

ĐẠI HỌC HUẾ  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM

PHẠM TUẤN VINH

NGHIÊN CỨU CỘNG HƯỞNG  
ELECTRON-PHONON VÀ CỘNG HƯỞNG  
TỪ-PHONON TRONG GIẾNG LƯỢNG TỬ

Demo Version - Select.Pdf.SDK

LUẬN ÁN TIẾN SĨ VẬT LÝ

Huế, 2021

ĐẠI HỌC HUẾ  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM

PHẠM TUẤN VINH

NGHIÊN CỨU CỘNG HƯỞNG  
ELECTRON-PHONON VÀ CỘNG HƯỞNG  
TỪ-PHONON TRONG GIẾNG LƯỢNG TỬ

**Demo Version - Select.Pdf SDK**

Chuyên ngành: Vật lý lý thuyết và Vật lý toán  
Mã số: 9 44 01 03

LUẬN ÁN TIẾN SĨ VẬT LÝ

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC

PGS. TS. LÊ ĐÌNH  
PGS. TS. LƯƠNG VĂN TÙNG

Huế, 2021

## LỜI CAM ĐOAN

*Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi, các số liệu và kết quả nghiên cứu nêu trong luận án là trung thực, được các đồng tác giả cho phép sử dụng và chưa từng được công bố trong bất kỳ một công trình nghiên cứu nào khác.*

*Huế, tháng 12 năm 2021*

Tác giả luận án

**Demo Version - Select.Pdf SDK** Phạm Tuấn Vinh

## LỜI CẢM ƠN

Hoàn thành luận án này, tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc nhất đến PGS.TS. Lê Đình và PGS.TS. Lương Văn Tùng. Đây là những người thầy đã tận tình dạy dỗ, hướng dẫn và giúp đỡ tác giả trong suốt quá trình học tập cũng như nhiều đóng góp quý báu để tác giả hoàn thành luận án. Qua đây, tác giả cũng gửi lời tri ân đến GS. TS. Trần Công Phong người đã dẫn dắt và truyền nhiệt huyết để tác giả vào hướng nghiên cứu này. Xin chân thành cảm ơn PGS. TS. Huỳnh Vĩnh Phúc là một người anh, người thầy đã động viên để tác giả hoàn thiện bản thân như hôm nay.

Xin chân thành cảm ơn Ban Giám hiệu, Khoa Vật lý và phòng Sau đại học của Trường Đại học Sư phạm - Đại học Huế; Ban đào tạo Sau đại học, Ban Giám đốc Đại học Huế đã tạo mọi điều kiện tốt nhất để tác giả được học tập, nghiên cứu và hoàn thành luận án này.

Tác giả cũng xin gửi lời cảm ơn đến Ban giám hiệu Trường Đại học Đồng Tháp đã tạo mọi điều kiện thuận lợi về thời gian và kinh phí để tác giả học tập nâng cao trình độ chuyên môn và hoàn thành luận án. Cảm ơn quý Thầy, Cô, và các đồng nghiệp trong và ngoài khoa Sư phạm Khoa học Tự nhiên đã động viên tác giả trong suốt quá trình nghiên cứu và thực hiện luận án.

Đây cũng là cả một sự cố gắng thầm lặng, thông cảm và lâu dài của những thành viên thân yêu trong gia đình nhỏ; xin cảm ơn rất rất nhiều vì tất cả. Luận án được hoàn thành tại Bộ môn Vật lý lý thuyết, Khoa Vật lý của Trường Đại học Sư phạm, Đại học Huế./.

Tác giả luận án

**Phạm Tuấn Vinh**

# MỤC LỤC

Lời cam đoan . . . . .	i
Lời cảm ơn . . . . .	ii
Mục lục . . . . .	iii
Danh mục các từ viết tắt . . . . .	vi
Danh mục một số kí hiệu . . . . .	vii
Danh mục các hình vẽ . . . . .	viii
PHẦN MỞ ĐẦU . . . . .	1
PHẦN NỘI DUNG . . . . .	8
Chương 1. Tổng quan về đối tượng và phương pháp nghiên cứu . . . . .	8
1.1 Tổng quan về bán dẫn thấp chiều và giếng lượng tử . . . . .	8
1.1.1 Bán dẫn thấp chiều . . . . .	8
1.1.2 Cấu trúc giếng lượng tử . . . . .	9
1.1.3 Hàm sóng và phổ năng lượng của electron trong giếng lượng tử với thế giam giữ bất kỳ . . . . .	10
1.1.4 Hàm sóng và phổ năng lượng của electron trong giếng lượng tử khi có mặt từ trường . . . . .	11
1.1.5 Giếng lượng tử thế tam giác . . . . .	12
1.1.6 Giếng lượng tử thế hyperbol bất đối xứng đặc biệt . . . . .	13
1.2 Tổng quan về phương pháp toán tử chiếu . . . . .	14
1.2.1 Hamiltonian của hệ electron tương tác với phonon . . . . .	16
1.2.2 Biểu thức giải tích của tenxơ độ dẫn khi có trường sóng điện từ đặt vào hệ . . . . .	18
1.2.3 Biểu thức tenxơ độ dẫn và công suất hấp thụ tuyến tính . . . . .	21
1.2.4 Biểu thức tenxơ độ dẫn và công suất hấp thụ phi tuyến . . . . .	24

1.3	Phương pháp hàm Green biểu diễn qua lý thuyết nhiễu loạn . . .	28
1.3.1	Lý thuyết nhiễu loạn phụ thuộc thời gian . . . . .	28
1.3.2	Xác suất dịch chuyển dưới ảnh hưởng của nhiễu loạn . . .	29
1.3.3	Tương tác electron-phonon-photon . . . . .	31
1.3.4	Xác suất dịch chuyển và hệ số hấp thụ quang từ khi có mặt từ trường biểu diễn qua hàm Green . . . . .	33
1.4	Phương pháp profile . . . . .	36

**Chương 2. Cộng hưởng electron-phonon trong giếng lượng tử thể  
tam giác 38**

2.1	Công suất hấp thụ tuyến tính và phi tuyến trong giếng lượng tử thể tam giác . . . . .	38
2.1.1	Biểu thức công suất hấp thụ tuyến tính . . . . .	38
2.1.2	Biểu thức công suất hấp thụ phi tuyến . . . . .	44
2.2	Kết quả tính số và thảo luận . . . . .	47
2.2.1	Điều kiện cộng hưởng ODEPR . . . . .	47
2.2.2	Sự phụ thuộc công suất hấp thụ và độ rộng vạch phổ vào điện trường . . . . .	49
2.2.3	Sự phụ thuộc công suất hấp thụ và độ rộng vạch phổ vào nhiệt độ . . . . .	50

**Chương 3. Cộng hưởng electron-phonon trong giếng lượng tử thể  
hyperbol bất đối xứng đặc biệt 53**

3.1	Công suất hấp thụ tuyến tính và phi tuyến trong giếng lượng tử thể hyperbol bất đối xứng đặc biệt . . . . .	53
3.2	Kết quả tính số và thảo luận . . . . .	55
3.2.1	Điều kiện cộng hưởng ODEPR . . . . .	55
3.2.2	Sự phụ thuộc công suất hấp thụ và độ rộng vạch phổ vào thông số $a$	57
3.2.3	Sự phụ thuộc công suất hấp thụ và độ rộng vạch phổ vào nhiệt độ . . . . .	58

<b>Chương 4. Cộng hưởng từ-phonon trong giếng lượng tử thể tam giác</b>	<b>61</b>
4.1 Hệ số hấp thụ quang từ tuyến tính và phi tuyến trong giếng lượng tử thể tam giác . . . . .	61
4.2 Kết quả tính số và thảo luận . . . . .	64
4.2.1 Điều kiện cộng hưởng ODMPR . . . . .	64
4.2.2 Sự phụ thuộc hệ số hấp thụ quang từ và độ rộng vạch phổ vào điện trường . . . . .	65
4.2.3 Sự phụ thuộc hệ số hấp thụ quang từ và độ rộng vạch phổ vào từ trường . . . . .	67
4.2.4 Sự phụ thuộc của hệ số hấp thụ quang từ và độ rộng vạch phổ vào nhiệt độ . . . . .	69
<b>Chương 5. Cộng hưởng từ-phonon trong giếng lượng tử thể hyperbol bất đối xứng đặc biệt</b>	<b>72</b>
5.1 Hệ số hấp thụ quang từ tuyến tính và phi tuyến trong giếng lượng tử thể hyperbol bất đối xứng đặc biệt . . . . .	72
5.2 Kết quả tính số và thảo luận . . . . .	74
5.2.1 Điều kiện cộng hưởng ODMPR . . . . .	74
5.2.2 Sự phụ thuộc hệ số hấp thụ quang từ và độ rộng vạch phổ vào thông số $a$ . . . . .	75
5.2.3 Sự phụ thuộc hệ số hấp thụ quang từ và độ rộng vạch phổ vào nhiệt độ . . . . .	79
5.2.4 Sự phụ thuộc hệ số hấp thụ quang từ và độ rộng vạch phổ vào từ trường . . . . .	81
<b>KẾT LUẬN CHUNG</b>	<b>85</b>
<b>TÀI LIỆU THAM KHẢO</b>	<b>89</b>
<b>PHỤ LỤC</b>	<b>P1</b>

## DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT

Viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
MBE	Molecular beam epitaxy	Epitaxy chùm phân tử
MOVPE	Metal organic vapor phase epitaxy	Epitaxy pha hơi kim loại hữu cơ
MOCVD	Metal organic chemical vapor deposition	Lắng đọng hơi kim loại hữu cơ
2DEG	Two dimensional electron gas	Khí điện tử hai chiều
QW	Quantum well	Giếng lượng tử
TrQW	Triangular quantum well	Giếng lượng tử thể tam giác
SAsHQW	Special asymmetric hyperbolic-type quantum well	Giếng lượng tử thể hyperbol bất đối xứng đặc biệt
<b>Demo Version - Select.Pdf SDK</b>		
EPR	Electron-phonon resonance	Cộng hưởng electron-phonon
ODEPR	Optically detected electron-phonon resonance	Cộng hưởng electron-phonon dò tìm bằng quang học
MPR	Magneto-phonon resonance	Cộng hưởng từ-phonon
ODMPR	Optically detected magneto-phonon resonance	Cộng hưởng từ-phonon dò tìm bằng quang học
AP	Absorption power	Công suất hấp thụ
MOAC	Magneto-optical absorption coefficient	Hệ số hấp thụ quang từ
FWHM	Full-width at half maximum	Độ rộng phổ toàn phần ở nửa cực đại (Độ rộng vạch phổ)

## DANH MỤC MỘT SỐ KÍ HIỆU

Kí hiệu	Đại lượng tương ứng
$\mathcal{H}$	Hamiltonian của hệ
$V_0$	Thế tích của hệ
$m_0$	Khối lượng của electron tự do
$m^*$	Khối lượng hiệu dụng của electron
$\epsilon_0$	Hằng số điện trong chân không
$\chi_0$	Hằng số điện môi tĩnh
$\chi_\infty$	Hằng số điện môi cao tần
$n$	Số lượng tử
$N$	Chỉ số mức Landau
$\omega_c$	Tần số cyclotron
$\omega_c$	Đán kinh cyclotron
$B$	Cảm ứng từ
$\mathcal{F}$	Cường độ điện trường
$E_0$	Biên độ điện trường
$\hbar\Omega$	Năng lượng photon
$\hbar\omega_{LO}$	Năng lượng phonon quang dọc
$B_0(\Omega)$	Phần ảo của hàm dạng phổ tuyến tính
$B_{1,2}(2\Omega)$	Phần ảo của hàm dạng phổ phi tuyến
$\mathcal{P}_0(\Omega)$	Công suất hấp thụ tuyến tính
$\mathcal{P}_1(\Omega)$	Công suất hấp thụ phi tuyến
$\mathcal{K}(\Omega)$	Hệ số hấp thụ quang từ.
“ $\mathbf{X}$ ”	Vectơ X ( $\vec{X}$ ).

## DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ

Hình 1.1	Minh họa hình dạng và mật độ trạng thái của bán dẫn khối (3D), giếng lượng tử (2D), dây lượng tử (1D) và chấm lượng tử (0D). . . . .	9
Hình 1.2	Mô hình cấu trúc giếng lượng tử GaAlAs/GaAs/GaAlAs . . . . .	10
Hình 1.3	Sự phụ thuộc của thể giam giữ tam giác theo hướng $z$ vào các giá trị khác nhau của điện trường $\mathcal{F}$ . . . . .	12
Hình 1.4	Hình dạng giếng lượng tử thể kiểu hyperbol bất đối xứng đặc biệt với ba giá trị khác nhau của thông số $a$ . . . . .	13
Hình 1.5	Độ rộng vạch phổ được xác định từ đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của công suất hấp thụ vào năng lượng photon. . . . .	36
Hình 2.1	Sự phụ thuộc của công suất hấp thụ tuyến tính vào năng lượng photon. Ở đây, $T = 200$ K và $\mathcal{F} = 10 \times 10^5$ V/m. . . . .	48
Hình 2.2	Sự phụ thuộc công suất hấp thụ phi tuyến vào năng lượng photon. Ở đây, $T = 200$ K và $\mathcal{F} = 10 \times 10^5$ V/m. . . . .	49
Hình 2.3	Sự phụ thuộc của công suất hấp thụ vào năng lượng photon đối với 3 giá trị khác nhau của điện trường nhờ a) quá trình hấp thụ tuyến tính và b) quá trình hấp thụ phi tuyến. Các đường liền nét (màu đen), đường gạch gạch (màu đỏ) và đường chấm chấm (màu xanh) lần lượt tương ứng với $\mathcal{F} = 5 \times 10^5$ V/m, $\mathcal{F} = 10 \times 10^5$ V/m và $\mathcal{F} = 15 \times 10^5$ V/m. Ở đây, $T = 200$ K. . . . .	49
Hình 2.4	Sự phụ thuộc của FWHM vào điện trường. Các hình vuông đặc (màu xanh) và rỗng (màu đen) lần lượt tương ứng với quá trình hấp thụ tuyến tính và phi tuyến. . . . .	50
Hình 2.5	Sự phụ thuộc của công suất hấp thụ vào năng lượng photon đối với 3 giá trị khác nhau của nhiệt độ nhờ a) quá trình hấp thụ tuyến tính và b) quá trình hấp thụ phi tuyến. Các đường liền nét (màu đen), đường gạch gạch (màu đỏ) và đường chấm chấm (màu xanh) lần lượt tương ứng với $T = 100$ K, $T = 200$ K và $T = 300$ K. Ở đây, $\mathcal{F} = 10 \times 10^5$ V/m. . . . .	51

Hình 2.6	Sự phụ thuộc của FWHM vào nhiệt độ tại $\mathcal{F} = 10 \times 10^5$ V/m. Các hình tròn đặc (màu xanh) và rỗng (màu đen) lần lượt tương ứng với quá trình hấp thụ tuyến tính và phi tuyến. . . . .	51
Hình 3.1	Sự phụ thuộc của công suất hấp thụ tuyến tính vào năng lượng photon. Ở đây, $T = 300$ K và $a = 20$ nm. . . . .	55
Hình 3.2	Sự phụ thuộc của công suất hấp thụ phi tuyến vào năng lượng photon. Ở đây, $T = 300$ K và $a = 20$ nm. . . . .	56
Hình 3.3	Sự phụ thuộc của công suất hấp thụ vào năng lượng photon đối với các giá trị khác nhau của thông số $a$ nhờ a) quá trình hấp thụ tuyến tính và b) quá trình hấp thụ phi tuyến. Đường liền nét (màu đen), đường gạch gạch (màu đỏ) và đường chấm chấm (màu xanh) lần lượt tương ứng với $a = 18$ nm, $a = 20$ nm và $a = 22$ nm. Ở đây, $T = 300$ K. . . .	57
Hình 3.4	Sự phụ thuộc của FWHM vào thông số $a$ tại $T = 300$ K. Các hình vuông đặc (màu xanh) và rỗng (màu đỏ) lần lượt mô tả quá trình hấp thụ tuyến tính và phi tuyến. . . . .	58
Hình 3.5	Sự phụ thuộc của công suất hấp thụ vào năng lượng photon đối với các giá trị khác nhau của nhiệt độ nhờ a) quá trình hấp thụ tuyến tính và b) quá trình hấp thụ phi tuyến. Các đường liền nét (màu đen), đường gạch gạch (màu đỏ) và đường chấm chấm (màu xanh) lần lượt tương ứng với $T = 77$ K, $T = 150$ K và $T = 300$ K. Ở đây, $a = 20$ nm. . . .	58
Hình 3.6	Sự phụ thuộc của FWHM vào nhiệt độ tại $a = 20$ nm. Các hình tròn đặc (màu xanh) và rỗng (màu đỏ) lần lượt mô tả quá trình hấp thụ tuyến tính và phi tuyến. . . . .	59
Hình 4.1	MOAC như một hàm của năng lượng photon tại các giá trị $\mathcal{F} = 1.0 \times 10^5$ V/m, $T = 300$ K và $B = 10$ T. . . . .	65
Hình 4.2	MOAC như một hàm của năng lượng photon với các giá trị khác nhau của điện trường $\mathcal{F}$ . Ở đây, $T = 300$ K và $B = 10$ T. . . . .	66
Hình 4.3	Sự phụ thuộc của FWHM vào điện trường $\mathcal{F}$ tại $T = 300$ K và $B = 10$ T. . . . .	67

Hình 4.4	MOAC như một hàm của năng lượng photon tại các giá trị khác nhau của từ trường $B$ . Kết quả được tính tại $T = 300$ K và $\mathcal{F} = 1.0 \times 10^5$ V/m. . . . .	67
Hình 4.5	Sự phụ thuộc của FWHM vào từ trường $B$ tại $T = 300$ K và $\mathcal{F} = 1.0 \times 10^5$ V/m. . . . .	68
Hình 4.6	MOAC như một hàm của năng lượng photon với các giá trị khác nhau của nhiệt độ $T$ . Ở đây $B = 10$ T và $\mathcal{F} = 1.0 \times 10^5$ V/m. . . . .	69
Hình 4.7	Sự phụ thuộc của FWHM vào nhiệt độ $T$ tại $B = 10$ T và $\mathcal{F} = 1.0 \times 10^5$ V/m. . . . .	70
Hình 5.1	MOAC như một hàm của năng lượng photon $\hbar\Omega$ tại $a = 10$ nm, $B = 10$ T và $T = 77$ K. . . . .	74
Hình 5.2	Biểu đồ đường đồng mức của tích số $f_{0,0}(1 - f_{1,1})$ như một hàm của thông số $a$ và $T$ tại $B = 10$ T. . . . .	75
Hình 5.3	Năng lượng ngưỡng $\Delta E = E_{1,1} - E_{0,0}$ như một hàm của từ trường với 3 giá trị $a = 10$ nm, 12 nm và 14 nm. . . . .	76
Hình 5.4	MOAC như một hàm của năng lượng photon $\hbar\Omega$ đối với các giá trị khác nhau của thông số $a$ . . . . .	77
Hình 5.5	FWHM như một hàm của thông số $a$ . Các kí hiệu đặc (rỗng) tương ứng với quá trình hấp thụ tuyến tính (phi tuyến). . . . .	78
Hình 5.6	MOAC như một hàm của năng lượng photon $\hbar\Omega$ đối với 3 giá trị khác nhau của nhiệt độ. . . . .	79
Hình 5.7	FWHM như một hàm của nhiệt độ. Các kí hiệu đặc (rỗng) tương ứng với quá trình hấp thụ tuyến tính (phi tuyến). . . . .	80
Hình 5.8	MOAC như một hàm của năng lượng photon với các giá trị khác nhau của từ trường. . . . .	82
Hình 5.9	FWHM như một hàm của từ trường $B$ . Các kí hiệu đặc (rỗng) tương ứng với quá trình hấp thụ tuyến tính (phi tuyến). . . . .	82

# PHẦN MỞ ĐẦU

## 1. Tính cấp thiết của đề tài

Ngày nay cùng với sự phát triển vượt bậc của khoa học kỹ thuật, việc nghiên cứu trên các thiết bị và bán dẫn có cấu trúc nano đã và đang là một xu hướng thiết yếu trong cuộc cách mạng công nghiệp lần thứ tư (Công nghiệp 4.0). Để sản xuất các linh kiện quang điện tử và quang tử có kích thước vài nanomet, các nhà khoa học đã không ngừng nghiên cứu về các vật liệu mới để tìm hiểu các đặc tính chuyển tải của điện tử cũng như các hiệu ứng động trong những mô hình này khi có mặt trường điện từ. Các bán dẫn có cấu trúc nano được chế tạo bằng cách áp dụng các phương pháp epitaxy hiện đại như epitaxy chùm phân tử (MBE), epitaxy pha hơi kim loại hữu cơ (MOVPE) bao gồm cả lắng đọng hơi kim loại hữu cơ (MOCVD),... để hình thành các dị tiếp xúc giữa các bán dẫn có tính chất khác nhau như AlGaAs và GaAs.

Việc hình thành hệ bán dẫn mới này cho thấy rằng ngoài điện trường của thế tuần hoàn gây ra bởi các nguyên tử tạo nên tinh thể còn xuất hiện thêm một trường điện thế phụ trong mạng tinh thể. Trường điện thế phụ này cũng tuần hoàn trong không gian mạng nhưng với chu kỳ lớn hơn rất nhiều so với chu kỳ của trường điện thế tuần hoàn. Tùy thuộc vào trường điện thế phụ, hệ bán dẫn nano được tạo ra sẽ có các cấu trúc giống lượng tử, siêu mạng, dây lượng tử, hay chấm lượng tử. Với những cấu trúc này, các hạt tải bị định xứ mạnh và hàm sóng của electron sẽ bị phản xạ tại các thành của cấu trúc nên phổ năng lượng của nó bị lượng tử hóa thành các mức năng lượng gián đoạn. Hiệu ứng giam giữ lượng tử trong các vật liệu nano bán dẫn thấp chiều mạnh hơn so với các vật liệu khối. Đây chính là nguyên nhân hình thành các đặc tính quang tuyến tính và phi tuyến. Hơn thế nữa, khi nhiệt độ  $T > 50$  K các electron linh động hơn và ảnh hưởng đến quá trình tán xạ của các electron với các phonon. Do đó, một số đặc tính quang điện tử mới và thú vị xuất hiện cũng như phản ứng của hệ electron-phonon dưới ảnh hưởng của trường điện từ được nhiều kỳ vọng trong những hệ này.

Ở đây, đối tượng của luận án hướng đến khảo sát là các tính chất động xảy ra trong

vật liệu bán dẫn có cấu trúc giếng lượng tử khi electron bị giới hạn chuyển động theo một chiều và chuyển động hoàn toàn tự do theo hai chiều còn lại hay còn gọi là khí điện tử 2 chiều (2DEG) với hai hiệu ứng đặc trưng:

1. Hiệu ứng cộng hưởng electron-phonon (EPR)

Bryskin và Firsov đã tiên đoán rằng EPR xuất hiện trong các loại bán dẫn không suy biến dưới tác dụng của một điện trường cao tần (trường laser). EPR là công cụ hữu ích để xác định khoảng cách giữa hai mức năng lượng vùng con thấp nhất cũng như khối lượng hiệu dụng. Bên cạnh đó, độ rộng vạch phổ (FWHM) được biết như là một công cụ tốt để khảo sát cơ chế tán xạ của hạt mang và được sử dụng để nghiên cứu quá trình tán xạ electron-phonon. Phổ hấp thụ được tạo thành do electron hấp thụ năng lượng photon  $\hbar\Omega$  để chuyển sang trạng thái năng lượng cao hơn kèm theo quá trình hấp thụ hoặc phát xạ phonon thỏa mãn điều kiện  $\hbar\Omega = \Delta E_{\lambda,\lambda'} \pm \hbar\omega_{LO}$  với  $\hbar\omega_{LO}$  là năng lượng phonon quang dọc và  $\Delta E_{\lambda,\lambda'}$  là hiệu giữa hai mức năng lượng liền kề. Vấn đề này có liên quan mật thiết đến hiệu ứng cộng hưởng electron-phonon (EPR) và hiệu ứng cộng hưởng electron-phonon dò tìm bằng quang học (ODEPR). Những kết quả này đã được kiểm chứng qua các công trình trong hệ chuẩn một chiều [38, 60, 64, 94] và hệ chuẩn hai chiều [51, 54, 49, 59, 81]. Cụ thể hơn, Lee và cộng sự [43] đã công bố hiệu ứng ODEPR cho giếng lượng tử với thế giam giữ vuông góc và thế parabol. Kết quả cho thấy, độ dẫn quang phụ thuộc vào tần số giam giữ và độ rộng của giếng. Kang và cộng sự [31] đã chứng minh rằng FWHM phụ thuộc vào nhiệt độ, mật độ electron và điện trường do tán xạ electron-phonon quang dọc trong TrQW. Duan và cộng sự [16] mô tả tốc độ tán xạ electron-phonon do dịch chuyển nội vùng và ngoại vùng con gia tăng cùng với sự gia tăng của độ rộng giếng cho tới 110 Å. Bên cạnh đó, khi xét đến trường hợp phonon giam giữ, kết quả thu được cho thấy, các đỉnh ODEPR và FWHM trong trường hợp phonon giam giữ lớn hơn trong trường hợp phonon khối [26].

Tuy nhiên, những công trình nghiên cứu cũng chỉ đề cập đến hiệu ứng xảy ra trong các cấu trúc bán dẫn thấp chiều với một số thế giam giữ truyền thống như thế vuông góc sâu vô hạn, thế parabol, thế hình trụ, thế hình chữ nhật,... mà chưa đề cập đến những dạng thế giam giữ khác. Ngoài ra, phần lớn các công bố trước đây còn hạn chế vì chỉ xét đến quá trình hấp thụ một photon (hấp thụ tuyến tính) còn quá trình hấp thụ phi tuyến (hấp thụ hai photon trở lên) tuy quan trọng nhưng vẫn chưa được nhiều tác giả quan tâm.

Bài toán cộng hưởng electron-phonon có tính đến quá trình hấp thụ phi tuyến được nhóm tác giả Lee, Kang và cộng sự [41, 33] nghiên cứu gần đây nhưng kết quả chưa bao hàm cả hai thành phần độ dẫn tuyến tính và phi tuyến vào một biểu thức chung. Để khắc phục nhược điểm này, nhóm tác giả Phong và Phuc [60] đã đề xuất cách thiết lập biểu thức độ dẫn phi tuyến do tương tác electron-phonon nhờ quá trình hấp thụ hai photon cùng tần số và thu được biểu thức giải tích tường minh của công suất hấp thụ trong dây lượng tử hình chữ nhật bằng phương pháp toán tử chiếu, trong giếng lượng tử [3] và khi xét đến hiệu ứng này có tính đến sự giam giữ phonon [2, 26, 38].

## 2. Hiệu ứng cộng hưởng từ-phonon

Hiệu ứng này đã được chứng minh là một trong những kỹ thuật tốt nhất, công cụ phổ mạnh để khảo sát trực tiếp các tính chất của vật liệu bán dẫn như tiết diện bề mặt Fermi, khối lượng hiệu dụng của electron và năng lượng phonon quang dọc [30, 54, 91]. Nguồn gốc của hiệu ứng này đến từ cơ chế tán xạ electron-phonon gây ra bởi sự hấp thụ hoặc/và phát xạ phonon khi khoảng cách giữa hai mức Landau bằng năng lượng phonon quang dọc dưới tác dụng của trường điện từ thỏa mãn điều kiện  $s\hbar\omega_c = \hbar\omega_{LO}$  với  $s = N' - N$  là một số nguyên và  $\hbar\omega_c$  là năng lượng cyclotron. Trong khi đó, nếu quá trình hấp thụ năng lượng photon  $\hbar\Omega$  xảy ra thì ta có thể xác định được điều kiện cộng hưởng cyclotron  $\hbar\Omega = s\hbar\omega_c$  và được chứng minh chiếm ưu thế hơn trong việc đo hiệu số các mức năng lượng trong chất rắn khi có mặt từ trường [7]. Tuy nhiên, trong phép gần đúng lưỡng cực do quy tắc lọc lựa, sự hấp thụ ở các giá trị khác của năng lượng không thỏa mãn điều kiện trên. Để khắc phục, ta bắt buộc cần xét đến tương tác electron-phonon quang dọc [28]. Điều này có nghĩa quy tắc lọc lựa phải được xác định theo công thức  $\hbar\Omega = s\hbar\omega_c \pm \hbar\omega_{LO}$ . Đây chính là hiệu ứng cộng hưởng từ-phonon dò tìm bằng quang học (ODMPR). Hiệu ứng quan trọng thích hợp để khảo sát bất kỳ loại tương tác electron-phonon khi có mặt từ trường. Bên cạnh đó, nếu hệ có thêm quá trình dịch chuyển giữa 2 mức vùng con thì điều kiện cộng hưởng ODMPR trở thành  $\hbar\Omega = s\hbar\omega_c \pm (E_{n'} - E_n) \pm \hbar\omega_{LO}$ . Như vậy, khi điều kiện này được thỏa mãn, electron thực hiện dịch chuyển giữa 2 mức Landau  $N, N'$  và 2 mức vùng con  $n, n'$  bằng cách hấp thụ hay phát xạ một photon có năng lượng  $\hbar\Omega$  kèm theo hấp thụ hoặc/và phát xạ một phonon có năng lượng  $\hbar\omega_{LO}$  (đối với trường hợp tổng quát kí hiệu  $\hbar\omega_q$ ).

Kết quả thu được trong [1] đã chứng minh sự phụ thuộc của độ dẫn vào từ trường, tần số giam giữ và nhiệt độ của hệ bằng phương pháp toán tử chiếu khi khảo sát dây

lượng tử với thể giam giữ hình trụ và thể hình chữ nhật. Điển hình với những công bố gần đây của nhóm tác giả Phong, Phuc và cộng sự [60, 62, 73], trong giếng lượng tử với thể giam giữ parabol [70, 72, 76], trong graphene [65, 66, 69], trong giếng lượng tử với thể Gauss bất đối xứng [75], thể kiểu Pöschl-Teller [40] cũng như có tính đến quá trình hấp thụ hai photon.

Trong khi đó, Barns và cộng sự [6] đã công bố kết quả thực nghiệm khi nghiên cứu ODMPR trong hệ bán dẫn hai chiều của các lớp chuyển tiếp dị cấu trúc GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As. Ryu và cộng sự [82] đã nghiên cứu về cộng hưởng từ-phonon trong dây lượng tử đặt trong từ trường xiên. Bhat và cộng sự đã nghiên cứu ODMPR do sự tán xạ giữa electron và các phonon LO giam giữ, phonon bề mặt [8] và phonon âm giam giữ [9] trong giếng lượng tử vuông góc, Lee và cộng sự [42] đã khảo sát chi tiết các hiệu ứng ODMPR trong giếng lượng tử bán dẫn. Những công bố này chỉ mới đề cập đến quá trình hấp thụ tuyến tính, chẳng hạn xét đến bài toán hấp thụ phi tuyến khi có mặt từ trường, Duque và cộng sự [18] đã xác định rằng sự hấp thụ quang phi tuyến liên quan đến electron và sự tách sóng quang tuyến tính phi tuyến bị ảnh hưởng bởi cường độ laser khi có điện-từ trường đặt vào giếng lượng tử. Hệ số hấp thụ quang tuyến tính và phi tuyến và sự thay đổi tương đối của chỉ số khúc xạ cũng như sự hiệu chỉnh phi tuyến bậc ba tương ứng của chúng trong các giếng lượng tử dưới tác dụng của điện trường và từ trường cũng đã được nghiên cứu [52]. Guo và cộng sự [23] đã tính toán ảnh hưởng của bán kính trong, bán kính ngoài và góc cắt của vỏ vòm hình cầu lên hệ số hấp thụ quang và chứng minh ảnh hưởng của tạp chất hydro lên hệ số hấp thụ quang tuyến tính và phi tuyến và sự thay đổi chỉ số khúc xạ trong chấm lượng tử [24]. Về bài toán có xét đến sự giam giữ phonon, Hien và cộng sự [25] đã nghiên cứu ảnh hưởng của sự giam giữ phonon trong các mô hình Huang-Zhu, mô hình mode dẫn sóng của Ridley và mô hình mode phân lớp Fuchs-Kliwer lên ODMPR và độ rộng phổ [61].

Các hiệu ứng chuyển tải trong giếng lượng tử thể tam giác (TrQW) và thể hyperbol được các nhà nghiên cứu quan tâm trong những năm gần đây vì gần với thực tiễn hơn. Kastalsky và cộng sự nghiên cứu hiện tượng chuyển tải tuyến tính và phi tuyến trong TrQW [37], Chen và cộng sự nghiên cứu sự hấp thụ quang trong giếng lượng tử thể tam giác kép [13], nhóm nghiên cứu của Kang và cộng sự đã áp dụng phương pháp toán tử chiếu để khảo sát độ dẫn và độ rộng vạch phổ do dịch chuyển nội vùng bởi tương tác giữa electron và phonon quang dọc trong TrQW [31].

Li và Weiss cũng đã nghiên cứu hệ số hấp thụ do chuyển tải liên vùng con bằng cách sử dụng hàm điện môi trong giếng thế hyperbol [45], Chen và cộng sự khảo sát các tính chất quang phi tuyến trong giếng hyperbol [14], giếng lượng tử thế hyperbol dạng Pöschl-Teller được đề xuất bởi G. Pöschl và E. Teller [78]. Một số công trình nghiên cứu khác liên quan đến thế giam giữ này, chẳng hạn Radovanovic và cộng sự [80] cho thấy hiện tượng hấp thụ liên vùng con từ đó ứng dụng trong chế tạo máy dò quang học hoạt động ở vùng hồng ngoại. Le và cộng sự [40] đã nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số đặc trưng của giếng thế, từ trường và nhiệt độ lên hệ số hấp thụ quang từ (MOAC) và FWHM do tương tác electron-phonon quang dọc.

Từ các phân tích trên, ta thấy rằng bài toán ODEPR và ODMPR được nhiều quan tâm nghiên cứu nhưng chỉ xét đến quá trình hấp thụ một photon (tuyến tính). Trong khi đó, phần lớn các công bố khảo sát đến quá trình hấp thụ nhiều photon (phi tuyến) cũng chỉ tập trung vào những mô hình thấp chiều với các thế giam giữ truyền thống (thế vuông góc, thế parabol, thế chữ nhật, thế hình trụ). Trong khi đó, hiệu ứng này xảy ra đối với thế giam giữ tam giác cũng như thế hyperbol bất đối xứng đặc biệt tuy quan trọng nhưng chưa được chú ý. Hai thế giam giữ này có tính chất vượt trội là rất nhạy với trường ngoài và dễ dàng điều chỉnh được khi thay đổi các thông số đặc trưng của chúng. Vì vậy, chúng tôi đề xuất hướng: **“Nghiên cứu cộng hưởng electron-phonon và cộng hưởng từ-phonon trong giếng lượng tử”** cho hai thế giam giữ tam giác và thế hyperbol bất đối xứng đặc biệt. Những kết quả thu được sẽ hứa hẹn nhiều tiềm năng và dự đoán xuất hiện các tính chất quang, điện tử mới, thú vị trong các vật liệu có cấu trúc nano cũng như nhiều ứng dụng quan trọng đối với lĩnh vực chế tạo các linh kiện dựa trên đặc tính quang phi tuyến.

## 2. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu của luận án là tìm độ dẫn, công suất và/hoặc hệ số hấp thụ tuyến tính và phi tuyến trong giếng lượng tử thế tam giác và thế hyperbol bất đối xứng đặc biệt (SASHQW) do tương tác electron-phonon đặt trong trường sóng điện từ và từ trường tĩnh. Xác định điều kiện để có cộng hưởng electron-phonon dò tìm bằng quang học, cộng hưởng từ-phonon dò tìm bằng quang học và khảo sát độ rộng vạch phổ tương ứng với các đỉnh cộng hưởng.

### 3. Nội dung nghiên cứu

- Áp dụng phương pháp toán tử chiếu và phương pháp hàm Green thông qua lý thuyết nhiễu loạn để tính biểu thức độ dẫn, xác suất dịch chuyển và công suất hoặc hệ số hấp thụ quang trong TrQW và SAsHQW;

- Từ đồ thị mô tả sự phụ thuộc của công suất hoặc hệ số hấp thụ sóng điện từ vào năng lượng photon, xác định được điều kiện cộng hưởng electron-phonon và cộng hưởng từ-phonon;

- Khảo sát sự phụ thuộc của FWHM vào nhiệt độ, các đặc trưng của giếng và trường ngoài.

### 4. Phạm vi nghiên cứu

Luận án tập trung chủ yếu khảo sát công suất và/hoặc hệ số hấp thụ ODEPR và ODMPR cũng như FWHM tuyến tính và phi tuyến trong giếng lượng tử với thế tam giác và thế hyperbol bất đối xứng đặc biệt dưới ảnh hưởng của trường ngoài, các thông số đặc trưng của mô hình giam giữ và điều kiện vật lý. Tương tác chủ yếu được xét đến là do cơ chế tán xạ electron-phonon quang dọc với giả thiết phonon khối.

### 5. Ý nghĩa khoa học của luận án

Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng khi thay đổi giá trị của các thông số trong mô hình với hai thế giam giữ tam giác và thế kiểu hyperpol bất đối xứng đặc biệt sẽ làm thay đổi lớn đến tính chất quang, điện của vật liệu có cấu trúc nano. Ngoài ra, chúng phụ thuộc mạnh vào trường điện từ đặt vào hệ và điều kiện vật lý (nhiệt độ). Kết quả cũng cho thấy rằng sự giam giữ electron trong các giếng này mạnh hơn so với các công bố trước đây với những mô hình thế giam giữ truyền thống khác. Do đó, giếng lượng tử này hứa hẹn nhiều đặc trưng vật lý mới, thú vị;

Luận án đã tìm được các quy luật phụ thuộc mới của độ rộng vạch phổ tuyến tính và phi tuyến vào từ trường, thông số của giếng và nhiệt độ bằng các công thức tường minh. Những kết quả chính của luận án sẽ cung cấp nhiều thông tin mới và hữu ích của khí electron trong các hệ bán dẫn thấp chiều dưới tác dụng của trường ngoài;

Ngoài ra, kết quả thu được đã khẳng định tính đúng đắn, ưu thế của từng phương pháp toán tử chiếu, phương pháp hàm Green và phương pháp profile cho từng bài toán cụ thể khi nghiên cứu các tính chất chuyển tải lượng tử trong bán dẫn thấp chiều nói chung và giếng lượng tử nói riêng.

## 6. Cấu trúc của luận án

Nội dung chính của luận án gồm 05 chương ngoài phần mở đầu, mục lục, phụ lục và tài liệu tham khảo. Cụ thể như sau:

Chương 1: Tổng quan về đối tượng và phương pháp nghiên cứu;

Chương 2: Cộng hưởng electron–phonon trong giếng lượng tử thể tam giác;

Chương 3: Cộng hưởng electron–phonon trong giếng lượng tử thể hyperbol bất đối xứng đặc biệt;

Chương 4: Cộng hưởng từ–phonon trong giếng lượng tử thể tam giác;

Chương 5: Cộng hưởng từ–phonon trong giếng lượng tử thể hyperbol bất đối xứng đặc biệt;

### **Demo Version - Select.Pdf SDK**

Phần kết luận chung sẽ trình bày các kết quả thu được của luận án.