

ĐẠI HỌC HUẾ
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC

HỘI VẬT LÝ VIỆT NAM
HỘI VẬT LÝ THỪA THIÊN HUẾ

ĐẠI HỌC BÀ NANG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM

Nhiều tác giả

KỈ YẾU HỘI NGHỊ VẬT LÝ MIỀN TRUNG NĂM 2024



NHÀ XUẤT BẢN ĐẠI HỌC HUẾ

TIÊU BAN VẬT LÝ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP DẠY HỌC VẬT LÝ	109
XÂY DỰNG THÍ NGHIỆM QUAN SÁT ĐỒ THỊ DAO ĐỘNG ÂM ĐỀ HỖ TRỢ GIẢNG DẠY VẬT LÝ 11 CHƯƠNG TRÌNH PHỔ THÔNG 2018	110
<i>Thái Ngọc Ánh, Hồ Đức Vinh, Nguyễn Thị Xuân Hiền</i>	
ỨNG DỤNG CHAT GPT ĐỀ HỖ TRỢ THIẾT KẾ BÀI TẬP VỀ NĂNG LƯỢNG VÀ SỰ BIẾN ĐỔI NHÂM RÈN LUYỆN NĂNG LỰC NHẬN THỨC KHOA HỌC TỰ NHIÊN CHO HỌC SINH LỚP 8	116
<i>Nguyễn Văn Cẩn, Nguyễn Thị Ánh Hà</i>	
PHÁT TRIỂN NĂNG LỰC GIẢI QUYẾT VẤN ĐỀ VÀ SÁNG TẠO HỌC SINH THÔNG QUA DẠY HỌC CHỦ ĐỀ STEM "MẠCH ĐIỆN CẦU THANG" - VẬT LÝ 11	124
<i>Trương Công Cường, Phùng Việt Hải</i>	
ĐỀ XUẤT KHUNG NĂNG LỰC TƯ DUY THIẾT KẾ TRONG DẠY HỌC THEO ĐỊNH HƯỚNG GIÁO DỤC STEAM Ở TRƯỜNG TRUNG HỌC PHỔ THÔNG	132
<i>Nguyễn Văn Hoàn, Phùng Việt Hải, Lê Hoài Anh</i>	
EXACT SOLUTION FOR THE QUANTUM RABI MODEL WITH THE A^2 TERM	144
<i>Nguyen Quang San, Ho Viet, Dung Van Lu, Naël Guilhaud</i>	
QUAN SÁT PHÓ HẤP THỤ LIÊN VÙNG TRONG CHẤM LƯỢNG TỬ DẠNG ĐĨA GaAs	149
<i>Lê Thị Diệu Hiền, Lê Thị Ngọc Bảo, Lê Phước Định</i>	
<i>Lê Ngọc Minh, Đinh Như Thảo</i>	
CÁC THUẬT TOÁN LƯỢNG TỬ NGHIÊN CỨU KHOA HỌC VẬT LIỆU	159
<i>Dung Văn Lữ, Đặng Đức Long, Nguyễn Trọng Bắc, Nguyễn Quang San</i>	
KHẢO SÁT CÁC TÍNH CHẤT PHẢN KẾT CHÙM BẬC CAO VÀ TÍNH CHẤT ĐẠN RỜI CỦA TRẠNG THÁI DỊCH CHUYỂN FOCK HAI MODE	160
<i>Lê Phước Định, Phan Ngọc Duy Tịnh, Trương Minh Đức</i>	
TỐC ĐỘ TÁN XẠ CỦA ELECTRON TRÊN PHONON ÂM, PHONON QUANG VÀ CÁC TÂM TẬP CHẤT ION HÓA TRONG GIẾNG LƯỢNG TỬ BÀN PARABOL	170
<i>Lê Phước Định, Lê Xuân Diễm Ngọc, Lê Thị Diệu Hiền, Lê Thị Ngọc Bảo</i>	
MÔ PHÒNG MẢNG CÁC BIẾN TỬ SIÊU ÂM BẰNG PHẦN MỀM COMSOL MULTIPHYSICS	179
<i>Lê Phước Định, Lê Thị Diệu Hiền, Lê Ngọc Minh, Lê Thị Ngọc Bảo</i>	
TIÊU BAN ĐIỆN TỬ - VIỄN THÔNG VÀ CƠ KHÍ	181
TỔNG HỢP QUY TRÌNH CHẾ TẠO CHIP QUANG VÀ ỨNG DỤNG CHẾ TẠO THIẾT BỊ CHUYỂN ĐỔI VÀ GHÉP MODE CHO HỆ THỐNG GHÉP KÊNH PHÂN CHIA THEO MODE	182
<i>Hồ Đức Tâm Linh, Nguyễn Tuấn Vinh, Nguyễn Hoàng Huy, Đặng Ngọc Sơn, Trần Thị Thu Hiền, Vương Quang Phước</i>	

KHẢO SÁT CÁC TÍNH CHẤT PHẢN KẾT CHÙM BẬC CAO VÀ TÍNH CHẤT ĐẠN RỐI CỦA TRẠNG THÁI DỊCH CHUYỂN FOCK HAI MODE

Lê Phước Định¹, Phan Ngọc Duy Tịch², Trương Minh Đức^{3*}

¹ Khoa Điện, Điện tử và Công nghệ Vật liệu, Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế

² Khoa Vật lý, Trường Đại học Sư phạm, Đại học Huế

*Email: tminhduc@hueuni.edu.vn

TÓM TẮT

Trong bài báo này, chúng tôi nghiên cứu các tính chất phản kết chùm bậc cao của trạng thái dịch chuyển Fock hai mode. Kết quả khảo sát cho thấy trạng thái dịch chuyển Fock hai mode là một trạng thái phi cổ điển thông qua tính chất phản kết chùm bậc cao. Bằng cách thay đổi các tham số của trạng thái Fock hai mode và các tham số dịch chuyển, trạng thái dịch chuyển Fock hai mode thể hiện tính chất phản kết chùm bậc cao. Số bậc càng cao thì tính chất phản kết chùm càng được tăng cường. Hơn nữa, khi dùng tiêu chuẩn đan rối Hillery-Zubairy để khảo sát thì trạng thái dịch chuyển Fock hai mode không thể hiện tính đan rối và trạng thái này không phù hợp để thực hiện quá trình viễn tải lượng tử.

Từ khóa: Tính chất phản kết chùm hai mode, rối lượng tử, trạng thái Fock dịch chuyển hai mode.

1. MỞ ĐẦU

Trong một vài thập niên gần đây, các trạng thái phi cổ điển có đóng góp nổi bật trong lĩnh vực quang lượng tử, truyền thông lượng tử và tính toán lượng tử [1]. Các đóng góp đó được khẳng định thông qua ứng dụng các trạng thái phi cổ điển vào việc phát hiện sóng hấp dẫn trong giao thoa kế LIGO [2] và phân phối khóa lượng tử [3]. Mô hình tạo ra các trạng thái phi cổ điển đã được đề xuất thông qua các thiết bị quang và cải tiến các kỹ thuật trong quang lượng tử [4, 5]. Các ứng dụng của những kỹ thuật này có thể tạo ra các trạng thái lượng tử hữu hạn chiều [6], và các lỗ trống trong phân bố số lượng photon [7].

Năm 1991, trạng thái phi cổ điển gọi là trạng thái đơn mode kết hợp thêm photon được đưa ra bởi Agarwal và Tara [8] bằng cách thêm photon vào trạng thái đơn mode kết hợp, và sau đó trạng thái này đã được tạo ra trong phòng thí nghiệm [9]. Sau đó, một số trạng thái đơn mode mới được đề xuất bằng cách thêm và bớt photon lên họ các trạng thái phi cổ điển và các đặc tính phi cổ điển của chúng cũng đã được nghiên cứu [10, 11] như trạng thái kết hợp nén được thêm/trừ photon [12, 13], và trạng thái kết hợp tăng cường nén-tăng cường thêm/trừ photon [14, 15]. Gần đây, một số trạng thái phi cổ điển đơn mode như trạng thái Fock dịch chuyển được thêm vào và/hoặc trừ đi photon đã được đề xuất và nghiên cứu về các đặc tính phi cổ điển của chúng [16, 17]. Ngoài các trạng thái phi cổ điển đơn mode thì các trạng thái phi cổ điển hai và nhiều mode cũng được đề xuất và nghiên cứu. Các trạng thái phi cổ điển hai mode và nhiều mode không chỉ thể hiện các tính chất phi cổ điển mà còn thể hiện khả năng đan rối giữa các mode [18, 19] như trạng thái kết hợp cặp bổ sung photon [20, 21], và trạng thái nhiệt nén hai mode được thêm photon [22]. Trong họ các trạng thái phi cổ điển hai mode, trạng thái Fock dịch chuyển hai mode đã được đề xuất vào năm 2007 [23]. Quá trình

viễn tải lượng tử với nguồn rối là trạng thái Fock dịch chuyển hai mode đã được nghiên cứu trong thời gian gần đây [24] trong đó quá trình viễn tải là không thành công.

Trong bài báo này, chúng tôi khảo sát tính chất phân kết chùm hai mode bậc cao và tính chất đan rối của trạng thái Fock dịch chuyển hai mode thông qua tiêu chuẩn đan rối Hillery-Zubairy. Cấu trúc bài báo gồm phần 1 là phần mở đầu. Phần 2 giới thiệu về trạng thái dịch chuyển Fock hai mode và biểu thức tính trung bình tổng quát. Phần 3 nghiên cứu các tính chất phân kết chùm bậc cao trong trạng thái Fock dịch chuyển hai mode. Ngoài ra, tính chất đan rối của trạng thái dịch chuyển Fock hai mode đã được khảo sát trong Phần 4, và Phần 5 là phần kết luận.

2. TRẠNG THÁI DỊCH CHUYỂN FOCK HAI MODE

Trạng thái dịch chuyển Fock hai mode $|\psi\rangle_{\alpha,\beta,n_1,n_2}$ được đưa ra bởi Ping và các cộng sự [23] dưới dạng

$$|\psi\rangle_{\alpha,\beta,n_1,n_2} = |\alpha,\beta,n_1,n_2\rangle = D(\alpha)D(\beta)|n_1,n_2\rangle, \quad (1)$$

trong đó $D(\alpha)$ và $D(\beta)$ lần lượt là các toán tử dịch chuyển và $|n_1,n_2\rangle = |n_1\rangle \otimes |n_2\rangle$ là trạng thái Fock hai mode với n_1 và n_2 là số hạt photon ứng với mode thứ nhất a và mode thứ hai b . Trong biểu diễn thông qua các trạng thái Fock hai mode, trạng thái dịch chuyển Fock hai mode được viết lại [25] như sau:

$$\begin{aligned} |\psi\rangle_{\alpha,\beta,n_1,n_2} = & \frac{1}{\sqrt{n_1!}\sqrt{n_2!}} \sum_{p_1=0}^{n_1} \sum_{p_2=0}^{n_2} \frac{n_1!}{p_1!(n_1-p_1)!} \frac{n_2!}{p_2!(n_2-p_2)!} (-\alpha^*)^{(n_1-p_1)} (-\beta^*)^{(n_2-p_2)} \\ & \times \exp\left(\frac{|\alpha|^2}{2}\right) \exp\left(\frac{|\beta|^2}{2}\right) \sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{m_2=0}^{\infty} \frac{\alpha^{m_1}}{m_1!} \frac{\beta^{m_2}}{m_2!} \sqrt{(m_1+p_1)!} \\ & \times \sqrt{(m_2+p_2)!} |m_1+p_1, m_2+p_2\rangle, \end{aligned} \quad (2)$$

trong đó các số phức $\alpha = r_\alpha e^{i\varphi_\alpha}$, $\beta = r_\beta e^{i\varphi_\beta}$ với $r_\alpha, r_\beta, \varphi_\alpha$, và φ_β số thực. Dựa vào [25], biểu thức tính trung bình tổng quát của các toán tử giữa hai mode đối với trạng thái dịch chuyển Fock hai mode:

$$\begin{aligned} H_{i,j,k,l} = & \langle a^{i,j} a^{j,i} b^{k,l} b^{l,k} \rangle \\ = & \langle \alpha, \beta, n_1, n_2 | a^{i,j} a^{j,i} b^{k,l} b^{l,k} | \alpha, \beta, n_1, n_2 \rangle \\ = & \frac{1}{n_1!} \sum_{p_1=0}^{n_1} \sum_{p_2=0}^{n_2} \frac{n_1!}{p_1!(n_1-p_1)!} \frac{n_2!}{p_2!(n_2-p_2)!} (-\alpha^*)^{(n_1-p_1)} (-\alpha)^{(n_1-p_1)} \exp(-|\alpha|^2) \\ & \times \frac{1}{n_2!} \sum_{p_3=0}^{n_2} \sum_{p_4=0}^{n_2} \frac{n_2!}{p_3!(n_2-p_3)!} \frac{n_2!}{p_4!(n_2-p_4)!} (-\beta^*)^{(n_2-p_3)} (-\beta)^{(n_2-p_4)} \exp(-|\beta|^2) \\ & \times \sum_{m_1=0}^{\infty} \frac{\alpha^{m_1}}{m_1!} \alpha^{(m_1+p_1-p_3-j)} \frac{(m_1+p_1+i-j)!(m_1+p_1-j)!}{m_1!(m_1+p_1-p_3+i-j)!(m_1+p_1-j)!} \\ & \times \sum_{m_2=0}^{\infty} \frac{\beta^{m_2}}{m_2!} \beta^{(m_2+p_2-p_4-k-l)} \frac{(m_2+p_2+k-l)!(m_2+p_2-l)!}{m_2!(m_2+p_2-p_4+k-l)!(m_2+p_2-l)!}, \end{aligned} \quad (3)$$

trong đó i, j, k , và l là các số nguyên không âm.

3. TÍNH CHẤT PHẢN KẾT CHÙM BẬC CAO

Một trong những tiêu chuẩn để khảo sát hiệu ứng phản kết chùm hai mode đã được đưa ra bởi Lee [26, 27]. Sự xuất hiện photon phản kết chùm chứng tỏ tính chất phi cổ điển của trạng thái. Theo Lee, tiêu chuẩn về phản kết chùm hai mode được đưa ra bởi tham số phản kết chùm hai mode $R(l, k)$ dưới dạng

$$R(l, k) = \frac{\langle n_a^{(l+1)} n_b^{(k+1)} \rangle + \langle n_a^{(l-1)} n_b^{(k-1)} \rangle}{\langle n_a^{(l)} n_b^{(k)} \rangle + \langle n_a^{(k)} n_b^{(l)} \rangle} - 1, \quad (4)$$

trong đó $n_i^{(l)} = \prod_{r=0}^{l-1} (n_i - r)$ với $l \geq k \geq 1$, $n_a = a^\dagger a$, và $n_b = b^\dagger b$ lần lượt là các toán tử số hạt ở hai mode a và b . Sử dụng tính chất $n_a^{(l)} = a^{\dagger l} a^l$, ta viết lại biểu thức (4) dưới dạng như sau:

$$R(l, k) = \frac{\langle a^{\dagger(l+1)} a^{(l+1)} b^{\dagger(k+1)} b^{(k+1)} \rangle + \langle a^{\dagger(l-1)} a^{(l-1)} b^{\dagger(k-1)} b^{(k-1)} \rangle}{\langle a^{\dagger l} a^l b^{\dagger k} b^k \rangle + \langle a^{\dagger k} a^k b^{\dagger l} b^l \rangle} - 1. \quad (5)$$

Một trạng thái thể hiện tính phản kết chùm hai mode nếu tham số phản kết chùm $R(l, k) < 0$. Tham số $R(l, k)$ càng âm thì tính chất phản kết chùm hai mode càng thể hiện rõ. Khi $l=k=1$ thì tương ứng với phản kết chùm hai mode bậc thấp. Khi $l > k \geq 1$ thì tương ứng với phản kết chùm bậc cao. Dựa vào biểu thức (5) ta có thể khảo sát cho tất cả các phản kết chùm bậc cao của trạng thái dịch chuyển Fock hai mode. Để thấy được tính chất phản kết chùm bậc cao của trạng thái dịch chuyển Fock hai mode, chúng ta khảo sát một số trường hợp sau:

3.1. Trường hợp $l=2$ và $k=1$

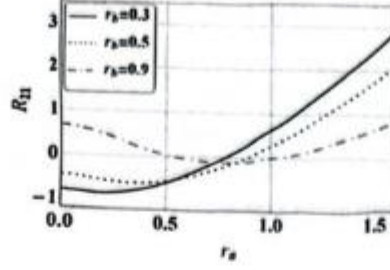
Trong trường hợp ứng với $l=2$ và $k=1$, tham số phản kết chùm $R(2, 1)$ trong biểu thức (5) được viết lại như sau:

$$R(2, 1) = \frac{\langle a^{\dagger 3} a^3 \rangle + \langle b^{\dagger 3} b^3 \rangle}{\langle a^{\dagger 2} a^2 b^{\dagger 1} b^1 \rangle + \langle a^{\dagger 1} a^1 b^{\dagger 2} b^2 \rangle} - 1. \quad (6)$$

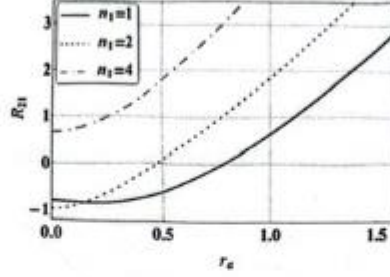
Thay các giá trị trung bình ở biểu thức (3) vào biểu thức (6), ta thu được

$$R(2, 1) = \frac{H_{3,3,0,0} + H_{0,0,3,3}}{H_{2,2,1,1} + H_{1,1,2,2}} - 1. \quad (7)$$

Dựa vào biểu thức (7), chúng ta khảo sát tham số phản kết chùm $R(2, 1)$ thay đổi theo tham số kết hợp r_a với các giá trị khác nhau của r_b lần lượt bằng 0.3, 0.5 và 0.9 khi cố định các tham số n_1 và n_2 trong trạng thái dịch chuyển Fock hai mode trong Hình 1. Kết quả khảo sát cho thấy tính chất phản kết chùm bậc cao xuất hiện khi các tham số kết hợp r_a và r_b bé. Tính chất phản kết chùm bậc cao sẽ biến mất khi đồng thời tăng các giá trị của r_a và r_b .



Hình 1. Tham số phân kết chùm $R(2,1)$ của trạng thái dịch chuyển Fock hai mode phụ thuộc vào biên độ kết hợp r_a với các giá trị khác nhau của r_b khi cố định các tham số n_1 và n_2 .



Hình 2. Tham số phân kết chùm $R(2,1)$ của trạng thái dịch chuyển Fock hai mode phụ thuộc vào biên độ kết hợp r_a với các giá trị khác nhau của n_1 khi cố định các tham số r_b và n_2 .

Hình 2 khảo sát tham số phân kết chùm $R(2,1)$ thay đổi theo tham số kết hợp r_a với các giá trị khác nhau của n_1 lần lượt bằng 1, 2 và 4 khi cố định các tham số r_b và n_2 trong trạng thái dịch chuyển Fock hai mode. Kết quả khảo sát cho thấy tính chất phân kết chùm bậc cao xuất hiện khi các tham số kết hợp r_a và n_1 bé. Tính chất phân kết chùm bậc cao sẽ biến mất khi đồng thời tăng các giá trị của r_a và n_1 .

3.2. Trường hợp $l=3$ và $k=1$

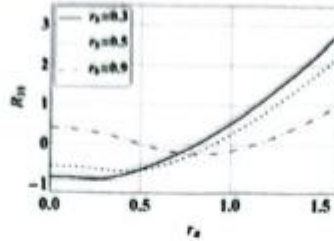
Trong trường hợp ứng với $l=3$ và $k=1$, tham số phân kết chùm $R(3,1)$ trong biểu thức (5) được viết lại như sau:

$$R(3,1) = \frac{\langle a^{\dagger 4} a^4 \rangle + \langle b^{\dagger 4} b^4 \rangle}{\langle a^{\dagger 3} a^3 b^{\dagger 1} b^1 \rangle + \langle a^{\dagger 1} a^1 b^{\dagger 3} b^3 \rangle} - 1. \quad (8)$$

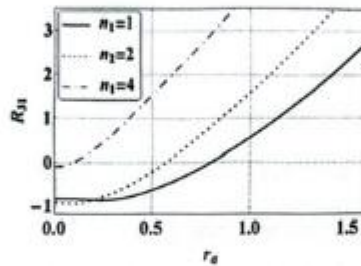
Thay các giá trị trung bình ở biểu thức (3) vào biểu thức (8), ta thu được

$$R(3,1) = \frac{H_{4,4,0,0} + H_{0,0,4,4}}{H_{3,3,1,1} + H_{1,1,3,3}} - 1. \quad (9)$$

Dựa vào biểu thức (9), trong Hình 3, chúng ta cũng khảo sát tham số $R(3,1)$ thay đổi theo tham số kết hợp r_a với các giá trị khác nhau của r_b lần lượt bằng 0.3, 0.5 và 0.9 khi cố định các tham số n_1 và n_2 trong trạng thái dịch chuyển Fock hai mode. Kết quả khảo sát cho thấy tính chất phản kết chùm bậc cao cũng xuất hiện khi các tham số kết hợp r_a và r_b bé, nhưng vùng phản kết chùm được mở rộng ra. Tính chất phản kết chùm bậc cao cũng sẽ biến mất khi đồng thời tăng các giá trị của r_a và r_b .



Hình 3. Tham số phản kết chùm $R(3,1)$ của trạng thái dịch chuyển Fock hai mode phụ thuộc vào biên độ kết hợp r_a với các giá trị khác nhau của r_b khi cố định các tham số n_1 và n_2 .



Hình 4. Tham số phản kết chùm $R(3,1)$ của trạng thái dịch chuyển Fock hai mode phụ thuộc vào biên độ kết hợp r_a .

Trong Hình 4, chúng tôi cũng khảo sát tham số phản kết chùm $R(3,1)$ thay đổi theo tham số kết hợp r_a với các giá trị khác nhau của n_1 lần lượt bằng 1, 2 và 4 khi cố định các tham số r_b và n_2 trong trạng thái dịch chuyển Fock hai mode. Kết quả khảo sát cũng cho thấy tính chất phản kết chùm bậc cao xuất hiện khi các tham số kết hợp r_a bé và tương ứng với tất cả các giá trị của n_1 bằng 1, 2 và 4. Tính chất phản kết chùm bậc cao cũng sẽ biến mất khi đồng thời tăng các giá trị của r_a và n_1 nhưng biến mất chậm hơn so với trường hợp $R(2,1)$.

4. TÍNH CHẤT ĐƠN RỜI

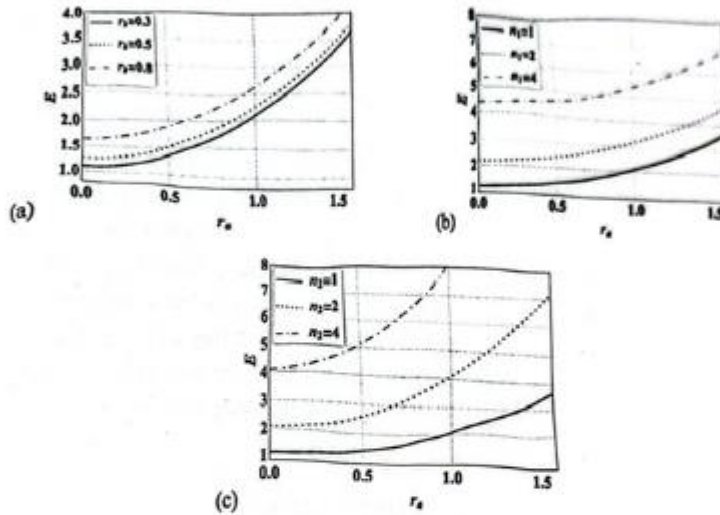
Tính chất đơn rời thể hiện mối liên hệ chặt chẽ với các tính chất phi cổ điển và là một đặc tính rất quan trọng của các trạng thái phi cổ điển [28, 29]. Một số nghiên cứu gần đây cho thấy rằng một trạng thái thể hiện tính phi cổ điển mạnh mẽ thì tính chất đơn rời của chúng

càng được tăng cường [30, 31]. Đối với các trạng thái phi cổ điển hai mode, khảo sát tính chất đan rối của chúng có thể dựa vào các tiêu chuẩn dưới dạng các bất đẳng thức. Trong số các tiêu chuẩn này có tiêu chuẩn của Duan và tiêu chuẩn của Hillery-Zubairy thường hay được sử dụng để phát hiện tính đan rối của hệ [32, 33]. Chúng tôi khảo sát tính đan rối cho trạng thái dịch chuyển Fock hai mode theo tiêu chuẩn Hillery-Zubairy [43] dưới dạng:

$$E = \langle a^\dagger a \rangle \langle b^\dagger b \rangle - |\langle ab \rangle|^2, \quad (10)$$

trong đó trạng thái hai mode thể hiện tính đan rối nếu tham số đan rối $E < 0$. Khi tham số đan rối E càng âm thì tính chất đan rối càng được thể hiện rõ. Thay biểu thức (3) vào biểu thức (10), ta thu được:

$$E = H_{1,1,0,0}H_{0,0,1,1} - |H_{0,1,0,1}|^2. \quad (11)$$



Hình 5. Tham số đan rối E của trạng thái dịch chuyển Fock hai mode với $\varphi_a = \varphi_b = 0$; và (a) $n_1 = n_2 = 1$; (b) $r_b = 0.3$, $n_2 = 1$; (c) $r_b = 0.3$, $n_1 = 1$.

Trong Hình 5, chúng tôi sử dụng biểu thức (11) để khảo sát tham số đan rối E của trạng thái dịch chuyển Fock hai mode thay đổi theo các tham số r_b , n_1 , và n_2 . Trong Hình 5(a) khảo sát sự thay đổi của tham số đan rối E vào r_a ứng với tham số $r_b = 0.3, 0.5, 0.8$ và các tham số cố định $n_1 = n_2 = 1$. Kết quả khảo sát cho rằng giá trị của E khi tăng giá trị r_b . Trong hình 5(b), chúng tôi khảo sát E khi tăng giá trị $n_1 = 1, 2, 4$ với các tham số $r_b = 0.3$, $n_2 = 1$. Khi giá trị của n_1 tăng, giá trị của E cũng tăng. Đối với hình 5(c) cũng khảo sát E với $n_2 = 1, 2, 4$ và các tham số $r_b = 0.3$, $n_1 = 1$. Giá trị của E tăng khi tăng các giá trị n_2 và r_a . Chúng tôi thấy rằng giá trị của E không âm khi thay đổi r_b và các tham số hai mode Fock n_1, n_2 , do đó trạng thái dịch chuyển Fock hai mode không có tính chất đan rối. Vì thế, khi

năng viên tải lượng từ sử dụng trạng thái dịch chuyển Fock hai mode là không khả thi. Điều này đã được thể hiện trong [24].

5. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, chúng tôi khảo sát một cách chi tiết các tính chất phân kết chùm bậc cao và tính chất đan rối của trạng thái dịch chuyển Fock hai mode. Đối với tính chất phân kết chùm bậc cao, chúng tôi đã khảo sát cho hai trường hợp cụ thể với $R(2,1)$ và $R(3,1)$. Kết quả khảo sát cho thấy tính chất phân kết chùm bậc cao xuất hiện khi các tham số kết hợp r_a và r_b bé, và tương ứng với số hạt photon n_1, n_2 ở trạng thái Fock hai mode nhỏ. Nếu tăng giá trị của các tham số kết hợp r_a, r_b và số hạt photon n_1, n_2 thì vùng phân kết chùm giảm dần và biến mất. Khi so sánh các tham số phân kết chùm $R(2,1)$ với $R(3,1)$ chúng tôi nhận thấy tính chất phân kết chùm bậc cao sẽ biến mất khi đồng thời tăng các giá trị của các tham số kết hợp r_a, r_b và số hạt photon n_1, n_2 nhưng trường hợp bậc cao $R(3,1)$ biến mất chậm hơn so với trường hợp $R(2,1)$. Hơn nữa, trong trường hợp $R(3,1)$, tính chất phân kết chùm bậc cao xuất hiện khi các tham số kết hợp r_a bé và tương ứng với tất cả các giá trị của n_1 bằng 1, 2 và 4. Điều đó chứng tỏ trạng thái dịch chuyển Fock hai mode là một trạng thái phi cổ điển thông qua tính chất phân kết chùm bậc cao. Số bậc càng cao thì tính chất phân kết chùm hai mode ở trong trạng thái này càng được tăng cường. Ngoài ra, khi dùng tiêu chuẩn đan rối Hillery-Zubairy để khảo sát tính chất đan rối của trạng thái dịch chuyển Fock hai mode thì kết quả cho thấy trạng thái này không thể hiện tính đan rối. Điều đó chứng tỏ trạng thái dịch chuyển Fock hai mode không phù hợp để thực hiện nhiệm vụ lượng tử như viễn tải lượng tử. Tuy vậy, đây là trạng thái phi cổ điển đặc biệt nên hứa hẹn cho đóng góp ứng dụng vào lĩnh vực quang học lượng tử trong tương lai gần đây.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Pathak, A., & Ghatak, A. (2018). Classical light vs. nonclassical light: characterizations and interesting applications. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 32(2), 229-264.
- [2]. Aasi, J., Abadie, J., Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Abernathy, M. R.... & Dooley, K. L. (2013). Enhanced sensitivity of the LIGO gravitational wave detector by using squeezed states of light. *Nature Photonics*, 7(8), 613-619.
- [3]. Liao, S. K., Cai, W. Q., Handsteiner, J., Liu, B., Yin, J., Zhang, L.... & Pan, J. W. (2018). Satellite-relayed intercontinental quantum network. *Physical review letters*, 120(3), 030501.
- [4]. Sperling, J., Vogel, W., & Agarwal, G. S. (2014). Quantum state engineering by click counting. *Physical Review A*, 89(4), 043829.
- [5]. Lee, S. Y., & Nha, H. (2010). Quantum state engineering by a coherent superposition of photon subtraction and addition. *Physical Review A*, 82(5), 053812.
- [6]. Miranowicz, A., & Leoński, W. (2004). Dissipation in systems of linear and

nonlinear quantum optics, *Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics*, 6(3), S43.

[7]. Escher, B. M., Avelar, A. T., da Rocha Filho, T. M., & Baseia, B. (2004). Controlled hole burning in the Fock space via conditional measurements on beam splitters. *Physical Review A*, 70(2), 025801.

[8]. Agarwal, G. S., & Tara, K. (1991). Nonclassical properties of states generated by the excitations on a coherent state. *Physical Review A*, 43(1), 492.

[9]. Zavatta, A., Viciani, S., & Bellini, M. (2004). Quantum-to-classical transition with single-photon-added coherent states of light. *science*, 306(5696), 660-662.

[10]. Duc, T. M., & Noh, J. (2008). Higher-order properties of photon-added coherent states. *Optics Communications*, 281(10), 2842-2848.

[11]. Sivakumar, S. (1999). Photon-added coherent states as nonlinear coherent states. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 32(18), 3441.

[12]. Thapliyal, K., Samantray, N. L., Banerji, J., & Pathak, A. (2017). Comparison of lower-and higher-order nonclassicality in photon added and subtracted squeezed coherent states. *Physics Letters A*, 381(37), 3178-3187.

[13]. Zhou, J., Song, J., Yuan, H., & Zhang, B. (2012). The Statistical Properties of a New Type of Photon-Subtracted Squeezed Coherent State. *Chinese Physics Letters*, 29(5), 050301.

[14]. Tinh, P. N. D., & Duc, T. M. (2023). Photon-added squeezing-enhanced coherent state and its nonclassical and non-Gaussian properties. *Optik*, 171019.

[15]. Ren, G., Du, J. M., & Zhang, W. H. (2019). Nonclassicality of photon-subtracted squeezing-enhanced coherent state. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 514, 290-297.

[16]. Malpani, P., Thapliyal, K., Alam, N., Pathak, A., Narayanan, V., & Banerjee, S. (2020). Impact of photon addition and subtraction on nonclassical and phase properties of a displaced Fock state. *Optics Communications*, 459, 124964.

[17]. Malpani, P., Thapliyal, K., Alam, N., Pathak, A., Narayanan, V., & Banerjee, S. (2019). Quantum phase properties of photon added and subtracted displaced Fock states. *Annalen der Physik*, 531(11), 1900141.

[18]. Hoai, N. T. X., & Duc, T. M. (2016). Nonclassical properties and teleportation in the two-mode photon-added displaced squeezed states. *International Journal of Modern Physics B*, 30(7), 1650032.

[19]. Truong, D. M., Nguyen, H. T. X., & Nguyen, A. B. (2014). Sum squeezing, difference squeezing, higher-order antibunching and entanglement of two-mode photon-added displaced squeezed states. *International Journal of Theoretical Physics*, 53, 899-910.

[20]. Yuan, H. C., Xu, X. X., & Fan, H. Y. (2009). Statistical properties of the generalized photon-added pair coherent state. *International Journal of Theoretical Physics*, 48, 3596-3606.

[21]. Le, T. H. T., Ho, S. C., Tran, Q. D., & Truong, M. D. (2023). Enhancement of

dynamical entanglement in a dispersive two-mode Jaynes-Cummings model via superposition of photon-added pair coherent state. *Laser Physics Letters*, 20(7), 075203.

[22]. Meng, X. G., Wang, Z., Fan, H. Y., Wang, J. S., & Yang, Z. S. (2012). Nonclassical properties of photon-added two-mode squeezed thermal states and their decoherence in the thermal channel. *JOSA B*, 29(7), 1844-1853.

[23]. Ping, Y. X., Zhang, B., Cheng, Z., & Xu, Q. (2007). Two-mode entanglement via superpositions of two-mode coherent states. *Modern Physics Letters B*, 21(19), 1253-1259.

[24]. Deepak, & Chatterjee, A. (2022). Realistic continuous-variable quantum teleportation using a displaced Fock state channel. *Quantum Information Processing*, 21(4), 145.

[25]. Tinh, P. N. D., Le, T. H. T., & Duc, T. M. (2024). Nonclassical properties of a two-mode displaced Fock state. *Da Lat University Journal of Science*. Vol. 14 (3), 3-16.

[26]. Lee, C. T. (1990). Higher-order criteria for nonclassical effects in photon statistics. *Physical Review A*, 41(3), 1721.

[27]. Lee, C. T. (1990). Many-photon antibunching in generalized pair coherent states. *Physical Review A*, 41(3), 1569.

[28]. Ivan, J. S., Chaturvedi, S., Ercolessi, E., Marmo, G., Morandi, G., Mukunda, N., & Simon, R. (2011). Entanglement and nonclassicality for multimode radiation-field states. *Physical Review A*, 83(3), 032118.

[29]. Vogel, W., & Sperling, J. (2014). Unified quantification of nonclassicality and entanglement. *Physical Review A*, 89(5), 052302.

[30]. Tasgin, M. E., & Zubairy, M. S. (2020). Quantifications for multimode entanglement. *Physical Review A*, 101(1), 012324.

[31]. Theurer, T., Satyajit, S., & Plenio, M. B. (2020). Quantifying dynamical coherence with dynamical entanglement. *Physical Review Letters*, 125(13), 130401.

[32]. Sen, B., Giri, S. K., Mandal, S., Ooi, C. R., & Pathak, A. (2013). Intermodal entanglement in Raman processes. *Physical Review A*, 87(2), 022325.

[33]. Hillery, M., & Zubairy, M. S. (2006). Entanglement conditions for two-mode states. *Physical review letters*, 96(5), 050503.

STUDYING HIGHER-ORDER ANTIBUNCHING AND QUANTUM ENTANGLEMENT PROPERTIES OF TWO-MODE DISPLACED FOCK STATE

Le Phuoc Dinh¹, Phan Ngoc Duy Tinh², Truong Minh Duc^{2*}

¹Faculty of Electronics, Electrical Engineering, and Material Technology,
University of Sciences, Hue University

²Department of Physics, University of Education, Hue University

*Email: tminhduc@hueuni.edu.vn

ABSTRACT

In this paper, we study the higher-order antibunching properties of a two-mode displaced Fock state. The results show that the two-mode displaced Fock state is the nonclassical state via the higher-order antibunching properties. By changing the parameters of the two-mode displaced Fock state and the displacement parameters, the two-mode displaced Fock state exhibits higher-order antibunching properties. The higher the order number, the more the antibunching property is enhanced. Furthermore, when using the Hillery-Zubairy entanglement criterion to investigate, the two-mode displaced Fock state does not exhibit quantum entanglement and this state is not suitable for quantum teleportation.

Keywords: Two-mode antibunching property, quantum entanglement, two-mode displaced Fock state.