

THE PRIMARY IONIZATION DISTRIBUTION IN THE FISSION CHAMBER

PHÂN BỐ ION HÓA SƠ CẤP TRONG BUỒNG PHÂN HẠCH

Lê Thị Diệu Hiền
Trường Đại học Quảng Bình

ABSTRACT: In this article, the question of the distribution of electron - ion pairs in the sensitive volume of the fission chamber has been studied. The distribution formula of ion-electron pairs created by ionization of the gas filled by fission fragments in the working volume of the fission chamber has been proposed for the cylindrical fission chamber with a layer of fissile material coated on the inner surface of the outer electrode plate. The formula of the distribution of electron - ion pairs in cylindrical fission chambers, in which the fissile material layer is coated on the internal side of the external electrode is derived. It is calculated in two ways: counting the number of electron - ion pairs created in the infinitesimal volume inside the active volume of the fission chamber by all the trajectories, which emanate from the fissile layer. In the first case, the infinitesimal volume is a sphere. In the second case it is an arbitrary shape. 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, fissile material layer, density of ion-electron pairs.

TÓM TẮT: Trong bài báo này, công thức phân bố của các cặp ion-electron được hình thành do quá trình ion hóa chất khí làm đầy bởi các phân mảnh phân hạch trong phần không gian làm việc của buồng phân hạch đã được đề xuất cho trường hợp buồng phân hạch hình trụ có lớp phủ vật liệu phân hạch được phủ ở mặt trong của bản điện cực ngoài. Công thức phân bố đã được suy ra theo hai cách: cách thứ nhất: đếm số cặp ion-electron được tạo ra bởi tất cả các vết phát xạ ra từ điện cực, có trong một thể tích vô cùng nhỏ có dạng hình cầu bên trong không gian làm việc của buồng phân hạch, cách thứ hai: tính toán đối với thể tích vô cùng nhỏ có hình dạng tùy ý. Sự phụ thuộc của mật độ ion hóa sơ cấp, được tạo ra bởi ion Sr - phân mảnh phân hạch điển hình, vào khoảng cách xuyên tâm đến lớp phủ vật liệu phân hạch và sự phân bố của mật độ ion hóa sơ cấp dọc theo buồng đã được xem xét.

Từ khóa: Buồng phân hạch, lớp phủ vật liệu phân hạch, mật độ của các cặp electron-ion.

1. MỞ ĐẦU

Buồng phân hạch được sử dụng để đo thông lượng neutron trong các lò phản ứng hạt nhân [1]. Buồng phân hạch có những ưu điểm nổi bật: độ nhạy của nó có thể được tối ưu hóa bằng cách chọn vật liệu phân hạch

phù hợp, có kích thước nhỏ và tỉ lệ tín hiệu - nhiễu tốt, có khả năng làm việc trong ba chế độ: xung, dòng và Campbell tùy vào điều kiện làm việc, điều này cho phép sử dụng buồng để đo thông lượng neutron trong một dải rộng [2, 3]. Theo cấu trúc, buồng phân

hạch có nhiều dạng khác nhau như: buồng phân hạch phẳng, hình trụ, hình cầu, bản song song... với kích thước có thể lên đến vài *cm*. Trong thiết kế đơn giản nhất của buồng phân hạch, buồng phân hạch gồm hai bản điện cực ghép song song. Một bản điện cực đóng vai trò là anode, bản còn lại là cathode. Trên một trong hai bản điện cực (thường là cathode) được phủ một lớp vật liệu phân hạch mỏng, thường là ^{235}U (hoặc ^{238}U , ^{232}Th , ^{239}Pu [2]). Phần không gian giữa các điện cực được làm đầy bởi khí hiếm (Ar, hoặc Ar có bổ sung khí N_2 , CH_4 , C_2H_2). Khi lớp phủ vật liệu phân hạch của buồng bị chiếu xạ neutron, tại đây sẽ xảy ra các phản ứng phân hạch hạt nhân. Các phân mảnh phân hạch được tạo thành là các hạt mang điện nặng với điện tích xấp xỉ $+20e$ và động năng trung bình khoảng $60\text{-}100\text{ MeV}$ [3]. Do hai phân mảnh phát ra theo hai hướng ngược chiều nhau nên một mảnh bị giữ lại trong lớp phủ điện cực, mảnh còn lại bay vào phần không gian giữa hai điện cực và làm ion hóa chất khí làm đầy, tạo ra một số lượng cặp electron-ion (Ar^+ , e^-) nhất định. 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 dòng điện ở mạch ngoài.

Khi tính toán các thông số của buồng phân hạch (dòng điện ra, độ nhạy, v.v.), cần biết mật độ ion hóa sơ cấp hay nói cách khác là mật độ của các cặp ion-electron do các phân mảnh phân hạch tạo ra bởi quá trình ion hóa sơ cấp trong không gian làm việc của buồng phân hạch.

Vấn đề xác định sự phân bố mật độ ion

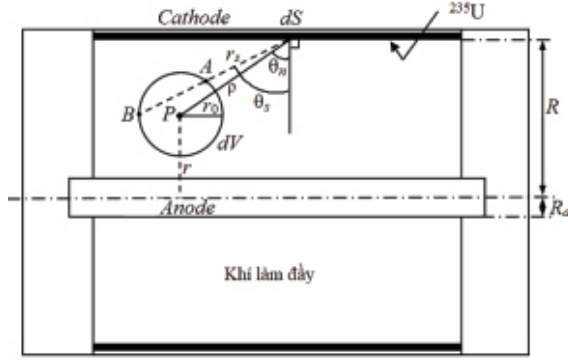
hóa sơ cấp trong không gian làm việc của buồng phân hạch hình trụ có lớp phủ vật liệu phân hạch được phủ lên điện cực bên trong đã được nghiên cứu trong các tài liệu [4, 5]. Tuy nhiên, trường hợp lớp phủ vật liệu phân hạch được phủ lên trên bản điện cực bên ngoài chưa được nghiên cứu.

Trong bài báo này, sự phân bố mật độ ion hóa sơ cấp trong không gian làm việc của buồng phân hạch hình trụ có lớp phủ vật liệu phân hạch được phủ trên bản điện cực bên ngoài đã được nghiên cứu.

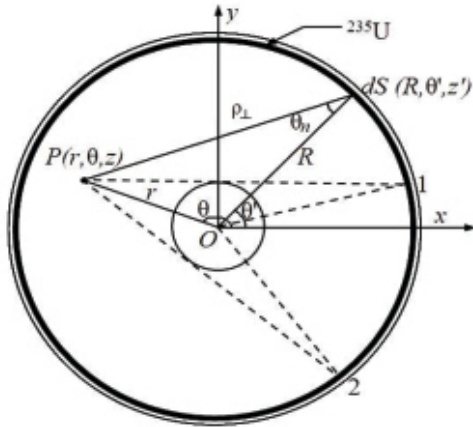
2. MẬT ĐỘ ION HÓA SƠ CẤP TRONG BUỒNG PHÂN HẠCH HÌNH TRỤ

Một trong số những buồng phân hạch có dạng hình trụ với lớp phủ vật liệu phân hạch được phủ trên bản điện cực bên ngoài là dạng buồng Photonis (Pháp) được sử dụng để kiểm soát thông lượng neutron trong lò phản ứng hạt nhân. Sơ đồ của dạng buồng này được biểu diễn trên Hình 1.

Để tìm công thức phân bố của các cặp ion-electron trong không gian làm việc của buồng, trước tiên ta tìm công thức tính mật độ ion hóa sơ cấp tại điểm P tùy ý bên trong không gian làm việc của buồng, cách trục của anode một khoảng r . Trong hệ tọa độ trụ có tâm đặt tại tâm của phần không gian làm việc của buồng và có trục z hướng dọc theo trục của buồng, điểm P có tọa độ $(r; \theta; z)$.



Hình 1. Sơ đồ buồng phân hạch hình trụ có lớp vật liệu phân hạch được phủ lên bản điện cực bên ngoài.



Hình 2. Sơ đồ mặt cắt ngang của buồng phân hạch hình trụ có lớp vật liệu phân hạch được phủ lên bản điện cực bên ngoài

Do tính đối xứng của hình trụ, mật độ ion hóa sơ cấp tại điểm P không phụ thuộc vào góc θ và bằng tổng mật độ ion hóa được tạo thành từ các phần tử diện tích $dS = R d\theta' dz'$ của bề mặt lớp phủ vật liệu phân hạch, trong đó R là bán kính của cathode (hình 2). Khi đó, mỗi phần tử diện tích dS bức xạ ra N_{fi} phân mảnh phân hạch:

$$N_{fi} = N_{fst} R d\theta' dz', \quad (1)$$

trong đó N_{fst} là mật độ bề mặt của các phân mảnh phân hạch (số phân mảnh phân hạch phát xạ ra từ một đơn vị diện tích bề mặt của lớp phủ vật liệu phân hạch).

Gọi dV là thể tích của một hình cầu vô cùng nhỏ bán kính r_0 , có tâm tại điểm P. Ta tính số cặp ion được tạo ra bởi tất cả các vết được phát xạ ra từ phần tử diện tích dS có trong thể tích dV . Chọn hệ tọa độ cầu với tâm đặt tại tâm của diện tích dS . Mỗi vết được đặc trưng bởi tọa độ (θ_s, φ_s) và độ dài của vết r_s nằm bên trong thể tích dV (đoạn AB trên hình 1). Biết mật độ ion hóa tuyến tính $X(s)$ dọc vết (số cặp ion-electron trung bình được tạo thành bởi các phân mảnh phân hạch trên một đơn vị chiều dài đường chạy của chúng trong chất khí làm đầy), ta chỉ cần tính tổng các đại lượng này với trọng số dr . Cần lưu ý rằng số vết không tỷ lệ với toàn bộ diện tích dS , mà chỉ với những vùng bề mặt có khả năng bức xạ phân mảnh phân hạch đến điểm đang xét. Tính toán gần đúng rằng: đường nối từ dV đến dS là đường nối từ tâm của dV ($\rho, \theta_n, \varphi_n$) và tâm của dS . Tính toán với lưu ý này, ta nhận được công thức tính tổng số cặp electron-ion có trong thể tích dV :

$$dN = N_{fi} \frac{X(\rho) \cos(\theta_n)}{2\pi \rho^2} dV. \quad (2)$$

Với ρ – khoảng cách từ điểm bức xạ đến điểm quan sát.

Ta cũng có thể thu được biểu thức trên theo cách khác: số cặp ion-electron được tạo thành trong thể tích dV (dV có hình dạng tùy ý, không nhất thiết phải là hình cầu) do quá trình ion hóa chất khí làm đầy bởi tất cả các vết của các phân mảnh phân hạch bức xạ ra từ diện tích dS được xác định bởi biểu thức:

$$dN'_s = N_{fi} \cos \theta_n X(r') dr' \frac{d\Omega}{2\pi} \quad (3)$$

trong đó r' là độ dài vết, θ_n là góc giữa pháp tuyến của dS và vết.

$$d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi \quad (4)$$

Khi đó mật độ của các cặp electron-ion được tạo ra trong thể tích dV được xác

định theo biểu thức:

$$dN_s = \frac{dN'_s}{dV} = N_{fi} \frac{\cos \theta_n X(r')}{2\pi r'^2}, \quad (5)$$

$$V_i dV = r'^2 dr' d\Omega.$$

Như vậy, biểu thức (5) có dạng giống với biểu thức (2). Tức là ta đã thu được công thức tính mật độ các cặp electron-ion tại điểm P bất kỳ trong không gian làm việc của buồng phân hạch theo hai cách khác nhau. Ngoài ra, từ các tính toán hình học, ta nhận được:

$$\cos \theta_n = \frac{R - r \cos(\theta - \theta')}{r'}$$

$$r' = \sqrt{r^2 + R^2 - 2rR \cos(\theta - \theta') + (z - z')^2}. \quad (6)$$

Suy ra đại lượng dN_s có thể được viết ở dạng:

$$dN_s = \frac{N_{fi} R X(r')}{2\pi} \frac{R - r \cos(\theta - \theta')}{[r^2 + R^2 - 2rR \cos(\theta - \theta') + (z - z')^2]^{3/2}} d\theta' dz'. \quad (7)$$

Tích phân biểu thức (7) theo phần diện tích bề mặt có khả năng bức xạ phân mảnh phân hạch đến điểm đang xét và tiến hành các phép biến đổi, ta thu được biểu thức tính mật độ ion hóa sơ cấp được tạo ra bởi các phân mảnh phân hạch ở dạng sau:

$$N(r, z) = \int_s dN_s = \frac{N_{fi} R}{\pi} \int_0^{\theta_{\max}(r)} \int_{z_1}^{z_2} X(r') H(l - r') \frac{[R - r \cos(\theta')]}{r'^3} dz' d\theta'$$

$$r' = \sqrt{r^2 + R^2 - 2rR \cos(\theta') + (z - z')^2}. \quad (8)$$

Tích phân được tính trên toàn bộ độ dài của phần không gian làm việc của buồng phân hạch $h = z_2 - z_1$.

$$\theta_{\max}(r) = \arccos\left(\frac{R_a}{R}\right) + \arccos\left(\frac{R_a}{r}\right). \quad (9)$$

Ta viết lại biểu thức (8) ở dạng:

$$N(r, z) = \frac{N_{fi} R X_0}{2\pi} F(r, z) \quad (10)$$

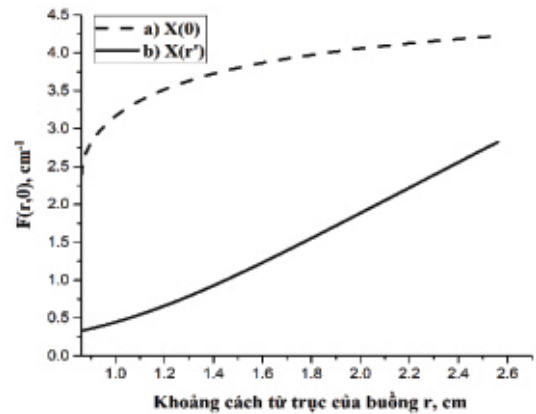
Trong đó hàm $F(r, z)$ có dạng:

$$F(r, z) = \frac{2}{X_0} \int_0^{\theta_{\max}(r)} \int_{z_1}^{z_2} X(r') H(l - r') \frac{[R - r \cos(\theta')]}{r'^3} dz' d\theta' \quad (11)$$

Trên hình 3 biểu diễn hàm phân bố $F(r, z) = F(r, 0)$ được tính toán đối với trường hợp quá trình ion hóa sơ cấp gây ra bởi ion Sr tại tâm của buồng phân hạch ($z=0$) có các tham số [6]: $R_a = 0,8595 \text{ cm}$, bán kính cathode $R = 2,5695 \text{ cm}$, $h = 15,24 \text{ cm}$ trong hai trường hợp:

- 1) Trường hợp 1: Xem mật độ ion hóa tuyến tính dọc vết là hằng số $X(r') = X(0) = X_0$.
- 2) Trường hợp 2: Mật độ ion hóa tuyến tính dọc vết phụ thuộc vào

tọa độ dọc theo vết $\frac{dX(r')}{dr'} \neq 0$

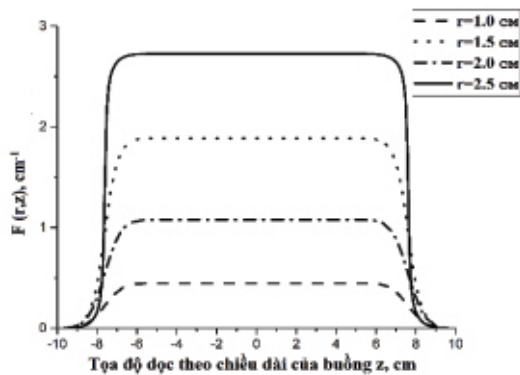


Hình 3. Sự phụ thuộc của mật độ ion hóa sơ cấp được tạo ra bởi ion Sr^+ vào khoảng cách từ trục của buồng phân hạch: $X(r') = 0 = X(0)$ - mật độ ion hóa tuyến tính dọc vết bằng hằng số (a), $X(r')$ - có tính đến sự phụ thuộc của mật độ ion hóa tuyến tính vào tọa độ dọc vết (b).

Kết quả thu được trên Hình 3 cho thấy hàm $F(r, 0)$ được tính cho trường hợp 2, có tính đến sự phụ thuộc của hàm $X(r')$ dọc theo vết, sẽ nhỏ hơn giá trị hàm $F(r, 0)$ được tính trong trường hợp gần đúng $X(r') = X_0$, điều này là do trên thực tế hàm $X(r')$ có phạm vi tác động ngắn.

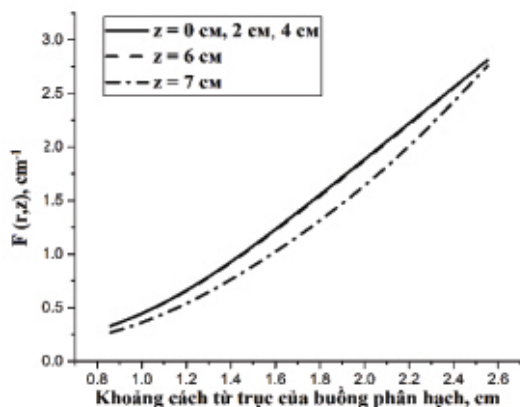
Sự phân bố của mật độ ion hóa sơ cấp (chỉ xét hàm $F(r, z)$) dọc theo buồng

được biểu diễn trên Hình 4. Kết quả cho thấy mật độ ion hóa sơ cấp phụ thuộc yếu vào tọa độ dọc theo buồng, ngoại trừ 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 $z=4$ cm sự phân bố thực tế không khác biệt. Lưu ý rằng, biên bên phải của đồ thị là bề mặt của lớp vật liệu phân hạch phủ lên bản điện cực bên ngoài.



Hình 5. Phân bố của mật độ ion hóa sơ cấp theo khoảng cách từ trục của buồng phân hạch

4. KẾT LUẬN

Công thức tính phân bố ion hóa sơ cấp trong không gian làm việc của buồng phân hạch hình trụ có lớp phủ vật liệu phân hạch được phủ lên bản điện cực bên ngoài đã được đề xuất. Công thức cho phép tính toán sự phân bố mật độ ion hóa sơ cấp không chỉ của các buồng phân hạch có kích thước nhỏ mà còn đối với các buồng phân hạch có kích thước thông thường.

Gần bề mặt của lớp phủ vật liệu phân hạch của buồng, mật độ ion hóa sơ cấp có xu hướng tăng, điều này xuất phát từ nguyên nhân hình học của buồng: lớp vật liệu phân hạch được phủ lên bản điện cực bên ngoài.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S.P. Chabod (2009), *Saturation current of miniaturized fission chambers*, Nuclear Instruments and Methods in Phys. Research. Sect. A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, Vol. 598, № 2, p. 578 – 590.
- [2] G. F. Knoll (2010), *Radiation Detection and Measurement*, New York, John Wiley & Sons, 816 p.
- [3] A. Antolínez [et al.] (2016), *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, p. 6 – 16.
- [4] O. Poujade [et al.] (1999), *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 Phys. Research. Sect. A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, Vol. 433, № 3, p. 673-682.
- [5] S. Chabod [et al.] (2006), *Modelling of Fission Chambers in Current Mode - Analytical Approach*, Nuclear Instruments and Methods in Phys. Research. Sect. A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, № 566, p. 633-653.
- [6] Hadad, K [et al.] (2009), *Analysis and optimization of a fission chamber detector using MCNP4C and SRIM Monte Carlo codes*, Iranian Journal of Science and Technology (Sciences), Vol. 33, №. 3, p. 269-276.

Liên hệ:

TS. Lê Thị Diệu Hiền

Khoa Khoa học cơ bản, Trường Đại học Quảng Bình

Địa chỉ: 18 Nguyễn Văn Linh, Đồng Hới, Quảng Bình

Email: hienlejob@gmail.com

Ngày nhận bài: 31/5/2023

Ngày gửi phản biện: 31/5/2023

Ngày duyệt đăng: 01/8/2023