



※ 본 연구동향은 양자정보연구지원센터 뉴스레터의 내용입니다.

반도체 기반 양자컴퓨터 연구 동향

[작성: 한국과학기술정보연구원(KISTI) 류정희 선임연구원]

최근 구글, IBM, 마이크로소프트와 같은 거대 기업을 비롯해 각국의 연구기관과 대학은 범용 양자컴퓨터 개발에 집중적으로 투자하고 있습니다. 비록 현재의 기술 개발 수준은 걸음마 단계에 불과하지만, 지난 몇 년간의 눈부신 개발 성장을 통해 가까운 미래에 실용적인 양자컴퓨터가 등장할 것이라고 예측하는 전문가도 적지 않습니다. 양자컴퓨터 개발은 하드웨어 장치를 구현하는 물리 플랫폼마다 기술성과에 차이가 있는데, 가장 앞선 성과를 보여주는 방식은 초전도체와 포획 이온 시스템입니다. 그 외에도 광학, 다다이아몬드 내의 질소 공극 등 다양한 물리 플랫폼에서 양자컴퓨터 개발 연구가 진행되고 있습니다. 이번 뉴스레터에서는 반도체 기반의 양자컴퓨터 개발 연구에서 주목할 만한 논문 2편을 소개하겠습니다. 반도체 기반 양자컴퓨터는 초전도나 포획 이온 방식보다는 기술 발전이 더디지만, 현재의 반도체 산업 기반을 활용할 수 있다는 점에서 잠재력이 크다고 평가받고 있습니다.

첫 번째로 소개할 논문은 2018년 네이처에 “A programmable two-qubit quantum processor in silicon”이라는 제목으로 발표되었습니다[1]. 여기서 programmability란 오로지 외부 제어 신호의 변화만으로 서로 다른 종류의 양자 알고리즘을 수행할 수 있다는 것을 의미합니다. 이 논문에서는 Si/SiGe 구조체에 외부에서 인가되는 전극 신호에 의해 이중 양자점을 생성하고, 여기에 전자-스핀을 큐비트 시스템으로 사용합니다. 그림1에서 보라색 원과 오렌지색 원 위치에 양자점이 만들어지고, 외부에서 가해주는 자기장(B_{ext})이 제이만(Zeeman) 효과를 만들어내고 그 결과 단일 전자의 스핀-업과 스핀-다운을 큐비트 시스템으로 사용합니다. 또한, 3개의 micromagnet들에 의해 생성되는 자기장은 각각 큐비트가 서로 구별되는 진동수를 가지게 함으로써 각각의 큐비트에 독립적으로 1-큐비트 게이트 연산을 가능하게 합니다.

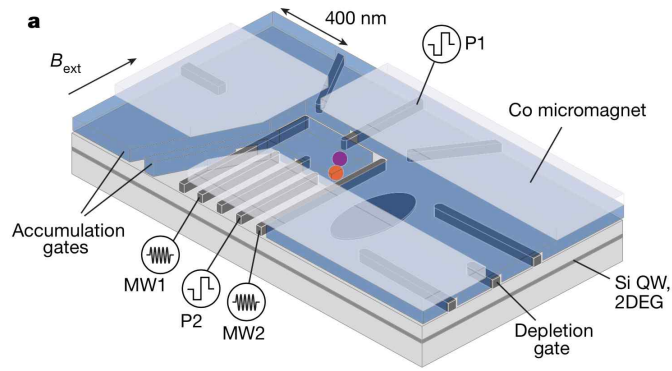


그림1. Si/SiGe 이중 양자점 디바이스

저자들은 Randomized benchmarking 방법론을 통해 1-큐비트 $R_x(\pi/2)$, $R_y(\pi/2)$ 회전 게이트 신뢰도가 각각 큐비트 마다 98.8%, 98.0%의 수치를 달성했다고 보고하였습니다. 2-큐비트 게이트는 Controlled-phase(CZ) 게이트를 구현하였습니다. CZ 게이트와 1-큐비트 게이트를 조합하여 Controlled-NOT (CNOT) 게이트를 구현할 수 있다는 것은 잘 알려져 있습니다. CNOT 게이트는 몇 개의 1-큐비트 게이트와의 조합을 통해 모든 양자 게이트를 구현할 수 있다고 알려져 있기 때문에(이를 범용 양자 게이트 세트라고 함), 해당 게이트 연산을 구현하는 것은 양자컴퓨터 개발에 중요한 과정입니다. CZ 게이트를 구현하기 위해서는 detuning 펄스를 특정 시간동안 적용합니다.

논문에서는 이렇게 구현한 1 & 2-큐비트 게이트가 잘 작동한다는 것을 확인하기 위해서 4개의 벨 얽힘 상태가 얼마나 잘 생성되었는지를 확인하는 과정을 수행하였습니다. 그 결과, 벨 얽힘 상태의 신뢰도는 85%~89%를 달성하였고, 얽힘 척도 (concurrence)는 0.73~0.82 값을 달성하였습니다. (concurrence 얽힘 척도는 0과 1사이의 값을 가지며 벨 얽힘 상태의 경우 값은 1임)

마지막으로 디바이스의 programmability를 확인하기 위해 잘 알려진 도이치-조사 (Deutsch-Jozsa) 알고리즘과 그로버(Grover) 알고리즘을 수행하였습니다.

그 결과, 그림 2에 보이는 것처럼 각각의 알고리즘 수행 시 4개의 2-큐비트 양자상태 ($|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle$)의 측정 확률 값이 시간이 지남에 따라 변하는 것을 확인할 수 있습니다. 이를 통해 두 알고리즘이 잘 작동한다는 것을 볼 수 있습니다.

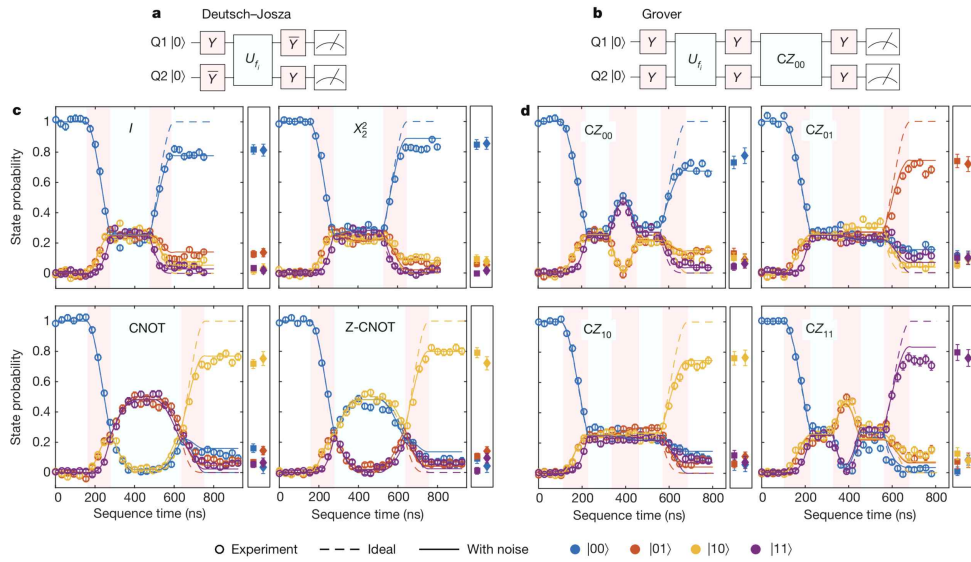


그림2. 도이치-조사, 그로버 알고리즘 수행 결과

두 번째로 소개할 논문 역시 반도체 기반의 연구 결과로 2022년에 네이처에 출판되었습니다[2]. 첫 번째로 소개한 논문과 달리 이 논문에서는 그림3처럼 두 개의 ^{31}P (인) 원자(빨간색)를 실리콘에 주입하고, 이 두 개의 인 원자핵이 하나의 전자를 공유하여 전체적으로 핵스핀-전자스핀의 3-큐비트 시스템을 구성하였습니다.

멀티 큐비트 시스템 구현은 양자컴퓨터 개발의 확장성 부분에서 중요한 단계입니다. 특히, 멀티 큐비트 시스템에서는 2-큐비트 시스템에서는 볼 수 없는 특수한 양자 얽힘 상태인 Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ) 상태가 존재하고, 이것은 여러 양자정보기술에서 중요한 양자자원입니다.

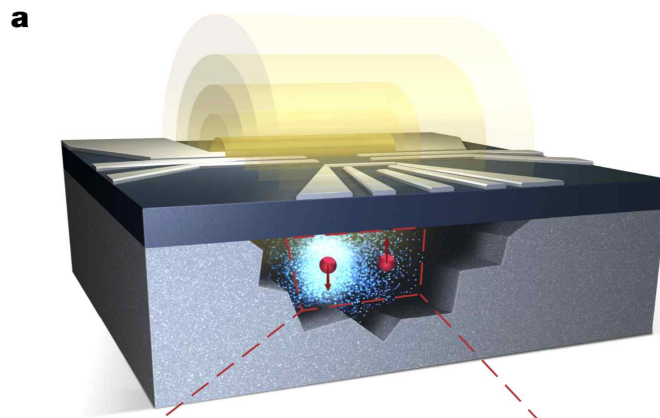


그림3. 2개의 ^{31}P (인) 원자핵이 하나의 전자와 결합되어 있는 3-큐비트 시스템

우선, 이 논문에서는 1-큐비트 게이트 $R_x(\pi/2)$, $R_y(\pi/2)$, $R_y(-\pi/2)$ 와 2-큐비트 게이트인 CZ 게이트를 구현하였습니다. 앞서 살펴봤듯이 해당 게이트들의 조합으로 범용 양자 게이트 세트를 구성할 수 있습니다. 그 결과, 1-큐비트 게이트는 99.95%, 2-큐비트 게이트는 99.37%의 신뢰도를 달성하였습니다. 1-큐비트 게이트 조작은 NMR 펄스를 이용하였고, 2-큐비트 게이트 구현을 위해 두 개의 핵스핀에 직접적인 제어 대신 공유하고 있는 전자 큐비트의 조작을 통해 핵스핀의 2-큐비트 연산을 수행하였습니다.

신뢰도 분석은 Gate Set Tomography라는 방법론을 활용하였는데, 일반적으로 사용하는 randomized benchmarking 방법론에 비해 각종 노이즈가 관여되는 상황에서 더 유용하다고 알려져 있다고 합니다. 이러한 범용 양자게이트 세트의 조합을 통해 우선 2개의 핵스핀에서 4개의 벨 얽힘 상태를 생성하고 측정하여 해당 디바이스의 실용성을 입증하였습니다. 그 결과, 각각의 벨 얽힘 상태에서 91.5%~94.2%의 신뢰도와 0.87~0.93의 얽힘 척도(concurrence) 값을 얻었습니다. 마지막으로 그림4에서 볼 수 있듯이 저자들은 핵-전자스핀을 활용하여 신뢰도 92.5% 수준의 3-큐비트 GHZ 얽힘 상태를 생성하였습니다. 이 신뢰도 값은 매우 높은 수치이며 심지어 최근 보고된 결과인 88%보다도 높습니다[3].

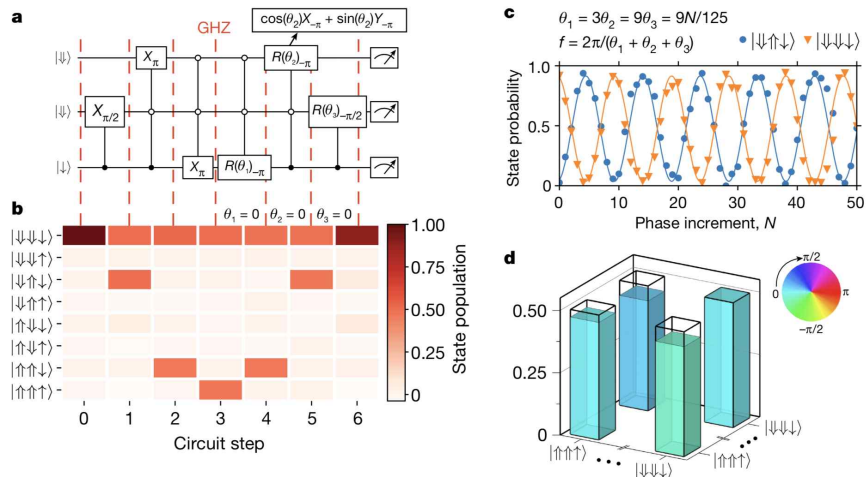


그림4. 핵-전자 3-큐비트 GHZ 상태 생성 및 측정

반도체 기반의 양자컴퓨터 개발은 초전도체, 포획 이온 플랫폼에 비해 기술 수준이 뒤쳐져 있지만, 최근 주목할 만한 연구 결과가 꾸준히 발표되고 있는 점은 고무적입니다. 이번 뉴스레터에서는 소개하지 않았지만, 2022년 네이처에 Tarucha 그룹에서 반도체 기반에서 높은 신뢰도의 1 & 2-큐비트 양자 게이트 구현 연구 결과를 출판하였습니다 [4]. 이 논문 또한 이번 뉴스레터에서 소개한 2편의 논문과 함께 살펴보는 것도 좋을 것 같습니다.

참고문헌:

- [1] Watson, T., Philips, S., Kawakami, E. et al. *A programmable two-qubit quantum processor in silicon*. Nature **555**, 633–637 (2018).
- [2] Mądzik, M. T., Asaad, S., Youssry, A. et al. *Precision tomography of a three-qubit donor quantum processor in silicon*. Nature **601**, 348–353 (2022).
- [3] Takeda, K. et al. *Quantum tomography of an entangled three-qubit state in silicon*. Nat. Nanotechnol. **16**, 965–969 (2021).
- [4] Noiri, A., Takeda, K., Nakajima, T. et al. *Fast universal quantum gate above the fault-tolerance threshold in silicon*. Nature **601**, 338–342 (2022).

