



School of Applied Mathematics
<http://sam.utc.edu.vn/>



HÀ NỘI - 2026

KỶ YẾU HỘI THẢO “GIẢNG DẠY VÀ NGHIÊN CỨU KHOA HỌC CƠ BẢN NĂM 2026”



ISBN: 978-604-76-3346-3.



Sách không bán



BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI

KỶ YẾU

HỘI THẢO “GIẢNG DẠY VÀ NGHIÊN CỨU KHOA HỌC CƠ BẢN NĂM 2026”



NHÀ XUẤT BẢN GIAO THÔNG VẬN TẢI

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI



KỶ YẾU
HỘI THẢO “GIẢNG DẠY VÀ NGHIÊN CỨU
KHOA HỌC CƠ BẢN NĂM 2026”

NHÀ XUẤT BẢN GIAO THÔNG VẬN TẢI
HÀ NỘI - 2026

BAN TỔ CHỨC HỘI THẢO

PGS.TS. Nguyễn Thị Mai	Trưởng BTC
TS. Ngô Đức Chinh	Ủy viên TT
TS. Mai Nam Phong	Ủy viên
PGS.TS. Trần Văn Long	Ủy viên
PGS.TS. Nguyễn Thị Hòa	Ủy viên
TS. Nguyễn Thị Hồng Tuyền	Ủy viên
TS. Nguyễn Thị Thu Hà	Ủy viên
TS. Nguyễn Thế Vinh	Ủy viên
TS. Nguyễn Trường Giang	Ủy viên
TS. Phạm Minh Phúc	Ủy viên
TS. Nguyễn Quang Anh	Ủy viên
ThS. Nguyễn Diệu Thúy	Ủy viên
TS. Lại Thị Hoan	Ủy viên
ThS. Hoàng Thiệu Anh	Ủy viên

MỤC LỤC

LỜI NÓI ĐẦU

TT	NỘI DUNG	Trang
1	ĐÁNH GIÁ TÁC ĐỘNG CỦA TIỀN XỬ LÝ ẢNH TRONG BÀI TOÁN PHÁT HIỆN LAO PHỐI BẰNG HỌC SÂU <i>Đào Vũ Hoàng Nam</i>	11
2	KHOẢNG CÁCH WASSERSTEIN MỘT CHIỀU VÀ ỨNG DỤNG <i>Trần Văn Long</i>	23
3	MỘT SỐ KỸ THUẬT GIẢM PHƯƠNG SAI CHO MÔ PHỎNG MONTE CARLO <i>Vũ Thị Hương</i>	31
4	MỘT SỐ PHƯƠNG PHÁP ĐIỀN KHUYẾT DỮ LIỆU: KHẢO SÁT VÀ SO SÁNH TRÊN PHẦN MỀM R <i>Hoàng Thuỳ Linh</i>	43
5	MỘT VÀI LỚP MÃ BCH NGUYÊN THỦY VỚI ĐỘ DÀI q^8-1 <i>Nguyễn Huy Hoàng</i>	55
6	THUẬT TOÁN NHÁNH CẮT DỰA TRÊN XẤP XỈ NGOÀI VÀ CẮT PHÂN DƯỚI CHO BÀI TOÁN VỊ TRÍ CƠ SỞ CÓ SỰ CẠNH TRANH <i>Phạm Vũ Hoàng Sơn</i>	67
7	THUẬT TOÁN Q-LEARNING TRONG HỌC TĂNG CƯỜNG: PHÂN TÍCH VÀ THỰC NGHIỆM TRÊN MÔI TRƯỜNG GRIDWORLD <i>Nguyễn Việt Hưng</i>	74
8	ỨNG DỤNG HỌC MÁY ĐỂ GIẢI QUYẾT BÀI TOÁN NGƯỜI BÁN HÀNG <i>Nguyễn Minh Hoàng Sơn</i>	85
9	ỨNG DỤNG MẠNG LSTM KẾT HỢP CƠ CHẾ ATTENTION TRONG DỰ BÁO LƯU LƯỢNG GIAO THÔNG ĐÔ THỊ <i>Nguyễn Thị Hồng Hoa</i>	93

TT	NỘI DUNG	Trang
10	ỨNG DỤNG MÔ HÌNH TRANSFORMER KẾT HỢP DỮ LIỆU ERA5 DỰ BÁO THỜI TIẾT CHO KHU VỰC ĐÔNG NAM Á <i>Nguyễn Thị Hồng Hoa</i>	100
11	CÁC METRIC BẤT BIẾN TRONG GIẢI TÍCH PHỨC NHIỀU BIẾN <i>Nguyễn Thị Kim Sơn</i>	109
12	CHUYỂN ĐỘNG BROWN TRONG TÀI CHÍNH <i>Trịnh Thị Trang</i>	116
13	ĐIỂM BẤT ĐỘNG CHO HỆ PHƯƠNG TRÌNH ĐẠO HÀM RIÊNG PHI TUYẾN BẬC NHẤT <i>Nguyễn Đức Dur</i>	123
14	HỆ THỐNG HOÁ CÁC PHƯƠNG PHÁP CHỨNG MINH SỰ TỒN TẠI NGHIỆM BẰNG ĐỊNH LÝ GIÁ TRỊ TRUNG BÌNH TRONG CÔNG TÁC BỒI DƯỠNG OLYMPIC SINH VIÊN <i>Nguyễn Hải Hà</i>	135
15	HƯỚNG DẪN SINH VIÊN ÔN TẬP CÁC BÀI TOÁN VỀ HÀM KHẢ VI TRONG KỲ THI OLYMPIC GIẢI TÍCH <i>Nguyễn Thị Huyền</i>	145
16	NỘI SUY GIÁ TRỊ TRUNG BÌNH CÁC HÀM CHỈNH HÌNH TRÊN ĐĨA ĐƠN VỊ <i>Nguyễn Anh Ngọc</i>	154
17	PHƯƠNG PHÁP BIẾN PHÂN GIẢI BÀI TOÁN BIÊN KHÔNG ĐỊA PHƯƠNG <i>Bùi Việt Hương</i>	162
18	TỔNG QUAN VỀ ỨNG DỤNG TRÍ TUỆ NHÂN TẠO TRONG GIAO THÔNG VẬN TẢI <i>Đặng Thị Mai</i>	171
19	THỰC TRẠNG VÀ GIẢI PHÁP NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG GIẢNG DẠY CÁC MÔN TOÁN CAO CẤP BẰNG TIẾNG ANH <i>Nguyễn Thị Lan Hương</i>	180

TT	NỘI DUNG	Trang
20	ẢNH HƯỞNG CỦA ĐỘ LỚN LỰC DI ĐỘNG LÊN ỨNG XỬ ĐỘNG LỰC HỌC CỦA DÀM <i>Nguyễn Duy Trường, Vũ Thị An Ninh</i>	187
21	XÁC ĐỊNH VẬN TỐC CỦA ĐIỂM TRONG HỆ NHIỀU BẬC TỰ DO CÓ CHUYỂN ĐỘNG PHỨC HỢP <i>Huỳnh Văn Quân, Lê Hữu Đạt</i>	195
22	CHIẾN LƯỢC DỊCH ẨM DỤ TRONG TRUYỆN NGẮN A ROSE FOR EMILY CỦA WILLIAM FAULKNER: NGHIÊN CỨU TRƯỜNG HỢP BẢN DỊCH TIẾNG VIỆT CỦA HOÀNG HỮU PHÊ <i>Vũ Thị Minh Phương</i>	205
23	NGHIÊN CỨU ĐỀ XUẤT MÔ HÌNH GIẢNG DẠY CHUYÊN NGÀNH BẰNG TIẾNG ANH (EMI) TẠI TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI <i>Nguyễn Thị Thu Hà</i>	233
24	NHẬN THỨC CỦA SINH VIÊN CÁC TRƯỜNG KHỐI KINH TẾ KINH DOANH VỀ HIỆU ỨNG ĐỘI NGƯỢC CỦA BÀI THI IELTS LÊN ĐỘNG LỰC HỌC TẬP <i>Nguyễn Thị Thanh Huyền, Đỗ Phương Anh</i>	248
25	TRÍ TUỆ NHÂN TẠO TẠO SINH VÀ HỌC TẬP TỰ ĐIỀU CHỈNH: PHÂN TÍCH LÝ THUYẾT VÀ HÀM Ý SƯ PHẠM <i>Nguyễn Quang Anh</i>	258
26	ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ SỐ VÀ HOẠT ĐỘNG TRÒ CHƠI TRONG GIẢNG DẠY TIẾNG PHÁP NHẪM NÂNG CAO ĐỘNG LỰC HỌC TẬP CỦA SINH VIÊN <i>Lê Nguyễn Thanh Hương</i>	269
27	VAI TRÒ CỦA HOẠT ĐỘNG ĐÓNG VAI JEUX DE RÔLE TRONG VIỆC PHÁT TRIỂN KỸ NĂNG NÓI CHO SINH VIÊN TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI <i>Nguyễn Phương Lan</i>	280

TT	NỘI DUNG	Trang
28	ẢNH HƯỞNG CỦA NHIỆT ĐỘ LÊN NGỪNG TỤ EXCITON-POLARITON TRONG VI HỐC MẮT CÂN BẰNG KHỐI LƯỢNG <i>Đỗ Thị Hồng Hải, Nguyễn Thị Hậu</i>	287
29	CÁC ĐẶC TRƯNG PHI CỎ ĐIỆN CỦA TRẠNG THÁI FOCK CHỒNG CHẤT THÊM VÀ KHỦ ĐƠN PHOTON <i>Phan Thị Hiền Anh</i>	297
30	KHẢO SÁT TÍNH CHẤT ĐIỆN SẮC VÀ ĐẶC TÍNH NHẠY KHÍ NH ₃ CỦA VẬT LIỆU LAI HÓA GRAPHENE /WO ₃ <i>Nguyễn Tuấn Sơn</i>	303
31	KHẢO SÁT TRẠNG THÁI NGỪNG TỤ POLARITON TRONG HỆ ĐIỆN TỬ-LỖ TRỐNG MẮT CÂN BẰNG KHỐI LƯỢNG THÔNG QUA HÀM PHỔ ĐƠN HẠT <i>Nguyễn Thị Hậu, Đỗ Thị Hồng Hải</i>	313
32	NGHIÊN CỨU CẤU TRÚC TINH THỂ, TÍNH CHẤT ĐA PHA ĐIỆN TỬ CỦA VẬT LIỆU BiFeO ₃ PHA TẠP La <i>Đào Việt Thắng, Nguyễn Mạnh Hùng</i>	324
33	TẦM QUAN TRỌNG CỦA GIÁO CỤ THÍ NGHIỆM TRỰC QUAN TRONG GIẢNG DẠY VẬT LÝ TRONG CÁC TRƯỜNG ĐẠI HỌC <i>Nguyễn Xuân Chung</i>	331
34	TỔNG QUAN CHẾ TẠO, TÍNH CHẤT VÀ ỨNG DỤNG VẬT LIỆU NANO COMPOSITE Fe ₃ O ₄ /rGO/SiO ₂ <i>Nguyễn Phi Hùng, Nguyễn Trường Giang</i>	338
35	TỔNG QUAN VỀ VẬT LIỆU Fe ₃ O ₄ /C/Ag: CẤU TRÚC, TỔNG HỢP, ỨNG DỤNG VÀ TRIỂN VỌNG <i>Nguyễn Phi Hùng, Nguyễn Trường Giang</i>	346
36	THANH NANO ZnO TỔNG HỢP TỪ THỦY NHIỆT CHO NHẠY KHÍ NO ₂ NHIỆT ĐỘ PHÒNG VỚI SỰ HỖ TRỢ CỦA TIA UV <i>Nguyễn Trường Giang</i>	354

TT	NỘI DUNG	Trang
37	THỬ NGHIỆM GẮN APTAMER LÊN HẠT NANO TỪ TÍNH KIM LOẠI NHẪM ĐÁNH DẤU TẾ BÀO <i>Chu Tiến Dũng</i>	362
38	CẤU TRÚC HÓA HỌC CỦA MỘT SỐ HỢP CHẤT ĐƯỢC PHÂN LẬP TỪ LOÀI TRÀ HOA VÀNG CAMELLIA HIRSUTA Ở VIỆT NAM <i>Hoàng Thị Tuyết Lan</i>	370
39	ĐẶC TRƯNG CẤU TRÚC VÀ TÍNH CHẤT HÓA LÝ CỦA XÚC TÁC LƯỠNG KIM LOẠI- LƯỠNG CHỨC NĂNG Pt-Sn/HZSM5 VÀ Pt-In/HZSM5 TRONG PHẢN ỨNG ISOMER HÓA n-HEXANE <i>Lê Thị Thi Hạ</i>	377
40	MỘT SỐ HỢP CHẤT ĐƯỢC PHÂN LẬP TỪ THÂN CỦA LOÀI DÂY ĐAU XƯƠNG (<i>Tinospora sinensis</i>) <i>Nguyễn Thị Mai</i>	385
41	MỘT SỐ HỢP CHẤT PHENYLPROPANOID GLYCOSIDE ĐƯỢC PHÂN LẬP TỪ LOÀI PHỈ DIỆP BIỂN (<i>Suaeda maritima</i> (L.) Durmort) <i>Lê Ngọc Anh, Bùi Thị Nha Trang</i>	391
42	NGHIÊN CỨU THÀNH PHẦN HÓA HỌC CỦA MỘT SỐ HỢP CHẤT ĐƯỢC PHÂN LẬP TỪ LOÀI TRÀ HOA VÀNG CAMELLIA PHANII Ở VIỆT NAM <i>Hoàng Thị Tuyết Lan</i>	398
43	PHÂN TÍCH HÀNH VI DỪNG, ĐỔ Ô TÔ TRONG KHÔNG GIAN ĐÔ THỊ VÀ ĐỊNH HƯỚNG GIẢI PHÁP QUẢN LÝ HIỆU QUẢ <i>Ninh Khắc Tôn, Bùi Văn Phú</i>	406
44	PHỐI CẢNH HÌNH HỌA - CÔNG CỤ PHÁT TRIỂN TƯ DUY KHÔNG GIAN TRONG ĐÀO TẠO KỸ THUẬT <i>Lê Thị Thanh Hằng</i>	417
45	TỐI ƯU HÓA GIẢNG DẠY VÀ HỌC TẬP MÔN VỀ KỸ THUẬT CHO SINH VIÊN NĂM THỨ NHẤT TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI TỪ NĂNG LỰC TƯ DUY KHÔNG GIAN <i>Nguyễn Tuấn Anh</i>	426

TT	NỘI DUNG	Trang
46	ỨNG DỤNG TRÍ TUỆ NHÂN TẠO TRONG TRỰC QUAN HÓA BẢN VỀ KỸ THUẬT PHỤC VỤ THIẾT KẾ VÀ XÂY DỰNG CÔNG TRÌNH <i>Nguyễn Thị Quỳnh Như, Nguyễn Huy Long, Nguyễn Đại Hải, Trần Việt Hoàn</i>	433
47	NGHIÊN CỨU TÍCH HỢP GIÁO DỤC VÌ PHÁT TRIỂN BỀN VỮNG (ESD) VÀO CHUẨN ĐẦU RA KHỎI NGÀNH KỸ THUẬT <i>Nguyễn Xuân Tùng, Ngô Văn Minh, Bùi Trung Dũng</i>	443

LỜI NÓI ĐẦU

Nhận thức rõ tầm quan trọng của công tác nghiên cứu khoa học trong việc nâng cao chất lượng đội ngũ giảng viên, đồng thời nâng cao chất lượng giảng dạy, trong những năm gần đây, việc đẩy mạnh nghiên cứu khoa học đã được Khoa Khoa học Cơ bản xác định là một trong những hoạt động trọng tâm trong các chương trình công tác của Khoa.

Khoa Khoa học Cơ bản hiện có 81 cán bộ, giảng viên và 12 giảng viên thỉnh giảng, hợp đồng thuộc 08 bộ môn: Giải tích, Đại số & Xác suất thống kê, Vật lý, Hóa học, Anh văn, Nga-Pháp, Hình họa-Vẽ kỹ thuật và Cơ lý thuyết; trong đó có: 06 Phó Giáo sư, 25 Tiến sĩ, 45 Thạc sĩ, 05 Cử nhân. Hàng năm, Khoa chủ trì hàng chục đề tài cấp Trường; chủ trì và tham gia các đề tài cấp Bộ và đề tài Quỹ Nafosted. Trong 5 năm gần đây, các giảng viên của Khoa đã công bố 124 công trình trên các tạp chí quốc tế thuộc danh mục ISI và Scopus, góp phần tạo nên thương hiệu của Nhà trường.

Ngoài giảng dạy các môn khoa học cơ bản, từ năm học 2018-2019, Khoa KHCB được Nhà trường giao nhiệm vụ đào tạo chuyên ngành Toán - Tin ứng dụng thuộc ngành đào tạo Toán ứng dụng. Hiện đã có 6 khóa sinh viên tốt nghiệp ra trường, tỉ lệ sinh viên có việc làm ngay rất cao và với mức thu nhập cao. Năm học 2024 - 2025 khoa tiếp tục mở chuyên ngành Ngôn ngữ Anh chính thức tuyển sinh. Việc tiếp tục mở các ngành đào tạo mới, theo hướng chuyên môn mà Khoa đang quản lý là hướng phát triển tiếp theo của Khoa trong thời gian tới.

Để đạt được những thành quả trong giảng dạy và nghiên cứu, thời gian qua, Khoa đã luôn khuyến khích đội ngũ giảng viên chủ động đổi mới, cải tiến phương pháp giảng dạy, tích cực tham gia các Hội nghị, Hội thảo trong nước và quốc tế về các lĩnh vực chuyên môn, tăng cường các công bố quốc tế để nâng cao chất lượng nghiên cứu khoa học.

Tiếp nối thành công của Hội thảo từ năm 2018 đến nay, Khoa Khoa học Cơ bản tổ chức **"Hội thảo về giảng dạy và nghiên cứu Khoa học Cơ bản năm 2026"**. Hội thảo là diễn đàn để các giảng viên, các nhà khoa học trao đổi, học hỏi, chia sẻ kinh nghiệm nghiên cứu và giảng dạy trong các lĩnh vực: Toán học, Vật lý, Hóa học, Ngoại ngữ, Cơ lý thuyết và Hình họa - Vẽ kỹ thuật và các lĩnh vực khác liên quan. Những công trình nghiên cứu có giá trị của Hội thảo được biên tập và xuất bản trong cuốn **"Kỷ yếu Hội thảo về giảng dạy và nghiên cứu Khoa học Cơ bản năm 2026"**.

Khoa Khoa học cơ bản trân trọng gửi lời cảm ơn tới các tác giả trong và ngoài Trường đã dành sự quan tâm và gửi đến Hội thảo các bài viết có chất lượng. Xin cảm ơn các nhà giáo, các nhà khoa học từ các Trường đại học, các Viện nghiên cứu đã dành thời gian và công sức đọc phản biện các bài báo, giúp Ban tổ chức lựa chọn các báo cáo tiêu biểu để đăng trong Kỷ yếu của Hội thảo. Những kết quả từ Hội thảo sẽ là cơ sở quan trọng để Khoa tiếp tục đổi mới, cải tiến phương pháp giảng dạy, định hướng nghiên cứu khoa học cũng như triển khai mở mới các ngành đào tạo.

Trong quá trình biên tập Kỷ yếu, không tránh khỏi những hạn chế, thiếu sót, Ban tổ chức mong nhận được sự chia sẻ và các ý kiến góp ý của độc giả.

Xin trân trọng cảm ơn!

BAN TỔ CHỨC HỘI THẢO

KHẢO SÁT TRẠNG THÁI NGƯNG TỤ POLARITON TRONG HỆ ĐIỆN TỬ-LỖ TRỐNG MẤT CÂN BẰNG KHỐI LƯỢNG THÔNG QUA HÀM PHỔ ĐƠN HẠT

Nguyễn Thị Hậu^{*,1,2}, Đỗ Thị Hồng Hải²

¹Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 18 Hoàng Quốc Việt, Cầu Giấy, Hà Nội

²Trường Đại học Mỏ - Địa chất, 18 Phố Viên, Đông Ngạc, Hà Nội

*Tác giả liên hệ: Email: nguyenthihau@humg.edu.vn; Tel: 0983572356

Tóm tắt: Trong bài báo này, chúng tôi khảo sát trạng thái ngưng tụ polariton trong vi hốc quang học có sự mất cân bằng khối lượng giữa điện tử và lỗ trống. Mô hình được xây dựng trên cơ sở Hamiltonian ghép vật chất-ánh sáng và được xử lý trong gần đúng trường trung bình để thu được các tham số trật tự mô tả trạng thái ngưng tụ của hệ. Để nhận diện các dấu hiệu hình thành các trạng thái ngưng tụ polariton, chúng tôi tính toán và phân tích hàm phổ đơn hạt của điện tử, lỗ trống và photon. Kết quả cho thấy sự mất cân bằng khối lượng giữa điện tử và lỗ trống cũng như tương tác điện tử/lỗ trống - photon ảnh hưởng đáng kể đến cấu trúc phổ và sự tái phân bố cường độ phổ, từ đó chi phối bản chất và mức độ ổn định của các trạng thái ngưng tụ polariton trong vi hốc.

Từ khóa: polariton, cấu trúc vi hốc, hàm phổ đơn hạt, mất cân bằng khối lượng

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Polariton là các giả hạt được hình thành do sự tương tác ghép cặp giữa photon trong vi hốc quang học và exciton (cặp điện tử - lỗ trống liên kết) trong giếng lượng tử [1]. Trong vi hốc quang, sự tương tác mạnh này dẫn đến sự tách mức năng lượng thành hai nhánh - polariton nhánh dưới (LP) và polariton nhánh trên (UP) - đặc trưng cho chế độ ghép mạnh. Với khối lượng hiệu dụng cực nhỏ (cỡ 10^{-5} lần khối lượng electron tự do) và tính chất boson ở năng lượng thấp, polariton có thể đạt được sự ngưng tụ lượng tử ở nhiệt độ cao hơn nhiều so với các hệ nguyên tử lạnh thông thường [2], nhờ đó mở ra khả năng ứng dụng rất lớn trong công nghệ hiện đại như thông tin lượng tử [3], laser polariton [4], các mạch quang học [5], ...

Trong các cấu trúc vi hốc, mối tương quan giữa khối lượng hiệu dụng của điện tử ở vùng dẫn và lỗ trống ở vùng hóa trị thường không giống nhau đối với các vi hốc được chế tạo từ các vật liệu khác nhau. Sự sai khác đó làm thay đổi cấu trúc phổ, mức độ ghép cặp điện tử-lỗ trống và tính chất của exciton hình thành. Khi exciton tiếp tục tương tác với photon trong vi hốc, những biến đổi này có thể được khuếch đại thông qua cơ chế lai hóa ánh sáng-vật chất. Đã có nhiều công trình đã nghiên cứu trạng thái ngưng tụ exciton hoặc polariton trong các trường hợp lý tưởng, nhưng phần lớn các mô hình giả định sự tương đương giữa khối lượng điện tử và lỗ trống. Giả định này chỉ phù hợp với

một số vật liệu hai chiều đặc biệt mà không phản ánh tính đa dạng của các hệ polariton đã được quan sát ở nhiệt độ phòng như hệ GaAs [6], ZnO [7], hoặc các dichalcogenide kim loại chuyển tiếp (TMDs) [8-10],... Trong các hệ này khối lượng điện tử và lỗ trống là khác nhau, với GaAs có khối lượng lỗ trống $m_h \approx 6,67 m_e$ [11, 12], trong khi ở ZnO $m_h \approx 2 m_e$ [13], còn trong TMDs $m_h \approx m_e$ [14, 15],.... Do đó, việc khảo sát vai trò của mất cân bằng khối lượng giữa điện tử và lỗ trống trong môi trường vi hóc là cần thiết để hiểu rõ hơn bản chất của các pha ngưng tụ.

Trong công trình [16], chúng tôi đã phân tích ảnh hưởng đồng thời của sự mất cân bằng khối lượng điện tử-lỗ trống và cường độ tương tác điện tử/lỗ trống - photon đến sự hình thành trạng thái ngưng tụ polariton ở nhiệt độ không thông qua tham số trật tự trạng thái ngưng tụ, hàm cảm ứng tĩnh và năng lượng giả hạt trong không gian xung lượng. Để làm rõ hơn các dấu hiệu của các trạng thái ngưng tụ polariton, trong bài báo này chúng tôi tính các hàm phổ đơn hạt của điện tử, lỗ trống, photon dựa trên phương trình chuyển động cho hàm Green. Các hàm phổ này được tính số để thu được cường độ phổ phát xạ ứng với các tham số thay đổi khác nhau như trong công trình [16].

Chúng tôi trình bày bài báo thành 4 phần, trong đó phần 1 là giới thiệu tổng quan về ngưng tụ polariton, phần 2 là mô hình tính toán giải tích. Phần 3 trình bày các kết quả tính số mô tả phổ phát quang khi thay đổi khối lượng lỗ trống và tương tác điện tử/lỗ trống - photon. Các kết luận được trình bày trong phần 4.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Hamiltonian mô tả hệ điện tử, lỗ trống và photon trong cấu trúc vi hóc được mô tả bởi:

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}_{cv} + \mathcal{H}_{ph} + \mathcal{H}_{c-v} + \mathcal{H}_{cv-ph} \quad (1)$$

Trong đó, lần lượt các thành phần mô tả hệ điện tử, lỗ trống tự do $\mathcal{H}_{cv}$, photon trong vi hóc $\mathcal{H}_{ph}$, tương tác Coulomb giữa điện tử - lỗ trống $\mathcal{H}_{c-v}$ và tương tác giữa điện tử - lỗ trống - photon $\mathcal{H}_{cv-ph}$ có biểu thức lần lượt là:

$$\mathcal{H}_{cv} = \sum_{\mathbf{k}} (\epsilon_{\mathbf{k}}^c c_{\mathbf{k}}^\dagger c_{\mathbf{k}} + \epsilon_{\mathbf{k}}^v v_{\mathbf{k}}^\dagger v_{\mathbf{k}}) \quad (2)$$

$$\mathcal{H}_{ph} = \sum_{\mathbf{q}} \omega_{\mathbf{q}} a_{\mathbf{q}}^\dagger a_{\mathbf{q}} \quad (3)$$

$$\mathcal{H}_{c-v} = -\frac{U}{N} \sum_{\mathbf{k}, \mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2} c_{\mathbf{k}+\mathbf{k}_1}^\dagger c_{\mathbf{k}_1} v_{-\mathbf{k}+\mathbf{k}_2}^\dagger v_{\mathbf{k}_2} \quad (4)$$

$$\mathcal{H}_{cv-ph} = -\frac{g}{\sqrt{N}} \sum_{\mathbf{k}, \mathbf{q}} (c_{\mathbf{k}+\mathbf{q}}^\dagger v_{-\mathbf{k}}^\dagger a_{\mathbf{q}} + a_{\mathbf{q}}^\dagger v_{-\mathbf{k}} c_{\mathbf{k}+\mathbf{q}}) \quad (5)$$

Với $c_k^\dagger(c_k)/v_k^\dagger(v_k)/a_q^\dagger(a_q)$ lần lượt là toán tử sinh (hủy) của điện tử/lỗ trống/photon mang xung lượng k/q , U là cường độ thế tương tác Coulomb giữa điện tử - lỗ trống, g là hằng số tương tác điện tử/lỗ trống - photon, $\varepsilon_k^c/\varepsilon_k^v/\omega_q$ lần lượt là năng lượng tán sắc của điện tử/lỗ trống/photon có biểu thức được biểu diễn trong gần đúng liên kết chặt như sau:

$$\varepsilon_k^{c/v} = -2t^{c/v}(\cos k_x + \cos k_y) + \frac{E_g + 8t^{c/v} - \mu}{2} \quad (6)$$

$$\omega_q = \sqrt{(cq)^2 + \omega_0^2} - \mu \quad (7)$$

Trong đó $t^{c/v}$ là tích phân nhảy nút của điện tử/lỗ trống trong mạng tinh thể. E_g là khoảng cách từ đáy của dải dẫn tới đỉnh của dải hóa trị, với $E_g > 0$ ta có trạng thái bán dẫn, và ngược lại $E_g < 0$ ta có trạng thái bán kim loại. c là vận tốc ánh sáng trong vi hốc, ω_0 là năng lượng của photon tại xung lượng không, μ là thế hóa học. Trong điều kiện thông thường photon có thể được tạo ra hoặc bị phá hủy một cách tự do, do đó thế hóa học của photon bằng 0. Tuy nhiên, đối với các hệ bị giới hạn như vi hốc quang học, giá trị này có thể khác không [2, 17]. Vì vậy, trong khuôn khổ nghiên cứu này, chúng tôi giả sử thế hóa học của photon đồng nhất với thế hóa học của các điện tử, ký hiệu chung là μ , nhằm đảm bảo trạng thái ngưng tụ polariton đạt cân bằng nhiệt. Để đặc trưng cho độ lệch giữa dải năng lượng điện tử/lỗ trống với mode photon trong vi hốc ta dùng tham số điều chỉnh $\Delta = \omega_0 - E_g$ [17, 18]. Giá trị của Δ chi phối sự hình thành pha ngưng tụ polariton: khi Δ nhỏ, sự lai hóa ánh sáng-vật chất mạnh và thành phần photon trong ngưng tụ là đáng kể; ngược lại, với Δ lớn, đóng góp của photon trở nên yếu [17, 19].

Bằng việc áp dụng gần đúng Hartree-Fock không giới hạn, đồng thời loại bỏ các hằng số và các số hạng vô cùng bé, Hamiltonian của hệ được viết lại như sau:

$$\mathcal{H}_{HF} = \sum_k \tilde{\varepsilon}_k^c c_k^\dagger c_k + \sum_k \tilde{\varepsilon}_k^v v_k^\dagger v_k + \Lambda \sum_k (c_k^\dagger v_{-k}^\dagger + H.c) + \sum_q \omega_q a_q^\dagger a_q + (\sqrt{N}Y a_0^\dagger + H.c) \quad (8)$$

Trong đó $\tilde{\varepsilon}_k^c$ và $\tilde{\varepsilon}_k^v$ là các năng lượng tán sắc tái chuẩn hóa khi có đóng góp của độ dịch Hartree-Fock, Λ và Y đóng vai trò như tham số trật tự để mô tả các trạng thái ngưng tụ của hệ, lần lượt có biểu thức:

$$\tilde{\varepsilon}_k^{c/v} = \varepsilon_k^{c/v} - U n^{v/c} \quad (9)$$

$$\Lambda = -\frac{g}{\sqrt{N}} \langle a_0 \rangle - \frac{U}{N} \sum_k \langle c_k^\dagger v_{-k}^\dagger \rangle \quad (10)$$

$$Y = -\frac{g}{N} \sum_k \langle c_k^\dagger v_{-k}^\dagger \rangle \quad (11)$$

Với $n^v = \frac{1}{N} \sum_k \langle v_k^\dagger v_k \rangle$, $n^c = \frac{1}{N} \sum_k \langle c_k^\dagger c_k \rangle$ lần lượt là mật độ lỗ trống, điện tử.

Để chéo hóa Hamiltonian trong phương trình (8), đối với phần điện tử ta sử dụng phép biến đổi Bogoliubov bằng cách định nghĩa các toán tử giả hạt fermion mới như sau:

$$\begin{cases} \gamma_{1k}^\dagger = \alpha_k c_k^\dagger + \beta_k v_{-k} \\ \gamma_{2k}^\dagger = -\beta_k c_k^\dagger + \alpha_k v_{-k} \end{cases} \quad (12)$$

Với α_k và β_k được chọn để thỏa mãn điều kiện $\alpha_k^2 + \beta_k^2 = 1$ và có thể tính được với kết quả là

$$\alpha_k^2 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\Xi_k}{\Omega_k} \right), \quad \beta_k^2 = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\Xi_k}{\Omega_k} \right) \quad (13)$$

$$\Xi_k = \frac{\tilde{\epsilon}_k^c + \tilde{\epsilon}_k^v}{2} \quad (14)$$

$$\Omega_k = \sqrt{(\tilde{\epsilon}_k^c + \tilde{\epsilon}_k^v)^2 + |\Lambda|^2} \quad (15)$$

Tương tự, phần photon được chéo hóa bằng việc định nghĩa toán tử photon mới

$$\tilde{a}_q^\dagger = a_q^\dagger - \frac{g}{\sqrt{N}} \frac{\sum_k \langle c_k^\dagger v_{-k}^\dagger \rangle}{\omega_0} \delta_{q,0} \quad (16)$$

Khi đó Hamiltonian ở gần đúng trường trung bình có dạng

$$\mathcal{H}_{dia} = \sum_k (E_k^1 \gamma_{1k}^\dagger \gamma_{1k} + E_k^2 \gamma_{2k}^\dagger \gamma_{2k}) + \sum_q \omega_q \tilde{a}_q^\dagger \tilde{a}_q \quad (17)$$

Trong đó:

$$E_k^{1/2} = \frac{1}{2} [\tilde{\epsilon}_k^v - \tilde{\epsilon}_k^c \pm \Omega_k] \quad (18)$$

Từ Hamiltonian đã được chéo hóa hoàn toàn, các giá trị trung bình có thể được tính một cách trực tiếp. Cụ thể, ta thu được

$$\langle c_k^\dagger v_{-k}^\dagger \rangle = [f(E_k^1) - f(E_k^2)] \frac{\Lambda}{\Omega_k} \quad (19)$$

Trong đó $f(\varepsilon) = (e^{\varepsilon/T} + 1)^{-1}$ là hàm phân bố Fermi-Dirac. Hệ phương trình tự hợp thu được từ (9)-(11) và (18)-(19) cho phép xác định đầy đủ các đại lượng đặc trưng cho trạng thái ngưng tụ của hệ. Dựa trên các đại lượng này, chúng tôi tiếp tục khảo sát cấu trúc kích thích của hệ thông qua hàm phổ đơn hạt. Đại lượng này cho phép mô tả trực tiếp sự phân bố phổ năng lượng theo vector sóng k và tần số ω .

Cụ thể, hàm phổ đơn hạt $A(k, \omega)$ được xác định từ phần ảo của hàm Green trễ như sau:

$$A^x(k, \omega) = -\frac{1}{\pi} \text{Im} \langle \langle x_k, x_k^\dagger \rangle \rangle_\omega \quad (20)$$

Trong đó $x = c, v, a$ lần lượt mô tả điện tử, lỗ trống và photon trong vi hốc. Để xác định hàm phổ đơn hạt trong (20), ta áp dụng phương trình chuyển động cho hàm Green boson (hoặc fermion) có dạng:

$$\omega \langle \langle x, x^\dagger \rangle \rangle_\omega = \langle [x, x^\dagger] \rangle + \langle \langle [x, \mathcal{H}], x^\dagger \rangle \rangle_\omega \quad (21)$$

Sử dụng các phép biến đổi Bogoliubov trong phương trình (12) cùng với Hamiltonian đã được chéo hóa trong (17), ta thu được các hàm phổ đơn hạt của điện tử, lỗ trống và photon tương ứng như sau:

$$A^c(k, \omega) = \alpha_k^2 \delta(\omega - E_k^1) + \beta_k^2 \delta(\omega - E_k^2) \quad (22)$$

$$A^v(k, \omega) = \beta_k^2 \delta(\omega + E_k^1) + \alpha_k^2 \delta(\omega + E_k^2) \quad (23)$$

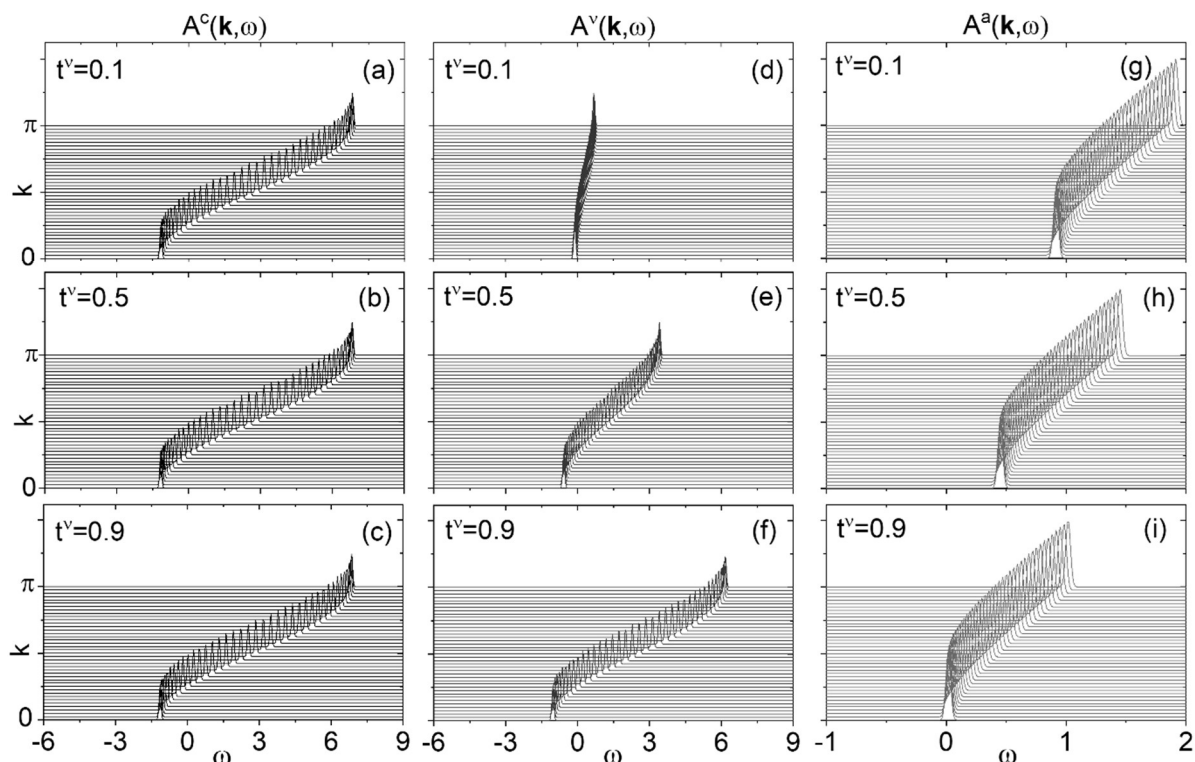
$$A^a(k, \omega) = \delta(\omega - \omega_k) \quad (24)$$

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Phần này trình bày kết quả tính số của các kết quả giải tích hàm phổ đơn hạt trong phần 2 cho một hệ với $N=200 \times 200$ nút mạng. Trong bài báo [16] chúng tôi đã khảo sát ảnh hưởng của mật cân bằng khối lượng và tương tác điện tử/lỗ trống - photon lên sự hình thành trạng thái ngưng tụ polariton thông qua tham số trật tự Λ , năng lượng giả hạt trong không gian xung lượng và hàm cảm ứng tĩnh của điện tử, lỗ trống. Trong bài báo này, chúng tôi tiếp tục làm rõ hơn dấu hiệu trạng thái ngưng tụ polariton thông qua hàm phổ đơn hạt của điện tử, lỗ trống và photon. Các thông số được chúng tôi lựa chọn cố định theo công trình [16] tương ứng với $\omega_0 = 0.5, n = 0.1, U = 1.0$ và $\Delta = 2.0$. Các tính toán được thực hiện trong hệ đơn vị tự nhiên, đồng thời chọn $t^c = 1$ là đơn vị của năng lượng, vì vậy các hình vẽ trong bài đều được biểu diễn theo quy ước này. Do tích phân nhảy nút của điện tử/lỗ trống tỷ lệ nghịch với khối lượng nên khi thay đổi giá trị của t^v thể hiện sự thay đổi khối lượng của lỗ trống. t^v luôn được chọn nhỏ hơn 1 để thể hiện lỗ trống ở dải hóa trị nặng hơn điện tử trên dải dẫn. Nghiên cứu trước đây cho thấy bản chất của pha ngưng tụ polariton có thể được phân loại dựa trên tỷ số giữa tham số trật tự photon và tham số trật tự exciton [17]. Cụ thể, khi tỷ số này nhỏ hơn 20%, trạng

thái ngưng tụ mang đặc trưng chủ yếu của exciton và được xem là pha exciton-polariton. Nếu tỷ số nằm trong khoảng từ 20% đến 80%, hai thành phần exciton và photon đóng góp tương đương, khi đó hệ được xem là ở pha polariton. Trong khi đó, nếu tỷ số vượt quá 80%, thành phần photon chiếm ưu thế và trạng thái ngưng tụ có bản chất gần với photon-polariton. Trong bài báo này, chúng tôi dựa trên tiêu chí phân loại nêu trên để phân tích chi tiết bản chất của các trạng thái ngưng tụ polariton trong hệ đang xét.

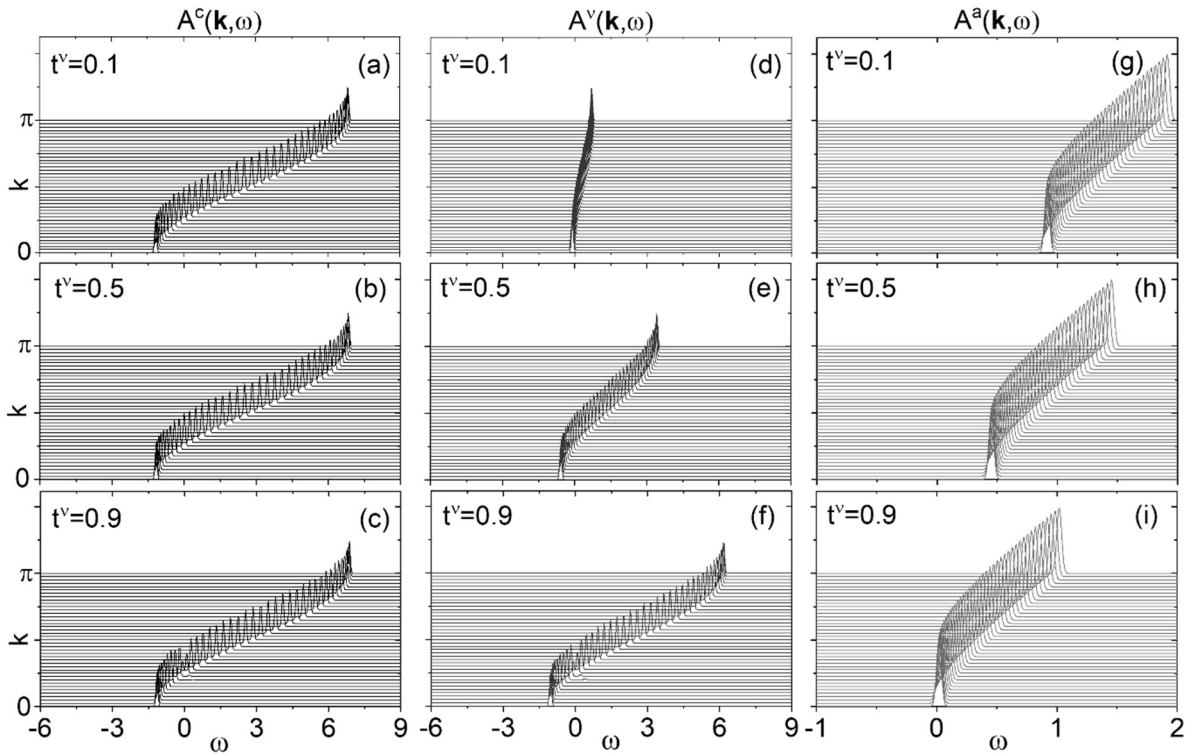
Trước tiên, chúng tôi khảo sát cường độ hàm phổ đơn hạt của điện tử, lỗ trống và photon tại $g = 0$ ứng với các giá trị khác nhau của t^v . Kết quả trên hình 1 thể hiện cường độ các hàm phổ đơn hạt theo hướng $k = k_x = k_y$ trong vùng Brillouin thứ nhất, ứng với ba giá trị khác nhau của t^v . Kết quả cho thấy khi t^v nhỏ, dải hóa trị gần như phẳng và ta thấy sự phân bố cường độ phổ đơn hạt điện tử và lỗ trống không đồng đều (so sánh hình 1a, 1d) nên không có sự lai hóa giữa điện tử và trống. Tăng t^v làm tăng độ linh động của lỗ trống, sự phân bố cường độ phổ đơn hạt đồng đều hơn, tuy nhiên chưa xuất hiện khe năng lượng nên chưa hình thành trạng thái ghép cặp điện tử - lỗ trống. Với phổ đơn hạt photon, chúng tôi luôn quan sát thấy cấu trúc một đỉnh đơn khi thay đổi t^v . Khi lỗ trống nặng (t^v nhỏ), dải kích thích photon đã được tái chuẩn hóa nằm xa mức Fermi (hình 1g). Tăng t^v , hàm phổ photon dịch chuyển gần về mức Fermi, đặc biệt tại các vector sóng gần $k = 0$ [hình 1h và 1i]. Với tất cả các giá trị của t^v trong hình 1 hệ đều tồn tại ở trạng thái lỏng của các hạt tự do.



Hình 1. Phổ phát xạ phân giải theo véc tơ sóng của điện tử (màu đen), lỗ trống (màu đỏ) và photon (màu xanh) tại $g = 0$ ứng với các giá trị khác nhau của t^v .

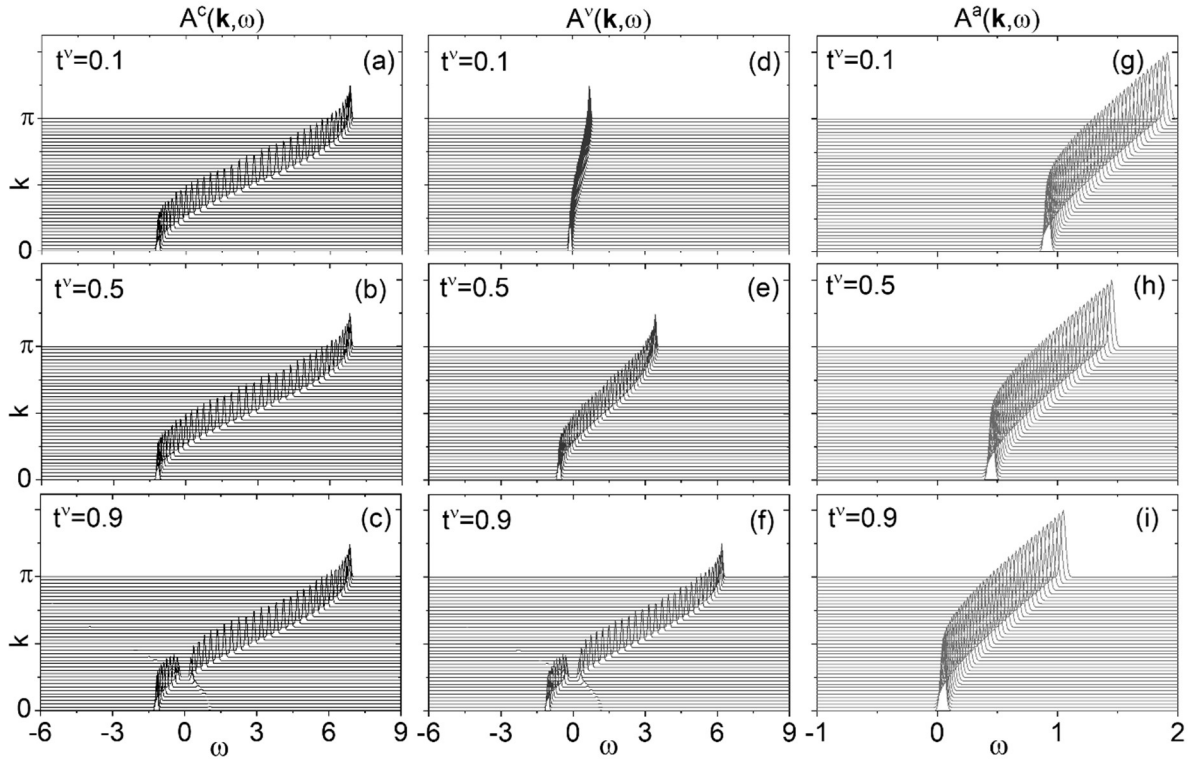
Tiếp theo, trong Hình 2 chúng tôi tăng giá trị tương tác điện tử/lỗ trống - photon lên $g = 0.15$ để xem xét sự hình thành pha ngưng tụ polariton. Khi đó, phổ đơn hạt của điện tử và lỗ trống bắt đầu xuất hiện một khe năng lượng nhỏ tại $t^v = 0.9$, ở giá trị xung lượng khác không (xem Hình 2c và 2f). Sự hình thành cấu trúc hai đỉnh đối xứng quanh mức Fermi cho thấy phổ năng lượng đã tách thành hai nhánh, phản ánh sự lai hóa giữa điện tử vùng dẫn và lỗ trống vùng hóa trị khi lỗ trống trở nên linh động hơn.

Đồng thời, hàm phổ photon dịch chuyển về gần mức Fermi, đặc biệt tại các vectơ sóng quanh $k = 0$ (xem Hình 2i), cho thấy photon tham gia tích cực vào trạng thái kết hợp của hệ. Những đặc điểm này chứng tỏ hệ đã hình thành trạng thái ngưng tụ mang bản chất polariton.

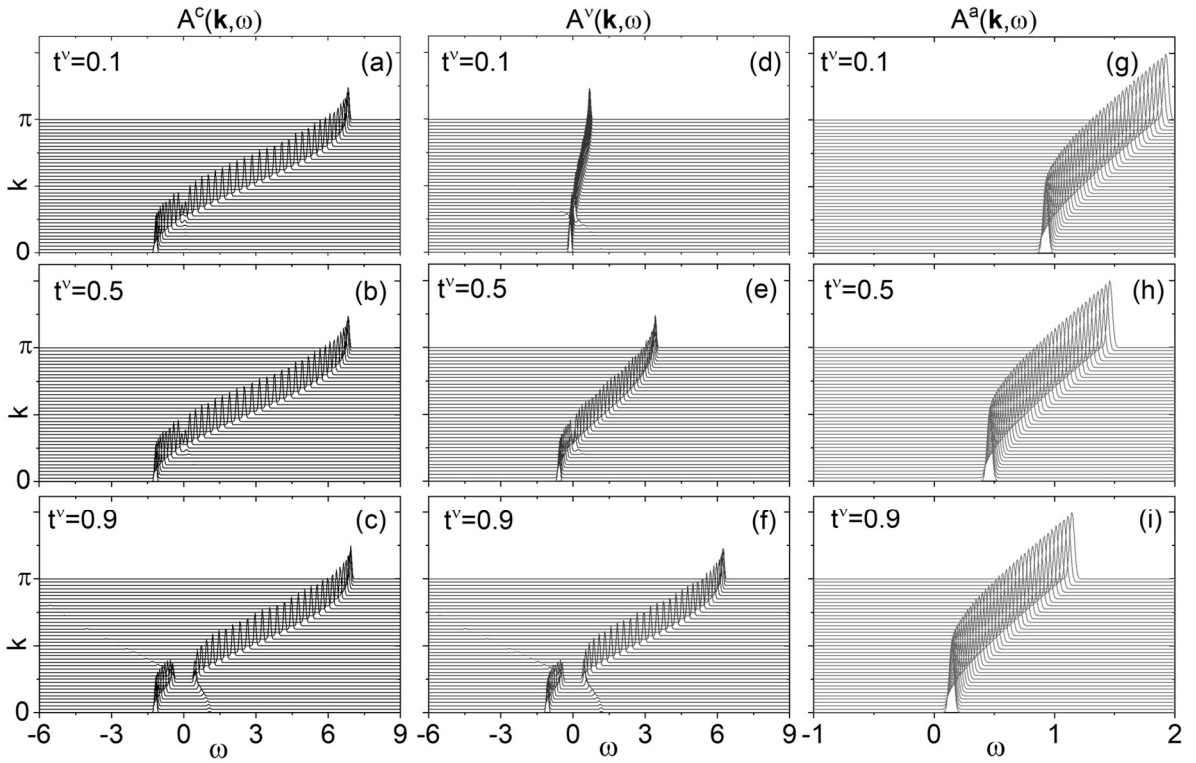


Hình 2. Phổ phát xạ phân giải theo véc tơ sóng của điện tử (màu đen), lỗ trống (màu đỏ) và photon (màu xanh) tại $g = 0.15$ ứng với các giá trị khác nhau của t^v .

Tăng cường độ tương tác điện tử/lỗ trống - photon lên $g = 0.3$, kết quả trên hình 3 cho thấy sự mở rộng khe năng lượng rõ nét tại mức Fermi ứng với $t^v = 0.9$. Sự gia tăng độ rộng của khe phản ánh sự tăng cường quá trình ghép cặp điện tử-lỗ trống gần mức Fermi, đặc trưng cho cơ chế ngưng tụ kiểu BCS của exciton. Trong miền này, các trạng thái điện tử và lỗ trống lân cận mức Fermi đóng vai trò quan trọng trong việc hình thành exciton và ổn định trạng thái ngưng tụ của hệ. Điều này cho thấy khi cường độ tương tác vật chất-ánh sáng đủ lớn, sự ghép cặp điện tử-lỗ trống được củng cố và đồng thời tăng cường cơ chế lai hóa với photon trong vi hóc. Hệ ổn định trong trạng thái ngưng tụ dạng polariton.



Hình 3. Phổ phát xạ phân giải theo véc tơ sóng của điện tử (màu đen), lỗ trống (màu đỏ) và photon (màu xanh) tại $g = 0.3$ ứng với các giá trị khác nhau của t^v .



Hình 4. Phổ phát xạ phân giải theo véc tơ sóng của điện tử (màu đen), lỗ trống (màu đỏ) và photon (màu xanh) tại $g = 0.6$ ứng với các giá trị khác nhau của t^v .

Tiếp tục tăng tương tác điện tử/lỗ trống-photon lên $g = 0.6$, trên hình 4 ta thấy khe năng lượng tại mức Fermi xuất hiện ngay cả khi mất cân bằng khối lượng rất lớn ($t^v = 0.1$ trên hình 4a, d). Khi này dải năng lượng của photon còn xa mức Fermi, do đó đóng góp của photon là không đáng kể, hệ tồn tại ở trạng thái ngưng tụ exciton-polariton. Tăng t^v làm tăng độ linh động của lỗ trống, đồng thời phổ photon cũng tiến đến gần đến mức Fermi hơn, đóng góp của photon vào trạng thái ngưng tụ của hệ trở nên đáng kể, hệ chuyển sang trạng thái ngưng tụ dạng polariton.

4. KẾT LUẬN

Có thể thấy rằng các kết quả thu được từ cường độ phổ phát xạ phân giải theo véc tơ sóng k của điện tử, lỗ trống và photon hoàn toàn tương thích với các giản đồ pha được xây dựng dựa trên tham số trật tự, hàm cảm ứng tĩnh và phổ năng lượng giả hạt đã trình bày trước đó [16]. Đặc biệt, trong miền tham số xuất hiện trạng thái ngưng tụ, phổ đơn hạt cho thấy sự hình thành khe năng lượng tại mức Fermi, thể hiện qua sự tách đôi của các nhánh kích thích trong phổ đơn hạt của điện tử và lỗ trống. Sự xuất hiện của khe năng lượng này phản ánh quá trình ghép cặp điện tử - lỗ trống hình thành exciton trong hệ và hoàn toàn phù hợp với miền mà tham số trật tự nhận giá trị khác không. Đồng thời, khi thay đổi mức độ mất cân bằng khối lượng hoặc cường độ tương tác điện tử/lỗ trống - photon, độ rộng khe và vị trí các đỉnh phổ biến thiên tương ứng với xu hướng thay đổi của các đại lượng đã phân tích trước đó. Điều này khẳng định rằng hàm phổ đơn hạt là một công cụ hiệu quả để nhận diện và kiểm chứng sự hình thành các trạng thái ngưng tụ polariton trong hệ mất cân bằng khối lượng.

Tài liệu tham khảo:

- [1]. C. Weisbuch, N. Nishioka, A. Ishikawa, Y. Arakawa, Observation of the coupled exciton-photon mode splitting in a semiconductor quantum microcavity, *Phys. Rev. Lett.* 69 (1992) 3314-3317. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.69.3314>.
- [2]. A. Rahimi-Iman, *Polariton Physics* (Springer, 2020)
- [3]. Boulier, T. et. al.. Microcavity Polaritons for Quantum Simulation, *Adv. Quantum Technol.* 3 (2020), 2000052. <https://doi.org/10.1002/qute.202000052>
- [4]. Dusel, M. et. al.. Room-Temperature Topological Polariton Laser in an Organic Lattice, *Nano Lett.*, 21 (2021), 6398-6405. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c00661>
- [5]. Zasedatelev, A.V. et. al.. A room-temperature organic polariton transistor, *Nat. Photon* 13 (2019), 378. <https://doi.org/10.1038/s41566-019-0392-8>
- [6]. H. Alnatah, Q. Yao, Q. Wan, J. Beaumariage, K. West, K. Baldwin, L. N. Pfeiffer, and D. W. Snoke, Bose-Einstein Condensation of Polaritons at Room Temperature in a GaAs/AlGaAs Structure, *ACS Photonics* 12 (2025). <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.4c01992>
- [7]. F. Li, L. Orosz, O. Kamoun, S. Bouchoule, C. Brimont, P. Disseix, T. Guillet, X. Lafosse, M. Leroux, J. Leymarie, M. Mexis, M. Mihailovic, G. Patriarche, F. Reveret,

- D. Solnyshkov, J. Zuniga-Perez, and G. Malpuech, From excitonic to photonic polariton condensate in a ZnO-based microcavity, *Phys. Rev. Lett.* 110 (2013), 196406. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.196406>.
- [8] Y. Liu, H. Fang, A. Rasmita, Y. Zhou, J. Li, T. Yu, Q. Xiong, N. Zheludev, J. Liu, and W. Gao, Room temperature nanocavity laser with interlayer excitons in 2D heterostructures, *Science Advances* 5 (2019), eaav4506. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav4506>
- [9]. J. Zhao, R. Su, A. Fieramosca, W. Zhao, X. L. W. Du, C. Diederichs, D. Sanvitto, T. C. Liew, and Q. Xiong, Ultralow threshold polariton condensate in a monolayer semiconductor microcavity at room temperature, *Nano Lett.* 21 (2021), 3331-3339. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c01162>
- [10]. J. Zhao, A. Fieramosca, K. Dini, R. Bao, W. Du, R. Su, Y. Luo, W. Zhao, D. Sanvitto, T. C. H. Liew, and Q. Xiong, Exciton polariton interactions in Van der Waals superlattices at room temperature, *Nature Communications* 14 (2023), 1512. doi: 10.1038 / s41467-023-36912-3.
- [11]. W. Nakwaski, Effective masses of electrons and heavy holes in GaAs, InAs, AlAs and their ternary compounds, *Physica B* 210 (1995), 1. [https://doi.org/10.1016/0921-4526\(94\)00921-H](https://doi.org/10.1016/0921-4526(94)00921-H).
- [12]. S. Pau, G. Bjork, J. Jacobson, H. Cao, and Y. Yamamoto, Stimulated emission of a microcavity dressed exciton and suppression of phonon scattering, *Phys. Rev. B* 51 (1995), 7090. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.51.7090>.
- [13]. B. Enright and D. Fitzmaurice, Spectroscopic Determination of Electron and Hole Effective Masses in a Nanocrystalline Semiconductor Film, *J. Phys. Chem.* 100 (1996), 1027. <http://dx.doi.org/10.1021/jp951142w>.
- [14]. A. Kormányos, G. Burkard, M. Gmitra, J. Fabian, V. Zólyomi, N. D. Drummond, V. Fal'ko, k·p theory for two-dimensional transition metal dichalcogenide semiconductors, *2D Mater.* 2 (2015), 022001. doi:10.1088/2053-1583/2/2/022001
- [15]. J. Chang, L. F. Register, and S. Banerjee, Ballistic performance comparison of monolayer transition metal dichalcogenide MX₂ (M = Mo, W; X = S, Se, Te) metal-oxide-semiconductor field effect transistors, *J. Appl. Phys.* 115 (2014), 084506. <https://doi.org/10.1063/1.4866872>
- [16]. D. T. H. Hai, H. Q. Anh, N. T. Hau, Effects of Electron-hole Mass Imbalance and Electron-photon Interaction on the Condensation of Exciton-polariton Systems, *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, July - December, 2025, 147-154. <https://doi.org/10.29227/IM-2025-02-13>
- [17]. K. Kamide and T. Ogawa, Ground-state properties of microcavity polariton condensates at arbitrary excitation density, *Phys. Rev. B* 83 (2011), 165319. doi: 10.1103/PhysRevB.83.165319.

- [18]. K. Kamide and T. Ogawa, What determines the wave function of electron-hole pairs in polariton condensates, *Phys. Rev. Lett.* 105 (2010), 056401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.105.056401>
- [19]. D. Bui and V. Phan, Thermal fluctuations in a system of microcavity exciton-polariton condensations, *Phys. Status Solidi B* 254 (2017), 1600359. <https://doi.org/10.1002/pssb.201600359>

NHÀ XUẤT BẢN GIAO THÔNG VẬN TẢI

Địa chỉ: Số 8 phố Tăng Bạt Hổ, phường Cửa Nam, TP. Hà Nội

ĐT: 024.39423346 - 024.39424620 * Fax: 024.38224784

Website: www.nxbgtvt.vn

CHỊU TRÁCH NHIỆM XUẤT BẢN, NỘI DUNG:

GIÁM ĐỐC - TỔNG BIÊN TẬP:

Nguyễn Minh Nhật

BIÊN TẬP:

Dương Hồng Hạnh

THIẾT KẾ:

Xưởng in Trường Đại học Giao thông vận tải

ĐỐI TÁC LIÊN KẾT XUẤT BẢN: Trường Đại học Giao thông Vận tải

In 300 cuốn khổ 20,5 x 29,5cm tại Xưởng in Trường Đại học Giao thông Vận tải.

Địa chỉ: Số 3, phố Cầu Giấy, Phường Láng, TP. Hà Nội.

Số xác nhận đăng ký xuất bản: 1146-2026/CXBIPH/3-22/GTVT.

Mã số sách tiêu chuẩn quốc tế - ISBN: 978-604-76-3346-3.

Quyết định xuất bản số: 43 LK/QĐ-XBGT ngày 02 tháng 4 năm 2026.

In xong và nộp lưu chiểu năm 2026.