양자컴퓨터

DOI: 10.3938/PhiT.23.039

임 현 식

Quantum Computing

Hyunsik IM

In this article, some fascinating things that the quantum computer will make possible are introduced, and an explanation of the real significance of the puzzling word “quantum” will be given. A quantum computer is not a machine that we can expect to be realized any day soon. Nevertheless, the realization of a quantum computer will affect our everyday life, and quantum computers will eventually surpass the information-processing capacity of existing computers as the number of quantum bits (Qubits) steadily increases.

양자: Quantum의 의미는 무엇인가?

양자컴퓨터에서의 “양자: quantum”는 물리학의 기본 이론인 양자역학에서 유래한 것으로, 물질의 입자성과 파동성 특성을 기술하는 물리량의 최소 단위를 나타낸다. 양자컴퓨터는 양자역학에서 예측하는 가장 특이한 특성인 상태중첩(superposition)과 얽힘(entanglement)을 이용하여 연산을 효율적으로 수행하는 기계 장치이다. 이러한 양자중첩과 얽힘 상태를 만드는 방법으로는 원자를 사용하는 방법에서부터 최첨단 반도체 공정을 이용하여 제작한 소자까지 다양한 방법이 있으며, 두 개의 서로 다른 에너지 상태의 중첩을 만드는 양자컴퓨터의 최소 구성단위를 quantum bit(qubit)이라 한다.

저자약력

임현식 교수는 1999년 Oxford 대학에서 2-차원 반도체 터널 접합에서의 수송 현상 연구로 박사 학위를 받고 영국 Clarendon 연구소 및 일본 동경대에서 연구원을 거쳐 2001년부터 동국대학교에 재직 중이다. 귀국 후 현재까지 일본 NEC 및 이화학연구소(RIKEN) 양자 컴퓨터 연구실과 공동으로 양자컴퓨터 기반 기술 개발 및 기초 물성 연구를 수행하고 있다. (hyunsik7@dongguk.edu)

양자 상태를 이용한 컴퓨터 개발의 시초

양자상태가 컴퓨터 연산에 적용될 수 있다는 아이디어는 1982년 Caltech의 Richard Feynman 교수가 구체적인 연산 방법은 제시하지 않았지만 양자역학적 상태가 컴퓨터 연산에 효율적으로 사용될 수 있음을 제시하였다. 3년 뒤인 1985년 Oxford 대학교 David Deutsch 교수가 양자상태를 이용한 데이터 처리가 이론적으로 가능하다는 것을 증명하는 획기적인 논문 “Quantum theory, the Church-Turing principle, and the universal quantum computer”을 발표하고 나서 양자컴퓨터 연구가 세계적으로 큰 주목을 받게 되었고, 10년 후인 1994년 미국 AT & T의 Peter Shor가 구체적인 양자 알고리즘을 제시하면서 이 분야가 물리학의 양자역학에 기반한 새로운 전산학 연구 분야로서 확립되게 된다.^[1,2] 구체적인 양자 알고리즘이 소개된 이후 양자역학적인 원리(중첩 및 얽힘)를 이용하여 정보를 처리할 수 있는 실험장치는 (즉 현재의 컴퓨터 회로를 구성하는 반도체 트랜지스터에 해당하며 보통 앞에서 설명한 qubit에 해당) 1998년 미국 미시간 대학교에서 광-기술을 이용하여 보고하였고,^[3] 그 다음 해인 1999년 일본 NEC 기초 연구소의 Tsai 박사 그룹에서 초전도체 나노 소자를 이용한 qubit 개발을 발표한다.^[4] 이 초전도 qubit 연구의 획기적인 성과는 실제 양자컴퓨터를 개발하고 실용화하기 위해서는 qubit이 10^4 개 이상 집적화된 회로가 필요한데 처음으로 이러한 응집물질 qubit 개발 가능성을 확인하였다는 것이다. 2000년대 들어오면서 미국, 유럽 등에서도 초전도체 및 반도체 나노 소자를 이용하여 다양한 qubit 개발에 성공하였고 현재는 2개 이상의 qubit을 이용하여 양자상태를 제어할 수 있는 소

REFERENCES

- [1] David Deutsch, Proc. R. Soc. London (A) **400**, 97 (1985).
- [2] P. Shor, Proc. 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (IEEE Computer Society Press, 1994), p. 124.
- [3] N. H. Bonadeo, et al., Science **282**, 1473 (1998).
- [4] Y. Nakamura, et al., Nature **393**, 786 (1999).

Fig. 1. Various qubits. [지금까지 개발된 다양한 qubit.]

자(Controlled-NOT)까지 개발되었다.^[5-7]

참고로, 양자상태를 전산(computing) 이외에 이용하는 다른 분야는 빛의 양자 단위인 광자(photon)를 이용한 양자암호통신(quantum cryptographic communications)이며 양자컴퓨터와 양자암호통신은 기본적으로 양자역학의 중첩현상을 이용한다는 면에서 공통점을 가지고 있다.

양자상태 중첩과 얽힘

양자컴퓨터의 연산 원리를 이해하기 위해서는 양자 중첩과 얽힘 현상을 이해해야 한다. 이 두 가지 핵심 현상은 고전 물리로는 설명할 수 없고 개념적으로도 이해하기 쉽지 않다. 양자 중첩에 대한 유명한 역사적 일화는 1954년 “슈뢰딩거의 고양이”로 잘 알려져 있다. 슈뢰딩거는 살아 있는 고양이의 생사가 양자역학적 확률로 주어지는 미시적인 사건(알과 입자 붕괴)과 연결되었다고 가정하면 고양이의 생사 여부 또한 확률로 주어져야 한다고 설명한다. 언뜻 보기엔 좀 이상한 결론인 것 같지만 양자역학적 해석에는 어긋나지는 않는다. 양자 중첩을 재미있게 이해하기 위해 그림 2는 고양이 대신 거북이를 사용했다. 거북이가 살아있는 상태와 죽은 상태를 각각 양자상태라고 가정하면 이 거북이의 양자 상태 Ψ 는 살아있는 상태 $|live\rangle$ 와 죽은 상태 $|dead\rangle$ 의 확률적인 합으로 기술할 수 있다. 즉, $\Psi = \alpha |live\rangle + \beta |dead\rangle$ 이며 α 와 β 는 살아있는 상태와 죽은

양자 중첩 (Superposition)

Fig. 2. Schematic description for quantum superposition. The quantum superposition is described by a turtle which is dead and live simultaneously. In real qubits, the quantum superposition is realized by using two different quantum states (for example, ground and excited states). [도식적인 양자 중첩(superposition) 이해. 양자 중첩을 거북이의 생사 확률로 기술하였으나 실제 qubit에서는 두 개의 다른 양자상태(예, ground state와 excited state)를 가지고 양자 중첩을 만든다. 즉 전자 하나가 확률적 기대 값을 가지고 동시에 ground state와 excited state에 존재하게 할 수 있다.]

양자 얽힘 (Entanglement)

Fig. 3. Schematic description for quantum entanglement. If two quantum superpositioned objects affect each other, they are quantum-entangled. In solid state devices, the entanglement can be done by exchange interaction between two qubits through capacitance and inductance. [도식적인 양자 얽힘(entanglement) 이해. 양자 중첩된 거북이 두 개를 상호작용할 수 있게 만듦으로 양자 얽힘 상태를 만들 수 있다. 실제 전자 소자 qubit의 경우 양자 얽힘 상호작용을 만드는 방법은 두 qubits에서의 캐패시턴스나 인덕턴스 상호작용이 될 수 있다.]

상태를 기술하는 확률계수이다. 이러한 양자 중첩 개념이 양자 컴퓨터 작동에 핵심 원리로 사용되는 이유는 각기 다른 상태가 동시에 존재할 수 있으며 이러한 다른 양자상태를 한 번의 작용으로 동시에 연산에 적용하면 그만큼 연산속도를 빨리 할 수 있다는 데 있다.

양자컴퓨터가 기존 컴퓨터보다 월등한 연산속도를 가지는 이

REFERENCES

- [5] Y. Pashkin, *et al.*, Nature **421**, 823 (2003).
- [6] T. Yamamoto, *et al.*, Nature **425**, 941 (2003).
- [7] T. H. Taminiau, *et al.*, Nature Nanotechnology **9**, 171 (2014).

Fig. 4. Comparison between classical and quantum bits. N-qubits can have exponentially increased data bit due to the quantum superposition and entanglement. If we use these features effectively in algorithms, we improve data processing speed considerably with increasing entangled qubit number. [고전 bit과 qubit 비교. 동그라미 한 개가 bit 또는 qubit을 나타낸다. Qubit의 경우 중첩 및 양자얽힘 현상으로 인해 N개의 qubit이 가질 수 있는 정보는 지수함수적으로 늘어나며 한 개의 qubit 상태가 변할 때마다 다른 qubit들의 상태도 같이 변하기 때문에 이러한 특성을 이용한 알고리즘을 잘 만든다면 qubit 수를 늘림에 따라 정보처리 속도를 지수함수적으로 빠르게 할 수 있다.]

유는 양자 중첩뿐만 아니라 양자상태 얽힘이라는 기이한 양자 역학적 현상을 이용하기 때문이다. 그림 3은 양자 얽힘 현상을 양자 중첩된 두 개의 거북이를 이용하여 설명하고 있다. 거북이 1과 거북이 2는 각각 생사가 양자 중첩된 거북이로 서로의 생사 여부가 다른 거북이의 생사에 영향을 준다. 즉, 각각의 양자상태가 서로 얽혀 있다. 다시 말하면 거북이 1의 생사 확률이 거북이 2의 생사 확률에 영향을 주고 역도 성립한다. 따라서 양자 중첩된 거북이가 서로 얽혀 있으면 이 둘의 양자상태는 하나의 상태함수 ψ_{12} 로 기술되고 총 4가지의 양자상태가 가능하며 각각의 상태확률 계수는 a, b, c, d로 주어진다. 따라서 이러한 양자 얽힘 상태로 상호작용하는 qubit의 수를 많이 만들고 하나의 qubit 상태를 바꾸어 주면 양자 얽힘으로 연결된 다른 모든 qubit의 양자상태 또한 자동적으로 바뀌며 양자 알고리즘을 사용하여 이러한 상태변화를 목적에 맞게 처리하면 동시에 엄청 많은 정보처리를 수행할 수 있다. 이러한 양자 중첩과 얽힘 현상을 이용한 양자컴퓨터 고유의 정보처리 능력을 양자병렬성(quantum parallelism)이라 한다.

전자소자를 이용한 qubit 제작, 양자 중첩 및 얽힘 실현

개념적으로 양자컴퓨터가 고전 컴퓨터보다 정보처리 속도가 빠른 이유를 양자병렬성(quantum parallelism) 특성으로 살펴 보았다. 즉, 양자컴퓨터가 가지는 정보처리 능력은 상호 얽힘

Fig. 5. (a, b) Cooper-pair box single qubit and entangled two qubits (Refs. [4,5]). (c) Measurement of superposition in a Cooper-pair box single qubit. (d) Physics of quantum entanglement in entangled two Cooper-pair box qubits. [(a, b) 초전도체 터널 접합으로 제작된 single qubit 및 entangled two qubits (일본 NEC 제작. Refs. [4,5]). (c) Cooper-pair box qubit에서의 중첩 현상 측정. (d) Entangled two Cooper-pair box qubits에서 캐패시터에 의해 양자 얽힘이 이루어지는 원리.]

으로 연결된 양자상태를 양자 알고리즘을 이용하여 한 번의 연산 명령으로 모든 양자상태를 변화시킬 수 있다는 것이 핵심이다. 그러나 이러한 양자상태가 중첩된 qubit이나 두 qubit 간의 양자 얽힘 상태를 만드는 것은 쉽지 않다. 여기서는 초전도체 터널 소자를 이용한 qubit 및 두 qubits의 얽힘 구현을 간단히 소개하겠다.

그림 5(a)는 초전도 상태의 알루미늄 쿠퍼쌍(Cooper-pair: 초전도체에서 전하를 운반하는 두 개의 전자로 이루어진 쌍) 트랜지스터를 이용한 qubit 소자를 보여준다. 금속이나 반도체가 0-차원의 채널(양자점)을 가진 트랜지스터 구조가 되면 소스 전극에서 (그림 5(a)에서는 reservoir로 표시) 양자점으로 들어오는 전자는 양자점 내 이미 존재하는 전자들에 의해 전기적 척력을 느끼게 되고, 이것을 상쇄하기 위해 게이트를 통해 퍼텐셜을 인가해 주어야 한다. 그러나 0-차원의 채널을 가진 (그림 5(a)에서는 box에 해당) 초전도체 쿠퍼쌍 트랜지스터인 경우 쿠퍼쌍이 터널링 장벽과 상관없이 초전도 전류를 발생시킬 수 있고, 이러한 전기적 척력과 초전도 고유의 특성 때문에 쿠퍼쌍($2e$)이 초전도체 소스 전극에서 상자 안으로 들어가기 위한 게이트 전압의 $1/2$ 값을 굉장히 빨리 상자에 인가하게 되면 상자 안에 쿠퍼쌍은 상자에 존재할 수도 있고 초전도체 소

스 전극에 존재할 수 있게 된다. 여기서 쿠퍼쌍이 상자 안에 있는 상태를 “1”로 초전도체 소스 전극에 있을 때를 “0” 상태로 정의한다면 이 두 상태는 “0”과 “1” 상태를 주기적으로 변화하며 시간에 따른 상태를 다음과 같이 표현할 있다. $\psi = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$. 여기서 α, β 는 “0”과 “1” 상태의 확률을 결정하는 계수이며 $\alpha^2 + \beta^2 = 1$ 로 주어진다. 따라서 쿠퍼쌍 트랜지스터의 양자상태는 “0”과 “1” 정보상태를 동시에 가질 수 있으며 이러한 현상을 양자역학적으로 두 상태가 중첩(superposition)되었다고 한다. 이러한 “0”과 “1”의 중첩된 상태를 읽는 방법은 쿠퍼쌍 상자의 한쪽에 저항이 높은 측정 접합을 연결해서 (그림 5(a)에서는 probe에 해당) 전류를 측정하면 된다. 즉 쿠퍼쌍 상자 안에 쿠퍼쌍 상태가 “1”에 가까우면 측정 접합을 통한 전류의 양은 최대가 될 것이고 “0”인 상태이면 누설 전류는 최소가 될 것이며 이러한 “0”과 “1” 상태는 주기적으로 반복하므로 누설 전류 또한 시간에 따라 주기적으로 변화하는 모양을 가지게 된다(그림 5(c)의 전류 oscillation에 해당). 따라서 위의 쿠퍼쌍 트랜지스터를 이용한 qubit은 하나의 예에 불과하고 다양한 구조와 물질에서 양자상태 two-level system을 만들 수 있다면 이것은 qubit이 될 수 있다.

일단 중첩을 이용하여 단일 qubit을 성공적으로 만들었다 하더라도 양자 컴퓨터가 일반 컴퓨터보다 엄청난 속도의 연산 능력을 가질 수 있는 기본 조건으로 qubit들 간의 상호 작용이 형성되어야 한다. 이러한 qubit들 간의 상호 작용을 양자 얽힘이라고 부른다. 이러한 얽힘 현상이 양자컴퓨터의 핵심 동작 원리가 되는 이유는 N개의 독립된 qubit이 얽힘 상태가 되면 N개의 qubit은 2^N 개의 정보를 만들 수 있기 때문이다(그림 5(b) 참조). 즉 기존의 컴퓨터에서는 N개의 bit가 하나의 정보를 만들고 공간적으로 배열된 각각의 bit를 바꾸어 줌으로써 새로운 정보를 처리하게 된다. 고전 컴퓨터의 bit는 “0” 또는 “1”만의 정보를 가지지만 그러나 N개의 qubit으로 이루어진 양자컴퓨터에서의 각각의 qubit은 양자 얽힘 현상으로 인하여 2^N 개의 정보를 가질 수가 있게 된다. 따라서 기존의 컴퓨터에서 각각의 bit 변화는 다른 bit에 영향을 주지 않지만 양자컴퓨터에서는 각각의 qubit 상태변화는 다른 qubit의 상태를 동시에 변화시킬 수 있고 이러한 특성을 적절히 이용한 양자 알고리즘을 개발하면 연산속도를 엄청나게 빠르게 향상시킬 수 있게 된다. 여기서 얽힘이라는 표현은 N개의 qubit으로 이루어진 배열에서 각각의 qubit은 순수한 자기만의 “0” 또는 “1”이 아닌 다른 “N-1”개의 qubit 상태에 영향을

Fig. 6. Low-temperature low-noise transport measurement system which is used to measure the characteristics of superconducting Cooper pair box charge qubits. [일본 NEC 기초연구소에서 charge qubits의 양자 중첩 및 얽힘 특성을 측정할 때 사용된 장치(극저온 전류-전압 측정 시스템).]

받는다. 즉 각각의 qubit을 기술하는 상태함수는 다음과 같이 N개의 상태 원소를 가진 파동함수로 표현되며, $\alpha |1001101\dots\dots\dots 1101\rangle$, 하나의 qubit 상태가 변하게 되면 다른 N-1개의 qubit 상태도 동시에 변하게 된다. 기술적으로 쿠퍼쌍 트랜지스터로 만든 단일 qubit을 다른 qubit과 양자 얽힘 상태로 만드는 것은 간단하다. 그림 5(b)에서 알 수 있듯이 두 개의 qubit을 가까운 거리에 놓고 터널링 장벽을 이용해 연결시켜 주면 이 두 qubit은 캐패시터를 사이에 두고 연결된 것과 같으며 어느 한 쪽의 qubit 상태에 변화가 오면 다른 qubit은 주변의 캐패시턴스 변화를 감지하고 상태 변화에 영향을 받게 된다(그림 5(d) 참조).

위에서 설명한 초전도체 터널 소자 qubit 및 두 qubit간 양자 얽힘을 만드는 방법은 하나의 예에 불과하며 다양한 방법을 이용해 qubit 및 양자 얽힘을 만들 수 있다. 이러한 얽힘 현상을 이용한 양자컴퓨터만의 독특한 정보처리 방법을 위에서 설명한 양자병렬(quantum parallelism) 처리라고 한다. 요약하면 반도체 소자를 이용한 기존의 컴퓨터는 비록 반도체 자체의 특성은 양자역학적으로 이해해야 하지만 컴퓨터 동작 원리는 반도체 소자에서의 전압 입출력을 이용하여 논리회로를 구성하고 연산을 수행하기 때문에 양자역학적인 특성이 컴퓨터 동작원리와는 무관하게 된다. 그러나 양자컴퓨터의 경우 중첩 및 양자 얽힘 현상이 알고리즘을 수행할 때 직접 이용되기 때문에 동작원리 자체가 양자역학적인 현상이다.

Qubit을 설계하고 공정을 통해 제작하는 것만큼 qubit 연구 분야에서 어려운 점이 측정이다. 그림 6은 초전도 qubit 특성

을 측정하기 위한 dilution 냉각기 (25 mK) 및 미세전류 측정 장비 시스템이다. 제작된 qubit을 package에 넣고 극저온까지 내리기 위해 cold-finger에 장착한 다음 온도를 25 mK까지 내려 양자상태 중첩 및 얽힘 특성을 측정한다. Qubit 특성이 주변 환경 즉 decoherence에 크게 제한 받기 때문에 양자정보 특성 측정에서 중요함 점은 noise 및 외부 decoherence 요소로부터 qubit을 보호하는 것이다. 이러한 decoherence를 최소화하는 know-how는 qubit 연구를 성공적으로 수행하기 위해 필수적이며, 이러한 측정기술에 대한 기반 기술 연구/개발은 사용되는 dilution에 맞게 특별히 설계된 filter들과 각종 노이즈 제거 기술로 집약된다. 현 단계에서도 반도체공정 기술을 이용하여 많은 수의 qubit을 집적(integration)하고 양자 얽힘 상태를 만들 수 있다. 그러나 측정된 신호를 분석하고 처리할 수 있는 양자 알고리즘 기술이 아직 미흡하며 decoherence로 인해 지속된 연산처리를 수행하는데 큰 제약이 있다.

양자컴퓨터 구현을 위한 기술적 과제

양자컴퓨터 작동은 원리적으로 양자상태 중첩과 중첩상태들의 얽힘을 이용하고, 이러한 양자역학적 물성을 제어할 수 있는 소자를 만들면 양자컴퓨터를 구현할 수 있다는 것을 알았다. 그러나 실제 양자컴퓨터를 만드는 일은 생각처럼 쉽지 않고 현재 기술적으로 극복해야 할 문제점들이 많이 남아있다. 양자컴퓨터를 구현하기 위해서는 필수적으로 극복해야 할 기술적 문제점 및 기본 전제 조건들은 다음과 같다.^[8]

1. 가장 우선적으로 해결해야 할 문제점이 decoherence 시간이 긴 qubit을 개발하는 것이다. 여기서 decoherence라고 하면 qubit이 “0”과 “1” 사이의 정보상태를 계속 유지하는 시간으로 qubit의 상태를 제어하는데 걸리는 시간이 10 ms이고 decoherence 시간이 1 s라고 하면 qubit을 상태를 제어해서 연산을 수행할 수 있는 가능한 횟수는 $1\text{ s}/10\text{ ms} = 100$ 번으로 주어진다. 예를 들어 응집물질 (예, 초전도체, 반도체 등등) qubit의 decoherence의 원인은 박막, 터널 장벽, 기판 및 주변의 전자기적 환경 등이 있고, 이러한 decoherence의 원인을 밝히고 decoherence 시간을 늘리는 연구가 현 시점에서 가장 활발히 연구되고 있다.

2. Single shot measurement: 짧은 시간 동안에 qubit에서 “0” 또는 “1”의 양자상태를 읽어내는 측정기술은 (측정되는 물리량은 전류, 전하량, 저항 등 무엇이든 될 수 있다) 실제 양자컴퓨터를 개발하기 위해서 반드시 필요한 기술인데, 이를 “single shot measurement”라고 한다.

3. 에러 보정(Error correction): 양자컴퓨터에서 에러 보정이

란 양자컴퓨터에서 연산 처리되는 양자정보를 주변의 decoherence 환경과 양자 잡음(noise)으로부터 차단시키는 것이며, 양자정보 준비, 저장, 측정하는데 반드시 필요한 기술이다. 고전적인 에러 보정의 경우 정보의 중복 측정을 기반으로 하는데 (또는 정보 복제) 가장 간단한 에러 보정 방법은 연산처리되는 정보를 반복적으로 저장하고 확률적으로 가장 많이 측정된 값을 선택하면 된다. 그러나 양자정보의 경우 정보 복사가 불가능하다 (즉, 양자컴퓨터는 측정되는 정보가 확률적으로 주어지기 때문에 반복적으로 양자 정보를 측정해도 같은 정보 값이 나오지 않음을 기억하라). 따라서 양자 에러 보정의 경우 특정한 qubit의 양자정보를 양자 얽힘으로 연결된 다른 qubit에 분산하는 것이 가능하며 이러한 특성을 이용하여 에러 보정을 수행할 수 있고 양자 에러 보정을 수행하기 위한 양자 알고리즘도 중요하다.

4. 초기화: 양자 알고리즘을 수행하기 위해 각각의 qubit을 원하는 “0” 또는 “1” 상태로 만들 수 있는 기술이 필요한데 이를 초기화라고 한다.

5. 확장성(scalability): 실질적인 양자컴퓨터를 제작하기 위해서는 qubit의 수를 원하는 만큼 늘릴 수 있고 양자 얽힘 상태로 만들 수 있는 qubit 제작 기술이 필수적이다. 이온이나 분자, NMR 기술을 이용한 qubit은 긴 decoherence 시간 때문에 기초 양자 물성 연구에는 좋지만 확장성이 없어 양자컴퓨터 개발에 큰 제약 조건으로 작용한다.

양자컴퓨터 개발 전망 및 기대

응용학문의 발전 역사를 살펴보면 초기 연구는 물리나 화학 같은 기초과학에서 시작하여 물성 연구 및 원리에 대한 과학적인 체계가 잡히면 공학이란 테두리에서 독자적인 학문 분야로 분리 발전해 왔다. 현재 하드웨어와 소프트웨어를 포함한 양자컴퓨터 개발도 새로운 전산학 분야를 탄생시킬 수 있는 물리학의 최첨단 분야로서 미시적 양자역학 세계에서 한정적으로 다루던 개념인 중첩 및 양자 얽힘 현상을 새로운 컴퓨터 개발에 직접적으로 응용한다는 점에서 새로운 미지 세계를 탐구하고자 하는 젊은 물리학자들이 도전해볼 만한 분야이며, 현시점에서 양자컴퓨터가 언제 실용화가 될지는 예측할 수는 없지만 반도체 IC chip의 놀랄 만한 발전을 볼 때 양자컴퓨터도 미래에 우리가 가지고 있는 기술로 실현할 수 있을 것으로 기대한다.

REFERENCES

- [8] M. A. Nielsen and I. L. Chuang, *Quantum computation and quantum information* (Cambridge U. Press, 2000).