

SỰ PHÂN BỐ ION HÓA SƠ CẤP ĐƯỢC TẠO THÀNH BỞI CÁC MẢNH PHÂN HẠCH TRONG BUỒNG PHÂN HẠCH

Lê Thị Diệu Hiền^{1*}, Hồ Việt²

¹Trường Đại học Quảng Bình

²Trường Cao đẳng Công nghiệp Huế

*Email: hienle.job@gmail.com

Ngày nhận bài: 07/5/2024; Ngày chấp nhận đăng: 31/5/2024

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đưa ra các công thức phân bố của các cặp ion-electron được tạo thành bởi các mảnh phân hạch của hạt nhân ^{235}U trong phần không gian làm việc của buồng phân hạch cho trường hợp buồng phân hạch hình trụ và buồng phân hạch phẳng. Các công thức phân bố của các cặp ion – electron đã được đề xuất cho phép tính toán mật độ ion hóa sơ cấp tại mọi điểm trong phần không gian làm việc của buồng phân hạch. Việc xây dựng công thức phân bố được thực hiện bằng các phương pháp mô phỏng toán học và vật lý các quá trình tương tác giữa neutron với chất phân hạch, cũng như các công cụ toán học của chương trình Mathematica. Sự phụ thuộc của mật độ ion hóa sơ cấp, gây ra bởi mảnh phân hạch điển hình là Sr, vào khoảng cách xuyên tâm tới lớp phủ chất phân hạch và sự phân bố của mật độ ion hóa sơ cấp dọc theo buồng cũng được nghiên cứu.

Từ khóa: Buồng phân hạch, mật độ các cặp ion-electron, lớp phủ điện cực.

1. MỞ ĐẦU

Ngày nay, các loại buồng phân hạch được sử dụng phổ biến để đo trực tiếp thông lượng neutron trong các lò phản ứng hạt nhân nhờ những ưu điểm nổi bật như: có kích thước nhỏ và tỉ lệ tín hiệu-nhiều tốt [1, 2], có dải đo rộng [3-5]. Buồng phân hạch có nhiều dạng cấu trúc hình học khác nhau như: buồng phân hạch phẳng, hình cầu, hình trụ [6]. Kích thước của chúng có thể từ vài mm đến vài cm. Buồng phân hạch gồm hai bản điện cực ghép song song đóng vai trò là anode và cathode, giữa hai điện cực là khí làm đầy, thông thường là argon [7] hoặc argon có bổ sung N_2 , CO_2 , C_2H_2 nhằm tăng tốc độ trôi của electron [3]. Trên bề mặt một trong hai bản điện cực được phủ một lớp chất phân hạch mỏng có mật độ bề mặt thông thường từ một vài $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ đến một vài mg/cm^2 [8]. Các chất phân hạch thường được sử dụng là ^{235}U , ^{232}Th , ^{239}Pu , ^{241}Pu , ^{237}Np , ^{244}Cm [9]. Khi bị chiếu xạ neutron, chất phân hạch được dùng để phủ điện cực của buồng sẽ bị phân hạch tạo ra hai mảnh phân hạch có năng lượng cao. Một trong hai mảnh bị hấp thụ trong lớp phủ điện cực, mảnh còn lại bay vào phần không gian giữa hai điện cực và ion hóa khí làm đầy, tạo ra các cặp ion-electron. Khi có điện áp được đặt vào các điện cực, các ion và electron này trôi về các điện cực tương ứng và kết quả là tạo ra tín hiệu điện ở mạch ngoài.

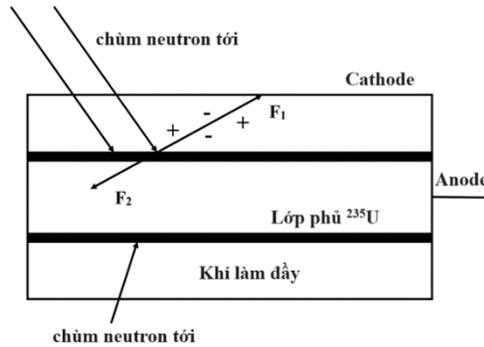
Để mô tả các quá trình vật lý xảy ra bên trong buồng phân hạch, cũng như tính toán các thông số của buồng như dòng điện ra, độ nhạy, v.v., cần xác định mật độ ion hóa sơ cấp, tức là mật độ các cặp ion-electron được tạo ra bởi các mảnh phân hạch do quá trình ion hóa sơ cấp khí làm đầy của buồng phân hạch hay phân bố ion hóa sơ cấp.

Trong bài báo này, công thức phân bố mật độ ion hóa sơ cấp trong không gian làm việc của buồng phân hạch hình trụ và buồng phân hạch phẳng được đề xuất.

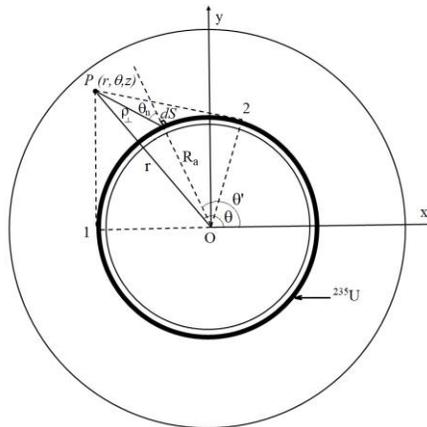
2. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

2.1. Buồng phân hạch hình trụ

Sơ đồ của dạng buồng phân hạch hình trụ được biểu diễn trên Hình 1. Để xây dựng công thức xác định phân bố ion sơ cấp của buồng, trước tiên ta tìm công thức tính mật độ các cặp ion - electron tại điểm P bất kỳ nằm bên trong phần không gian làm việc giữa hai điện cực của buồng. Điểm P có tọa độ (r, θ, z) trong hệ tọa độ trụ có tâm đặt tại tâm của buồng (điểm O trên Hình 2), trục z hướng dọc theo trục của buồng, r là khoảng cách từ P đến trục của anode.



Hình 1. Sơ đồ buồng phân hạch hình trụ



Hình 2. Sơ đồ mặt cắt ngang của buồng phân hạch hình trụ

Mật độ ion hóa sơ cấp tại điểm P không phụ thuộc vào góc θ do tính đối xứng của hình trụ và bằng tổng mật độ ion hóa được tạo thành từ diện tích dS của bề mặt lớp phủ chất phân hạch. Khi đó, mỗi diện tích dS bức xạ ra N_{ft} mảnh phân hạch:

$$N_{ft} = N_{fst} dS \quad (1)$$

trong đó, N_{fst} là mật độ bề mặt của các mảnh phân hạch (số mảnh phân hạch phát xạ ra từ một đơn vị diện tích bề mặt của lớp phủ chất phân hạch), $dS = R_a d\theta' dz'$, R_a là bán kính của anode.

Số cặp ion-electron được tạo ra trong thể tích dV vô cùng nhỏ bao quanh điểm P do quá trình ion hóa khí làm đầy gây ra bởi các mảnh phân hạch bức xạ ra từ diện tích dS được xác định bởi công thức:

$$dN'_s = N_{ft} \cos \theta_n X(r') dr' \frac{d\Omega}{2\pi} \quad (2)$$

trong đó, r' là khoảng cách từ điểm bức xạ đến điểm quan sát (độ dài vết), θ_n là góc giữa pháp tuyến của dS và r' , $X(r')$ là hàm mật độ ion hóa tuyến tính dọc theo vết (số cặp ion-electron trung bình được tạo ra bởi các mảnh phân hạch trên một đơn vị độ dài đường chạy của mảnh trong khí làm đầy), $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$.

Khi đó, mật độ của các cặp ion-electron được tạo ra trong thể tích dV được xác định theo công thức:

$$dN_s = \frac{dN'_s}{dV} = N_{ft} \frac{\cos \theta_n X(r')}{2\pi r'^2}, \quad (3)$$

vì $dV = r'^2 dr' d\Omega$.

Suy ra, mật độ ion hóa tại điểm P gây ra bởi các mảnh phân hạch phát ra từ toàn bề mặt bức xạ được tính theo công thức:

$$N(r, z) = \int_S dN_s = \frac{N_{fst}}{2\pi} \int_S \frac{\cos \theta_n X(r')}{r'^2} dS \quad (4)$$

Sử dụng các kỹ thuật tính toán hình học, ta nhận được:

$$r' = \sqrt{r^2 + R_a^2 - 2rR_a \cos(\theta - \theta') + (z - z')^2} \quad (5)$$

$$\cos \theta_n = \frac{r \cos(\theta - \theta') - R_a}{r'} \quad (6)$$

Dựa trên sơ đồ Hình 2 có thể thấy rằng, tích phân theo diện tích S không bao gồm toàn bộ diện tích bề mặt của anode mà nó chỉ được lấy theo phần diện tích S từ đó các mảnh phân hạch phát xạ đến điểm P. Tích phân (4) với lưu ý này và tiến hành các phép biến đổi, ta thu được công thức tính mật độ ion hóa sơ cấp được tạo ra bởi các mảnh phân hạch ở dạng sau:

$$N(r, z) = \int_S dN_s = \frac{N_{fst} R_a}{2\pi} \int_{-\theta_{max}}^{\theta_{max}} \int_{-h/2}^{h/2} X(r') H(l(E_f, Z_f, m_f) - r') \frac{[r \cos(\theta') - R_a] dz' d\theta'}{r'^3} \quad (7)$$

Tích phân được tính trên toàn bộ độ dài của phần không gian làm việc của buồng phân hạch có chiều dài h , giới hạn tích phân của góc θ_{max} được lấy theo góc tương ứng với phần diện tích bề mặt anode, từ đó các mảnh có khả năng bức xạ đến điểm đang xét:

$$\theta_{max}(r) = \arccos\left(\frac{R_a}{r}\right) \quad (8)$$

Trong tích phân (7), $H(x)$ là hàm Heaviside, E_f , Z_f , m_f là năng lượng, điện tích và khối lượng của các mảnh phân hạch tương ứng.

Đối với các buồng phân hạch nhỏ và siêu nhỏ, độ dài vết của các mảnh phân hạch đủ ngắn để có thể xem hàm mật độ ion hóa dọc vết $X(r')$ là hằng số X_0 .

Khi đó, công thức (7) có thể được viết lại dưới dạng:

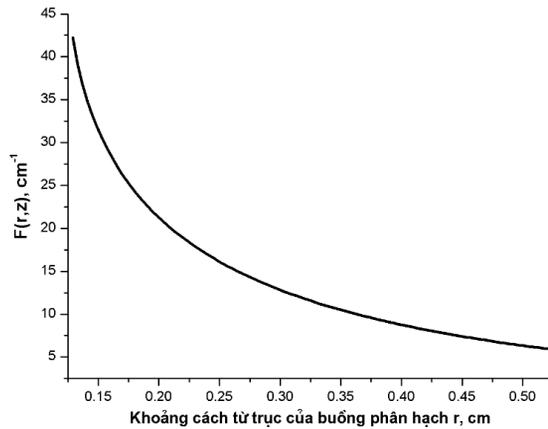
$$N(r, z) = \frac{N_{fst} R_a X_0}{2\pi} F(r, z) \quad (9)$$

với

$$F(r, z) = \int_{-\theta_{max}}^{\theta_{max}} \int_{-h/2}^{h/2} H(l(E_f, Z_f, m_f) - r') \frac{[r \cos(\theta') - R_a] dz' d\theta'}{r'^3} \quad (10)$$

Các buồng phân hạch nhỏ thông thường có đường kính khoảng vài mm, độ dài từ 1 đến một vài cm [10]. Khoảng cách giữa các bản điện cực trong buồng phân hạch nhỏ thường từ vài chục microns đến vài mm [8]. Trên cơ sở đó, việc tính toán kết quả số của công thức (10) đã được thực hiện bằng cách sử dụng chương trình Mathematica với các tham số được lựa chọn như sau: $R_a = 0,125 \text{ cm}$, bán kính cathode $R = 0,525 \text{ cm}$, $h = 1 \text{ cm}$. Việc chọn khoảng cách giữa các bản điện cực ($R - R_a$) này phù hợp để nghiên cứu sự thay đổi mật độ ion hóa sơ cấp theo khoảng cách từ trục của buồng phân hạch. Độ dài của phần không gian làm việc của buồng h được lựa chọn gần với thông số hình học của dạng buồng được đưa ra trong [11]. Cần lưu ý rằng, việc nghiên cứu mật độ ion hóa sơ cấp chỉ được xem xét trong phần không gian làm việc của buồng.

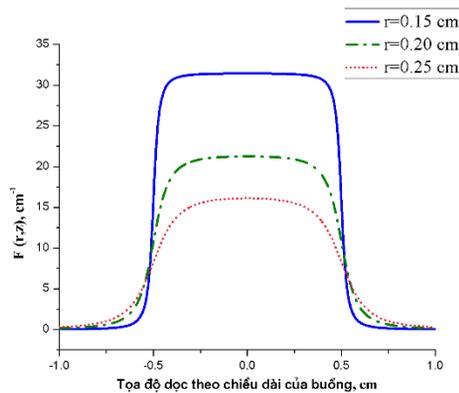
Trên Hình 3 biểu diễn hàm phân bố $F(r, z)$ được tính toán tại mặt phẳng đối xứng của buồng phân hạch ($z=0$) gây ra bởi ion Sr nhờ các công cụ tính toán của phần mềm Mathematica.



Hình 3. Phân bố mật độ ion hóa sơ cấp theo khoảng cách từ trục của buồng phân hạch

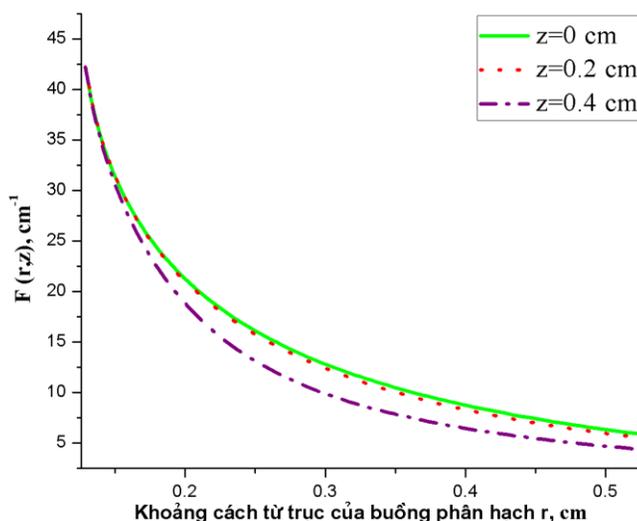
Kết quả thu được trên Hình 3 cho thấy, càng đi ra xa bề mặt anode, mật độ ion hóa càng giảm. Khi tiến tới gần bề mặt anode hàm $F(r, 0)$ tiến tới giá trị xác định, có nghĩa là số cặp ion – electron được tạo ra bởi các mảnh phân hạch là hữu hạn. Điều này hoàn toàn phù hợp với kết quả tính toán mật độ ion hóa dọc vết bằng phần mềm SRIM [12]: một mảnh phân hạch tạo ra số cặp ion – electron xác định.

Đối với phân bố của mật độ ion hóa sơ cấp (chỉ xét hàm $F(r, z)$) dọc theo buồng, kết quả tính toán được biểu diễn trên Hình 4 cho thấy mật độ ion hóa sơ cấp ít phụ thuộc vào tọa độ dọc theo buồng, ngoại trừ vùng lân cận của các điểm cuối.



Hình 4. Sự phân bố mật độ ion hóa sơ cấp dọc theo buồng phân hạch

Trên Hình 5 biểu diễn sự phân bố mật độ ion hóa sơ cấp phụ thuộc vào khoảng cách r từ trục của buồng tại các điểm khác nhau $-h/2 < z < h/2$ dọc theo chiều dài buồng. Kết quả cho thấy rằng, từ $z=0$ cm đến $z=0,4$ cm sự phân bố thực tế không khác biệt. Lưu ý rằng, biên bên trái của đồ thị là bề mặt của lớp chất phân hạch phủ lên anode.



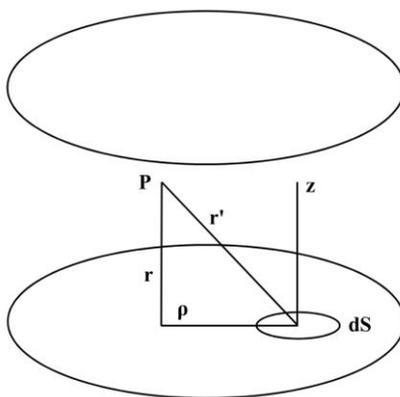
Hình 5. Phân bố của mật độ ion hóa sơ cấp theo khoảng cách từ trục của buồng phân hạch tại các điểm khác nhau dọc theo chiều dài của buồng

2.2. Buồng phân hạch phẳng

Tính toán tương tự như đối với trường hợp buồng hình trụ, có thể thu được công thức xác định mật độ ion hóa sơ cấp tại điểm P đối với buồng phân hạch phẳng (Hình 6) ở dạng:

$$N(r) = \frac{N_{fst}}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\sqrt{l^2 - z^2}} \frac{X(r')r}{(\rho^2 + r^2)^{3/2}} \rho d\rho d\varphi \quad (11)$$

trong đó, ρ – hình chiếu của r' lên bề mặt lớp phủ điện cực, r – khoảng cách từ bề mặt lớp phủ điện cực, l – độ dài đường chạy tự do của các mảnh phân hạch. Các đại lượng còn lại có cùng ý nghĩa như trong (7).



Hình 6. Sơ đồ đơn giản của buồng phân hạch phẳng

Nếu giả thiết rằng, mật độ ion hóa dọc vết là hằng số ($X(r') = const$), thì:

$$N(r) = N_{fst} X(0) \left(1 - \frac{r}{l}\right) \quad (12)$$

Như vậy, khi $r \rightarrow 0$ phương trình (12) tiến tới giá trị bề mặt của nó $N_{fst}X_0$. Kết quả này chứng tỏ tính đúng đắn của kết quả phân bố ion hóa sơ cấp gần bề mặt của buồng phân hạch hình trụ: mật độ ion hóa sơ cấp gần bề mặt của lớp phủ điện cực là đại lượng hữu hạn.

3. KẾT LUẬN

Qua nghiên cứu này, công thức tính toán phân bố ion hóa sơ cấp trong không gian làm việc của buồng phân hạch hình trụ và buồng phân hạch phẳng đã được đề xuất. Công thức cho phép xác định hàm của nguồn trong các phương trình vận chuyển hạt, mô tả các quá trình vật lý xảy ra trong buồng.

Gần bề mặt của lớp phủ chất phân hạch của buồng, mật độ ion hóa sơ cấp tiến tới giá trị xác định, điều này chứng tỏ rằng, số cặp ion hóa được tạo ra bởi mỗi mảnh phân hạch là đại lượng hữu hạn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Antolínez A., Rapisarda D. - Fission chambers designer based on Monte Carlo techniques working in current mode and operated in saturation regime. Nuclear Instruments and Methods in Phys. Research. Sect. A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment **825** (2016) 6–16. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.03.050>
2. Letourneau, A., Bringer, O., Chabod, S. P., Dupont, E., Marie, F., Panebianco, S., ... & Veyssi re, C. - Recent developments on micrometric fission chambers dedicated for high neutron fluxes. IEEE Transactions on Nuclear Science **58** (4) (2011) 1913-1920. <https://doi.org/10.1109/TNS.2011.2155670>
3. Jammes C., Filliatre P., Geslot B., Oriol L., Berhouet F., Villard J. F., Vermeeren, L. - Research activities in fission chamber modeling in support of the nuclear energy industry. IEEE Transactions on Nuclear Science **57** (6) (2010) 3678-3682. <https://doi.org/10.1109/TNS.2010.2075939>
4. Lamirand, V., Geslot, B., Wagemans, J., Borms, L., Malambu, E., Casoli, P., ... & Blaise, P. - Miniature fission chambers calibration in pulse mode: interlaboratory comparison at the SCK.CEN BR1 and CEA CALIBAN Reactors. IEEE Transactions on Nuclear Science **61** (4) (2014) 2306-2311. <https://doi.org/10.1109/TNS.2014.2302541>
5. Knoll, G. F. (2010). Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons.
6. Chabod, S. P. - Saturation current of miniaturized fission chambers. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **598** (2) (2009) 578-590. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.09.051>
7. Chabod, S. P., & Letourneau, A. - Improvements in the modelling of micro fission chambers operated in current mode. In 2009 1st International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications (2009) 1-6. <https://doi.org/10.1109/ANIMMA.2009.5503675>
8. Elter, Z., Jammes, C., P zsis, I., P l, L., Filliatre, P. - Performance investigation of the pulse and Campbelling modes of a fission chamber using a Poisson pulse train simulation code. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:

- Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **774** (2015) 60-67.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.11.065>
9. Assal, W., Bosq, J. C., & Mellier, F. - Experimental measurements at the MASURCA facility. In 2009 1st International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications (2009). 1-9.
<https://doi.org/10.1109/ANIMMA.2009.5503831>
10. <https://www.exosens.com/products/fission-chambers-core-use>
11. Poujade O., Lebrun A. - Modeling of the saturation current of a fission chamber taking into account the distortion of electric field due to space charge effects. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **433** (3) (1999) 673-682.
[https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(99\)00386-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(99)00386-1)
12. J. F. Ziegler SRIM.COM Annapolis, MD 21037 USA, M. D. Ziegler SRIM.COM Los Angeles, CA 90066 USA, J. P. Biersack Hahn-Meitner Inst Berlin Germany, www.srim.org

ABSTRACT

PRIMARY IONIZATION DISTRIBUTION CREATED BY FISSION FRAGMENTS IN THE FISSION CHAMBERS

Le Thi Dieu Hien^{1*}, Ho Viet²

¹*Quang Binh University, 312 Ly Thuong Kiet Str., Dong Hoi City, Quang Binh, Vietnam*

²*Hue Industrial College, 70 Nguyen Hue Str., Hue City, Thua Thien Hue, Vietnam*

*Email: hienle.job@gmail.com

This study provides the distribution formulas of ion-electron pairs formed by fission fragments of ²³⁵U nucleus in the working space of the fission chamber for the case of cylindrical fission chamber and flat fission chamber. Distribution formulas of ion-electron pairs have been proposed that allow the calculation of the primary ionization density at every point in the working space of the fission chamber. Formula setting of the distribution is carried out using mathematical and physical simulation methods of the interaction processes between neutrons and fissile material, as well as mathematical tools of the Mathematica program. The dependence of the primary density of electron - ion pairs on the radial distance to the fissile layer, created a typical fission fragment - ion Sr in the center of the chamber and the spatial distribution of the initial density of ion pairs along the chamber have been studied.

Keywords: Fission chamber, density of ion-electron pairs, fissile material layer.