

PHÂN TÍCH MÁY TÍNH LƯỢNG TỬ CÔNG NGHỆ QUANG: TỪ NGUYÊN LÝ NỀN TẢNG ĐẾN LỘ TRÌNH CÔNG NGHIỆP

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.2025.722

Tóm tắt: Điện toán lượng tử quang tử (PQC) đang nổi lên như một trong những nền tảng hứa hẹn nhất để hiện thực hóa máy tính lượng tử phổ quát có khả năng chịu lỗi. Bài báo này cung cấp một phân tích chuyên sâu về PQC, tập trung vào sự đánh đổi cốt lõi: lợi thế về thời gian kết hợp dài và khả năng vận hành ở nhiệt độ phòng của qubit photon, đối nghịch với thách thức cố hữu đến từ tương tác yếu, gây khó khăn cho việc hiện thực cổng hai-qubit và kiểm soát suy hao. Chúng tôi khảo sát các phương pháp mã hóa thông tin lượng tử vào photon, bao gồm cả biến rời rạc (DV) và biến liên tục (CV), đồng thời phân tích sự tiến hóa của các mô hình tính toán từ LOQC đến các kiến trúc tiên tiến như MBQC và FBQC. Các chiến lược sửa lỗi lượng tử chuyên biệt, đặc biệt là mã GKP cho hệ CV, cũng được xem xét như một nhân tố then chốt cho tính toán chịu lỗi. Bài báo cũng đưa ra một góc nhìn tổng quan về bối cảnh công nghiệp, đối chiếu hai hướng tiếp cận chiến lược của Xanadu (CV) và PsiQuantum (DV), và thảo luận các ứng dụng tiêu biểu như Lấy mẫu Boson. Chúng tôi kết luận rằng, vị thế của PQC trong tương lai sẽ được quyết định bởi cuộc chạy đua giữa tốc độ đổi mới trong kiến trúc và sản xuất của quang tử so với khả năng giải quyết các bài toán về quy mô và độ kết hợp của các nền tảng dựa trên vật chất.

Từ khóa: điện toán lượng tử, quang tử lượng tử, biến rời rạc (DV), biến liên tục (CV), tính toán lượng tử dựa trên phép đo (MBQC), lấy mẫu boson, sửa lỗi lượng tử

I. Giới thiệu

Lĩnh vực điện toán lượng tử đang ở một giai đoạn phát triển then chốt. Sau những thành công ban đầu của các hệ thống dựa trên vật chất trong kỷ

nguyên NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) (Preskill, 2018), điển hình là qubit siêu dẫn và ion bẫy (Arute & cộng sự, 2019), cộng đồng khoa học đang hướng tới mục tiêu xây dựng các máy

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

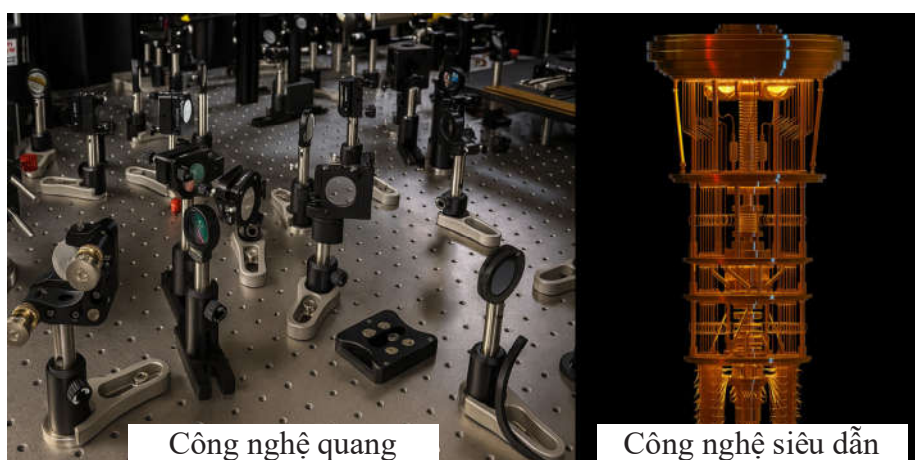
tính lượng tử quy mô lớn và chịu lỗi. Trong bối cảnh này, điện toán lượng tử quang tử (Photonic Quantum Computing - PQC) đã khẳng định vị thế là một hướng đi chiến lược, mang trong mình những tiềm năng và thách thức riêng biệt (Wang & cộng sự, 2020).

Không giống các qubit vật chất vốn tĩnh tại và nhạy cảm với môi trường nhiễu, đòi hỏi điều kiện vận hành khắc nghiệt như nhiệt độ siêu lạnh (Kjaergaard & cộng

sự, 2020), PQC sử dụng photon các “qubit bay” làm đơn vị xử lý thông tin. Đặc tính vật lý của photon mang lại hai lợi thế nội tại: thời gian kết hợp (coherence time) rất dài do tương tác yếu với môi trường, và khả năng vận hành bộ xử lý quang tử ở nhiệt độ phòng (Hình 1). Tuy nhiên, chính sự tương tác yếu này lại là trở ngại lớn nhất, khiến việc tạo ra các cổng lượng tử hai-qubit---một yêu cầu cơ bản cho tính toán phổ quát---trở nên cực kỳ khó khăn (O’Brien, 2007).



Hình 1: So sánh mô hình điện toán: QC dựa trên vật chất (trái) yêu cầu làm lạnh sâu, trong khi QC quang tử (phải) có thể hoạt động ở nhiệt độ phòng trên chip tích hợp (PIC).



Hình 2: Minh họa thực tế về sự khác biệt nền tảng giữa kiến trúc lượng tử siêu dẫn và quang tử.

Mâu thuẫn nền tảng này đã định hình toàn bộ lĩnh vực PQC, dẫn đến sự ra đời của hai phương pháp luận chính: mã hóa Biến Rời rạc (Discrete Variable - DV) và Biến Liên tục (Continuous Variable - CV) (Weedbrook & cộng sự, 2012). Sự lựa chọn giữa hai phương pháp này không chỉ ảnh hưởng đến kiến trúc phần cứng mà còn định hình chiến lược thương mại của các công ty tiên phong như PsiQuantum (DV) và Xanadu (CV) (Bourassa & cộng sự, 2021). Bài báo này sẽ đi sâu phân tích các khía cạnh của PQC, từ nguyên lý cơ bản đến các lộ trình phát triển công nghiệp, nhằm cung cấp một cái nhìn toàn cảnh và cập nhật.

Để làm rõ hơn sự khác biệt mang tính nền tảng này, Hình 2 dưới đây cung cấp một minh họa thực tế về hai hệ thống. Một bên là kiến trúc dựa trên vật chất đòi hỏi một cơ sở hạ tầng làm lạnh công kênh và khắc nghiệt để bảo vệ các qubit tĩnh tại. Bên còn lại là kiến trúc quang tử, nơi việc tính toán được thực hiện bằng cách điều khiển chính xác đường đi của các "qubit bay" (photon) thông qua một mạng lưới các linh kiện quang học trên bàn thí nghiệm ở nhiệt độ phòng. **Hình 2(a)** trực quan hóa "điều kiện vận hành khắc nghiệt như nhiệt độ siêu lạnh" được đề cập cho các qubit siêu dẫn. Cấu trúc "đèn chùm" này chính là hệ thống đưa con chip lượng tử xuống nhiệt độ mili-Kelvin. **Hình 2(b)** cho thấy một phần của bộ xử lý quang tử, nơi thông tin được mã hóa và xử lý trên các photon. Nó thể hiện bản chất của PQC là sử dụng các thành phần quang học tuyến tính như gương, bộ tách chùm để thực hiện các phép toán, củng cố cho luận điểm về khả năng vận hành ở nhiệt độ phòng.

II. Nguyên lý cơ bản của quang tử lượng tử

2.1. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu này được thực hiện thông qua một phương pháp luận đa chiều nhằm đánh giá toàn diện lộ trình phát triển của Điện toán Lượng tử Quang tử (PQC). Phương pháp tiếp cận kết hợp ba trụ cột chính:

Tổng hợp Tài liệu Hệ thống (Systematic Literature Review): Một quy trình tổng hợp tài liệu có hệ thống được triển khai trên các cơ sở dữ liệu học thuật (IEEE Xplore, Web of Science, Scopus, arXiv) sử dụng các từ khóa trọng tâm (e.g., "photonic quantum computing", "GKP code", "Boson Sampling"). Các tài liệu được lựa chọn dựa trên tính mới, mức độ ảnh hưởng và sự liên quan, sau đó được phân tích để trích xuất các thông số kỹ thuật then chốt (hiệu suất nguồn photon, tỷ lệ lỗi cổng), xu hướng kiến trúc (LOQC, MBQC, FBQC), và chiến lược sửa lỗi (Surface code, GKP code).

Phân tích Hệ thống và Đánh đổi (Systems & Trade-off Analysis): Các nguyên lý lý thuyết được chuyển thành đánh giá định lượng thông qua mô hình hóa hiệu năng. Chúng tôi phân tích các yêu cầu để đạt ngưỡng sửa lỗi lượng tử (e.g., mức nén cho mã GKP trong hệ CV, tỷ lệ thành công fusion trong hệ DV) và định lượng sự đánh đổi cốt lõi giữa thời gian kết hợp dài và tương tác yếu bằng cách so sánh yêu cầu tài nguyên giữa các kiến trúc.

Phân tích Đối chiếu Công nghiệp (Industrial Benchmarking): Nhận thấy tính thực tiễn của PQC, chúng tôi tiến

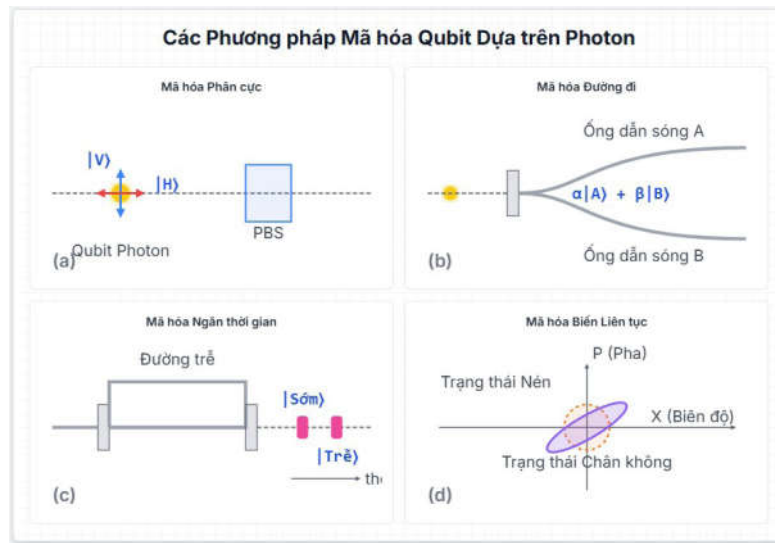
hành phân tích đối chiếu các lộ trình của Xanadu (CV, mô-đun) và PsiQuantum (DV, nguyên khối). Phân tích này dựa trên các công bố chính thức và bằng sáng chế, tập trung vào các chỉ số khả thi kỹ thuật-sản xuất (khả năng tích hợp, năng suất) và đánh giá hệ sinh thái hỗ trợ (chuỗi cung ứng, đối tác chiến lược).

Tính khách quan và độ tin cậy được đảm bảo thông qua xác thực đa nguồn, ưu

tiên dữ liệu định lượng từ các ấn phẩm được bình duyệt, và xác định rõ phạm vi cùng giới hạn của nghiên cứu

2.2. Mã hóa Qubit trên Photon

Một qubit, đơn vị cơ bản của thông tin lượng tử, là một trạng thái chồng chập tuyến tính $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ với $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. Trong PQC, hai trạng thái cơ sở $|0\rangle$ và $|1\rangle$ được mã hóa vào các bậc tự do của một photon (Hình 3).



Hình 3: Các phương pháp mã hóa qubit quang tử: (a) Phân cực, (b) Đường đi, (c) Ngăn thời gian, và (d) Biến liên tục sử dụng trạng thái nén trong không gian pha.

2.2.1. Mã hóa Biến Rời rạc (DV-Discrete Variable)

Hướng tiếp cận DV ánh xạ các trạng thái qubit vào những thuộc tính trực giao, có thể phân biệt được của photon. Các phương pháp phổ biến bao gồm mã hóa vào **phân cực** (ví dụ, ngang $|H\rangle$ và dọc $|V\rangle$), đường đi không gian (photon đi qua ống dẫn sóng A hoặc B) (Politi & cộng sự, 2008), hoặc ngăn thời gian (photon đến sớm hoặc muộn) (Slussarenko & Pryde, 2019).

2.2.2. Mã hóa Biến Liên tục (CV-Continuous Variable)

Ngược lại, hướng CV mã hóa thông tin vào các biến có giá trị liên tục của trường

điện từ, cụ thể là các toán tử tứ phương (quadrature) $\hat{x}$ và $\hat{p}$. Các toán tử này, tương tự vị trí và động lượng, được định nghĩa thông qua toán tử sinh $\hat{a}^\dagger$ và hủy $\hat{a}$:

$$\hat{x} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{a} + \hat{a}^\dagger), \quad \hat{p} = \frac{i}{\sqrt{2}}(\hat{a}^\dagger - \hat{a}) \quad (1)$$

Chúng tuân theo hệ thức giao hoán $[\hat{x}, \hat{p}] = i$ và nguyên lý bất định Heisenberg. Tài nguyên chính của CV-PQC là các **trạng thái nén** (squeezed states), trong đó phương sai của một trong hai tứ phương được giảm xuống thấp hơn mức nhiễu của trạng thái chân không (Andersen & cộng sự, 2016).

2.3. Sự Tiến hóa của các Mô hình Tính toán

Để vượt qua thách thức về tương tác yếu, các mô hình tính toán độc đáo đã được phát triển, thể hiện một sự tiến hóa về mặt kiến trúc (Hình 4).



Hình 4: Sự tiến hóa của các kiến trúc tính toán PQC: từ LOQC, qua MBQC, đến FBQC.

• **Quang học Lượng tử Tuyến tính (LOQC- Linear Optical Quantum Computing):** Giao thức KLM tiên phong đã chứng minh rằng tính toán phổ quát là khả thi chỉ với các thành phần quang học tuyến tính (bộ tách chùm, dịch pha), phép đo và nguồn đơn photon. Tuy nhiên, mô hình này đòi hỏi một lượng tài nguyên cực lớn, không khả thi trong thực tế (Knill & cộng sự, 2001).

• **Tính toán Dựa trên Phép đo (MBQC-Measurement-Based Quantum Computing):** Mô hình này tách biệt hai giai đoạn: (1) chuẩn bị một trạng thái tài nguyên vướng víu cao độ gọi là trạng thái cụm (cluster state), và (2) thực hiện tính

toán thông qua một chuỗi các phép đo thích ứng trên từng qubit riêng lẻ. Điều này giúp chuyển gánh nặng từ việc thực hiện cổng hai-qubit sang việc tạo ra trạng thái cụm (Raussendorf & Briegel, 2001).

• **Tính toán Dựa trên Hợp nhất (FBQC-Fusion-Based Quantum Computing):** Được phát triển bởi PsiQuantum, kiến trúc này xây dựng các trạng thái vướng víu lớn bằng cách liên tục tạo ra và "hợp nhất" (fusion) các trạng thái tài nguyên nhỏ. Cách tiếp cận này được thiết kế để có khả năng chịu suy hao (loss-tolerant) một cách tự nhiên (Bartolucci & cộng sự, 2023).

Bảng 2. So sánh các mô hình kiến trúc tính toán lượng tử quang tử

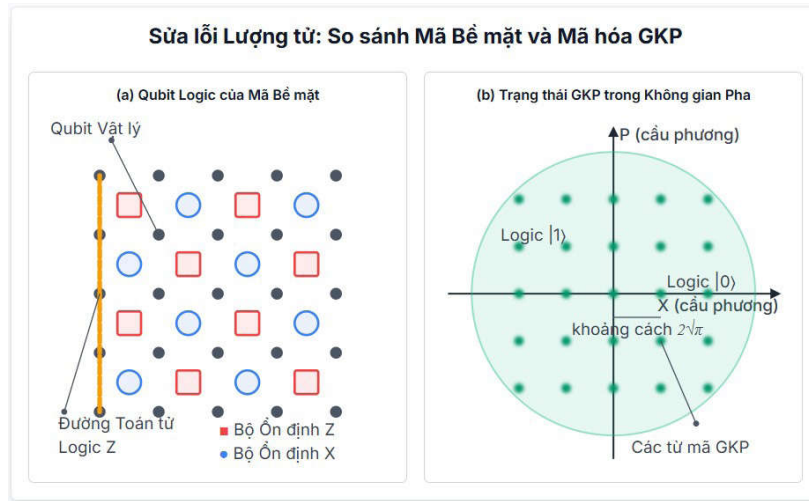
Giai đoạn	Đặc điểm chính	Ưu điểm	Hạn chế
LOQC	Sử dụng quang học tuyến tính	Lý thuyết rõ ràng	Đòi hỏi tài nguyên lớn
MBQC	Tách biệt chuẩn bị trạng thái và phép đo	Giảm yêu cầu cổng hai-qubit	Phức tạp trong chuẩn bị trạng thái
FBQC	Hợp nhất các trạng thái nhỏ	Chịu lỗi cao	Yêu cầu công nghệ sản xuất tiên tiến

2.4. Sửa lỗi Lượng tử cho Hệ Quang tử

Tính toán chịu lỗi (Fault-Tolerant Quantum Computation - FTQC) là mục tiêu cuối cùng, đòi hỏi các mã sửa lỗi lượng tử (QEC) có khả năng chống lại các

nguồn nhiễu chính trong PQC là suy hao photon và sai số vận hành.

- **Mã bề mặt (Surface Code):** Là một mã QEC topo, rất phù hợp với kiến trúc 2D của các hệ thống dựa trên MBQC. Nó có ngưỡng chịu lỗi cao nhưng yêu cầu số lượng qubit vật lý lớn (Fowler & cộng sự, 2012).



Hình 5: Các chiến lược QEC: (a) Cấu trúc qubit logic của mã bề mặt. (b) Biểu diễn không gian pha của trạng thái GKP, với các “răng lược” là các từ mã.

- **Mã GKP (Gottesman-Kitaev-Preskill):** Là một mã QEC được thiết kế riêng cho hệ CV. Nó mã hóa một qubit logic vào một “lược” các trạng thái nén trong không gian pha (Hình 5b), giúp chống lại các lỗi dịch chuyển nhỏ (Gottesman & cộng sự, 2001). Trạng thái logic $|0\rangle_L$ của mã GKP có dạng:

$$|0\rangle^1 \propto \sum_{\chi=-\infty}^{+\infty} |\chi = 2n\sqrt{\pi}\rangle \quad (2)$$

III. Nền tảng phần cứng và kiến trúc hệ thống

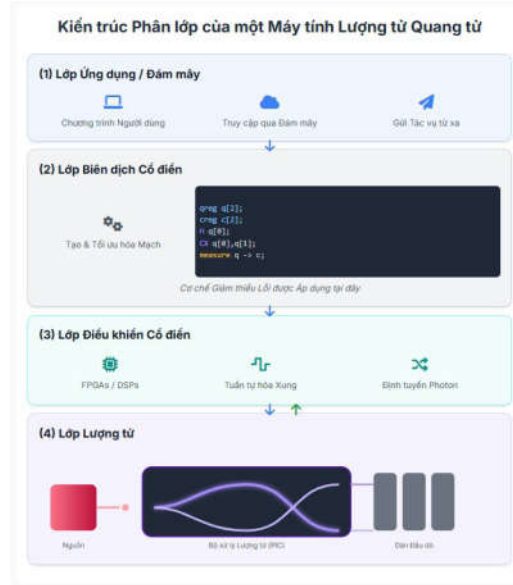
Một máy tính PQC hoàn chỉnh là một hệ thống đa lớp phức tạp (Hình 5), tích hợp lớp vật lý lượng tử với các tầng điều khiển, biên dịch và ứng dụng cổ điển.

Mặc dù có nhiều ưu điểm, PQC vẫn phải đối mặt với những thách thức kỹ

thuật đáng kể. Suy hao photon trong các waveguide tích hợp là một vấn đề then chốt, làm giảm hiệu quả tính toán. Để giảm thiểu vấn đề này, các nghiên cứu gần đây tập trung vào phát triển vật liệu quang học mới (như silicon nitride) có độ suy hao thấp. Bên cạnh đó, việc thực hiện cổng hai-qubit—vốn đòi hỏi tương tác mạnh—vẫn là một trở ngại lớn. Các phương pháp như sử dụng hiệu ứng Kerr phi tuyến trong microresonator hoặc kết hợp với các hệ vật chất (atomic ensembles) đang được khám phá để tạo ra các cổng lượng tử hiệu quả hơn.

3.1. Các Thành phần Phần cứng Cốt lõi

Hiệu năng của toàn hệ thống phụ thuộc vào chất lượng của các linh kiện quang tử (Hình 6).



Hình 6: Kiến trúc phân lớp của một hệ thống PQC.

• **Nguồn đơn photon:** Yêu cầu then chốt là tạo ra các photon theo yêu cầu, có độ tinh khiết cao (hàm tự tương quan bậc hai $g^{(2)}(0) \rightarrow 0$) và không thể phân biệt. Các nguồn có thể là **xác suất**, dựa trên hiệu ứng Chuyển đổi Tự phát Tham số (SPDC), hoặc **tất định**, thường dùng chấm lượng tử (Quantum Dots - QDs) (Senellart & cộng sự, 2017).

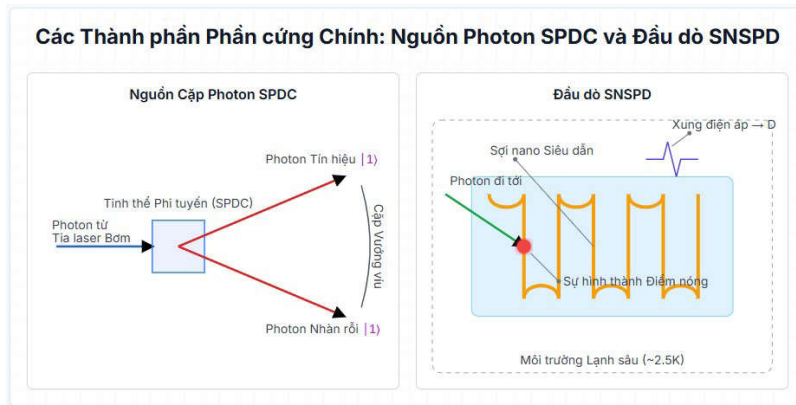
$$g^{(2)}(0) = \frac{\langle \hat{a}^\dagger(0)\hat{a}^\dagger(0)\hat{a}(0)\hat{a}(0) \rangle}{\langle \hat{a}^\dagger(0)\hat{a}(0) \rangle^2} \rightarrow 0 \quad (3)$$

Bộ xử lý quang tử tích hợp (PIC): Đây là trái tim của hệ thống, bao gồm một

mạng lưới các giao thoa kế được chế tạo từ bộ tách chùm (beam splitter) và bộ dịch pha (phase shifter). Ma trận toán tử của chúng là:

$$U_{BS} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix}, \quad U_{PS} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\phi} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Bộ dò photon: Hệ DV yêu cầu các bộ dò có khả năng đếm từng photon riêng lẻ với hiệu suất cao, như Bộ dò Nano dây Siêu dẫn (SNSPDs) (Natarajan & cộng sự, 2012). Hệ CV sử dụng kỹ thuật đo homodyne để thu được thông tin về các tứ phương của trường sáng.



Hình 7: Các thành phần phần cứng chính:
(Trái) Nguồn cặp photon SPDC. (Phải) Nguyên lý hoạt động của bộ dò SNSPD.

3.2. Phân tích các Hướng tiếp cận Công nghiệp

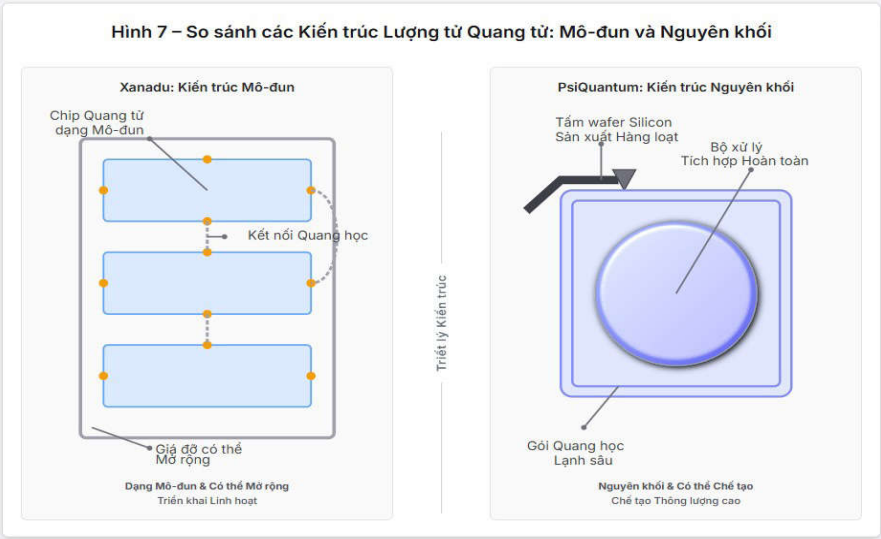
Cuộc đua PQC hiện đang được dẫn dắt bởi hai chiến lược công nghệ-sản xuất đối lập (Hình 7, Bảng 1).

Bảng 1: Đối chiếu các Kiến trúc Quang tử Hàng đầu

Đặc điểm	Xanadu	PsiQuantum
Loại Qubit	Biến Liên tục (CV)	Biến Rời rạc (DV)
Mô hình Tính toán	MBQC (trên GKP)	FBQC
Phương pháp sửa lỗi	Mã GKP	Mã Tô pô (biến thể)
Cơ chế	Chống lỗi dịch chuyển nhỏ	Chống lỗi mất mát Photon
Phương pháp Sản xuất	Lắp ráp mô-đun	Hợp tác nhà máy đúc

• **Xanadu:** Theo đuổi lộ trình CV, tập trung vào việc tạo ra các trạng thái GKP chất lượng cao. Kiến trúc của họ mang tính mô-đun, cho phép kết nối nhiều chip nhỏ lại với nhau.

• **PsiQuantum:** Chọn lộ trình DV, với kiến trúc FBQC nguyên khối. Chiến lược của họ là “ưu tiên sản xuất”, hợp tác sâu với các nhà máy đúc bán dẫn hàng đầu để chế tạo các tấm wafer 300mm, hướng tới sản xuất hàng triệu qubit.



Hình 8: So sánh triết lý kiến trúc công nghiệp: Mô-đun (Xanadu) và Nguyên khối (PsiQuantum).

IV. Ứng dụng và thảo luận

4.1. Minh chứng Ưu thế Lượng tử và Ứng dụng

Lấy mẫu Boson (Boson Sampling) là một bài toán được cho là khó đối với máy tính cổ điển nhưng lại phù hợp một cách tự nhiên với các bộ xử lý quang tử tuyến tính. Đây là lĩnh vực mà PQC đã nhiều lần chứng minh được «ưu thế lượng

tử» (Zhong & cộng sự, 2020; Madsen & cộng sự, 2022). Về cơ bản, thí nghiệm này bao gồm việc đưa các photon đơn lẻ vào một giao thoa kế phức tạp và lấy mẫu phân bố xác suất ở đầu ra (Hình 9). Ngoài ra, PQC còn có tiềm năng lớn trong **Học máy Lượng tử (QML)** (Biamonte & cộng sự, 2017), **Mạng Lượng tử** (Kimble, 2008), và **Mô phỏng các hệ vật chất lượng tử**.



Hình 9: Sơ đồ khái niệm của một thí nghiệm Lấy mẫu Boson.

4.2. Hệ sinh thái và Tính bền vững

Sự thành công của PQC không chỉ nằm ở công nghệ mà còn phụ thuộc vào một hệ sinh thái hỗ trợ, bao gồm chuỗi cung ứng cho các linh kiện chuyên dụng và nguồn nhân lực có kỹ năng liên ngành. Một điểm đáng chú ý là khía cạnh bền vững: việc bộ xử lý quang tử có thể hoạt động ở nhiệt độ phòng mang lại lợi thế tiềm năng về mức tiêu thụ năng lượng so với các nền tảng dựa trên công nghệ siêu lạnh, mở ra khái niệm về “lợi thế môi trường lượng tử”.

V. Kết luận

Điện toán lượng tử quang tử được định hình bởi sự đối lập giữa ưu thế về độ kết hợp và thách thức về tương tác. Quá trình tiến hóa từ các mô hình lý thuyết như LOQC đến các kiến trúc thực tiễn như MBQC và FBQC cho thấy sự trưởng thành của lĩnh vực này trong việc tìm ra các giải pháp kỹ thuật khéo léo. Con đường phía trước có thể được hình dung qua ba giai đoạn: (1) tiếp tục tối ưu hóa các bộ xử lý trong kỷ nguyên NISQ, (2) hiện thực hóa các qubit logic đầu tiên có

khả năng sửa lỗi, và cuối cùng là (3) xây dựng các máy tính chịu lỗi quy mô lớn. Với tốc độ phát triển hiện tại và những lợi thế cơ bản không thể phủ nhận, PQC đã chứng tỏ là một lộ trình công nghiệp khả thi và đầy sức cạnh tranh, hứa hẹn sẽ đóng vai trò trung tâm trong cuộc cách mạng lượng tử sắp tới.

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Andersen, U. L., Gehring, T., Marquardt, C., & Leuchs, G. (2016). 30 years of squeezed light generation. *Physica Scripta*, *91*(5), 053001.
- [2]. Arute, F., Arya, K., Babbush, R., Bacon, D., Bardin, J. C., Barends, R., ... & Martinis, J. M. (2019). Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, *574*(7779), 505–510.
- [3]. Bartolucci, S., Birchall, P., Bombin, H., Cable, H., Dawson, C., Gimeno-Segovia, M., ... & Shadbolt, P. (2023). Fusion-based quantum computation. *Nature Communications*, *14*(1), 954.
- [4]. Biamonte, J., Wittek, P., Pancotti, N., Rebentrost, P., Wiebe, N., & Lloyd, S. (2017). Quantum machine learning. *Nature*, *549*(7671), 195–202.

- [5]. Bourassa, J. E., Bejanin, J. H., Bonsma-Fisher, K., Bouchard, F., Degenais, G., Deshmukh, C., ... & Sanders, B. C. (2021). Blueprint for a scalable photonic fault-tolerant quantum computer. *Quantum*, *5*, 392.
- [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.
- [7]. Gottesman, D., Kitaev, A., & Preskill, J. (2001). Encoding a qubit in an oscillator. *Physical Review A*, *64*(1), 012310.
- [8]. Kimble, H. J. (2008). The quantum internet. *Nature*, *453*(7198), 1023–1030.
- [9]. Kjaergaard, M., Schwartz, M. E., Braumüller, J., Krantz, P., Wang, J. I.-J., Gustavsson, S., & Oliver, W. D. (2020). Superconducting qubits: Current state of play. *Annual Review of Condensed Matter Physics*, *11*, 369–395.
- [10]. Knill, E., Laflamme, R., & Milburn, G. J. (2001). A scheme for efficient quantum computation with linear optics. *Nature*, *409*(6816), 46–52.
- [11]. Madsen, L. S., Laudенbach, F., Askarani, M. F., Rortais, F., Vincent, T., Bulmer, J. F., ... & Lita, A. E. (2022). Quantum computational advantage with a programmable photonic processor. *Nature*, *606*(7912), 75–81.
- [12]. Natarajan, C. M., Tanner, M. G., & Hadfield, R. H. (2012). Superconducting nanowire single-photon detectors: Physics and applications. *Superconductor Science and Technology*, *25*(6), 063001.
- [13]. Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). *Quantum computation and quantum information: 10th anniversary edition*. Cambridge University Press.
- [14]. O’Brien, J. L. (2007). Optical quantum computing. *Science*, *318*(5856), 1567–1570.
- [15]. Politi, A., Cryan, M. J., Rarity, J. G., Yu, S., & O’Brien, J. L. (2008). Silica-on-silicon waveguide quantum circuits. *Science*, *320*(5876), 646–649.
- [16]. Preskill, J. (2018). Quantum computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, *2*, 79.
- [17]. Raussendorf, R., & Briegel, H. J. (2001). A one-way quantum computer. *Physical Review Letters*, *86*(22), 5188–5191.
- [18]. Rudolph, T. (2017). Why I am optimistic about the silicon-photonics route to quantum computing. *APL Photonics*, *2*(3), 030901.
- [19]. Senellart, P., Solomon, G., & White, A. (2017). High-performance semiconductor quantum-dot single-photon sources. *Nature Nanotechnology*, *12*(11), 1026–1039.
- [20]. Slussarenko, S., & Pryde, G. J. (2019). Photonic quantum information processing: A review. *Applied Physics Reviews*, *6*(4), 041303.
- [21]. Wang, J., Sciarrino, F., Laing, A., & Thompson, M. G. (2020). Integrated photonic quantum technologies. *Nature Photonics*, *14*(5), 273–284.
- [22]. Weedbrook, C., Pirandola, S., García-Patrón, R., Cerf, N. J., Ralph, T. C., Shapiro, J. H., & Lloyd, S. (2012). Gaussian quantum information. *Reviews of Modern Physics*, *84*(2), 621–669.
- [23]. Zhong, H.-S., Wang, H., Deng, Y.-H., Chen, M.-C., Peng, L.-C., Luo, Y.-H., ... & Pan, J.-W. (2020). Quantum computational advantage using photons. *Science*, *370*(6523), 1460–1463

ANALYSIS OF PHOTONIC QUANTUM COMPUTING: FROM FUNDAMENTAL PRINCIPLES TO A VIABLE INDUSTRIAL ROADMAP

Hoang Anh Dung², Pham Tien Huy², Nguyen Van Manh²

Abstract: Photonic quantum computing (PQC) is emerging as one of the most promising platforms for realizing universal, fault-tolerant quantum computers. This paper provides an in-depth analysis of PQC, focusing on its core trade-off: the advantage of long coherence times and room-temperature operation of photonic qubits, contrasted with the inherent challenge of weak interactions, which complicates two-qubit gate implementation and loss management. We survey methods for encoding quantum information onto photons, including both discrete (DV) and continuous variables (CV), and analyze the evolution of computational models from LOQC to advanced architectures like MBQC and FBQC. Specialized quantum error correction strategies, particularly the GKP code for CV systems, are also examined as a key factor for fault-tolerant computation. The paper also presents an overview of the industrial landscape, contrasting the strategic approaches of Xanadu (CV) and PsiQuantum (DV), and discusses landmark applications such as Boson Sampling. We conclude that the future standing of PQC will be determined by the race between the pace of innovation in photonic architecture and manufacturing versus the ability of matter-based platforms to solve their own scaling and coherence problems.

Keywords: quantum computing, photonic quantum computing, discrete variable (DV), continuous variable (CV), measurement-based quantum computing (MBQC), boson sampling, quantum error correction.

² Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Hanoi Open University