BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM HÀ NỘI

NGUYỄN VĂN HỢP

MỘT SỐ HIỆU ỨNG LƯỢNG TỬ TRONG CÁC HỆ NANÔ TRÊN CƠ SỞ CHẤM LƯỢNG TỬ

LUẬN ÁN TIẾN SĨ VẬT LÝ

HÀ NỘI - 2011

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM HÀ NỘI

NGUYỄN VĂN HỢP

MỘT SỐ HIỆU ỨNG LƯỢNG TỬ TRONG CÁC HỆ NANÔ TRÊN CƠ SỞ CHẤM LƯỢNG TỬ

Chuyên ngành: Vật lí lý thuyết và vật lí toán
Mã số: 62.44.01.01.

LUẬN ÁN TIẾN SĨ VẬT LÝ

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:
GS.VS. NGUYỄN VĂN HIỆU

HÀ NỘI - 2011

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Tiến bộ của vật lý chất rắn trong những năm qua được đặc trưng bởi sự chuyển hướng đối tượng nghiên cứu chính từ các khối tinh thể sang các màng mỏng, các cấu trúc nhiều lớp và chấm lượng tử. Trong các đối tượng mới được nêu trên, hầu hết các tính chất điện tử đều thay đổi một cách đáng kể. Đặc biệt, đã xuất hiện một số tính chất mới khác, được gọi là các hiệu ứng kích thước. Trong các cấu trúc có kích thước lượng tử, nơi các hạt dẫn bị giới hạn trong những vùng có kích thước đặc trưng vào cỡ bậc của bước sóng de Broglie, các tính chất vật lí và điện tử thay đổi đầy kịch tính. Ở đây, các qui luật cơ học lượng tử bắt đầu có hiệu lực, trước hết thông qua việc biến đổi đặc trưng cơ bản nhất của hệ điện tử là phổ năng lượng của nó. Phổ năng lượng trở thành gián đoạn dọc theo hướng toạ độ giới hạn. Dưới ảnh hưởng của trường ngoài hay của các tâm tán xạ (phonon, tạp chất, . . .) thường chỉ hai, mà không phải là ba thành phần động lượng của hạt dẫn có thể biến đổi. Do đó, dáng điệu của hạt dẫn trong các cấu trúc kích thước lượng tử tương tự như trong khí điện tử hai chiều, thậm chí các hệ trên qui mô xác định theo tất cả ba chiều toạ độ.

Chuyển động của electron hoàn toàn bị lượng tử hoá khi nó bị bẫy trong giả không gian không chiều (quasi-zero-dimensional) hay chấm lượng tử (quantum dot QD). Điều này đạt được đầu tiên bởi các nhà khoa học của Texas Instruments Incorporated. Các electron trong QD bị giam cầm mạnh theo cả ba chiều không gian nên hệ QD được xem tương tự như các nguyên tử nhân tạo (artificial atoms), siêu nguyên tử (superatoms), hoặc quantum-dot atoms. Điều làm cho QD không giống như các hệ thông thường đó là: khả năng có thể điều chỉnh hình dạng của nó, không gian của nó, cấu trúc các mức năng lượng và số electron bị giam cầm.

Một loạt các nghiên cứu thực nghiệm có liên quan tới QD đã được đề cập đó là tính chất quang học của chúng (hấp thụ và phát xạ ánh sáng trong vùng khả kiến

hoặc vùng hồng ngoại xa, và tán xạ Raman của ánh sáng) và các tính chất điện (điện dung và sự truyền dẫn). Vì sự hấp thụ và phát xạ ánh sáng của các QD chỉ trong vùng phổ rất hẹp và hoàn toàn điều khiển được bằng cách sử dụng từ trường do đó kết quả này sớm được ứng dụng để xây dựng và điều khiển laser bán dẫn. Sự lượng tử hoá mạnh các mức năng lượng của electron cùng với các tham số thích hợp đối với laser action, đặc biệt là các QD self-assembled, nó là cơ sở cho laser hoạt động ở nhiệt độ cao và dòng bơm thấp. QD có kích thước nhỏ và có thể tạo thành các ma trận chấm lượng tử với mật độ lớn cho phép sử dụng trong bộ nhớ có dung lượng lớn trong máy tính.

Nghiên cứu về tính truyền dẫn của QD, đơn giản nhất là dòng qua chấm, điều này đã được nghiên cứu từ lâu nhưng cho tới nay vẫn chưa hoàn chỉnh về mặt lý thuyết. Các nghiên cứu chủ yếu là tính số mà chưa đưa ra được các biểu thức giải tích của chúng. Sự chuyển dời của các electron qua QD một mức (single-level quantum dot) liên kết với hai điện cực là một vấn đề thời sự đối với nghiên cứu lí thuyết cũng như thực nghiệm của nhiều công trình trong những năm gần đây đối với lĩnh vực vật lí nanô [27, 28, 29, 32, 37, 42, 43, 44, 60, 63, 75, 82, 83, 84, 88, 92]. Hai đại lượng vật lí có thể đo được trong thực nghiệm dựa trên sự chuyển vận của các electron đó là dòng electron qua QD và giá trị trung bình của số electron trong QD. Tất cả các đại lượng này đều có thể tính qua các số hạng của hàm Green một electron. Trong việc nghiên cứu lý thuyết đầu tiên về sự chuyển vận của electron qua QD đơn mức, các phương trình vi phân đối với các hàm Green thời gian thực đã được đưa ra cùng với việc sử dụng các phương trình Heisenberg đối với các toán tử sinh và hủy electron [37, 60]. Do tính đến tương tác Coulomb mạnh giữa các electron trong QD, nên các phương trình vi phân đối với các hàm Green một electron có chứa các hàm Green nhiều electron và tất cả các phương trình này liên kết các hàm Green với nhau tạo thành một hệ vô hạn các phương trình vi phân. Để thu được một hệ đóng gồm hữu hạn các phương trình, chúng ta phải sử dụng một số phương pháp gần đúng để tách hệ vô hạn các phương trình vi phân này. Hơn nữa, quá trình chuyển vận của electron qua QD là quá trình không cân bằng, do đó chúng

ta phải sử dụng các hàm Green thời gian phức không cân bằng trong hình thức luận Keldysh [26, 49].

Trong việc nghiên cứu các hàm Green thời gian phức không cân bằng bằng phương pháp lý thuyết nhiễu loạn đối với tương tác Coulomb, người ta thường giữ lại một số chuỗi các giản đồ hình thang và cũng thừa nhận phương pháp gần đúng không chéo (non-crossing approximation NCA). Các hệ của các phương trình đối với các hàm Green đã được giải bằng nhiều phương pháp số khác nhau, ví dụ: kỹ thuật Quantum Monte Carlo [82] và tính số bằng phương pháp nhóm tái chuẩn hóa [28, 29, 43, 44]. Các kết quả tính số đã chỉ ra rằng các hàm Green electron hai điểm có cộng hưởng và cộng hưởng này có liên hệ với hiệu ứng Kondo. Bên cạnh cộng hưởng Kondo này, trạng thái chuẩn liên kết Fano trong phổ năng lượng của hệ electron trong QD và các điện cực cũng có thể đóng góp một số cộng hưởng.

Trong luận án này, khác với các nghiên cứu trước, chúng tôi sẽ đưa ra các biểu thức giải tích chính xác của các số hạng cộng hưởng Kondo và Fano bằng cách giải các phương trình dưới dạng ma trận đối với các hàm Green để tìm nghiệm giải tích tường minh. Từ các biểu thức giải tích này chúng tôi sẽ thu được toàn bộ các cộng hưởng và điều kiện để tồn tại các cộng hưởng đó. Đặc biệt, chúng tôi sẽ chỉ ra sự khác biệt giữa cộng hưởng Kondo và cộng hưởng Fano, nếu chúng tồn tại [62, 66].

Nghiên cứu về tính truyền dẫn giữa các chấm lượng tử làm cơ sở trong thông tin lượng tử và máy tính lượng tử. Trong một máy tính điện tử lượng tử của tương lai, các phép tính toán dùng để tính không còn là các phép tính toán thông thường dùng trong máy tính cổ điển nữa mà sẽ là các phép toán của cơ học lượng tử. Vì thế, đơn vị cơ bản để chứa tin tức sẽ là các mẩu tin lượng tử - quantum bit hay gọi tắt là qubit. Một qubit có thể ở trạng thái chứa trị số 0 hoặc ở trạng thái chứa trị số 1 hay cũng có thể ở một trạng thái vừa chứa trị số 1 với một tỷ số xác xuất nào đó và trị số 0 với một tỷ số xác suất còn lại. Trong thực hiện vật lí tên gọi qubit dành cho một hệ lượng tử có hai trạng thái. Cho nên, bất kì hai trạng thái lượng tử của một hệ nào đó cũng có thể xem là một qubit. Nhưng trong trường hợp cụ thể qubit là một hệ lượng

tử hai mức với giả thiết rằng cả hai mức năng lượng này không suy biến. Có nhiều hệ vật lí khác nhau thực hiện mô hình qubit, chẳng hạn như: hai mức năng lượng của hạt có mômen từ spin 1/2 trong từ trường không đổi, một nguyên tử hai mức, hai trạng thái phân cực của một phôtôn, mức năng lượng kích thích thấp nhất và trạng thái cơ bản trong chấm lượng tử bán dẫn, ... Cho tới nay, người ta cũng chưa biết nên chọn hệ vật lí nào trong các hệ kể trên để làm qubit vì mỗi hệ có những ưu điểm và nhược điểm khác nhau. Thông tin lượng tử được mã hóa vào trong qubit là hai thành phần hàm sóng của qubit đối với trạng thái thuần lượng tử hoặc là ma trận mật độ 2×2 đối với các trạng thái pha trộn.

Tương tự như máy tính điện tử cổ điển, máy tính lượng tử sẽ điều khiển một bộ các qubit chứa trong não của máy tính bằng cách tác động trên các qubit này một loạt các cổng logic lượng tử. Như vậy, qubit có vai trò quan trọng trong việc tạo ra máy tính lượng tử và thông tin lượng tử nên trong hơn một thập kỉ qua các nhà lý thuyết và thực nghiệm rất quan tâm đến nghiên cứu động lực học qubit và hệ qubit và đã đạt được nhiều kết quả quan trọng. Trên thực tế bất kì một hệ lượng tử nào cũng tương tác với môi trường (environment) quanh nó, điều này đã gây ra giảm kết hợp (decoherence) của hệ lượng tử [61]. Các quá trình suy giảm kết hợp của qubit được cho là cơ chế chính cản trở các quá trình tính toán lượng tử và thông tin lượng tử trở thành hiện thực. Hiểu được và triệt tiêu được các quá trình này là một nhiệm vụ quan trọng của khoa học thông tin lượng tử. Việc nghiên cứu về động lực học qubit và hệ các qubit có tương tác với môi trường chưa được xét một cách đầy đủ.

Gần đây, vấn đề nghiên cứu các hệ nguyên tử hoặc giống nguyên tử hai mức có chức năng như bit lượng tử tích điện (charge qubits) trong điện động lực học lượng tử về cavity được quan tâm rất nhiều là vì nó được sử dụng giống như một phần tử của các hệ xử lý thông tin lượng tử (quantum information QI) [8, 9, 20, 36, 52, 79, 80, 90, 91]. Điện động lực học lượng tử về cavity là lý thuyết lượng tử của các hệ nguyên tử hoặc giống nguyên tử tương tác với trường điện từ trong microcavity. Do điều kiện biên nên trường điện tử trong microcavity có phổ năng lượng gián đoạn. Liên kết mạnh của hệ electron hai mức tương tác với đơn mode

lượng tử của trường điện từ trong microcavity đã được quan sát trong thực nghiệm [30, 38, 50, 56, 57, 74, 76]. Sự giảm kết hợp của bit lượng tử tích điện trong điện động lực học lượng tử về cavity do tương tác của chúng với môi trường và ảnh hưởng của nó lên xử lý thông tin lượng tử cũng đã được nghiên cứu. Tuy nhiên, cho đến nay việc giải toàn bộ hệ phương trình tốc độ của bit lượng tử tích điện cùng với sự suy giảm kết hợp trong điện động lực học lượng tử về cavity chưa được nghiên cứu đầy đủ. Mặt khác, đối với việc nghiên cứu toàn diện các tính chất vật lí của hệ liên kết mạnh, hệ bit lượng tử tích điện và các photon trong microcavity, chúng ta cần phải xác định sự tiến triển theo thời gian của ma trận mật độ rút gọn của hệ này khi tính đến sự tương tác với môi trường là vấn đề được nghiên cứu trong luận án này.

Phần tử cơ bản nhất của bất kì một hệ xử lý QI là qubit. Sự trao đổi trạng thái lượng tử giữa hai qubit là cơ chế vật lí để chuyển giao, hoặc truyền thông tin lượng tử từ qubit này đến qubit khác [4, 13, 14, 24, 25, 33, 47, 48, 54, 64, 67, 78, 85]. Đặc biệt Lloyd [54] và Bose [13] đã đề xuất sử dụng chuỗi spin tương tác để truyền thông tin lượng tử giữa hai spin-qubit ở vị trí đầu và cuối của mỗi chuỗi này. Sự truyền thông tin lượng tử từ đầu đến cuối chuỗi spin đã được nghiên cứu bởi nhiều tác giả [4, 24, 33, 48, 85]. Bên cạnh tương tác giữa hai spin-qubit liền kề, tương tác giữa chuỗi spin-qubit với môi trường là nguyên nhân giảm kết hợp của nó. Động lực học lượng tử của hệ hai spin-qubit có tương tác, cùng với suy giảm kết hợp đã được nghiên cứu bởi nhiều tác giả, nhưng các quá trình suy giảm kết hợp của chuỗi gồm có nhiều hơn hai spin-qubit chưa được xem xét kĩ. Với mục đích đó, trong luận án này chúng tôi tập trung vào nghiên cứu động lực học lượng tử của chuỗi gồm ba spin-qubit với các quá trình suy giảm kết hợp.

Từ các biểu thức giải tích của ma trận mật độ rút gọn của hệ qubit, chúng tôi áp dụng nghiên cứu tính đan rối lượng tử và độ tin cậy lượng tử của hệ khi truyền qua các kênh suy giảm kết hợp.

Đan rối lượng tử không những là điều cơ bản được quan tâm trong cơ học lượng tử mà nó còn là một nguồn quan trọng trong việc xử lý thông tin lượng tử

[39, 61]. Đan rối lượng tử là một tính chất cơ bản của các hệ lượng tử, tính chất này của hệ có nhiều tiềm năng để sử dụng trong viễn tải lượng tử (quantum teleportation), mật mã lượng tử (quantum crytography) và các ứng dụng khác [61]. Viễn tải lượng tử hay truyền thông lượng tử là một quá trình truyền một trạng thái lượng tử không xác định đến một nơi nhận ở xa. Điểm quan trọng nhất của quá trình này là dựa trên cơ sở của đan rối lượng tử. Khởi đầu của quá trình này được áp dụng để tạo ra các giao thức (protocol) của truyền thông giữa hai đối tượng chia sẻ đan rối lượng tử của các trạng thái Bell của hai qubit [15, 31]. Sự thực hiện thành công của thí nghiệm về giao thức truyền thông lượng tử dựa trên cơ sở trạng thái của hệ hai qubit [19] đã thôi thúc các nghiên cứu về mặt lí thuyết của các giao thức dựa trên trạng thái đan rối của nhiều qubit. Trong trường hợp tổng quát, khi thực hiện đầy đủ sự sắp xếp theo hệ thống đối với viễn tải lượng tử cần đòi hỏi: số lượng trạng thái đan rối lượng tử được sử dụng trong mỗi giao thức và các trạng thái đan rối này là pha trộn do tương tác với môi trường. Giá trị của đan rối lượng tử của các trạng thái pha trộn ban đầu phân bố giữa các đối tượng để xác định hiệu quả của giao thức kèm theo trong viễn tải lượng tử [16, 17, 86]. Tuy nhiên không tránh được sự tương tác giữa qubit và môi trường dẫn đến tính đan rối lượng tử của hệ không được bảo toàn theo thời gian. Hiện tượng đan rối lượng tử giữa hai qubit hoàn toàn biến mất sau một khoảng thời gian hữu hạn, gọi là hiệu ứng "đan rối lượng tử đột ngột chết" (entanglement sudden death ESD) đã được tiên đoán trước bởi lý thuyết [94, 95] và sau đó đã được kiểm tra bằng thực nghiệm [6, 53]. Điều này chỉ ra rằng tính chất đặc biệt của đan rối lượng tử khác với tính kết hợp của hệ. Từ những điểm như vậy, hình như ESD là một điều bất lợi trong quá trình sử lý thông tin lượng tử. Gần đây Bellomo và các đồng tác giả [10, 11] đã chỉ ra rằng tính đan rối lượng tử có thể hồi sinh sau một khoảng thời gian chết, như vậy đã mở rộng ý nghĩa của thời gian đan rối lượng tử của qubit. Hiện tượng vật lí đáng chú ý này đã được thực nghiệm quan sát thấy [89]. Tuy nhiên trong [93], Muhammed Yönaç và các đồng tác giả mới chỉ xét hiệu ứng ESD đối với hai hệ qubit-cavity giống nhau không kể đến tương tác với môi trường. Trong [94], các tác giả mới chỉ xét hiện ứng ESD khi

kể đến ảnh hưởng của hiện tượng phát xạ tự phát trong chân không mà chưa kể đến các ảnh hưởng suy giảm kết hợp khác. Trong luận án này, chúng tôi cũng xét đan rối lượng tử giữa các qubit, hoặc giữa các photon, hoặc giữa qubit và photon với trạng thái ban đầu của trường điện từ trong cavity là chân không, nhưng xét đồng thời ảnh hưởng của ba cơ chế làm suy giảm kết hợp của hệ đó là: hồi phục, lật pha và mất photon.

Đã có nhiều nghiên cứu về động lực học đan rối lượng tử của các trạng thái nhiều qubit dưới ảnh hưởng của môi trường [23, 58]. Trong [81], Michael Siomau và các tác giả đã nghiên cứu động lực học đan rối lượng tử của trạng thái ba qubit trong kênh nhiễu đã chỉ ra rằng: trạng thái $|\mathrm{GHZ}\rangle$ bảo toàn được đan rối lượng tử mạnh hơn trạng thái $|\mathrm{W}\rangle$, khi truyền qua các kênh σ_x, σ_y và kênh khử phân cực. Nhưng đối với kênh σ_z thì ngược lại đan rối lượng tử của trạng thái $|\mathrm{W}\rangle$ chống lại giảm kết hợp mạnh hơn tính đan rối của trạng thái $|\mathrm{GHZ}\rangle$. Tuy nhiên, các tác giả chưa xét đến bản chất vật lí của các kênh, đồng thời cũng chưa xét tới kênh suy giảm kết hợp do hồi phục cũng như suy giảm kết hợp do lệch pha và hồi phục đồng thời. Trong luận án này, chúng tôi cũng xét đan rối lượng tử của các trạng thái $|\mathrm{GHZ}\rangle$ và $|\mathrm{W}\rangle$ trong kênh suy giảm kết hợp do lệch pha, hồi phục cũng như lệch pha và hồi phục đồng thời. Từ đó suy ra trạng thái đan rối lượng tử nào chống lại suy giảm kết hợp của môi trường mạnh hơn để làm cơ sở vật lí nghiên cứu viễn tải lượng tử với giao thức là các qubit-cavity hoặc spin-qubit.

Viễn tải lượng tử là một quá trình mà người gửi gọi là Alice, gửi một trạng thái lượng tử chưa xác định cho một người ở xa, gọi là Bob, qua hai kênh cổ điển và lượng tử [15,18, 19]. Nếu một cặp hạt có đan rối lượng tử lớn nhất thì tạo thành một kênh lượng tử tốt nhất để sử dụng trong viễn tải lượng tử. Tuy nhiên, trong khi trạng thái đan rối lượng tử được phân bố và lưu giữ bởi Alice và Bob thì trạng thái này có thể bị mất tính kết hợp của nó và trở thành trạng thái pha trộn do tương tác của hệ với môi trường. Bennett và các đồng tác giả [15] đã chỉ ra rằng nếu kênh càng ít đan rối lượng tử thì độ tin cậy trong viễn tải lượng tử càng giảm. Popescu [77] đã phát

hiện ra mối liên hệ giữa viễn tải lượng tử, bất đẳng thức Bell và tính không định xứ. Điều này đã chứng minh được rằng trạng thái pha trộn là trạng thái không vi phạm bất đẳng thức Bell nhưng vẫn có thể sử dụng đối với viễn tải lượng tử. Horodecki và các đồng tác giả đã chỉ ra rằng bất kì trạng thái pha trộn nào của hai spin 1/2, trạng thái vi phạm bất đẳng thức Bell-CHSH, cũng có thể dùng cho viễn tải lượng tử. Horodecki và các đồng tác giả [40] cũng đã chứng minh được mối liên hệ giữa độ tin cậy tối ưu của viễn tải lượng tử và phần đơn lớn nhất của kênh lượng tử. Trong [7], Banaszek đã phát hiện ra độ tin cậy của viễn tải lượng tử khi sử dụng các trạng thái đan rối không lớn nhất. Ishizaka [41] đã nghiên cứu kênh lượng tử có tương tác với môi trường địa phương hai mức. Mặc dù các nghiên cứu được đề cập ở trên đã phát hiện ra mối tương quan trọng yếu giữa mức độ đan rối lượng tử của kênh lượng tử trong viễn tải lượng tử, nhưng dường như ít nghiên cứu đến mối liên hệ trực tiếp giữa viễn tải lượng tử và tốc độ suy giảm kết hợp. Thật là thú vị nếu biết được bằng cách nào mà loại nhiễu và cường độ của nhiễu tác động lên các kênh lượng tử ảnh hưởng đến độ tin cậy của viễn tải lượng tử. Trong [72], Sangchul Oh và các đồng tác giả đã sử dụng hai qubit EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) để làm kênh lượng tử có tương tác với các kênh nhiễu khác nhau. Sangchul Oh đã phát hiện ra độ tin cậy của viễn tải lượng tử như hàm của thời gian mất kết hợp và góc của trạng thái không xác định đã được truyền đi. Đồng thời cũng khảo sát các tính chất của độ tin cậy trung bình phụ thuộc vào loại nhiễu tác động lên các qubit ở mỗi giai đoạn viễn tải lượng tử. Eylee Jung [45] và các đồng tác giả đã xét viễn tải lượng tử với các trạng thái $|\mathrm{GHZ}\rangle$ và $|\mathrm{W}\rangle$ tương ứng, khi các kênh nhiễu làm cho các kênh lượng tử trở thành trạng thái pha trộn. Eylee Jung đã phát hiện ra trong hai loại kênh bị nhiễu $|\mathrm{GHZ}\rangle$ và $|\mathrm{W}\rangle$, kênh nào làm mất ít thông tin lượng tử hơn còn tùy thuộc vào loại kênh nhiễu. Tuy nhiên trong [45] và [72], các tác giả đã không gắn các qubit với một hệ vật lí cụ thể nào để thực hiện nhiệm vụ đó, đồng thời các tác giả cũng bỏ qua Hamiltonian của hệ qubit. Trong luận án này, chúng tôi cũng xét viễn tải lượng tử với các trạng thái Bell, $|\mathrm{GHZ}\rangle$ và $|\mathrm{W}\rangle$, tương ứng, khi các kênh nhiễu