

# THỂ GIAM CÀM VÀ PHÂN BỐ KHÍ ĐIỆN TỬ TRONG CẤU TRÚC DỊ CHẤT ĐƠN DỰA TRÊN NỀN OXIT KẼM VÀ HỢP KIM CỦA NÓ Ở NHIỆT ĐỘ THẤP

Nguyễn Thành Tiên<sup>1</sup> và Trần Yến Mi<sup>1</sup>

## ABSTRACT

*High speed semiconductor devices are the essential component of telecommunication systems, as they can handle analog and digital signals at high frequencies and high bit rates. In the frequency range of interest, silicon devices are inherently limited by material parameters such as inversion layer mobility and saturation velocity. Zinc Oxide (ZnO), are very good alternative options to replace silicon because of many advantages, for example, highly chemical resistance, potential for high power operation, and blue and ultraviolet optoelectronic behaviors [1]. The techniques have been developed to grow a Zn(O) polar ZnO and MgZnO layers on sapphire [2, 3]. In this study, the formation of the two-dimensional (2DEG) using a Zn(O) polar ZnMgO/ZnO heterostructure and its properties have been investigated. The relationship between polarity and device structure is discussed. However, the electrical properties have not been investigated in detail. So, we present a study the role of possible various confining potentials on the quantum properties of the 2DEG in a MgZnO/ZnO quantum well (QW). We proved that effect due to spontaneous and piezoelectrics polarization may significantly affect on 2DEG distribution, then on the electron transport properties in ZnO SFQWs.*

**Keywords:** Nano physics, quantum well, two-dimensional electron gas, mobility, donor, band gap, exciton

**Title:** Confining potentials and the distributions of the electron gas in single heterostructure based on ZnO and its compound at the low temperature

## TÓM TẮT

Các linh kiện bán dẫn tốc độ cao là thành phần chính của hệ thống kỹ thuật truyền thông vì chúng có thể điều khiển các tín hiệu số hay các tín hiệu tương tự ở tần số cao và tốc độ cao. Trong khoảng tần số cần quan tâm, các linh kiện dựa trên Si vốn đã có những giới hạn các tham số vật liệu như độ linh động ở tầng đảo và vận tốc bão hòa. ZnO là một ứng viên đáng chú ý để thay thế Si bởi những đặc tính vượt trội của nó như đặc tính hóa học ổn định, khả năng hoạt động ở công suất cao và đặc tính phát xạ bức xạ quang điện tử ở màu xanh và cực tím [1]. Nhiều kỹ thuật bán dẫn đã được phát triển để nuôi ZnO và MgZnO trên nền sapphire theo cả hai hướng phân cực O và phân cực Zn [2, 3]. Trong các nghiên cứu này sự hình thành khí điện tử hai chiều (2DEG) trong cấu trúc dị chất MgZnO/ZnO và một số đặc tính vật lý của chúng đã được đánh giá. Mối liên hệ giữa cấu trúc linh kiện và sự phân cực đã được thảo luận. Tuy nhiên, một số tính chất điện chưa được đánh giá chi tiết, đặc biệt là ảnh hưởng của phân cực lên sự hình thành 2DEG. Trong báo cáo này, chúng tôi muốn thể hiện vai trò của các thể giam giữ điện tử có thể ảnh hưởng đến đặc tính lượng tử của 2DEG trong giếng lượng tử dựa trên MgZnO/ZnO. Chúng tôi chứng minh sự ảnh hưởng của phân cực tự phát và phân cực áp điện lên phân bố của 2DEG, mà nó sẽ ảnh hưởng lên sự vận chuyển của điện tử trong các giếng lượng tử dựa trên ZnO.

**Từ khóa:** Vật lý nano, giếng lượng tử, khí điện tử hai chiều, độ linh động, khe năng lượng

<sup>1</sup> Khoa Khoa Học Tự Nhiên, Trường Đại học Cần Thơ

## 1 ĐẶT VẤN ĐỀ

Tiến bộ của vật lý chất rắn trong hai thập kỷ cuối thế kỷ thứ XX và trong những năm gần đây đã chuyển hướng đối tượng nghiên cứu từ các khối tinh thể sang các đối tượng có tính chất thấp chiều như màng mỏng, cấu trúc nhiều lớp.... Tùy theo cấu trúc của các hệ này mà người ta gọi là cấu trúc giếng lượng tử (quantum well) hay các cấu trúc dây lượng tử (quantum wire) và chấm lượng tử (quantum dot). Trong các đối tượng mới, hầu hết các tính chất của hạt dẫn điện đều thay đổi một cách đáng kể và xuất hiện một số tính chất mới khác do thay đổi kích thước gọi là **hiệu ứng kích thước**. Các cấu trúc này thường được gọi là cấu trúc nano (nano structure) và vật lý nghiên cứu cấu trúc này được gọi là **vật lý nano** (nano physics).

Việc nghiên cứu cấu trúc nano có nhiều hướng như lý thuyết, thực nghiệm và ứng dụng. Trong lý thuyết, có nhiều vấn đề cần nghiên cứu như tính chất cơ, nhiệt, điện, từ, quang... của các cấu trúc này. Tất nhiên, nghiên cứu lý thuyết, thực nghiệm hay triển khai ứng dụng không thể tách rời nhau mà bổ sung cho nhau và rất được quan tâm nghiên cứu hiện nay. Khi nghiên cứu các hệ này thì phải dựa trên các chất bán dẫn cụ thể (có thể bán dẫn vô cơ hay bán dẫn hữu cơ...). Trong phạm vi bài báo này, tôi muốn trình bày tính chất điện của một hệ vật liệu bán dẫn vô cơ, cụ thể là cấu trúc dị chất MgZnO/ZnO.

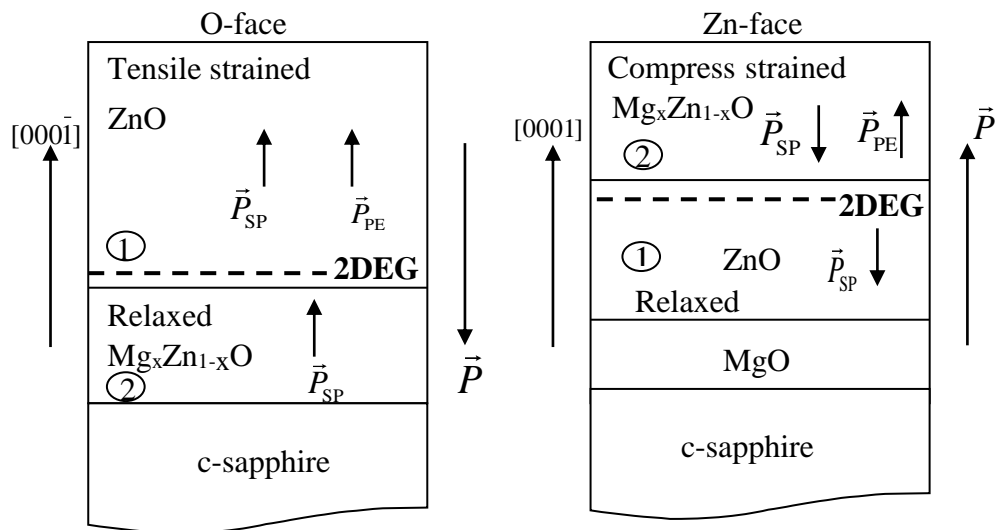
Trong vài năm gần đây, ZnO đã được quan tâm nghiên cứu trở lại vì những khả năng ứng dụng của nó trong các linh kiện quang điện, đặc biệt với khả năng phát ra ánh sáng xanh và cực tím bởi độ rộng vùng cấm rộng (~3.37 eV) và năng lượng liên kết exciton lớn (60 meV) [4]. Mặt khác, ZnO có thể được nuôi trên nhiều loại nền khác nhau và khả năng thay thế Zn bởi các nguyên tố khác để hình thành bán dẫn kép (Zn, Mg, Cd)O mà có vùng cấm trong khoảng 3.0 đến 4.0 eV. Ta cũng lưu ý rằng, mặc dù ZnO có ưu thế về những tính chất quang nhưng nghiên cứu tính chất điện, đặc biệt là tính chất vận chuyển của hạt tải điện trong mẫu cũng có vai trò quan trọng khi phân tích tính chất quang. Một đại lượng liên quan đến tính chất điện thường được xem như hệ số phẩm chất của vật liệu là độ linh động (mobility). Để khảo sát độ linh động của hạt tải trong hệ này về mặt lý thuyết là ta đi giải bài toán để xác định trạng thái điện của chúng trong sự giam giữ một chiều và khảo sát các ảnh hưởng của các cơ chế tán xạ khác nhau khi điện tử vận chuyển trong hai chiều kia. Bài báo này chỉ muốn trình bày ảnh hưởng của giam giữ một chiều lên trạng thái điện của hệ bằng cách sử dụng phương pháp biến phân, dùng chương trình máy tính để mô phỏng giếng thế, mô phỏng phân bố điện tử trong giếng và phân tích ảnh hưởng của các tham số của hệ lên phân bố điện tử hay lên hệ điện tử ở trạng thái cơ bản.

## 2 MÔ HÌNH TOÁN VỚI PHƯƠNG PHÁP BIẾN PHÂN

### 2.1 Phát biểu mô hình vật lý cho hệ kể trên

Sử dụng kỹ thuật nuôi epitaxy chùm phân tử (MBE) để nuôi  $Zn_{1-x}Mg_xO/ZnO$  trên nền sapphire, hướng đến ứng dụng cho transistor hiệu ứng trường đã được nghiên cứu. Chính do sự chênh lệch giữa đáy hai vùng dẫn với một bên là MgZnO còn bên kia là ZnO cộng với tương tác hút của các donor và thế hút của các điện tích bề mặt dị chất bởi hiệu ứng phân cực đã tạo ra thế (hay ái lực) hút các điện tử lại gần bề mặt, tức đã hình thành giếng lượng tử gần bề mặt. Ngoài ra sự tương tác

giữa các điện tử cũng có ảnh hưởng đến thế năng này. Khí điện tử nằm trong giếng thế này, nó bị ảnh hưởng bởi dạng của giếng thế. Xác định dạng giếng thế sẽ xác định trạng thái của hệ khí điện tử này. Trạng thái của hệ khí điện tử bị lượng tử được xác định bởi hàm sóng  $\psi(\vec{r}, z)$ . Ta xác định trạng thái của hệ điện tử là xác định hàm sóng. Hệ điện tử ở đây là hệ hạt đồng nhất và bài toán đề cập ở đây được quy về bài toán một hạt. Bài báo này cũng chỉ xét trong trường hợp nhiệt độ  $T=0K$ , tức là xét hệ điện tử ở trạng thái cơ bản. Kết quả của nó sẽ giải thích và tiên đoán cho các hệ thực ở nhiệt độ thấp. Sau đây là mô hình của hệ nghiên cứu mà thể hiện khí điện tử được hình thành ở bề mặt dị chất nơi tiếp giáp giữa ZnO và  $Mg_xZn_{1-x}O$  bởi hiệu ứng phân cực. 2DEG tử hình thành bởi hiệu ứng phân cực với hai mặt cực khác nhau (mặt cực O và mặt cực Zn) thì vị trí hình thành khí điện tử khác nhau do đặc tính biến dạng khác nhau (biến dạng dãn và biến dạng nén) và chiều phân cực khác nhau.



**Hình 1: Mô hình của hệ nghiên cứu thể hiện khí điện tử hình thành ở bề mặt dị chất trong hai trường hợp hệ phân cực O và phân cực Zn**

Xét điện tử có 3 bậc tự do, trong mặt phẳng (x, y) điện tử chỉ chịu tác dụng của trường tuần hoàn tinh thể, còn theo trục z, ngoài trường tuần hoàn, điện tử còn chịu ảnh hưởng của thế một chiều  $V(z)$  là tổ hợp của rào thế, thế bởi điện tích phân cực... Phương trình Schrodinger của điện tử có dạng:

$$\left\{ -\left[ \frac{\hbar^2}{2m^*} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + \frac{\hbar^2}{2m_z} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] + V(z) \right\} \psi(\vec{r}, z) = E \cdot \psi(\vec{r}, z) \tag{1}$$

với  $m^*$  là khối lượng hiệu dụng của điện tử trong mặt phẳng (x,y),  $m_z$  là khối lượng hiệu dụng của điện tử theo phương z, nó nhận các giá trị khác nhau theo z,  $\vec{r}$  là vector định vị trong mặt phẳng (x,y) và E là năng lượng của điện tử.

Giải phương trình vi phân theo phương pháp tách biến ta được:

$$\begin{cases} \psi(\vec{r}, z) = \psi(\vec{r})\xi(z) \\ E_{3D} = E_{2D} + E_{1D} \end{cases} \tag{2}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi(\vec{r}) \propto e^{i\vec{k}\vec{r}} \\ E_{2D} = \frac{\hbar^2}{2m^*} \vec{k}^2 \end{array} \right. \quad (3) \quad \left\{ \begin{array}{l} \psi(\vec{r}, z) = \frac{e^{i\vec{k}\vec{r}}}{\sqrt{A}} \xi_n(z) \\ E_{n\vec{k}} = \frac{\hbar^2 \vec{k}^2}{2m^*} + E_n \end{array} \right. \quad (4)$$

với A là diện tích của tiết diện ngang mà hệ chiếm, đồng thời nó đóng vai trò là thừa số chuẩn hóa,  $E_{1D, 2D, 3D}$  là năng lượng điện tử tương ứng trường hợp một chiều, hai chiều, ba chiều và  $\vec{k}$  là vector sóng trong không gian hai chiều. Bộ tham số đầy đủ xác định hàm sóng và năng lượng của điện tử vẫn gồm bộ ba  $(n, k_x, k_y)$ .

Ta cần tìm hàm sóng  $\xi_n(z)$  ứng với năng lượng  $E_n$  được mô tả bởi phương trình Schrodinger một chiều:

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m_z} \frac{d^2}{dz^2} + V(z) \right] \xi_n(z) = E_n \cdot \xi_n(z) \quad (5)$$

Giải phương trình Schrodinger một chiều này ta tìm được các mức năng lượng gián đoạn  $E_1, E_2, E_3, \dots$  ta được bức tranh vùng có các mức năng lượng theo phương z bị tách ra được gọi là các vùng con. Ta cần xác lập được dạng thể toàn phần  $V(z)$  tác dụng lên hạt điện tử do tất cả các nguồn tạo ra trên toàn trục z và giải phương trình (5) để tìm hàm sóng một chiều  $\xi_n(z)$  trên toàn bộ trục z.

## 2.2 Dẫn xuất các biểu thức toán học cho thể giam giữ V(z)

Để xác định phân bố điện tử, ta phải xác định hàm sóng đặc trưng cho hệ. Trước khi xác định hàm sóng ta phải xác định các thể giam giữ.

### 2.2.1 Các thể giam giữ

Rào thế đặt ở mặt phẳng  $z = 0$  do có sự chênh lệch đáy vùng dẫn giữa MgZnO và ZnO hình thành nên thể rào cơ bản:

$$V_b(z) = V_0 \theta(-z), \quad (6)$$

với  $\theta(z)$  là hàm bước đơn vị và  $V_0 = 1.91x$  (eV) [5], x là hàm lượng Mg trong hợp kim  $Mg_xZn_{1-x}O$ .

Ta biết rằng do có phân cực tự phát và phân cực áp điện mà ở bề mặt dị chất tồn tại các điện tích hiệu ứng phân cực dương có nồng độ  $\sigma = 1.99 \times 10^{13} x$  ( $|e|/cm^2$ ) [2]. Các điện tích phân cực này tạo ra điện trường đồng nhất với thế.

$$V_\sigma(z) = \frac{2\pi}{\epsilon_a} e\sigma |z|, \quad (7)$$

với  $\epsilon_a$  là hằng số điện môi trung bình của  $Mg_xZn_{1-x}O$  và ZnO.

Vì thế có dạng tam giác nên hệ khí điện tử hai chiều trong vùng con thấp nhất được mô tả bởi hàm sóng Fang-Howard có bổ sung bởi Ando [6]:

$$\zeta(z) = \begin{cases} Ak^{1/2} e^{\kappa z/2}, & z < 0 \\ Bk^{1/2} (kz+c)e^{-kz/2}, & z > 0 \end{cases} \quad (8)$$

ở đây  $k, \kappa$  là các số sóng cần được xác định; A và B là các hệ số chuẩn hóa.

Hàm sóng trên sẽ được xác định khi cực tiểu hóa năng lượng ứng với một hạt và được xác định bởi Hamilton:

$$H=T+V_{\text{tot}}(z) \tag{9}$$

ở đây T là động năng và  $V_{\text{tot}}(z)$  là thế năng giam giữ hiệu dụng theo phương z. Thế năng hiệu dụng này bao gồm thế rào ( $V_b(z)$ ), thế bởi các điện tích phân cực ( $V_\sigma(z)$ ), thế Hartree ( $V_H(z)$ ) tạo bởi các donor, các hạt tải và thế tương quan trao đổi ( $V_{\text{ex}}(z)$ ):

$$V_{\text{tot}}(z) = V_b(z) + V_\sigma(z) + V_H(z) + V_{\text{ex}}(z). \tag{10}$$

Trong vùng điện tích không gian, thế Hartree được xác định theo phương trình Poisson:

$$\frac{d^2}{dz^2}V_H(z) = \frac{4\pi e^2}{\epsilon_a}[N_I(z) - n(z)], \tag{11}$$

trong đó  $N_I(z)$  là nồng độ ion tạp,  $n(z)$  là nồng độ điện tử. Với mẫu không pha tạp chủ đích thì  $N_I(z)$  xem như hằng số. Thế tương quan trao đổi thường có giá trị nhỏ nên ta có thể bỏ qua [7].

Nồng độ điện tử phân bố trong ZnO được xác định theo hàm sóng (8) bởi phương trình sau:

$$n(z) = n_s |\zeta(z)|^2 \tag{12}$$

Ta giải phương trình Poisson (11) với điều kiện biên là điện trường tương ứng với thế Hartree triệt tiêu ở vô cùng ta được các thế thành phần  $V_I(z)$  và  $V_s(z)$  [7] với:

$$V_H(z) = V_I(z) + V_s(z), \tag{13}$$

### 2.2.2 Tổng năng lượng của một điện tử ở vùng con thấp nhất

Theo phương pháp biến phân, năng lượng ứng với một điện tử ở trạng thái cơ bản sẽ là tổng các trung bình cơ học lượng tử ứng với trạng thái cơ bản đó như sau:

$$E(k) = \langle T \rangle + \langle V_b \rangle + \langle V_I \rangle + \langle V_s \rangle / 2 + \langle V_{\text{ex}} \rangle \tag{14}$$

Ta tính được chúng với các kết quả sau :

$$\langle T \rangle = -\frac{\hbar^2}{8m_z} [A^2 \kappa^2 + B^2 k^2 (c^2 - 2c - 2)], \tag{15}$$

$$\langle V_b \rangle = V_0 A^2, \tag{16}$$

$$\langle V_\sigma \rangle = \frac{2\pi e \sigma}{\epsilon_a} \left[ \frac{A^2}{\kappa} + \frac{B^2}{k} (c^2 + 4c + 6) \right], \tag{17}$$

$$\langle V_s \rangle \approx \frac{4\pi e^2 n_s}{\epsilon_a} \left[ \frac{A^4}{2\kappa} - \frac{A^2}{\kappa} + \frac{B^4}{4k} (2c^4 + 12c^3 + 34c^2 + 50c + 33) \right], \tag{18}$$

$$\langle V_I \rangle \approx \frac{4\pi e^2 N_I}{\epsilon_a} \left[ \frac{A^2}{\kappa} L_b - \frac{B^2}{k} L_c (c^2 + 4c + 6) \right], \tag{19}$$

với  $L_b$  và  $L_c$  tương ứng là bề rộng của MgZnO và ZnO.

### 3 KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

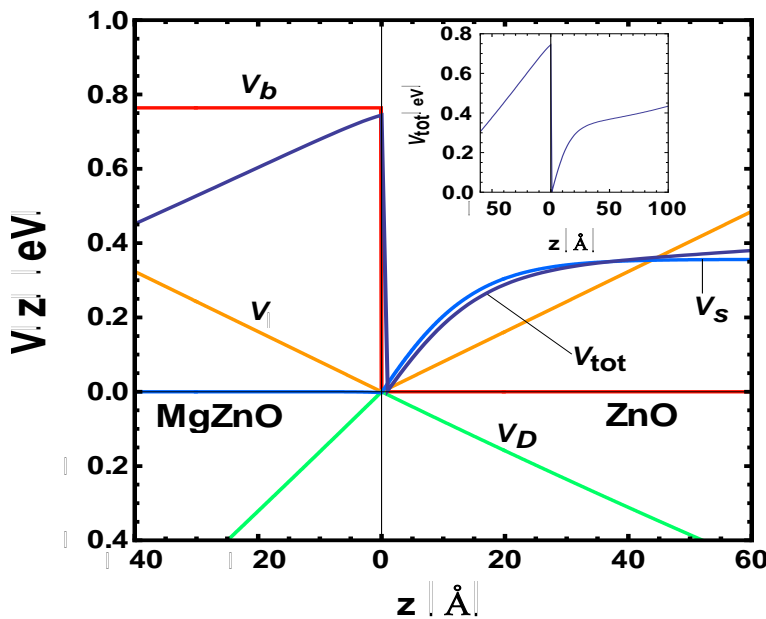
Với các kết quả giải tích ở trên, ta viết chương trình máy tính để mô phỏng dạng giếng thế và phân bố điện tử trong giếng ở trạng thái cơ bản (mô tả trạng thái điện của hệ) cho trường hợp phân cực O với các thông số nhập vào được trích từ các tài liệu tham khảo với các giá trị sau :

**Bảng 1: Các thông số nhập vào [5]**

Khối lượng hiệu dụng ( $m^*$ )	0.28 $m_e$
Hằng số điện môi trung bình ( $\epsilon_a$ )	$8.75 + 4.445x$

$m_e$  là khối lượng điện tử tự do

#### 3.1 Đồ thị biểu diễn dạng giếng thế giam giữ khí điện tử



**Hình 2: Đồ thị biểu diễn dạng giếng thế với các tham số:  $L_b = 1000$  (Å),**

$L_c = 500$  (Å),  $N_D = 8.10^{17}$  (cm<sup>-3</sup>),  $x = 0.4$ .

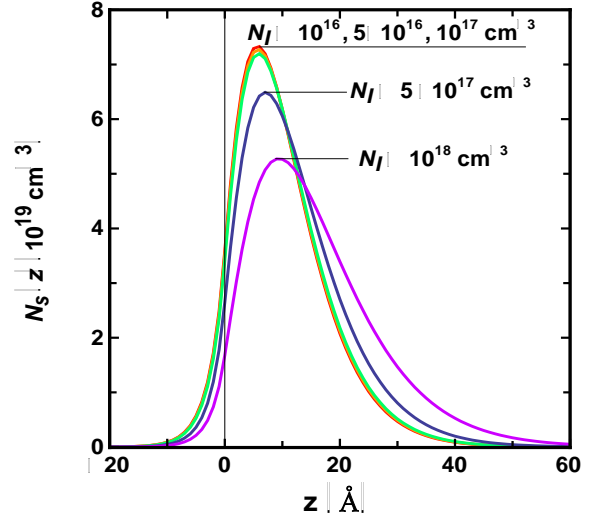
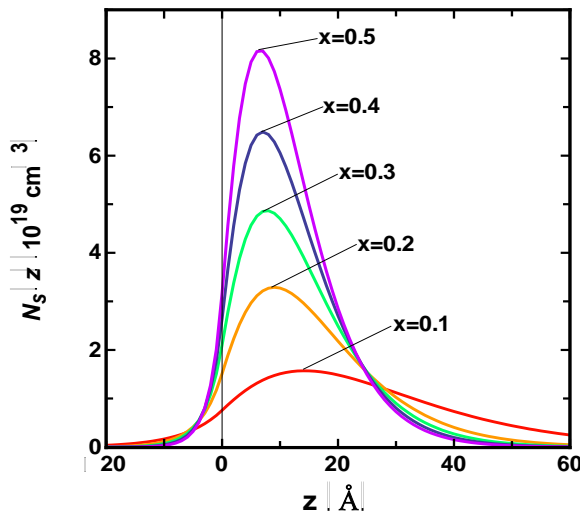
Rõ ràng, giếng thế tổng hợp các thế thành phần có dạng tam giác và rào có chiều cao hữu hạn [7, 8]. Các thế thành phần có các tính chất sau :

- Thế tạo bởi các ion tạp donor là thế kéo hệ điện tử ra xa rào.
- Thế tạo bởi các điện tích phân cực là thế hút các điện tử về phía rào.
- Thế tương tác của các electron là thế hút hệ điện tử về phía rào ở miền gần rào nhưng nó sẽ là thế đẩy ra xa rào khi hệ điện tử nó ở xa rào.

Vậy, vai trò giam giữ điện tử quan trọng của hệ này là thế rào do chênh lệch vùng dẫn của hai vật liệu và thế hút của các điện tích phân cực dương gần bề mặt. Dạng của giếng thế với hệ tương tự như hệ này ta thấy chúng luôn có dạng tam giác còn tính chất nông, sâu của chúng phụ thuộc vào hệ cụ thể với các tham số đặc vào cụ

thể khác nhau, một tham số rất quan trọng là hàm lượng Mg, x trong hợp kim  $Mg_xZn_{1-x}O$ .

### 3.2 Đồ thị biểu diễn phân bố điện tử trong giếng



**Hình 3(a):** Phân bố điện tử trong giếng với các tham số: thay đổi x và  $n_s$  với

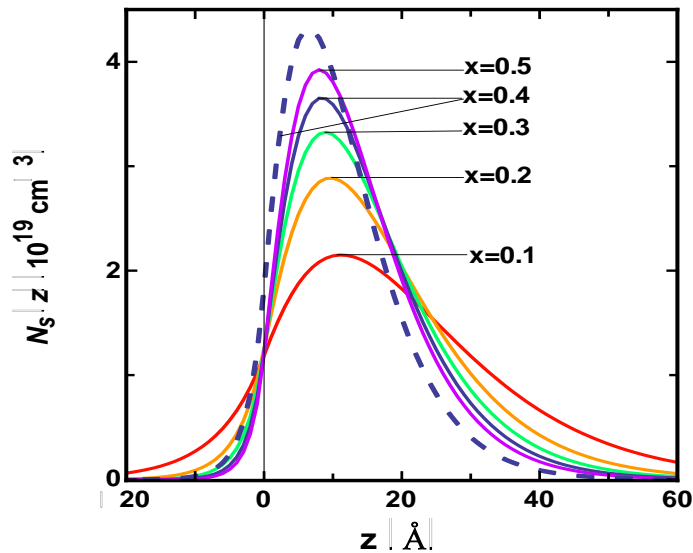
$$n_s = (0.48 + 1.99x) \times 10^{13} (cm^{-2}) [2], \text{ cố định:}$$

$$N_I = 5 \cdot 10^{17} (cm^{-3}), L_b = 1000 (\text{Å}), L_c = 500 (\text{Å}).$$

**Hình 3(b):** Phân bố điện tử trong giếng với các tham số: thay đổi  $N_I$ , cố định:

$$n_s = (0.48 + 1.99x) \times 10^{13} (cm^{-2}) [2], x = 0.4,$$

$$L_b = 1000 (\text{Å}), L_c = 500 (\text{Å}).$$



**Hình 4 :** Phân bố điện tử trong giếng với các tham số: cố định  $n_s = 8 \times 10^{12} (cm^{-2})$ ,

$$N_I = 5 \cdot 10^{17} (cm^{-3}), L_b = 1000 (\text{Å}), L_c = 500 (\text{Å}) \text{ và thay đổi } x. \text{ Đường nét đứt ứng với } N_I = 0.$$

Từ các hình 3 và hình 4 ta thấy rằng điện tử phân bố trong giếng gần chỗ tiếp giáp dị chất với khoảng phân bố tương đối hẹp (khoảng vài nanomet), chúng thể hiện tính chất của khí điện tử hai chiều (chính xác là giả hai chiều).

Tất cả các hình 3 và hình 4 đều cố định bề dày của hai lớp vật liệu ( $L_b = 1000 (\text{Å}), L_c = 500 (\text{Å})$ ).

- Ở hình 3(a) ta thấy rằng với việc cố định nồng độ donor nhưng thay đổi hàm lượng Mg trong hợp kim và nồng độ  $n_s$  thì phân bố điện tử sẽ tập trung gần bề mặt và hướng về mặt phân cách hơn khi hàm lượng hợp kim tăng, điều này là do khi hàm lượng Mg tăng thì giếng hẹp hơn.
- Ở hình 3(b) ta thấy rằng với việc cố định hàm lượng Mg nhưng thay đổi nồng độ donor, với nồng độ donor tăng, phân bố điện tử bị lệch ra xa tiếp giáp dị chất bởi tâm khối điện tử gần tâm donor bên lớp ZnO hơn.
- Trong hình 4 ta thấy rằng với việc cố định nồng độ donor nhưng thay đổi hàm lượng Mg trong hợp kim và không thay đổi nồng độ  $n_s$  thì phân bố điện tử sẽ tập trung gần bề mặt và hướng về mặt phân cách hơn khi hàm lượng hợp kim tăng giống như 3(a) nhưng sự dịch chuyển yếu hơn. Nếu nồng độ donor không đáng kể ( $N_D = 0$ ) thì phân bố điện tử nằm gần mặt phân cách hơn vì không có vai trò hút của các tâm donor.

#### 4 KẾT LUẬN

Chúng tôi đã thiết lập được mô hình giam giữ lượng tử cho hệ điện tử trong giếng lượng tử tạo bởi cấu trúc dị chất đơn MgZnO/ZnO theo phương pháp biến phân. Từ đó, chúng tôi khảo sát ảnh hưởng của các tham số đặc trưng của cấu trúc lên sự phân bố của hệ khí điện tử hai chiều trong giếng. Những kết quả này sẽ có ý nghĩa rất quan trọng trong việc giải thích tính chất của độ linh động bị ảnh hưởng như thế nào với các mẫu dị chất có các cấu trúc khác nhau. Từ đó, xác định được phẩm chất của vật liệu để tối ưu cho việc phát triển linh kiện quang điện tử.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. J. Pearton, J. C. Zolper, R. J. Shul, and F. Ren, *J. Appl. Phys.* 86, 1 (1999).
- [2] Mitsuaki Yano et al, *Journal of Crystal Growth*, 301–302, 353 (2007).
- [3] H. Tampo et al, *Journal of Crystal Growth*, 301–302, 358 (2007).
- [4] D. C. Look, *Semicond. Sci. Technol.*, 20, S55 (2005).
- [5] A. Ohtomo et al, *Appl Phys Lett.* 75, 980 (1999).
- [6] T. Ando, *J. Phys. Soc. Jpn.* 51, 3893 (1982).
- [7] D. N. Quang et al, *Phys Rev. B.* 74, 205312 (2006).
- [8] L. Tuan and N. T. Tien, *Eleventh Vietnamese-German Seminar on Physics and Engineering* (2008).