

Bộ xử lý Silicon 11 qubit:

Bước tiến quan trọng trong điện toán lượng tử

Đỗ Đức Dương¹, Trương Đình Dũng², Triệu Thu Hằng²

¹Trường Cao đẳng Kỹ thuật Mật mã, Bộ Tổng Tham mưu, Bộ Quốc phòng

²Trường Cao đẳng Kỹ thuật Thông tin, Binh chủng Thông tin liên lạc

“

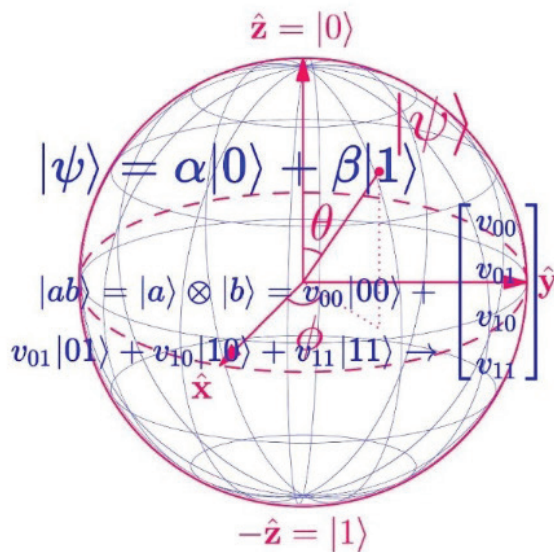
Một nhóm nhà khoa học vừa công bố trên Tạp chí *Nature* về một bộ xử lý lượng tử dựa trên nguyên tử silicon, có khả năng liên kết 11 qubit với độ chính xác vượt 99%. Thành tựu này đánh dấu bước tiến đáng kể trong việc mở rộng quy mô các hệ thống lượng tử mà vẫn duy trì hiệu suất cao. Thiết kế sử dụng silicon-28 được pha tạp phosphorus, trong đó các cụm nguyên tử được kết nối thông qua tương tác electron. Nhờ vậy, các qubit không chỉ tương tác trong từng cụm mà còn có thể trao đổi thông tin giữa các cụm với nhau.

”

Bối cảnh và thách thức trong máy tính lượng tử

Trong điện toán lượng tử, qubit là đơn vị cơ bản của thông tin lượng tử, tương tự như bit trong điện toán cổ điển nhưng có khả năng tồn tại ở nhiều trạng thái cùng lúc nhờ vào hiện tượng chồng

chập (superposition). Bên cạnh đó, liên kết lượng tử cho phép các qubit tạo thành mối liên kết mạnh mẽ, giúp các hệ thống qubit làm việc đồng thời và tương tác với nhau theo cách mà các hệ thống cổ điển không thể.



Q U B I T

Biểu diễn trạng thái qubit trên mặt cầu Bloch. Ảnh minh họa.

Hiện nay, các kiến trúc qubit như siêu dẫn (superconducting qubits), bẫy ion (ion traps) hay nguyên tử trung hòa (neutral atoms) đã được phát triển để tạo ra các hệ thống máy tính lượng tử. Tuy nhiên, những hệ thống này gặp phải những thách thức lớn, đặc biệt là về độ chính xác và khả năng mở rộng. Độ chính xác thấp khiến sai số lượng tử lớn, cản trở việc thực hiện thuật toán phức tạp và đạt ngưỡng chịu lỗi (fault-tolerant) cần thiết cho ứng dụng thực tiễn.

Kiến trúc 14|15 platform trong silicon

Bộ xử lý trong nghiên cứu sử dụng silicon-28 tinh khiết về đồng vị làm nền tảng. Trên đó, các nguyên tử phosphorus được cài đặt chính xác ở khoảng cách nanomet, tạo thành hai register spin (một có 4 nguyên tử và một có 5 nguyên tử). Mỗi register này liên kết với một electron, đóng vai trò trung gian để tạo ra tương tác lượng tử và hai electron này tương tác với nhau qua một quá trình gọi là trao đổi electron. Điều này tạo thành một mạng lưới liên kết gồm 11 qubit. Thiết kế này được đặt tên là 14|15 platform do tổng số nguyên tử và electron trong cấu trúc.

Các qubit trong hệ thống này được điều khiển bằng cách sử dụng các tần số sóng vi ba khác nhau để điều chỉnh sự cộng hưởng quay (spin resonance) của electron và hạt nhân. Điều này cho phép thực hiện các phép toán trên từng qubit và phép toán giữa hai qubit với độ chính xác rất cao. Các phép đo cho thấy, độ chính xác của các phép toán trên một qubit và giữa hai qubit đều vượt quá 99% (với hai qubit thậm chí đạt tới 99,9%), thiết lập một kỷ lục mới đối với qubit sử dụng silicon. Đồng thời, khi số lượng qubit tăng từ 4 lên 11, hiệu suất không giảm mà còn duy trì hoặc cải thiện, chứng tỏ khả năng mở rộng hệ thống này một cách ổn định.

Tương quan lượng tử và liên kết không cục bộ

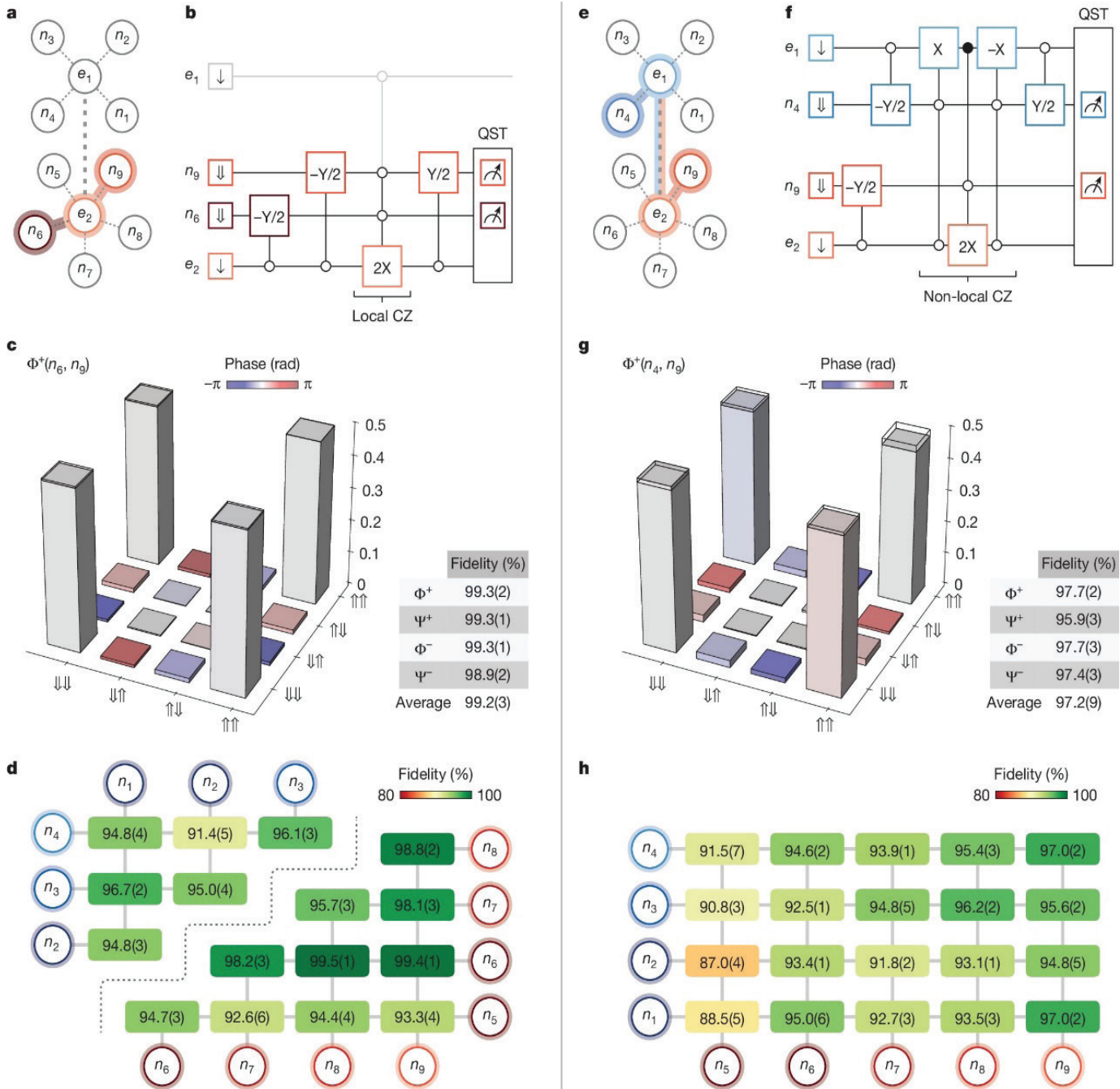
Một trong những chỉ số quan trọng để đánh giá bộ xử lý lượng tử là độ chính xác của liên kết lượng tử

(entanglement fidelity), tức mức độ liên kết giữa các qubit trong hệ thống. Trong hệ thống 11 qubit này, các cặp qubit trong cùng một register đạt độ chính xác của trạng thái Bell (Bell state fidelity) từ khoảng 91,4% đến 99,5%. Trong khi đó, các cặp qubit không nằm trong cùng một register vẫn duy trì được liên kết lượng tử lên tới 97%. Điều này cho thấy khả năng duy trì liên kết không cục bộ (non-local entanglement) rất tốt nhờ vào sự tương tác trao đổi electron (electron exchange interaction) giữa các spin register.

Trước khi mở rộng liên kết giữa hai thanh ghi, nghiên cứu đánh giá khả năng tạo trạng thái rối cục bộ trong một thanh ghi đơn. Cụ thể, hai spin hạt nhân n6 và n9 được liên kết thông qua electron e2, như minh họa trong Hình 1a. Quy trình tạo trạng thái Bell được thực hiện thông qua mạch lượng tử sử dụng cổng CZ, trình bày trong Hình 1b. Bằng cách điều chỉnh pha các xung NMR (Nuclear Magnetic Resonance pulse), hệ có thể tạo ra đầy đủ các trạng thái Bell tối đa.

Chất lượng trạng thái được đánh giá bằng phương pháp chụp cắt lớp lượng tử (QST - Quantum State Tomography), với ma trận mật độ tái tạo. Kết quả cho thấy độ trung thực trung bình đạt khoảng 99,2%, ngay cả khi chưa loại bỏ sai số SPAM (hình 1c). Ngoài ra, độ trung thực của trạng thái Φ^+ trên toàn bộ các cặp spin, dao động từ 91,4% đến 99,5%, trong đó giá trị cao nhất vượt 99%, thể hiện hiệu suất vượt trội của hệ (hình 1d).

Ở bước tiếp theo, hệ thống thực hiện liên kết giữa các thanh ghi spin để tạo trạng thái Bell phi cục bộ thông qua cơ chế trao đổi electron. Cụ thể, hai spin hạt nhân n4 và n9 được liên kết thông qua hai electron trung gian e1 và e2, như thể hiện trong hình 1e. Cổng CZ phi cục bộ được triển khai bằng cách chiếu trạng thái hạt nhân lên electron e1 và kết hợp thao tác 2X trên electron e2, với mạch lượng tử minh họa trong hình 1f.



Hình 1. Đánh giá độ chính xác của các phép toán lượng tử trên qubit trong các cấu trúc local và non-local CZ. Nguồn: TG.

Để đánh giá trạng thái thu được, phương pháp chụp cắt lớp lượng tử (QST) với đầy đủ chín phép đo được sử dụng. Kết quả tái tạo ma trận mật độ của trạng thái Bell Φ^+ được trình bày trong hình 1g, với độ trung thực trung bình đạt khoảng 97,2%, bao gồm các trạng thái Φ^+ , Φ^- , Ψ^+ và Ψ^- . Kết quả thực nghiệm được trình bày

trong hình 1h cho thấy, độ trung thực của các trạng thái đạt trong khoảng từ 87,0% đến 97,0%. So với các trạng thái Bell cục bộ, sự suy giảm độ trung thực này chủ yếu xuất phát từ thời gian thực thi dài hơn của cổng CZ phi cục bộ, làm gia tăng ảnh hưởng của nhiễu và sai số trong quá trình vận hành hệ.

Thách thức kỹ thuật và hướng phát triển

Mặc dù hệ thống 11 qubit đã đạt được những bước tiến, nhưng để mở rộng lên hàng trăm hoặc hàng nghìn qubit, cần giải quyết một số thách thức quan trọng. Đầu tiên, tối ưu hóa điều khiển xung (pulse control) để giảm sai số khi điều khiển nhiều qubit là yếu tố quan trọng. Điều này giúp duy trì độ chính xác trong các phép toán lượng tử khi số lượng qubit tăng lên. Tiếp theo, cần mở rộng các register bằng cách tăng cường liên kết hyperfine giữa electron và hạt nhân, từ đó giúp các qubit tương tác hiệu quả hơn và ổn định hơn.

Ngoài ra, ghi nhận các trạng thái lượng tử phức tạp hơn như trạng thái rối lượng tử nhiều hạt (GHZ-Greenberger-Horne-Zeilinger) và phát triển mã sửa lỗi lượng tử là cần thiết để duy trì độ chính xác và khả năng mở rộng của hệ thống. Mã sửa lỗi lượng tử sẽ giúp bảo vệ thông tin khỏi sai sót trong quá trình tính toán, một yếu tố quan trọng khi số lượng qubit tăng cao. Hướng nghiên cứu tiếp theo sẽ tập trung vào cải

thiện các kỹ thuật này để phát triển các hệ thống lượng tử có thể xử lý các bài toán thực tế phức tạp hơn.

Bộ xử lý silicon 11 qubit cho thấy khả năng đạt được độ chính xác cao và liên kết phức tạp đồng thời trong các qubit spin silicon, một yếu tố quan trọng đối với điện toán lượng tử hiện đại.

Kết quả này không chỉ thu hẹp khoảng cách giữa các nghiên cứu thử nghiệm và hệ thống thực tiễn mà còn gợi ra tiềm năng ứng dụng cho việc phát triển các hệ thống lượng tử có thể mở rộng và chịu lỗi. Điều này đặc biệt quan trọng, vì khi số lượng qubit tăng lên, việc duy trì độ chính xác và khả năng mở rộng của hệ thống sẽ quyết định khả năng ứng dụng điện toán lượng tử vào các bài toán thực tế phức tạp. Việc tạo ra các hệ thống lượng tử ổn định và có thể mở rộng sẽ là nền tảng cho các ứng dụng trong nhiều lĩnh vực, từ tối ưu hóa và mô phỏng phân tử cho đến mật mã và các giải pháp công nghệ tiên tiến khác.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. F. Arute, K. Arya, R. Babbush, et al. (2019), "Quantum supremacy using a programmable superconducting processor", *Nature*, **574**(7779), pp.505-510, DOI: 10.1038/s41586-019-1666-5.
2. S.J. Devitt, W.J. Munro, K. Nemoto (2013), "Quantum error correction for beginners", *New Journal of Physics*, **15**(6), DOI: 10.1088/1367-2630/15/6/065001.
3. M.A. Nielsen, I.L. Chuang (2010), *Quantum computation and quantum information*, Cambridge University Press.
4. Y. Li, Z. Xie (2021), "Quantum computing with qubits in silicon: A review", *Journal of Physics D: Applied Physics*, **54**(28), DOI: 10.1088/1361-6463/abf1c0.
5. J. Zhang, X. Xu, T. Yang, et al. (2020), "Silicon-based quantum computing: Recent developments and challenges", *Frontiers in Physics*, **8**, pp.1-8, DOI: 10.3389/fphy.2020.00048.