

# THIẾT KẾ, CHẾ TẠO VÀ CHẠY THỬ NGHIỆM THIẾT BỊ ĐO DÒNG PROTON TRÊN MÁY GIA TỐC HIC-KOTRON13

THE DESIGN, CONSTRUCTION AND TESTING OPERATION OF PROTON CURRENT CIRCUIT ON ACCELERATOR HIC-KOTRON13

Nguyễn Tuấn Anh<sup>1,\*</sup>, Nguyễn Tiến Dũng<sup>1</sup>,  
Phạm Minh Đức<sup>1</sup>, Nguyễn Xuân Trường<sup>1</sup>

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.139>

## TÓM TẮT

Máy gia tốc cyclotron HIC-KOTRON13 được lắp đặt và vận hành tại Trung tâm Chiếu xạ Hà Nội với mục tiêu sản xuất đồng vị phóng xạ  $^{18}\text{F}$ . Đồng vị phóng xạ này sau đó được tổng hợp thành dược chất phóng xạ  $^{18}\text{F}$ FDG, dùng cho việc chuẩn đoán sớm bệnh ung thư. Máy gia tốc này là sản phẩm khoa học R&D được cung cấp từ Viện Khoa học Xạ trị và Dược chất phóng xạ Hàn Quốc (Korea Institute of Radiological and Medical Sciences - KIRAMS). Thiết bị cần được nâng cấp để có chức năng tương đương với một thiết bị PET Cyclotron thương mại. Với các máy PET Cyclotron, dòng của chùm tia được đo trên bia, trên 4 bản che chắn xung quanh bia và trên hệ thống dẫn chùm tia. Với máy HIC-KOTRON13, mới chỉ có thiết bị đo cường độ chùm hạt trên bia được lắp đặt. Các vị trí khác như trên các tấm chắn quanh bia, trên hệ dẫn chùm,... chưa được lắp đặt thiết bị đo dòng. Bài báo này trình bày việc thiết kế, chế tạo và chạy thử nghiệm thiết bị đo dòng proton trên máy HIC-KOTRON13. Thiết bị sử dụng đầu đo loại FARADAY bản phẳng, mạch biến đổi dòng thành điện áp, mạch khuếch đại, và ADC để ghi nhận số liệu đo. Thiết bị đo dòng chùm bia được lắp đặt tại các tấm chắn quanh bia với mục đích xác định vị chùm hạt trong quá trình vận hành máy HIC-KOTRON13.

**Từ khóa:** PET-Cyclotron, HIC-KOTRON13,  $^{18}\text{F}$ FDG, khối đo dòng, Faraday.

## ABSTRACT

The cyclotron HIC-KOTRON13 was installed and operated in Hanoi Irradiation Center in order to produce radio-isotope  $^{18}\text{F}$ . After that,  $^{18}\text{F}$  is synchronized to  $^{18}\text{F}$ FDG, which is used to diagnoses early cancer disease. This accelerator is the R/D product supported from Korea Institute of Radiological and Medical Sciences (KIRAMS). It need to upgrade with the functions as the commercial PET Cyclotron. With PET-Cyclotron, the beam current are measured at target, 4 collimators around target and at the beam transmission line. With HIC-KOTRON13, the only beam current gauge on target is installed. The other position such as collimators, beam line,... beam current gauge are not installed. This report presents the design, construction and testing operation of beam current proton gauge of HIC-KOTRON13. It operator based on the plane FARADAY detector. Electronic scheme operates based on the beam current to voltage converter (I-V converter). The data acquisition operates based on ADC converter and integrates beam current on fixed time. The beam current gauges are installed at collimators around target with the purpose to determine the beam position in the operation of HIC-KOTRON13.

**Từ khóa:** PET-Cyclotron, HIC-KOTRON13,  $^{18}\text{F}$ FDG, Beam current gauge, Faraday.

<sup>1</sup>Phòng Gia tốc và điện tử hạt nhân, Trung tâm chiếu xạ Hà Nội

\*Email: [tuanhbk112@gmail.com](mailto:tuanhbk112@gmail.com)

Ngày nhận bài: 15/4/2023

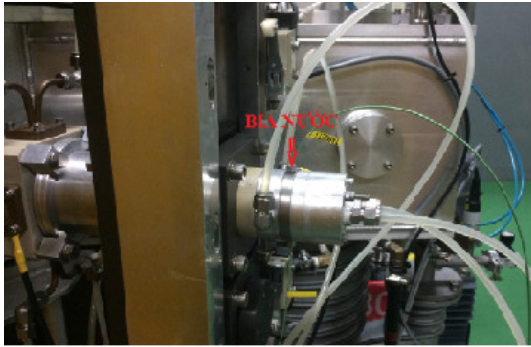
Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/7/2023

Ngày chấp nhận đăng: 25/8/2023

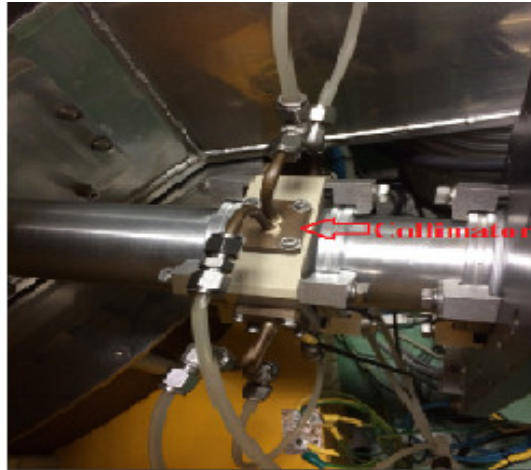
## 1. MỞ ĐẦU

Máy gia tốc HIC-KOTRON13 thuộc dự án ODA của Chính phủ Hàn Quốc viện trợ cho Việt Nam. Đây là sản phẩm R/D của Viện Khoa học xạ trị và dược chất phóng xạ Hàn Quốc (KIRAMS), do vậy thiết bị chưa đủ các chức năng như một máy gia tốc thương mại. Máy gia tốc này từng bước được hoàn thiện với công việc đầu tiên là chế tạo hệ đo dòng proton. Khối đo dòng trên bia nhằm xác định cường độ chùm hạt proton bắn vào bia, nơi sẽ xảy ra phản ứng hạt nhân tạo đồng vị phóng xạ  $^{18}\text{F}$ . Đo dòng trên 4 tấm che chắn quanh bia nhằm xác định vị trí lệch chùm hạt về các hướng so với tâm của bia. Do máy gia tốc HIC-KOTRON13 chưa có hệ đo dòng trên 4 tấm che chắn quanh bia nên rất khó điều chỉnh chùm hạt proton hội tụ vào tâm của bia. Việc thiết kế, chế tạo khối đo dòng proton nhằm hội tụ được chùm hạt vào tâm của bia trên cơ sở điều chỉnh vị trí của nguồn ion, vị trí của lá carbon, điều chỉnh giá trị của từ trường nam châm,... nhằm tăng hiệu suất tạo đồng vị phóng xạ  $^{18}\text{F}$  của mỗi mẻ sản xuất.

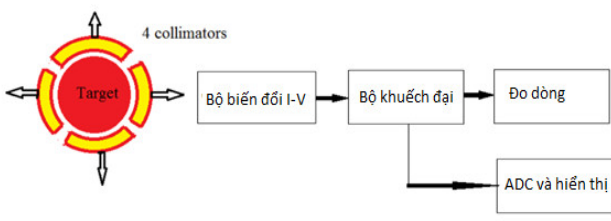
Có 7 phương pháp đo dòng hạt tích điện, trong đó chúng tôi sử dụng phương pháp đầu đo faraday để đo dòng của máy gia tốc HIC-KOTRON13 [1]. Thiết kế đầu đo Faraday cup ghi nhận hạt tích điện được mô tả trong tài liệu [2, 3]. Hệ đo dòng proton trên bia của máy gia tốc HIC-KOTRON13 hoạt động theo nguyên lý đầu đo Faraday bản phẳng [4, 5]. Bia được xem là đầu đo, và hệ đo sẽ xác định điện tích lưu trữ trên bia trong quá trình bắn bia.



Hình 1. Vị trí bia tại HIC-KOTRON13



Hình 2. Vị trí 4 collimators



Hình 3. Cấu hình vị trí bia và 4 bản che chắn xung quanh bia cùng sơ đồ khối hệ đo

Với cấu hình hệ đo dòng như hình 3, có thể xác định dòng proton bắn vào bia và dòng proton bắn vào các tấm che chắn xung quanh bia. Căn cứ vào giá trị dòng tại 4 bản che chắn ta có thể dự đoán độ lệch của chùm hạt: Lệch lên trên, xuống dưới, sang phải, sang trái để có cơ sở điều chỉnh vị trí nguồn ion tại tâm máy gia tốc và vị trí lá carbon cho phù hợp.

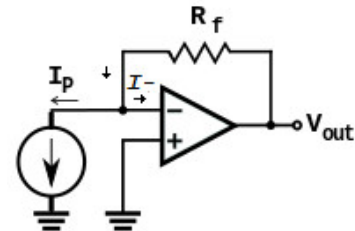
Sơ đồ chức năng của hệ điện tử đo dòng hạt tích điện được giới thiệu trong các tài liệu về điện tử [7-9]. Sơ đồ khối của hệ điện tử đo dòng proton máy HIC-KOTRON13 bao gồm các phần sau:

- Đầu đo: Bia và các tấm che chắn collimatos được xem như là đầu đo loại Faraday bản phẳng.
- Bộ biến đổi I-V: Biến đổi từ dòng điện tích sang điện áp.
- Bộ khuếch đại điện áp: Biến đổi đến dải điện áp phù hợp với đầu vào bộ biến đổi ADC.
- Bộ biến đổi ADC, ghi nhận và chỉ thị giá trị dòng chùm tia.

## 2. THIẾT KẾ, LẮP RÁP, CHẠY THỬ NGHIỆM BỘ BIẾN ĐỔI I-V

### 2.1. Nguyên lý hoạt động mạch biến đổi I-V

Mạch biến đổi I-V là mạch biến đổi dòng điện thành điện áp tương ứng với giá trị của dòng điện lối vào. Trong trường hợp với máy gia tốc HIC-KOTRON13, dòng sẽ là dòng điện tích ghi nhận trên bia, được biến đổi thành điện áp với dải biên độ thích hợp. Sơ đồ khối của mạch [4] được mô tả trên hình 4.



Hình 4. Sơ đồ khối của mạch biến đổi dòng thành điện áp

Với  $I_p$  là dòng vào đầu đo,  $R_f$  là điện trở biến đổi,  $V_{out}$  là giá trị điện áp ra,  $I$  là dòng điện vào lối vào đảo của bộ khuếch đại. Mạch khuếch đại thiết kế theo kiểu phản hồi âm.

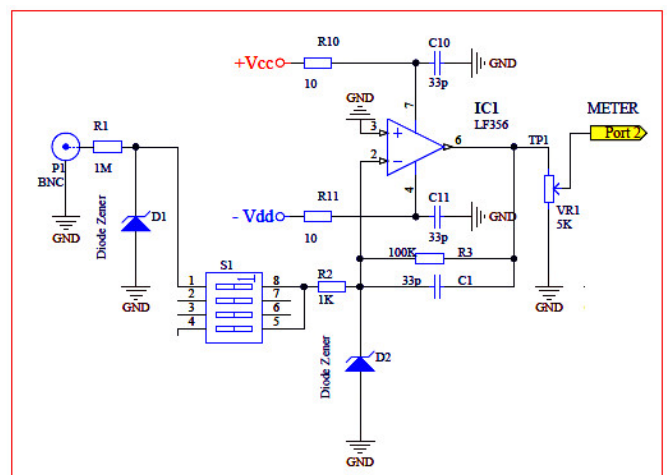
Công thức tính toán với mạch điện trên hình 4 như sau:

$$\frac{V_{out} - V_-}{R_f} = I_p - I_-$$

Mạch khuếch đại phản hồi âm, lối vào không đảo nối đất do đó:  $V_- = V_+ = 0$

Kết luận: Với sơ đồ khối mạch biến đổi I-V như trên, điện áp lối ra  $V_{out}$  tỷ lệ tuyến tính với dòng  $I_p$  từ đầu đo với hệ số biến đổi  $R_f$ . Căn cứ vào dải điện áp ra cần thiết mà chọn giá trị của điện trở  $R_f$  cho phù hợp.

### 2.2. Thiết kế, lắp ráp mạch biến đổi I-V



Hình 5. Sơ đồ mạch thử nghiệm biến đổi I-V

Giải thích

- Dòng vào tại giắc nối BNC P1 đi qua điện trở vào R1 tạo ra dòng vào cho mạch biến đổi I-V.
- Diode Zener D1 nối với một đầu điện trở R1 để bảo vệ IC1 khỏi điện áp cao tích tụ trên giắc cắm P1.

- IC1 là khuếch đại thuật toán lắp theo kiểu khuếch đại đảo với nguồn nuôi ±12V.

- R3 là điện trở xác định hệ số biến đổi có chức năng như điện trở  $R_f$  trong phần sơ đồ khối của mạch biến đổi I-V.

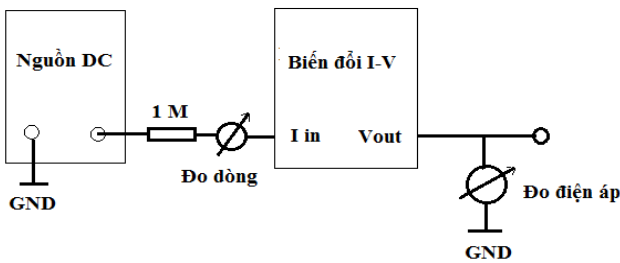
- Các điện trở R10, R11 và các tụ C10, C11 có chức năng lọc nhiễu cho nguồn nuôi của IC11.

- Diode Zener D2 là mắt xích bảo vệ thứ 2 cho IC1.

Các hạt proton có điện tích +1e được gia tốc lên 13MeV khi đi tới bia sẽ có 1 một phần điện tích lưu trữ tại đầu đo faraday bản phẳng. Vì vậy sau 1 khoảng thời gian tích điện có thể gây ra hiện tượng phóng điện. Diode Zener D1 và D2 lắp nhằm mục đích không cho điện áp tại đầu đo tích quá cao gây ra hiện tượng phóng điện làm hỏng mạch điện.

**2.3. Chạy thử nghiệm mạch biến đổi I-V**

Sơ đồ khối của thí nghiệm được lắp đặt như hình 6.



Hình 6. Sơ đồ khối mạch thử nghiệm biến đổi I-V

Trong đó:

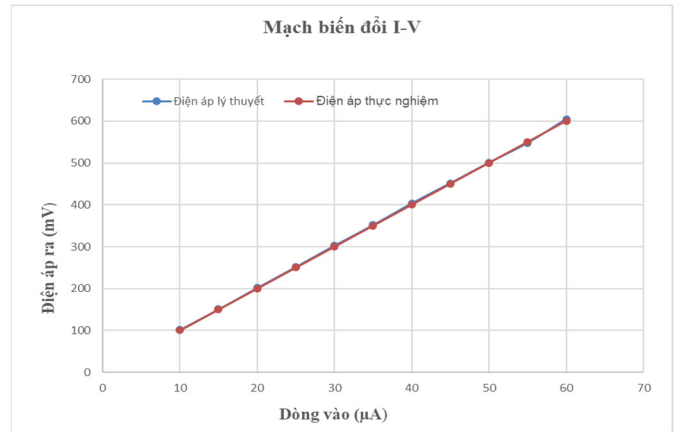
+ Dòng vào  $I_{in}$  của khối biến đổi I-V được tạo ra từ điện áp ra của nguồn nuôi một chiều DC nối tiếp với điện trở R1 có giá trị 1MΩ và nối tiếp với một đồng hồ đo dòng chỉ thị số.

+ Đầu ra  $V_{out}$  của bộ biến đổi I-V được nối với một đồng hồ đo điện áp chỉ thị số.

Các kết quả thử nghiệm với IC LF356 được trình bày trong bảng 1 và hình 7.

Bảng 1. Mối liên quan giữa dòng vào  $I_{in}$  và điện áp ra  $V_{out}$  của khối biến đổi I-V

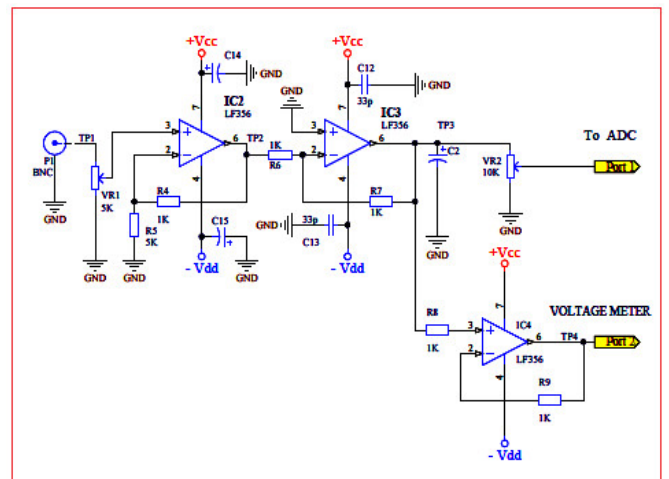
| $V_{in}$ (V) | R1 (Ω)  | $I_{in}$ (μA) | R3 (Ω) | $V_{out}$ (- mV) Thực nghiệm | $V_{out}$ (-mV) Lý thuyết | Sai số (%) |
|--------------|---------|---------------|--------|------------------------------|---------------------------|------------|
| 1,0          | 1000000 | 10            | 100000 | 102                          | 100                       | 2,00       |
| 1,5          | 1000000 | 15            | 100000 | 151                          | 150                       | 0,67       |
| 2,0          | 1000000 | 20            | 100000 | 202                          | 200                       | 1,00       |
| 2,5          | 1000000 | 25            | 100000 | 252                          | 250                       | 0,80       |
| 3,0          | 1000000 | 30            | 100000 | 303                          | 300                       | 1,00       |
| 3,5          | 1000000 | 35            | 100000 | 352                          | 350                       | 0,57       |
| 4,0          | 1000000 | 40            | 100000 | 404                          | 400                       | 1,00       |
| 4,5          | 1000000 | 45            | 100000 | 452                          | 450                       | 0,44       |
| 5,0          | 1000000 | 50            | 100000 | 501                          | 500                       | 0,20       |
| 5,5          | 1000000 | 55            | 100000 | 548                          | 550                       | 0,36       |
| 6,0          | 1000000 | 60            | 100000 | 605                          | 600                       | 0,83       |



Hình 7. Mối liên quan giữa dòng vào và điện áp ra của mạch thử nghiệm I-V

Nhận xét: Giá trị dòng điện đầu vào và điện áp lối ra là tuyến tính. Sai số giữa số đo thực nghiệm và lý thuyết là nhỏ. Kết quả cho thấy, mạch biến đổi I-V trên là dùng được, sai số phép đo không đáng kể cho hệ đo.

**2.4. Thiết kế, chạy thử nghiệm mạch khuếch đại cho khối đo dòng**



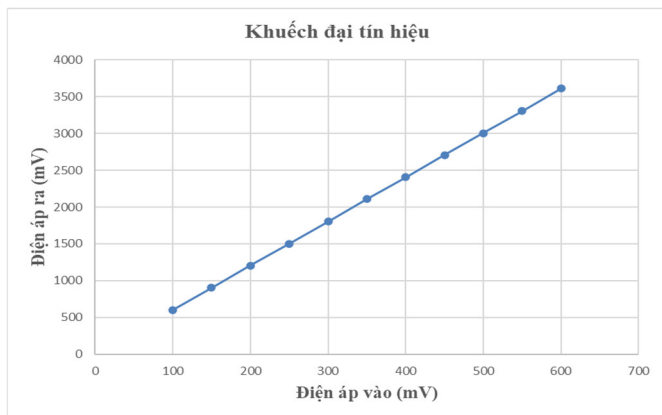
Hình 8. Sơ đồ thử nghiệm mạch khuếch đại điện áp

Với IC2 là mạch khuếch đại không đảo, với lối vào là điện áp âm thì lối ra có điện áp âm. IC3 là mạch khuếch đại đảo, với lối vào có điện áp âm thì lối ra có điện áp dương. Lối ra IC3 được tách ra làm 2 đường, một đường vào bộ biến đổi ADC và một đường vào mạch đệm thông qua IC4, để sử dụng cho các mục đích khác. Mạch khuếch đại này được lắp ráp trên bản thử và chạy thử nghiệm với điện áp đầu vào thay đổi. Dải thay đổi đầu vào gắn sát với dải đầu ra từ bộ biến đổi I-V. Sơ đồ thí nghiệm bao gồm: đầu vào là nguồn điện 1 chiều chỉ thị số, đầu ra là đồng hồ đo điện áp chỉ thị số. Bảng 2 là kết quả của phép thử.

Bảng 2. Mối liên quan giữa điện áp đầu vào và ra của bộ khuếch đại

| Điện áp đầu vào (Millivolt) | Giá trị đo điện áp đầu ra (Millivolt) | Hệ số khuếch đại |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------------|
| 100                         | 602                                   | 6,02             |
| 150                         | 905                                   | 6,03             |

|     |      |      |
|-----|------|------|
| 200 | 1205 | 6,03 |
| 250 | 1501 | 6,00 |
| 300 | 1805 | 6,02 |
| 350 | 2110 | 6,03 |
| 400 | 2405 | 6,01 |
| 450 | 2705 | 6,01 |
| 500 | 3002 | 6,00 |
| 550 | 3306 | 6,01 |
| 600 | 3610 | 6,02 |



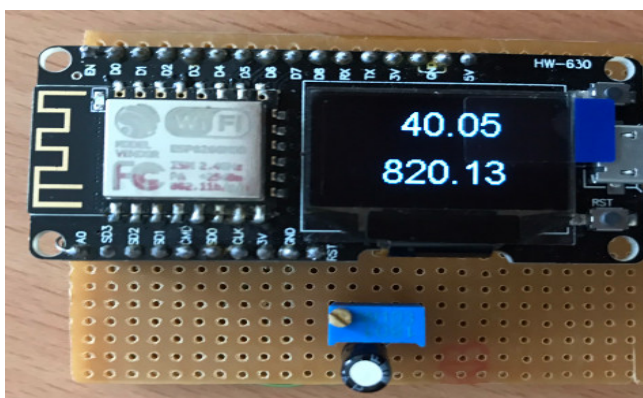
Hình 9. Mối quan hệ điện áp đầu vào và ra của bộ khuếch đại

Hệ số khuếch đại được tính là tỷ số giữa điện áp đầu ra và điện áp đầu vào của bộ khuếch đại. Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ số này có giá trị khoảng 6,02. Lỗi ra của bộ khuếch đại còn có một biến trở VR2-10K có chức năng điều chỉnh để dải điện áp lỗi ra khuếch đại phù hợp với bộ biến đổi ADC.

**2.5. Lắp đặt chạy thử nghiệm khối biến đổi ADC**

Sơ đồ khối thử nghiệm bao gồm:

- Khối nguồn nuôi một chiều tạo điện áp vào  $V_{in}$ . Dải điện áp  $V_{in}$  từ 0 - 8V được nối tiếp với một biến trở để tạo dải điện áp phù hợp với đầu vào ADC của Arduino.
- Đồng hồ đo giá trị điện áp  $V_{in}$ .
- Khối biến đổi ADC (Sử dụng một đầu vào biến đổi ADC của bản mạch điện tử Arduino).
- Màn chỉ thị số tinh thể lỏng ghép nối với bản mạch Arduino.

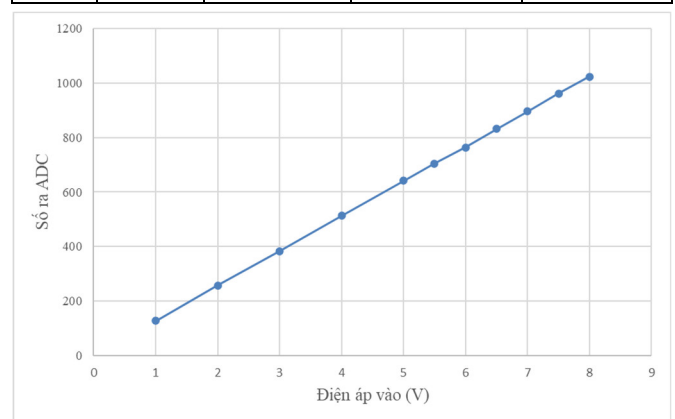


Hình 10. Thí nghiệm bộ biến đổi ADC và chỉ thị trên bản mạch thử

Bảng 3 là các kết quả của phép thử nghiệm.

Bảng 3. Kết quả của phép biến đổi ADC

| STT | Điện áp $V_{in}$ (V) | Lỗi ra số ADC (Vị trí kênh) | Giá trị số ra ADC lý tưởng | Sai số so với giá trị lý tưởng |
|-----|----------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 1   | 1,0                  | 127                         | 128                        | -1                             |
| 2   | 2,0                  | 257                         | 256                        | +1                             |
| 3   | 3,0                  | 383                         | 384                        | 1                              |
| 4   | 4,0                  | 513                         | 512                        | +1                             |
| 5   | 5,0                  | 642                         | 640                        | +2                             |
| 6   | 5,5                  | 705                         | 704                        | +1                             |
| 7   | 6,0                  | 764                         | 765                        | -1                             |
| 8   | 6,5                  | 832                         | 832                        | 0                              |
| 9   | 7,0                  | 896                         | 896                        | 0                              |
| 10  | 7,5                  | 961                         | 960                        | +1                             |
| 11  | 8,0                  | 1023                        | 1024                       | -1                             |



Hình 11. Đồ thị sự phụ thuộc điện áp vào và số chỉ thị ra của ADC

Nhận xét: Sai số kênh ra cao nhất là 2 so với giá trị lý tưởng của ADC. Độ phi tuyến tích phân cao nhất là tỷ số số lệch của kênh trên tổng số kênh:  $2/1024 \sim 0,2\%$  (đây là chỉ tính riêng cho ADC).

**2.6. Xác định hệ số chuyển đổi ngoại suy dòng điện tích**

Các thử nghiệm về phép biến đổi I-V, khuếch đại, ADC cho thấy kết quả các phép biến đổi trên đều tuân theo hàm tuyến tính bậc nhất  $Y = a.X + b$ . Hệ số b có thể hiệu chỉnh về không bằng cách điều chỉnh mức Offset của mạch khuếch đại hoặc xác định bằng phần mềm khi xử lý số liệu. Thực nghiệm sau sẽ kết nối số liệu thực nghiệm từ việc thay đổi dòng phát, giữ nguyên các thông số kỹ thuật của mạch khuếch đại, ADC,... để tạo bộ số liệu xây dựng hệ số chuyển đổi ngoại suy giá trị dòng điện tích ghi nhận được từ hệ đo dòng.

Bảng 4. Xác định hệ số chuyển đổi từ số ra ADC thành dòng điện tích

| Dòng phát ( $\mu A$ ) | Điện áp ra khuếch đại (V) | Số ra ADC (Kênh ra) | Hệ số chuyển đổi |
|-----------------------|---------------------------|---------------------|------------------|
| 10                    | 1,6                       | 206                 | 20,60            |
| 15                    | 2,4                       | 306                 | 20,40            |

|    |     |      |       |
|----|-----|------|-------|
| 20 | 3,2 | 412  | 20,60 |
| 25 | 4,0 | 513  | 20,52 |
| 30 | 4,8 | 616  | 20,53 |
| 35 | 5,6 | 718  | 20,51 |
| 40 | 6,4 | 820  | 20,50 |
| 45 | 7,2 | 925  | 20,56 |
| 50 | 8,0 | 1022 | 20,44 |

Dòng phát: là dòng vào của bộ biến đổi I-V

Điện áp ra khuếch đại: là điện áp ra của khuếch đại đi vào bộ biến đổi ADC

Số ra ADC: là vị trí kênh ra của ADC, số này được chỉ thị trên khối chỉ thị LED.

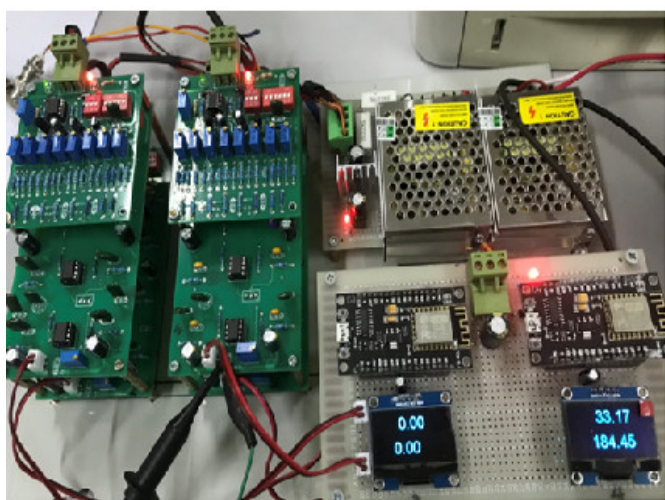
Hệ số chuyển đổi chỉ thị: Là thương số giữa số ra ADC và giá trị dòng phát. Giá trị trung bình cho hệ số chuyển đổi khoảng 20,5.

Ví dụ, khi lối ra ADC là 500 thì dòng điện tích chỉ thị là:  $500 : 20,5 = 24,4$

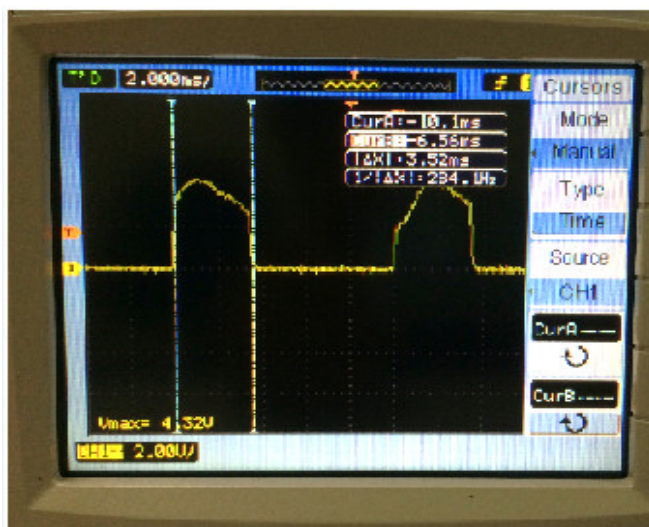
### 3. CHẠY THỬ NGHIỆM THIẾT BỊ ĐO DÒNG MỚI CHẾ TẠO TRÊN MÁY GIA TỐC HIC-KOTRON13

Sau khi bản mạch đo dòng được lắp đặt, điều chỉnh các thông số kỹ thuật, thiết bị đo dòng này được chạy thử nghiệm trực tiếp trên máy gia tốc HIC-KOTRON13. Hai chế độ thử nghiệm được tiến hành bao gồm chạy thử nghiệm hệ đo dòng có sẵn trên máy HIC-KOTRON13 do Hàn Quốc chế tạo và chạy trên thử nghiệm hệ mới được chế tạo tại Trung tâm Chiếu xạ Hà Nội. Các điều kiện biên cài đặt cho máy là tương tự như nhau với:

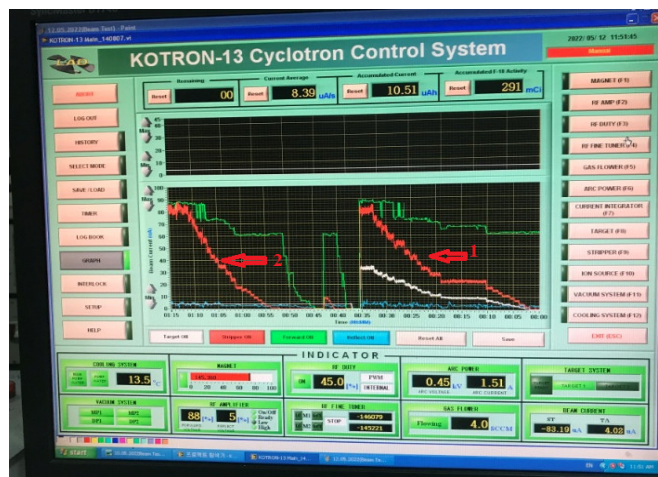
- Nhiệt độ phòng: 23°C; nhiệt độ phòng Cyclotron đặt 20°C
- Chân không khi khởi phát máy:  $1,2 \times 10^{-7}$ mbar
- Dòng nam châm từ trường: 145,360A
- Vị trí Fine tuner M<sub>1</sub>: 144587
- Nhiệt độ nước làm mát đặt tại 13°C
- Điện ba pha đầu vào khoảng 385V - xoay chiều



a)



Hình 12. Hình ảnh thử nghiệm khối đo dòng trên máy gia tốc (a) và xung ra từ bia tại lối ra khuếch đại mới chế tạo (b)



Hình 13. So sánh dạng phổ khí ghi nhận dòng trên bia từ khối đo dòng do Hàn Quốc chế tạo và khối đo dòng mới chế tạo

Bảng 5. Kết quả đo dòng trên thiết bị được chế tạo và trên thiết bị có sẵn trên máy gia tốc KOTRON13

| Công suất (%) | Lưu lượng khí H <sub>2</sub> (sccm) | Dòng trên nguồn ion(A) | Dòng trên bia đo trên máy gia tốc (µA) | Dòng trên bia đo trên thiết bị đo dòng chế tạo (µA) | Sai số (%) |
|---------------|-------------------------------------|------------------------|--|---|------------|
| 15            | 3                                   | 0,3                    | 1,7                                    | 1,65  | 2,94       |
| 15            | 3                                   | 0,4                    | 2,7                                    | 2,64  | 2,22       |
| 15            | 3                                   | 0,5                    | 3,3                                    | 3,37  | 2,12       |
| 15            | 3                                   | 0,6                    | 4,3                                    | 4,27  | 0,70       |
| 15            | 3                                   | 0,7                    | 5,2                                    | 5,2   | 0,00       |
| 15            | 3                                   | 0,8                    | 6,2                                    | 6,07  | 2,10       |
| 15            | 3                                   | 0,9                    | 7,1                                    | 6,93  | 2,39       |
| 20            | 3                                   | 0,9                    | 9,3                                    | 9,3   | 0,00       |
| 25            | 3                                   | 0,9                    | 11,7                                   | 11,5  | 1,71       |
| 30            | 3                                   | 0,9                    | 13,6                                   | 13,68   | 0,59       |

|    |   |     |      |      |      |
|----|---|-----|------|------|------|
| 30 | 3 | 1   | 15,6 | 15,5 | 0,64 |
| 30 | 3 | 1,1 | 17   | 16,8 | 1,18 |
| 30 | 4 | 1,2 | 20   | 19,3 | 3,50 |
| 35 | 4 | 1,2 | 22,6 | 22,3 | 1,33 |
| 40 | 4 | 1,2 | 24,6 | 24,2 | 1,63 |
| 40 | 4 | 1,3 | 27,3 | 26,1 | 4,40 |
| 40 | 4 | 1,4 | 29   | 28,3 | 2,41 |
| 40 | 4 | 1,5 | 30,3 | 31,2 | 2,97 |
| 45 | 4 | 1,5 | 34   | 33   | 2,94 |

**Nhận xét:**

Phần phổ số 1 là kết quả chạy trên khối đo dòng do Hàn Quốc chế tạo. Phần phổ số 2 là ghi nhận kết quả chạy trên khối đo dòng mới chế tạo. Đường phổ màu đỏ là dòng ghi nhận trên Stripper. Có thể thấy là dạng phổ của dòng trên Stripper, của sóng tới và sóng phản xạ RF và các thông số khác của máy gia tốc là gần như nhau khi thử nghiệm đo dòng trên bia từ hai khối đo dòng này.

Với các điều kiện biên và thông số cài đặt như nhau, dòng ghi nhận trên khối mới chế tạo và trên khối do Hàn Quốc chế tạo có sai số lớn nhất khoảng 3,5%. Do vậy có thể thay thế, triển khai các vị trí đo dòng mới trên máy HIC-KOTRON13 giống như các máy gia tốc thương mại khác đang lưu hành trên thị trường.

**4. KẾT LUẬN**

Bài báo đã trình bày việc thiết kế, chế tạo, chạy thử nghiệm thiết bị đo dòng hạt proton trên bia của máy gia tốc HIC-KOTRON13 trên cơ sở đầu đo Faraday. Sau khi thiết kế sơ đồ mạch điện tổng thể, từng phần của mạch điện được thử nghiệm và đánh giá các thông số kỹ thuật với dải đo dòng lối vào từ 0 - 50 $\mu$ A. Mạch khuếch đại có hệ số khuếch đại ổn định khoảng 6,02. Bộ biến đổi ADC có độ tuyến tính cao, độ phi tuyến tích phân nhỏ hơn 0,3%. Thiết bị đo dòng mới chế tạo đã được lắp đặt, chạy thử nghiệm trực tiếp trên máy gia tốc HIC-KOTRON13 và cho kết quả tương đương với khối đo dòng proton do Hàn Quốc chế tạo. Kết quả này mở ra một triển vọng sẽ chế tạo, lắp đặt các khối đo dòng mới tại các vị trí thích hợp nhằm theo dõi cường độ chùm hạt, giống như trên các máy PET-cyclotron thế hệ mới.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

- [1]. H. Koziol, 2001. *Beam diagnostics for accelerator*. CERN, Geneva, Switzerland.
- [2]. Kent Hartley, JR Dennison, 2013. *Faraday Cup Designs for High Efficiency Determination of Energy and Angular-Resolved Charged Particle Fluxes*. Utah Undergraduate Research on Capitol Hill Salt Lake City, UT.
- [3]. Hugonnaud Valentin, Mazouffre Stéphane, 2021. *Optimization of a Faraday Cup Collimator for Electric Propulsion Device Beam Study: Case of a Hall Thruster*. Applied Sciences 11(5):2419
- [4]. Manual of KOTRON13.
- [5]. Chai J.S., Kim Y.S., Hu J.Y., 2001. *Development of baby cyclotron for PET in Korea*. International symposium on utilization of accelerators Proceedings.
- [6]. Manual of IBA30.
- [7]. Herbert Rutgers, 2013. The I/V-converter. <https://www.by-rutgers.nl/IV-converter.html>
- [8]. Paul Horowitz, Winfield Hill, 1989. *The Art of Electronics (Second ed.)*. Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-37095-0
- [9]. Texas Instruments, 2015. *Principles of Data Acquisition and Conversion*. Application Report

**AUTHORS INFORMATION**

**Nguyen Tuan Anh, Nguyen Tien Dzung, Pham Minh Duc,  
Nguyen Xuan Truong**

Cyclotron Department, Hanoi Irradiation Center, Vietnam