

# CÁC HỆ SỐ CHUYỂN ĐỘNG ELECTRON VÀ GIỚI HẠN CƯỜNG ĐỘ ĐIỆN TRƯỜNG TRONG HỖN HỢP KHÍ $CF_4-N_2$

## ELECTRON TRANSPORT COEFFICIENTS AND LIMITING FIELD STRENGTH IN $CF_4-N_2$ MIXTURE

Phạm Xuân Hiến<sup>1</sup>, Đỗ Anh Tuấn<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Giao thông Vận tải, <sup>2</sup>Trường Đại học Sư phạm kỹ thuật Hưng Yên

Ngày nhận bài: 04/02/2020, Ngày chấp nhận đăng: 14/07/2020, Phản biện: TS. Nguyễn Đức Quang

### Tóm tắt:

Các hệ số chuyển động electron và giới hạn cường độ điện trường trong hỗn hợp khí  $CF_4-N_2$  được tính toán lần đầu tiên sử dụng phương pháp xấp xỉ bậc hai phương trình Boltzmann. Kết quả của nghiên cứu là cơ sở để áp dụng cho các ứng dụng công nghiệp, đặc biệt là trong lĩnh vực cách điện khí.

### Từ khóa:

Cách điện khí, các hệ số chuyển động electron, giới hạn cường độ điện trường, phương trình Boltzmann.

### Abstract:

Electron transport coefficients and limiting field strength in  $CF_4-N_2$  mixture were firstly calculated using two-term Boltzmann equation approximation. The results of this research are considered to use in industrial applications, especially in gas insulation.

### Keywords:

Gas insulation, electron transport coefficients, limiting field strength, Boltzmann equation.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Khí  $SF_6$  đã và đang được sử dụng rộng rãi trong lĩnh vực cách điện khí. Tuy nhiên do khí  $SF_6$  là một chất khí có khả năng gây nóng toàn cầu cao nên việc tìm ra các chất khí thay thế nó trong các ứng dụng cách điện nhận được sự quan tâm từ nhiều nhà khoa học trên thế giới. Trong đó các chất khí nhận được sự quan tâm là các chất khí cách điện carbon florua như

$CF_3I$ ,  $CF_4$ ,  $C_2F_6$ ,  $C_3F_8$ ,  $c-C_4F_8$  [1,2]. Zhong và các cộng sự [1] đã nghiên cứu thuộc tính đánh thủng điện môi của các hỗn hợp các chất khí carbon florua  $CF_3I$ ,  $C_2F_6$ ,  $C_3F_8$ ,  $c-C_4F_8$  trộn với  $CO_2$ ,  $N_2$  và  $CF_4$ . Những phân tích này dựa trên việc giải phương trình Boltzmann, tuy nhiên thuộc tính đánh thủng điện môi của chất khí  $CF_4$  với  $N_2$  chưa được thực hiện.  $CF_4$  là một chất khí không màu, không

mùi, không dễ cháy khi bị nén và khả năng bị bay hơi cao [2]. Nó là một trong những hợp chất bền và khó bị phân hủy trong nước ở nhiệt độ phòng [2].  $\text{CF}_4$  có khả năng gây nóng toàn cầu nhưng nhỏ hơn của  $\text{SF}_6$  nhiều và không phá hủy tầng ozon. Thêm vào đó nó rất bền và có thể tồn tại trong khí quyển trong một thời gian dài, khoảng 50000 năm, lớn hơn rất nhiều do so với  $\text{SF}_6$  [2]. Các hệ số chuyển động electron và khả năng cách điện trong chất khí  $\text{CF}_4$  nguyên chất đã nhận được sự quan tâm từ nhiều nhà nghiên cứu. Những nghiên cứu này chỉ ra rằng giới hạn cường độ điện trường  $(E/N)_{\text{lim}}$  của  $\text{CF}_4$  nhỏ hơn tương đối so với khí  $\text{SF}_6$  [2]. Tuy nhiên hiệu ứng phân tán của  $\text{CF}_4$  là mạnh hơn so với  $\text{SF}_6$ . Do đó để cải thiện khả năng cách điện của  $\text{CF}_4$  có thể trộn thêm với các khí có độ âm điện cao. Do đó việc nghiên cứu các hệ số chuyển động electron và thuộc tính cách điện của hỗn hợp chất khí  $\text{CF}_4$  với các chất khí khác là cần thiết để có thể đưa ra những đánh giá, lựa chọn sử dụng trong các ứng dụng, đặc biệt là ứng dụng cách điện khí nhằm thay thế phần nào đó cho việc sử dụng chất khí  $\text{SF}_6$ . Một trong những chất khí phổ biến được sử dụng để trộn với các chất khí cách điện là  $\text{N}_2$ . Do đó trong nghiên cứu này, các hệ số chuyển động electron và giới hạn cường độ điện trường trong hỗn hợp  $\text{CF}_4\text{-N}_2$  với các tỉ lệ trộn khác nhau được tính toán sử dụng phương pháp xấp xỉ phương trình bậc hai Boltzmann. Kết quả của nghiên cứu là nguồn tài liệu quan trọng trong việc cân nhắc ứng dụng hỗn hợp  $\text{CF}_4\text{-N}_2$  trong các ứng dụng công nghiệp, đặc biệt là lĩnh vực cách điện.

## 2. TÍNH TOÁN HỆ SỐ CHUYỂN ĐỘNG ELECTRON VÀ GIỚI HẠN CƯỜNG ĐỘ ĐIỆN TRƯỜNG TRONG HỖN HỢP KHÍ $\text{CF}_4\text{-N}_2$

### 2.1. Phương pháp phương trình Boltzmann

Trong nghiên cứu này, việc tính toán các hệ số chuyển động electron trong hỗn hợp khí  $\text{CF}_4\text{-N}_2$  dựa trên việc giải phương trình Boltzmann xấp xỉ bậc hai. Phương pháp tính toán này được thực hiện nhờ vào một phần mềm được lập trình sử dụng ngôn ngữ Fortran được đưa ra bởi Tagashira và những cộng sự [3]. Phương pháp này dựa trên việc mô phỏng các phương pháp thực nghiệm là phương pháp “thời gian bay” (time-of-flight) và phương pháp “trạng thái ổn định Townsend” (steady state Townsend). Các hệ số chuyển động electron trong nguyên chất/hỗn hợp khí có thể nhận được là vận tốc trôi của electron  $W_r$ , hệ số khuếch tán dọc  $D_L$ , hệ số ion hóa electron  $\alpha$  và hệ số dính kèm electron  $\eta$ . Xuất phát từ dạng tổng quát của phương trình Boltzmann cho chất khí:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v}\nabla_r f + \vec{a}\nabla_v f = \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{\text{coll}} \quad (1)$$

trong đó  $f = f(\vec{r}, \vec{v}, t)$  là hàm phân bố ở vị trí  $r$  và thời gian  $t$  với vận tốc  $v$  của electron,  $\vec{a}$  là gia tốc gây nên bởi ngoại lực,  $(\partial f/\partial t)_{\text{coll}}$  là hệ số va chạm gây ra bởi sự thay đổi số lượng các electron trên một đơn vị thể tích của không gian pha.

Mối liên hệ giữa vận tốc trôi của electron và hàm phân bố electron được thể hiện ở biểu thức (2):

$$W = -\frac{1}{3} \left( \frac{2}{m} \right)^{1/2} \frac{eE}{N} \int_0^{\infty} \frac{\varepsilon}{q_m(\varepsilon)} \frac{df(\varepsilon, E/N)}{d\varepsilon} d\varepsilon \quad (2)$$

trong đó,  $\varepsilon$  là năng lượng của electron,  $m$  là khối lượng electron,  $e$  là điện tích cơ bản của electron và  $q_m(\varepsilon)$  là tiết diện va chạm đàn hồi.

Hệ số khuếch tán dọc electron được biểu diễn như ở biểu thức (3):

$$ND_L = \frac{V_1}{3N} \left( E \int_0^{\infty} \frac{\varepsilon}{q_T} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} (F_0 \varepsilon^{-1/2}) d\varepsilon + \int_0^{\infty} \frac{\varepsilon^{1/2}}{q_T} F_0 d\varepsilon \right) - (\varpi_0 A_2 - \varpi_1 A_1 - \varpi_{02}) \quad (3)$$

trong đó,  $V_1$  là tốc độ của electron,  $q_T$  là tiết diện tổng của electron,  $F_n$  và  $\varpi_n$  lần lượt là phân bố năng lượng electron với các bậc khác nhau và giá trị riêng của nó.  $V_1$ ,  $\varpi_n$ ,  $\varpi_{0n}$ , và  $A_n$  được tính toán theo các biểu thức:

$$V_1 = \left( \frac{2e}{m} \right)^{1/2} \quad (3.1)$$

$$\varpi_0 = V_1 N \int_0^{\infty} \varepsilon^{1/2} q_1 F_0 d\varepsilon \quad (3.2)$$

$$\varpi_1 = -\frac{V_1 E}{3N} \int_0^{\infty} \frac{\varepsilon}{q_T} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} (F_0 \varepsilon^{-1/2}) d\varepsilon + (\varpi_0 A_1 - \varpi_{01}) \quad (3.3)$$

$$\varpi_{0n} = V_1 N \int_0^{\infty} \varepsilon^{1/2} q_i F_n d\varepsilon \quad (3.4)$$

$$A_n = \int_0^{\infty} F_n d\varepsilon \quad (3.5)$$

Hệ số ion hóa:

$$\alpha / N = \frac{1}{W} \left( \frac{2}{m} \right)^{1/2} \int_1^{\infty} f(\varepsilon, E/N) \varepsilon^{1/2} q_i(\varepsilon) d\varepsilon \quad (4)$$

trong đó  $I$  là ngưỡng năng lượng ion hóa và  $q_i(\varepsilon)$  là tiết diện ion hóa.

Phương pháp này có thể được áp dụng cho cả chất khí nguyên chất hoặc hỗn hợp hai chất khí với tỉ lệ trộn tùy ý. Phương

pháp này đã được áp dụng và chứng minh tính đúng đắn cho các chất khí/hỗn hợp khí [4-8].

## 2.2. Các hệ số chuyển động electron trong hỗn hợp khí CF<sub>4</sub>-N<sub>2</sub>

Trong nghiên cứu này giả sử các chất khí CF<sub>4</sub> và N<sub>2</sub> là nguyên chất 100% và được tính toán tại nhiệt độ 300 K, áp suất 1 Torr.

Như đã trình bày ở trên, các hệ số chuyển động electron trong hỗn hợp khí CF<sub>4</sub>-N<sub>2</sub> có liên quan đến các tiết diện va chạm electron của các chất khí thành phần. Do đó việc lựa chọn các bộ tiết diện va chạm electron đáng tin cậy để đưa vào tính toán là rất quan trọng. Do đó, dữ liệu về bộ tiết diện va chạm electron được lấy từ [9] cho chất khí CF<sub>4</sub> và từ [10] cho chất khí N<sub>2</sub>. Tính tin cậy của các bộ tiết diện va chạm cho các phân tử khí này đã được chứng minh trong [9,10].

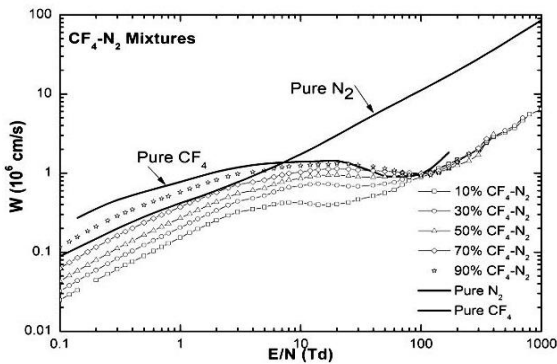
Các hệ số chuyển động electron trong hỗn hợp khí CF<sub>4</sub>-N<sub>2</sub> với các tỉ lệ trộn khác nhau được thể hiện như trong các hình 1-4.

Vận tốc trôi của electron trong hỗn hợp khí CF<sub>4</sub>-N<sub>2</sub> với các tỉ lệ trộn khác nhau là một tham số quan trọng đặc trưng cho độ dẫn điện. Các vận tốc trôi electron đó là hàm của cường độ điện trường E/N như được biểu diễn trên hình 1. Ngoại trừ trường hợp 90%CF<sub>4</sub>-10%N<sub>2</sub> hầu hết các giá trị vận tốc trôi của electron nhỏ hơn giá trị vận tốc trôi của nguyên chất CF<sub>4</sub> và N<sub>2</sub>.

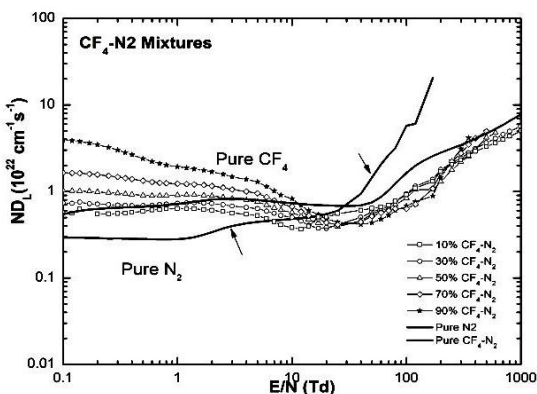
Hình 2 biểu diễn giá trị của hệ số khuếch tán dọc  $ND_L$  trong hỗn hợp CF<sub>4</sub>-N<sub>2</sub> với

các tỉ lệ trộn khác nhau. Tại cùng một giá trị  $E/N$  cố định, giá trị của  $ND_L$  trong hỗn hợp  $CF_4-N_2$  tăng cùng với sự tăng tỉ lệ của  $CF_4$ . Trong khoảng  $E/N < 12$  Td, các giá trị  $ND_L$  trong hỗn hợp  $CF_4-N_2$  lớn hơn giá trị  $ND_L$  trong nguyên chất  $CF_4$  và  $N_2$  trong một vài trường hợp mà tỉ lệ  $CF_4$  lớn (ví dụ trong các trường hợp 50%, 70%, 90%  $CF_4$ ). Trong khoảng  $E/N > 20$  Td, hầu hết các giá trị  $ND_L$  trong hỗn hợp  $CF_4-N_2$  nhỏ hơn giá trị  $ND_L$  trong nguyên chất  $CF_4$  và  $N_2$ .

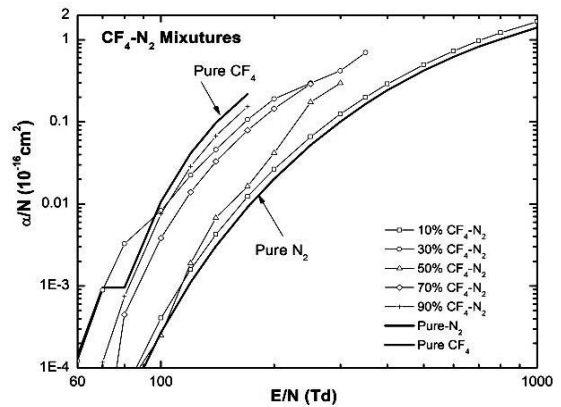
Hình 3 biểu diễn các giá trị của hệ số ion hóa trong hỗn hợp khí  $CF_4-N_2$ . Tại cùng một giá trị  $E/N$ , giá trị của hệ số ion hóa  $\alpha$  tỉ lệ thuận với tỉ lệ trộn của  $CF_4$ .



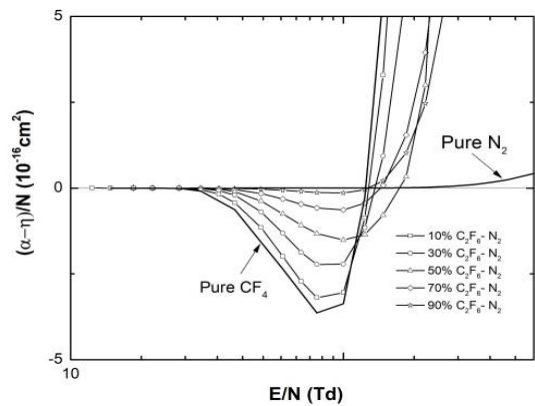
Hình 1. Vận tốc trôi của electron trong hỗn hợp khí  $CF_4-N_2$



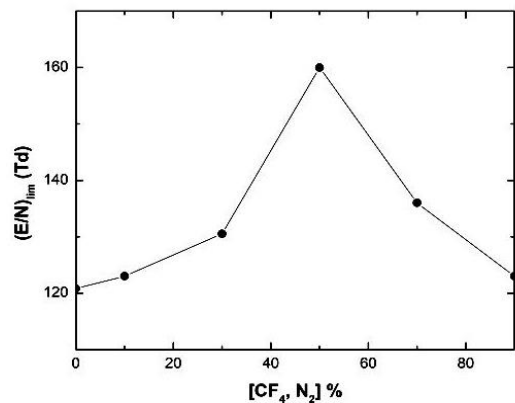
Hình 2. Hệ số khuếch tán dọc trong hỗn hợp khí  $CF_4-N_2$



Hình 3. Hệ số ion hóa trong hỗn hợp khí  $CF_4-N_2$



Hình 4. Hệ số ion hóa theo mật độ đặc trưng trong hỗn hợp khí  $CF_4-N_2$



Hình 5. Giá trị giới hạn cường độ điện trường trong hỗn hợp khí  $CF_4-N_2$  theo tỉ lệ trộn

Hệ số ion hóa theo mật độ đặc trưng được biểu diễn trên hình 4. Đồng thời giá trị giới hạn cường độ điện trường  $(E/N)_{lim}$

(giá trị  $E/N$  khi hệ số ion hóa bằng với hệ số đính kèm) thay đổi theo tỉ lệ trộn của hỗn hợp  $CF_4-N_2$  và được biểu diễn trên hình 5. Ta có thể dễ dàng nhận thấy giá trị  $(E/N)_{lim}$  của hỗn hợp  $CF_4-N_2$  hầu hết lớn hơn giá trị  $(E/N)_{lim}$  của  $CF_4$  nguyên chất. Đặc biệt giá trị  $(E/N)_{lim}$  ở tỉ lệ trộn 50% $CF_4$ -50% $N_2$  là 160Td. Giá trị này lớn nhất trong các tỉ lệ trộn khảo sát và lớn hơn nhiều so với  $(E/N)_{lim}$  của khí  $CF_4$  nguyên chất. Từ các kết quả trên có thể thấy rằng việc sử dụng hỗn hợp khí  $CF_4-N_2$  là hiệu quả hơn trong việc sử dụng khí  $CF_4$  nguyên chất trong lĩnh vực

cách điện khí.

### 3. KẾT LUẬN

Các hệ số chuyển động electron (vận tốc trôi của electron, hệ số khuếch tán dọc, hệ số ion hóa) và giới hạn cường độ điện trường trong hỗn hợp khí  $CF_4-N_2$  được tính toán và phân tích sử dụng phương pháp xấp xỉ bậc hai phương trình Boltzmann. Kết quả của nghiên cứu cho thấy ưu điểm của hỗn hợp khí  $CF_4-N_2$  so với khí  $CF_4$  nguyên chất trong lĩnh vực cách điện khí.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Zhong L, Wang J, Wang X, Rong M, Comparison of Dielectric Breakdown Properties for Different carbon-fluoride Insulating Gases as  $SF_6$  Alternatives, *AIP Advances*, vol. 8, pp. 085122, 2018.
- [2] Xiao D, Gas Discharge and Gas Insulation, Energy and Environment Research in China, 2016.
- [3] Tagashira H, Sakai Y and Sakamoto S, The Development of Electron Avalanches in Argon at High  $E/N$  Values. II. Boltzmann Equation Analysis, *J. Phys. D*, vol.10, 1051, 1977.
- [4] Tuan D.A. and Jeon B.H., Electron Collision Cross Sections for the Tetraethoxysilane Molecule and Electron Transport Coefficients in Tetraethoxysilane- $O_2$  and Tetraethoxysilane-Ar Mixtures, *Journal of the Physical Society of Japan*, vol. 81, no. 6, pp. 064301-1-8, 2012.
- [5] Tuoi P.T., Hien P.X. and Tuan D.A., Electron Collision Cross Sections for the TRIES Molecule and Electron Transport Coefficients in TRIES-Ar and TRIES- $O_2$  Mixtures, *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 73, no. 12, pp. 1855-1862, 2018.
- [6] Hien P.X., Jeon B.H., and Tuan D.A., Electron Cross Sections for the  $BF_3$  Molecule and Electron Transport Coefficients in  $BF_3$ -Ar and  $BF_3$ - $SiH_4$  mixtures, *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 82, no. 3, pp. 034301-1-8, 2013.
- [7] Tuan D.A., Analysis of Insulating Characteristics of  $Cl_2$ -He Mixture Gases in Gas Discharges, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 10, no. 4, pp. 1735-1738, 2015.
- [8] Tuan D.A. and Hanh C.D., Analysis of Electron Transport Coefficients in  $CF_3I-N_2$  Mixture Gas Using an Electron Swarm Study, *AETA 2013: Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences Lecture Notes in Electrical Engineering Volume 282*, pp 29-38, 2014.
- [9] Hayashi Y and Nakamura Y, Electron Collision Cross Sections for the  $CF_4$  Molecule by Electron Swarm Study, *International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications*, edited by Wiese W L and Mohr P J, NIST Special Publication, no. 926, pp. 248-251, 1998.
- [10] Nakamura Y, Tokyo Denki Univ., Tokyo, Japan, Private Communication, 2010.

**Giới thiệu tác giả:**



Tác giả Phạm Xuân Hiển tốt nghiệp đại học tại Trường Đại học Sư phạm kỹ thuật Hưng Yên năm 2008; nhận bằng Tiến sĩ ngành kỹ thuật điện năm 2016 tại Trường Dongguk, Hàn Quốc. Hiện nay tác giả là giảng viên Khoa Cơ khí, Trường Đại học Giao thông Vận tải.

Lĩnh vực nghiên cứu: vật liệu điện - điện tử và phóng điện cao áp; nâng cao độ chính xác các phép đo các đại lượng không điện; nghiên cứu thiết kế, chế tạo các hệ thống tự động hóa.



Tác giả Đỗ Anh Tuấn tốt nghiệp đại học và nhận bằng Thạc sĩ ngành hệ thống điện tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội vào các năm 2004 và 2008; nhận bằng Tiến sĩ Kỹ thuật năm 2012 tại Trường Dongguk, Hàn Quốc; Phó Giáo sư ngành điện năm 2016. Hiện nay tác giả là giảng viên Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Sư phạm kỹ thuật Hưng Yên.

Lĩnh vực nghiên cứu: hệ thống điện, vật liệu điện - điện tử và phóng điện cao áp, tiết kiệm năng lượng.

