

NGHIÊN CỨU PHỐI HỢP TRỞ KHÁNG VÀ HỆ SỐ PHẢN XẠ TRONG HỆ CỘNG HƯỞNG RF CỦA MÁY GIA TỐC CYCLOTRON HIC-KOTRON13

THE STUDY OF IMPEDANCE AND REFLECTION OF RF RESONANCE CAVITY OF CYCLOTRON HIC-KOTRON13

Nguyễn Tuấn Anh*,
Nguyễn Tiến Dũng, Phạm Minh Đức

TÓM TẮT

Máy gia tốc HIC-KOTRON13 gia tốc hạt proton tới năng lượng 13MeV. Hoạt động của buồng gia tốc dựa trên hiệu ứng cộng hưởng RF có tần số cố định 77,3MHz. Sóng RF lấy từ tầng cuối khối khuếch đại RF đưa vào buồng cộng hưởng có công suất khoảng 20kW. Trở kháng ra của khối khuếch đại RF là 50Ω. Để hiệu ứng cộng hưởng RF xảy ra trong buồng gia tốc, trở kháng buồng này phải điều chỉnh gần giá trị 50Ω và hệ số phản xạ từ buồng cộng hưởng tới khối công suất RF điều chỉnh nhỏ hơn 3%. Bài báo này trình bày các thực nghiệm xác định trở kháng và hệ số phản xạ của buồng gia tốc cộng hưởng trên cơ sở thiết bị Network Analyzer N9912A. Các số liệu thực nghiệm này phục vụ trực tiếp cho quá trình lắp đặt các bộ phận như nguồn ion, hệ coupler, hệ làm mát,... của máy gia tốc.

Từ khóa: HIC-KOTRON13, RF, ¹⁸FDG, PET/CT.

ABSTRACT

The cyclotron HIC-KOTRON13 accelerates proton up to energy 13MeV. The operation of accelerated cavity, which is based on RF resonance effect, has a fixed frequency 77.3MHz. The RF wave from RF power module go to RF resonance cavity with power 20kW. The output impedance of RF power module is fixed 50Ω. In order to get RF resonance in cavity, a impedance of resonance cavity has to adjust near 50Ω and the reflection coefficient from the cavity to RF power module has to adjust less than 3%. This report presents the experiments to determine the impedance and reflection coefficient of RF resonance cavity of HIC-KOTRON13, which are based on Network Analyzer N9912A equipment. These parameters will be used in process of installation of ion source, coupler, cooling water,... for this cyclotron.

Keywords: HIC-KOTRON13, RF, ¹⁸FDG, PET/CT.

Trung tâm Chiếu xạ Hà Nội

*Email: tuananhbk112@gmail.com

Ngày nhận bài: 02/12/2019

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 12/01/2020

Ngày chấp nhận đăng: 20/02/2020

1. MỞ ĐẦU

Máy gia tốc HIC-KOTRON13 được lắp đặt tại Trung tâm chiếu xạ Hà Nội thuộc dự án hợp tác khoa học giữa chính phủ Hàn Quốc và Việt Nam. Máy bao gồm rất nhiều các bộ phận được ghép nối với nhau từ nguồn ion, khối đệm giữa

nguồn ion và bộ phận gia tốc, buồng cộng hưởng gia tốc, khối tách chùm tia ra khỏi máy gia tốc và hướng chùm hạt tới bia. Ngoài mục đích chuyển giao về công nghệ gia tốc cyclotron cho Việt Nam, hệ thống máy HIC-KOTRON13 còn sản xuất trực tiếp ra sản phẩm dược chất phóng xạ ¹⁸FDG dùng trong chẩn đoán ung thư sớm trên thiết bị quét PET/CT. Trong chế độ hoạt động thường ngày, dòng proton trên bia đạt 35μA. Sau hai giờ bắn bia, hoạt độ phóng xạ ¹⁸F tại bia đạt trên 1,2 Ci đủ để tổng hợp thành dược chất phóng xạ ¹⁸FDG dùng cho 2 máy quét PET/CT.

Lắp đặt các bộ phận trong buồng cộng hưởng sau khi bảo dưỡng, sửa chữa thiết bị thường chỉ được thực hiện bởi các cán bộ kỹ thuật của hãng sản xuất. Khi lắp đặt các bộ phận trong buồng gia tốc, hai thông số phải được xác định bằng thực nghiệm là trở kháng buồng khoảng 50Ω và hệ số sóng phản xạ RF từ buồng cộng hưởng tới khối công suất RF nhỏ hơn 3%.

2. CÁC NỘI DUNG CHÍNH ĐÃ NGHIÊN CỨU

2.1. Xác định trở kháng R buồng cộng hưởng phụ thuộc khoảng cách hai bản tụ vi chỉnh và nhiệt độ nước làm mát

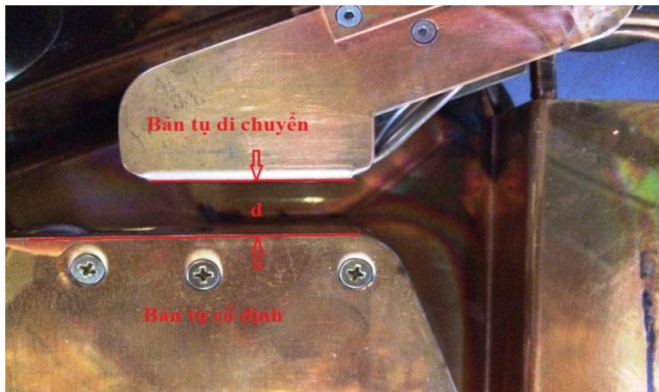
2.1.1. Trở kháng buồng cộng hưởng phụ thuộc khoảng cách hai bản tụ vi chỉnh

Trở kháng buồng cộng hưởng được xác định qua công thức: $Z = V/I$ với V là biên độ sóng RF và I là cường độ dòng điện [1]. Trong buồng cộng hưởng với sóng xoay chiều, Z được xác định qua phần trở kháng thực và phần trở kháng ảo theo công thức: $Z = R + j\omega L + 1/j\omega C$. Với R là giá trị điện trở thực, ω là tần số dao động, L là giá trị điện cảm, C là giá trị điện dung.

Thông thường, trở kháng từ lối ra của khối công suất RF, ống dẫn sóng từ khối công suất RF đến buồng cộng hưởng và buồng cộng hưởng gia tốc được thiết kế với giá trị 50Ω.

Cấu hình của tụ vi chỉnh gồm 2 bản tụ. Một bản là mép trong của điện cực Dee cố định và một bản tụ là một bản phẳng bằng đồng có thể dịch chuyển (hình 1). Để tăng giá trị điện dung tụ vi chỉnh, HIC-KOTRON13 đã thiết kế 2 tụ vi chỉnh ở hai phía đối diện nhau trong buồng cộng hưởng. Bản tụ được di chuyển thông qua một mô tơ bước điều

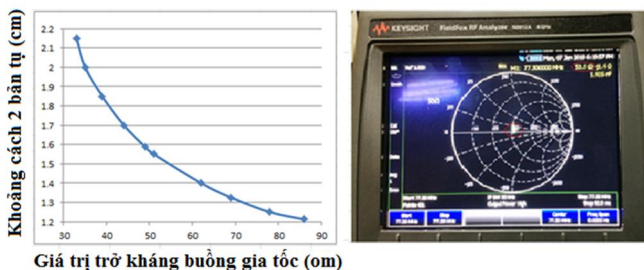
kiến bằng số từ khối điều khiển. Thí nghiệm được tiến hành nhằm xác định được vị trí giữa trong dải dịch chuyển của bản tụ (Khoảng cách d giữa hai bản tụ) đảm bảo trở kháng của buồng cộng hưởng là 50Ω .



Hình 1. Hình ảnh của tụ vi chỉnh điện dung buồng cộng hưởng

Thiết bị đo N9912A được cài đặt trong chế độ đo NA với màn hình chỉ thị cài đặt trong chế độ SMITH CHART [2]. Giá trị trở kháng được đo và hiển thị trên màn hình của N9912A với tần số phát cố định $77,3\text{MHz}$.

Kết quả của thí nghiệm: Từ đường cong mô tả quan hệ giữa khoảng cách hai bản tụ vi chỉnh và giá trị trở kháng buồng cộng hưởng (hình 2), có thể ngoại suy khoảng cách tương ứng với giá trị trở kháng 50Ω khoảng $1,57\text{cm}$.



Hình 2. Trở kháng buồng cộng hưởng gia tốc phụ thuộc khoảng cách d bằng thiết bị N9912A

2.1.2. Trở kháng R buồng cộng hưởng phụ thuộc nhiệt độ nước làm mát

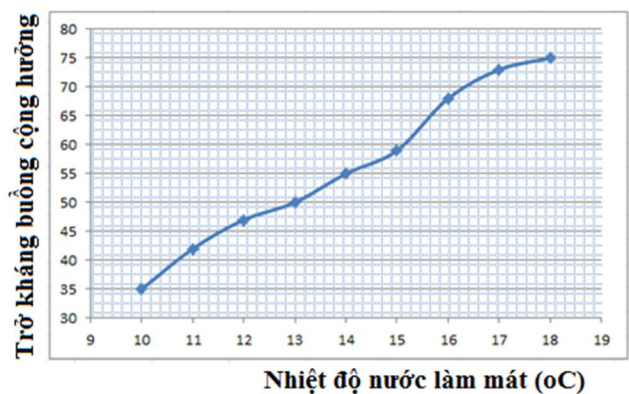
Một yếu tố ảnh hưởng nhiều đến sự thay đổi của trở kháng R buồng gia tốc là sự thay đổi của nhiệt độ nước làm mát. Các bộ phận phải làm mát cho buồng này bao gồm các điện cực Dee, bộ phận truyền sóng RF coupler, bản tụ vi chỉnh,... Thực tế cho thấy khi trở kháng buồng cộng hưởng thay đổi, sóng phản xạ từ buồng cộng hưởng tới khối công suất phát RF cũng thay đổi. Để cân bằng lại giá trị 50Ω trở kháng buồng cộng hưởng phải thay đổi liên tục giá trị tụ điện vi chỉnh. Điều này dẫn đến kết quả là rất khó vận hành máy gia tốc. Một số trường hợp khi sóng phản xạ quá lớn đã gây ra cháy nổ điện trở và đốt bảo vệ khối công suất RF.

Nhằm từng bước hiểu sâu hơn về các yếu tố làm thay đổi trở kháng buồng cộng hưởng, thực nghiệm đã được tiến hành bằng cách thay đổi nhiệt độ nước làm mát đầu vào chung cho các bộ phận của buồng cộng hưởng và đo giá trị trở buồng cộng hưởng trên thiết bị N9912A. Thiết bị

gia tốc HIC-KOTRON13 được cài đặt ở điều kiện biên gần với giá trị hoạt động thực của máy: Chân không khoảng $2,0 \times 10^{-7}\text{mbar}$; Khoảng cách hai bản tụ vi chỉnh tại vị trí khi nhiệt làm mát đặt 13°C , trở kháng buồng gia tốc khoảng 50Ω ,...

Bảng 1. Giá trị trở kháng buồng cộng hưởng gia tốc RF phụ thuộc nhiệt độ nước làm mát

Nhiệt độ đặt ($^\circ\text{C}$)	Trở kháng (Ω)	Nhiệt độ đặt ($^\circ\text{C}$)	Trở kháng (Ω)
10	35	15	59
11	42	16	68
12	47	17	73
13	50	18	75
14	55		

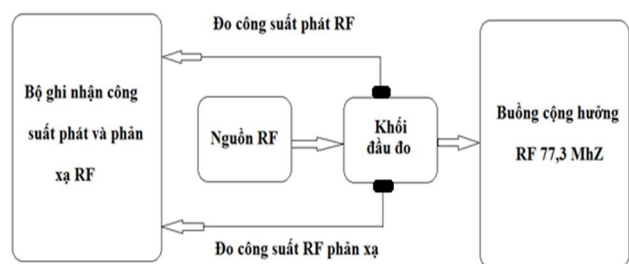


Hình 3. Sự thay đổi trở kháng phụ thuộc nhiệt độ nước làm mát buồng cộng hưởng

Nhận xét: Khi tăng dần nhiệt độ nước làm mát, trở kháng của buồng cộng hưởng cũng tăng theo dẫn đến hiệu ứng làm thay đổi hệ số phản xạ từ buồng cộng hưởng gia tốc tới khối phát công suất RF. Thực tế nhiệt độ làm mát được cài đặt từ khối làm mát nước Chiller với nhiệt độ thay đổi nhỏ từ 13°C đến 14°C và máy gia tốc hoạt động tương đối ổn định trong chế độ sản xuất thông thường.

2.2. Xác định hệ số sóng phản xạ từ buồng cộng hưởng RF sử dụng thiết bị Network Analyzer N9912A

2.2.1. Sơ đồ khối hệ đo hệ số phản xạ RF từ buồng cộng hưởng gia tốc



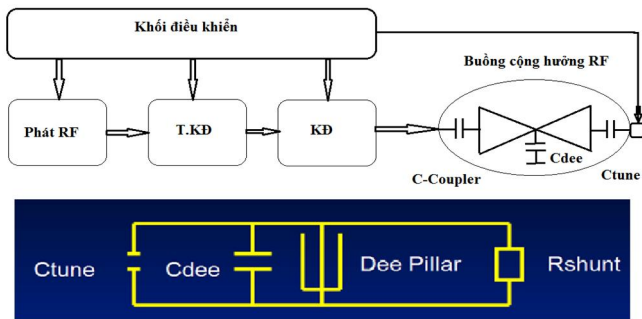
Hình 4. Sơ đồ khối hoạt động thiết bị N9912A chế độ NA (Network Analyzer) Trong đó:

Nguồn RF: Phát các dao động điện $77,3\text{MHz}$ cùng tần số với tần số cộng hưởng buồng gia tốc.

Khối đầu đo: gồm 2 đầu đo chính. Một đầu đo công suất phát sóng RF từ nguồn phát đến buồng cộng hưởng và một đầu đo công suất sóng phản xạ từ buồng cộng hưởng trở lại thiết bị N9912A.

Bộ phận ghi nhận công suất phát sóng và sóng phản xạ: Ghi nhận và chỉ thị dưới dạng số tỷ số công suất giữa sóng phản xạ và sóng phát.

2.2.2. Sơ đồ khối điện tử của buồng gia tốc cộng hưởng RF



Hình 5. Sơ đồ khối hệ điện tử của buồng cộng hưởng gia tốc RF Trong đó:

Cdec: Giá trị điện dung của buồng cộng hưởng phụ thuộc vào cấu hình hình học của các bộ phận bên trong buồng.

Dee Pillar: Giá trị điện cảm của buồng cộng hưởng.

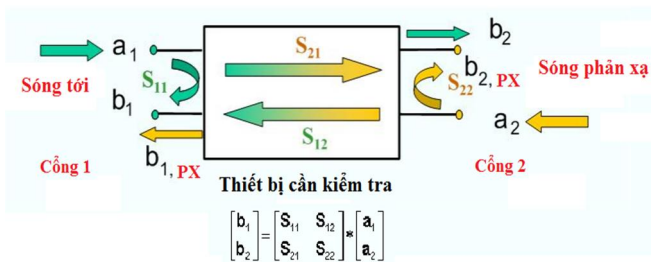
Rshunt: Điện trở thuần của buồng cộng hưởng

Ctune: Giá trị điện dung của tụ vi chỉnh có thể thay đổi làm tần số cộng hưởng buồng gia tốc trùng với tần số phát RF.

Với thiết bị HIC-KOTRON13, nguồn phát RF có tần số cố định 77,3MHz, tiền khuếch đại nâng công suất đầu ra tới 1,5kW và lối ra khuếch đại công suất nâng công suất phát RF tới 20kW [5]. Điều chỉnh công suất phát được thực hiện qua thông số Duty Cycle từ 1% đến 100%. Duty Cycle là giá trị tỷ số phần trăm giữa thời gian phát xung RF vào khối công suất trong 1 chu kỳ phát. Trong chế độ hoạt động bình thường, giá trị Duty Cycle đặt khoảng 60%.

2.2.3. Khái niệm về S-Parameter và xác định hệ số S11 của một cổng điện tử

S-Parameter là các thông số cơ bản của một cổng điện tử [4]. Trong trường hợp 2 cổng như hình 6, S-Parameter bao gồm 4 giá trị $S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$. Các giá trị này mô tả hệ số truyền qua, hệ số phản xạ của sóng RF khi đi qua các cổng điện tử này.



Hình 6. Sơ đồ khối các thông số S-Parameter loại 2 cổng

a_1 là sóng tới, b_1 là phần sóng phản xạ từ cổng 1, b_2 là sóng truyền qua thiết bị cần kiểm tra, a_2 là phần sóng phản xạ từ cổng 2. Giá trị b_1, b_2 được xác định theo công thức sau:

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2$$

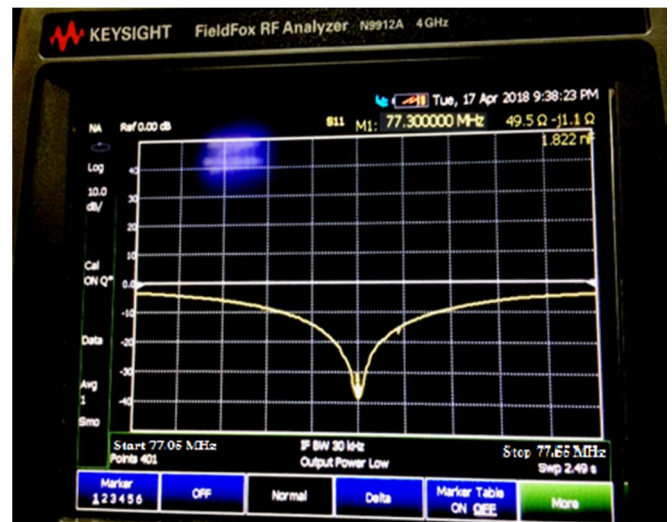
Khi cài đặt thực nghiệm với $a_2 = 0$, $S_{11} = b_1/a_1$ là tỷ số giữa sóng phản xạ và sóng tới tại cổng 1. Đây là cơ sở lý thuyết để xác định hệ số phản xạ tại buồng cộng hưởng gia tốc bằng thiết bị Network Analyzer.

2.2.4. Thực nghiệm xác định hệ số sóng phản xạ từ buồng gia tốc cộng hưởng của thiết bị gia tốc HIC-KOTRON13

Sơ đồ khối của thí nghiệm được mô phỏng theo hình 4. Nguồn phát RF, khối đầu đo và hệ ghi nhận được thực hiện bởi thiết bị N9912A. Thông số kỹ thuật được xác định trong thí nghiệm này là tỷ số năng lượng sóng phản xạ và sóng tới buồng gia tốc cộng hưởng phụ thuộc tần số phát RF.

Thí nghiệm được tiến hành sau khi đã lắp đặt toàn bộ các bộ phận bên trong buồng gia tốc như nguồn ion, các điện cực gia tốc, tụ vi chỉnh tần số cộng hưởng,... Chân không tại buồng cộng hưởng trong thí nghiệm này đạt $2,0 \times 10^{-7}$ mbar.

Thiết bị N9912A được cài đặt trong chế độ NA (Network Analyzer) được hiển thị chế độ đo S_{11} với trục tung có đơn vị đo dB và trục hoành là tần số quét dải từ 77,05MHz đến 77,55MHz. Kết quả đo được hiển thị trên hình 7.



Hình 7. Xác định hệ số phản xạ từ buồng cộng hưởng bằng thiết bị N9122A

Kết quả đo giá trị S_{11} của buồng cộng hưởng có thể rút ra một số kết luận sau:

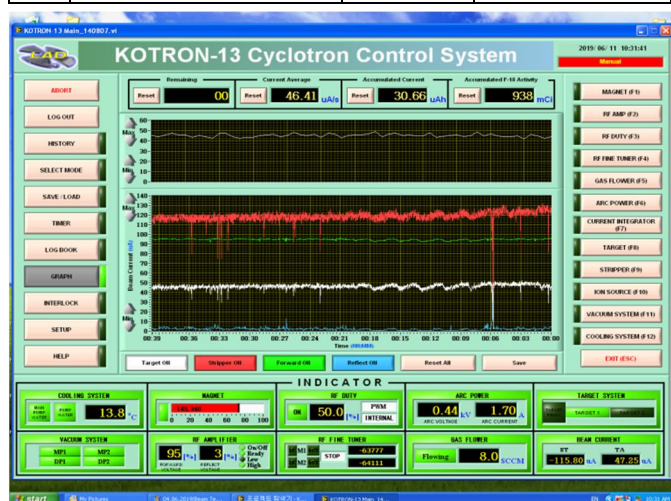
- Vị trí cực tiểu của S_{11} tại tần số phát 77,3MHz cho thấy vị trí lắp đặt các bộ phận trong buồng cộng hưởng đã đúng vị trí. Buồng gia tốc đã cộng hưởng ở tần số này.
- Giá trị cực tiểu của S_{11} đo được khoảng -38dB tương đương với tỷ số công suất sóng phản xạ trên sóng tới khoảng vài phần trăm. Điều này cho thấy gần như toàn bộ năng lượng sóng tới RF đã đi vào buồng cộng hưởng và hiệu ứng cộng hưởng đã xảy ra tại đây.

3. CHẠY THỬ NGHIỆM THIẾT BỊ HIC-KOTRON13 SAU KHI BẢO DƯỠNG BUỒNG GIA TỐC CỘNG HƯỞNG

Sau khi bảo dưỡng các bộ phận bên trong buồng gia tốc cộng hưởng RF của thiết bị HIC-KOTRON13, thiết bị đã được đo giá trị trở kháng khoảng 50Ω và giá trị S₁₁ cực tiểu tại tần số 77,3MHz. Toàn bộ thiết bị đã được vận hành trong chế độ sản xuất đồng vị phóng xạ ¹⁸F thực. Các điều kiện biên cài đặt cho thiết bị được mô tả trong bảng 2.

Bảng 2. Các thông số cài đặt cho HIC-KOTRON13

STT	Thông số cài đặt	Giá trị	Ghi chú
1	Dòng nam châm tạo từ trường	145,240A	Vi chỉnh cho mỗi lần bắn bia
2	Dòng ARC-Current nuôi nguồn ion	1,21A	
3	Nhiệt độ cài đặt nước làm mát đầu ra từ Chiller	13°C	Nhiệt độ làm mát dao động từ 13°C - 14 °C
4	Công suất phát RF- Duty cycle	50%	
5	Lưu lượng dòng khí H ₂ vào nguồn ion	7sccm	Chân không khi phát tia đặt 7,1 x 10 ⁻⁶ mbar
6	Điện áp cho sợi đốt đèn công suất RF	8V~	
7	Điện áp cho sợi đốt đèn điện tử IPA	6V~	
8	Nhiệt độ phòng Cyclotron và phòng điều khiển	20°C	Cài đặt khi phát tia
9	Độ ẩm đặt cho máy hút ẩm tại phòng Cyclotron	40%	
10	Nhiệt độ đốt cho sợi đốt bơm khuếch tán dầu	320°C	Chân không khi không phát tia đặt 1,6 x 10 ⁻⁷ mbar



Hình 8. Phổ bắn bia vào tháng 6/2019 sau khi bảo dưỡng buồng gia tốc HIC-KOTRON13

Nhận xét: Từ phổ bắn bia hình 8 có thể rút ra một số kết luận sau:

- Dòng trung bình trên bia (Phổ màu trắng) đạt khoảng 47μA. Giá trị này là đủ để sản xuất đồng vị ¹⁸F trong chế độ

hoạt động bình thường (Hoạt độ khoảng 1,2 Ci cho mỗi ca sản xuất trong 2 giờ bắn bia).

- Hệ số năng lượng RF sóng tới chỉ thị trên hình 8 đạt trên 90% và sóng phản xạ chỉ thị khoảng 2%. Phổ năng lượng sóng tới và sóng phản xạ là tương đối ổn định. Giá trị sóng phản xạ tương đương với giá trị đo S₁₁ của thiết bị N9912A tại tần số 77,3MHz là -38dB.

- Đánh giá chung là vị trí lắp đặt các bộ phận trong buồng cộng hưởng gia tốc là đạt yêu cầu của thiết bị HIC-KOTRON13.

4. KẾT LUẬN

Bài báo nghiên cứu phối hợp trở kháng và xác định hệ số phản xạ từ hệ phản xạ RF máy gia tốc cyclotron HIC-KOTRON13 đã được nghiên cứu và tiến hành các thực nghiệm trên cơ sở thiết bị N9912A. Hai thông số đã được xác định sau khi lắp đặt buồng cộng hưởng gia tốc là trở kháng khoảng 50Ω và hệ số phản xạ RF từ buồng cộng hưởng nhỏ hơn 3% tại tần số 77,3MHz. Cùng với việc lắp đặt nguồn ion PIG [6] thì đây là công việc tiếp theo cho việc lắp đặt buồng cộng hưởng của thiết bị gia tốc HIC-KOTRON13. Thực nghiệm đã xác định được khoảng cách hai bản tụ của tụ vi chỉnh khoảng 1,57cm. Thực nghiệm cũng đã nghiên cứu sự ảnh hưởng của nhiệt độ nước làm mát tới sự thay đổi trở kháng buồng cộng hưởng. Kết quả đo phổ sóng phản xạ thực tế RF từ buồng cộng hưởng khoảng 2% cho thấy sự phù hợp với kết quả giá trị đo S₁₁ từ thiết bị N9912A. Sau khi bảo dưỡng định kỳ, thiết bị gia tốc HIC-KOTRON13 đã hoạt động bình thường phục vụ quá trình sản xuất đồng vị ¹⁸F.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. K. Kurokawa, 1965. *Power Waves And Scattering Matrix*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 194-202, March 1965.
- [2]. User's guide. Keysight Technologies FieldFox Analyzers N9912A.
- [3]. Quick Reference Guide. Keysight N9912A for FieldFox RF Analyzer.
- [4]. Hewlett packard. Test & Measurement Application Note 95-1; S-parameter Techniques.
- [5]. Reference manual of KIRAMS13.
- [6]. Nguyễn Tiến Dũng, Nguyễn Tuấn Anh, Phạm Minh Đức, 2018. *Nguyên lý hoạt động, lắp đặt và xác định thực nghiệm các thông số kỹ thuật nguồn ion PIG trong máy gia tốc cyclotron KOTRON13*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, số 49, tháng 12/2018.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Tuan Anh, Nguyen Tien Dung, Pham Minh Duc
Hanoi Irradiation Center