

ĐẠI HỌC HUẾ
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM

HỒ SỸ CHƯƠNG

KHẢO SÁT CÁC TÍNH CHẤT,
ĐỀ XUẤT CÁC TIÊU CHUẨN ĐÁN RỐI
VÀ ỨNG DỤNG CỦA MỘT SỐ TRẠNG THÁI
PHI CỔ ĐIỂN HAI VÀ BA MODE MỚI

Demo Version - Select.Pdf SDK

LUẬN ÁN TIẾN SĨ VẬT LÝ

Huế, 2022

ĐẠI HỌC HUẾ
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM

HỒ SỸ CHƯƠNG

KHẢO SÁT CÁC TÍNH CHẤT,
ĐỀ XUẤT CÁC TIÊU CHUẨN ĐÁN RỐI
VÀ ỨNG DỤNG CỦA MỘT SỐ TRẠNG THÁI
PHI CỔ ĐIỂN HAI VÀ BA MODE MỚI

Ngành: Vật lý lý thuyết và Vật lý toán
Demo Version - Select.Pdf SDK
Mã số: 9440103

LUẬN ÁN TIẾN SĨ VẬT LÝ

Người hướng dẫn khoa học:
PGS.TS. TRƯƠNG MINH ĐỨC

Huế, 2022

LỜI CAM ĐOAN

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

Tác giả luận án



Hồ Sỹ Chương

Demo Version - Select.Pdf SDK

LỜI CẢM ƠN

Tôi xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc và sự kính trọng lớn lao đối với thầy giáo PGS.TS. Trương Minh Đức, người thầy đã tận tâm chỉ dạy, truyền cảm hứng và đam mê nghiên cứu khoa học cho tôi từ những ngày đầu mới gặp trên giảng đường trường Đại học Sư phạm Huế. Thầy đã góp phần rất lớn vào định hướng sự nghiệp của tôi, luôn giúp đỡ và chỉ bảo tôi từ sau khi tốt nghiệp đại học, quá trình học và làm luận văn Thạc sĩ và sau đó là làm Nghiên cứu sinh và thực hiện Luận án này. Thầy không chỉ giúp đỡ tôi trong chuyên môn, công việc nghiên cứu mà cả trong nhiều lĩnh vực của cuộc sống. Tôi xin được tri ân Thầy giáo của mình cũng như cảm tạ gia đình Thầy đã dành trọn cho tôi niềm yêu quý chân thành.

Tôi xin chân thành cảm ơn đến quý thầy giáo, cô giáo ở khoa Vật lý, trường Đại học Sư phạm, Đại học Huế đã giảng dạy, giúp đỡ và tạo mọi điều kiện thuận lợi trong suốt thời gian tôi học tập và nghiên cứu tại nơi đây.

Demo Version - Select.Pdf SDK

Tôi cũng xin trân trọng cảm ơn đến quý thầy cô ở Phòng Đào tạo Sau Đại học và các Phòng, Ban khác của trường Đại học Sư phạm, Đại học Huế đã đưa ra những hướng dẫn tận tình cũng như tạo mọi điều kiện thuận lợi cho tôi trong việc hoàn thành các thủ tục hành chính trong suốt thời gian tôi học tập.

Tôi xin gửi lời cảm ơn đến Ban Giám hiệu trường Đại học Đồng Nai đã cho phép, tạo điều kiện thuận lợi và giúp đỡ tôi trong thời gian tôi học tập, nghiên cứu và công tác. Xin trân trọng cảm tạ tới quý thầy, cô và bạn bè là đồng nghiệp của tôi tại trường Đại học Đồng Nai đã có những động viên, chia sẻ lúc tôi khó khăn trong công việc, học tập và công tác. Tôi xin cảm ơn tới anh Đặng Hữu Định, chị Lê Thị Hồng Thanh và bạn Trần Quang Đạt là các đồng môn của tôi đã chia sẻ những khó khăn, giúp đỡ

tôi rất nhiều trong thời gian làm nghiên cứu sinh.

Đặc biệt, tôi xin dành tất cả niềm yêu thương và sự cảm tạ chân thành đến tất cả các thành viên trong đại gia đình nội, ngoại của mình. Xin cảm ơn bố, mẹ; cảm ơn các anh, chị, em đã luôn giúp đỡ, lo lắng và động viên con, em, anh của mình trong mọi hoàn cảnh. Xin cảm tạ đến gia đình nhỏ trong đó có vợ và con gái nhỏ yêu quý của tôi đã chịu nhiều vất vả và hi sinh trong suốt thời gian tôi làm nghiên cứu sinh và hoàn thành luận án này.

Huế, tháng 10 năm 2022

Tác giả



Hồ Sỹ Chương

Demo Version - Select.Pdf SDK

BẢNG CHỮ VIẾT TẮT

Viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
GPAPCS	Generalized photon-added pair coherent states	Trạng thái kết hợp cặp thêm photon tổng quát
PAASTMPCS	Photon-added-and-subtracted two modes pair coherent state	Trạng thái kết hợp cặp thêm và bớt photon hai mode
PAPCS	Photon added pair coherent states	Trạng thái kết hợp cặp thêm photon
PCS	Pair coherent states	Trạng thái kết hợp cặp
SPAPCS	Superposition of photon-added pair coherent state	Trạng thái kết hợp cặp chồng chất thêm photon
SPAPSPCS	Superposition of photon-added and photon-subtracted pair coherent states	Trạng thái kết hợp cặp chồng chất thêm photon và bớt photon
STMPATCS	Superposition of three-mode photon-added trio coherent states	Trạng thái kết hợp bộ ba chồng chất thêm photon ba mode
TCS	Trio coherent states	Trạng thái kết hợp bộ ba

Danh sách hình vẽ

3.1	<i>Đồ thị sự phụ thuộc của S vào ξ và α khi chọn $k = 4$ và $h = 8$.</i>	54
3.2	<i>Sự phụ thuộc của $S(\phi)$ theo biến ξ của PCS ($k = l = 0$) ứng với các tham số $h = q$ khác nhau.</i>	54
3.3	<i>Sự phụ thuộc của $S(\phi)$ theo biến ξ và bộ tham số (k, h), trong đó cố định $h = 6$ và k tăng dần.</i>	55
3.4	<i>Sự phụ thuộc của $S(\phi)$ theo biến ξ và bộ tham số (k, h), trong đó cố định $k = 6$ và h tăng dần.</i>	55
3.5	<i>Đồ thị của hàm $R_{ab}(u, v)$ phụ thuộc vào biến ξ và bộ tham số (u, v), với các tham số k và h được chọn cố định là $k = h = 6$.</i>	59
3.6	<i>Các đồ thị của hàm $R_{ab}(u, v)$ theo biến ξ và bộ tham số (k, h), khi chọn $u = 8$ và $v = 1$. Hình (a) là trường hợp chỉ thay đổi một trong hai đại lượng k hoặc h. Hình (b) là trường hợp $k + h$ không đổi.</i>	60
3.7	<i>Đồ thị hàm $R_{ab}(u, v)$ của PAASTMPCS và PCS phụ thuộc vào biến ξ và bộ tham số (k, h), các tham số khác được chọn cố định là $q = 6, u = 8, v = 1$.</i>	60
3.8	<i>Đồ thị hàm Wigner (W) theo phần thực và phần ảo của α_a với $\xi = 0.2, \alpha_b = 0.5, \varphi = 0$, và $h = k = 1$.</i>	63

- 3.9 Đồ thị hàm Wigner (W) theo biến $|\xi|$ và bộ tham số (k, h) với $|\alpha_a| = 0.29$, $|\alpha_b| = 0.20$ và $\varphi_a + \varphi_b - \varphi = \pi$ 63
- 3.10 Đồ thị hàm E_{lin} phụ thuộc vào biến $|\xi|$ và cặp tham số (k, h) . Trong các hình (a), (b) và (c) đường nét liền $(k, h) = (0, 8)$ là của PCS, các đường nét đứt là của PAASTMPCS. Hình (a) là trường hợp $h = 8$ và k tăng. Ở hình (b), các đường nét đứt tương ứng $k = 8$ và h giảm (l tăng). Ở hình (c), các đường nét đứt ứng với k tăng và h giảm (l tăng), đồng thời hiệu $k - l$ tăng. 65
- 3.11 Đồ thị hàm rối \Re của PAASTMPCS theo biến $|\xi|$ và bộ tham số (k, h) với $q = 8$. Hình (a) ứng với trường hợp $h = 8$ và k tăng dần. Hình (b) ứng với trường hợp $k = 8$ và h giảm dần (l tăng dần). 67
- 3.12 Đồ thị hàm nén $S(\phi)$ phụ thuộc vào các biến $|\xi|$, ϕ và bộ tham số (k, l) với $\varepsilon = 1, q = 2$. Ở hình (a), hàm $S(\phi)$ phụ thuộc vào cả biến $|\xi|$ và ϕ với $(k, l) = (4, 2)$. Ở hình (b), $S(\phi)$ phụ thuộc vào $|\xi|$ với $k = 2$ và l tăng dần. Ở hình (c), $S(\phi)$ phụ thuộc vào $|\xi|$ với $l = 2$ và k tăng dần. 69
- 3.13 Đồ thị hàm Wigner của SPAPCS với các tham số được chọn là $q = 1, \varepsilon = 1, |\beta| = 0.3, \varphi_a = \varphi_b = \varphi = 0$. Trong (a), hàm W phụ thuộc vào phần thực và phần ảo của α với $\xi = 4$ và $(k, l) = (3, 12)$. Trong (b), W phụ thuộc vào biến $|\xi|$ với $|\alpha| = 0.5$ 71

- 3.14 Đồ thị hàm entropy tuyến tính E_{lin} phụ thuộc vào biến $|\xi|$ với $\varphi = \pi, \varepsilon = 1, q = 3$. Trong hình (a) và (b) đường cong $(0, 0)$ tương ứng với PCS, các đường còn lại ứng với SPAPCS. Ở hình (a), các đường nét đứt ứng với trường hợp cố định $l = 4$ và k tăng. Ở hình (b), các đường nét đứt ứng với trường hợp cố định $k = 4$ và l tăng. 73
- 3.15 Các đồ thị của hàm $S(\phi)$ phụ thuộc vào biến $|\xi|$ và cặp tham số (k, l) với $\varepsilon = 1, \phi = 0$ và $q = 9$. Hình (a) tương ứng với trường hợp cả k và l đều tăng. Hình (b) tương ứng với trường hợp k tăng nhưng l cố định. 75
- 3.16 Đồ thị của hàm $R_{ab}(u, v)$ phụ thuộc vào biến $|\xi|$ với các tham số được cố định là $\varepsilon = 1, \varphi = 0$ và $q = 9$. Ở hình (a), cặp tham số (u, v) thay đổi trong khi $k = l = 3$. Ở hình (b), cặp tham số (k, l) thay đổi trong khi $u = 10$ và $v = 3$ 78
- Demo Version - Select.Pdf SDK**
- 3.17 Đồ thị hàm Wigner (W) của SPAPSPCS với $\varepsilon = 1, q = 12$ và $\varphi_a = \varphi_b = \varphi = 0$. Hình (a) là đồ thị hàm W trong không gian pha phụ thuộc vào phần thực và phần ảo của α_a với $\xi = 8, |\alpha_b| = 0.4$ và $k = l = 9$. Hình (b) là các đồ thị hàm W phụ thuộc vào biến $|\xi|$ và bộ tham số (k, l) trong khi $|\alpha_a| = 0.5$ và $|\alpha_b| = 0.4$ 80
- 3.18 Đồ thị của hàm E_{lin} phụ thuộc vào biến $|\xi|$ và cặp tham số (k, l) với $\varepsilon = 1, \varphi = \pi$ và $q = 9$. Đường nét liền $(0, 0)$ ở cả hai hình (a) và (b) ứng với PCS, các đường nét đứt là của SPAPSPCS. Ở hình (a), các đường nét đứt tương ứng với trường hợp $l = q = 9$ và k tăng. Ở hình (b), các đường nét đứt tương ứng với trường hợp $k = q = 9$ trong khi l tăng. 83

- 3.19 Đồ thị của hàm E_{lin} phụ thuộc vào biến ξ và bộ tham số (k, l, q) với $\varepsilon = 1$ và $\varphi = \pi$. Hình (a) là trường hợp $k = l$ tăng, trong khi $q = 8$. Hình (b) là trường hợp $k = l = q$ tăng. 84
- 3.20 Đồ thị hàm rỗi \mathfrak{R} của SPAPSPCS phụ thuộc theo biến $|\xi|$ và bộ tham số (k, l) , với $q = 8, \varepsilon = 1, \varphi = 0$. Ở các hình (a), (b), (c) và (d) đường cong $(k, l) = (0, 0)$ ứng với PCS, các đường còn lại là của SPAPSPCS với k và l tăng dần. Hình (a) ứng với trường hợp $k = l + 2$, hình (b) ứng với trường hợp $l = k + 2$, hình (c) ứng với trường hợp $k = l + 4$, hình (d) ứng với trường hợp $l = k + 4$ 87
- 3.21 Đồ thị hàm rỗi \mathfrak{R} của SPAPSPCS phụ thuộc theo biến $|\xi|$ và bộ tham số (k, l, q) với $\varepsilon = 1, \varphi = 0$. Ở hình (a), đường cong $(0, 0, 8)$ ứng với trạng thái PCS, các đường còn lại là của SPAPSPCS với $q = 8$ trong khi $k = l$ tăng dần. Hình (b) là trường hợp $k = l = q$ tăng dần. 88
- 3.22 Đồ thị hàm $S_U(m)$ phụ thuộc vào biến r và bộ tham số (h, k, l) với $p = q = 0$ và $\varepsilon = \lambda = \sigma = 1$. Ở hình (a) $m = 1$, ở hình (b) $m = 2$ và ở hình (c) $m = 3$ 90
- 3.23 Đồ thị hàm $S_U(m)$ phụ thuộc vào biến r và bộ tham số (h, k, l) với $p = q = 0, \varepsilon = \lambda = \sigma = 1$ và $m = 2$ 91
- 3.24 Biểu đồ hàm $S_U(m)$ phụ thuộc vào λ và σ khi $p = q = 0, h = k = l, \varepsilon = 1, r = 4$ và $m = 2$ 91
- 3.25 Đồ thị hàm $S_V(m)$ phụ thuộc vào biến r và bộ tham số (h, k, l) khi $p = q = 0$ và $\varepsilon = \lambda = \sigma = 1$ 92

- 3.26 Đồ thị hàm $R_a(m)$ phụ thuộc vào biến r và bộ tham số (h, k, l) khi $p = q = 0$ và $\varepsilon = \lambda = \sigma = 1$. Hình (a), (b) và (c) lần lượt ứng với $m = 1, m = 2$ và $m = 3$ 94
- 3.27 Đồ thị hàm $R_a(m)$ phụ thuộc vào biến r và bộ tham số (h, k, l) với $p = q = 0, \varepsilon = \lambda = \sigma = 1$ và $m = 2$ 94
- 3.28 $R_a(m)$ dưới dạng một hàm của λ và σ khi $p = q = 0, h = k = l = \varepsilon = 1, m = 2$ và $r = 4$ 95
- 3.29 Đồ thị hàm $R_{a,b}(m)$ phụ thuộc theo biến r và bộ tham số (h, k, l) với $p = q = 0, \varepsilon = \lambda = \sigma = 1$. Các hình (a), (b), và (c) lần lượt tương ứng $m = 1, m = 2$ và $m = 3$ 96
- 3.30 Đồ thị hàm $R_{a,b}(m)$ phụ thuộc vào biến r và bộ tham số (h, k, l) với $p = q = 0, \varepsilon = \lambda = \sigma = 1$ và $m = 2$ 97
- 3.31 $R_{a,b}(m)$ dưới dạng hàm của λ và σ khi $p = q = 0, h = k = l = \varepsilon = 1, r = 4$, và $m = 2$ 97
- 3.32 Đồ thị hàm $E(m)$ phụ thuộc vào biến r và bộ tham số (h, k, l) với $p = q = 0$ và $\varepsilon = \lambda = \sigma = 1$. Hình (a) ứng với $m = 1$, hình (b) ứng với $m = 2$ 99
- 3.33 Đồ thị hàm $E(m)$ phụ thuộc vào biến r và bộ tham số (h, k, l) với $p = q = 0, \varepsilon = \lambda = \sigma = 1$ và $m = 2$ 99
- 3.34 Đồ thị của $E(m)$ dưới dạng một hàm của λ và σ khi $p = q = 0, h = k = l = \varepsilon = 1, r = 4$, và $m = 2$ 100

- 4.1 *Đồ thị độ trung thực trung bình F_{av} phụ thuộc vào $|\xi|$ và bộ tham số (k, h) với $q = 6$, các đường nét liền $(k, h) = (0, 6)$ ứng với PCS, các đường nét đứt còn lại của PAASTMPCS. Ở hình (a) cố định $h = 6$, k tăng, ở hình (b) các đường nét đứt tương ứng $k = 2$ và h giảm (l tăng) và trong hình (c) k và l cùng tăng (h giảm) 105*
- 4.2 *Đồ thị độ trung thực trung bình F_{av} phụ thuộc vào biến $|\xi|$ với $k = 4, h = 6$ và $|\alpha|$ được chọn có giá trị giảm dần. . . . 109*
- 4.3 *Đồ thị độ trung thực trung bình F_{av} phụ thuộc vào biến $|\xi|$ với $|\alpha| = 1$ và $q = 6$. Ở cả hai hình (a) và (b), đường nét liền $(0, 6)$ tương ứng với PCS, các đường nét đứt còn lại là của PAASTMPCS. Hình (a) tương ứng $k = 3$ và h giảm (l tăng). Hình (b) tương ứng $h = 6$ ($l = 0$) và k tăng. 109*
- 4.4 *Đồ thị của độ trung thực trung bình F_{av} phụ thuộc vào biến $|\xi|$ và bộ tham số (p, q, l) với $p \geq q + l, \varepsilon = 0.25, k = 1$. Ở hình (a), các tham số p và q được cố định trong khi l tăng. Ở hình (b), bộ tham số (p, q, l) thỏa mãn $p = 2q = 2l$ và tăng dần. 112*
- 4.5 *Đồ thị hàm F_{av} phụ thuộc vào biến $|\xi|$ và bộ ba tham số (k, q, l) với $\varepsilon = 1; \varphi = 0$. Hình (a) ứng với trường hợp k tăng, hình (b) ứng với trường hợp l tăng, hình (c) ứng với các trường hợp $k = l = q$ tăng. 116*

MỤC LỤC

Trang phụ bì	i
Lời cam đoan	ii
Lời cảm ơn	iii
Bảng chữ viết tắt	v
Danh mục các hình vẽ	xi
Mục lục	xii
PHẦN MỞ ĐẦU	1
PHẦN NỘI DUNG	8
Chương 1 - Cơ sở lý thuyết	8
1.1. Mở đầu	8
1.2. Trạng thái Fock, trạng thái kết hợp và một số trạng thái phi cổ điển	8
1.2.1. Trạng thái Fock và trạng thái kết hợp	8
1.2.2. Trạng thái đơn mode kết hợp thêm photon	13
1.2.3. Trạng thái kết hợp hai mode thêm, bớt photon	13
1.2.4. Trạng thái kết hợp cặp và kết hợp cặp thêm, bớt photon	14
1.2.5. Trạng thái kết hợp bộ ba và kết hợp bộ ba chồng chất thêm photon	18
1.3. Một số tính chất của các trạng thái phi cổ điển	21

1.3.1.	Tính chất nén	21
1.3.2.	Tính chất phản kết chùm	26
1.3.3.	Tính chất phi Gauss	29
1.3.4.	Tính chất đan rối	30
1.4.	Một số giao thức viễn tải lượng tử	34
1.4.1.	Giới thiệu viễn tải lượng tử	34
1.4.2.	Giao thức đo các thành phần trực giao	35
1.4.3.	Giao thức đo tổng số hạt và hiệu pha	37
1.5.	Kết luận	38

Chương 2 - Các trạng thái phi cổ điển hai mode và tiêu chuẩn đan rối mới **40**

2.1.	Mở đầu Demo Version - Select.Pdf SDK	40
2.2.	Các trạng thái phi cổ điển hai mode mới	41
2.2.1.	Trạng thái kết hợp cặp thêm và bớt photon hai mode	41
2.2.2.	Trạng thái kết hợp cặp chồng chất thêm photon và bớt photon	43
2.3.	Tiêu chuẩn đan rối mới	45
2.3.1.	Toán tử pha và toán tử số hạt	45
2.3.2.	Tiêu chuẩn đan rối mới	49
2.4.	Kết luận	51

Chương 3 - Các tính chất của các trạng thái phi cổ điển đa mode mới **52**

3.1.	Mở đầu	52
3.2.	Tính chất phi cổ điển của trạng thái kết hợp cặp thêm và bớt photon hai mode	53
3.2.1.	Tính chất nén tổng và nén hiệu hai mode	53
3.2.2.	Tính chất phản kết chùm	57
3.2.3.	Tính chất phi Gauss	61
3.2.4.	Tính chất đan rối	63
3.3.	Tính chất phi cổ điển của trạng thái kết hợp cặp chồng chất thêm photon	68
3.3.1.	Tính chất nén tổng hai mode	68
3.3.2.	Tính chất phi Gauss	70
3.3.3.	Tính chất đan rối	72
3.4.	Tính chất phi cổ điển của trạng thái kết hợp cặp chồng chất thêm photon và bớt photon	74
3.4.1.	Tính chất nén tổng hai mode	74
3.4.2.	Tính chất phản kết chùm	76
3.4.3.	Tính chất phi Gauss	78
3.4.4.	Tính chất đan rối	81
3.5.	Tính chất phi cổ điển bậc cao của trạng thái kết hợp bộ ba chồng chất thêm photon ba mode	89
3.5.1.	Tính chất nén tổng ba mode bậc cao	89
3.5.2.	Tính chất phản kết chùm bậc cao	92
3.5.3.	Tính chất đan rối ba mode bậc cao	98
3.6.	Kết luận	100

Chương 4 - Viễn tải lượng tử với các trạng thái phi cổ điển mới	102
4.1. Mở đầu	102
4.2. Viễn tải lượng tử với trạng thái kết hợp cặp thêm và bớt photon hai mode	102
4.2.1. Quá trình viễn tải bằng giao thức đo các thành phần trực giao	102
4.2.2. Quá trình viễn tải bằng giao thức đo tổng số hạt và hiệu pha	106
4.3. Viễn tải lượng tử với trạng thái kết hợp cặp chồng chất thêm photon	110
4.4. Viễn tải lượng tử với trạng thái kết hợp cặp chồng chất thêm photon và bớt photon	113
4.5. Kết luận	117
PHẦN KẾT LUẬN CHUNG	118
Danh mục các công trình khoa học đã công bố liên quan đến các kết quả nghiên cứu của luận án	121
Tài liệu tham khảo	122
Phụ lục	P.1

PHẦN MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Từ khi Schrödinger đưa ra khái niệm rối lượng tử để giải thích nghịch lý EPR [1] năm 1935, các nhà khoa học đã sớm có ý tưởng về một hệ thống thông tin lượng tử mà trung tâm của nó chính là các máy tính lượng tử. Ý tưởng về hệ thống tính toán lượng tử và máy tính lượng tử được đưa ra lần đầu tiên bởi Manin [2] vào năm 1980 và bởi Feynman năm 1982 [3]. Cho đến nay, có thể nói các ý tưởng đó đã cơ bản trở thành hiện thực, nhiều quốc gia mạnh về kinh tế và công nghệ như Mỹ, Trung Quốc, Đức, Nga đã xem việc phát triển hệ thống máy tính lượng tử nói riêng và lĩnh vực thông tin lượng tử nói chung là chiến lược quốc gia nên đã tạo những điều kiện thuận lợi nhất và đầu tư rất lớn cho lĩnh vực này. Tính đến năm 2021, có nhiều hãng và trung tâm công nghệ của các nước này đã nghiên cứu và chế tạo thành công các mô hình thử nghiệm máy tính lượng tử, điển hình như hãng IBM có Q Systems One, hãng Google có Sycamore, ở Đại học Khoa học và Công nghệ Trung Quốc có Zuchongzhi. Đó là các hệ thống máy tính lượng tử lần lượt có 27, 54 và 66 qubit. Tất cả chúng đều thể hiện những ưu điểm vượt xa các siêu máy tính cổ điển mạnh nhất hiện nay như Fugaku, Summit và Sierra. Tuy nhiên chúng vẫn là các mô hình thử nghiệm và còn bộc lộ nhiều nhược điểm về tính ổn định cũng như tính chính xác, nhất là các tính toán đòi hỏi số qubit hoạt động lớn. Vì khi đó, tính chất rối của các trạng thái lượng tử được sử dụng trở nên bất ổn định, khó kiểm soát và nhiều vấn đề kỹ thuật khác.

Lĩnh vực thông tin lượng tử và viễn tải lượng tử đều dựa trên các hiệu ứng của Cơ học lượng tử trong đó đáng chú ý là rối lượng tử. Dựa trên việc mô tả chùm laser đơn mode bằng trạng thái kết hợp được đề xuất

bởi Glauber và Sudarshan năm 1963 [4],[5], hàng loạt các trạng thái phi cổ điển đã được các nhà khoa học trên thế giới đưa ra như trạng thái kết hợp hai photon, trạng thái kết hợp cặp [6], trạng thái kết hợp hai mode SU(1,1) thêm photon đơn, trạng thái nén [7], trạng thái chân không nén hai mode thêm và bớt photon [8]. Trong nước, nhóm tác giả Nguyễn Bá Ân, Trương Minh Đức cùng các cộng sự cũng đã đưa ra các trạng thái mới và được đăng trên các tạp chí quốc tế có uy tín như trạng thái kết hợp bộ ba [9], trạng thái nén dịch chuyển thêm photon hai mode [10] và nhiều trạng thái khác. Các tính chất phi cổ điển của những trạng thái đó như tính chất nén tổng và hiệu, tính chất phản kết chùm, tính chất phi Gauss, tính chất đan rối,... cũng được quan tâm nghiên cứu [8],[10],[11],[12],[13].

Trong những tính chất phi cổ điển nêu trên, tính đan rối đóng vai trò quan trọng trong việc tạo ra các nguồn rối phục vụ cho các lĩnh vực thông tin lượng tử và viễn tải lượng tử. Do đó, các nhà Vật lý lý thuyết đã đưa ra các mô hình tạo ra các trạng thái phi cổ điển có tính chất rối như mô hình tạo ra trạng thái kết hợp cặp của Dong và các cộng sự năm 2008 [14], mô hình tạo ra trạng thái kết hợp bộ ba của nhóm tác giả Nguyễn Bá Ân và các cộng sự năm 2013 [15],... Việc tạo ra các nguồn rối trên lý thuyết đòi hỏi phải được kiểm tra thông qua các tiêu chuẩn đan rối phù hợp. Vậy nên các tiêu chuẩn hay điều kiện để kiểm tra tính đan rối cũng được quan tâm nghiên cứu. Năm 1996, Peres đã đưa ra tiêu chuẩn tách được đối với ma trận mật độ [16]. Năm 1997, Horodecki đã đưa ra tiêu chuẩn tách được và không tách được đối với trạng thái pha trộn [17]. Từ đó một loạt các tiêu chuẩn có thể tách được đối với các hệ lượng tử cũng được đề xuất như tiêu chuẩn tách được cho hệ có biến liên tục của Simon và các cộng sự năm 2000 [18] và một số tiêu chuẩn khác [19]. Năm 2003 Hillery và Zubairy đưa ra điều kiện đan rối cho hệ hai mode [20]. Cũng năm 2006, Nha và Kim đưa ra các tiêu chuẩn đan rối dựa vào hệ thức bất định trong đại số SU(2)

và $SU(1,1)$ [21] từ đó phát hiện ra các trạng thái đan rối phi Gauss. Tiếp đó, các điều kiện đan rối cho hệ hai mode, ba mode và đa mode cũng được đưa ra. Điển hình là năm 2007, nhóm tác giả Li, Fei, Wang và Wu đã đưa ra điều kiện đan rối cho các trạng thái đa mode [22]; năm 2008 nhóm tác giả Duc, Noh và Kim đưa ra tiêu chuẩn đan rối dựa vào bất đẳng thức cho trạng thái kết hợp cặp và bộ ba [8]. Nhìn chung, các tiêu chuẩn hay điều kiện đan rối được đưa ra chủ yếu dựa trên hệ thức bất định giữa xung lượng và tọa độ, sự vi phạm bất đẳng thức Cauchy-Schwarz.

Hiện nay các lĩnh vực thông tin lượng tử, viễn tải lượng tử, máy tính lượng tử đang được nghiên cứu rất sôi động trên khắp thế giới. Với hi vọng góp phần vào sự phát triển chung đó, chúng tôi chọn **“Khảo sát các tính chất, đề xuất các tiêu chuẩn đan rối và ứng dụng của một số trạng thái phi cổ điển hai và ba mode mới”** làm đề tài nghiên cứu của luận án. Các đóng góp mới của luận án bao gồm: thứ nhất là đưa ra hai trạng thái phi cổ điển hai mode mới, thứ hai là làm rõ các tính chất phi cổ điển của một số trạng thái phi cổ điển hai và ba mode mới. Thứ ba là đề xuất một tiêu chuẩn đan rối mới cho hệ hai mode. Thứ tư là đánh giá mức độ thành công của quá trình viễn tải lượng tử với nguồn rối là các trạng thái hai mode mới. Với những đóng góp đó, luận án góp phần hữu ích cho sự phát triển của lĩnh vực Quang lượng tử nói chung và lĩnh vực Thông tin lượng tử, máy tính lượng tử nói riêng.

2. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu chung của đề tài là đề xuất được các trạng thái phi cổ điển hai mode mới, xây dựng được tiêu chuẩn đan rối mới cho hệ hai mode, làm rõ được các tính chất của một số trạng thái phi cổ điển hai và ba mode mới, đánh giá được mức độ thành công của các quá trình viễn tải lượng tử với nguồn rối là các trạng thái phi cổ điển mới. Trên cơ sở đó, mục tiêu cụ

thể của luận án là:

- Đưa ra được hai trạng thái phi cổ điển hai mode mới bằng phương pháp thêm, bớt photon định xứ và không định xứ;
- Đề xuất được một tiêu chuẩn đan rối mới để dò tìm và định lượng độ đan rối cho hệ hai mode;
- Làm rõ được các tính chất phi cổ điển của các trạng thái hai và ba mode mới như tính chất nén, tính chất phản kết chùm, tính chất phi Gauss thông qua hàm Wigner và tính chất đan rối;
- Sử dụng các trạng thái hai mode mới đã đề xuất vào các quá trình viễn tải lượng tử một trạng thái kết hợp, đồng thời đánh giá mức độ thành công của các quá trình đó thông qua độ trung thực trung bình.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của đề tài là các trạng thái phi cổ điển hai và ba mode; các tính chất phi cổ điển bao gồm tính chất nén, tính chất phản kết chùm, tính chất phi Gauss, tính chất đan rối; các tiêu chuẩn đan rối và các mô hình viễn tải lượng tử.

Nội dung nghiên cứu của đề tài được giới hạn trong các phạm vi sau đây. Các trạng thái phi cổ được nghiên cứu trong phạm vi hai và ba mode của trường điện từ. Tiêu chuẩn đan rối mới được đề xuất chỉ dành cho hệ hai mode. Các tính chất phi cổ điển được nghiên cứu bao gồm tính chất nén, tính chất phản kết chùm, tính chất phi Gauss và tính chất đan rối. Nguồn đan rối được sử dụng cho quá trình viễn tải lượng tử bao gồm ba trạng thái phi cổ điển hai mode là trạng thái kết hợp cặp thêm và bớt photon hai mode, trạng thái kết hợp cặp chồng chất thêm photon và trạng thái kết hợp cặp chồng chất thêm photon và bớt photon. Giao thức viễn tải được sử dụng bao gồm hai loại là giao thức đo các thành phần trực

giao và giao thức đo tổng số hạt và hiệu pha.

4. Phương pháp nghiên cứu

Trong quá trình nghiên cứu các nội dung chính của luận án chúng tôi đã sử dụng các phương pháp sau:

- Phương pháp lượng tử hóa lần hai được sử dụng trong quá trình tính toán giải tích để xây dựng trạng thái mới, xây dựng tiêu chuẩn đan rối mới và áp dụng, nghiên cứu các tính chất phi cổ điển của các trạng thái mới;

- Phương pháp thống kê lượng tử được sử dụng khi xây dựng các biểu thức giải tích của độ trung thực trung bình nhằm đánh giá mức độ thành công của quá trình viễn tải lượng tử;

- Phương pháp tính số và vẽ đồ thị được áp dụng để đánh giá các kết quả giải tích thu được trong hầu hết các nội dung nghiên cứu chính của đề tài. Phần mềm được sử dụng để tính số và vẽ đồ thị là Mathematica.

Demo Version - Select.Pdf SDK

5. Điểm mới của đề tài

Đề tài luận án có một số điểm mới sau:

- Đưa ra được hai trạng thái phi cổ điển hai mode mới bằng phương pháp thêm và bớt photon định xứ và không định xứ;

- Đề xuất được tiêu chuẩn đan rối mới cho hệ hai mode từ toán tử hiệu pha dạng Hermite và toán tử hiệu số hạt của trường điện từ;

- Làm rõ một số tính chất phi cổ điển của các trạng thái hai và ba mode mới bao gồm tính chất nén, tính chất phản kết chùm, tính chất phi Gauss và tính chất đan rối;

- Chỉ ra được sự thành công của các quá trình viễn tải lượng tử với nguồn đan rối được sử dụng là các trạng thái phi cổ điển hai mode mới.

6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án

Việc đưa ra hai trạng thái hai mode mới và nghiên cứu chi tiết một số tính chất phi cổ điển của chúng cùng với một số trạng thái hai và ba mode mới khác là cơ sở quan trọng cho các nhà lý thuyết và thực nghiệm nghiên cứu và áp dụng chúng vào các nhiệm vụ lượng tử. Phương pháp thêm, bớt photon được sử dụng trong quá trình xây dựng trạng thái mới có ý nghĩa quan trọng trong việc tăng cường các đặc tính phi cổ điển từ đó góp phần nâng cao mức độ thành công khi áp dụng các trạng thái mới vào thực tiễn.

Thông qua việc áp dụng các trạng thái mới vào quá trình viễn tải lượng tử, luận án đã đóng góp cơ sở lý thuyết cho việc xây dựng và cải tiến các mô hình lý thuyết cũng như mô hình thực nghiệm của quá trình viễn tải sử dụng các trạng thái mới trong tương lai.

Việc xây dựng thành công tiêu chuẩn đan rối mới dựa trên toán tử hiệu pha có dạng Hermite và toán tử hiệu số hạt có ý nghĩa trong việc dò tìm và định lượng độ đan rối của các trạng thái hai mode của trường điện từ, đặc biệt là các trạng thái mà yếu tố pha và số hạt có vai trò quan trọng.

7. Bố cục của luận án

Bố cục luận án gồm ba phần: phần mở đầu, phần nội dung và phần kết luận. Ngoài ra còn có danh mục ký hiệu viết tắt, danh sách hình vẽ, danh mục các công trình khoa học đã công bố liên quan đến các kết quả nghiên cứu của luận án, tài liệu tham khảo và phụ lục.

- Phần mở đầu trình bày lý do chọn đề tài, mục tiêu nghiên cứu, đối tượng và phạm vi nghiên cứu, phương pháp nghiên cứu, điểm mới của đề tài, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án, bố cục luận án.

- Phần nội dung bao gồm bốn chương. Chương một trình bày về cơ sở lý thuyết của đề tài. Chương hai trình bày về việc đưa ra hai trạng thái phi cổ điển hai mode mới và đề xuất tiêu chuẩn đan rối mới. Chương ba trình bày về nghiên cứu các tính chất phi cổ điển của các trạng thái đa mode mới. Chương bốn trình bày ứng dụng các trạng thái mới vào viễn tải lượng tử.

- Phần kết luận trình bày về những kết quả đã đạt được, đánh giá mức độ đạt được so với mục tiêu đề ra, các ưu nhược điểm của đề tài, hướng khắc phục và phát triển của đề tài.

Các kết quả nghiên cứu của luận án được công bố trong 06 công trình dưới dạng các bài báo khoa học, trong đó có 01 bài đã được đăng trên tạp chí chuyên ngành nằm trong hệ thống SCIE (*Journal of Computational Electronics*), 01 bài đã được đăng trên tạp chí chuyên ngành nằm trong hệ thống SCOPUS (*Journal of Physics: Conference Series*), có 02 bài đã đăng trên tạp chí chuyên ngành trong nước thuộc danh mục ACI (*Hue University Journal of Science: Natural Science* và *Communications in Physics*) và có 02 bài đang gửi đăng trên các tạp chí chuyên ngành quốc tế nằm trong hệ thống SCIE-SCOPUS (*Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* và *International Journal of Theoretical Physics*).