

**ICT SPOT  
ISSUE**

**ICT 산업동향**

**양자 컴퓨팅 기술 동향 및 시사점  
- 양자프로세서(QPU) 중심으로 -**

**보고서 관련 문의처**

작성자 권요안

소속 동향분석팀

☎ 042-612-8242

✉ schnabel@iitp.kr

**보고서 목차**

1. 양자컴퓨팅 개요
  - 양자 개요
  - 물리 큐비트와 논리 큐비트
  - NISQ era
  - 양자 시스템 가치 사슬
2. 양자프로세서(QPU)
  - 실리콘 스핀 큐비트
  - 이온트랩 큐비트
  - 초전도 트랜스몬 큐비트
3. 시사점 및 산업활성화를 위한 정책 제언

**주요 내용 요약**

- 양자(Quantum) 역학적 현상(얽힘, 중첩 등)을 이용하여 연산을 실행하는 컴퓨터
  - 양자 중첩 상태와 얽힘을 컴퓨터 연산의 입력, 큐비트(qubit)로 활용하는 것이 양자 컴퓨팅
  - 양자 컴퓨팅의 성능은 논리 큐비트(Logical Qubit) 수(數)가 중요
  - 현재, 양자 컴퓨팅의 연구 수준은 “양자계 검증 단계(NISQ Era)”로 오류가 포함된 수십~수백 개 수준의 큐비트를 활용한 중간 규모의 양자컴퓨터를 개발하는 시대
- QPU는 실리콘 스핀(Silicon Spin)/이온트랩(Trapped Ion)/초전도 트랜스몬(Superconductor Transmon) 큐비트 방식이 주도
  - (실리콘 스핀 큐비트) 실리콘 양자점(Quantum Dot) 구조 내 전자의 스핀 또는 단일 도핑 원자핵 스핀(Nucleus Spin)으로 양자 정보를 인코딩하는 방식
    - Intel은 Qutech와 협력하여 최초의 CMOS기반의 큐비트 소자를 제작하고 결맞음 지속시간 3ms 성공(’22.3), 6개의 실리콘 큐비트 구현에 성공
  - (이온트랩 큐비트) 진공 상태의 이온의 전기적 에너지 레벨로 양자정보를 인코딩
    - IonQ는 ‘25년 다중 이온트랩 칩 구현을 위해 개발중이고, 최근 SD (Software Defined) 양자 프로세서를 개발하고 Honeywell은 큐비트 확장을 위해 그리드(grid) 분포 방식의 이온트랩 구조로 확장 연구 중
  - (초전도 트랜스몬 큐비트) 초전도체의 쿠퍼쌍(Cooper Pair) 전하상태(또는 CPB)로 양자 정보를 인코딩
    - IBM, ‘26년까지 백만개의 Qubit QPU 개발을 위한 로드맵을 발표하고(’21.2), 433개의 Qubit QPU(Osprey, ‘22.11)를 개발
- 시사점 및 산업활성화를 위한 정책 제언
  - 단기적으로 초전도 트랜스몬 큐비트 기반, 장기적으로는 실리콘 스핀 큐비트 기반의 프로세서가 대두될 전망
  - 양자 컴퓨팅은 공학과 기초 과학이 융합된 토털 패키지 분야로 통합 사고가 가능한 인재 양성이 필요
  - 양자 컴퓨팅 기술은 개발 초기 단계로써, 지속적이고 끊임없는 연구지원이 필요

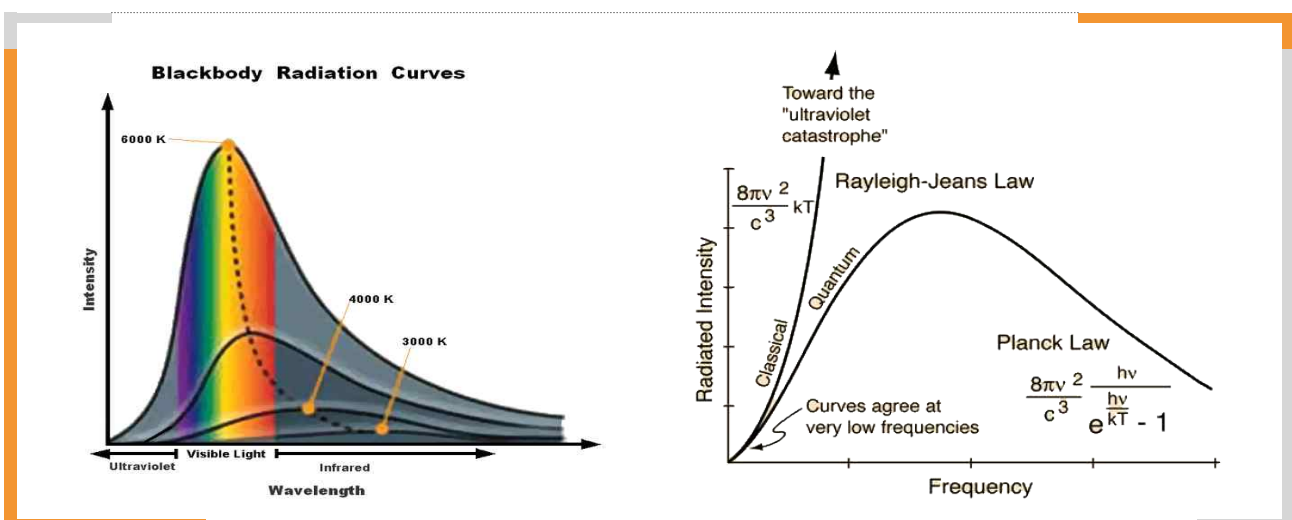
**ИТР**

# 1 Quantum Computing 개요

## > 양자(Quantum) 역학적 현상(얽힘, 중첩 등)을 이용하여 연산을 실행하는 컴퓨터

- 양자론은 원자론이 아닌 흑체복사의 이론적 분석을 위해 열역학에서 태동
  - 간혹, 잘못 알려진 오해 중 하나는 양자를 입자로 해석하는 것으로, 양자역학에서 양자(量子)는 입자(粒子)를 지칭하는 것이 아님
  - “양자역학(量子力學)”은 아시아에서 가장 먼저 서양에 개항한 일본에서 “Quantum Mechanics”를 번역한 용어를 그대로 한국에서 받아들여서 통용
  - 물리학에서의 입자(particle)는 electron(전자), positron(양성자), neutron(중성자), fermion(스핀이 반정수인 입자) 등 일반적으로 “~on”으로 끝남
  - ※ 양자(量子)에서의 “자(子)”, 전자(電子), 양성자(陽性子), 중성자(中性子) 등의 “자(子)”가 동일한 한자어 “자(子)”를 사용한 것이 오해의 원인
  - Quantum은 Quanta의 복수형으로써, 물리적으로 불연속적인 양을 의미하는 것으로 미시 세계에서 관측되는 현상인 에너지, 운동량 등 불연속적인 물리량 현상 전반을 지칭
  - 양자역학의 시초는 원자론에서 잉태한 것이 아닌 열역학의 흑체복사(Blackbody Radiation)를 플랑크(Planck\*)가 물리적 모델링한 것이 시초
  - \* Max Planck : 독일 물리학자, 양자론의 시초
  - ※ 대표적인 흑체 복사 모델링은 Rayleigh-Jeans와 플랑크로 Rayleigh-Jeans의 경우 고전적인 이론을 기반으로 접근하였으나 자외선 영역에서는 불일치, 플랑크는 에너지 양자화 개념을 도입/모델링으로 전 파장대에서 일정한 결과를 도출

### 그림 1 | Rayleigh-Jeans와 플랑크 흑체 복사(Blackbody Radiation)의 모델링 결과 비교



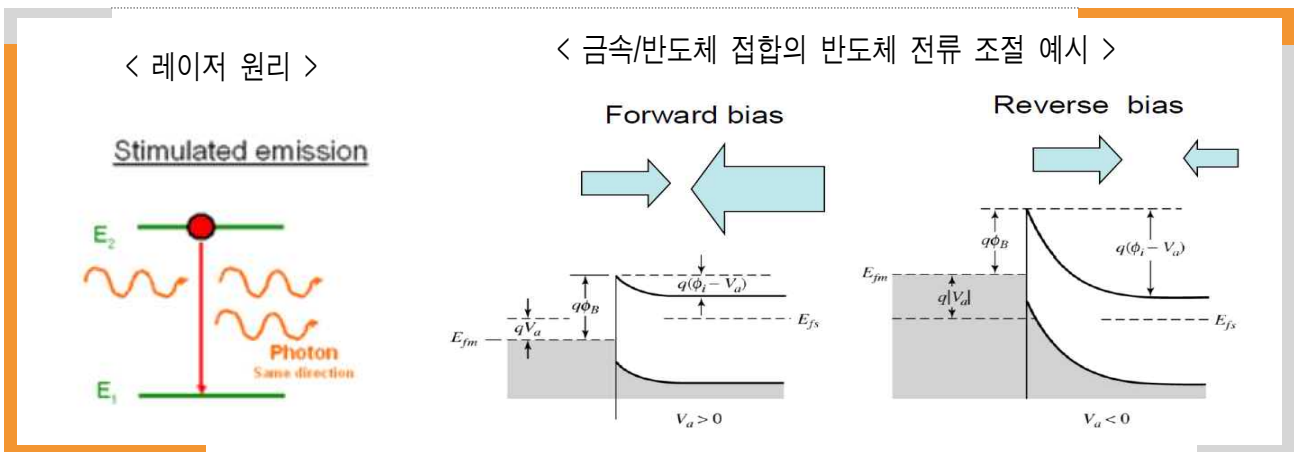
자료 : commons.wikimedia.org, physics.stackexchange.com

- 양자론은 크게 물리량(에너지, 운동량 등)의 양자화와 확률(입자 존재의 확률, 위치의 확률 파동성 등)로 해석

- (양자화) 불연속적인 물리량으로써, 대표적인 것은 에너지의 불연속성으로 이를 응용한 것이 레이저의 원리, 반도체 내의 전류 조절\* 등이 대표적인 사례

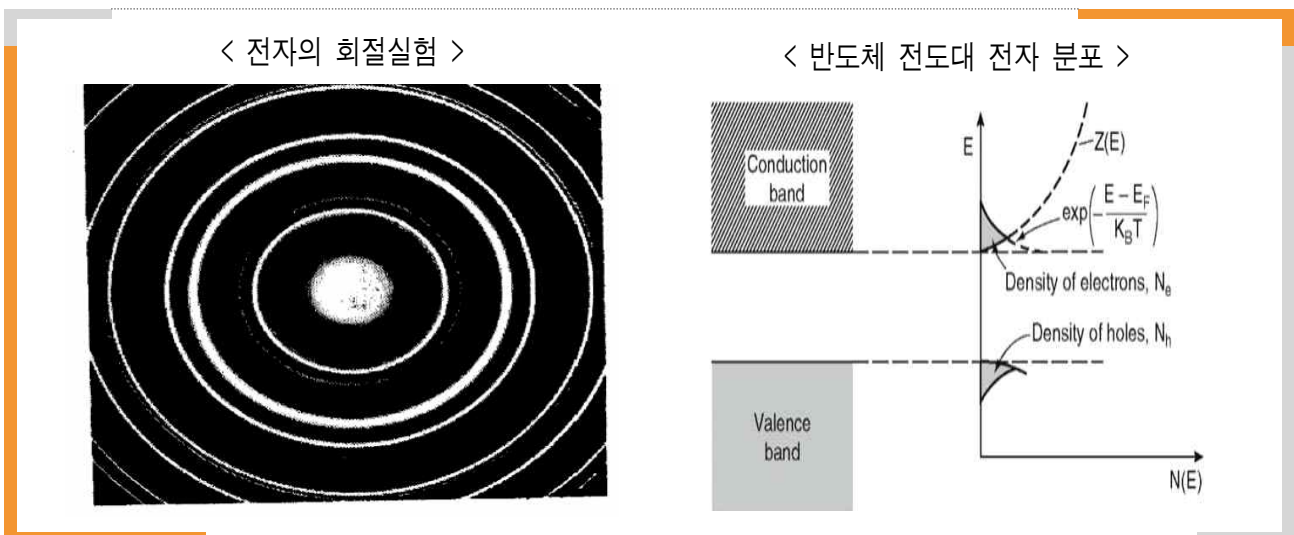
\* 반도체 전류는 확산(Diffusion) 및 장(Field)에 의한 전하의 운동 외(外) 에너지 양자화에 의한 에너지 장벽으로 조절

그림2 | 에너지 장벽에 의한 반도체 내 전류 흐름 조절 예시



- (확률) 입자의 존재는 고전적으로 한 개의 질점(質點)이 아닌 파동성과 확률로 결정되는 것으로 대표적인 사례는 전자의 회절 실험, 반도체 내의 전도대(Conduction Band) 전자수 분포, 터널링 효과 등이 있음

그림3 | 전자의 회절 실험 결과 및 반도체 전도대 전자 분포 예시



자료 : [what-when-how.com/electronic-properties-of-materials/semiconductors-electrical-properties-of-materials-part-1/](http://what-when-how.com/electronic-properties-of-materials/semiconductors-electrical-properties-of-materials-part-1/)

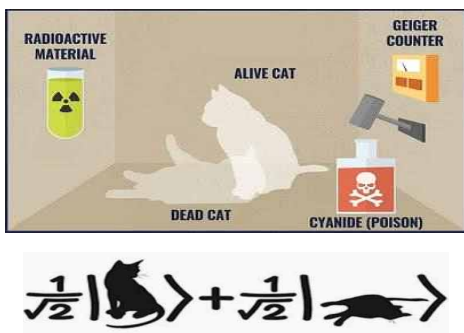
- 입자의 확률 파동성에서 중첩(Superposition)과 얽힘(Entanglement) 등의 개념이 파생
  - 슈뢰딩거(Schrödinger) 방정식의 해(解), 파동함수(wavefunction)를 확률 파동론의 관점에서 해석하여, 불확정성 원리(uncertainty principle)가 도출되고 양자 중첩(superposition)\*, 얽힘(entanglement) 개념이 파생되고 실험으로 증명\*\*

\* 측정 되기전 양자 상태는 허용 가능한 양자 상태의 조합으로 중첩

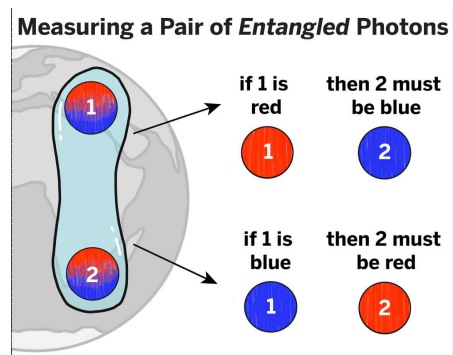
\*\* John Clauser 와 Stuart Freedman(1972)

그림4 | 중첩 및 얽힘 개념도

< 슈뢰딩거 고양이의 중첩상태 개념 >



< 광자 2개의 얽힘 예시 >

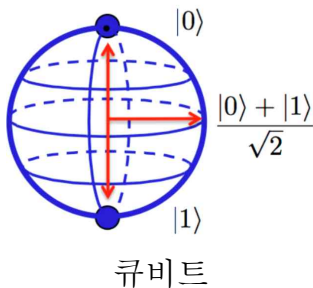


자료 : theabingtonian.com/1678/features/schrodingers-cat-groundbreaking-crazy-or-both/

- 2개의 양자 중첩 상태를 정보의 단위 비트로 활용한 것이 큐비트(qubit)이며, 양자 중첩 상태와 얽힘의 특성을 활용하는 것이 양자 컴퓨팅
  - 양자 중첩 상태로 연산 정보를 인코딩하거나, 얽힘을 활용한 양자 고밀도 코드(superdense code)로 입력 정보에 해당하는 큐비트 값을 축소하는 등 고전컴퓨터에 비해 빠른 연산이 가능

그림5 | 고전 비트와 양자 큐비트 비교

< 큐비트 >



< 고전 비트와 양자 큐비트의 비트 표현 >



자료 : Basic Guide to Quantum Computing and Superposition (medium.com)

## ▶ 고전적인 난제(소인수 분해 등)를 위한 다양한 양자 알고리즘과 QPU가 개발 중

- 고전적인 난제에 대해 양자 컴퓨터를 통해 다양한 알고리즘이 연구 중
  - 소인수 분해 알고리즘을 양자컴퓨팅으로 해결하는 Shor 알고리즘, 데이터 검색을 위한 Grover 알고리즘 등이 개발 중이나 상용화를 위해서는 아직 많은 연구가 필요

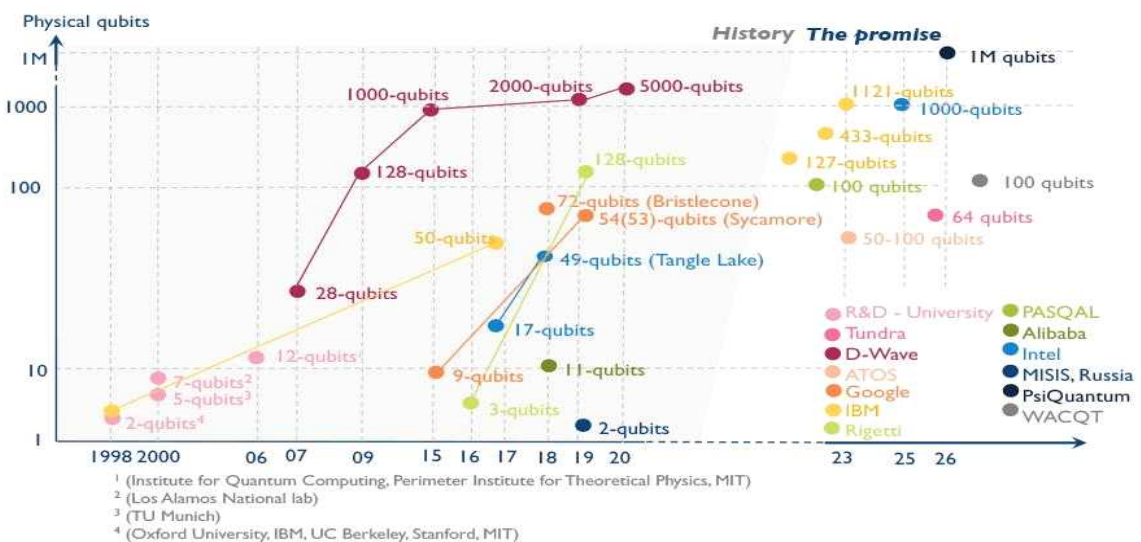
표1 주요 양자 알고리즘 특징

알고리즘	용도	특징
Shor	소인수분해 알고리즘	· 동일한 계산 결과에 대한 보장 없음
Harrow- Hassidim - lloyd	선형 방정식 해	· 특정한 방정식에 대해 지수함수적으로 빠른 연산 결과
Grover	검색 알고리즘	· 고전적인 방법과 비교해 속도는 빠르나, 검색 대상이 증가할수록 낮은 검색 성공률
양자 어닐링	최적화 문제	· 일부 조건에 따라 느린 수렴 속도

자료: A survey of quantum computing hybrid applications with brain-computer interface (Cognitive Robotics, , 2022)

- 양자 컴퓨팅 성능 향상과 상용화 성공을 위해 큐비트 연산처리량을 현재 수준 보다 확장된 양자 프로세서(QPU: Quantum Processor Unit) 연구가 활발하게 진행 중
  - IBM('23년, 1,121개의 큐비트), intel('25년, 1,000개의 큐비트) 등 다양한 방식(실리콘, 이온트랩, 초전도체 등)으로 대용량 큐비트 제어가 가능한 QPU를 연구 중

그림6 1998~2026 개발 연구 기관별 큐비트 발전 추이 및 전망



자료 : yole development (2021)-[www.i-micronews.com/products/quantum-technologies-2021/](http://www.i-micronews.com/products/quantum-technologies-2021/)

## ▶ 양자 컴퓨팅의 성능은 논리 큐비트(Logical Qubit) 수(數)가 중요

● 큐비트는 물리(Physical Qubit) 큐비트와 논리 큐비트(Logical Qubit)로 구분

- (물리(physical) 큐비트) 이온, 광자 등 큐비트 구현 주체인 개별 입자의 2개의 양자 상태를 지칭

- (논리(logical) 큐비트) 큐비트 오류\*를 보정하기 위해 동일한 물리 큐비트를 여러개(물리 큐비트+ 보조(ancilla) 큐비트)로 구성된 그룹을 1개의 논리 큐비트로 정의하고, 양자컴퓨팅 성능을 위한 실질적인 큐비트 수(數)는 논리 큐비트 수에 좌우

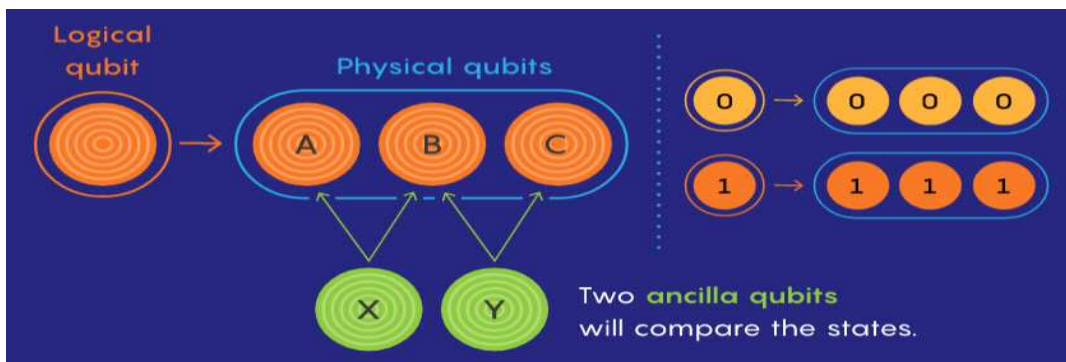
\* 물리 큐비트 자체는 외부 환경(열, 전자파 등)에 의한 불안정한 상태

※ Shor 양자 알고리즘에 의하면 2,048 비트 RSA 키 암호 해독에 14,238개의 논리 큐비트가 필요하고(1개의 논리 큐비트는 1,583개의 초전도 물리 큐비트에 해당), 약 2천만 개의 물리 큐비트가 필요

출처 : How to factor 2,048 bit RSA integers in 8 hours using 20 million noisy qubits(arXiv, 2019)

그림 7 물리 큐비트와 논리 큐비트 개념 및 보조(ancilla) 큐비트를 이용한 Error 검출 원리

< 물리 큐비트와 논리 큐비트 개념 >



< 보조 큐비트를 활용한 오류 검출 개념 >

X Compares A and B	Y Compares B and C	
A: 1, B: 1 → Match	B: 1, C: 1 → Match	No errors.
A: 0, B: 1 → No match	B: 1, C: 1 → Match	A has an error.
A: 1, B: 0 → No match	B: 0, C: 1 → No match	B has an error.
A: 1, B: 1 → Match	B: 1, C: 0 → No match	C has an error.

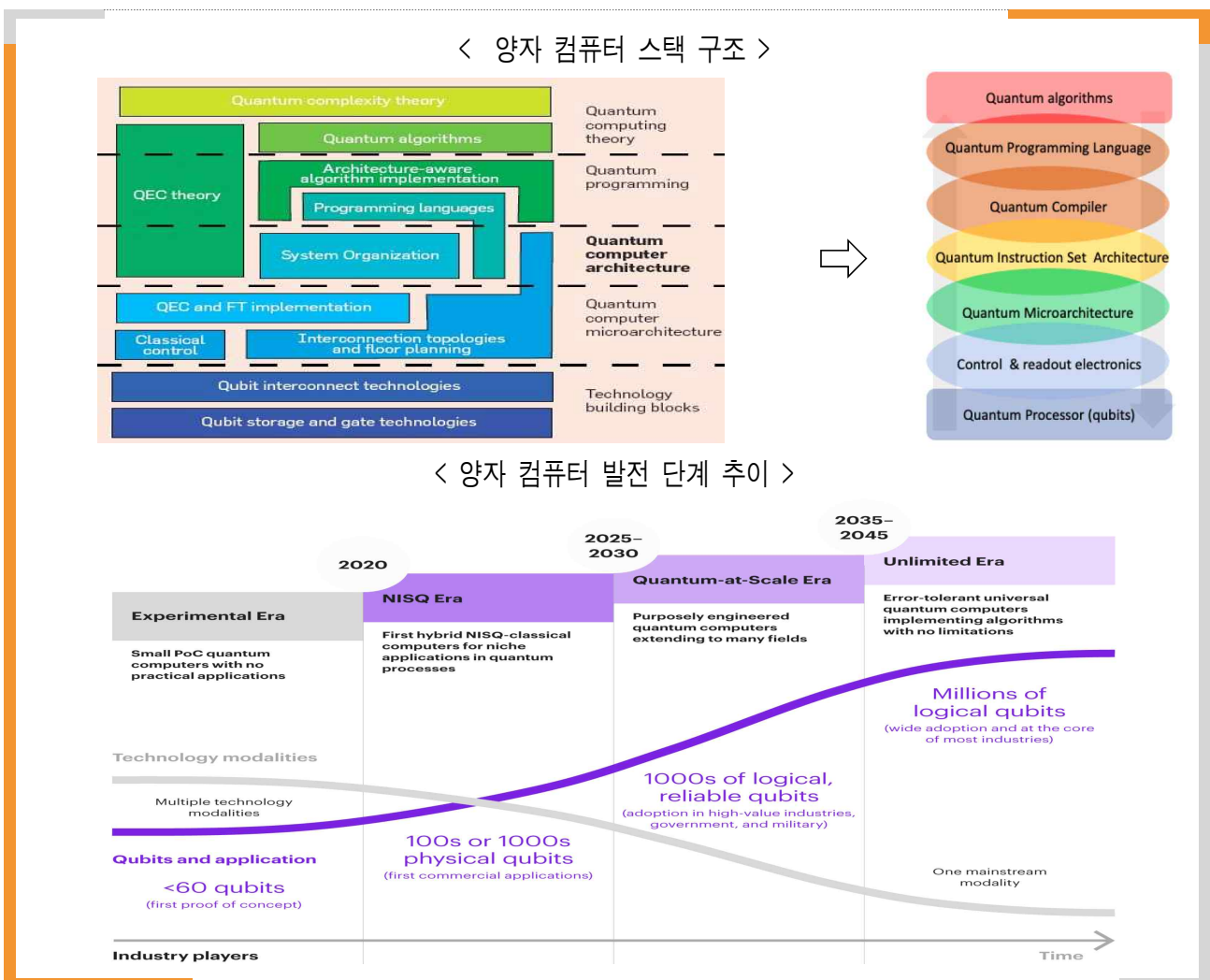
자료 : [www.quantamagazine.org/how-quantum-computers-will-correct-their-errors-20211116/](http://www.quantamagazine.org/how-quantum-computers-will-correct-their-errors-20211116/), <https://www.telsy.com/it/il-qubit-logico-e-la-correzione-degli-errori-quantistici/>

### ▶ 현재 양자 컴퓨팅의 연구 수준은 “양자계 검증 단계(NISQ Era\*)”

\* NISQ(Noisy Intermediate-Scale Quantum) Era : 오류가 포함된 수십~수백 개 수준의 큐비트를 활용한 중간 규모의 양자컴퓨터를 개발하는 시대로 “양자계 검증단계”로 번역

- 양자 연산을 위한 큐비트 구현시, 큐비트 주변의 다양한 환경으로 양자 중첩상태가 붕괴되는 결어긋남(decoherenece) 등이 존재하고 양자 에러 보정(QEC\*)은 필수 요소, 이를 포함한 양자 컴퓨터 스택(Stack) 구조가 연구 중
  - 양자 컴퓨터 스택 구조는 QPU/양자상태 제어 및 검출을 위한 회로/양자오류보정 회로 /QISA/양자 컴파일러/양자프로그램/양자 알고리즘으로 구성
  - 완전 무결한 큐비트(Perfect Qubit) 생성과 유지의 한계로 당분간(20~25) 수백 큐비트 정도의 QPU로 양자 알고리즘을 검증하는 단계에 머물것으로 전망

그림8 양자 컴퓨터 스택 구조 및 발전 단계 전망



자료 : Full-stack quantum computing systems in the NISQ era: algorithm-driven and hardware-aware compilation techniques quantum computing(arXiv, 2022)[상], why you should care(kearney, 2021.11)[하]

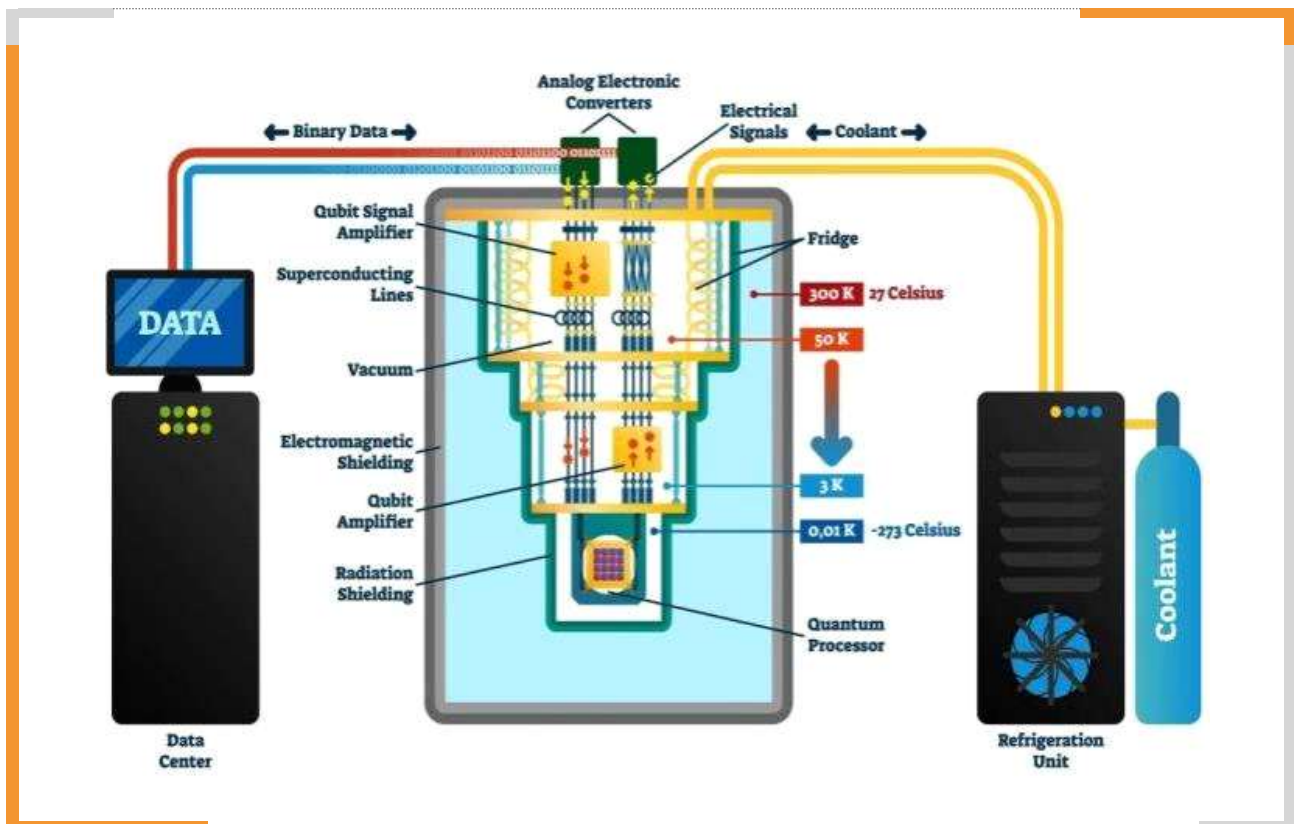
## ▶ 양자 컴퓨팅은 반도체 소자 및 장비, 광공학, 전파, 냉각 기술 등으로 구성된 종합 기술

- 큐비트 생성 및 상태 유지를 위한 외부 환경의 영향 차폐(열, 전파 등), 큐비트 제어를 위한 신호처리 기술 등 다양한 학문의 집합체

- (냉각 기술) 초전도 또는 실리콘 큐비트 등의 생성 및 상태를 위한 극저온이 필요
- (반도체 기술) 실리콘/초전도 기반 큐비트 소자 제작을 위한 반도체 공정 기술인 박막 증착(Sputtering, CVD) 기술, 도핑 등 반도체 관련 소자 제작 기술이 필요
- (광공학 기술) 큐비트 생성 및 양자 정보 인코딩을 위한 레이저 및 광 인터페이스 기술
- (전파 기술) 큐비트 제어 및 검출에 활용되는 RF 신호\*의 증폭 및 차폐 기술

\* 활용되는 RF 주파수는 GHz~THz로 관련 회로 제작 기술이 필요

그림9 양자 컴퓨팅 시스템 구성 예시

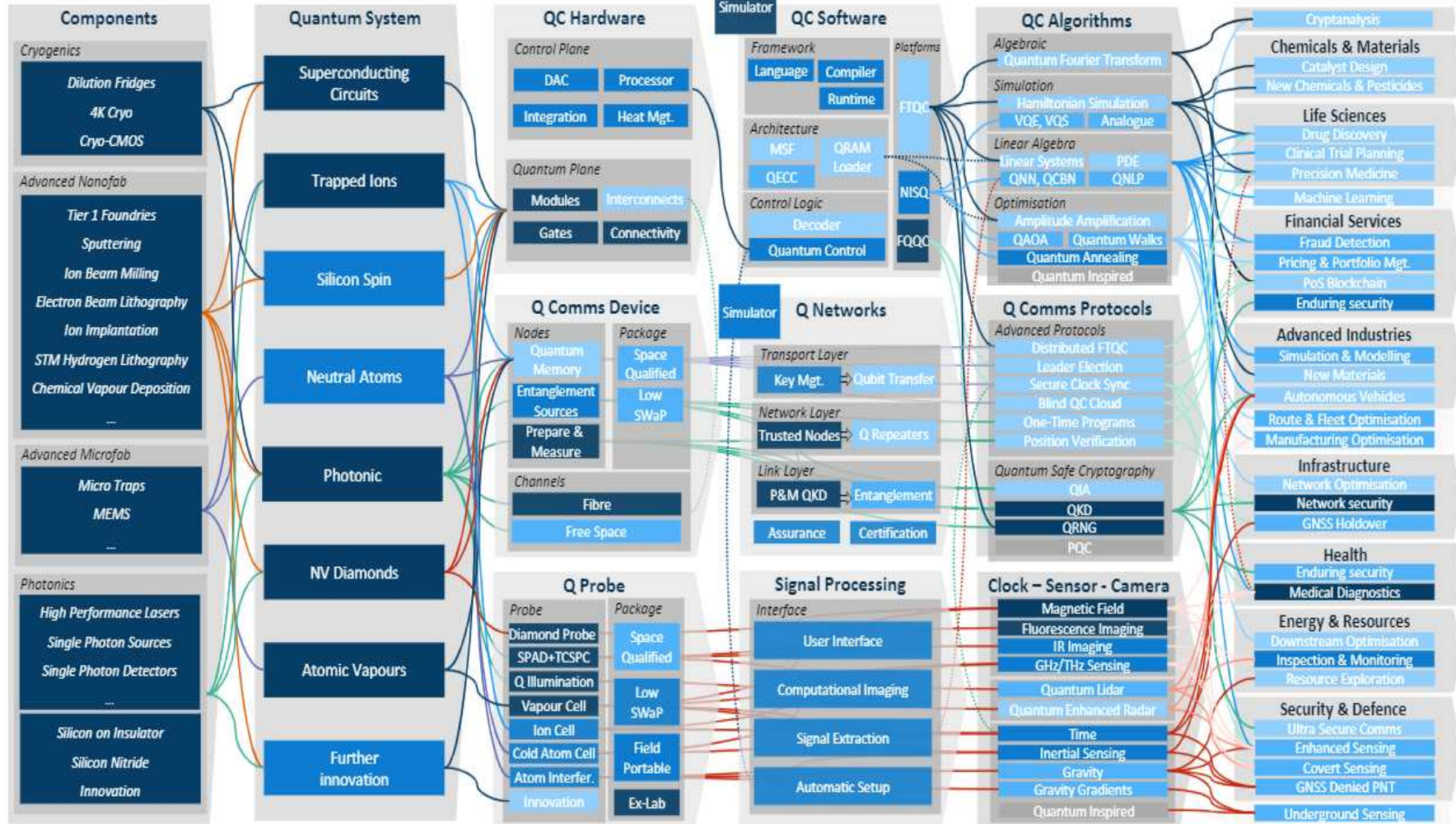


자료 : [www.thebroadcastbridge.com/content/entry/14159/instant-answers-from-the-universe](http://www.thebroadcastbridge.com/content/entry/14159/instant-answers-from-the-universe)

- 양자 정보 가치 사슬(value chain)은 소자 제작을 위한 인프라(반도체 공정, 극저온 기술 등) → 큐비트 생성을 위한 양자소자 시스템 (QPU, QM 등) → 큐비트 제어를 위한 양자시스템 구성 HW → 양자 알고리즘을 프로그램을 위한 양자 SW → 양자 알고리즘 → 관련 응용 분야(소재 개발, 금융, 제조, 보안 등)로 연결되고, 양자 컴퓨팅의 중심은 QPU

그림10 | Quantum Value Chain

# The quantum value chain



자료 : <https://www.factbasedinsight.com/quantum-value-chain-overview/>, David Shaw

### 3 주요 양자 프로세서(Quantum Processor Unit)

▶ 양자 프로세서는 ①실리콘 스핀(Silicon Spin), ②이온트랩(Trapped Ion), ③초전도 트랜스몬(Superconductor Transmon) 큐비트 방식이 주도

● (실리콘 스핀(Silicon Spin) 큐비트) 실리콘 양자점(Quantum Dot) 구조 내 전자의 스핀 또는 단일 도핑 원자핵 스핀(Nucleus Spin)으로 양자 정보를 인코딩하는 방식

- 실리콘 스핀 큐비트 구현방식은 첫 번째로 Metal/SiO<sup>2</sup> (또는 Si/SiGe) 경계면에 속박된 전자에 대해 외부 자기장(B)으로 Zeeman 효과를 활용, 전자의 스핀상태를 |↑⟩(업 상태)과 |↓⟩(down 상태)으로 분리되는 현상을 이용하여 양자정보를 인코딩

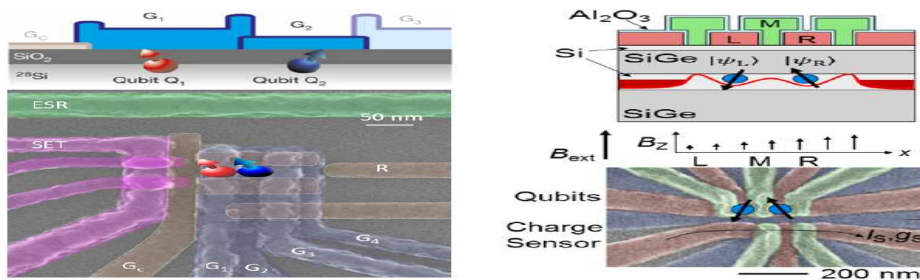
※ Zeeman 효과(Zeeman effect) : 자기장이 원자의 축퇴된 에너지 준위를 갈라지게 하는 현상

- 두 번째로 도핑된 원자핵(도너(Donor))에 대해 강한 자기장을 걸어 전자의 스핀과 핵의 스핀의 커플링 상태 |↑↑⟩과 |↓↓⟩분리 현상을 이용하고 인접한 전극 주변의 안테나를 통해 전자스핀의 공진 주파수에 해당하는 MW\*을 인가하여 양자정보를 인코딩(그림 참조)

\* MW : Microwave

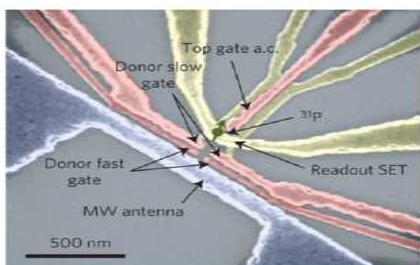
그림11 | 실리콘 스핀 큐비트(Silicon Spin Qubit) 사례

< MOS구조 및 Si/SiO<sup>2</sup> 계면에서의 전자스핀 개념도 >

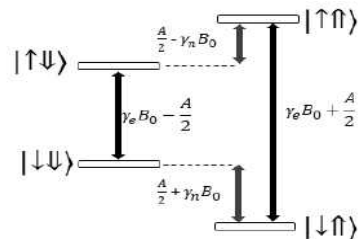


SET : Single Eletron Transistor, ESR : Eletron Spin Resonance, B : 자기장

<도핑 원자(Donor)의 양자정보 Readout 구조 >



<도핑된 원자핵 스핀과 전자스핀의 Zeeman효과>

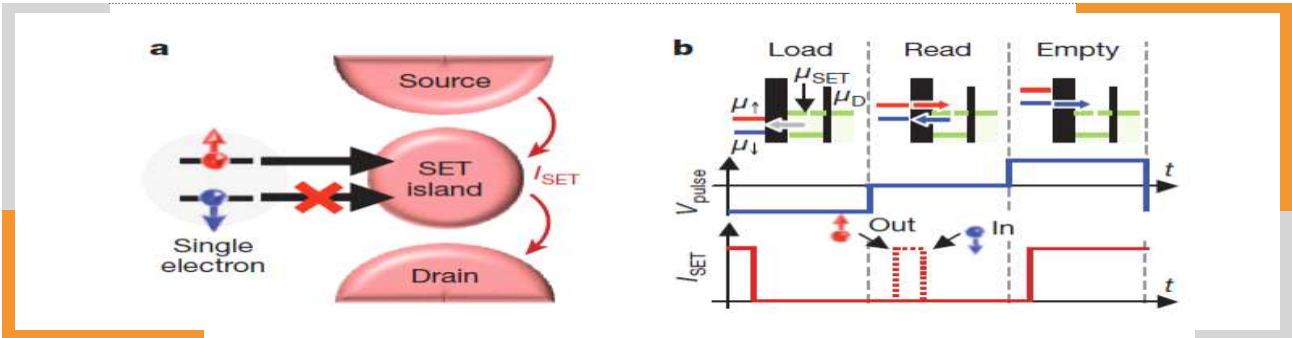


※ |↑↑⟩, |↓↓⟩ 핵스핀

자료 : Quantum Computing Circuits and Devices(arXiv, 2019)

- 실리콘 스핀 큐비트의 인코딩 된 양자정보의 스핀 상태는 전하센서(Charge Sensor)에 의해 검지
- ※ 전자 스핀의 전기화학 포텐셜 조정으로 SET(Single Electron Transistor)와 전자간 터널링을 형성하여 전자의 스핀  $|\uparrow\rangle$  상태만 통과하여 전자의 스핀 상태를 판독

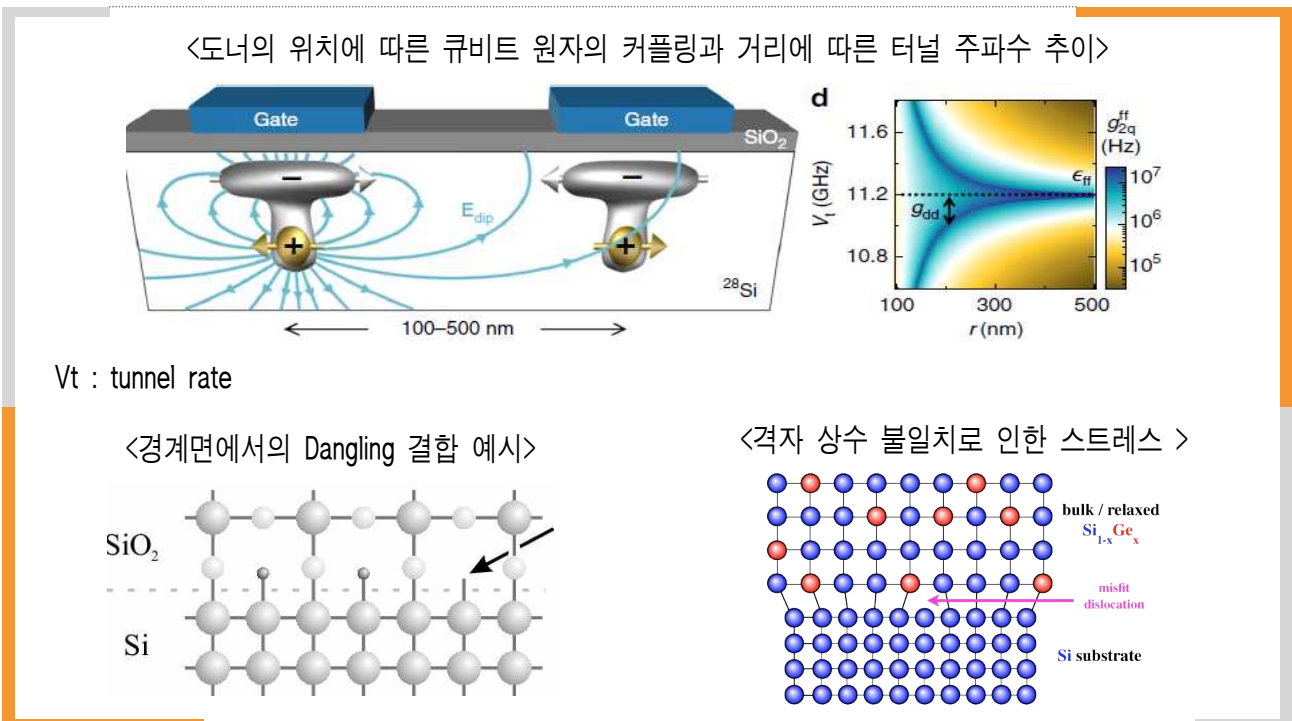
그림12 전하센서의 스핀 상태 판독 원리



자료 : Single-shot readout of an electron spin in silicon(Nature, 2010)

- 실리콘 스핀 큐비트의 반도체 특성상 정밀한 도너의 위치 제어가 필요하고, 결어긋남(decoherence)을 유발하는 다양한 원인이 존재
- ※ 도너(Donor)의 위치에 따른 큐비트 원자간의 커플링 상태, MOS 구조의 경계면의 불완전 구조(dangling lattice 등), 반도체 소재의 격자상수 불일치에 따른 격자에 대한 스트레스, 큐비트 상태를 제어하기 위한 MW 안테나의 열복사 등으로 중첩상태의 큐비트를 결어긋남(Decoherence) 상태로 전이

그림13 실리콘 스핀 큐비트의 다양한 디코히런스(Decoherence) 원인

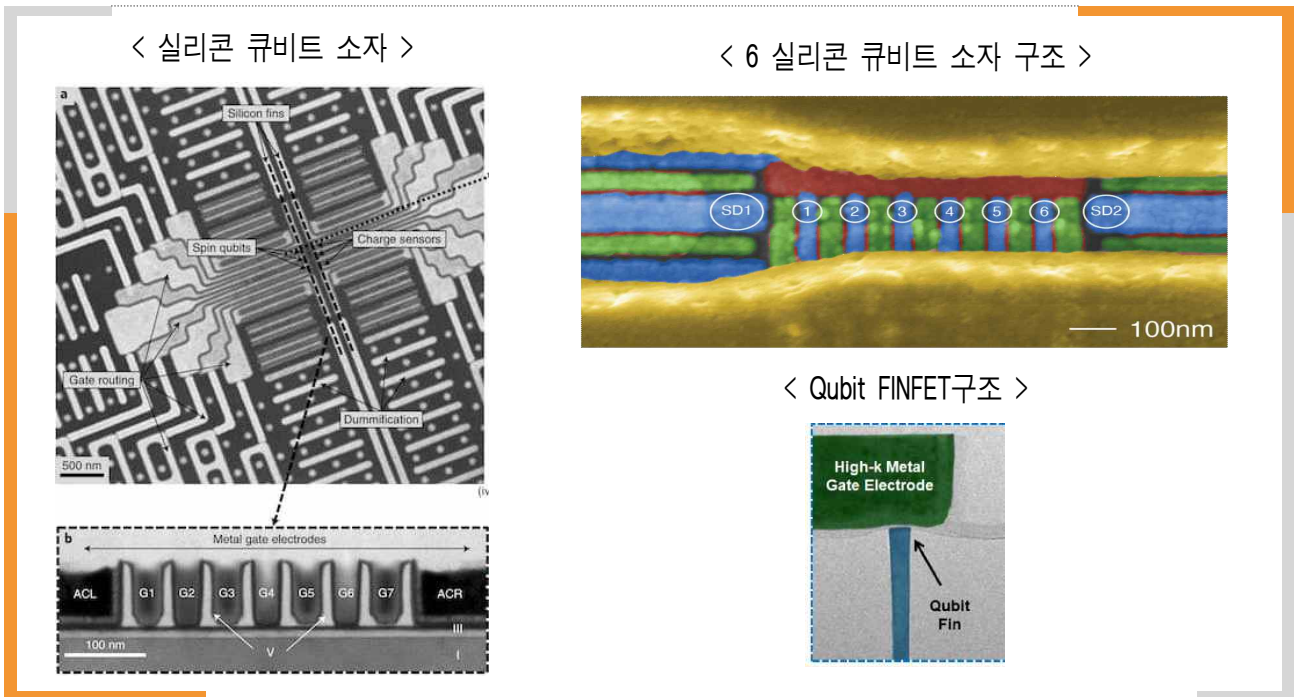


자료 : Silicon quantum processor with robust long-distance qubit couplings(Nature, 2017), userweb.eng.gla.ac.uk/douglas.paul/SiGe /misfit.html

- Intel은 Qutech\*과 협력하여 최초의 CMOS(FINFET)기반의 큐비트 소자를 제작하고 결맞음 지속시간 3ms(22.3)과 6개\*\*의 실리콘 큐비트 구현에 성공(22.10)

\* 네덜란드 델프트 공대 스타트업, \*\* 기존 최대 실리콘 큐비트 3개 → 6개

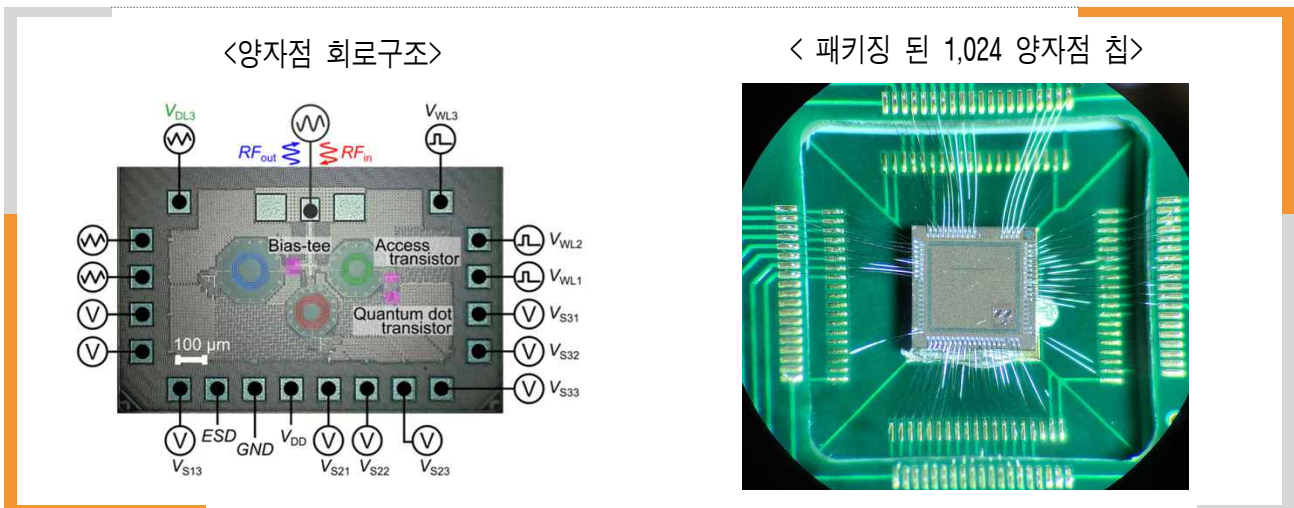
그림14 Qutech의 CMOS기반의 실리콘 큐비트 소자 구조



자료 : Qubits made by advanced semiconductor manufacturing(Nature, 2022) [좌], Physicsworld [우]

- Quantum Motion\*사는 결맞음 지속시간 9초의 단일 큐비트 생성에 성공(21.3)하고, 짧은 시간(12분)내 양자상태 검출이 가능한 1,024개의 양자점 구조의 실리콘 소자 개발(22.10)

그림15 Quantum Motion의 양자점 회로 구조와 1,024개의 양자점을 가진 실리콘 큐비트 소자



자료 : Quantum Motion

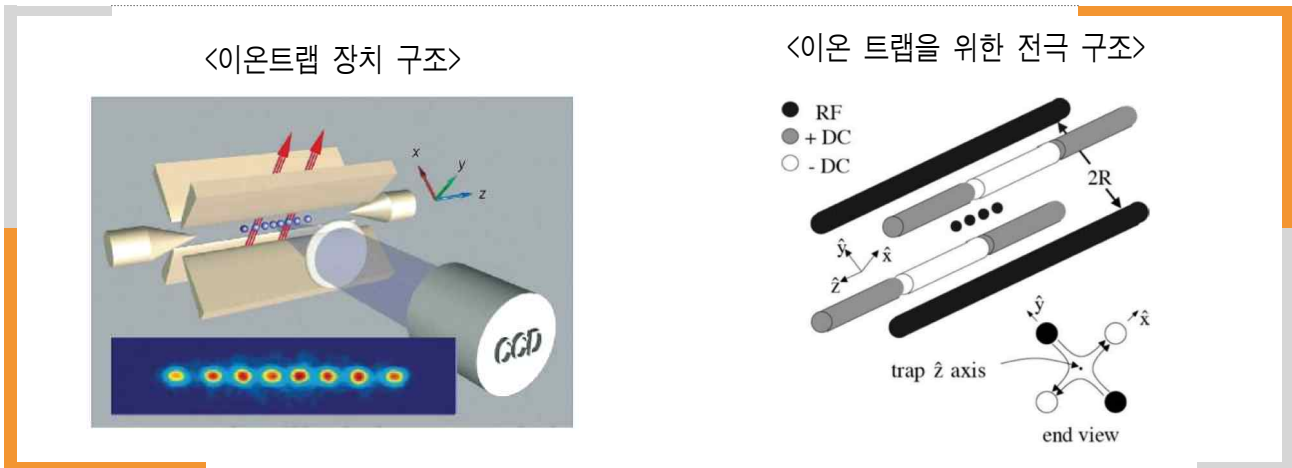
● (이온 트랩(Trapped Ion) 큐비트) 진공 상태에 있는 이온의 전기적 에너지 레벨로 양자 정보를 인코딩

- 칼슘(Ca) 또는 이터븀(Yb)을 진공 챔버 내에서 열확산(Vaporized)과 동시에 레이저를 조사하여 이온화 상태로 생성한 뒤 주변에 진동 전기장(Oscillating Electric Field, 또는 RF)을 가해 생성된 이온을 포획된 상태\*\*로 만듦(그림 참조)

\* 이온트랩에 활용되는 원소는 Sr, Hg, Al, In, Cd 등이 있음

\*\* 포획된 이온은 쿨롱 포텐셜로 서로 ~10um 범위의 간격을 유지

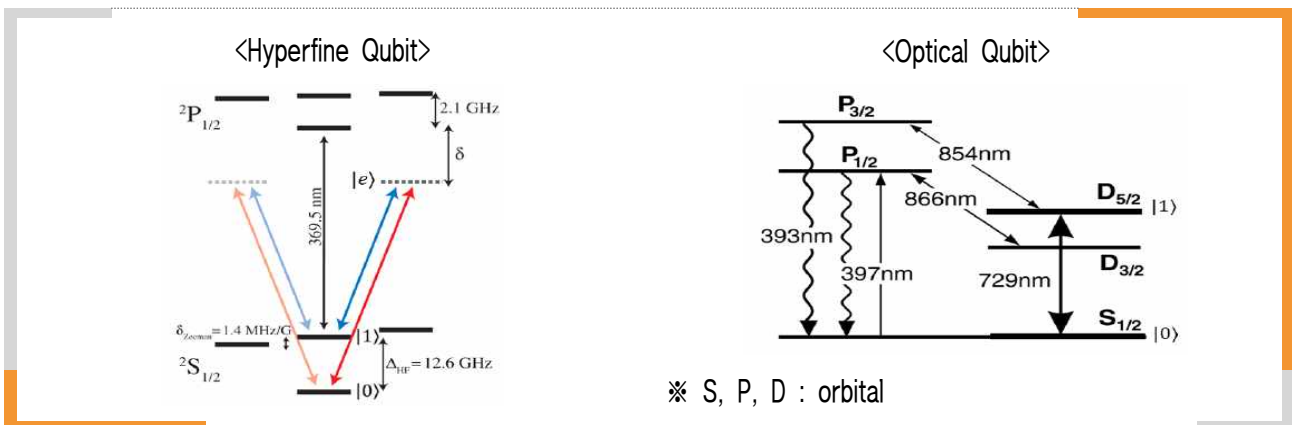
그림16 이온 트랩 큐비트 생성 장치 개념



자료 : Quantum Computing Circuits and Devices(arXiv, 2019), Quantum Computing with Trapped Ion Hyperfine Qubits(Quantum Information Processing, 2004)

- 포획된 이온들에 대해 미세한 자기장을 인가(Hyperfine Qubit)하여 에너지 준위 분리(Zeeman effect)로 큐비트를 인코딩하거나, 이온에 레이저를 조사(Optical Qubit)하여 인코딩

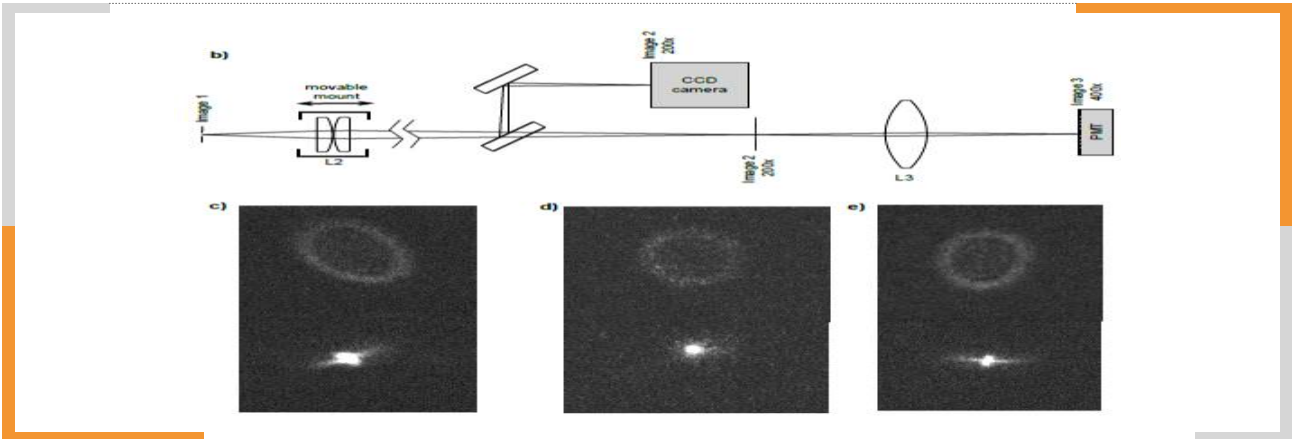
그림17 하이퍼파인(Hyperfine) 및 광(optical) 방식의 큐비트 원자 에너지 준위



자료 : Quantum Computing Circuits and Devices(arXiv, 2019), Ion Trap Quantum Computing with Ca+ Ions(Quantum Information Processing, 2004)

- 이온 트랩 큐비트의 양자 상태를 검출하는 대표적인 방식은 레이저 조사에 의한 자극 방출 (Stimulated emission)로 CCD(charge coupled device)를 통해 검출
- ※ 들뜬 상태(excited state)에 있는 큐비트에 해당하는 레이저 주파수로 자극방출을 유도하고 이를 CCD로 검출하는 방식

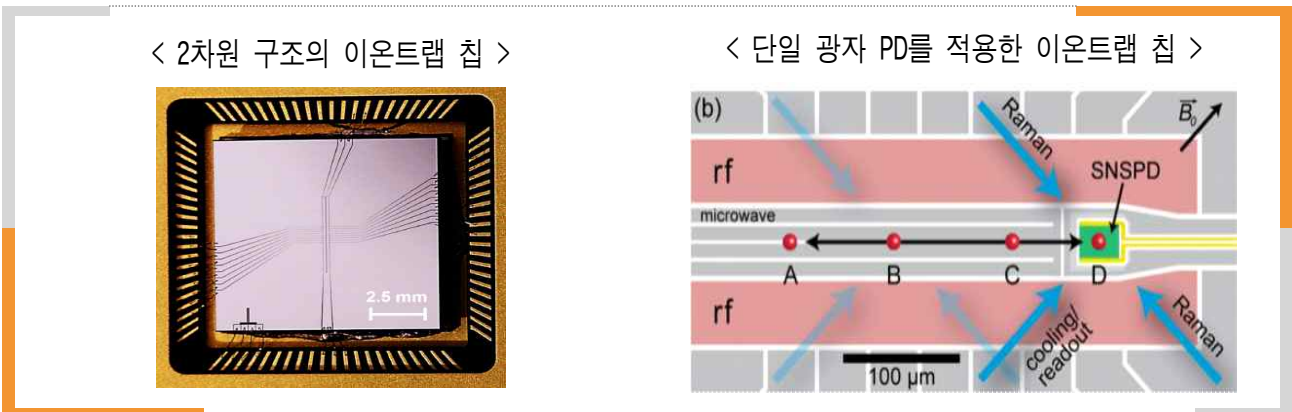
그림18 | CCD센서를 통한 양자 상태 검출 예시



자료 : A Programmable Five Qubit Quantum Computer Using Trapped Atomic Ions(Shantanu Debnath, Doctor of Philosophy, 2016)

- 최근, 2차원 구조의 이온트랩 칩과 초전도 SPD(Single Photodetector)를 활용하여 양자상태를 검출하는 연구가 진행중

그림19 | 2차원 구조의 이온트랩 칩과 단일 광자 PD의 적용 사례

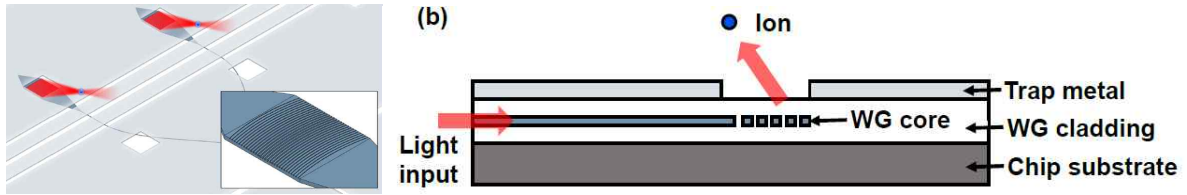


자료 : Trapped-Ion Quantum Computing: Progress and Challenges(arXiv, 2019)(좌), State Readout of a Trapped Ion Qubit Using a Trap-Integrated Superconducting Photon Detector (Phys. Rev. Lett. 126, January 2021)(우)

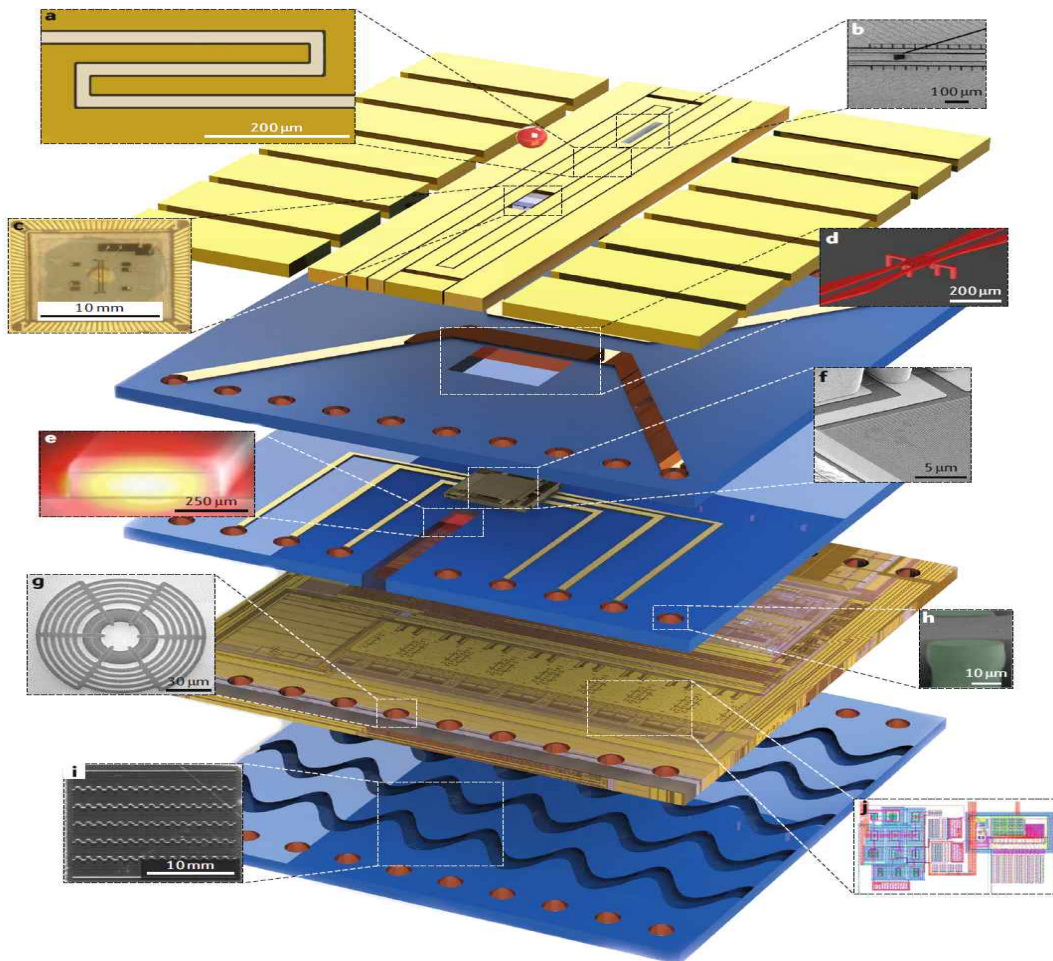
- 개별 이온에 대해 레이저 조사에 의한 큐비트 제어 방식을 사용시 큐비트 확장에 따른 다중 입력 광 인터페이스(Optical Interface) 구현이 필요하고, 이에 따른 광원과 이온 트랩 칩의 집적 연구가 필요
- 이온 트랩 칩 내에 광도파관(optical waveguide)과 그레이팅(grating) 커플러를 집적하여 이온을 제어하는 적층 구조 연구가 진행 중

그림20 이온 제어용 광 도파관과 커플러(coupler) 구조 및 이온트랩 칩 적층 구조

< 광 도파관과 그레이팅 커플러 구조를 집적한 포획 이온 제어 예시 >



< 이온트랩 칩 적층 구조 >



- a: 이온트랩을 위한 전극 구조, c: 이온 제어를 위한 투명 전극 d: RF 인가를 위한 배선,
- e: 이온제어용 광도파관(optical waveguide)과 그레이팅 커플러(grating coupler) 구조
- f: 단일 광자 PD, h & g: BGA, i: 칩 냉각을 위한 냉매로(microchannel\*)

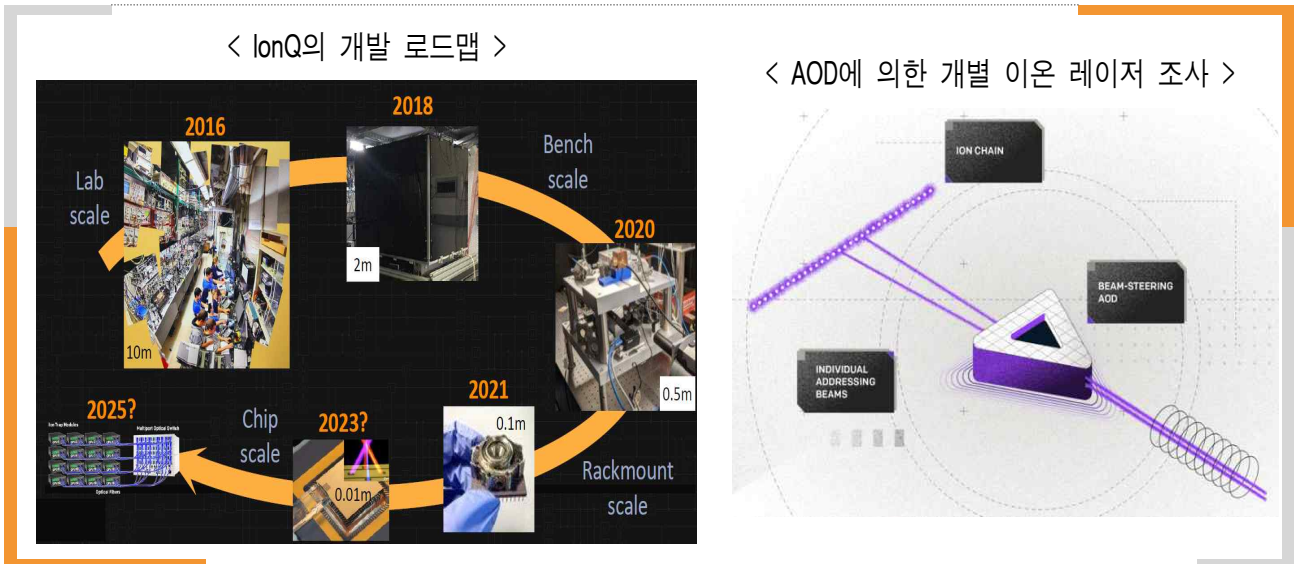
\* A Practical Implementation of Silicon Microchannel Coolers for High Power Chips(IEEE 2005 SEMI-THERM Symposium)

자료 : Trapped-Ion Quantum Computing: Progress and Challenges(arXiv, 2019), Engineering of microfabricated ion traps and integration of advanced on-chip features(Nature Reviews/Physics, 2020)

- IonQ는 이온트랩을 1개의 칩으로 구현하고 '25년 다중 이온트랩 칩 구현을 위해 개발 중이고, 최근 SD(Software Defined) 양자 프로세서 개발을 위해 AOM\*에서 AOD\*\* 기술을 도입, 포획된 개별 이온의 레이저 조사에 활용

\* AOM : Acoustic Optical Modulator, \*\* AOD : Acoustic Optical Deflector

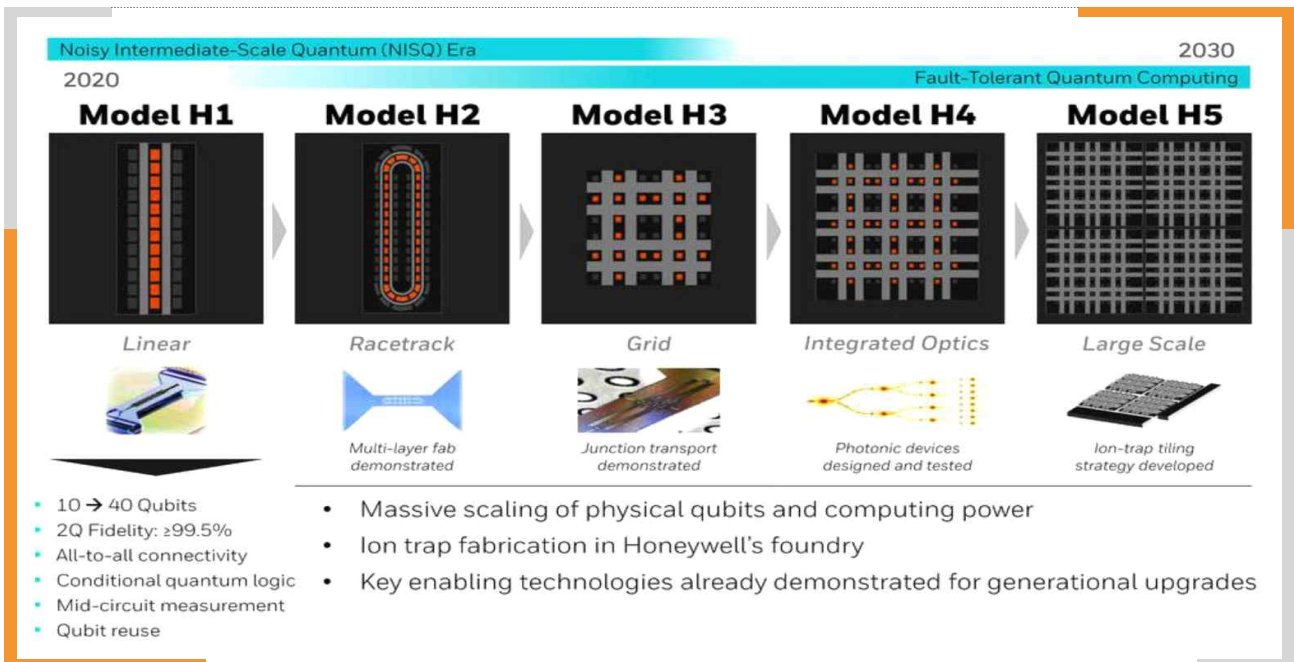
그림21 | IonQ의 개발 로드맵 및 AOD기술을 적용한 레이저 빔 조절 개념도



자료 : IonQ

- Honeywell은 큐비트 확장을 위해 선형분포의 이온트랩구조에서 그리드(grid) 분포 방식의 이온트랩 구조로 확장 연구 중

그림22 | Honeywell의 Ion Trap 프로세서 로드맵



자료 : Honeywell

● (초전도 트랜스몬(Superconductor Transmon\* Qubit) 큐비트) 초전도 CPB\*\*(Cooper Pair Box)내 쿠퍼쌍(Cooper Pair) 전하의 양자상태로 양자정보를 인코딩

\* Transmon : Transmission Line Shunted Plasma Oscillation

\*\* CPB(Cooper Pair Box) : 조셉슨 접합을 형성하는 구조(부도체-초전도체-부도체)로 초전도 전류 전하인 쿠퍼쌍을 저장하고 있는 초전도 회로를 통칭(전하 큐비트(Charge Qubit)로 불리워 지기도 함)

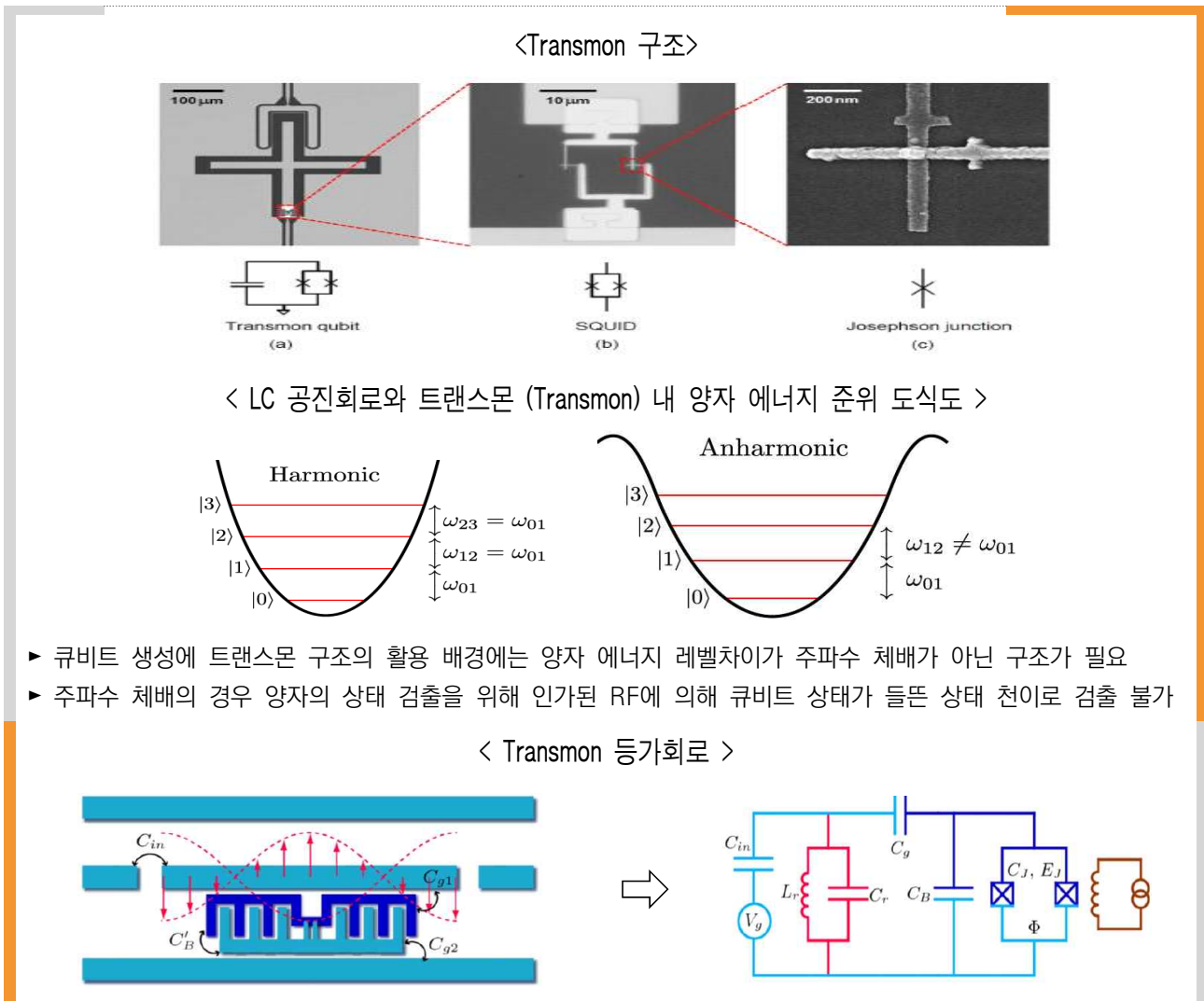
- SQUID\* 구조(조셉슨 접합 효과(Josephson Junction Effect)\*의 부조화(Anharmonic) LC 공진회로의 에너지 준위를 활용

\* SQUID : Superconducting Quantum Interference Device

\*\* 조셉슨 접합 효과 : 초전도 사이에 부도체를 두어도 전류가 흐르는 현상

- SQUID 구조 내 쿠퍼쌍 전하에 RF/Microwave를 인가하여 전하상태 에너지 준위로 양자정보를 인코딩

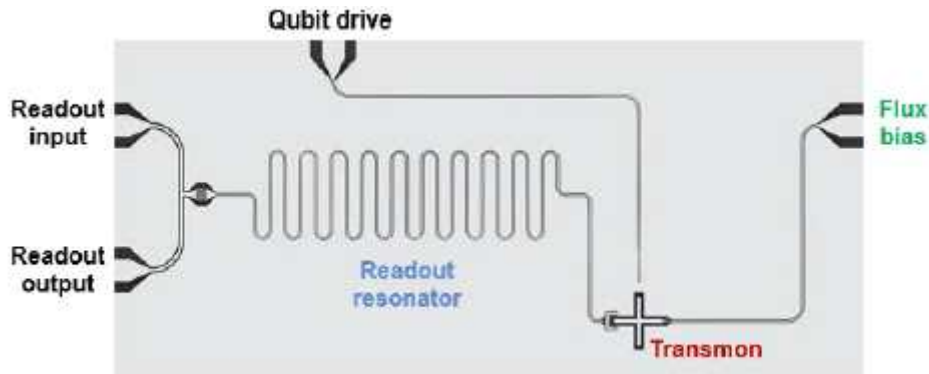
그림23 | Transmon 구조



자료 : An Introduction to the Transmon Qubit for Electromagnetic Engineers(arXiv, 2021)/Quantum Computing Circuits and Devices(arXiv, 2019)

- 트랜스몬 큐비트 검출은 RF/Microwave의 큐비트 제어외에 양자상태 측정을 위해 공진기를 통해 인가되어 양자 상태를 판독

#### 그림24 | 트랜스몬 큐비트 검출을 위한 공진기(Resonator) 예시



Qubit Drive : 양자 상태 제어를 위해 RF/Microwave를 인가

Flux Bias : 트랜스몬 공진 주파수 제어

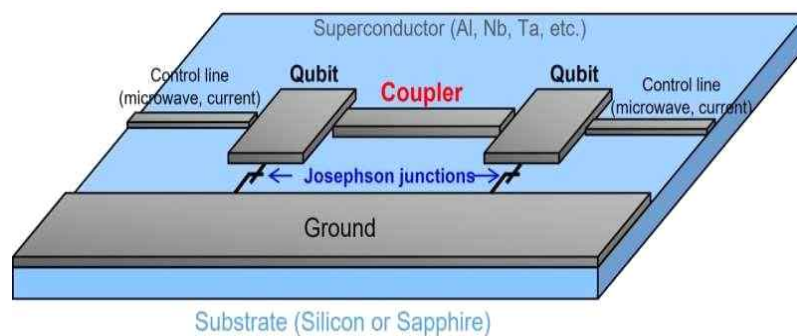
Readout Input : 양자 상태 검출을 위해 RF/Microwave를 인가

자료 : An Introduction to the Transmon Qubit for Electromagnetic Engineers(arXiv, 2021)

- 트랜스몬 큐비트는 Silicon/Ion Trapp 큐비트에 비해 응답 특성이 빠른 (~ 100ns) 양자 게이트 구현이 장점이나, 짧은 결맞음 지속시간, 초전도 상태 유지를 위한 극저온(~ 20mK)과 큐비트간 커플링을 유지하기 위한 물리적 거리의 제한 등이 단점
- 큐비트 제어를 위해 RF의 인가는 인접 큐비트 상호간섭에 의한 에러를 유발하여, 이를 방지하기 위한 듀얼 구조의 트랜스몬과 응답속도\*가 빠른 연구 결과를 발표(도시바, '22.9)

\* 응답속도 : 24ns, 정확도 : 99.99%

#### 그림25 | 트랜스몬 큐비트 검출을 위한 공진기(Resonator) 예시

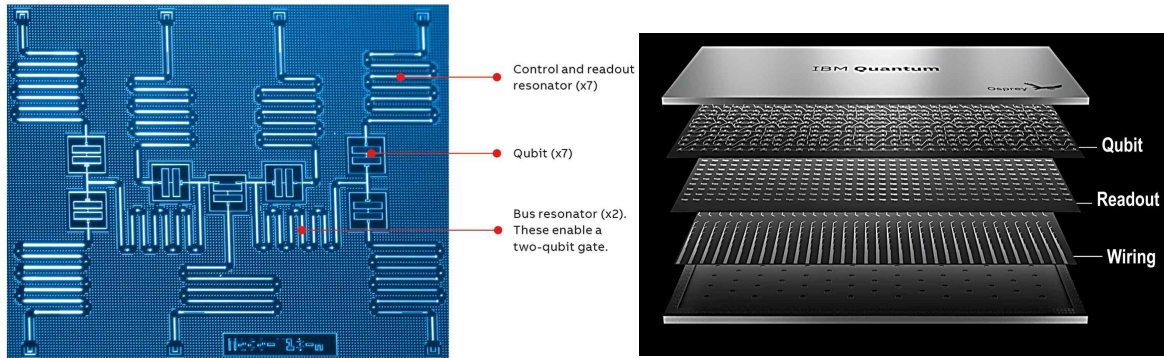


자료 : Double-transmon coupler will realize faster, more accurate superconducting quantum computers(phys.org, '22.9)

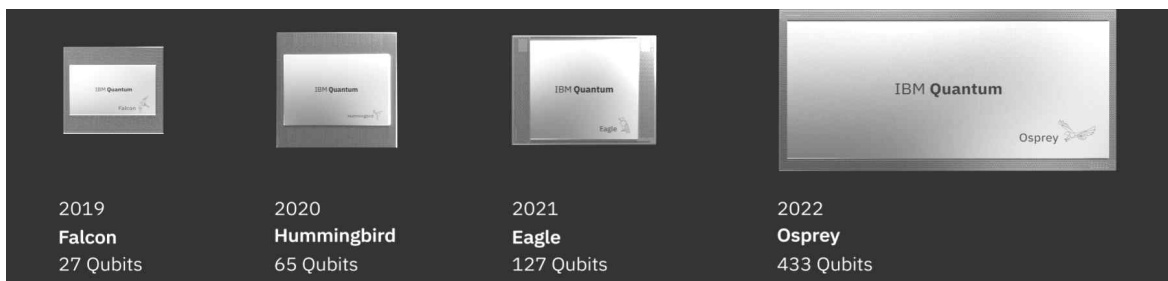
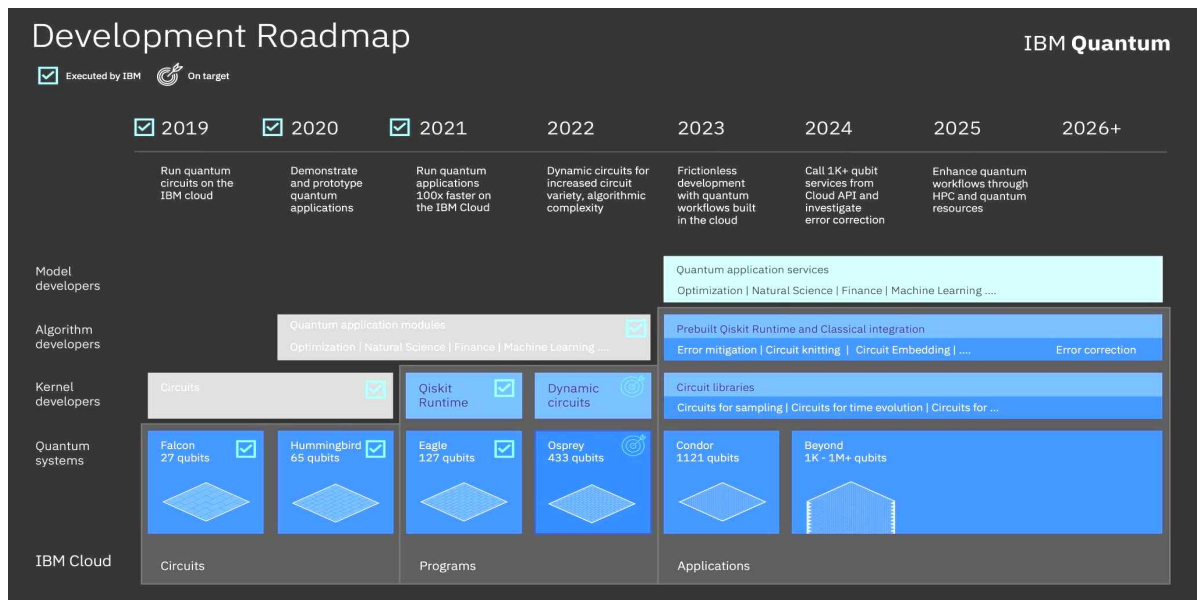
- IBM, '26년까지 백만개의 Qubit QPU개발을 위한 로드맵을 발표하고('21.2), 433개의 Qubit QPU(Osprey, '22.11)를 개발

그림26 IBM 개발 로드맵 및 개발 칩 추이

<IBM QPU의 트랜스몬과 공진기 구조/ OSPREY 적층 구조>



<IBM QPU 개발 로드맵>

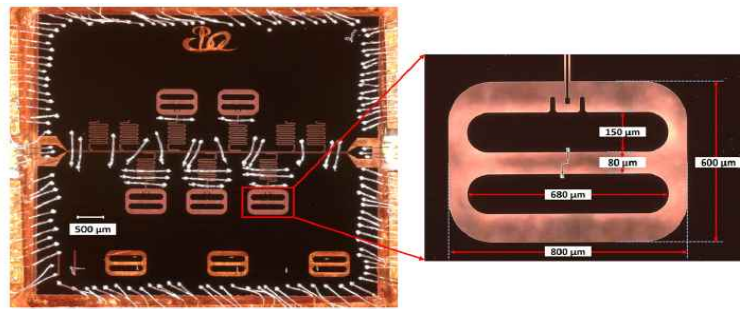


자료 : [hpcwire.com/2021/12/13/ibm-breaks-100-qubit-qpu-barrier-marks-milestones-on-ambitious-roadmap/](https://hpcwire.com/2021/12/13/ibm-breaks-100-qubit-qpu-barrier-marks-milestones-on-ambitious-roadmap/),  
<https://newsroom.ibm.com/2022-11-09-IBM-Unveils-400-Qubit-Plus-Quantum-Processor-and-Next-Generation-IBM-Quantum-System-Two>

- 최근 학계\*에서는 탄탈(Ta) 박막에 트랜스몬을 형성해 큐비트 지속시간  $\mu s \rightarrow ms$ 로 연장한 연구결과가 지속적으로 발표('21 ~ '22.1)

\* 베이징 양자정보 과학원(Beijing Academy of Quantum Information Sciences) : 0.5ms('22.1), 프린스턴대학교 : 0.3ms('21.1)

그림27 베이징 양자정보 과학원 개발 칩 구조



자료 : Towards practical quantum computers: transmon qubit with a lifetime approaching 0.5 milliseconds (npj, 2022.1)

- 대용량 큐비트 확장에는 실리콘 스핀 큐비트, 빠른 응답특성은 초전도 트랜스몬 큐비트, 재현성은 이온트랩 큐비트, 결맞음(coherence) 지속시간은 실리콘과 이온트랩 큐비트가 유리
- 실리콘/이온트랩/트랜스몬 모두 대용량 큐비트 확장에는 장단점이 존재하나, 반도체 공정의 성숙으로 미래에는 실리콘 큐비트 기반 양자 컴퓨팅이 유망할 것으로 예상

표2 Silicon/Ion Trap/Transmon Qubit 방식 비교

구분	Silicon Qubit	Ion Trap Qubit	Transmon Qubit
Qubit	Electron/Nuclear 스핀 상태	진공상태의 전자의 에너지 레벨	초전도체의 전하 상태
Qubit Energy	28 GHz	12 GHz (171Yb+), 411 THz (40Ca+)	5 GHz
Readout방식	spin-charge conversion	optical pumping	resonator
제어방식	RF/Microwave	Optical Fields	RF/Microwave
큐비트 결합 방식	exchange-interaction	trap vibrational modes	resonator
장점	소형, 고체상태, 코히런스 지속 시간	재현성, 코히런스 지속 시간	소형, 빠른 응답
구조 설계툴	CST Microwave, Ansys-HFSS TCAD, COMSOL	COMSOL	Ansys-HFSS AWR Microwave Office

자료: Quantum Computing Circuits and Devices(arXiv, 2019)

### 3 시사점 및 산업 활성화를 위한 정책 제언

- 단기적으로 초전도 트랜스몬/이온트랩 큐비트, 장기적으로는 실리콘 스핀 큐비트 기반의 프로세서가 대두될 전망
  - 게이트 응답속도와 확장성 측면에서 실리콘 스핀 큐비트의 장점과 반도체 공정의 지속적인 발전이 맞물려 이온트랩 및 초전도 트랜스몬 큐비트와 대등한 위치로 발전할 것으로 전망

표 3 주요 큐비트 구현 방식에 따른 사양 비교

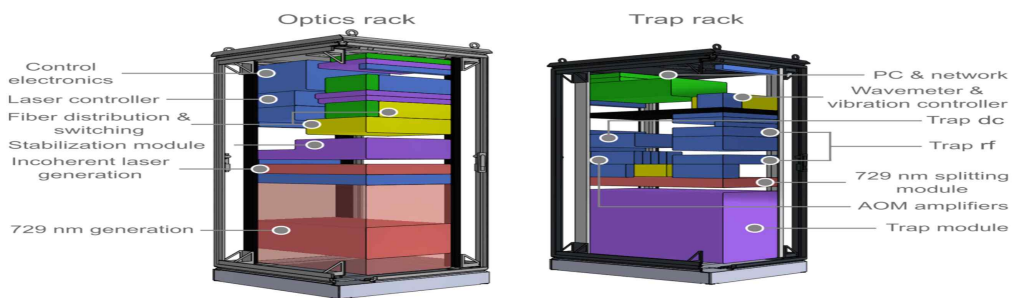
구분	이온트랩	초전도	실리콘	광
코히런스 지속시간	~50s, (1.5h*)	50 ~ 200 $\mu$ s	1~10s	150 $\mu$ s
Gate 정확도	~99.9%	99.4	90	99
Gate 응답속도	3 ~ 50	10 ~ 50	1ns	1 ~ 10ns
확장성 난이도	중	중/하	하	하

자료: Quantum Computing: A Taxonomy, Systematic Review and Future Directions(arXiv, 2020)

\* Single ion qubit with estimated coherence time exceeding one hour(Nature communication, 2021)

- 양자 컴퓨팅은 공학과 기초 과학이 융합된 토털 패키지 분야로 통합 사고가 가능한 인재가 필요
  - 양자 컴퓨터 구현에는 양자물리 외 반도체, 전파, SW, 컴퓨터 공학, 광공학, 진공 기술 등이 복합적으로 필요하므로 기초과학과 공학지식이 겸비된 인재양성이 필요

그림28 양자 컴퓨팅 구조 예시



자료 : wikipedia

- 양자 컴퓨팅 기술은 개발 초기 단계로써, 지속적이고 끊임없는 연구지원이 필요
  - 양자 컴퓨팅 기술은 양자 알고리즘, 큐비트의 코히런스 지속성, 큐비트 구성 등 많은 세부 기술에서 완성되어야 할 과제가 산적한 상태로 단기적인 성과보다 장기적인 관점에서 연구지원이 필요

- 정보통신기획평가원의 「ICT SPOT ISSUE」 저작물은 공공누리 “출처표시 - 상업적 이용 금지” 조건에 따라 이용할 수 있습니다.
- 본 보고서의 내용은 저자의 주관적인 의견으로 정보통신기획평가원의 공식적인 입장이 아님을 밝힙니다.