



NSA 2025





TRƯỜNG ĐẠI HỌC
SƯ PHẠM KỸ THUẬT HƯNG YÊN



HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ
BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG



UNETI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC
KINH TẾ - KỸ THUẬT CÔNG NGHIỆP

HỘI THẢO KHOA HỌC QUỐC GIA
**KHOA HỌC TỰ NHIÊN VÀ ỨNG DỤNG
TRONG THỜI ĐẠI SỐ**
(Lần thứ 2)

THE 2nd NATIONAL SYMPOSIUM ON NATURAL SCIENCES
AND APPLICATIONS IN THE DIGITAL AGE

NSA2025



NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT

CÁC BAN CỦA HỘI THẢO NSA2025

1. BAN CHỈ ĐẠO

Trưởng ban

- GS. TS. Từ Minh Phương (PTIT)

Đồng trưởng ban

- PGS. TS. Bùi Trung Thành (UTEHY)
- TS. Trần Hoàng Long (UNETI)

Thành viên

- GS. TS. Nguyễn Quang Liêm (VPS)
- GS. TSKH. Vũ Hoàng Linh (VNU – HUS)
- PGS. TS. Lê Minh Hà (VIASM)
- TS. Trần Nam Tú (KHCN&MT – Bộ Giáo dục và Đào tạo)

2. BAN TỔ CHỨC

Trưởng ban

- PGS. TS. Đặng Hoài Bắc (PTIT)

Đồng trưởng ban

- PGS. TS. Nguyễn Hữu Quang (UNETI)
- TS. Nguyễn Minh Quý (UTEHY)

Thành viên

- | | |
|---------------------------------|----------------------------------|
| ▪ GS. TS. Phạm Ngọc Anh (PTIT) | ▪ TS. Nguyễn Anh Tuấn (UNETI) |
| ▪ GS. TSKH. Phạm Thế Long (MTA) | ▪ TS. Vũ Hồng Sơn (UTEHY) |
| ▪ TS. Ngô Đức Thiện (PTIT) | ▪ TS. Trần Thị Hoàng Yến (UNETI) |
| ▪ TS. Nguyễn Thị Thúy (UTEHY) | |

3. BAN CHƯƠNG TRÌNH

Trưởng ban

- GS. TS. Phạm Ngọc Anh (PTIT)

Đồng trưởng ban

- GS. TSKH. Phạm Kỳ Anh (VNU - HUS)
- GS. TS. Đặng Văn Soa (UNETI)

Thành viên

- GS. TS. Đặng Quang Á (VAST)
- GS. TSKH. Lê Dũng Mưu (TLU)
- GS. TS. Nguyễn Huy Sinh (VNU - HUS)
- PGS. TS. Bùi Văn Định (MTA)
- PGS. TS. Nguyễn Thị Thu Thủy (HUST)
- TS. Nguyễn Thị Thúy (UTEHY)
- TS. Trần Thị Hoàng Yến (UNETI)

4. BAN BIÊN TẬP VÀ THƯ KÝ

Trưởng ban

- TS. Đỗ Trung Anh (PTIT)

Đồng trưởng ban

- TS. Nguyễn Anh Tuấn (UNETI)
- TS. Vũ Hồng Sơn (UTEHY)

Thành viên

- TS. Giáp Văn Cường (UTEHY)
- TS. Hoàng Phi Dũng (PTIT)
- TS. Lê Xuân Huy (UNETI)
- TS. Chu Bình Minh (UNETI)
- TS. Trần Hồng Thái (UTEHY)
- ThS. Nguyễn Văn Hình (PTIT)

5. BAN CHUYÊN MÔN

a. Tiểu ban 1: Mô hình, Thuật toán và Ứng dụng

Trưởng tiểu ban

- GS. TS. Đặng Quang Á (VAST)

Đồng trưởng tiểu ban

- GS. TSKH. Lê Dũng Mưu (TLU)

Thư ký

- TS. Lê Văn Ngọc (PTIT)

Thành viên

- PGS. TS. Nguyễn Thị Thu Thủy (HUST)
- PGS. TS. Trương Thùy Dương (BAV)
- PGS. TS. Nguyễn Văn Hậu (UTEHY)
- PGS. TS. Hà Tiến Ngoạn (UNETI)
- TS. Trần Thị Hoàng Anh (ALPHA SCHOOL)
- TS. Nguyễn Thị Quỳnh Anh (DH KTHC CAND)
- TS. Phạm Văn Bằng (UNETI)
- TS. Nguyễn Quang Chung (UTEHY)
- TS. Bùi Xuân Diệu (HUST)
- TS. Hoàng Phi Dũng (PTIT)
- TS. Nguyễn Đức Hiền (DTU)
- TS. Lê Xuân Huy (UNETI)
- TS. Nguyễn Kiều Linh (PTIT)
- TS. Chu Bình Minh (UNETI)
- TS. Phùng Duy Quang (FTU)
- TS. Nguyễn Thị Thúy Quỳnh (AOF)
- TS. Nguyễn Thị Minh Tâm (PTIT)
- TS. Hoàng Thị Cẩm Thạch (UTT)
- TS. Cao Diệp Thắng (UNETI)
- TS. Trần Văn Thắng (EPU)

b. Tiểu ban 2: Ứng dụng Vật lý trong Khoa học và Công nghệ

Trưởng tiểu ban

- GS. TS. Đặng Văn Soa (UNETI)

Đồng trưởng tiểu ban

- GS. TS. Nguyễn Huy Sinh (VNU-HUS)

Thư ký

- TS. Đàm Nhân Bá (UTEHY)

Thành viên

- | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| ▪ PGS. TS. Lê Bá Sơn (UTC) | ▪ TS. Nguyễn Thị Thúy Liễu (PTIT) |
| ▪ PGS. TS. Tống Sĩ Tiến (UFPF) | ▪ TS. Phạm Thế Tân (UTEHY) |
| ▪ TS. Giáp Văn Cường (UTEHY) | ▪ TS. Vũ Kim Thái (UNETI) |
| ▪ TS. Hoàng Văn Hán (UTEHY) | ▪ TS. Tô Thị Thảo (PTIT) |
| ▪ TS. Nguyễn Thị Hân (UTEHY) | ▪ TS. Nguyễn Thị Sạ (HAUI) |
| ▪ TS. Lê Thị Thu Hiền (UTEHY) | ▪ ThS. Hoàng Thị Lan Hương (PTIT) |
| ▪ TS. Nguyễn Mạnh Hùng (HUMG) | ▪ ThS. Vũ Thị Hồng Nga (PTIT) |
| ▪ TS. Bùi Xuân Kiên (EPU) | |

c. Tiểu ban 3: Công nghệ số và phương pháp giảng dạy Toán – Vật lý trong các trường ĐH Kỹ thuật và công nghệ

Trưởng tiểu ban

- GS. TSKH. Phạm Kỳ Anh (VNU - HUS)

Đồng trưởng tiểu ban

- PGS. TS. Phạm Thúc Tuyên (VNU - HUS)

Thư ký

- TS. Lê Xuân Huy (UNETI)

Thành viên

- | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|
| ▪ PGS. TS. Lê Bá Long (PTIT) | ▪ TS. Lê Bá Phương (HAUI) |
| ▪ TS. Trần Việt Anh (PTIT) | ▪ TS. Bùi Hải Phong (HAU) |
| ▪ TS. Trần Đức Chiên (UNETI) | ▪ TS. Nguyễn Hồng Quân (PTIT) |
| ▪ TS. Nguyễn Thị Dung (PTIT) | ▪ TS. Ngô Thị Kim Quy (PTIT) |
| ▪ TS. Nguyễn Anh Đài (UTEHY) | ▪ TS. Trần Hồng Thái (UTEHY) |
| ▪ TS. Nguyễn Xuân Hải (PTIT) | ▪ TS. Lê Minh Thanh (PTIT) |
| ▪ TS. Đào Thị Hồng (PTIT) | ▪ TS. Đỗ Duy Thành (HPUNI) |
| ▪ TS. Mai Thị Hồng (HUCE) | ▪ TS. Hồ Phi Tứ (HPUNI) |
| ▪ TS. Nguyễn Thị Lan Hương (HUMG) | ▪ TS. Hoàng Xuân Vinh (VNU – UEB) |
| ▪ TS. Nguyễn Như Tuấn (Tạp chí ATTT) | ▪ TS. Trịnh Xuân Yên (UTEHY) |

MỤC LỤC

LỜI NÓI ĐẦU.....	5
CÁC BÁO CÁO MỜI	6

Phần 1

MÔ HÌNH, THUẬT TOÁN VÀ ỨNG DỤNG

ĐIỀU KIỆN TỒN TẠI NGHIỆM CHO BÀI TOÁN CÂN BẰNG TRONG KHÔNG GIAN TỔNG QUÁT VỚI CÁC GIẢ THIẾT KHÔNG LỖI.....	14
<i>Nguyễn Xuân Hải</i>	
MỘT LỚP PHƯƠNG TRÌNH VI-TÍCH PHÂN BẬC VÔ HẠN DẠNG RITT LIÊN QUAN ĐẾN BIẾN ĐỔI MEHLER-FOCK.....	21
<i>Lê Xuân Huy, Phạm Văn Hoàng, Nguyễn Thanh Hồng</i>	
APPROXIMATE PROJECTION ALGORITHMS FOR MULTIVALUED VARIATIONAL INEQUALITY PROBLEMS.....	29
<i>Hoang Thi Cam Thach</i>	
GLOBAL DYNAMICS OF A THREE-DIMENSIONAL SYSTEM OF DIFFERENCE EQUATIONS WITH QUADRATIC TERMS	38
<i>Tran Hong Thai</i>	
THUẬT TOÁN PIECEMEAL-DFS CHO VIỆC TÌM KIẾM DUYỆT SÂU VỚI MỨC NĂNG LƯỢNG RÀNG BUỘC TRÊN BÀI TOÁN HỢP HAI CÂY CHO TRƯỚC.....	46
<i>Nguyễn Minh Tuấn, Nguyễn Hồng Sơn và Châu Văn Vân</i>	
ỨNG DỤNG MẠNG LSTM NÂNG CAO HIỆU QUẢ NHẬN DIỆN HÀNH ĐỘNG NGƯỜI DỰA TRÊN YOLOV11 POSE.....	54
<i>Phạm Trần Công Hoàng, Nguyễn Thị Nguyệt</i>	
CẤU TRÚC MẠNG NƠ-RON SONG TUYẾN TÍNH CHO BÀI TOÁN PHÂN LOẠI.....	64
<i>Nguyễn Minh Tuấn, Nguyễn Hồng Sơn</i>	
GIẢ NGỊCH ĐẢO CỦA MA TRẬN VÀ NGHIỆM BÌNH PHƯƠNG TỐI THIỂU.....	71
<i>Trần Quang Tuệ</i>	
TỐI ƯU HÓA DANH MỤC ĐẦU TƯ THEO TỶ LỆ SHARPE BẰNG THUẬT TOÁN DI TRUYỀN	82
<i>Chu Bình Minh, Hà Bình Minh, Phan Đình Phùng, Nguyễn Mai Quyên</i>	
NEURAL NETWORK-BASED EMPLOYEE ATTENDANCE TRACKING USING ARCFACE LOSS: A CASE STUDY AT THE LAO NATIONAL INTERNET CENTER (LANIC).....	89
<i>Vanhsana Soukthavone, Nguyen Tat Thang</i>	
XÂY DỰNG PHƯƠNG PHÁP LẬP TÌM NGHIỆM CỦA PHƯƠNG TRÌNH VI-TÍCH PHÂN CẤP HAI VỚI ĐIỀU KIỆN BIÊN HAI ĐIỂM CÓ ĐỘ CHÍNH XÁC CẤP 6.....	101
<i>Nguyễn Thị Thu Hà</i>	

ỨNG DỤNG THUẬT TOÁN PPO VÀ THUẬT TOÁN GA TRONG CHIẾN LƯỢC ĐỊNH GIÁ KINH DOANH.....	109
<i>Lê Hằng Anh</i>	
A RESULT ON THE BEHAVIOR OF SOLUTIONS TO PARTIAL NEUTRAL FUNCTIONAL DIFFERENTIAL EQUATIONS IN ADMISSIBLE SPACES	118
<i>Nguyễn Thị Mơ, Trịnh Xuân Yển</i>	
ĐA TẬP KHÔNG ỔN ĐỊNH CỦA PHƯƠNG TRÌNH VI PHÂN TRUNG TÍNH VỚI ĐIỀU KIỆN HILLE-YOSIDA	126
<i>Phạm Văn Bằng, Ngô Quý Đăng</i>	
CONNECTNET: JOINT DISCOVERY OF PATIENT SUBGROUPS AND CONNECTED GENE MODULES VIA INTEGER PROGRAMMING.....	138
<i>Đỗ Văn Hoàn, Bùi Quốc Hưng, Phạm Tiến Dũng, Đỗ Anh Tuấn, Nguyễn Hồng Nam</i>	
TÍNH TIÊU HAO CỦA MẠNG NƠ RON PHÂN THỨ KHALIL CÓ TRỄ BIẾN THIÊN.....	149
<i>Nguyễn Thị Thanh Huyền, Nguyễn Thị Huệ, Mai Viết Thuận</i>	
TÌM KIẾM KHÓA BÍ MẬT CỦA HỆ MÃ DÒNG ĐƠN GIẢN DỰA TRÊN LFSR SỬ DỤNG CÔNG CỤ QISKIT TRÊN MÁY TÍNH LƯỢNG TỬ IBM.....	159
<i>Vũ Minh Thắng, Nguyễn Văn Duẩn, Đỗ Quang Trung</i>	
KRASNOSELSKII-MANN'S TYPE ITERATION METHODS WITH A CONTRACTION FOR FIXED POINTS OF A NONEXPANSIVE MAPPING IN BANACH SPACES	171
<i>Nguyen Thi Quynh Anh</i>	
ƯỚC LƯỢNG MÔ HÌNH ARDL TUYẾN TÍNH VÀ PHI TUYẾN MỐI QUAN HỆ GIỮA ĐỔI MỚI SÁNG TẠO VÀ TĂNG TRƯỞNG KINH TẾ CỦA VIỆT NAM	180
<i>Phùng Duy Quang, Nguyễn Khánh Huyền, Hoàng Nam Quyền</i>	
MỘT SỐ VẤN ĐỀ VỀ CHỈ SỐ HOÀN VỐN NỘI BỘ TRUNG BÌNH.....	193
<i>Tô Văn Ban, Nguyễn Thị Quyên</i>	
MARTINGALE METHOD FOR RUIN PROBABILITY IN A DEPENDENCE MODEL WITH CONSTANT INTEREST RATE	203
<i>Tran Thi Hai Ly, Nguyen Anh Dai, Nguyen Quang Chung</i>	
KẾT HỢP PHƯƠNG PHÁP ARIMA VÀ LSTM CÙNG NGÔN NGỮ LẬP TRÌNH PYTHON VÀO VIỆC DỰ BÁO GIÁ CHO MỘT SỐ SẢN PHẨM TRONG XÂY DỰNG.....	208
<i>Ngô Thị Toán, Nguyễn Thành Công Lợi</i>	
TỐI ƯU HOÁ SỰ LÂY NHIỄM TRONG MÔ HÌNH LAN TRUYỀN THÔNG TIN D-SIR TRÊN MẠNG PHỨC HỢP	214
<i>Hoàng Phi Dũng, Trần Văn Khánh</i>	
ON THE C^*-DYNAMICAL SYSTEMS	224
<i>Dinh Thi Thu, Nguyen Van Sang Hong, Trinh Thi Thuy Hong</i>	
PHƯƠNG PHÁP KHUYẾN NGHỊ BÀI TẬP LẬP TRÌNH DỰA TRÊN DỮ LIỆU PHẢN HỒI NGẦM.....	234
<i>Nguyễn Quang Huy, Lê Như Quỳnh</i>	

ỨNG DỤNG HỌC MÁY VÀ MEDIAPIPE CHO NHẬN DẠNG TƯ THỂ YOGA THEO THỜI GIAN THỰC	243
<i>Nguyễn Quang Huy, Đinh Hoàng Anh, Triệu Ngọc Tâm</i>	
EXISTENCE THEOREMS FOR A FAMILY OF SET-VALUED MAPPINGS AND APPLICATIONS.....	253
<i>Nguyen Hong Quan</i>	
XÂY DỰNG PHƯƠNG PHÁP SỐ CẤP TÁM GIẢI MỘT BÀI TOÁN BIÊN CHO PHƯƠNG TRÌNH CẤP SÁU PHI TUYẾN.....	267
<i>Ngô Thị Kim Quy</i>	
SEGMENTED PPO-BASED TRANSFER LEARNING FOR 2D UAV NAVIGATION IN OBSTACLE-RICH ENVIRONMENTS.....	273
<i>Tạ Chí Hiếu, Phạm Văn Cường</i>	
ROBUST STABILITY OF PERTURBED SWITCHED SYSTEMS WITH SECTOR NONLINEARITIES.....	282
<i>Le Van Ngoc, Nguyen Thi Hang Duy</i>	
<i>Phần 2</i>	
ỨNG DỤNG VẬT LÝ TRONG KHOA HỌC CÔNG NGHỆ	
INVESTIGATION OF ANHARMONIC EXTENDED X-RAY ABSORPTION FINE STRUCTURE DEBYE-WALLER FACTOR OF IRON METAL AFFECTED BY THERMAL DISORDER	292
<i>Nguyen Thi Minh Thuy, Nguyen To Nu, Vu Thi Kim Lien, Tran Huyen Giang, Pham Thi Thao, Bui Ha Anh, Vu Quang Tho, Tong Sy Tien</i>	
STRUCTURAL AND ELECTRONIC PROPERTIES OF 2D Ge/ GaTe HETEROSTRUCTURE: DFT INVESTIGATIONS	301
<i>Nguyen Thi Han, Dam Nhan Ba, Hoang Van Han</i>	
VẬN DỤNG THỂ HIỆU DỤNG TRONG MÔ HÌNH HAI LƯỢNG TUYẾN HIGGS.....	308
<i>Vũ Kim Thái, Đặng Thị Minh Huệ</i>	
KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG CỦA ĐỂ TẢN NHIỆT LÊN NHIỆT ĐỘ CHUYỂN TIẾP CỦA CHIP LED.....	314
<i>Đỗ Mạnh Dũng, Đỗ Thị Kim Thoa, Lương Hữu Bắc</i>	
NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA TRƯỜNG THỂ LÊN ĐẶC TÍNH CẤU TRÚC VÀ PHỔ RAMAN PHÂN CỰC CỦA α QUARTZ.....	320
<i>Tô Thị Thảo</i>	
ẢNH HƯỞNG CỦA NỒNG ĐỘ PHA TẠP Co ĐẾN TÍNH CHẤT QUANG CỦA CÁC NANO TINH THỂ ZnCdS	327
<i>Nguyễn Thị Thu Hoàn, Nguyễn Thị Thuý Hằng, Nguyễn Thanh Tùng, Đồng Thị Linh, Nguyễn Xuân Ca, Đỗ Thị Huệ, Vũ Thị Kim Liên, Nguyễn Thị Hằng Nga và Phạm Minh Tân</i>	
ÁP DỤNG MỘT SỐ PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH BIÊN HIỆN ĐẠI TRONG PHÂN TÍCH SỐ LIỆU TRONG LỰC KHU VỰC PHÍA NAM VIỆT NAM.....	334
<i>Bùi Thị Huệ, Ngô Thị Tố Như</i>	

DFT INVESTIGATION OF STRUCTURAL AND ELECTRONIC PROPERTIES OF 3D LiPF ₆ -BASED Li-ION BATTERY ELECTROLYTES	343
<i>Nguyen Thi Han, Dinh Thuy Van</i>	
PHÂN TÍCH HÀM CẢM ỨNG TÍNH TRONG HỆ CÓ NGỪNG TỤ POLARITON Ở TRẠNG THÁI CÂN BẰNG	351
<i>Nguyễn Thị Hậu</i>	
XÂY DỰNG MÔ HÌNH TOÁN HỌC ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ ĐẾN CHIỀU SÂU THẨM NHIỆT CỦA CHI TIẾT TRƯỚC KHI TIỆN CÓ GIÁ NHIỆT BẰNG DÒNG ĐIỆN CẢM ỨNG ĐIỆN TỪ	357
<i>Nguyễn Thành Huân</i>	
ẢNH HƯỞNG CỦA TẠP Mn LÊN CẤU TRÚC, TÍNH CHẤT QUANG VÀ TỪ TÍNH CỦA VẬT LIỆU BiFeO ₃	363
<i>Nguyễn Thị Thu, Nguyễn Ngọc Minh, Ngô Đức Quân</i>	
EFFECT OF DEFECTS ON THE OPTICAL BANDGAP ENERGY OF COLLOIDAL 0.2 % Cu DOPED Zn _{0.6} Cd _{0.4} S QUANTUM DOTS.....	371
<i>Nguyen Thi Thuy Lieu</i>	
CONGO RED DEGRADATION OF CUO/LA ₂ O ₃ BINARY COMPOSITES	380
<i>Do Duc Tho, Nguyen Thi Thuy, Hoang Nhu Thuan, Nguyen Quoc Anh, Phi Huy Bach, Le Nhat Minh</i>	
APPLICATION OF TWO-DIMENSIONAL MATERIALS (2D-TMD) IN RECHARGEABLE BATTERIES	388
<i>Dam Nhan Ba</i>	
CHẾ TẠO VẬT LIỆU COMPOSITE CỦA GO-CNT VÀ NANO SILIC BẰNG PHƯƠNG PHÁP PLASMA	399
<i>Phạm Thế Tân</i>	
<i>Phần 3</i>	
PHƯƠNG PHÁP GIẢNG DẠY TOÁN, VẬT LÝ TRONG CÁC TRƯỜNG ĐẠI HỌC KỸ THUẬT VÀ CÔNG NGHỆ	
PHÁT TRIỂN NĂNG LỰC SÁNG TẠO KỸ THUẬT DỰA TRÊN MÔ HÌNH GIÁO DỤC STEM CHO SINH VIÊN KHỎI NGÀNH KỸ THUẬT	406
<i>Ngô Văn Tới, Đinh Văn Tình</i>	
XÂY DỰNG MỐI QUAN HỆ GIỮA TRÍ TUỆ NHÂN TẠO VỚI GIÁO DỤC TRONG XU THẾ HỘI NHẬP.....	415
<i>Lê Thị Minh Thanh</i>	
AN APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN PERSONALIZED LEARNING OF PROBABILITY AND STATISTICS FOR UNIVERSITY STUDENTS USING PYTHON	424
<i>Pham Thanh Hieu</i>	
NGHIÊN CỨU GIẢNG DẠY ĐẠI SỐ TUYẾN TÍNH TẠI ĐẠI HỌC THEO TIẾP CẬN DIDACTIC - MỘT NGHIÊN CỨU TRƯỜNG HỢP TẠI TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIÁO DỤC, ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI.....	432

TIẾP CẬN BÀI TOÁN TỐI ƯU ĐỘNG TRONG KINH TẾ BẰNG PHƯƠNG TRÌNH EULER VỚI LỜI GIẢI QUA PYTHON	446
Hoàng Xuân Vinh	
PHƯƠNG PHÁP GỢI MỞ VẤN ĐỀ TRONG GIẢNG DẠY CHO ĐỘI TUYỂN OLYMPIC TOÁN GIẢI TÍCH	455
Hoàng Văn Cẩn	
MỘT SỐ GỢI Ý TRONG DẠY HỌC TOÁN CAO CẤP Ở CÁC TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHỎI NGÀNH KỸ THUẬT TRONG THỜI ĐẠI SỐ	460
Nguyễn Thị Dung	
GIẢNG DẠY TOÁN ĐẠI CƯƠNG TRONG CÁC TRƯỜNG ĐẠI HỌC KỸ THUẬT VÀ CÔNG NGHỆ: GÓC NHÌN QUA CÁC VÍ DỤ THỰC TẾ.....	469
Bùi Xuân Diệu, Nguyễn Thành Quang	
BÀI TOÁN KIỂM ĐỊNH GIẢ THIẾT THỐNG KÊ VÀ ỨNG DỤNG VÀO MỘT VÀI MÔ HÌNH TRONG THỰC TẾ.....	478
Đinh Thị Thu, Đặng Văn Tiến	
XÂY DỰNG VÀ PHÁT TRIỂN PHƯƠNG PHÁP DẠY HỌC THÍCH ỨNG TRONG GIẢNG DẠY MÔN TOÁN TẠI TRƯỜNG ĐẠI HỌC KỸ THUẬT, CÔNG NGHỆ.....	485
Hà Thị Thanh	
ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ THÔNG TIN TRONG NỘI DUNG XÁC SUẤT THỐNG KÊ CHO SINH VIÊN: MỘT NGHIÊN CỨU TRƯỜNG HỢP VỀ TPACK	494
Nguyễn Thị Thảo Linh	
ĐỔI MỚI VÀ NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG GIẢNG DẠY MÔN ĐẠI SỐ TUYẾN TÍNH CHO SINH VIÊN CÙNG TRÍ TUỆ NHÂN TẠO.....	503
Nguyễn Anh Đài, Đinh Thị Thu, Đặng Văn Tiến	
ỨNG DỤNG STREAMLIT TRONG XÂY DỰNG GIAO DIỆN ĐIỀU KHIỂN THIẾT BỊ IOT CHO SINH VIÊN KHÔNG CHUYÊN LẬP TRÌNH FRONTEND	513
Cao Diệp Thắng	
TƯƠNG QUAN KỸ NĂNG GIẢI BÀI TẬP VÀ THÍ NGHIỆM CỦA SINH VIÊN TRONG HỌC PHẦN VẬT LÝ 1 TẠI TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHIỆP HÀ NỘI: GÓC NHÌN TỪ MÔ HÌNH KOLB	524
Dương Vũ Trường	
ỨNG DỤNG GOOGLE AI STUDIO NÂNG CAO NĂNG LỰC TỰ HỌC VẬT LÝ CỦA SINH VIÊN HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG.....	530
Vũ Thị Hồng Nga	

PHÂN TÍCH HÀM CẢM ỨNG TĨNH TRONG HỆ CỐ NGUNG TỤ POLARITON Ở TRẠNG THÁI CÂN BẰNG

Nguyễn Thị Hậu^{1,2*}

¹ Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

² Trường Đại học Mỏ - Địa chất

* nguyenthihau@hmg.edu.vn.

Tóm tắt:

Bài báo tập trung nghiên cứu bản chất ngưng tụ của hệ polariton trong cấu trúc vi hốc, với trọng tâm là khảo sát chi tiết hàm cảm ứng tĩnh $\chi(0, 0)$ của exciton và photon ở trạng thái cân bằng, từ đó làm sáng tỏ vai trò của hàm này trong việc mô tả ngưỡng chuyển pha và đặc điểm ngưng tụ. Tác giả xây dựng mô hình lý thuyết là hệ nhiều hạt gồm điện tử, lỗ trống và photon, có tương tác ánh sáng-vật chất và Coulomb. Áp dụng phương pháp Hartree-Fock không giới hạn cùng với phương trình chuyển động của hàm Green hai hạt để tính toán giải tích trong không gian xung lượng. Kết quả tính số cho thấy hàm $\chi^{eh}(0, 0)$ và $\chi^{ph}(0, 0)$ biến thiên rõ rệt theo nhiệt độ khi thay đổi tham số độ lệch và cường độ của tương tác Coulomb. Ngoài ra, nghiên cứu chỉ ra rằng sự hình thành hoặc mất ổn định của ngưng tụ có thể được nhận biết qua đặc trưng phi tuyến trong hàm cảm ứng tĩnh. Nghiên cứu đóng góp một góc nhìn lý thuyết toàn diện giúp hiểu sâu hơn về động lực học và điều kiện hình thành ngưng tụ trong các hệ lượng tử bán dẫn hai chiều.

Từ khóa: cấu trúc vi hốc, gần đúng Hartree-Fock, lý thuyết trường trung bình, ngưng tụ Bose-Einstein, trạng thái ngưng tụ polariton.

1. Đặt vấn đề

Trong vài thập kỷ gần đây, hiện tượng ngưng tụ Bose-Einstein (BEC) của các giả hạt boson trong hệ vật chất ngưng tụ đã thu hút sự quan tâm đặc biệt từ cộng đồng nghiên cứu khoa học. Một trong những giả hạt boson có tồn tại trạng thái ngưng tụ BEC là polariton, một giả hạt được tạo ra từ sự kết cặp giữa exciton trong giếng lượng tử và photon trong cấu trúc vi hốc. Với khối lượng hiệu dụng nhỏ (cỡ $10^{-5} m_e$) và thời gian sống đủ lớn nên polariton có thể tồn tại ở trạng thái ngưng tụ BEC khi mật độ đủ lớn và nhiệt độ chuyển pha cũng cao hơn so với các hệ boson khác [1]. Cho đến nay, có khá nhiều các quan sát thực nghiệm chứng tỏ sự tồn tại trạng thái ngưng tụ BEC của polariton ở nhiệt độ phòng [2-4] do đó mở ra nhiều ứng dụng tiềm năng trong các lĩnh vực như laser polariton, thông tin lượng tử, cảm biến quang học,... [5-8]

Về mặt lý thuyết, các nghiên cứu trước đây tập trung vào việc khảo sát các tham số trật tự trạng thái ngưng tụ và giản đồ pha [9-12]. Những công trình này chủ yếu sử dụng các phương pháp lý thuyết trường trung bình như xấp xỉ Hartree-Fock (Unrestricted Hartree-Fock - UHF), và thường giả định hệ đạt trạng thái cân bằng nhiệt khi tham số điều chỉnh là dương. Trong khung lý thuyết này, người ta đã phân loại được các trạng thái ngưng tụ như: exciton, polariton, và photon, tùy thuộc vào mật độ kích thích, cường độ tương tác và độ lệch năng lượng giữa photon và exciton. Tuy nhiên, một khía cạnh quan trọng vẫn chưa được khai thác sâu là khả năng phản ứng tuyến tính của hệ với các nhiễu loạn tĩnh nhỏ – được đặc trưng bởi hàm cảm ứng tĩnh $\chi(\mathbf{q}, 0)$. Trong hệ ngưng tụ polariton, hàm $\chi(\mathbf{q}, 0)$ cung cấp dấu hiệu quan trọng cho sự mất ổn định tuyến tính, báo hiệu hệ chuẩn bị bước vào trạng thái ngưng tụ hoặc chuyển pha.

Trong bài báo này, tôi thực hiện một nghiên cứu chi tiết về hàm cảm ứng tĩnh $\chi(\mathbf{q} = 0, 0)$ trong hệ polariton ở trạng thái cân bằng. Dựa trên mô hình nhiều hạt gồm electron, lỗ trống và photon có tương tác ánh sáng-vật chất và Coulomb, chúng tôi áp dụng phương trình chuyển động của hàm

Green hai hạt và phương pháp UHF để tính toán hàm cảm ứng trong không gian động lượng. Thông qua việc khảo sát sự biến thiên của $\chi(0, 0)$ theo nhiệt độ khi thay đổi tham số điều chỉnh (d) và thể tương tác Coulomb tôi chỉ ra được các ngưỡng chuyển pha và vai trò của cấu trúc phản ứng tĩnh trong việc mô tả bản chất ngưng tụ của hệ.

Kết quả nghiên cứu không chỉ mở rộng hiểu biết về tính phản ứng tuyến tính của hệ polariton, mà còn đề xuất một công cụ mạnh để phân tích ngưỡng ngưng tụ và cấu trúc pha mà không cần dựa hoàn toàn vào tham số trật tự. Đồng thời, những phân tích về $\chi(0, 0)$ cũng mở ra triển vọng so sánh trực tiếp với các phép đo thực nghiệm về đáp ứng tĩnh hoặc phổ hấp thụ trong các hệ bán dẫn lai giữa ánh sáng và vật chất.

Trong phần 2 của bài báo tôi sẽ trình bày cơ sở lý thuyết của mô hình hệ điện tử, lỗ trống và photon trong cấu trúc vi hốc. Các kết quả tính số và phân tích sẽ được giới thiệu trong phần 3, và các kết luận được trình bày trong phần 4.

2. Mô hình và tính toán lý thuyết

Trong biểu diễn theo không gian xung lượng, Hamiltonian của hệ gồm điện tử, lỗ trống và photon trong cấu trúc vi hốc được viết dưới dạng:

$$\mathcal{H} = \sum_{\mathbf{k}} \varepsilon_{\mathbf{k}}^e e_{\mathbf{k}}^\dagger e_{\mathbf{k}} + \sum_{\mathbf{k}} \varepsilon_{\mathbf{k}}^h h_{\mathbf{k}}^\dagger h_{\mathbf{k}} + \sum_{\mathbf{q}} \omega_{\mathbf{q}} \psi_{\mathbf{q}}^\dagger \psi_{\mathbf{q}} - \frac{U}{N} \sum_{\mathbf{k}, \mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2} e_{\mathbf{k}+\mathbf{k}_1}^\dagger e_{\mathbf{k}_1} h_{-\mathbf{k}+\mathbf{k}_2}^\dagger h_{\mathbf{k}_2} - \frac{g}{\sqrt{N}} \sum_{\mathbf{k}, \mathbf{q}} (e_{\mathbf{k}+\mathbf{q}}^\dagger h_{-\mathbf{k}}^\dagger \psi_{\mathbf{q}} + h_{-\mathbf{k}} e_{\mathbf{k}+\mathbf{q}} \psi_{\mathbf{q}}^\dagger) \quad (1)$$

trong đó, ba số hạng đầu trong phương trình (1) lần lượt mô tả năng lượng của hệ điện tử, lỗ trống và photon khi không tương tác, với $e_{\mathbf{k}}^\dagger (e_{\mathbf{k}})$ và $h_{\mathbf{k}}^\dagger (h_{\mathbf{k}})$ là biểu diễn toán tử sinh (hủy) của các điện tử và lỗ trống không spin mang xung lượng \mathbf{k} , $\psi_{\mathbf{q}}^\dagger (\psi_{\mathbf{q}})$ biểu diễn toán tử sinh (hủy) của photon tại xung lượng \mathbf{q} . $\varepsilon_{\mathbf{k}}^{e(h)}$ và $\omega_{\mathbf{q}}$ lần lượt là năng lượng tán sắc của điện tử (lỗ trống) không tương tác và photon được cho bởi:

$$\varepsilon_{\mathbf{k}}^{e(h)} = -2t \sum_i^D \cos k_i + \frac{E_g + 4t^{e(h)} D - \mu}{2} \quad (2)$$

$$\omega_{\mathbf{q}} = \sqrt{(cq)^2 + \omega_c^2} - \mu \quad (3)$$

với μ là thế hóa học, $t^{e(h)}$ là tích phân nhảy nút của điện tử và lỗ trống, D là số chiều của mạng tinh thể, ω_c là năng lượng của photon tại xung lượng $\mathbf{q} = 0$ và c và vận tốc ánh sáng trong vi hốc. E_g là khoảng cách từ đáy của dải dẫn tới đỉnh của dải hóa trị, hệ ở trạng thái bán dẫn nếu $E_g > 0$ và ngược lại hệ ở trạng thái bán kim loại nếu $E_g < 0$. Hai số hạng cuối trong phương trình (1) lần lượt mô tả tương tác Coulomb giữa điện tử - lỗ trống với cường độ thể tương tác U và tương tác điện tử - lỗ trống - photon với cường độ tương tác g , trong đó N là số nút mạng trong giếng lượng tử. Trong các nghiên cứu về ngưng tụ polariton, để thuận tiện người ta thường sử dụng tham số điều chỉnh $d = \omega_c - E_g$ được coi như một tham số của mô hình [9].

Sử dụng gần đúng Hartree-Fock không giới hạn (UHF) cho Hamiltonian trong phương trình (1) và bỏ qua các thăng giáng, tôi thu được Hamiltonian hiệu dụng trong gần đúng UHF được viết dưới dạng:

$$\mathcal{H}_{UHF} = \sum_{\mathbf{k}} \bar{\varepsilon}_{\mathbf{k}}^e e_{\mathbf{k}}^\dagger e_{\mathbf{k}} + \sum_{\mathbf{k}} \bar{\varepsilon}_{\mathbf{k}}^h h_{\mathbf{k}}^\dagger h_{\mathbf{k}} + \Delta \sum_{\mathbf{k}} (e_{\mathbf{k}}^\dagger h_{-\mathbf{k}}^\dagger + H.c) + \sum_{\mathbf{q}} \omega_{\mathbf{q}} \psi_{\mathbf{q}}^\dagger \psi_{\mathbf{q}} + (\sqrt{N} \Lambda \psi_0^\dagger + H.c) \quad (4)$$

trong đó $\bar{\varepsilon}_{\mathbf{k}}^e$ và $\bar{\varepsilon}_{\mathbf{k}}^h$ là các năng lượng tán sắc tái chuẩn hóa khi có đóng góp của độ dịch Hartree-Fock và các tham số mới xuất hiện Δ , Λ được xác định theo biểu thức:

$$\Delta = -\frac{g}{\sqrt{N}} \langle \psi_0 \rangle - \frac{U}{N} \sum_{\mathbf{k}} d_{\mathbf{k}} \quad (5)$$

$$\Lambda = -\frac{g}{N} \sum_{\mathbf{k}} d_{\mathbf{k}} \quad (6)$$

với $d_{\mathbf{k}} = \langle e_{\mathbf{k}}^\dagger h_{-\mathbf{k}}^\dagger \rangle = \langle h_{-\mathbf{k}} e_{\mathbf{k}} \rangle = d_{\mathbf{k}}^*$ là mật độ exciton ở trạng thái xung lượng \mathbf{k} , $\langle \psi_0 \rangle$ là giá trị trung bình của trường photon ở xung lượng không ($\mathbf{q} = 0$). Khi tham số Δ khác không thể hiện trạng thái ngưng tụ của hệ, tùy thuộc vào sự cạnh tranh của các tham số thành phần ($\Delta_{\text{eh}} = -\frac{U}{N} \sum_{\mathbf{k}} d_{\mathbf{k}}$ và $\Delta_{\text{ph}} = -\frac{g}{\sqrt{N}} \langle \psi_0 \rangle$) trong phương trình (5) mà hệ có thể ngưng tụ ở trạng thái exciton, polariton hay là

photon. Để chéo hóa hoàn toàn Hamiltonian trong phương trình (4), tôi sử dụng phép biến đổi Bogoliubov để thu được các giá trị kì vọng của tham số trật tự trạng thái ngưng tụ. Việc khảo sát chi tiết tham số trật tự để mô tả chuyển pha trạng thái ngưng tụ polariton đã được khảo sát chi tiết trong các bài báo [10-12]. Trong bài báo này, chúng tôi nghiên cứu sự hình thành trạng thái ngưng tụ polariton thông qua khảo sát tính chất của hàm cảm ứng exciton χ^{eh} và photon χ^{ph} . Trong không gian xung lượng, các hàm cảm ứng được định nghĩa [13] như sau:

$$\chi^{\text{eh}}(\mathbf{q}, \omega) = -\frac{1}{N} \sum_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'} \langle \langle h_{-\mathbf{k}} e_{\mathbf{k}+\mathbf{q}}; e_{\mathbf{k}'+\mathbf{q}}^\dagger h_{-\mathbf{k}'}^\dagger \rangle \rangle_{(\omega)} \quad (7)$$

$$\chi^{\text{ph}}(\mathbf{q}) = \langle \langle \psi_{\mathbf{q}}; \psi_{\mathbf{q}}^\dagger \rangle \rangle \quad (8)$$

Áp dụng phương trình chuyển động cho hàm Green hai hạt của exciton và photon, ta có:

$$\omega \langle \langle h_{-\mathbf{k}} e_{\mathbf{k}+\mathbf{q}}; e_{\mathbf{k}'+\mathbf{q}}^\dagger h_{-\mathbf{k}'}^\dagger \rangle \rangle_{(\omega)} = \langle [h_{-\mathbf{k}} e_{\mathbf{k}+\mathbf{q}}; e_{\mathbf{k}'+\mathbf{q}}^\dagger h_{-\mathbf{k}'}^\dagger] \rangle + \langle \langle [h_{-\mathbf{k}} e_{\mathbf{k}+\mathbf{q}}, \mathcal{H}]; e_{\mathbf{k}'+\mathbf{q}}^\dagger h_{-\mathbf{k}'}^\dagger \rangle \rangle_{(\omega)} \quad (9)$$

$$\omega \langle \langle \psi_{\mathbf{q}}; \psi_{\mathbf{q}}^\dagger \rangle \rangle_{(\omega)} = \langle [\psi_{\mathbf{q}}; \psi_{\mathbf{q}}^\dagger] \rangle + \langle \langle [\psi_{\mathbf{q}}, \mathcal{H}]; \psi_{\mathbf{q}}^\dagger \rangle \rangle_{(\omega)} \quad (10)$$

Thay Hamiltonian trong phương trình (1) vào (9), (10) và sử dụng gần đúng pha ngẫu nhiên, tôi thu được kết quả của các hàm cảm ứng exciton và photon như sau:

$$\chi^{\text{eh}}(\mathbf{q}, \omega) = \frac{-\chi^0(\mathbf{q}, \omega)}{1 + U\chi^0(\mathbf{q}, \omega) - \frac{g^2}{(\omega - \omega_{\mathbf{q}})} \chi^0(\mathbf{q}, \omega)} \quad (11)$$

$$\chi^{\text{ph}}(\mathbf{q}, \omega) = \frac{1}{\left(\omega - \omega_{\mathbf{q}} - \frac{g^2 \chi^0(\mathbf{q}, \omega)}{1 + U\chi^0(\mathbf{q}, \omega)} \right)} \quad (12)$$

Trong đó

$$\chi^0(\mathbf{q}, \omega) = \frac{1}{N} \sum_{\mathbf{k}} \frac{1 - \langle n_{-\mathbf{k}}^h \rangle - \langle n_{\mathbf{k}+\mathbf{q}}^e \rangle}{\omega - \omega_{\mathbf{k}}^{\text{eh}}(\mathbf{q})} \quad (13)$$

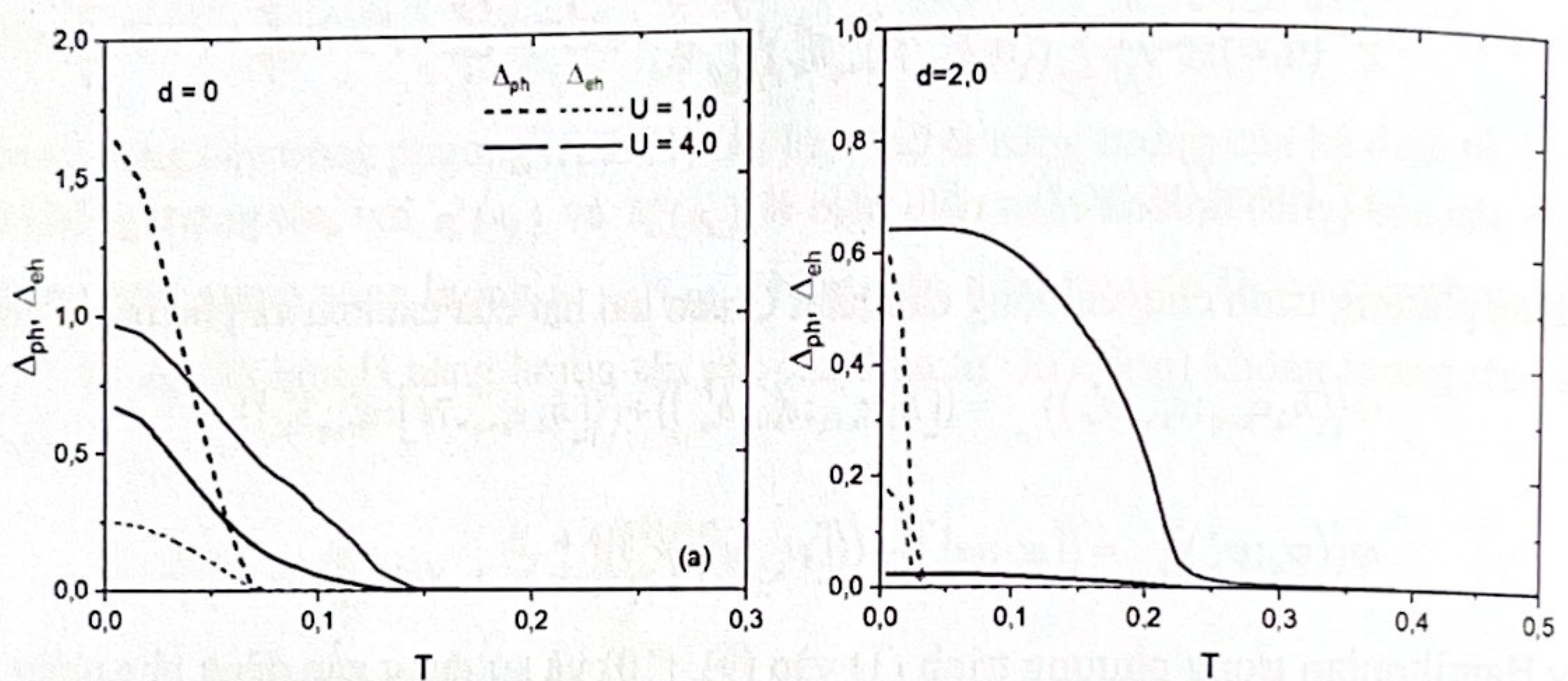
$$\omega_{\mathbf{k}}^{\text{eh}}(\mathbf{q}) = \bar{\varepsilon}_{\mathbf{k}+\mathbf{q}}^e + \bar{\varepsilon}_{-\mathbf{k}}^h \quad (14)$$

Trong bài báo này, tôi khảo sát hàm cảm ứng exciton và photon khi $\omega = 0$ và $\mathbf{q} = 0$ hay còn gọi hàm cảm ứng tĩnh exciton $\chi^{\text{eh}}(0,0)$ và photon $\chi^{\text{ph}}(0,0)$.

Kết quả tính số và thảo luận

Trong mục này, chúng tôi trình bày các kết quả tính số nhằm minh họa cho những biểu thức giải đã thiết lập ở phần 2, áp dụng cho một hệ hai chiều gồm $N = 200 \times 200$ nút mạng ($D = 2$). Nhằm

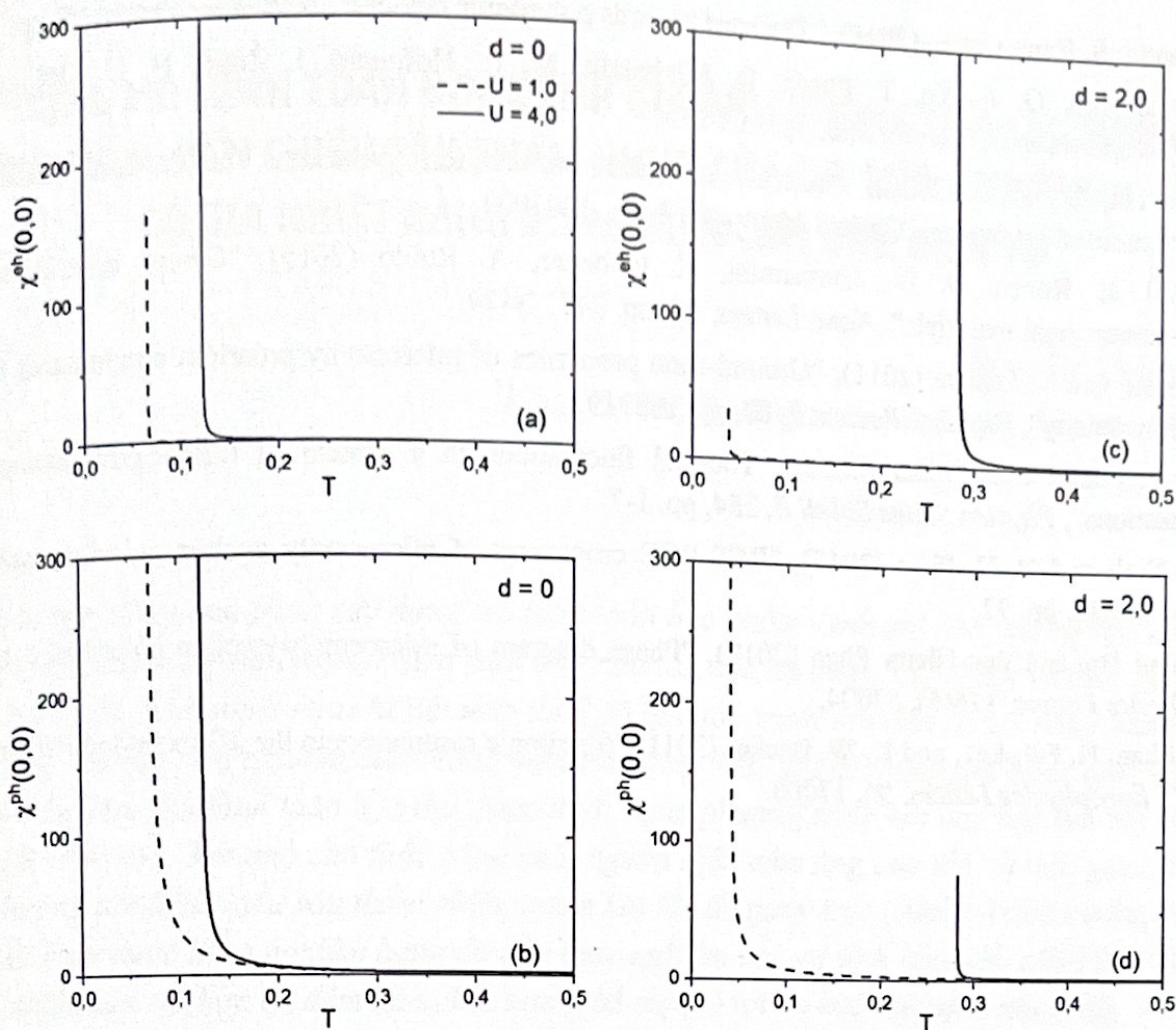
đơn giản hóa và vẫn đảm bảo tính tổng quát tôi chọn $f^e = f^h = 1$ làm đơn vị năng lượng và cố định một số tham số như: hằng số tương tác giữa điện tử, lỗ trống và photon $g = 0,2$; năng lượng photon tại xung lượng $q = 0$ là $\omega_c = 0,5$; và mật độ kích thích $n = 0,1$. Trước khi phân tích hàm cảm ứng tĩnh exciton và photon, tôi đánh giá lại đồ thị khảo sát sự phụ thuộc của tham số trật tự theo nhiệt độ tại hai giá trị của tham số điều chỉnh $d = 0$ và $d = 2$ ứng với các giá trị khác nhau của thể tương tác Coulomb, kết quả được thể hiện trên Hình 1. Tại $d = 0$, khi tương tác Coulomb nhỏ ($U = 1,0$), ở nhiệt độ thấp, tham số trật tự trạng thái ngưng tụ photon lớn hơn nhiều so với tham số trật tự trạng thái ngưng tụ exciton, thể hiện hệ tồn tại ở trạng thái ngưng tụ dạng photon. Khi nhiệt độ tăng, cả hai giá trị này đều giảm và bằng không tại cùng một giá trị nhiệt độ, được gọi là nhiệt độ chuyển pha trạng thái ngưng tụ T_c . Khi nhiệt độ tăng ta thấy có sự chuyển pha từ trạng thái ngưng tụ dạng photon sang trạng thái ngưng tụ polariton. Khi tăng thể tương tác Coulomb, nhiệt độ chuyển pha T_c tăng và lúc này hệ tồn tại ở trạng thái ngưng tụ polariton. Điều này có thể giải thích được là do thể tương tác Coulomb tăng cường khả năng ghép cặp điện tử - lỗ trống làm Δ_{eh} tăng nhanh, photon không còn đóng vai trò chính cho quá trình ngưng tụ nên Δ_{ph} giảm. Bức tranh chuyển pha có sự thay đổi khi $d = 2,0$, hệ ngưng tụ ở trạng thái polariton khi thể tương tác Coulomb nhỏ và chuyển sang pha ngưng tụ dạng exciton khi thể tương tác Coulomb lớn. Kết quả này hoàn toàn phù hợp với giản đồ pha $U-n$ và $T-U$ đã được khảo sát trong công trình [11, 12].



Hình 1. Tham số trật tự trạng thái ngưng tụ exciton Δ_{eh} và photon Δ_{ph} theo nhiệt độ T ứng với hai giá trị khác nhau của thể tương tác Coulomb $U = 1,0$ và $U = 4,0$ tại $d = 0$ (a) và $d = 2$ (b)

Tiếp theo, tôi khảo sát hàm cảm ứng tĩnh exciton và photon phụ thuộc vào nhiệt độ ứng với các giá trị khác nhau của tham số điều chỉnh d và thể tương tác Coulomb U tương ứng như trong Hình 1, kết quả được thể hiện trên Hình 2. Giản đồ pha trên Hình 2 cho thấy, ứng với mỗi giá trị cố định của d và U hàm cảm ứng tĩnh exciton $\chi^e(0,0)$ và photon $\chi^h(0,0)$ tăng dần khi nhiệt độ giảm. Khi nhiệt độ giảm tới giá trị tới hạn, cả hai hàm cảm ứng đều tăng mạnh và phân kì tại nhiệt độ chuyển pha T_c . Điều này có thể dễ dàng giải thích được, do khi nhiệt độ tăng, năng lượng nhiệt lớn làm phá hủy trạng thái liên kết giữa điện tử và lỗ trống để hình thành exciton, do đó mọi trạng thái liên kết đều bị phá vỡ. Tại $d = 0$, nhiệt độ chuyển pha T_c tăng khi U tăng thể hiện trên hình 2a và 2b. So sánh hình 2a và 2b ta thấy cả hai hàm cảm ứng đều phân kì tại cùng một giá trị của nhiệt độ T_c . Tăng tham số điều chỉnh lên $d = 2,0$, ứng với thể tương tác Coulomb nhỏ, nhiệt độ chuyển pha T_c giảm. Ngược lại, ứng với thể tương tác Coulomb lớn, nhiệt độ chuyển pha tăng.

Kết quả phân tích hàm cảm ứng trong hình 2 hoàn toàn phù hợp với kết quả khảo sát tham số trật tự trạng thái ngưng tụ trong hình 1. Như vậy, việc phân tích hàm cảm ứng tĩnh exciton và photon giúp chúng ta có thêm một thước đo để đánh giá ngưỡng chuyển pha trạng thái ngưng tụ của các boson. Kết hợp giữa phân tích tham số trật tự trạng thái ngưng tụ và hàm cảm ứng tĩnh sẽ cho chúng ta hiểu một cách sâu sắc bản chất động học của quá trình chuyển pha trạng thái ngưng tụ polariton trong cấu trúc vi hốc.



Hình 2. Hàm cảm ứng tĩnh exciton $\chi^{eh}(0,0)$ và photon $\chi^{ph}(0,0)$ biến thiên theo nhiệt độ ứng với các giá trị khác nhau của d và U (các đường nét đứt ứng với $U = 1$, các đường nét liền ứng với $U = 4$)

4. Kết luận

Nghiên cứu đã làm rõ vai trò của hàm cảm ứng tĩnh $\chi(0,0)$ như một đại lượng nhạy trong việc mô tả trạng thái ngưng tụ và các quá trình chuyển pha trong hệ polariton. Thông qua việc phân tích sự biến thiên của $\chi^{eh}(0,0)$ và $\chi^{ph}(0,0)$ theo nhiệt độ khi thay đổi tham số lệch d và thế tương tác Coulomb U , chúng tôi đã xác định được ranh giới của chuyển pha trạng thái ngưng tụ. Các kết quả thu được cho thấy phản ứng tĩnh của hệ mang thông tin đặc trưng về bản chất lượng tử của sự ngưng tụ. Kết quả này mở ra khả năng sử dụng hàm cảm ứng tĩnh như một công cụ lý thuyết trong thiết kế vật liệu và cấu trúc vi hốc tối ưu nhằm điều khiển quá trình ngưng tụ theo mong muốn. Trong tương lai, hướng nghiên cứu có thể mở rộng sang các hệ không cân bằng, hoặc tính toán thêm trường hợp tích phân nhảy nút của lỗ trống không cân bằng với tích phân nhảy nút của điện tử để hệ phù hợp hơn với bài toán thực tế.

Tài liệu tham khảo:

- [1]. A. Rahimi-Iman (2020), "Polariton Physics: From Dynamic Bose - Einstein Condensates in Strongly-Coupled Light - Matter Systems to Polariton Lasers", *Springer Switzerland*.
- [2]. J. Zhao, R. Su, A. Fieramosca, W. Zhao, X. L. W. Du, C. Diederichs, D. Sanvitto, T. C. Liew, and Q. Xiong (2021), "Ultralow threshold polariton condensate in a monolayer semiconductor microcavity at room temperature", *Nano Letter* **21**(7), pp. 3331-3339.
- [3]. M. Wei, W. Verstraelen, K. Orfanakis, A. Ruseckas, T. C. Liew, I. D. Samuel, G. A. Turnbull, and H. Ohadi (2022), "Optically trapped room temperature polariton condensate in an organic semiconductor", *Nature Communications*, **13**(1), pp. 7191.
- [4]. Xianxin Wu, Shuai Zhang, Jiepeng Song, Xinyi Deng, Wenna Du, Xin Zeng, Yuyang Zhang, Zhiyong Zhang, Yuzhong Chen, Yubin Wang, Chuanxiu Jiang, Yangguang Zhong, Bo Wu, Zhuoya Zhu, Yin Liang, Qing Zhang, Qihua Xiong & Xinfeng Liu (2024), "Exciton polariton condensation from bound states in the continuum at room temperature", *Nature Communications* **15**, pp. 3345.

- [5]. D. Sanvitto; S. Kéna-Cohen (2016), "The road towards polaritonic devices", *Nature materials*, **15**, pp. 1061-73.
- [6]. M. Lindemann, G. F. Xu, T. Pusch, R. Michalzik, M. R. Hofmann, I. Žutić, N. C. Gerhardt (2019), "Ultrafast spin-lasers", *Nature*, **568**, pp. 212-215.
- [7]. F. R. Hu, Z. Fei (2020), "Recent progress on exciton polaritons in layered transition-metal dichalcogenides", *Advanced Optical Materials*, **8**, pp. 1901003.
- [8]. S. Latini, E. Ronca, U. De Giovannini, H. Hübener, A. Rubio (2019), "Cavity control of excitons in two-dimensional materials", *Nano Letters*, **19**, pp. 3473-3479.
- [9]. K. Kamide and T. Ogawa (2011), "Ground-state properties of microcavity polariton condensates at arbitrary excitation density", *Physical Review B*, **83**, pp. 165319.
- [10]. B.-D. Hoi and V.-N. Phan (2016), "Thermal fluctuations in a system of microcavity excitonpolariton condensations", *Physica Status Solidi B*, **254**, pp. 1-7.
- [11]. Q.-H. Ninh and V.-N. Phan (2019), "BCS-BEC crossovers of microcavity exciton-polariton condensates", *Physica B*, **573**, pp. 72.
- [12]. Dinh-Hoi Bui and Van-Nham Phan (2017), "Phase diagram of microcavity exciton-polariton condensates", *Europhysics Letters*, **116(5)**, 57004.
- [13]. V.-N. Phan, H. Fehske1, and K. W. Becker (2011), "Excitonic resonances in the 2D extended Falicov-Kimball model", *Europhysics Letters*, **95**, 17006.