

ĐÁNH GIÁ TOÀN DIỆN VỀ ĐIỆN TOÁN LƯỢNG TỬ SIÊU DẪN: TỪ NỀN TẢNG ĐIỆN ĐỘNG LỰC HỌC LƯỢNG TỬ MẠCH ĐẾN KIẾN TRÚC CHỊU LỖI

Hoàng Anh Dũng^{1*}, Phạm Tiến Huy¹, Nguyễn Văn Mạnh¹

**Tác giả liên hệ, Email: dungha@hou.edu.vn*

Ngày tòa soạn nhận được bài báo: 02/06/2025

Ngày phản biện đánh giá: 08/09/2025

Ngày bài báo được duyệt đăng: 15/10/2025

DOI: 10.59266/houjs.2025.727

Tóm tắt: Bài báo này cung cấp một bài đánh giá toàn diện và chuyên sâu về lĩnh vực điện toán lượng tử siêu dẫn, một trong những nền tảng phân cứng hứa hẹn nhất cho việc hiện thực hóa các máy tính lượng tử quy mô lớn. Trọng tâm của bài đánh giá là kiến trúc Điện động lực học Lượng tử Mạch (circuit QED - cQED), một mô hình đã trở thành trụ cột cho việc điều khiển và đo lường các bit lượng tử (qubit) siêu dẫn. Chúng tôi sẽ phân tích các thành phần cốt lõi, bắt đầu từ qubit transmon, vốn là “con ngựa thồ” của lĩnh vực, và các biến thể tiên tiến hơn như fluxonium và gatemon, so sánh các đặc tính và sự đánh đổi của chúng. Bài báo đi sâu vào các cơ chế vật lý của việc điều khiển cổng lượng tử và đọc trạng thái, bao gồm các công nghệ tiên tiến như logic Lượng tử Từ thông Đơn (Single Flux Quantum - SFQ) và những thách thức cố hữu trong quá trình đo lường, đặc biệt là sự xuất hiện của Hỗn loạn Lượng tử Tiêu tán (Dissipative Quantum Chaos - DQC). Một phần quan trọng của bài báo được dành để phân tích các cơ chế mất kết hợp chính—các Hệ hai mức (Two-Level Systems - TLS) và sự nhiễm độc bởi chuẩn hạt (quasiparticle poisoning)—vốn là những rào cản cơ bản đối với hiệu suất của qubit. Cuối cùng, chúng tôi thảo luận về các khuôn khổ mô phỏng, các ứng dụng thuật toán trong kỷ nguyên Lượng tử Nhiều Loạn Quy mô Trung bình (Noisy Intermediate-Scale Quantum - NISQ), và vạch ra lộ trình chiến lược hướng tới các kiến trúc chịu lỗi (fault-tolerant), nơi các mã sửa lỗi lượng tử hiệu quả về phần cứng đang định hình tương lai của lĩnh vực.

Từ khóa: điện toán lượng tử siêu dẫn, điện động lực học lượng tử mạch (cQED), qubit transmon, fluxonium, mất kết hợp lượng tử, hệ hai mức (TLS), chuẩn hạt, Sửa lỗi lượng tử, tính toán lượng tử chịu lỗi (FTQC), logic lượng tử từ thông đơn (SFQ).

¹ Khoa Điện - Điện Tử, Trường Đại học Mở Hà Nội

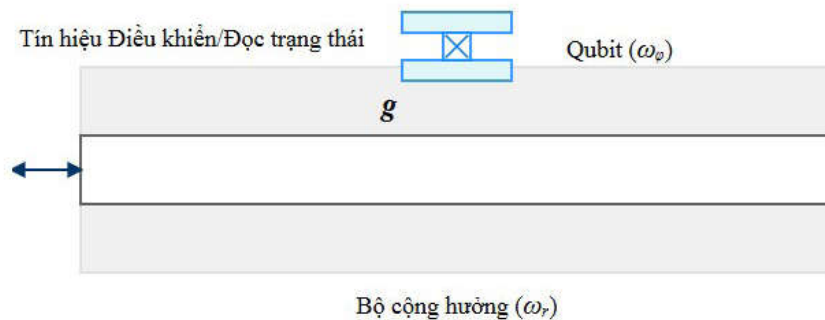
I. Đặt vấn đề

Trong cuộc đua toàn cầu nhằm xây dựng một máy tính lượng tử có khả năng giải quyết các vấn đề vượt xa tầm với của các siêu máy tính hiện đại, các mạch siêu dẫn đã nổi lên như một nền tảng hàng đầu (Oliver & Welander, 2023). Khả năng của chúng trong việc thực thi các thuật toán và mô phỏng lượng tử đã được chứng minh một cách thuyết phục trong kỷ nguyên công nghệ Lượng tử Nhiều Loạn Quy mô Trung bình (NISQ), với cột mốc quan trọng là việc chứng minh “ưu thế lượng tử” lần đầu tiên bằng bộ xử lý 53 qubit siêu dẫn vào năm 2019 (Arute & cộng sự, 2019). Sự thống trị này bắt nguồn từ một tập hợp các ưu điểm độc đáo: khả năng thiết kế cao, khả năng mở rộng quy mô dựa trên các quy trình vi chế tạo bán dẫn đã được thiết lập, và khả năng tương thích tự nhiên với các thiết bị điện tử điều khiển vi sóng thương mại (Krantz & cộng sự, 2019).

Tuy nhiên, chính đặc tính cốt lõi làm nên sức mạnh của các qubit siêu dẫn—khả năng thiết kế chúng như những “nguyên tử nhân tạo”—cũng là nguồn gốc của

những thách thức lớn nhất. Không giống như các nguyên tử tự nhiên, vốn giống hệt nhau theo định luật vật lý, các mạch lượng tử vĩ mô này lại chịu ảnh hưởng của sự không hoàn hảo trong chế tạo và sự tương tác không mong muốn với môi trường của chúng (Krantz & cộng sự, 2019). Sự linh hoạt trong thiết kế cho phép các nhà nghiên cứu điều chỉnh các tham số nhưng cũng làm cho các thiết bị này cực kỳ nhạy cảm với nhiễu. Các khiếm khuyết vật liệu ở cấp độ vi mô, được gọi là các Hệ hai mức (TLS) (McRae, 2025), và các kích thích giả bền, được gọi là các chuẩn hạt (quasiparticles - QPs) (Winkel, P. 2024), là những nguồn gây mất kết hợp (decoherence) chính.

Nền tảng cho việc điều khiển và đo lường các qubit siêu dẫn là mô hình Điện động lực học Lượng tử Mạch (cQED) (Blais & cộng sự, 2021). Kiến trúc này, được minh họa trong Hình 1, thay thế một nguyên tử tự nhiên bằng một qubit siêu dẫn và một hốc quang học bằng một bộ cộng hưởng vi sóng, cho phép đạt được chế độ ghép nối mạnh và điều khiển trạng thái lượng tử với độ trung thực cao.



Hình 1: Minh họa kiến trúc cQED nền tảng. Một qubit siêu dẫn (đóng vai trò “nguyên tử nhân tạo”) được ghép nối với một bộ cộng hưởng vi sóng (đóng vai trò “hốc lượng tử”). Sự tương tác này, được mô tả bởi Hamilton của Jaynes-Cummings, cho phép điều khiển và đọc trạng thái qubit.

Khi lĩnh vực này phát triển, bộ cộng hưởng thường hoạt động như một “bus lượng tử” chung, kết nối nhiều qubit (Krantz & cộng sự. 2019). Kiến trúc này là chìa khóa cho khả năng mở rộng, nhưng cũng là nguồn gốc của nhiễu xuyên âm (crosstalk) (Ni & cộng sự, 2025) và các lỗi tương quan trong quá trình đọc trạng thái (Oliver & Welander, 2023).

II. Cơ sở lý thuyết

2.1. Phương pháp nghiên cứu

Bài báo này được thực hiện dưới dạng một bài đánh giá tổng quan toàn diện (comprehensive literature review). Phương pháp luận được xây dựng dựa trên một quy trình có hệ thống để đảm bảo tính bao quát, khách quan và cập nhật. Quá trình này bao gồm ba giai đoạn chính:

Xây dựng Chiến lược Tìm kiếm (Search Strategy): Chúng tôi đã tiến hành tìm kiếm tài liệu trên các cơ sở dữ liệu học thuật hàng đầu, bao gồm arXiv, IEEE Xplore, Google Scholar, và các tạp chí của American Physical Society (ví dụ: Physical Review Letters, Reviews of Modern Physics). Các từ khóa tìm kiếm chính bao gồm: “superconducting qubit”, “circuit QED”, “transmon”, “fluxonium”, “quantum error correction”, “decoherence”, “Two-Level Systems”, và “quasiparticle poisoning”.

Tiêu chí Sàng lọc và Lựa chọn (Inclusion and Exclusion Criteria): Các

bài báo được lựa chọn dựa trên các tiêu chí về mức độ phù hợp, tầm ảnh hưởng và tính mới. Ưu tiên hàng đầu được dành cho các bài báo đã qua bình duyệt (peer-reviewed) được xuất bản trên các tạp chí uy tín (Nature, Science, etc.), các bài báo tổng quan nền tảng, và các bản thảo quan trọng trên arXiv thể hiện những đột phá gần đây. Các nghiên cứu về những nền tảng điện toán lượng tử khác (ví dụ: ion bẫy, quang tử) chỉ được xem xét trong bối cảnh so sánh.

Tổng hợp và Phân tích (Synthesis and Analysis): Thông tin từ các tài liệu đã chọn được tổng hợp theo phương pháp tường thuật theo chủ đề (thematic narrative synthesis). Chúng tôi đã cấu trúc bài đánh giá xung quanh các chủ đề cốt lõi: cơ sở lý thuyết của cQED, so sánh các kiến trúc qubit, phân tích các nguồn mất kết hợp, và vạch ra lộ trình hướng tới tính toán chịu lỗi. Cách tiếp cận này cho phép trình bày một cách có hệ thống các khái niệm từ cơ bản đến nâng cao, đồng thời làm nổi bật những thách thức và định hướng tương lai của lĩnh vực

2.2. Cơ sở lý thuyết

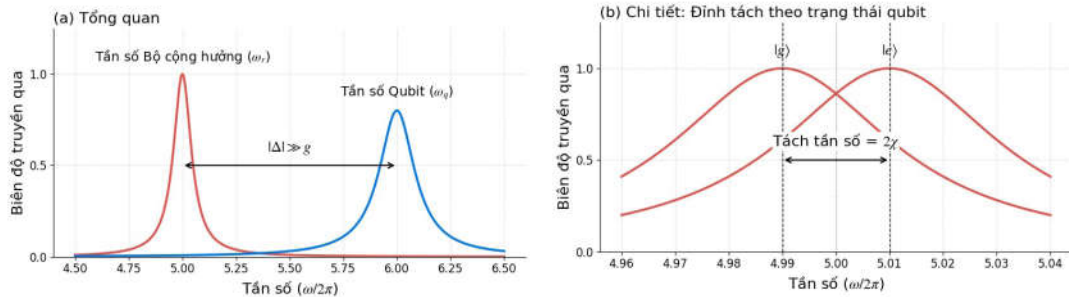
Mô tả lý thuyết cơ bản nhất về một hệ cQED được cung cấp bởi Hamilton của JaynesCummings (JC) (Asfaw & Cộng sự, 2020). Trong xấp xỉ sóng quay (RWA), Hamilton này có dạng:

$$H_{JC}/\hbar = \omega_r(a^\dagger a) + \frac{1}{2}\omega_q\sigma_z + g(\sigma_+ a + \sigma_- a^\dagger) \quad (1)$$

Ở đây, ω_r và ω_q lần lượt là tần số của bộ cộng hưởng và qubit. Các toán tử $a^\dagger$ và a là các toán tử sinh và hủy photon, trong khi σ_z, σ_+ và σ_- là các toán tử Pauli cho qubit. Tham số g biểu thị cường độ ghép nối.

Trong chế độ phân tán, khi độ lệch tần số $|\Delta| = |\omega_q - \omega_r| \gg g$, Hamilton JC có thể được xấp xỉ bởi một Hamilton hiệu dụng (Asfaw & Cộng sự, 2020):

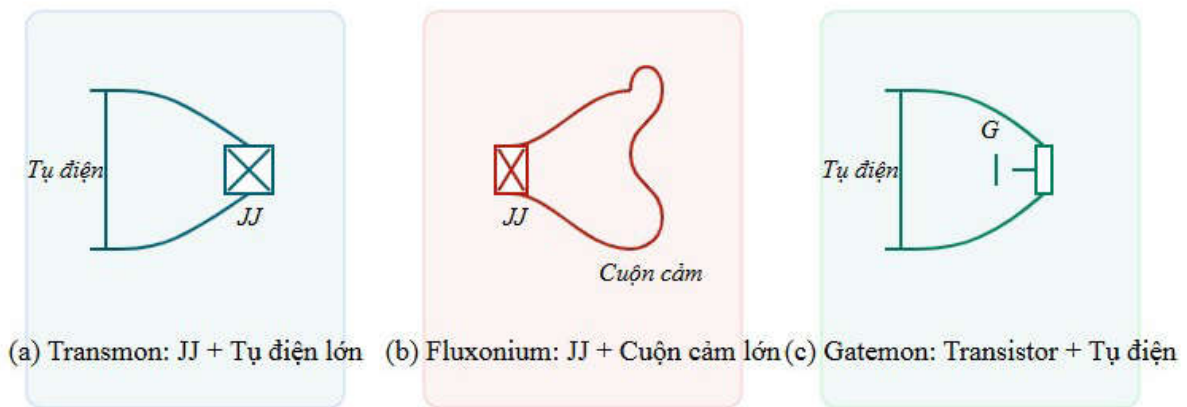
$$H_{disp}/\hbar \approx (\omega_r + \chi\sigma_z) a^\dagger a + \frac{1}{2}(\omega_q + \chi) \quad (2)$$



Hình 2: Nguyên lý của việc đọc trạng thái trong chế độ phân tán. (a) Tần số của qubit (ω_q) và bộ cộng hưởng (ω_r) được thiết kế cách xa nhau. (b) Tương tác phân tán làm cho tần số của bộ cộng hưởng dịch chuyển một lượng $\pm\chi$ phụ thuộc vào trạng thái của qubit ($|g\rangle$ hoặc $|e\rangle$).

III. Phương pháp, công nghệ và vật liệu nghiên cứu

3.1. Kiến trúc Qubit và Vật liệu



Hình 3: So sánh kiến trúc mạch của (a) Transmon, (b) Fluxonium, và (c) Gatemon. Mỗi thiết kế có những ưu và nhược điểm riêng về độ kết hợp, khả năng điều khiển và độ phức tạp chế tạo.

với dịch chuyển phân tán $\chi \approx -g^2/\Delta$. Hamilton này cho thấy tần số của bộ cộng hưởng bị dịch chuyển một lượng $\pm\chi$ tùy thuộc vào trạng thái qubit, đây là cơ sở của việc đọc trạng thái phân tán, như minh họa trong Hình 2.

Điều quan trọng là xấp xỉ này sẽ bị phá vỡ khi số lượng photon trong bộ cộng hưởng lớn, dẫn đến các hiện tượng vật lý mới như hỗn loạn lượng tử tiêu tán (Leghtas & Cộng sự, 2013).

Qubit transmon, với Hamilton $H = 4E_C n^2 - E_J \cos(\varphi)$, là “con ngựa thồ” của lĩnh vực nhờ khả năng chống nhiễu điện tích (Krantz, P & cộng sự. 2019). Các loại qubit tiên tiến khác bao gồm **fluxonium**, có độ kết hợp cao (Somoroff & Cộng sự, 2023), và **gatemon**, có thể điều chỉnh bằng điện áp cổng (Visser & Cộng sự, 2021), được thể hiện trong Hình 3.

Các nguồn gây mất kết hợp chính bao gồm các Hệ hai mức (TLS) trong các lớp oxit (McRae, 2025) và sự nhiễu loạn bởi chuẩn hạt (QP) do bức xạ hoặc sự tiêu tán từ mạch điều khiển (Winkel, 2024; Mukhanov, 2023).

3.2. Công nghệ Điều khiển và Mô phỏng

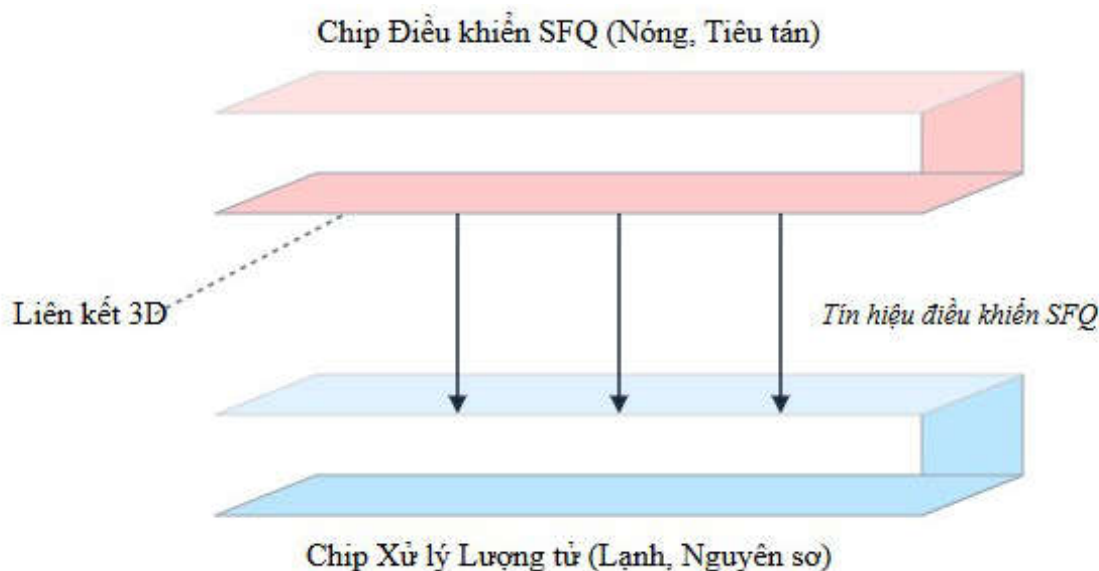
Để giải quyết «vấn đề dây nối» trong các hệ thống quy mô lớn, logic số siêu dẫn Lượng tử Từ thông Đơn (SFQ) được sử

dụng để điều khiển tại chỗ (Mukhanov, 2023). Để cách ly nhiệt và nhiễu, kiến trúc Mô-đun Đa Chip (MCM) được phát triển, trong đó chip điều khiển SFQ và chip qubit được chế tạo riêng biệt và liên kết với nhau (Hình 4). Các công cụ mô phỏng như QuTiP và các phương pháp tiên tiến như Q-TEDOPA (Mascherpa, 2020) đóng vai trò quan trọng trong việc thiết kế và tối ưu hóa.

IV. Kết quả và thảo luận

4.1. So sánh hiệu suất và các yếu tố giới hạn

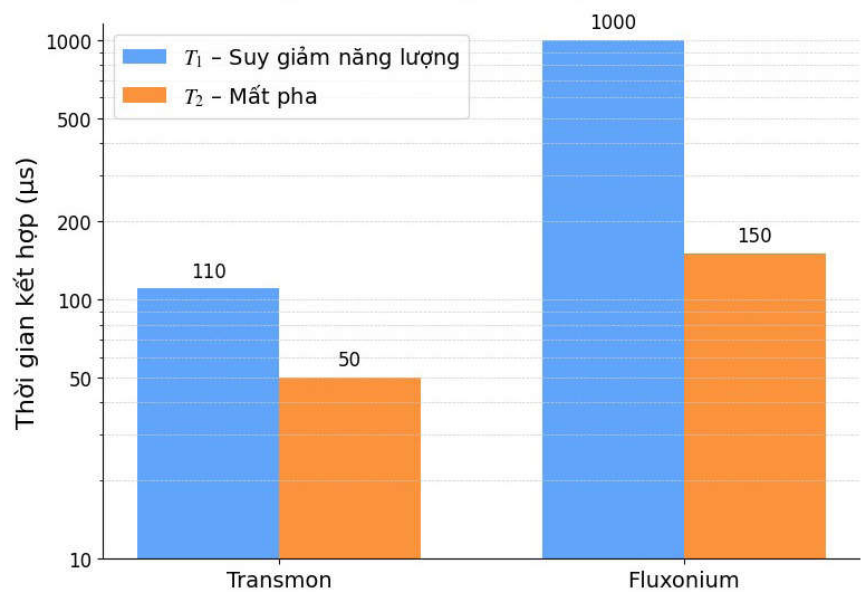
Bảng 1 tóm tắt và so sánh các đặc tính chính của các loại qubit hàng đầu, cho thấy sự đánh đổi giữa các yếu tố như thời gian kết hợp, độ phi điều hòa và độ phức tạp chế tạo. Hình 5 và 6 minh họa trực quan các so sánh này.



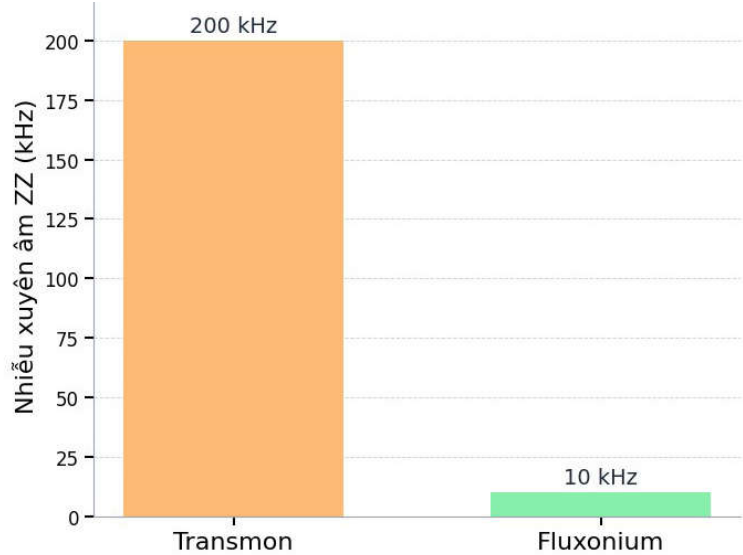
Hình 4: Sơ đồ khái niệm của một mô-đun đa chip (MCM) để tích hợp điều khiển SFQ. Kiến trúc này giúp cách ly các qubit khỏi nhiệt và các chuẩn hạt được tạo ra bởi mạch điều khiển.

Bảng 1: Phân tích So sánh các Kiến trúc Qubit Siêu dẫn Hàng đầu

Đặc tính	Transmon	Fluxonium	Gatemon
Nguyên lý cốt lõi	Qubit điện tích được rẽ	Qubit từ thông được rẽ	Transmon điều khiển bằng điện áp
Thời gian kết hợp	~10-110 μ s	> 1 ms	~200 ns (CNT)
Độ phi điều hòa	Thấp	Cao	Thấp
Phương pháp điều chỉnh	Từ thông (SQUID)	Từ thông	Điện áp cổng
Độ nhạy nhiễu chính	Nhiều từ thông	Nhiều điện tích	Nhiều 1/f



Hình 5: So sánh trực quan thời gian kết hợp của các loại qubit. Fluxonium đã chứng tỏ thời gian kết hợp vượt trội, một lợi thế đáng kể cho việc lưu trữ thông tin lượng tử.

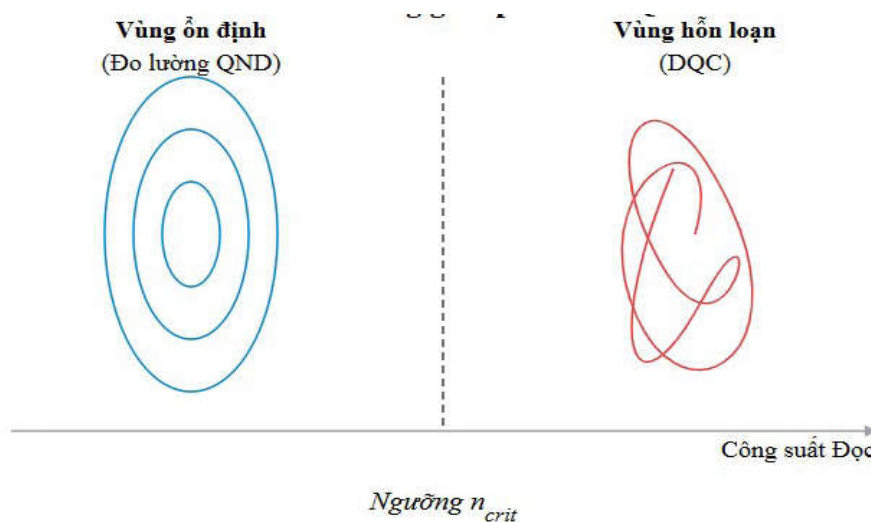


Hình 6: So sánh thực nghiệm nhiễu xuyên âm ZZ không mong muốn. Kiến trúc fluxonium cho thấy mức độ nhiễu xuyên âm ZZ thấp hơn một cách tự nhiên (Dữ liệu khái niệm dựa trên Ni & cộng sự, 2025).

4.2. Thảo luận về vật lý của việc Đọc trạng thái Qubit

Việc đọc trạng thái phân tán là một phép đo không phá hủy lượng tử (QND) trong điều kiện lý tưởng. Tuy nhiên, khi công suất đọc vượt qua một ngưỡng tới hạn $n_{crit} = \Delta^2/4g^2$, hệ thống có thể bước

vào chế độ Hỗn loạn Lượng tử Tiêu tán (DQC), dẫn đến các lỗi đo lường không thể đoán trước (Hình 7). Việc thiết kế các giao thức đọc hiệu quả đòi hỏi phải giữ cho hệ thống hoạt động trong một “hòn đảo tích phân” ổn định của không gian tham số (Santos, 2025).



Hình 7: Không gian pha của việc đọc trạng thái và sự xuất hiện của Hỗn loạn Lượng tử Tiêu tán (DQC). Ở công suất thấp, hệ thống ổn định. Ở công suất cao, hệ thống có thể trở nên hỗn loạn, làm giảm hiệu suất đo.

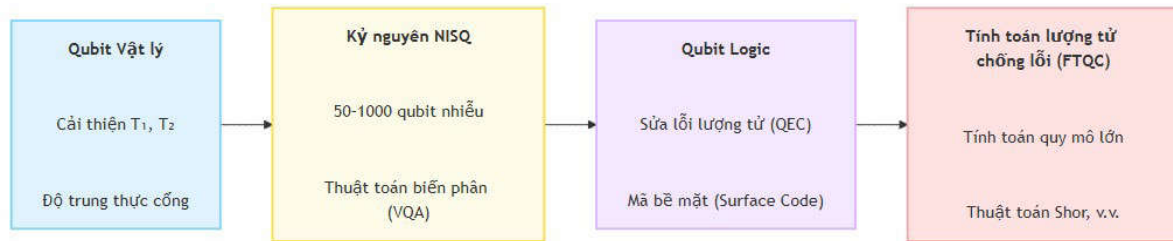
Bảng 2: Các Cơ chế Mất kết hợp Chính và Kỹ thuật Giảm thiểu

Cơ chế	Nguồn gốc Vật lý	Chiến lược Giảm thiểu Chính
TLS (Cộng hưởng)	Khiếm khuyết trong oxit vô định hình (McRae, C. R. H. 2025)	Cải thiện vật liệu, xử lý bề mặt, thiết kế qubit lớn hơn
QP (Do Photon)	Bức xạ tần số cao đi lạc, qubit như ăng-ten (Winkel, P. 2024)	Che chắn RF, lọc, tối ưu hóa thiết kế, bẫy QP

V. Kết luận

Lĩnh vực điện toán lượng tử siêu dẫn, được xây dựng trên nền tảng cQED, đã đạt được sự trưởng thành đáng kể. Tuy nhiên, những thách thức về mất kết hợp do TLS và QP, nhiễu xuyên âm, và sự phức tạp của việc đọc trạng thái vẫn là những rào cản lớn. Mục tiêu cuối cùng là xây dựng một máy tính lượng tử chịu lỗi (FTQC), có khả năng

sửa lỗi nhanh hơn tốc độ chúng xảy ra. Lộ trình này, như phác thảo trong Hình 8, đòi hỏi sự kết hợp giữa việc cải tiến phần cứng vật lý và phát triển các mã sửa lỗi lượng tử hiệu quả hơn. Thành công cuối cùng sẽ là sự tổng hợp của cả hai: sử dụng phần cứng tốt nhất để thực hiện các mã hiệu quả nhất, khẳng định vị thế của điện toán lượng tử siêu dẫn trong tương lai.



Hình 8: Lộ trình chiến lược cho điện toán lượng tử siêu dẫn, từ việc cải thiện qubit vật lý, qua kỷ nguyên NISQ, đến qubit logic sơ khai và mục tiêu cuối cùng là FTQC quy mô lớn.

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Arute, F., Arya, K., Babbush, R., Bacon, D., Bardin, J. C., Barends, R., Biswas, R., Boixo, S., Brandao, F. G. S. L., Buell, D. A., Burkett, B., Chen, Y., Chen, Z., Chiaro, B., Collins, R., Courtney, W., Dunsworth, A., Farhi, E., Foxen, B., ... Martinis, J. M. (2019). *Quantum supremacy using a programmable superconducting processor*. *Nature*, 574(7779), 505–510. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>
- [2]. Asfaw, A., Blais, A., Temme, K., Córcoles, A., & Cross, A. (2020). *Learn quantum computation using Qiskit*. Qiskit. <https://qiskit.org/textbook/>
- [3]. Blais, A., Grimsmo, A. L., Girvin, S. M., & Wallraff, A. (2021). *Circuit quantum electrodynamics*. *Reviews of Modern Physics*, 93(2), 025005. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.93.025005>
- [4]. Breuckmann, N. P., & Eberhardt, J. N. (2021). *Quantum Low-Density Parity-Check Codes*. *PRX Quantum*, 2(4), 040101. <https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.2.040101>
- [5]. de Visser, P. J., Vesterinen, V., Rodrigues, B., Tuominen, S., Torgovkin, A., Sclafani, M., Ihme, T., Lehtinen, T., Kiviranta, M., Gunnarsson, D., & Grönberg, L. (2021). *Gatemonium: A superconducting qubit with a hybrid gatemon-fluxonium structure*. *PRX Quantum*, 2(3), 030335. <https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.2.030335>
- [6]. Fowler, A. G., Mariantoni, M., Martinis, J. M., & Cleland, A. N. (2012). *Surface codes: Towards practical large-scale quantum computation*. *Physical Review A*, 86(3), 032324. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.86.032324>
- [7]. Google Quantum AI. (2023). *Suppressing quantum errors by scaling a surface code logical qubit*. *Nature*, 614(7949), 676–681. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05434-1>
- [8]. Gottesman, D., Kitaev, A., & Preskill, J. (2001). *Encoding a qubit in an oscillator*. *Physical Review A*, 64(1), 012310. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.64.012310>
- [9]. Krantz, P., Kjaergaard, M., Yan, F., Orlando, T. P., Gustavsson, S., & Oliver, W. D. (2019). *A quantum engineer's guide to superconducting qubits*. *Applied Physics Reviews*, 6(2), 021318. <https://doi.org/10.1063/1.5089550>
- [10]. Leghtas, Z., Kirchmair, G., Vlastakis, B., Schoelkopf, R. J., Devoret, M. H., & Mirrahimi, M. (2013). *Circuit quantum electrodynamics with a nonlinear resonator*. *Physical Review A*, 87(4), 042315. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.87.042315>
- [11]. Lu, Y., Chakram, S., Leung, N., Earnest, N., McKay, D. C., Koch, J., & Schuster, D. I. (2021). *Universal stabilization*

- of a parametrically-driven qubit. *Physical Review Letters*, 126(14), 140502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.140502>
- [12]. Mascherpa, F., Smirne, A., D'Arrigo, A., Fazio, R., Palma, G. M., & Maniscalco, S. (2020). *A quantum algorithm for the quantum simulation of the dynamics of open quantum systems*. *npj Quantum Information*, 6(1), 22. <https://doi.org/10.1038/s41534-020-0255-y>
- [13]. McRae, C. R. H., et al. (2025). *Mitigating material-related loss in superconducting qubits*. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2503.08767>
- [14]. Mukhanov, O., et al. (2023). *SFQ-based digital control of superconducting qubits in a multi-chip module*. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2301.05696>
- [15]. Ni, Z., Li, S., Li, L., Han, J., Mei, Z., & Ma, Y., et al. (2025). *Comparative study of crosstalk in transmon and fluxonium quantum processors*. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2504.10298>
- [16]. Oliver, W. D., & Welander, P. B. (2023). *Superconducting qubits: Current state of play*. *Annual Review of Condensed Matter Physics*, 14, 317–346. <https://doi.org/10.1146/annurev-conmatphys-031622-103323>
- [17]. Santos, I. B., et al. (2025). *Dissipative quantum chaos and its impact on dispersive readout of a transmon qubit*. *Physical Review Research*, 7(1), 013276. <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.7.013276>
- [18]. Somoroff, A., Ficheux, Q., Mencia, R. A., Xiong, H., Kuzmin, R. V., & Manucharyan, V. E. (2023). *Millisecond coherence in a superconducting qubit*. *Nature Communications*, 14(1), 3351. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38706-6>
- [19]. Winkel, P., et al. (2024). *Direct absorption of high-energy photons in a superconducting qubit*. *Physical Review Letters*, 132(1), 017001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.017001>

A COMPREHENSIVE REVIEW OF SUPERCONDUCTING QUANTUM COMPUTING: FROM THE FOUNDATIONS OF CIRCUIT QUANTUM ELECTRODYNAMICS TO FAULT-TOLERANT ARCHITECTURES

Hoang Anh Dung², Pham Tien Huy², Nguyen Van Manh²

Abstract: *This manuscript presents a comprehensive and in-depth review of superconducting quantum computing, widely regarded as one of the most promising hardware modalities for the realization of large-scale quantum computers. Central to this exposition is the Circuit Quantum Electrodynamics (cQED) architecture, a foundational paradigm that has become paramount for the control and measurement of superconducting quantum bits (qubits). The analysis commences with the core components, beginning with the transmon qubit—the de facto workhorse of the field—and its more advanced variants such as the fluxonium and gatemon. A comparative analysis of their respective characteristics and inherent trade-offs is provided. The review then delves into the fundamental physical mechanisms governing quantum gate control and state readout. This includes an examination of cutting-edge technologies, notably Single Flux Quantum (SFQ) logic, and a critical assessment of the intrinsic challenges in the measurement process, particularly the emergence of Dissipative Quantum Chaos (DQC). A significant portion of the paper is dedicated to scrutinizing the principal decoherence mechanisms—namely, interactions with Two-Level Systems (TLS) and quasiparticle poisoning—which constitute fundamental impediments to qubit performance. Finally, the discussion extends to simulation frameworks and algorithmic applications within the Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) era. We conclude by outlining a strategic roadmap toward fault-tolerant architectures, where hardware-efficient quantum error correction codes are poised to shape the future trajectory of the field.*

Keywords: *superconducting quantum computing, circuit quantum electrodynamics (cQED), transmon qubit, fluxonium, quantum decoherence, two-level systems (TLS), quasiparticle poisoning, quantum error correction, fault-tolerant quantum computing (FTQC), single flux quantum (SFQ) logic*

² Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Hanoi Open University