học trong ống phóng tia plasma giữa lưu lượng 1 slm và 3 slm, ta đánh giá dựa vào số xung dòng phóng điện trong một chu kỳ, độ lớn của xung dòng phóng điện lớn nhất và năng lượng nguồn cung cấp.

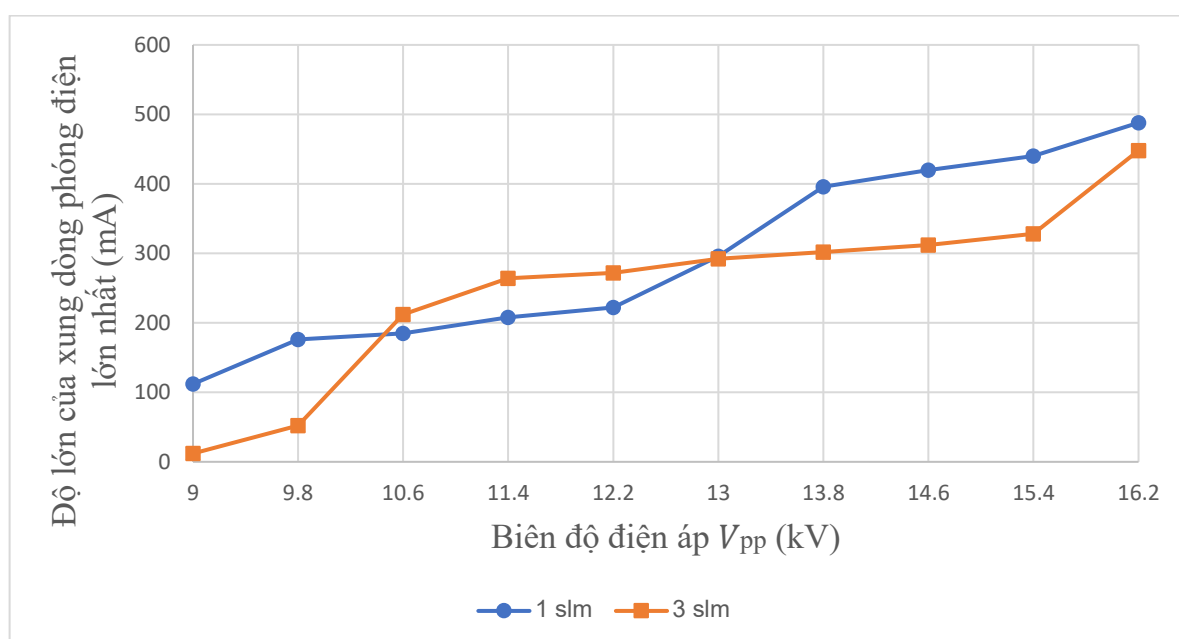
3.4.1 Về số xung dòng phóng điện



Hình 3.39: Số xung phóng điện giữa lưu lượng 1 slm và 3 slm

Khi biên độ điện áp V_{pp} tăng, số xung dòng phóng điện cũng tăng theo, cho thấy hiện tượng phóng điện mạnh hơn ở các biên độ điện áp cao. Ở các giá trị điện áp thấp (từ 9 kV đến 13 kV), số xung tăng chậm. Sau ngưỡng biên độ điện áp 13 kV trở lên, số xung phóng điện tăng nhanh. Ở điện áp thấp (dưới ~ 13.8 kV), đường biểu diễn của 1 slm nằm cao hơn 3 slm, cho thấy lưu lượng khí thấp tạo ra số xung phóng điện nhiều hơn. Tuy nhiên, tại biên độ điện áp từ 14,6 kV đến 15,4 kV, số xung của 3 slm vượt qua 1 slm, và sau đó hai đường gần như bằng nhau tại 16,2 kV. Điều này cho thấy tác động của lưu lượng khí đến phóng điện phụ thuộc vào biên độ điện áp. Ở điện áp cao, lưu lượng khí lớn có thể thúc đẩy phóng điện mạnh hơn.

3.4.2 Về độ lớn của xung dòng phóng điện lớn nhất



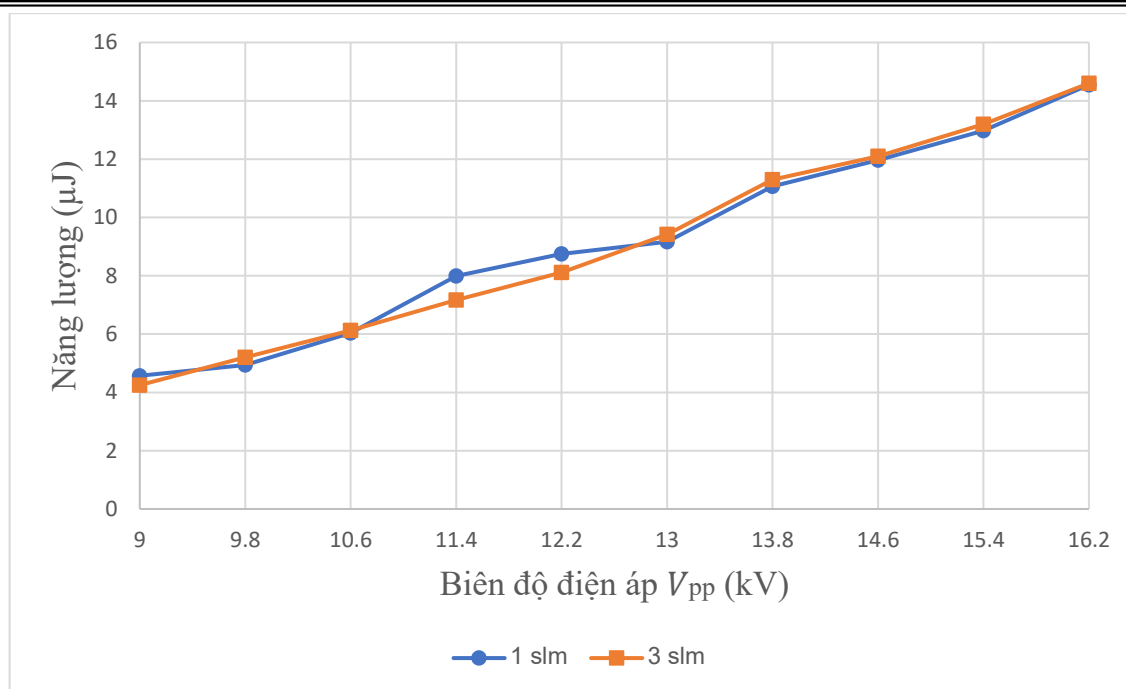
Hình 3.40: Độ lớn của xung phóng điện lớn nhất giữa lưu lượng 1 slm và 3 slm

Ở điện áp thấp (9 kV đến 11,4 kV): Xung dòng phóng điện lớn nhất ở lưu lượng 3 slm cao hơn 1 slm đáng kể. Điều này cho thấy lưu lượng khí cao hơn có thể hỗ trợ quá trình phóng điện.

Ở điện áp (12,2 kV đến 14,6 kV): Xung dòng phóng điện lớn nhất ở 2 mức lưu lượng khí gần nhau hoặc giao nhau, tức là ảnh hưởng của lưu lượng khí đến dòng điện có phần giảm dần.

Ở điện áp cao ($\geq 15,4$ kV): Xung dòng phóng điện lớn nhất ở lưu lượng 1 slm lại cao hơn 3 slm. Do ở điện áp cao, mật độ ion hoặc điều kiện phóng điện bị giới hạn bởi lưu lượng khí quá lớn.

3.4.3 Về năng lượng nguồn cấp



Hình 3.41: Năng lượng nguồn cấp giữa lưu lượng 1 slm và 3 slm

Có thể thấy rằng, khi biên độ điện áp tăng từ 9 kV đến 9,8 kV, năng lượng tiêu thụ bởi quá trình phóng điện tăng tuyến tính với điện áp. Xu hướng này không phụ thuộc vào lưu lượng khí mặc dù biên độ điện áp được áp dụng để bắt đầu phóng điện là khoảng 9,8 kV. Sự gia tăng tuyến tính này trong mức tiêu thụ năng lượng lên đến cho thấy quá trình phóng điện chủ yếu là được điều khiển bởi biên độ điện áp, liên tục thúc đẩy quá trình tạo ra plasma mà không bị ảnh hưởng đáng kể bởi các yếu tố khác, chẳng hạn như động lực học khí.

Sự độc lập với lưu lượng khí trong giai đoạn này cho thấy cơ chế ion hóa và phóng điện ổn định và chịu ảnh hưởng đồng đều chỉ bởi điện áp tăng. Tuy nhiên, khi biên độ điện áp vượt quá 9,8 kV, mức tiêu thụ năng lượng của DBD cho thấy sự phụ thuộc rõ ràng vào lưu lượng khí. Ở lưu lượng cao hơn, năng lượng tiêu thụ bởi các lần phóng điện lớn hơn đáng kể. Hiện tượng này được giải thích bằng sự gia tăng khả năng cung cấp các phân tử khí ở lưu lượng cao hơn cho quá trình ion hóa và phóng điện sau đó. Sự gia tăng nhiễu loạn và chuyển động của khí cũng góp phần vào các tương tác phức tạp hơn giữa trường điện và khí, tăng cường mật độ và hoạt động của plasma. Kết quả là, cần nhiều năng lượng hơn để duy trì quá trình phóng điện ở lưu lượng cao và biên độ điện áp cao hơn.

KẾT LUẬN

Kết luận: Đồ án đã thiết lập mô hình thí nghiệm ống phóng tia plasma trong khí Nitơ sử dụng máy biến áp Neon. Các thí nghiệm đã được thực hiện ứng với các biên độ điện áp khác nhau. Nghiên cứu góp phần làm rõ cơ chế truyền năng lượng của tia plasma trong các môi trường khác nhau, đồng thời xác định được các yếu tố then chốt ảnh hưởng đến quá trình này.

Biên độ điện áp đặt vào ảnh hưởng trực tiếp đến năng lượng phóng mỗi xung và khả năng đánh thủng khí tạo plasma. Tần số nguồn cấp quyết định tốc độ lặp lại của các xung phóng điện. Lưu lượng khí tác động đến thời gian lưu của phân tử khí trong vùng plasma, khả năng làm mát và hình dạng không gian của plasma jet. Cấu hình điện cực và khoảng cách phóng điện ảnh hưởng đến cường độ điện trường, chế độ phóng điện (dạng sợi hay đều) và mức độ truyền năng lượng. Việc hiểu và tối ưu hóa các thông số này giúp kiểm soát chính xác đặc tính của plasma, từ đó nâng cao hiệu quả ứng dụng mà không gây tổn thương nhiệt hoặc giúp tiết kiệm năng lượng

Một số lưu ý kỹ thuật để thực hiện thí nghiệm: nguồn điện cao áp, nên thiết bị đo giám sát cần chịu điện áp cao. Xung phóng điện có tốc độ tăng xung nhanh, thiết bị đo cần có tần số đáp ứng cao - 75 Mhz-200 Mhz. Oscilloscope phải có băng thông lớn 200 Mhz, tần số lấy mẫu lớn 2,5 Gas/s, hệ thống thí nghiệm cần được setup với các kết nối chắc chắn, đơn giản, hạn chế chiều dài dây dẫn tránh các điện dung, điện cảm ký sinh làm sai lệch kết quả thí nghiệm.

Kết quả nghiên cứu cho thấy khi tăng biên độ điện áp thì tia plasma được tạo ra với cường độ mạnh hơn, năng lượng nguồn cung cấp cho hệ thống thí nghiệm, công suất trên mục tiêu xử lý đều tăng lên. Kết quả giúp tối ưu hiệu quả năng lượng, giảm thất thoát nhiệt, và tăng độ chính xác trong các hệ thống sử dụng plasma, từ đó nâng cao hiệu suất công nghệ và giảm thiểu tác động môi trường. Kết quả nghiên cứu mở ra các định hướng ứng dụng cho tia plasma trong tương lai.

Hướng phát triển và ứng dụng: Để phát triển hơn trong lĩnh vực này, cần tiếp tục nghiên cứu về cách tối ưu hóa điều kiện hoạt động của phóng điện DBD với khí Nitơ và máy biến áp Neon. Việc này sẽ giúp chúng ta hiểu rõ hơn về cơ chế hoạt động và hướng ứng dụng của công nghệ này. Nghiên cứu này góp phần làm sáng tỏ cơ chế và khả năng điều khiển năng lượng trong plasma jet sử dụng khí nitơ, từ đó tối ưu hóa hiệu quả xử lý sinh học. Kết quả thu được là nền tảng khoa học cho các ứng dụng thực tiễn

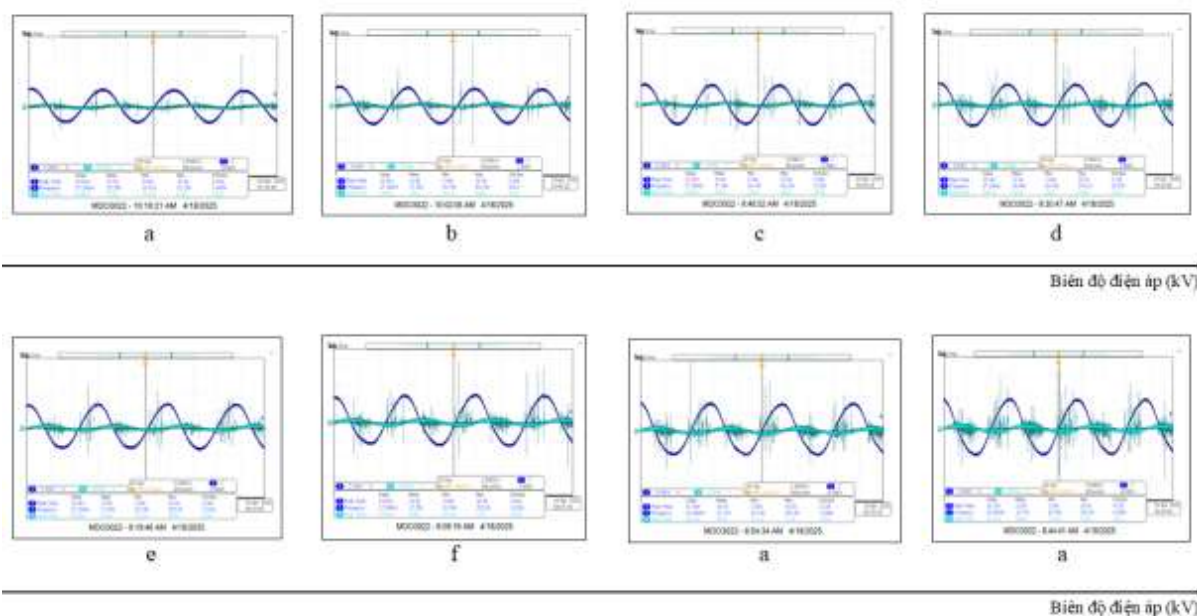
như xử lý hạt giống, tiệt trùng, và y sinh học mà không cần dùng hóa chất độc hại. Điều này phù hợp với xu hướng phát triển bền vững và công nghệ sạch trong nông nghiệp và công nghiệp hiện đại. Nhìn vào tương lai, việc nghiên cứu và phát triển trong lĩnh vực này sẽ đem lại nhiều cơ hội mới và ứng dụng rộng rãi. Sự tiếp tục khám phá và đổi mới sẽ giúp chúng ta tận dụng tối đa tiềm năng của phóng điện DBD với khí Nitơ và máy biến áp Neon mang lại những đóng góp quan trọng cho xã hội và môi trường.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

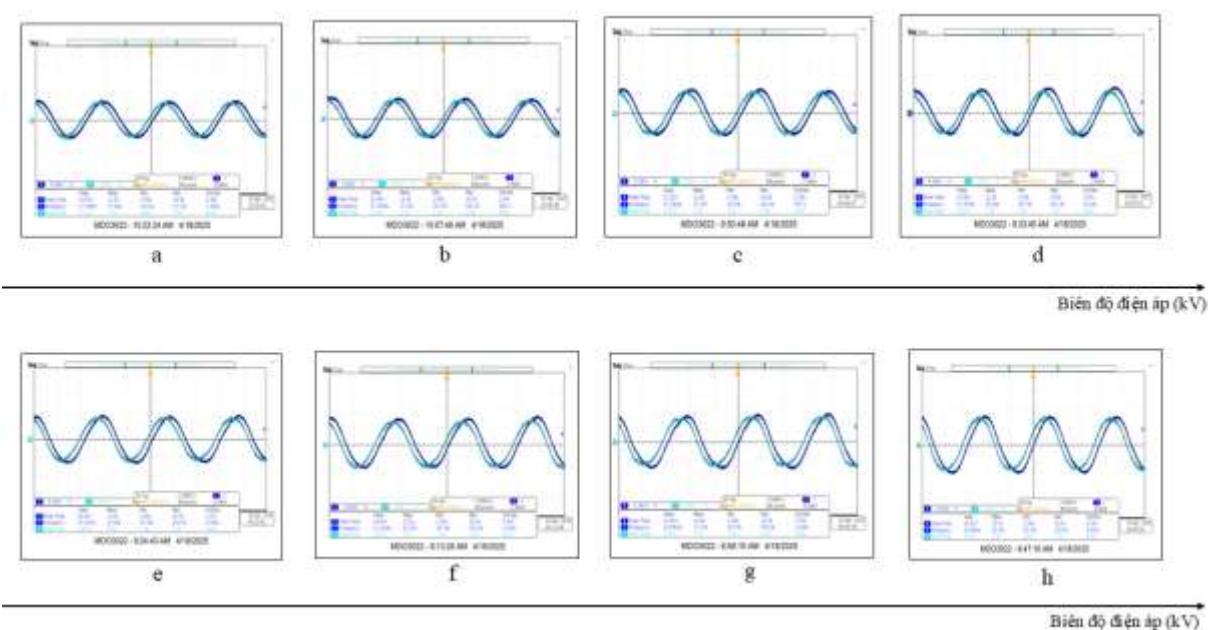
- [1] Hoàng Việt, “Kỹ thuật điện cao áp” (Tập 1, Kỹ thuật cách điện, Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, 2003).
- [2] Phan Đình Chung, “Kỹ thuật điện cao áp” (Đại học Bách Khoa, Đại học Đà Nẵng).
- [3] Nguyễn Đình Thắng, “Giáo trình Vật liệu điện” (Sách dùng cho các trường Đào tạo hệ Trung học chuyên nghiệp và Cao đẳng Kỹ thuật, 2002).
- [4] Nguyễn Văn Dũng, “Vật liệu điện” (Bài giảng học phần kỹ thuật cao áp 8/3/2015).
- [5] Hoa Thi Truong, Van Nhan Truong, “Electrical Characteristics of Plasma Jet Depending on Operating Voltage Amplitude at Industrial Frequency” 30 November 2024.
- [6] Hoa Thi Truong , Yoshihiko Uesugi , Yasunori Tanaka , and Tatsuo Ishijima “Effects of dielectric properties on electrical characteristic of dielectric barrier discharge (DBD) generated by low frequency uni-polar high voltage pulses” 6 November 2019.
- [7] Efe Hasan Kemaneci, “Numerical Investigation of a DC Glow Discharge in an Argon Gas: Two-Component Plasma Model” Middle East Technical University (September 2009).
- [8] P. S. G. Subramanian, A. Ananthanarasimhan, L. P., H. Rao, A. M. Shivapuji, P.-L. Girard-Lauriault, and L. Rao, “Plasma-activated water from DBD as a source of nitrogen for agriculture: Specific energy and stability studies”, Mar. 2021
- [9] Achraf Hani, Karim Saber, Alyen Abahazem and Nofel Merbahi, “Energy Efficiency of Plasma Jets: Electrical Modeling Based on Experimental Results” MDPI, 23 October 2024
- [10] Srutee Rout, Pradeep Kumar Panda, Pranjyan Dash, Prem Prakash Srivastav and Chien-Te Hsieh, “Cold Plasma-Induced Modulation of Protein and Lipid Macromolecules: A Review” MDPI, 13 February 2025

PHỤ LỤC

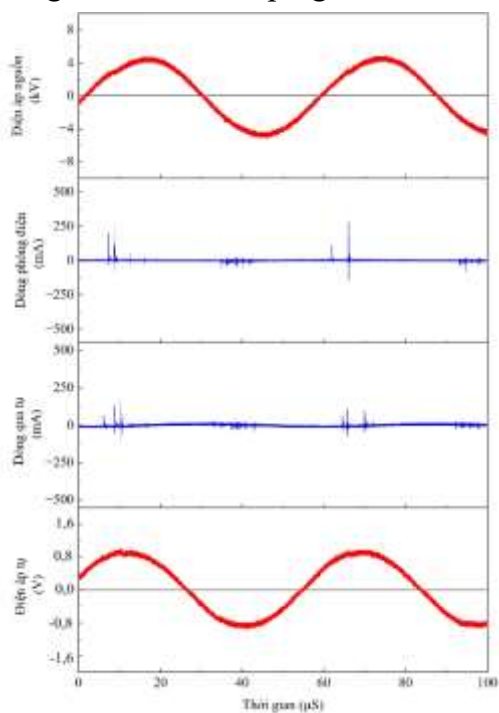
Phụ lục 3.1: Dạng sóng giữa điện áp nguồn và dòng qua máy biến dòng điện được đo ở các biên độ điện áp khác nhau tương ứng (a) 10,6 kV; (b) 11,4 kV; (c) 12,2 kV; (d) 13 kV; (e) 13,8 kV; (f) 14,6 kV; (g) 15,4 kV và (h) 16,2 kV



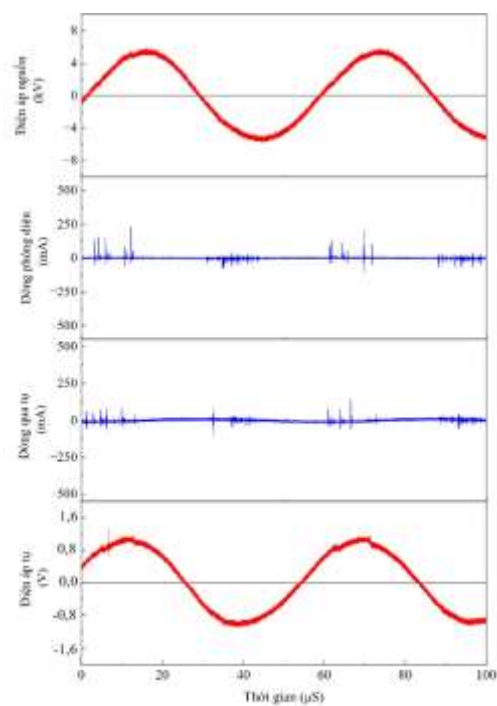
Phụ lục 3.2: Dạng sóng giữa điện áp nguồn và điện áp trên tụ điện giám sát được đo ở các biên độ điện áp khác nhau tương ứng (a) 10,6 kV; (b) 11,4 kV; (c) 12,2 kV; (d) 13 kV; (e) 13,8 kV; (f) 14,6 kV; (g) 15,4 kV và (h) 16,2 kV



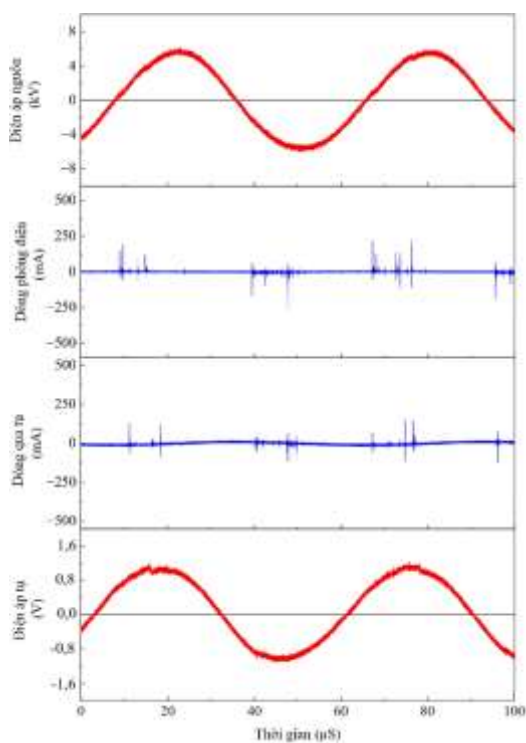
Phụ Lục 3.3: Đặc tính V-A của kết quả thí nghiệm khí Nito lưu lượng 1 slm ứng với từng biên độ điện áp nguồn



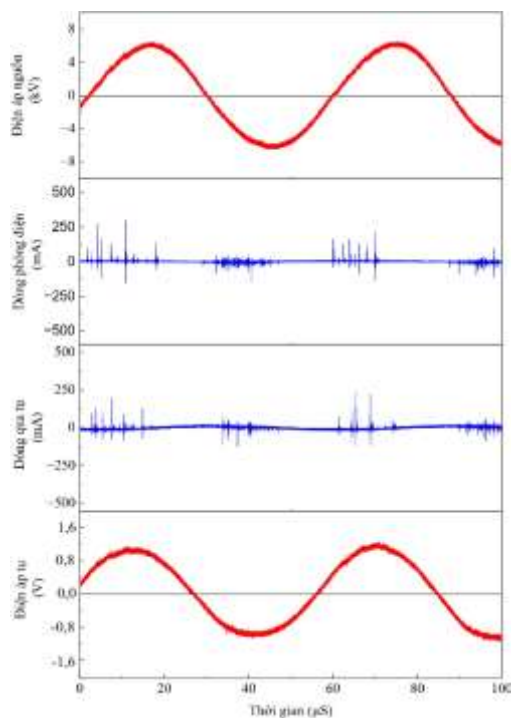
a. $V_{pp} = 10,6 \text{ kV}$



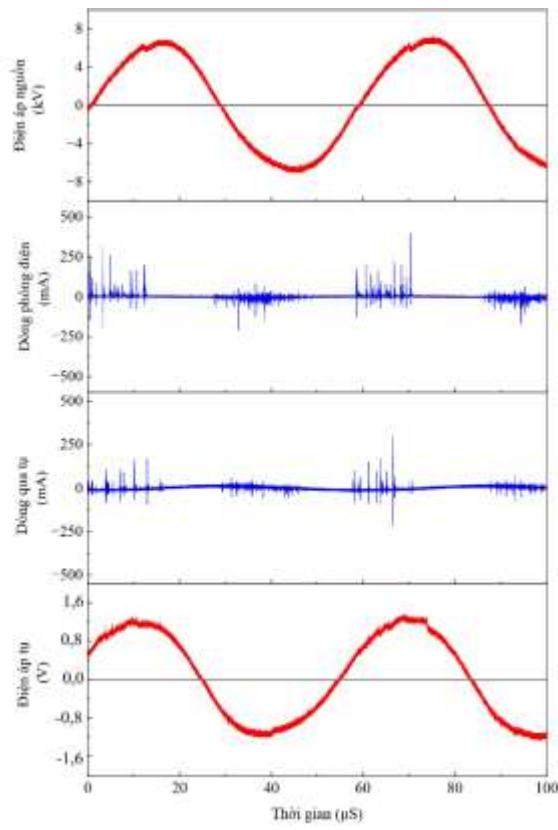
b. $V_{pp} = 11,4 \text{ kV}$



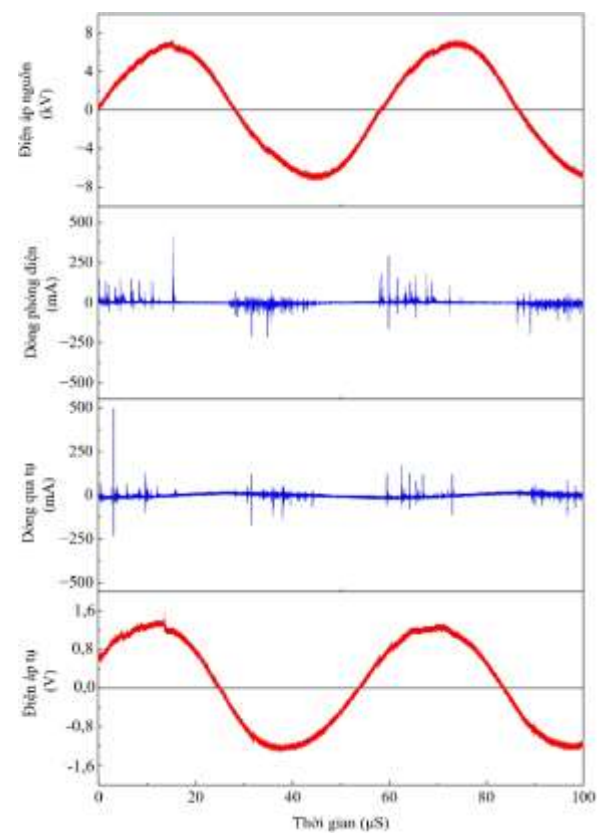
c. $V_{pp} = 12,2 \text{ kV}$



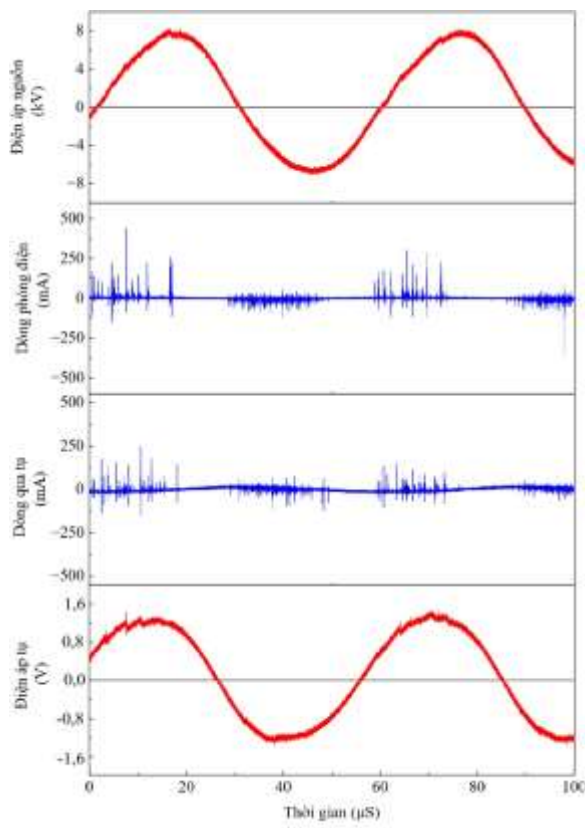
d. $V_{pp} = 13 \text{ kV}$



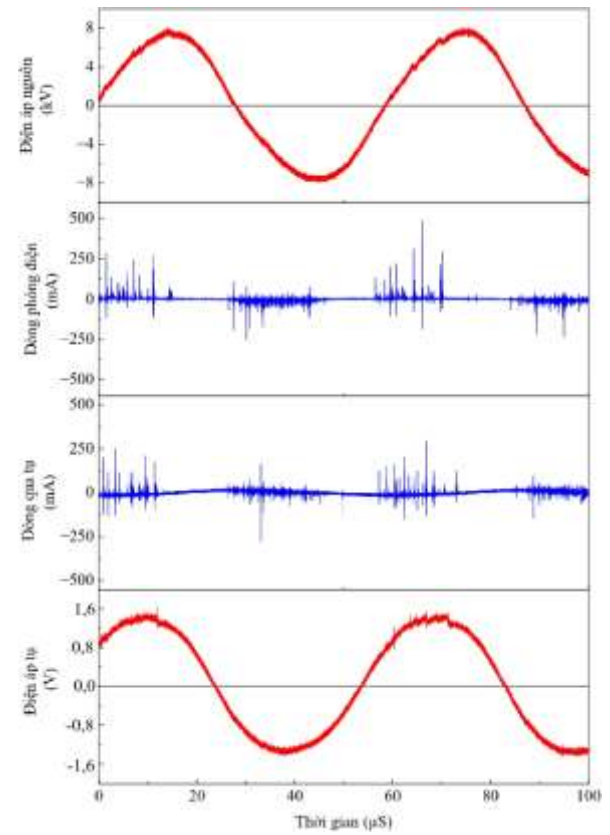
e. $V_{pp} = 13,8 \text{ kV}$



f. $V_{pp} = 14,6 \text{ kV}$

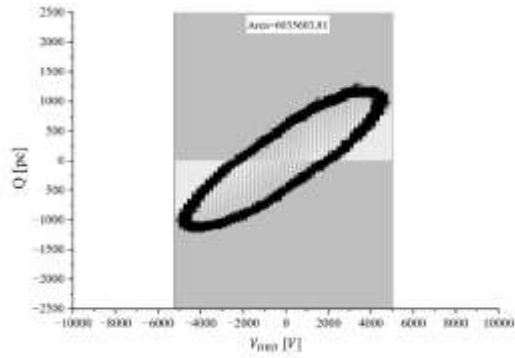


g. $V_{pp} = 15,4 \text{ kV}$

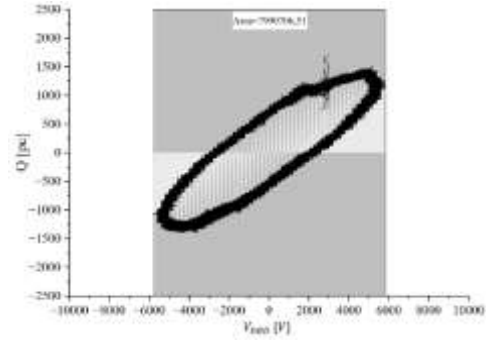


h. $V_{pp} = 16,2 \text{ kV}$

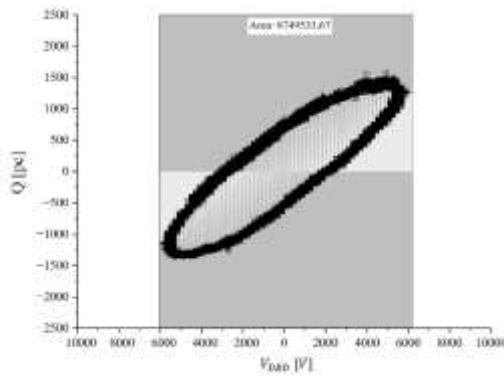
Phụ Lục 3.4: Các đường lisajour và giá trị thu được ở các biên độ điện áp thí nghiệm với khí Nito 1 slm



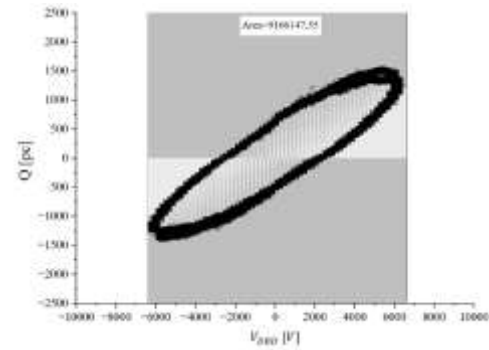
a. Biên độ điện áp 10,6 kV



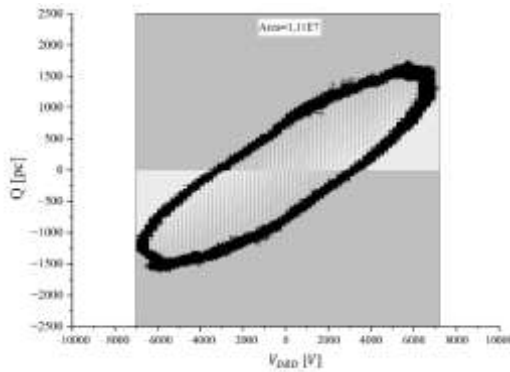
b. Biên độ điện áp 11,4 kV



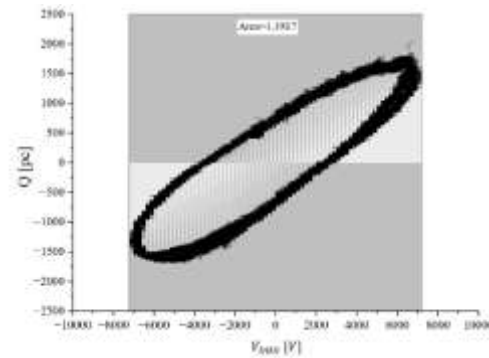
c. Biên độ điện áp 12,2 kV



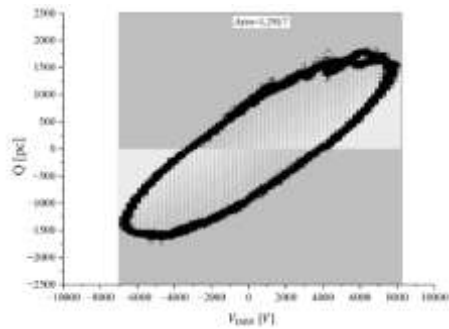
d. Biên độ điện áp 13 kV



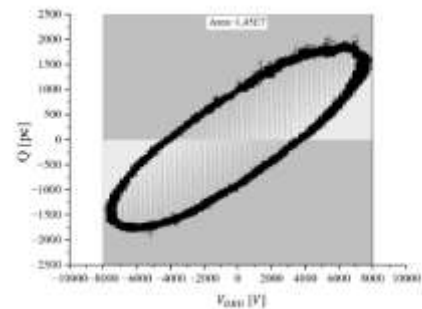
e. Biên độ điện áp 13,8 kV



f. Biên độ điện áp 14,6 kV

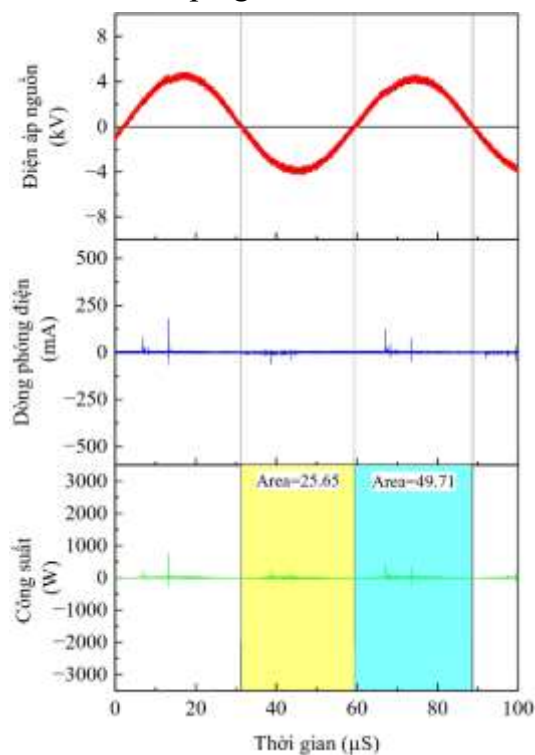


g. Biên độ điện áp 15,4 kV

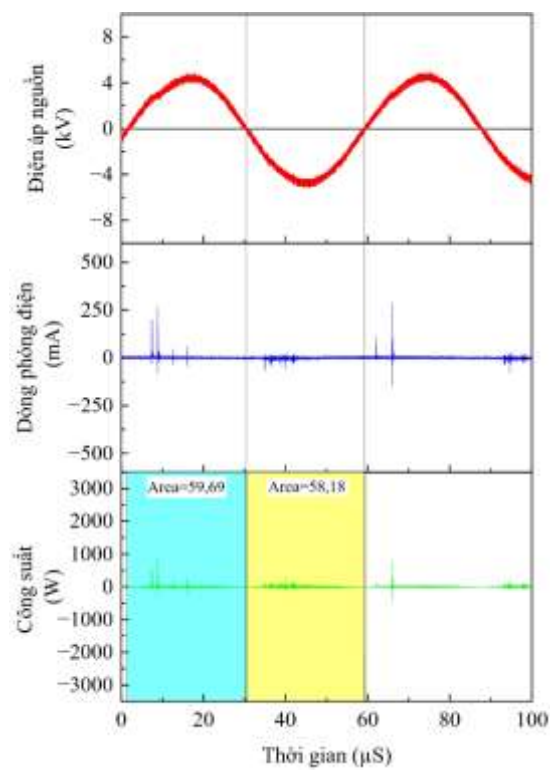
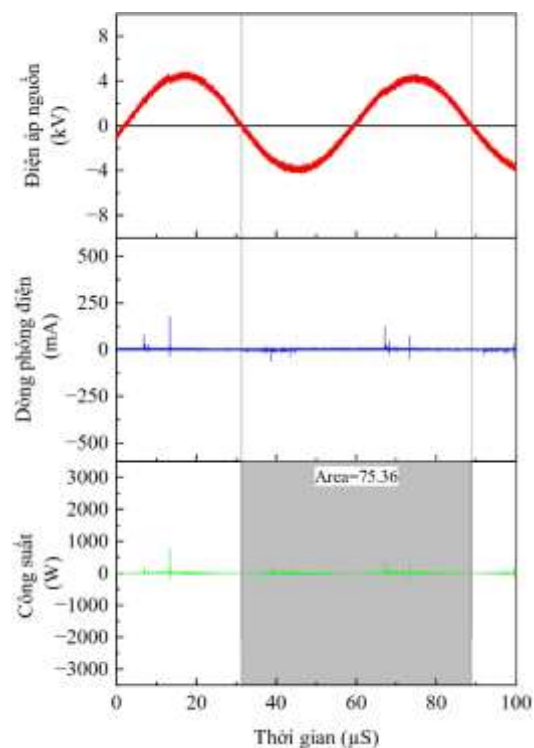


h. Biên độ điện áp 16,2 kV

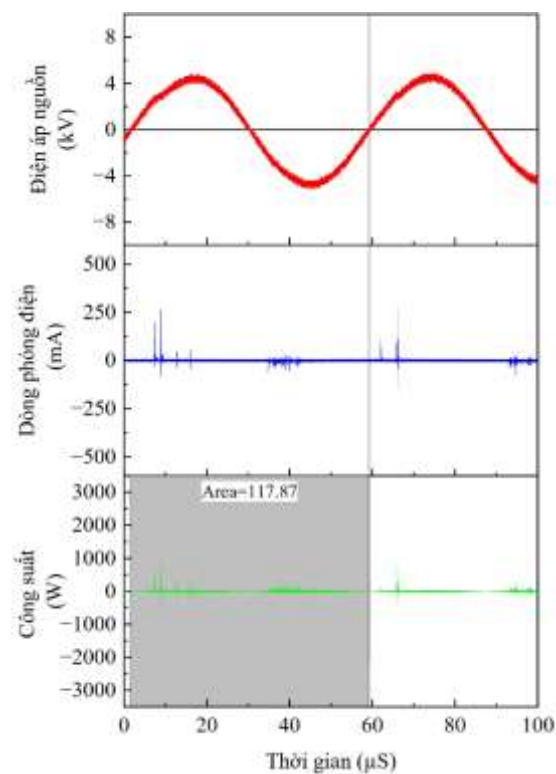
Phụ Lục 3.5: Năng lượng nguồn cung cấp thí nghiệm khí Nito 1slm ứng với từng biên độ điện áp nguồn

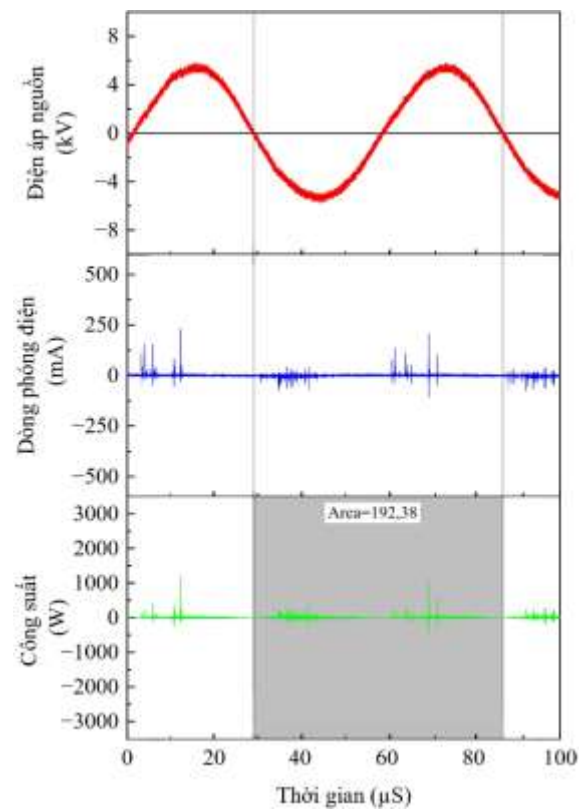
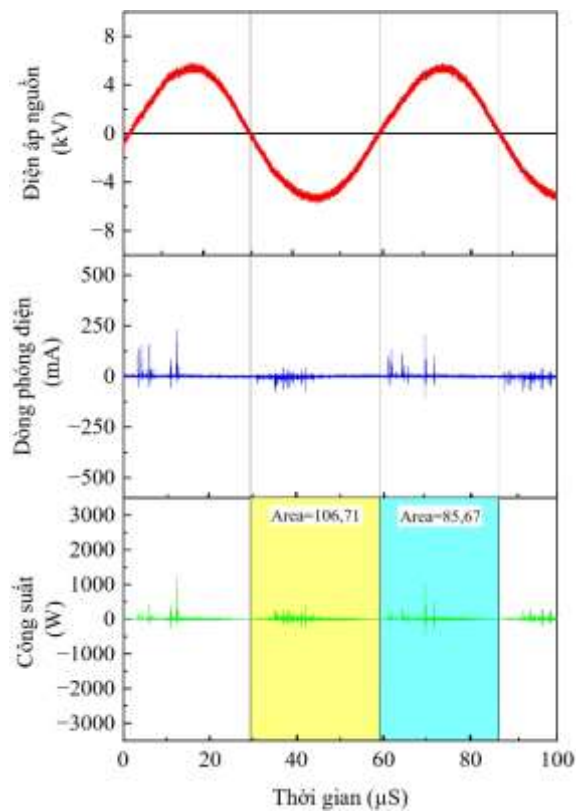


a. Biên độ điện áp nguồn 9,8 kV

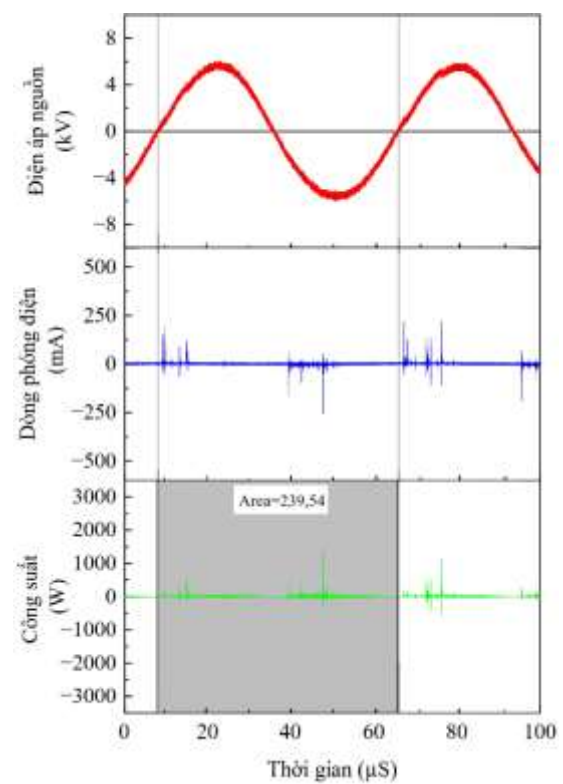
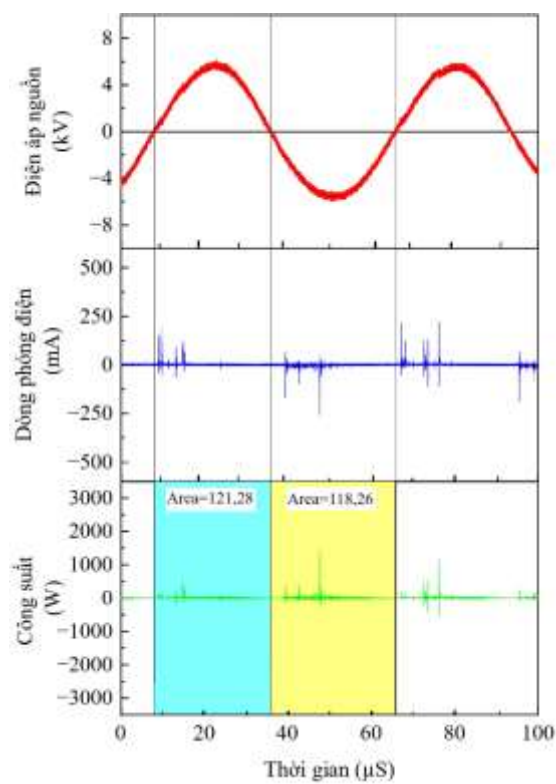


b. Biên độ điện áp nguồn 10,6 kV

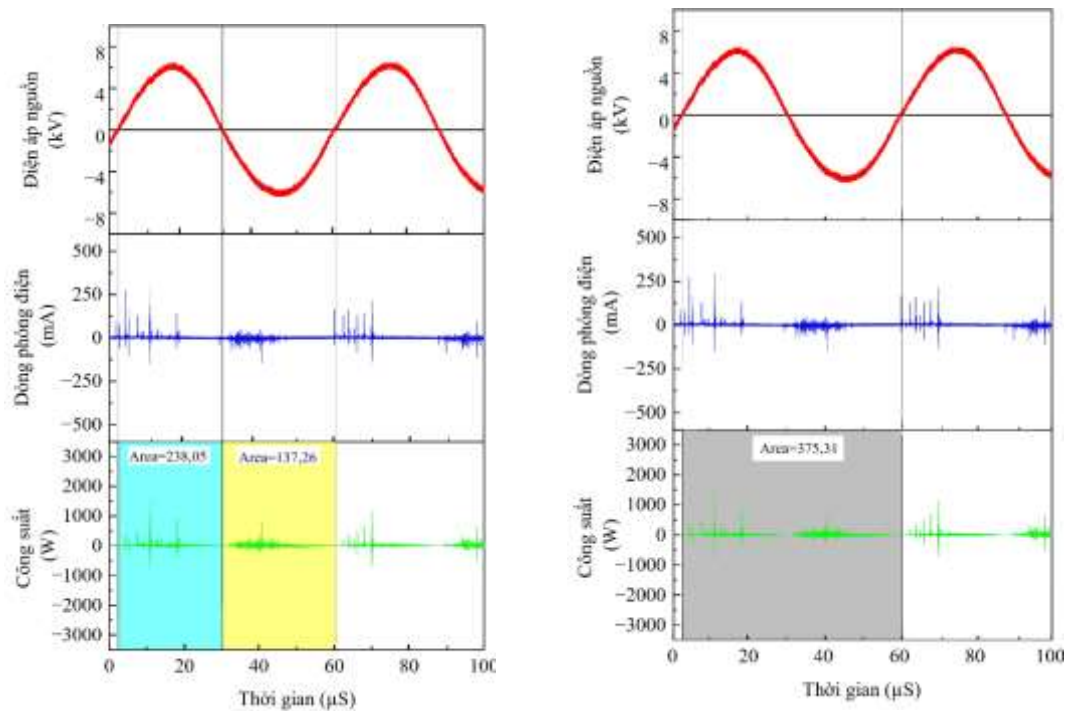




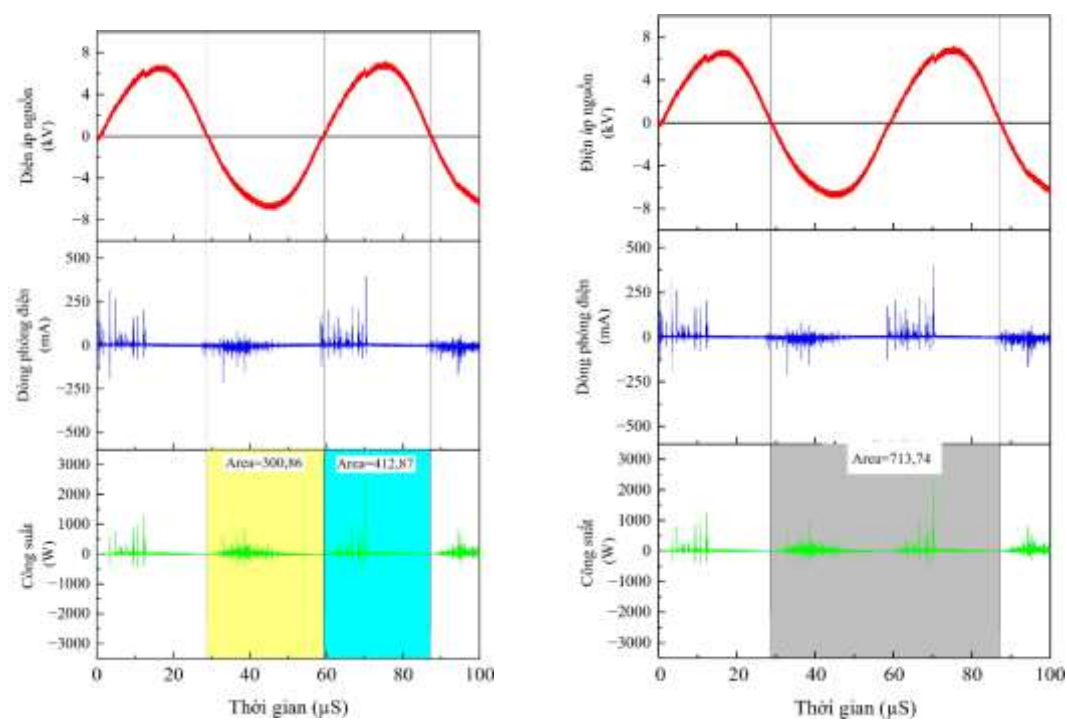
c. Biên độ điện áp nguồn 11,4 kV



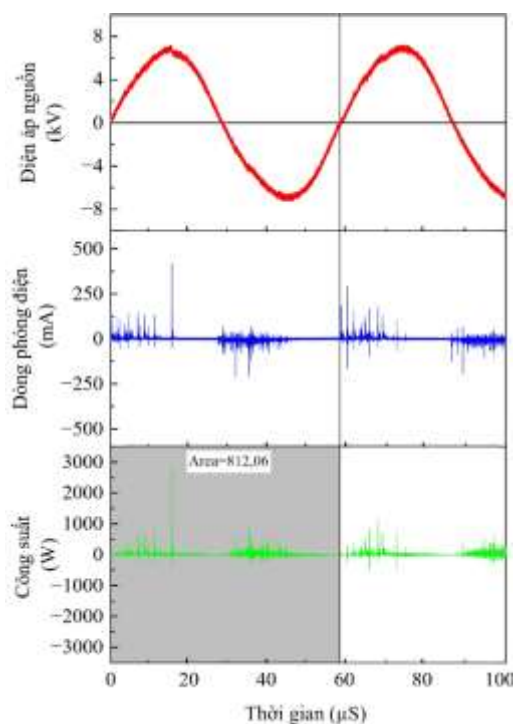
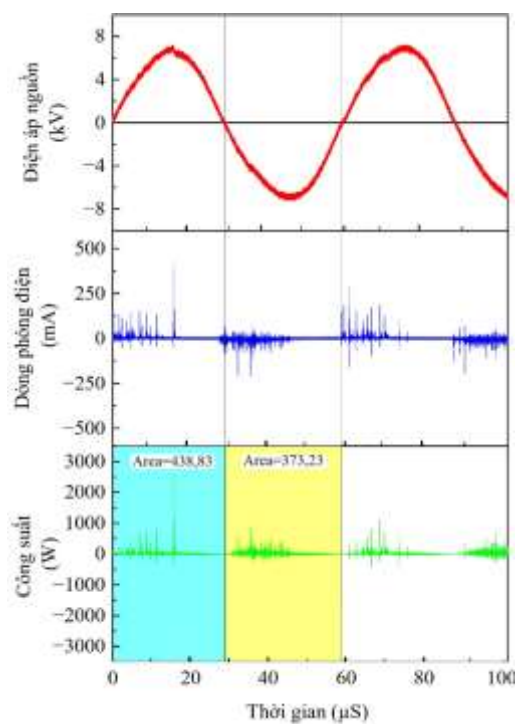
d. Biên độ điện áp nguồn 12,2 kV



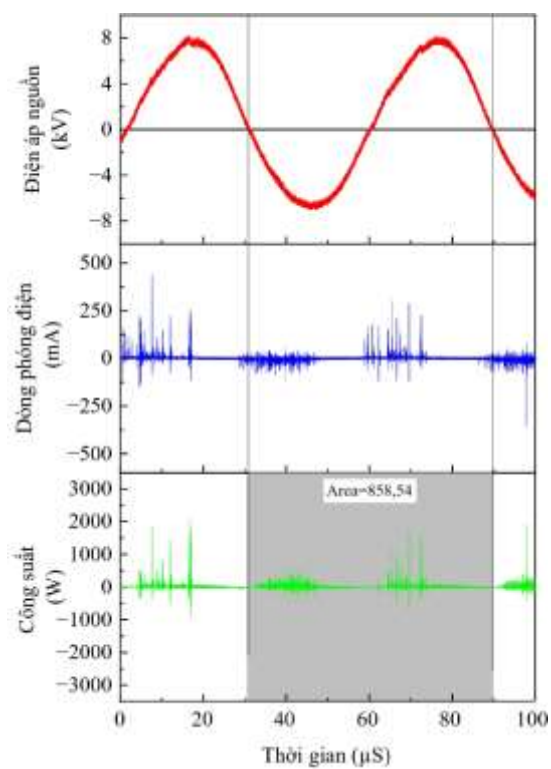
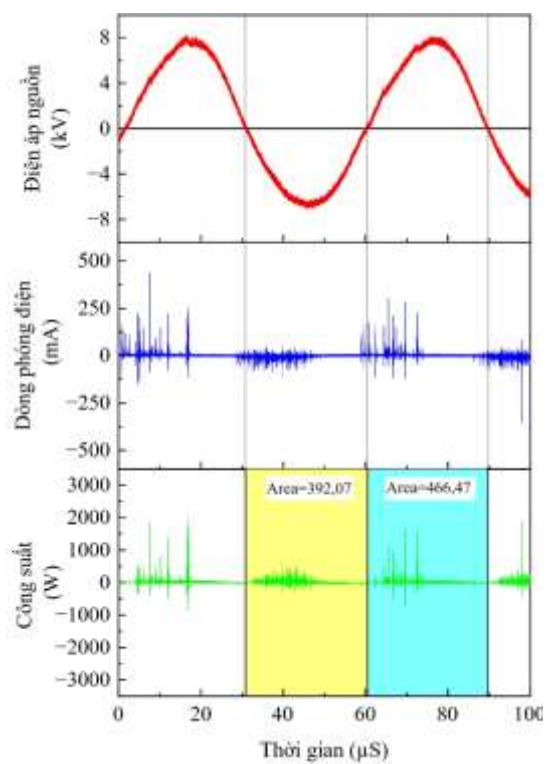
e. Biên độ điện áp nguồn 13 kV



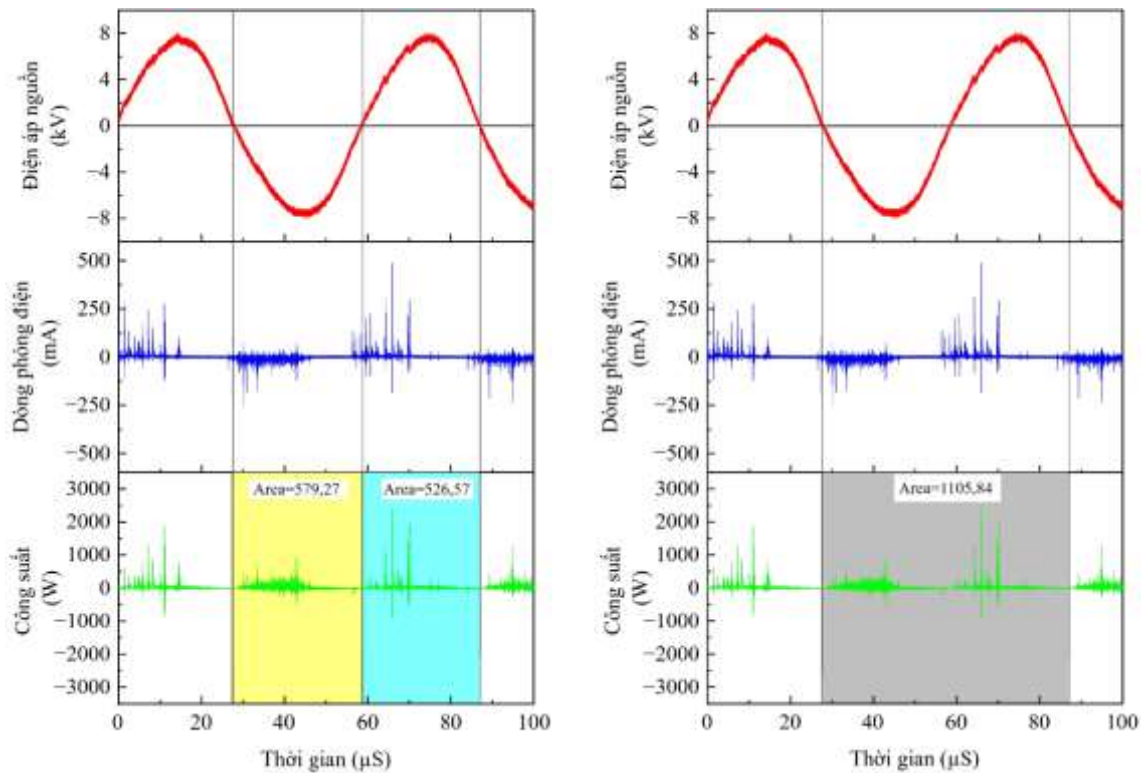
f. Biên độ điện áp nguồn 13,8 kV



g. Biên độ điện áp nguồn 14,6 kV

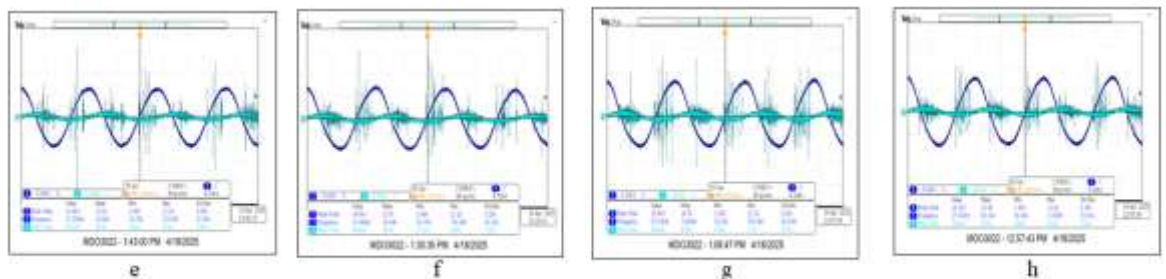
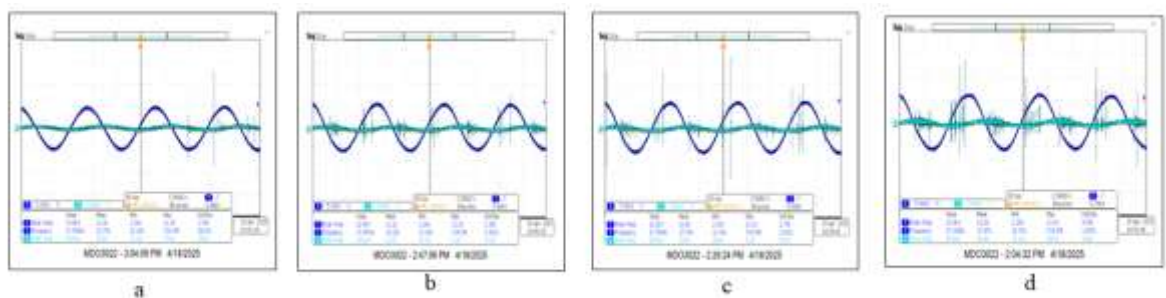


h. Biên độ điện áp nguồn 15,4 kV



i. Biên độ điện áp nguồn 16,2 kV

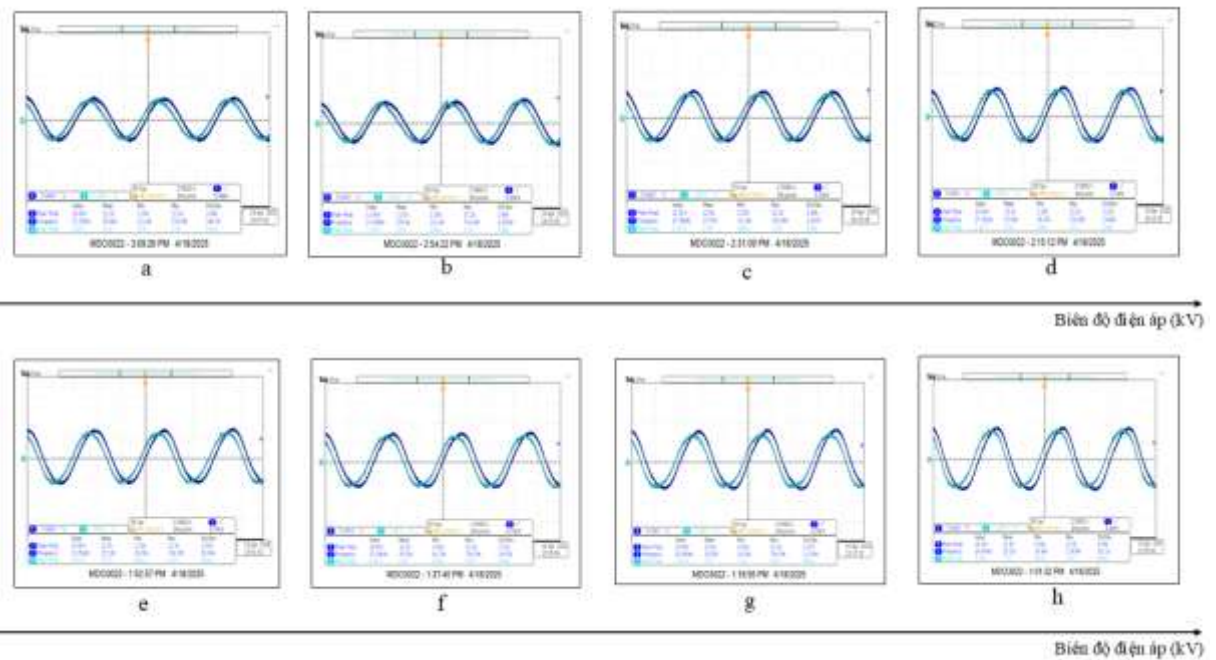
Phụ lục 3.6: Dạng sóng giữa điện áp nguồn và dòng qua máy biến dòng điện được đo ở các biên độ điện áp khác nhau tương ứng (a) 10,6 kV; (b) 11,4 kV; (c) 12,2 kV; (d) 13 kV; (e) 13,8 kV; (f) 14,6 kV; (g) 15,4 kV và (h) 16,2 kV



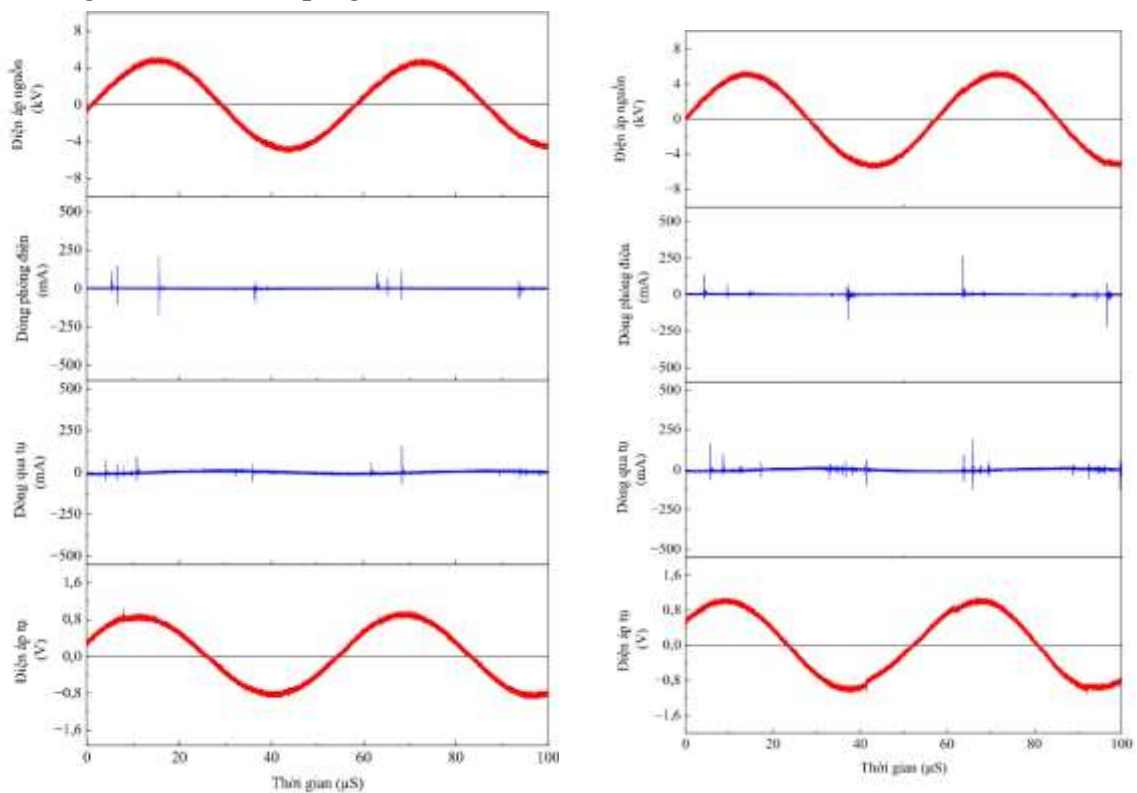
Biên độ điện áp (kV)

Biên độ điện áp (kV)

Phụ lục 3.7: Dạng sóng giữa điện áp nguồn và điện áp trên tụ điện giám sát được đo ở các biên độ điện áp khác nhau tương ứng (a) 10,6 kV; (b) 11,4 kV; (c) 12,2 kV; (d) 13 kV; (e) 13,8 kV; (f) 14,6 kV; (g) 15,4 kV và (h) 16,2 kV

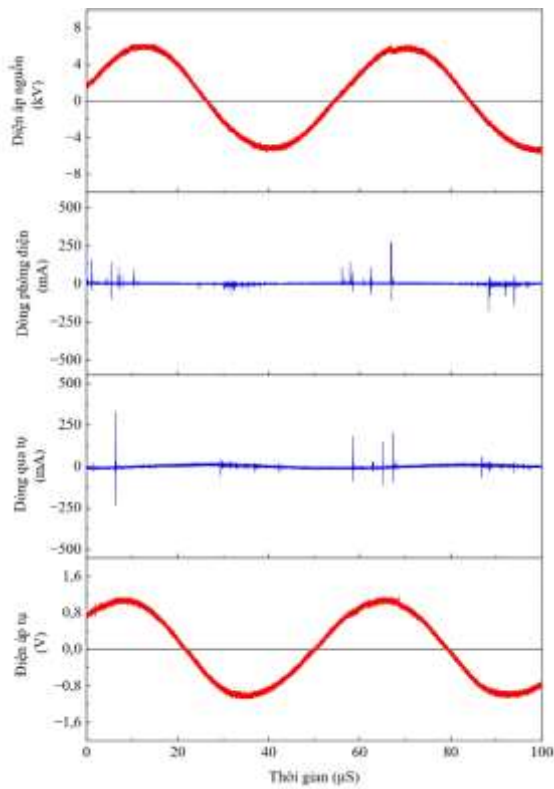


Phụ Lục 3.8: Đặc tính V-A của kết quả thí nghiệm khí Nito lưu lượng 3 slm ứng với từng biên độ điện áp nguồn

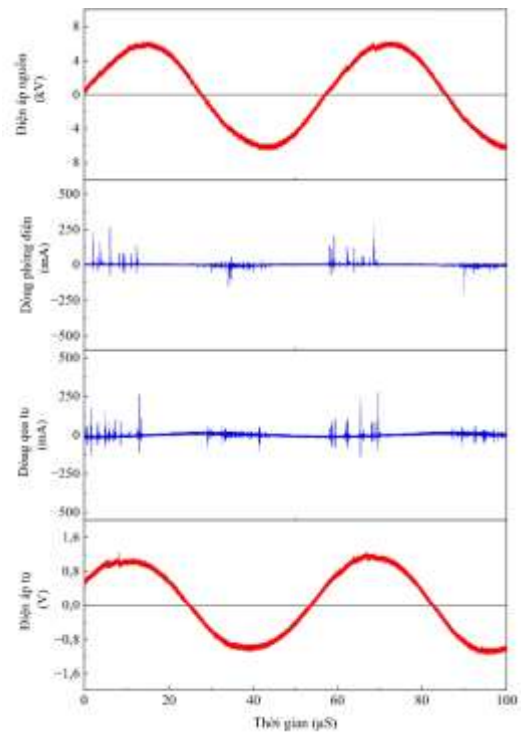


a. $V_{pp} = 10,6$ kV

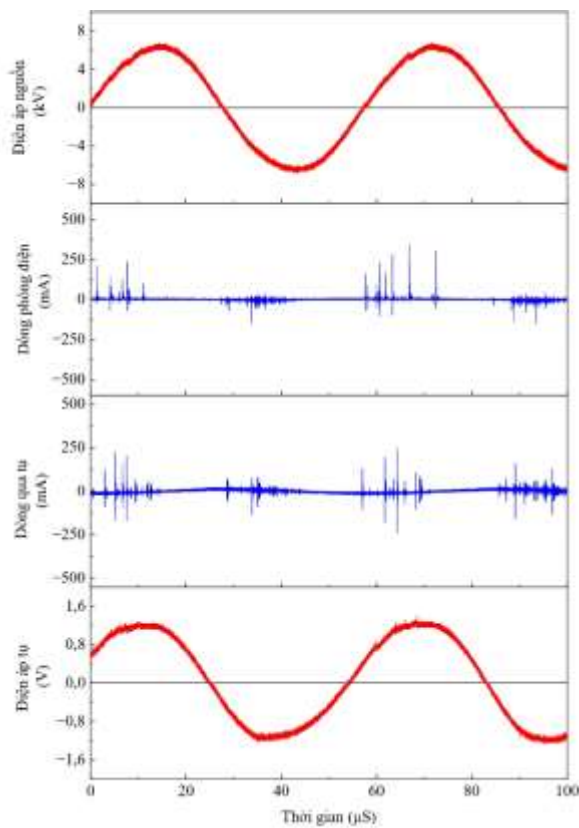
b. $V_{pp} = 11,4$ kV



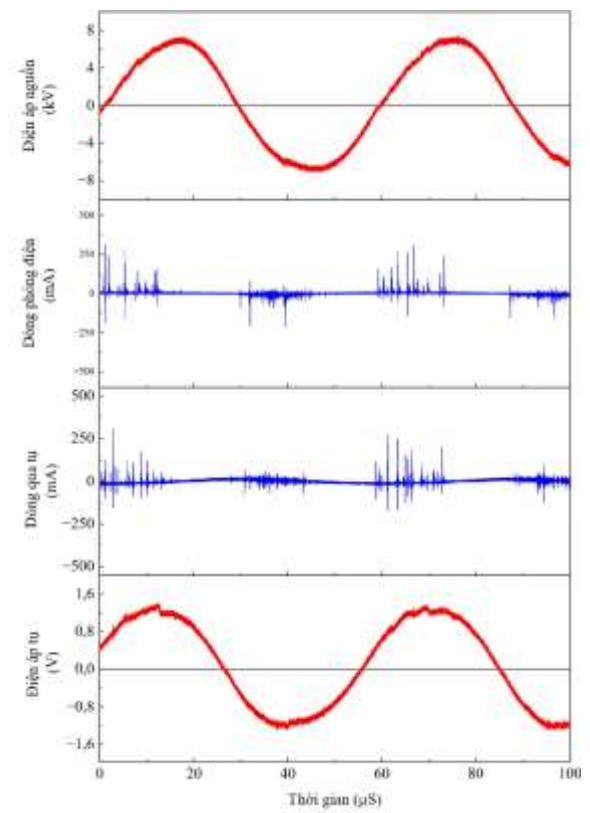
c. $V_{pp} = 12,2 \text{ kV}$



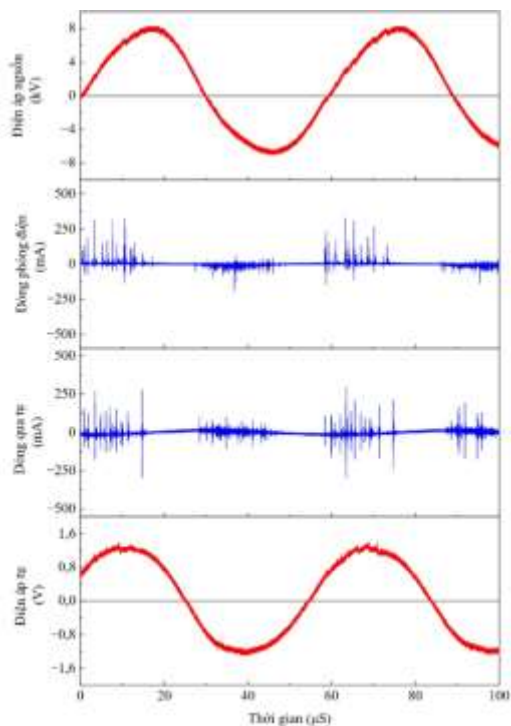
d. $V_{pp} = 13 \text{ kV}$



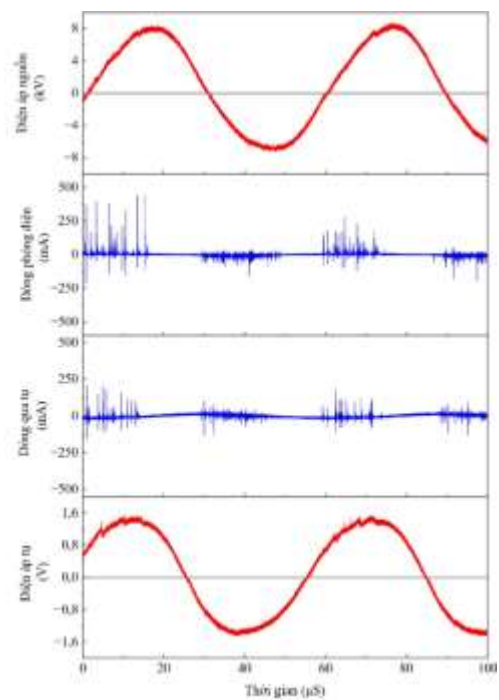
e. $V_{pp} = 13,8 \text{ kV}$



f. $V_{pp} = 14,6 \text{ kV}$

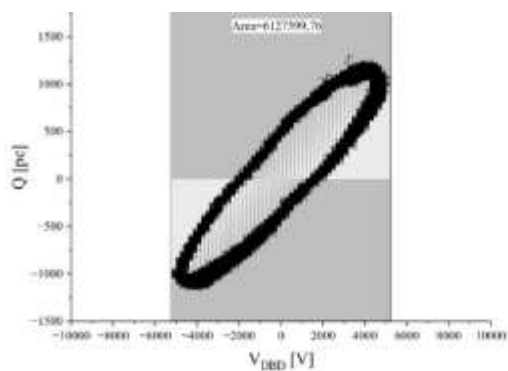


g. $V_{pp} = 15,4 \text{ kV}$

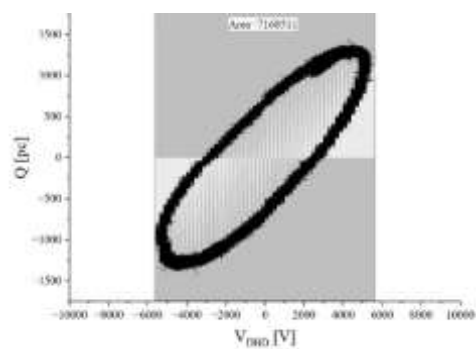


h. $V_{pp} = 16,2 \text{ kV}$

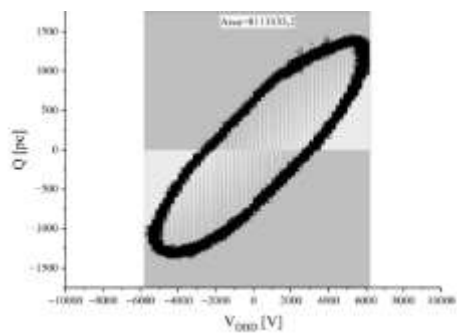
Phụ Lục 3.9: Các đường Lisajour và giá trị thu được ở các cấp điện áp thí nghiệm với khí Nito 3 slm



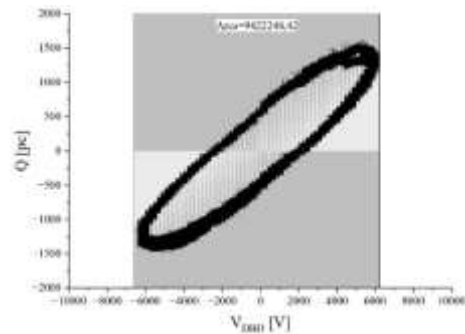
a. Biên độ điện áp 10,6 kV



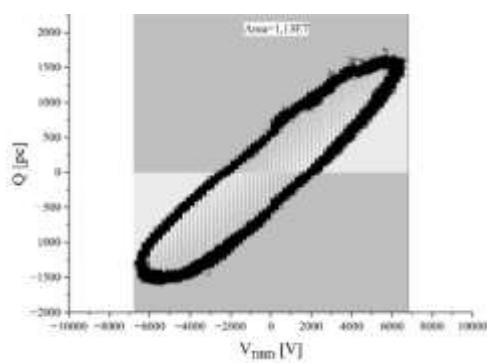
b. Biên độ điện áp 11,4 kV



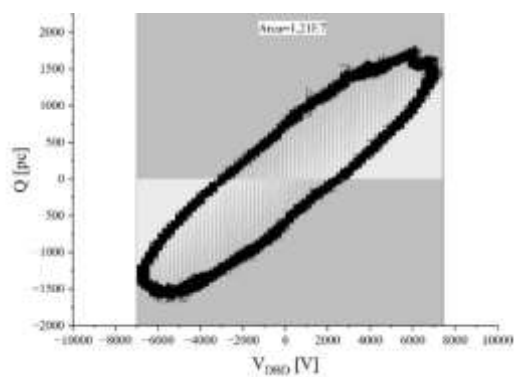
c. Biên độ điện áp 12,2 kV



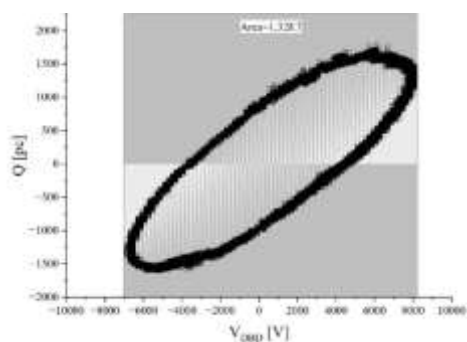
d. Biên độ điện áp 13 kV



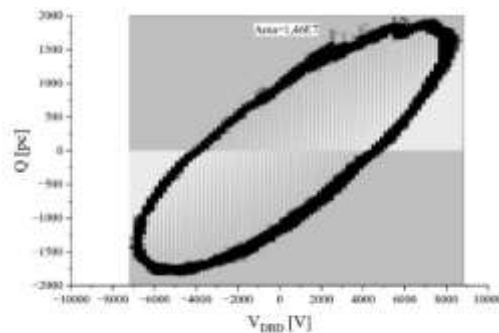
e. Biên độ điện áp 13,8 kV



f. Biên độ điện áp 14,6 kV

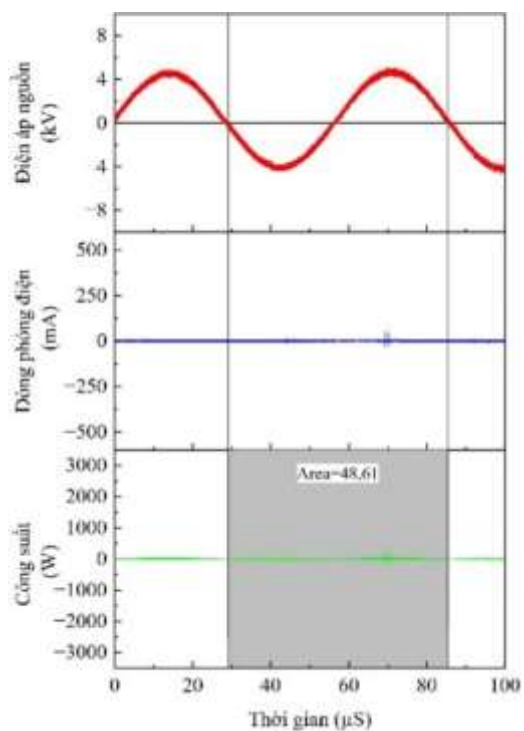
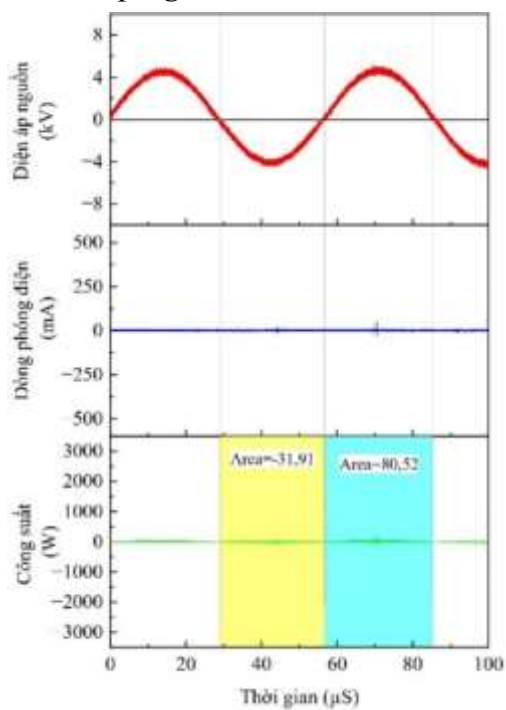


g. Biên độ điện áp 15,4 kV

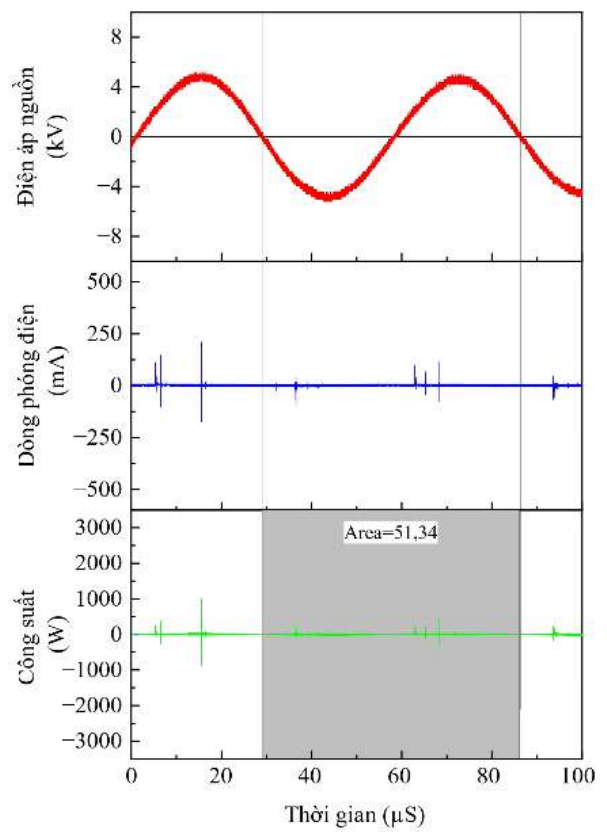
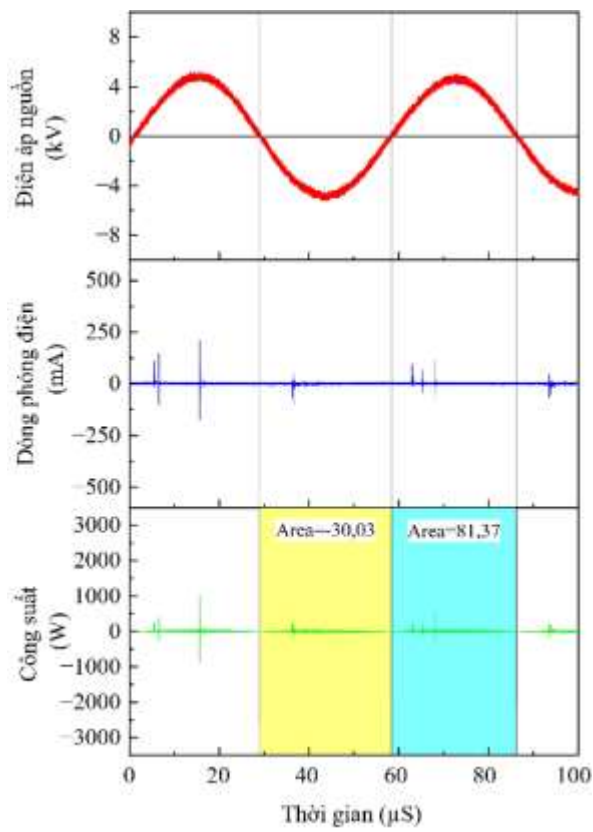


h. Biên độ điện áp 16,2 kV

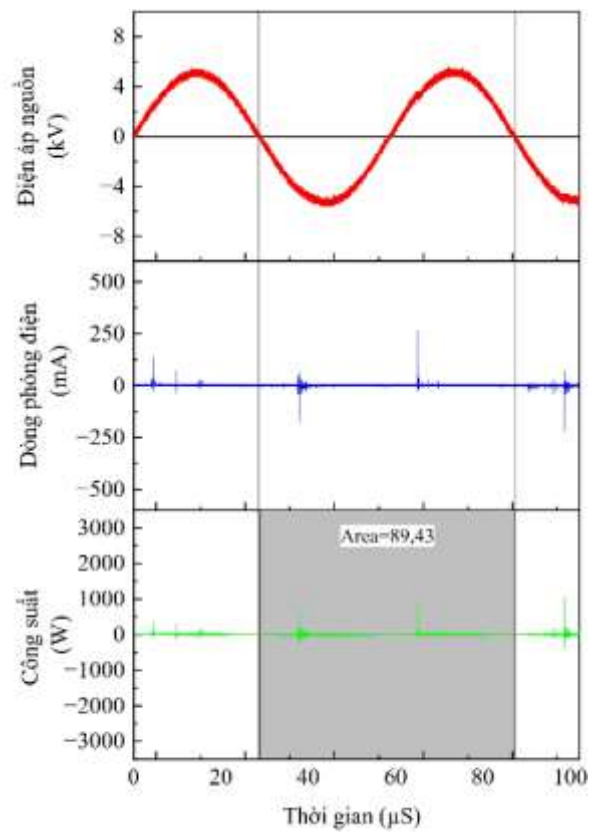
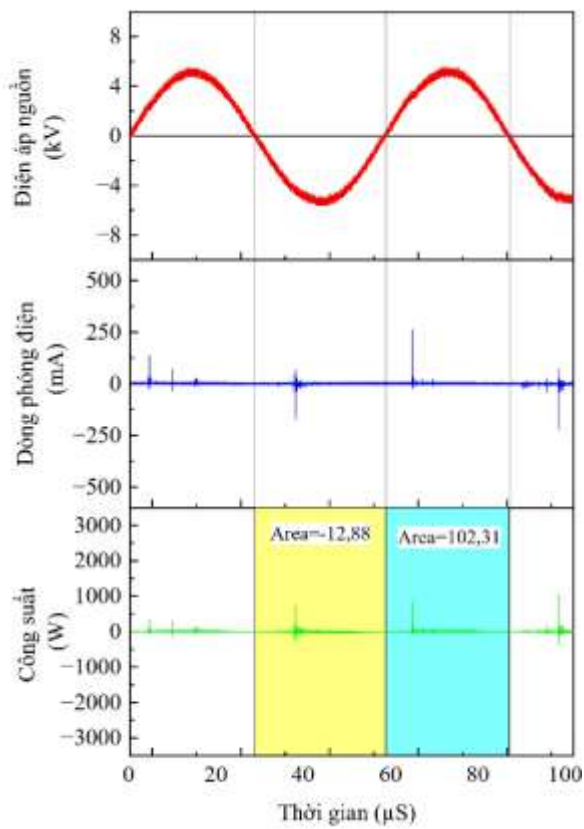
Phụ Lục 3.10: Năng lượng nguồn cung cấp thí nghiệm khí Nito 3 slm ứng với từng biên độ điện áp nguồn



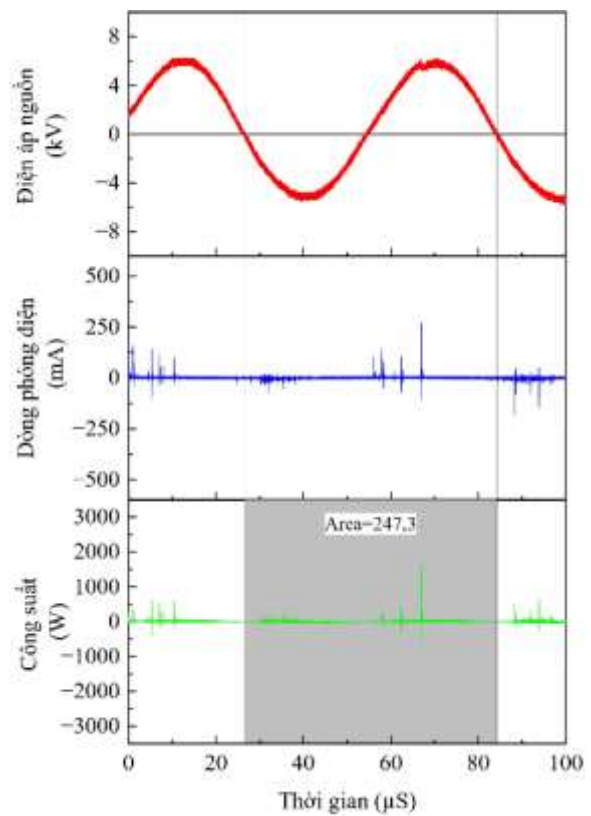
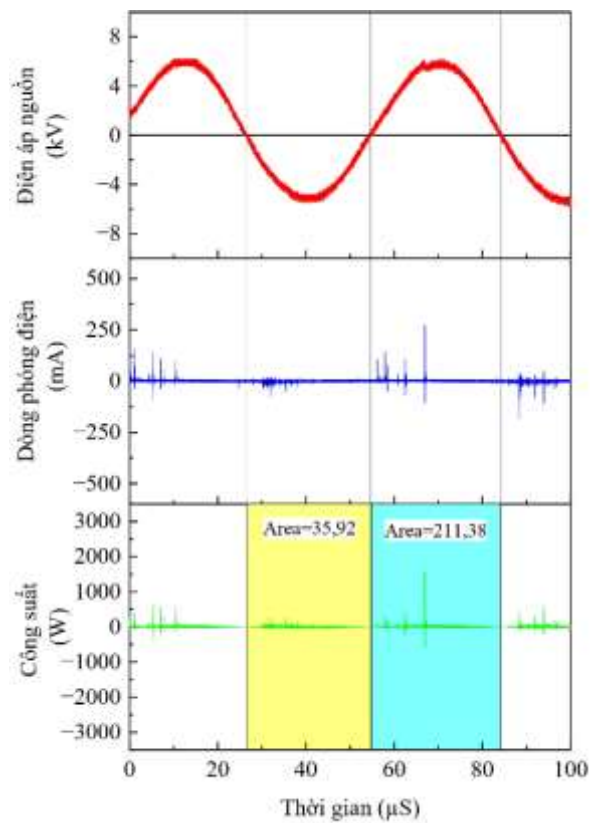
a. Biên độ điện áp nguồn 9,8 kV



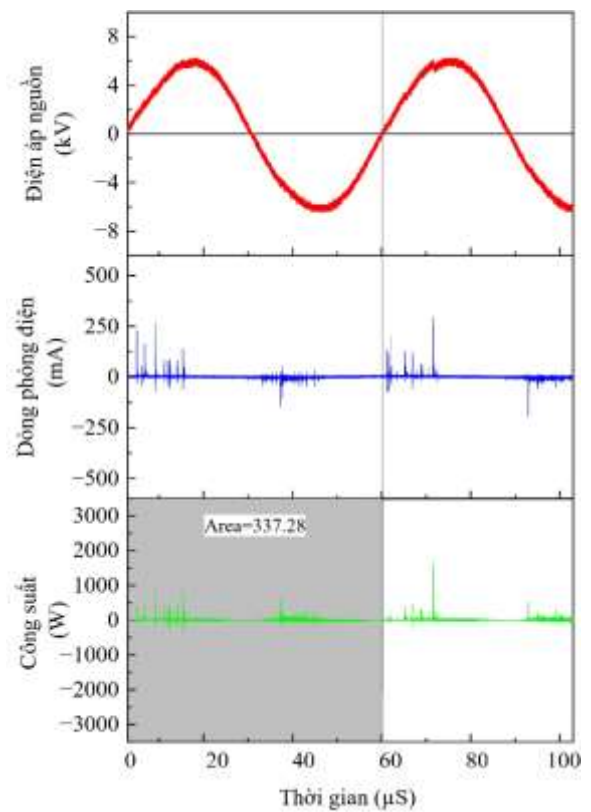
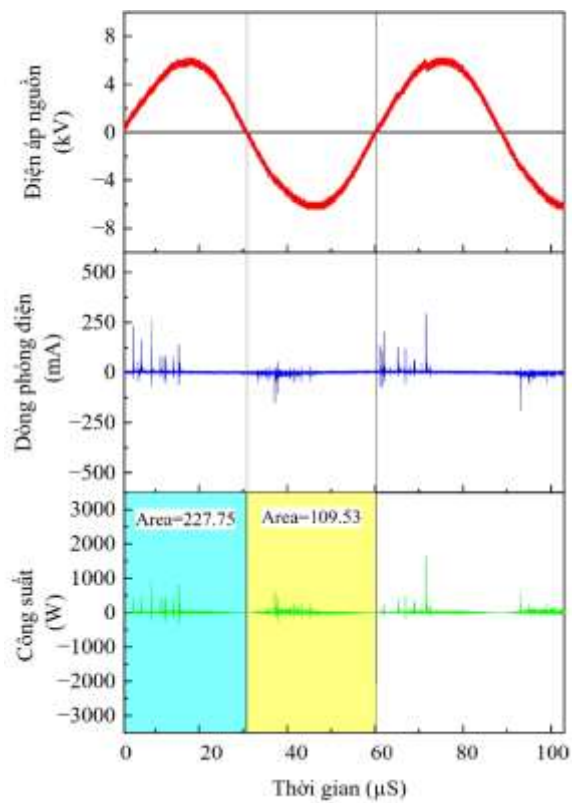
b. Biên độ điện áp nguồn 10,6 kV



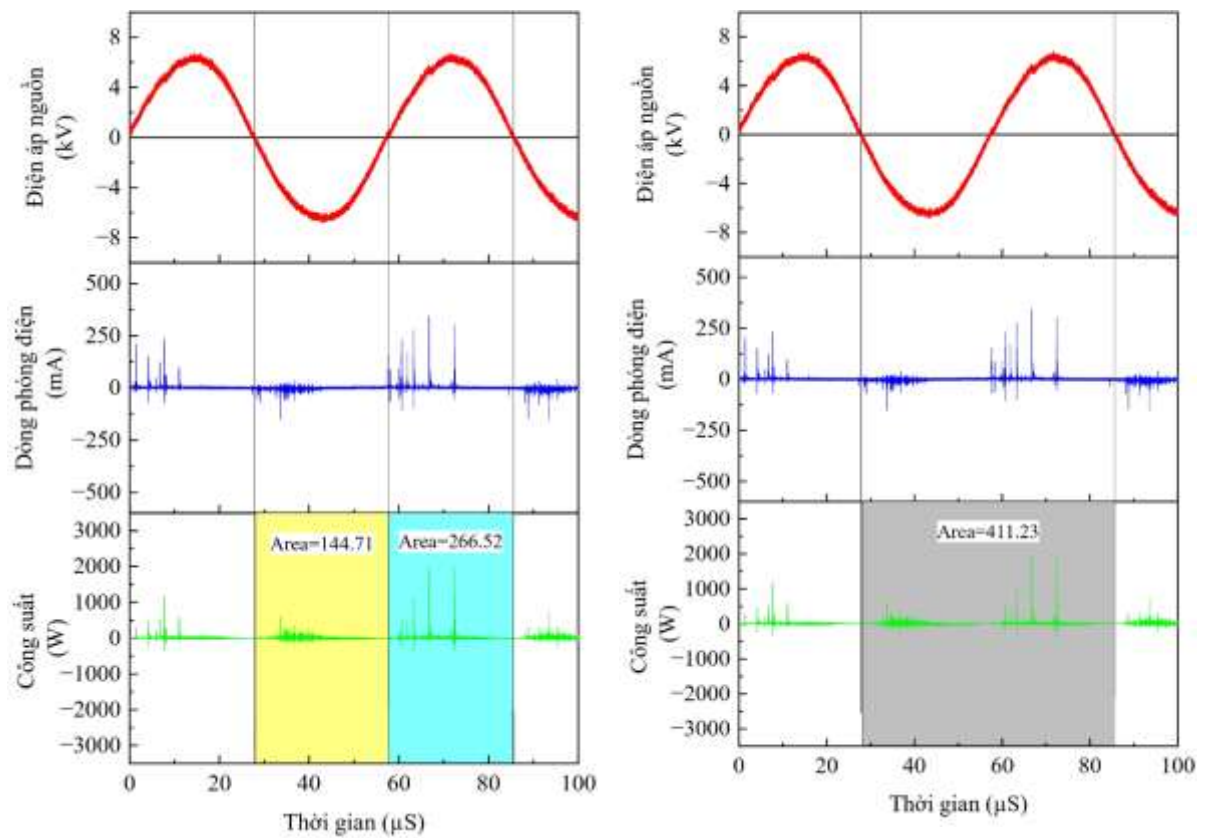
c. Biên độ điện áp nguồn 11,4 kV



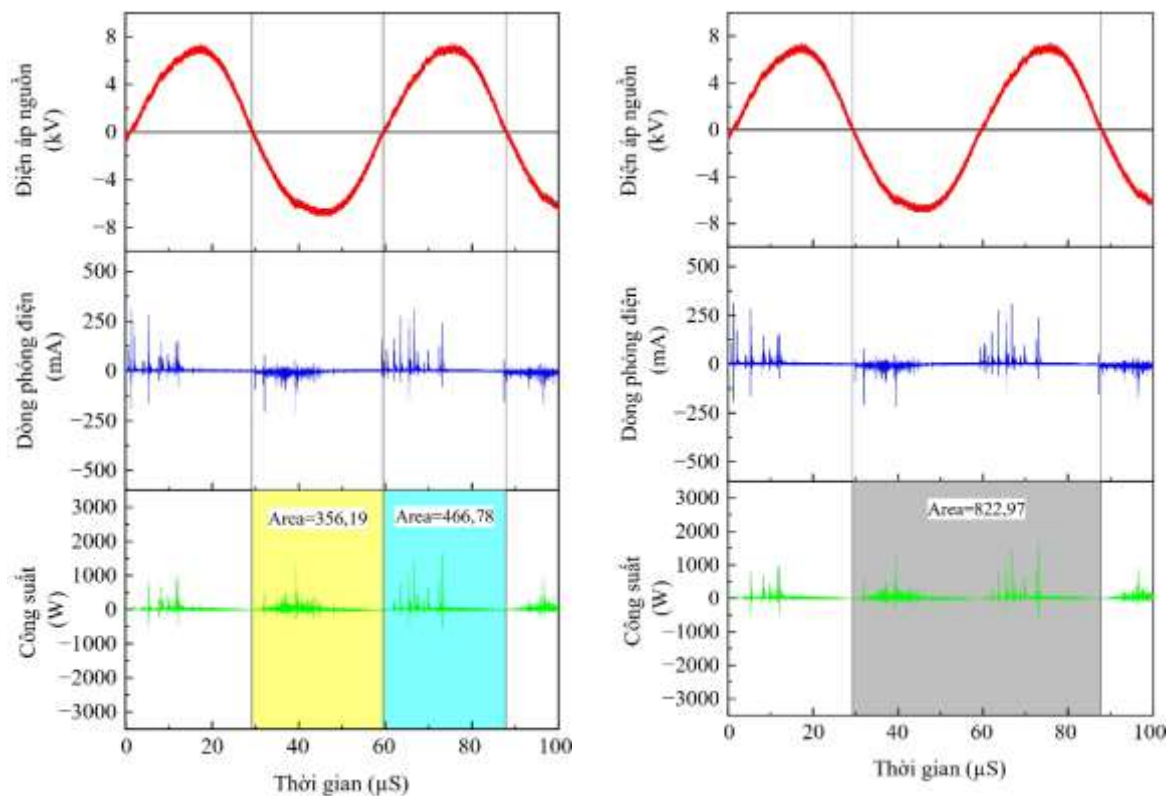
d. Biên độ điện áp nguồn 12,2 kV



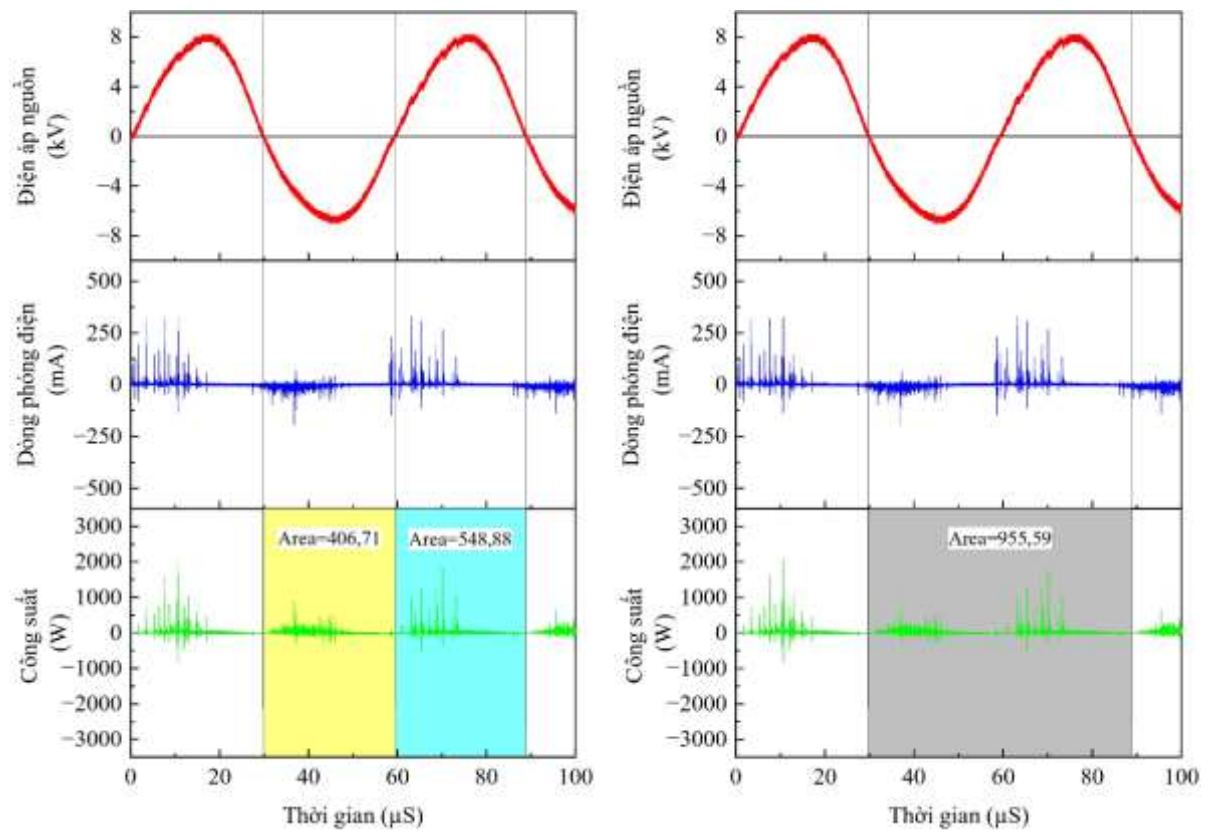
e. Biên độ điện áp nguồn 13 kV



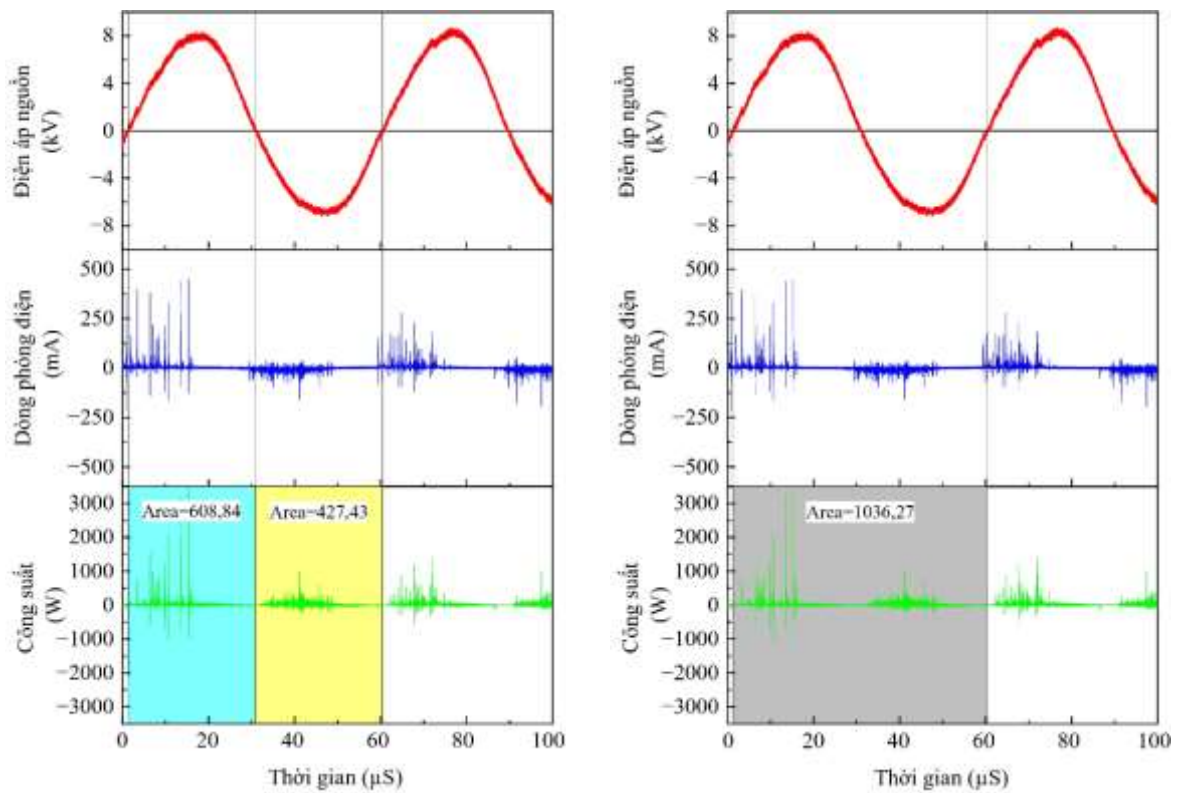
f. Biên độ điện áp nguồn 13,8 kV



g. Biên độ điện áp nguồn 14,6 kV



h. Biên độ điện áp nguồn 15,4 kV



i. Biên độ điện áp nguồn 16,2 kV