

# ĐỘ LINH ĐỘNG CỦA KHÍ ĐIỆN TỬ HAI CHIỀU TỒN TẠI TRONG MgZnO/ZnO CÓ CÁC CẤU HÌNH TẠP KHÁC NHAU

Nguyễn Thành Tiên<sup>1</sup>, Nguyễn Thị Kim Ngân<sup>1</sup> và Đặng Hoàng Phương<sup>2</sup>

## ABSTRACT

*The mobility of the two-dimensional electron gas exists in the heterostructures is governed by many factors. One of them is the doping profile. The doping profile not only control the distribution of the two-dimensional electron gas but also affect their mobility. The doping is the general way to make the electron system for samples. However, the non-doping MgZnO/ZnO heterostructures also exist the high density electron gas system by their polar property. We investigate the impact of the doping profiles (uniform, modulation, and delta form) on the electron gas distributions and the mobility of the electron in the quantum wells are created by the MgZnO/ZnO heterostructures.*

**Keywords:** *Nano physics, quantum well, two-dimensional electron gas, mobility, heterostructure, doping profile*

**Title:** *The mobility of the two-dimensional electron gas exists in the MgZnO/ZnO heterostructures with the various doping profiles*

## TÓM TẮT

*Độ linh động của khí điện tử hai chiều (2DEG) tồn tại trong các cấu trúc dị chất chịu sự chi phối bởi nhiều yếu tố. Một trong những yếu tố đó là cấu hình tạp của chúng. Cấu hình tạp không những chi phối sự phân bố khí điện tử trong giếng lượng tử của cấu trúc dị chất mà nó còn ảnh hưởng đến độ linh động của khí điện tử. Để có hệ hạt tải hai chiều tồn tại trong cấu trúc dị chất có nồng độ cao người ta thường pha tạp cho hệ. Tuy nhiên, với hệ vật liệu MgZnO/ZnO không cần pha tạp, hệ điện tử tồn tại trong hệ vẫn có nồng độ cao do đặc tính phân cực của chúng. Chúng tôi đánh giá ảnh hưởng của các cấu hình tạp khác nhau (đồng đều, điều biến và dạng delta) lên sự phân bố khí điện tử và độ linh động điện tử tồn tại trong các giếng lượng tử tạo bởi các cấu trúc dị chất MgZnO/ZnO khác nhau.*

**Từ khóa:** *Vật lý nano, giếng lượng tử, khí điện tử hai chiều, độ linh động, cấu trúc dị chất, cấu hình tạp*

## 1 ĐẶT VẤN ĐỀ

Nghiên cứu các hệ vật liệu mới với các cấu trúc mới là lĩnh vực rất được quan tâm nghiên cứu hiện nay cả ở trong và ngoài nước với nhiều cách tiếp cận khác nhau: lý thuyết, thực nghiệm hay mô hình hóa. Các cấu trúc bán dẫn thấp chiều với kích thước cỡ nanometer đã được quan tâm nghiên cứu rộng rãi vì những ưu việt của nó so với cấu trúc bán dẫn khối truyền thống, các linh kiện quang điện tử hoạt động dựa trên các cấu trúc mới này có nhiều tính năng vượt trội như tiêu tốn ít năng lượng, tốc độ hoạt động nhanh và kích thước nhỏ. Việc nghiên cứu các tính chất vật lý cơ bản liên quan đến hệ điện tử trong cấu trúc là rất cần thiết. Các vật liệu bán dẫn như Si, Ge, GaAs,... được xem như là các vật liệu bán dẫn truyền thống,

<sup>1</sup> Khoa Khoa Học Tự Nhiên - Trường Đại học Cần Thơ, <sup>2</sup>Học viện cao học - Trường Đại Học Cần Thơ.

đã có nhiều công trình nghiên cứu về chúng. Gần đây, oxit kẽm (ZnO) là vật liệu rất được quan tâm nghiên cứu để sản xuất các linh kiện quang điện tử với kích thước cỡ nanometer bởi các nguyên nhân sau:

- ZnO là chất bán dẫn vùng cấm thẳng có bề rộng vùng cấm lớn (cỡ 3,4 eV) và năng lượng liên kết exciton lớn (cỡ 60 meV). Ngoài ra, ZnO có thể tổ hợp với các vật liệu khác như Mg, Cd... để tạo ra các hợp chất nhiều thành phần với bề rộng vùng cấm có thể điều chỉnh được (từ 3.0 đến 4 eV). Đây là những đặc tính đặc biệt của vật liệu đã được phát hiện gần đây.
- ZnO có tiềm năng ứng dụng quan trọng trong việc chế tạo các linh kiện quang điện tử hoạt động ở vùng ánh sáng xanh hoặc tử ngoại, được sử dụng trong công nghệ bán dẫn hiện đại (đặc biệt chế tạo các màn hình phẳng và tranzito hiệu ứng trường).

Các cấu trúc thấp chiều thiết kế trên ZnO có thể ở dạng chấm lượng tử, dây lượng tử hay giếng lượng tử với các công nghệ nuôi cấy tinh thể hiện đại. Khi cấu trúc mới được hình thành, các tính chất vật lý của chúng cần được khảo sát. Với cấu trúc giếng lượng tử, một trong những tính chất vật lý quan trọng được xem là đặc trưng cho phẩm chất linh kiện là độ linh động hệ điện tử hình thành trong giếng. Độ linh động của hệ điện tử càng cao thì linh kiện hoạt động dựa trên hệ điện tử này có phẩm chất càng tốt. Độ linh động của hệ điện tử hình thành trong hệ chịu sự chi phối bởi nhiều yếu tố cấu thành hệ. Một trong những yếu tố đó là cấu hình tạp. Hệ có các cấu hình tạp khác nhau sẽ làm cho sự phân bố điện tử và sự tán xạ điện tử trong hệ là khác nhau, nó có ảnh hưởng khác nhau đến độ linh động điện tử.

Các tác giả Nguyen Thanh Tien, *et al* đã khảo sát hiệu ứng giam cầm phân cực lên hệ điện tử cho vật liệu ZnO [1] với cấu trúc là giếng lượng tử bề mặt bằng phương pháp giải tích và tính số. Gần đây, các tác giả Doan Nhat Quang, *et al* đã tìm ra sự tồn tại hai cơ chế tán xạ mới là thẳng giáng nồng độ donor ở bề mặt nhám trong cấu trúc Không khí/ZnO [2] và tán xạ bởi các điện tích áp điện phân bố ngẫu nhiên trên bề mặt nhám [3] trong các cấu trúc dị chất. Hai tác giả Le Tuan và Nguyen Thanh Tien đã khảo sát độ linh động của khí điện tử tồn tại trong  $Zn_{1-x}Mg_xO/ZnO$  với hai hướng nuôi phân cực O và phân cực Zn trong hệ không pha tạp [4].

Bài báo này muốn phân tích, so sánh các nhân tố ảnh hưởng đến độ linh động của khí điện tử hai chiều tồn tại trong các cấu trúc dị chất đơn dựa trên hệ vật liệu ( $Mg_xZn_{1-x}O/ZnO$ ) với ba cấu hình tạp: tạp nền đồng đều (background impurity), pha tạp điều biến (modulation doping) và tạp dạng delta (delta doping) ở nhiệt độ thấp và trong trường thấp<sup>1</sup> với phương pháp tính toán giải tích biến phân và tính số mà còn ít nghiên cứu trước đây.

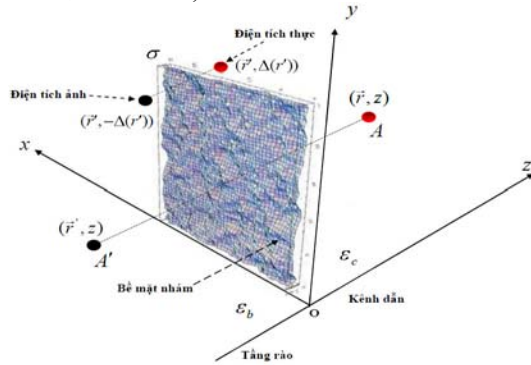
Bài báo được trình bày với ba phần cơ bản: phần đầu trình bày mô hình vật lý của hệ nghiên cứu, phần hai trình bày các kết quả tính toán giải tích liên quan đến phân bố khí điện tử trong giếng và độ linh động của hệ điện tử, phần ba là các kết quả tính số và thảo luận các kết quả này, phần cuối cùng là kết luận.

<sup>1</sup> Khi hệ ở nhiệt độ cao thì độ linh động của điện tử bị chi phối chủ yếu bởi tán xạ phonon, hệ đặt trong trường cao điện tử chuyển động với vận tốc bão hòa không còn hiện tượng trôi, không là cơ sở để phát triển transistor.

## 2 MÔ HÌNH VẬT LÝ CỦA HỆ NGHIÊN CỨU

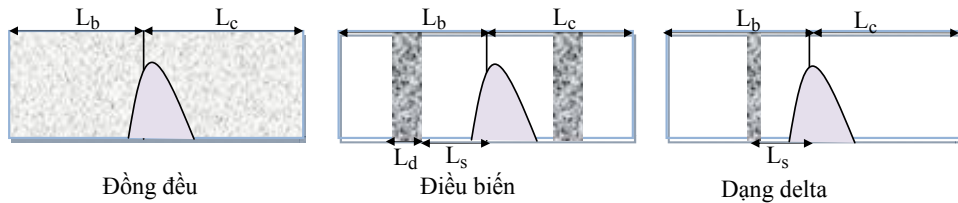
### 2.1 Mô hình vật lý của các hệ nghiên cứu

Sử dụng kỹ thuật nuôi epitaxy chùm phân tử (MBE) để nuôi  $Mg_xZn_{1-x}O/ZnO$  hướng đến ứng dụng cho các linh kiện quang điện tử đã được nghiên cứu nhiều. 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. Với hệ vật liệu  $Mg_xZn_{1-x}O/ZnO$ , có đặc tính phân cực cao, điện tích hiệu ứng phân cực tồn tại ở tiếp giáp dị chất đã được mô tả trong [4,5] cho trường hợp tạp nền đồng đều nồng độ thấp. Ta biết rằng bề mặt dị chất luôn là bề mặt nhám và có sự chênh lệch hằng số điện môi giữa hai lớp vật liệu (minh họa ở hình 1)



Hình 1: Mô hình hệ nghiên cứu thể hiện bề mặt nhám ở tiếp giáp dị chất.

Trong các nghiên cứu trước đây chỉ tập trung phân tích cho cấu hình tạp đồng đều tương ứng với tạp tồn tại không mong muốn trong mẫu [6]. Bài báo này phân tích thêm với tạp pha điều biến và tạp dạng delta [7]. Các cấu hình tạp được minh họa ở hình 2.



Hình 2: Các cấu hình tạp nghiên cứu

### 2.2 Dẫn xuất các biểu thức toán học xác định thế giam giữ, phân bố điện tử và độ linh động

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

#### 2.2.1 Các thế giam giữ

Rào thế cơ bản đặt ở mặt phẳng  $z = 0$  do có sự chênh lệch đáy vùng dẫn giữa  $MgZnO$  và  $ZnO$  khi chúng ghép lại với nhau là

$$V_b(z) = V_0\theta(-z), \tag{6}$$

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 [4]. Các điện tích phân cực này tạo ra điện trường đồng nhất với thể

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

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

Với thể cơ bản có dạng tam giác như vừa đề cập thì hệ khí điện tử hai chiều ở vùng con thấp nhất được mô tả bởi hàm sóng Fang-Howard bổ sung bởi Ando [8]:

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

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:

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

Ở đây T là động năng và  $V_{tot}(z)$  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 ( $V_{ex}(z)$ ):

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

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

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

trong đó,  $N_I(z)$  là nồng độ ion tạp ba chiều hay là phân bố của các ion tạp theo phương nuôi mẫu,  $N_s(z)$  là nồng độ điện tử ba chiều, cũng là phân bố của các điện tử theo phương nuôi mẫu.

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

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

trong đó,  $n_s$  là mật độ điện tử mặt. Ta giải phương trình Poisson (11) với các điều kiện biên phù hợp 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 tương ứng 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:

$$E(k, \kappa) = \langle T \rangle + \langle V_b \rangle + \langle V_\sigma \rangle + \langle V_l \rangle + \langle V_s \rangle / 2 + \langle V_{ex} \rangle. \tag{14}$$

Ta tính được chúng với các kết quả sau :

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

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

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

Tùy thuộc vào cấu hình tạp mà biểu thức của  $\langle V_l \rangle$  và  $\langle V_s \rangle$  tính được sẽ có dạng khác nhau như sau:

- i) Dạng đồng đều : tham khảo [4]
- ii) Dạng điều biến :

$$\langle V_l \rangle = \frac{4\pi e^2}{\epsilon_a} \left\{ \begin{array}{l} \frac{n_l A^2}{\kappa(d-s)} (e^{-s} - e^{-d} - d + s) - \frac{n_l s^2}{2\kappa(d-s)} + \frac{P n_l B^2}{2k(v-u)} [e^{-u} (24 + 12c + 2c^2 + u(12 + 4c) + 2u^2)] \\ - e^{-v} (24 + 12c + 2c^2 + v(12 + 4c) + 2v^2)] + \frac{n_l B^2}{k} (6 + 4c + c^2) \end{array} \right\}$$

và

$$\langle V_s \rangle = \frac{4\pi e^2}{\epsilon_a} n_s \left[ \frac{B^4}{4k} (2c^4 + 12c^3 + 30c^2 + 50c + 33) + \frac{B^2}{k} (c^2 + 2c + 2) - \frac{A^4}{2\kappa} + \frac{A^2}{\kappa} \right] \tag{18}$$

với  $u = \kappa L_s$ ,  $d = \kappa L_d$ ,  $s = \kappa L_s$  và P là thông số xác định vùng pha tạp (một bên P=0 và hai bên P=1).

- iii) Dạng delta là trường hợp riêng của dạng điều biến khi kích thước phân bố tạp rất bé.

$\langle V_{ex} \rangle$  thường có giá trị rất nhỏ, có thể được bỏ qua [1,2,3,4,5].

2.2.3 Độ linh động

Độ linh động của hệ điện tử được tính theo phương pháp gần đúng thời gian vận chuyển tuyến tính [9]. Với hệ điện tử tồn tại trong các cấu trúc dị chất ở nhiệt độ thấp, ba cơ chế tán xạ chi phối độ linh động của hệ là tán xạ bởi tạp (BI), bất trật tự hợp kim (AD) và nhám bề mặt phân cực (PSR). Thông thường, tán xạ bởi tạp thì nhỏ vì các mẫu được xử lý nhiệt, ta có thể bỏ qua, đặc biệt với hệ pha tạp điều biến và dạng delta, vùng phân bố tạp càng xa hệ điện tử tồn tại nên tán xạ bởi tạp càng nhỏ [2,3,4].

3 KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Với các kết quả giải tích ở trên, ta viết chương trình máy tính để mô phỏng phân bố điện tử trong giếng ở trạng thái cơ bản (mô tả trạng thái điện của hệ) và tính độ

linh động cho từng trường hợp 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 ( $\epsilon_a$ )	$8.75 + 4.445x$

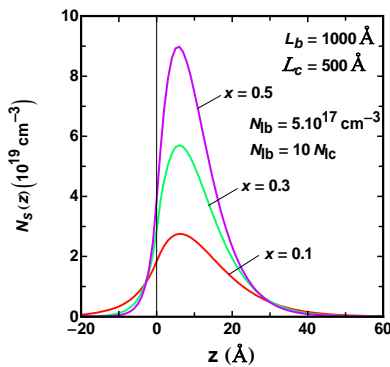
*m<sub>e</sub> là khối lượng điện tử tự do*

**3.1 Đồ thị biểu diễn phân bố điện tử trong giếng**

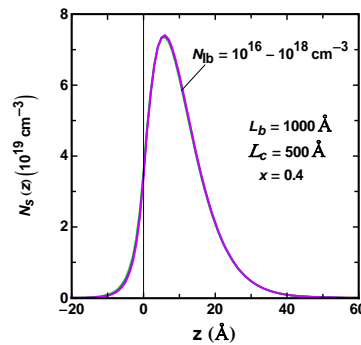
Dựa vào các mẫu thực nghiệm với một số tham số vật lý đã được xác định, chúng tôi khảo sát sự phân bố khí điện tử và độ linh động theo sự thay đổi của một tham số và cố định các tham số kia ứng với các khoảng giá trị thực nghiệm đã đo được của các mẫu có các cấu hình tạp khác nhau.

*3.1.1 Tạp nền đồng đều*

Từ hình 3(a) và 3(b) ta thấy rằng, với dạng tạp nền phân bố đồng đều, nếu ta cố định cấu hình tạp, thay đổi hàm lượng hợp kim thì phân bố điện tử càng tiến gần rào, điều này được giải thích rằng do  $x$  càng lớn, giếng thế càng sâu cùng với nồng độ điện tích bề mặt hiệu ứng phân cực càng lớn nên phân bố điện tử bị dịch chuyển mạnh về phía rào. Ngược lại, phân bố điện tử không thay đổi nhiều khi ta cố định  $x$  nhưng thay đổi nồng độ tạp, bởi vì tạp nền phân bố đồng đều nên nó không ảnh hưởng cục bộ lên phân bố điện tử.



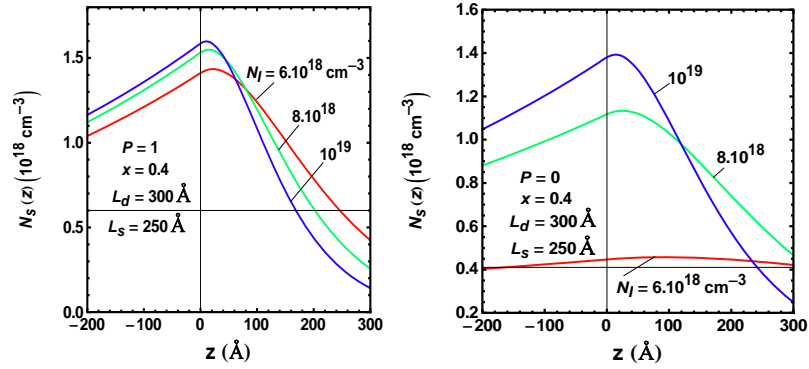
**Hình 3(a) : Phân bố điện tử trong giếng với thay đổi  $x$ , cố định:  $N_b$ ,  $L_b$ ,  $L_c$ .**



**Hình 3(b): Phân bố điện tử trong giếng với thay đổi  $N_b$ , cố định:  $x$ ,  $L_b$ ,  $L_c$ .**

*3.1.2 Tạp điều biến*

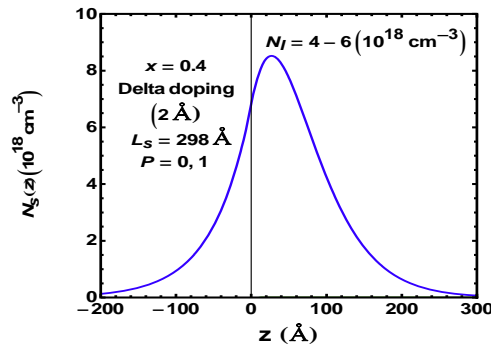
Với trường hợp tạp pha điều biến (Hình 4), nếu ta cố định hàm lượng Mg, nhưng thay đổi nồng độ tạp thì phân bố khí điện tử thay đổi đáng kể, sự thay đổi này theo hướng các donor tăng cường hút khí điện tử về phía nó khi nồng độ donor tăng lên cho trường hợp pha tạp một bên và có hiện tượng co kéo khí pha tạp hai bên.



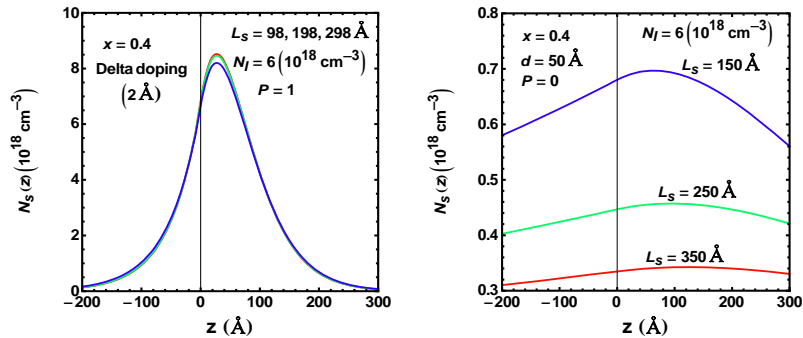
Hình 4 : Phân bố điện tử trong giếng với các tham số: cố định  $x, L_d, L_s$  và thay đổi  $N_I$ . Hình trái cho trường hợp pha tạp hai bên ( $P=1$ ) và hình phải là pha tạp một bên ( $P=0$ )

3.1.3 Tạp dạng delta

Với trường hợp pha tạp dạng delta, phân bố khí điện tử hầu như không thay đổi khi ta thay đổi nồng độ tạp cho cả hai trường hợp pha tạp một bên và pha tạp hai bên (hình 5) khi cho phân bố tạp nằm rất xa rào ( $L_s=298 \text{ \AA}$ ). Từ hình 6, ta cũng ghi nhận được rằng, phân bố điện tử thay đổi lớn khi thay đổi vị trí vùng phân bố tạp ứng với trường hợp pha tạp một bên. Ngược lại, với trường hợp pha tạp hai bên thì phân bố điện tử ít thay đổi.



Hình 5 : Phân bố điện tử trong giếng với các tham số: cố định  $x, L_d, L_s$  và thay đổi  $N_I$  cho cả hai trường hợp pha tạp delta một bên và hai bên



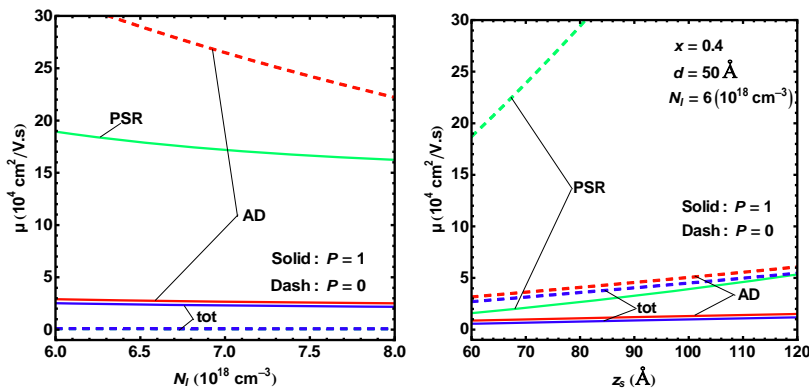
Hình 6 : Phân bố điện tử trong giếng với các tham số: cố định  $x, N_I, L_d$  và thay đổi  $L_s$ . Hình trái cho trường hợp pha tạp delta hai bên ( $P=1$ ) và hình phải là pha tạp điều biến một bên ( $P=0$ )

### 3.2 Đồ thị biểu diễn độ linh động điện tử

Như đã đề cập ở phần trên, với hệ điện tử tồn tại trong mẫu ở nhiệt độ thấp thì tán xạ bởi các ion tạp có thể bỏ qua. Các đồ thị sau đây tôi chỉ khảo sát hai cơ chế tán xạ quan trọng chi phối độ linh động điện tử trong hệ (mất trật tự hợp kim -AD và nhám bề mặt phân cực -PSR).

#### 3.2.1 Tạp điều biến

Từ hình 7 ta thấy rằng độ linh động riêng AD và PSR đều giảm khi tăng nồng độ tạp ứng với cả hai trường hợp pha tạp một bên và pha tạp hai bên; ta cũng thấy rằng, trường hợp pha tạp một bên có sự giảm mạnh hơn pha tạp hai bên. Điều này được giải thích rằng khi tăng nồng độ tạp, trong cả hai trường hợp khí điện tử luôn bị kéo về phía rào (Hình 4 - pha tạp một bên kéo mạnh hơn). Ngược lại, độ linh động riêng AD và PSR đều tăng khi tăng khoảng cách từ rào đến vùng phân bố tạp ứng với cả hai trường hợp pha tạp một bên và pha tạp hai bên, trường hợp pha tạp một bên có sự tăng mạnh hơn pha tạp hai bên. Điều này được giải thích rằng khi tăng nồng độ tạp, trong cả hai trường hợp khí điện tử luôn bị dịch ra xa rào (Hình 4 - pha tạp một bên dịch mạnh hơn). Cả hai trường hợp, độ linh động điện tử đều bị chi phối bởi tán xạ AD và PSR nhưng tán xạ PSR chi phối mạnh hơn.

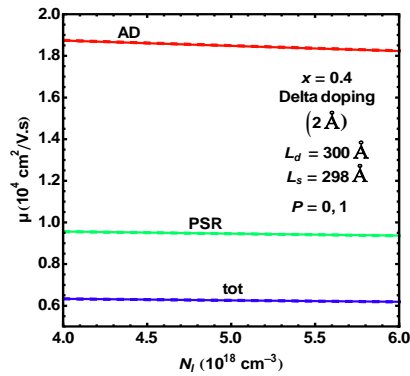


Hình 7 : Độ linh động điện tử vẽ theo  $N_I$  (hình trái) và vẽ theo  $L_s$  (hình phải) với cố định các tham số khác ứng với hai trường hợp pha tạp hai bên ( $P=1$ ) và pha tạp một bên ( $P=0$ )

#### 3.2.2 Tạp dạng delta

Với trường hợp tạp pha dạng delta thì độ linh động được ghi nhận hầu như không thay đổi khi ta thay đổi nồng độ tạp cho cả hai trường hợp pha tạp một bên và hai bên (Hình 8). Điều này cũng phù hợp với sự phân bố điện tử được ghi nhận hầu như không thay đổi khi ta thay đổi nồng độ tạp. Vậy ta có nhận xét rằng, cấu hình tạp dạng delta không ảnh hưởng nhiều đến tán xạ AD và PSR mà nó chỉ có vai trò quan trọng là làm giảm tán xạ bởi tạp (BI) do ta đưa vùng tạp ra xa khu vực phân bố điện tử như đã biết trong nhiều công bố trước đây.





Hình 8: Độ linh động điện tử vẽ theo  $N_D$  với cố định các tham số khác ứng với hai trường hợp pha tạp hai bên ( $P=1$ ) và pha tạp một bên ( $P=0$ )

#### 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  $\text{MgZnO}/\text{ZnO}$  theo phương pháp biến phân. Từ đó, chúng tôi khảo sát, so sánh ảnh hưởng của các tham số đặc trưng cho các cấu hình tạp khác nhau lên sự phân bố của hệ khí điện tử và độ linh động điện tử trong giếng. Những kết quả này sẽ có ý nghĩa quan trọng trong việc giải thích độ linh động bị ảnh hưởng như thế nào với các mẫu vật liệu dị chất có các cấu hình tạp khác nhau. Từ đó, chúng ta xác định được phẩm chất của các cấu trúc để tối ưu cho việc phát triển các linh kiện quang điện tử.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyen Thanh Tien, Le Tuan, Doan Nhat Quang, Quantum confinement in Gaussian heavily-doped ZnO surface quantum well, Communication in Physics, (2008).
- [2] Doan Nhat Quang, Le Tuan, Nguyen Thanh Tien, Electron scattering from roughness-induced fluctuations in the donor density in ZnO surface quantum well, Journal of Applied Physics, 107, 123709, (2010).
- [3] Doan Nhat Quang, Nguyen Huyen Tung, Nguyen Thanh Tien, Electron scattering from polarization charges bound on rough interface of polar heterostructures, Journal of Applied Physics, 109, 113711, (2011).
- [4] Le Tuan, Nguyen Thanh Tien, Electron scattering due to polarization charges bound on a rough interface in  $\text{ZnO}/\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$  heterostructures, The 5<sup>th</sup> South East Asian Technical University Consortium Symposium, ISSN 1882-5796, 457, (2011).
- [5] Nguyễn Thành Tiên, Trần Yến Mi, Thế giam cầm 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, Tạp chí khoa học Trường Đại Học Cần Thơ, 16a, 7, (2010).
- [6] A. Tsukazaki, A. Ohtomo, M. Nakano, and M. Kawasaki, Photoinduced insulator-to-metal transition in  $\text{ZnO}/\text{Mg}_{0.15}\text{Zn}_{0.85}\text{O}$  Heterostructures, Applied Physics Letters, 92, 052105, (2008).
- [7] Kazuto KOIKE, Kenji HAMA, Ippei NAKASHIMA, Shigehiko SASA, Masataka INOUE, and Mitsuaki YANO, Molecular Beam Epitaxial Growth of Al-doped ZnMgO Alloy Films for Modulation-doped ZnO/ZnMgO Heterostructures, Japanese Journal of Applied Physics, 44, 3822, (2005).
- [8] T. Ando, Self-Consistent Results for a GaAs/AlxGa1-xAs Heterojunction II Low Temperature Mobility, Journal of the Physical Society of Japan, 51, 3900, (1982).
- [9] T. Ando, A. B. Fowler, and F. Stern, Electronic properties of two-dimensional systems, Reviews of Modern Physics, 54, 437 (1982).