



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2022-0143858
(43) 공개일자 2022년10월25일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06N 10/70 (2022.01) G06N 10/20 (2022.01)
G06N 10/40 (2022.01) B82Y 10/00 (2017.01)
- (52) CPC특허분류
G06N 10/70 (2022.08)
G06N 10/20 (2022.01)
- (21) 출원번호 10-2022-7029635
- (22) 출원일자(국제) 2021년01월29일
심사청구일자 없음
- (85) 번역문제출일자 2022년08월26일
- (86) 국제출원번호 PCT/US2021/015903
- (87) 국제공개번호 WO 2021/155289
국제공개일자 2021년08월05일
- (30) 우선권주장
62/967,513 2020년01월29일 미국(US)
63/140,210 2021년01월21일 미국(US)
- (71) 출원인
사이퀀텀, 코퍼레이션
미국 94304 캘리포니아 팔로 알토 한센 웨이 700
- (72) 발명자
기메노-세고비아, 메르세데스
미국 캘리포니아 94306 팔로 알토 한센 웨이 700
사이퀀텀 코퍼레이션 내
루돌프, 테렌스
미국 캘리포니아 94306 팔로 알토 한센 웨이 700
사이퀀텀 코퍼레이션 내
니커슨 나오미
미국 캘리포니아 94306 팔로 알토 한센 웨이 700
사이퀀텀 코퍼레이션 내
- (74) 대리인
오병석, 함수옥

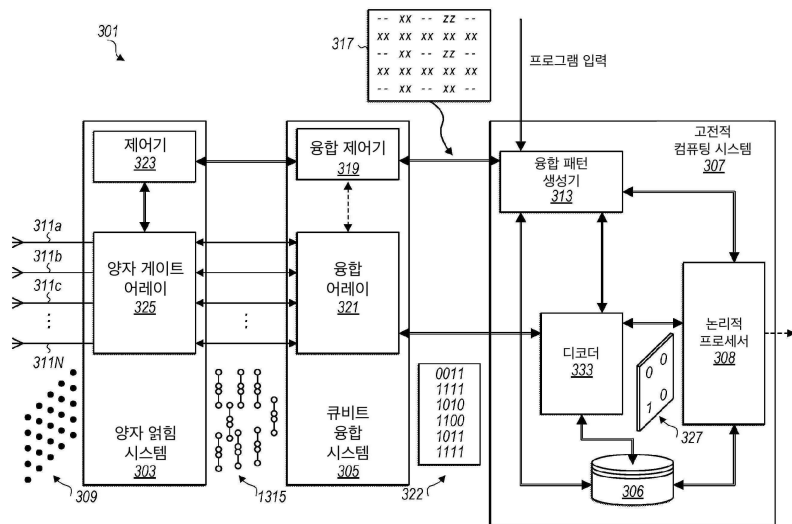
전체 청구항 수 : 총 16 항

(54) 발명의 명칭 융합 기반 양자 컴퓨팅

(57) 요약

방법은 복수의 양자 시스템을 수신하는 단계를 포함하고, 복수의 양자 시스템의 각각의 양자 시스템은 얽힌 상태의 복수의 양자 서브시스템을 포함하고, 복수의 양자 시스템의 각각의 양자 시스템은 서로 얽히지 않은 독립적인 양자 시스템이다. 방법은 복수의 양자 시스템 중 각각으로부터의 서로다른 양자 서브시스템에 대해 복수의 공동 측정을 수행하는 단계를 더 포함하고, 상기 공동 측정은 공동 측정 산출 데이터를 생성하고, 디코더에 의해, 공동 측정 결과 데이터에 기초하여 복수의 신드롬 그래프 값을 결정한다.

대표도



(52) CPC특허분류

G06N 10/40 (2022.01)

B82Y 10/00 (2013.01)

명세서

청구범위

청구항 1

방법으로서,

큐비트 융합 시스템(qubit fusion system)에 의해 복수의 양자 시스템(quantum system)을 수신하는 단계 - 상기 복수의 양자 시스템의 각각의 양자 시스템은 얽힌 상태(entangled state)의 복수의 양자 서브시스템(quantum sub-system)을 포함하고, 상기 복수의 양자 시스템의 각각의 양자 시스템은 서로 얽히지 않은 독립적인 양자 시스템임. - ;

상기 큐비트 융합 시스템에 의해, 상기 복수의 양자 시스템의 각각의 양자 시스템으로부터 서로다른 양자 서브시스템에 대한 복수의 공동 측정(joint measurement)을 수행하는 단계 - 상기 공동 측정은 공동 측정 산출 데이터(outcome data)를 생성함 -; 및

디코더(decoder)에 의하여, 상기 공동 측정 산출 데이터에 기초하여 복수의 신드롬 그래프(syndrome graph) 값을 결정하는 단계

를 포함하는 방법.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 공동 측정을 수행하는 단계는 융합 오퍼레이션(fusion operation)을 수행하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 3

제1항에 있어서, 상기 공동 측정을 수행하는 단계는 타입 II 융합 오퍼레이션을 통해 파괴적 공동 측정을 수행하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 4

제1항에 있어서, 상기 복수의 양자 시스템의 각각의 양자 시스템으로부터 서로다른 양자 서브시스템에 대한 복수의 공동 측정을 수행하는 단계는, 상기 큐비트 융합 시스템에 의해 수신된 복수의 양자 서브시스템의 서브세트(subset)에 대해서만 복수의 공동 측정을 수행하여, 측정되지 않은 양자 서브시스템의 서브세트를 생성하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 큐비트 융합 시스템에 의해, 제2 복수의 양자 시스템을 수신하는 단계 - 상기 제2 복수의 양자 시스템의 각각의 양자 시스템은 얽힌 상태의 제2 복수의 양자 서브시스템을 포함하고, 상기 제2 복수의 양자 시스템의 각각의 양자 시스템은 서로 얽히지 않은 독립적인 양자 시스템임. -;

측정되지 않은 양자 서브시스템의 서브세트를 수신하는 단계; 및

상기 큐비트 융합 시스템에 의해, i) 상기 복수의 제2 양자 시스템의 각각으로부터의 제2 양자 서브시스템과 ii) 상기 측정되지 않은 양자 서브시스템의 서브세트로부터의 각각의 양자 서브시스템 사이에서, 제2 복수의 공동 측정을 수행하는 단계 - 상기 제2 복수의 공동 측정은 제2 공동 측정 산출 데이터를 생성함. -

를 더 포함하는 방법.

청구항 6

시스템으로서,

복수의 융합 게이트를 포함하는 큐비트 융합 시스템 - 상기 큐비트 융합 시스템은 복수의 양자 시스템을 수신하

도록 구성되고, 상기 복수의 양자 시스템의 각각의 양자 시스템은 얽힌 상태의 복수의 양자 서브시스템을 포함하고, 상기 복수의 양자 시스템의 각각의 양자 시스템은 서로 얽히지 않은 독립적인 양자 시스템임. -;

상기 복수의 융합 게이트는 각각 상기 복수의 양자 시스템의 각각으로부터 서로다른 양자 서브시스템에 대한 공동 측정을 수행하도록 구성되며, 상기 공동 측정은 공동 측정 산출 데이터를 생성하며; 및

상기 큐비트 융합 시스템에 통신 가능하게 결합되고, 상기 공동 측정 산출 데이터를 수신하며 또한 상기 공동 측정 산출 데이터에 기초하여 복수의 신드롬 그래프(syndrome graph) 값을 결정하도록 구성된 디코더(decoder)를 포함하는 시스템.

청구항 7

제6항에 있어서, 상기 융합 게이트는 광자 회로(photonic circuit)를 포함하고, 상기 복수의 양자 시스템은 양자 서브시스템으로서 광자를 포함하고, 상기 광자 회로는 타입 II 융합 게이트를 포함하는, 시스템.

청구항 8

제6항에 있어서, 상기 공동 측정은 벨 기준(Bell basis)에 대한 2-입자 투영 측정(2-particle projective measurement)을 포함하는, 시스템.

청구항 9

제6항에 있어서, 상기 큐비트 융합 시스템의 적어도 하나에 결합되고 상기 복수의 양자 서브시스템의 서브셋을 수신하고 저장하는 양자 메모리(quantum memory)를 더 포함하는 시스템.

청구항 10

제9항에 있어서, 상기 양자 메모리는 광섬유(optical fiber)인, 시스템.

청구항 11

제9항에 있어서, 상기 양자 메모리는, i) 상기 복수의 양자 시스템의 각각으로부터의 양자 서브시스템과 ii) 상기 복수의 양자 서브시스템의 서브셋으로부터의 각각의 양자 서브시스템 사이에서 공동 측정이 수행되며, 이는 상기 양자 메모리에 저장되도록 상기 큐비트 융합 시스템에 결합되는, 시스템.

청구항 12

제6항에 있어서, 상기 복수의 양자 시스템을 생성하도록 구성된 큐비트 얽힘 시스템(qubit entangling system)을 더 포함하는 시스템.

청구항 13

제12항에 있어서, 상기 큐비트 얽힘 시스템은 양자 게이트 어레이(quantum gate array)를 포함하는, 시스템.

청구항 14

제13항에 있어서, 상기 큐비트 얽힘 시스템은 얽힌 상태 생성기(entangled state generator)에 광학적으로 연결된 광자 소스 시스템(photon source system)을 포함하는, 시스템.

청구항 15

제14항에 있어서, 상기 얽힌 상태 생성기는 광자 소스 시스템으로부터 출력 광자를 수신하고 상기 출력 광자를 얽힌 광자 상태(entangled photonic state)로 변환하도록 구성되는, 시스템.

청구항 16

제15항에 있어서, 상기 큐비트 얽힘 시스템은 상기 큐비트 융합 시스템에 광학적으로 결합되고 상기 융합 게이트의 입력에 얽힌 광자 상태를 제공하도록 구성된 복수의 출력 도파관(waveguide)을 포함하는, 시스템.

발명의 설명

기술분야

- [0001] 관련 출원에 대한 상호 참조
- [0002] 이 특허 출원은 2020년 1월 29일에 출원된 미국 가특허 출원 번호 62/967,513의 우선권을 주장하며, 또한 2021년 1월 21일에 출원된 미국 가특허 출원 번호 63/140,210의 우선권도 주장한다. 두 출원의 개시 내용은 모든 목적을 위해 그 전체가 참조에 의해 본원에 편입된다.
- [0003] 본 개시의 하나 이상의 실시예는 일반적으로 양자 컴퓨팅(quantum computing) 장치 및 방법에 관한 것이고, 더 구체적으로는 내결함성(fault-tolerant) 양자 컴퓨팅 장치 및 방법에 관한 것이다.

배경기술

- [0004] 내결함성 양자 컴퓨팅에서, 잘못된 연산 산출(computational outcome)로 이어지는 큐비트 오류(qubit error)의 누적을 피하기 위해 양자 오류 수정이 필요하다. 내결함성을 달성하는 한 가지 방법은 양자 오류 수정을 위해 오류 수정 코드(예를 들어, 토폴로지 코드(topological code))를 사용하는 것이다. 더 구체적으로는, 물리적 큐비트의 집합은 오류로부터 보호되는 단일 논리적 큐비트(logic qubit)를 인코딩하는 얽힌 상태(entangled state)(여기에서 오류 수정 코드(error correction code)라고도 함)로 생성될 수 있다.
- [0005] 일부 양자 컴퓨팅 시스템에서는 여러 큐비트의 클러스터 상태(cluster state) 또는 더 일반적으로 그래프 상태(graph state)를 오류 수정 코드로 사용할 수 있다. 그래프 상태는, 큐비트를 나타내는 노드(node)와 큐비트 간의 얽힘(entanglement)을 나타내는 에지(edge)를 포함하는 그래프로서 시각적으로 나타낼 수 있는, 고도로 얽힌 다중 큐비트(multi-qubit) 상태이다. 그러나 얽힌 상태의 생성을 억제하거나 한 번 창출된 얽힘을 파괴하는 다양한 문제는, 고도로 얽힌 양자 상태의 사용에 의존하는 양자 기술의 발전을 좌절시켜왔다.
- [0006] 또한 일부 큐비트 아키텍처(예를 들어, 광자 아키텍처(photonic architecture)에서 다중 큐비트의 얽힌 상태 생성은 성공 확률이 낮을 수 있는 본질적으로 확률적 프로세스이다.
- [0007] 따라서, 큐비트의 큰 클러스터 상태에 의존할 필요가 없는 양자 컴퓨팅을 위한 개선된 시스템 및 방법에 대한 요구가 남아 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

과제의 해결 수단

- [0008] 큐비트의 큰 클러스터 상태에 의존할 필요가 없는 양자 컴퓨팅을 위한 내결함성 시스템 및 방법의 실시예가 여기에 설명된다.
- [0009] 일부 실시예에 따르면, 방법은, 복수의 양자 시스템을 수신하는 단계 - 복수의 양자 시스템의 각각의 양자 시스템은 얽힌 상태의 복수의 양자 서브시스템을 포함하고, 복수의 양자 시스템의 각각의 양자 시스템은 서로 얽히지 않은 독립적인 양자 시스템임. - ; 복수의 양자 시스템의 각각으로부터의 서로다른 양자 서브시스템에 대한 복수의 파괴적 공동 측정(융합 오퍼레이션과 같은)을 수행하는 단계 - 파괴적 공동 측정은 서로다른 양자 서브시스템을 파괴하며 공동 측정 산출 데이터를 생성하고, 서로다른 양자 서브시스템으로부터의 양자 상태 정보를 복수의 양자 시스템으로부터 다른 측정되지 않은 양자 서브시스템으로 전송함 -; 및 공동 측정 산출 데이터에 기초하여 논리적 큐비트 상태를 결정하는 단계를 포함할 수 있다. 논리적 큐비트 상태는 내결함성 방식으로 결정될 수 있다.
- [0010] 일부 실시예에 따르면, 방법은, 복수의 양자 시스템을 수신하는 단계 - 복수의 양자 시스템의 각각의 양자 시스템은 얽힌 상태의 복수의 양자 서브시스템을 포함하고, 복수의 양자 시스템의 각각의 양자 시스템은 서로 얽히지 않은 독립적인 양자 시스템임. - ; 복수의 양자 시스템의 각각으로부터의 서로다른 양자 서브시스템에 대한 복수의 파괴적 공동 측정(융합 오퍼레이션과 같은)을 수행함으로써 논리적 큐비트 게이트를 수행하는 단계 - 파괴적 공동 측정은 서로다른 양자 서브시스템을 파괴하며 공동 측정 산출 데이터를 생성하고, 서로다른 양자 서브시스템으로부터의 양자 상태 정보를 복수의 양자 시스템으로부터 다른 측정되지 않은 양자 서브시스템으로 전송함 -; 및 공동 측정 산출 데이터에 기초하여 논리적 큐비트 게이트의 결과를 결정하는 단계를 포함할 수

있다. 논리적 큐비트 게이트의 결과는 내결함성 방식으로 결정될 수 있다.

- [0011] 일부 실시예에 따르면, 양자 컴퓨팅 장치는, 복수의 양자 시스템을 생성하는 큐비트 얽힘 시스템 - 복수의 양자 시스템의 각각의 양자 시스템은 얽힌 상태의 복수의 양자 서브시스템을 포함하고, 복수의 양자 시스템의 각각의 양자 시스템은 서로 얽히지 않은 독립적인 양자 시스템임. - ; 복수의 양자 시스템의 각각으로부터의 서로다른 양자 서브시스템에 대한 복수의 파괴적 공동 측정을 수행하는 큐비트 융합 시스템 - 파괴적 공동 측정은 서로다른 양자 서브시스템을 파괴하며 공동 측정 산출 데이터를 생성하고, 서로다른 양자 서브시스템으로부터의 양자 상태 정보를 복수의 양자 시스템으로부터 다른 측정되지 않은 양자 서브시스템으로 전송함 -; 및 공동 측정 산출 데이터에 기초하여 논리적 큐비트 상태를 결정하는 고전적 컴퓨팅 시스템을 포함할 수 있다.
- [0012] 일부 실시예에 따르면, 양자 컴퓨팅 장치는, 복수의 양자 시스템을 생성하는 큐비트 얽힘 시스템 - 복수의 양자 시스템의 각각의 양자 시스템은 얽힌 상태의 복수의 양자 서브시스템을 포함하고, 복수의 양자 시스템의 각각의 양자 시스템은 서로 얽히지 않은 독립적인 양자 시스템임. - ; 복수의 양자 시스템의 각각으로부터의 서로다른 양자 서브시스템에 대한 복수의 파괴적 공동 측정을 수행함으로써 논리적 큐비트 게이트를 수행하는 큐비트 융합 시스템 - 파괴적 공동 측정은 서로다른 양자 서브시스템을 파괴하며 공동 측정 산출 데이터를 생성하고, 서로다른 양자 서브시스템으로부터의 양자 상태 정보를 복수의 양자 시스템으로부터 다른 측정되지 않은 양자 서브시스템으로 전송함 -; 및 공동 측정 산출 데이터에 기초하여 논리적 큐비트 게이트의 결과를 결정하는 고전적 컴퓨팅 시스템을 포함할 수 있다.
- [0013] 일부 실시예에 따르면, 방법은 큐비트 융합 시스템에 의해 복수의 양자 시스템을 수신하는 단계를 포함하고, 복수의 양자 시스템의 각각의 양자 시스템은 얽힌 상태의 복수의 양자 서브시스템을 포함한다. 복수의 양자 시스템 중 각각의 양자 시스템은 서로 얽혀 있지 않은 독립적인 양자 시스템이다. 방법은 큐비트 융합 시스템에 의해, 복수의 양자 시스템 중 각각으로부터 서로다른 양자 서브시스템에 대한 복수의 공동 측정을 수행하는 단계를 더 포함한다. 공동 측정은 공동 측정 산출 데이터를 생성한다. 방법은, 디코더에 의해, 공동 측정 산출 데이터에 기초하여 복수의 신드롬 그래프 값을 결정하는 단계를 더 포함한다.
- [0014] 일부 실시예에 따르면, 공동 측정을 수행하는 단계는 융합 오퍼레이션을 수행하는 단계를 포함한다.
- [0015] 일부 실시예에 따르면, 공동 측정을 수행하는 단계는 타입 II 융합 오퍼레이션을 통해 파괴적인 공동 측정을 수행하는 단계를 포함한다.
- [0016] 일부 실시예에 따르면, 복수의 양자 시스템 중 각각의 양자 시스템으로부터 서로다른 양자 서브시스템에 대해 복수의 공동 측정을 수행하는 단계는, 큐비트 융합 시스템에 의해 수신된 복수의 양자 서브시스템의 서브세트에 대해서만 복수의 공동 측정을 수행하여, 측정되지 않은 양자 서브시스템의 서브세트를 생성하는 단계를 포함한다.
- [0017] 일부 실시예에 따르면, 방법은, 큐비트 융합 시스템에 의해, 제2 복수의 양자 시스템을 수신하는 단계를 더 포함하며, 여기서 제2 복수의 양자 시스템의 각각의 양자 시스템은 얽힌 상태의 제2 복수의 양자 서브시스템을 포함하고, 제2의 복수의 양자 시스템의 각각의 양자 시스템은 서로 얽히지 않은 독립적인 양자 시스템이다. 방법은, 측정되지 않은 양자 서브시스템의 서브세트를 수신하는 단계 및 큐비트 융합 시스템에 의해, i) 복수의 제2 양자 시스템의 각각으로부터의 제2 양자 서브시스템과 ii) 측정되지 않은 양자 서브시스템의 서브세트로부터의 각각의 양자 서브시스템 사이에서, 제2 복수의 공동 측정을 수행하는 단계를 더 포함한다. 제2 복수의 공동 측정은 제2 공동 측정 산출 데이터를 생성한다.
- [0018] 일부 실시예에 따르면, 시스템은 복수의 융합 게이트를 포함하는 큐비트 융합 시스템을 포함한다. 큐비트 융합 시스템은 복수의 양자 시스템을 수신하도록 구성되며, 복수의 양자 시스템의 각각의 양자 시스템은 얽힌 상태의 복수의 양자 서브시스템을 포함하고, 복수의 양자 시스템의 각각의 양자 시스템은 서로 얽히지 않은 독립적인 양자 시스템이다.
- [0019] 일부 실시예에 따르면, 복수의 융합 게이트는 각각 복수의 양자 시스템의 각각으로부터 서로다른 양자 서브시스템에 대한 공동 측정을 수행하도록 구성되며, 여기서 공동 측정은 공동 측정 산출 데이터를 생성한다.
- [0020] 시스템은, 큐비트 융합 시스템에 통신 가능하게 결합되고, 공동 측정 산출 데이터를 수신하며 또한 공동 측정 산출 데이터에 기초하여 복수의 신드롬 그래프 값을 결정하도록 구성된 디코더를 더 포함한다.
- [0021] 일부 실시예에 따르면, 융합 게이트는 광자 회로를 포함하고, 복수의 양자 시스템은 양자 서브시스템으로서 광자를 포함하며, 여기서 광자 회로는 타입 II 융합 게이트를 포함한다.

- [0022] 일부 실시예에 따르면 공동 측정은 벨 기준에 대한 2-입자 투영 측정을 포함한다.
- [0023] 일부 실시예에 따르면, 시스템은 큐비트 융합 시스템의 적어도 하나에 결합되고 복수의 양자 서브시스템의 서브셋을 수신하고 저장하는 양자 메모리를 더 포함한다.
- [0024] 일부 실시예에 따르면 양자 메모리는 광섬유이다.
- [0025] 일부 실시예에 따르면, 양자 메모리는 i) 복수의 양자 시스템의 각각으로부터의 양자 서브시스템과 ii) 복수의 양자 서브시스템의 서브셋으로부터의 각각의 양자 서브시스템 사이에서 공동 측정이 수행되며, 이는 양자 메모리에 저장되도록 큐비트 융합 시스템에 결합된다.
- [0026] 일부 실시예에 따르면, 시스템은 복수의 양자 시스템을 생성하도록 구성된 큐비트 얽힘 시스템을 더 포함한다.
- [0027] 일부 실시예에 따르면, 큐비트 얽힘 시스템은 양자 게이트 어레이를 포함한다.
- [0028] 일부 실시예에 따르면, 큐비트 얽힘 시스템은 얽힌 상태 생성기에 광학적으로 연결된 광자 소스 시스템을 포함한다.
- [0029] 일부 실시예에 따르면, 얽힌 상태 생성기는 광자 소스 시스템으로부터 출력 광자를 수신하고 출력 광자를 얽힌 광자 상태로 변환하도록 구성된다.
- [0030] 일부 실시예에 따르면, 큐비트 얽힘 시스템은 큐비트 융합 시스템에 광학적으로 결합되고 융합 게이트의 입력에 얽힌 광자 상태를 제공하도록 구성된 복수의 출력 도파관을 포함한다.
- [0031] 첨부된 도면과 함께 다음의 상세한 설명은 청구된 발명의 특성 및 이점에 대한 더 나은 이해를 제공할 것이다.

도면의 간단한 설명

- [0032] 본 개시의 국면들은 그 예시로서 설명된다. 비제한적이고 비소진적인 국면들은, 달리 명시되지 않는 한, 다양한 도면 전체에 걸쳐 유사한 참조 번호가 유사한 부분을 지칭하는, 다음 도면을 참조하여 설명된다.
 - 도 1a 내지 도 1c는 일부 실시예에 따른 물리적 큐비트의 얽힌 상태에 대한 클러스터 상태 및 대응하는 신드롬 그래프를 예시하는 도면이다.
 - 도 2는 하나 이상의 실시예에 따른 양자 컴퓨팅 시스템을 도시한 도면이다.
 - 도 3은 일부 실시예에 따른 양자 컴퓨팅 시스템을 도시한 도면이다.
 - 도 4는 일부 실시예에 따른 큐비트 얽힘 시스템의 예를 도시한 도면이다.
 - 도 5는 일부 실시예에 따른 큐비트 융합 시스템의 일례를 도시한 도면이다.
 - 도 6은 일부 실시예에 따른 내결함성 양자 연산(quantum computation)을 위한 디코더에 측정 산출(measurement outcome)을 제공하기 위해 융합 컨트롤러와 함께 작동하도록 구성된 융합 사이트(fusion site)의 하나의 가능한 예를 도시한 도면이다.
 - 도 7의 (a) 내지 (c)는 하나 이상의 실시예에 따른 내결함성 양자 연산을 위한 융합 기반 양자 컴퓨팅 방식을 예시한 도면이다.
 - 도 8a 내지 도 8b는 일부 실시예에 따른 융합 기반 양자 컴퓨팅을 위한 격자 준비 프로토콜(lattice preparation protocol)의 일례를 도시한 도면이다.
 - 도 9a 내지 도 9b는 일부 실시예에 따른 융합 기반 양자 컴퓨팅을 위한 격자 준비 프로토콜의 일례를 도시한 도면이다.
 - 도 10의 (a) 내지 (e)는 하나 이상의 실시예에 따른 융합 기반 양자 컴퓨팅을 위한 방법을 예시하기 위한 흐름도 및 예시적인 격자 준비 프로토콜을 도시한 도면이다.
 - 도 11a 내지 도 11e는 일부 실시예에 따른 광자 큐비트에 대한 유니터리 오퍼레이션(unitary operation)을 수행하기 위한 이중 레일 인코딩된(dual-rail-encoded) 광자 큐비트 및 광자 회로의 표현(representation)을 도시한 도면이다.
 - 도 12a 내지 도 12b는 일부 실시예에 따른 광자 큐비트에 대한 유니터리 오퍼레이션을 수행하기 위한 이중 레일

인코딩된 광자 큐비트 및 광자 회로의 표현을 도시한 도면이다.

도 13은 일부 실시예에 따라 하나 이상의 스프레더(spreader), 예를 들어 아다마르 게이트(Hadamard gate)를 구현하는 데 사용될 수 있는 빔 스플리터(beam splitter)의 광자 구현(photonic implementation)을 도시한 도면이다.

도 14는 일부 실시예에 따라 하나 이상의 스프레더, 예를 들어 아다마르 게이트를 구현하는 데 사용될 수 있는 빔 스플리터의 광자 구현을 도시한 도면이다.

도 15는 일부 이중 레일 인코딩된 광자 실시예에서 사용될 수 있는 벨 상태(Bell state) 생성기 회로의 한 예를 도시한 도면이다.

도 16은 일부 실시예에 따른 편광 인코딩(polarization encoding)을 위한 타입(Type) II 융합 회로의 예를 도시한 도면이다.

도 17은 일부 실시예에 따른 경로 인코딩(path encoding)을 위한 타입 II 융합 회로의 예를 도시한 도면이다.

도 18의 (a) 내지 (d)는 일부 실시예에 따른 클러스터 상태의 생성에서 융합의 효과를 도시한 도면이다.

도 19는 일부 실시예에 따른 편광 및 경로 인코딩에서 1회 부스트된(boosted) 타입 II 융합 게이트의 예를 도시한 도면이다.

도 20은 편광 인코딩에서 서로다른 측정 기준에 대한 타입 II 융합 게이트의 변형을 포함한 표를 도시한 도면이다.

도 21은 일부 실시예에 따른 경로 인코딩에서 측정 기준의 서로다른 선택을 위한 타입 II 융합 게이트의 광자 회로 변형의 예를 도시한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0033] 이제 실시예를 상세히 참조할 것이며, 그 예는 첨부 도면에 도시되어 있다. 다음의 상세한 설명에서, 다양한 설명된 실시예의 완전한 이해를 제공하기 위해 다수의 특정 세부사항이 설명된다. 그러나, 다양한 설명된 실시예가 이러한 특정 세부사항 없이 실시될 수 있다는 것이 당업자에게 명백할 것이다. 다른 예에서, 잘 알려진 방법, 절차, 구성요소, 회로 및 네트워크는 실시예의 국면들을 불필요하게 모호하게 하지 않도록 상세하게 설명되지 않았다.

[0034] 1. 양자 컴퓨팅 소개

[0035] 양자 연산(quantum computation)은 종종 물리적 큐비트(physical qubit)에서 오퍼레이션(operation)(또는 게이트(gate))이 수행되는 '회로 기반 양자 연산'(Circuit Based Quantum Computation, CBQC)의 프레임워크에서 고려된다. 게이트는, 단일 큐비트 유니터리(unitary) 오퍼레이션(회전(rotation)), CNOT 게이트와 같은 두 개의 큐비트 얽힘 오퍼레이션 또는 토폴리 게이트(Toffoli gate)와 같은 기타 다중 큐비트 게이트일 수 있다.

[0036] 측정 기반 양자 연산(Measurement Based Quantum Computation, MBQC)은 양자 연산을 구현하는 또 다른 접근 방식이다. MBQC 접근 방식에서, 연산은 먼저, 일반적으로 클러스터 상태(cluster state)라 불리는, 많은 큐비트의 특정 얽힌 상태(entangled state)를 준비하고, 다음으로 클러스터 상태에 대해 일련의 단일 큐비트 측정(single qubit measurement)을 수행하여 양자 연산을 시행하는 방식으로 진행된다. 이 접근 방식에서 단일 큐비트 측정의 선택은 양자 컴퓨터에서 실행되는 양자 알고리즘(quantum algorithm)에 의해 결정된다. MBQC 접근 방식에서는, 클러스터 상태를 신중하게 설계하고 이 클러스터 상태의 토폴로지(topology)를 사용하여 클러스터 상태를 구성하는 임의의 물리적 큐비트의 오류로 인해 발생할 수 있는 논리적 오류로부터 보호되는 논리적 큐비트를 인코딩함으로써, 내결함성(fault tolerance)을 달성할 수 있다. 실제로, 논리적 큐비트의 값은, 연산이 진행됨에 따라 클러스터 상태의 물리적 큐비트에 대해 수행된 단일 입자 측정의 결과(여기에서 측정 산출(measurement outcome)이라고도 함)를 기반으로 결정, 즉 판독될 수 있다.

[0037] 그러나 클러스터 상태 전반에 걸친 장거리 얽힘(long-range entanglement)의 생성 및 유지와 대규모 클러스터 상태의 후속 저장이 어려울 수 있다. 예를 들어, MBQC 접근 방식을 물리적으로 구현하려면, 수천 개 또는 그 이상의 서로 얽힌 큐비트를 포함하는 클러스터 상태를 준비한 다음 단일 큐비트 측정이 수행되기 전에 일정 기간 동안 저장해야 한다. 예를 들어, 단일 논리적 오류 수정 큐비트를 나타내는 클러스터 상태를 생성하기 위해, 기본 물리적 큐비트의 집합(collection) 각각이 $|+\rangle$ 상태에서 준비될 수 있고 각 물리적 큐비트 쌍 사이

에 제어된 위상 게이트(controlled-phase gate)(CZ) 상태가 적용되어 전체 클러스터 상태를 생성할 수 있다. 보다 명시적으로, 고도로 얽힌 큐비트의 클러스터 상태는, 각각 꼭지점(vertice) 및 에지(edge) 세트를 나타내는 V 및 E 를 가진 무방향 그래프 $G = (V, E)$ 로 설명할 수 있으며 다음과 같이 생성될 수 있다: 1) 모든 물리적

큐비트를 초기화하여 $|+\rangle$ 상태가 되게 하며, 여기서 $|+\rangle = \frac{|0\rangle+|1\rangle}{\sqrt{2}}$ 이며; 2) 큐비트의 각 쌍 i, j 에 제어된 위상 게이트(CZ)를 적용한다. 따라서 물리적 큐비트의 큰 얽힌 상태에 물리적으로 해당하는 임의의 클러스터 상태는 다음과 같이 설명할 수 있다:

$$|\Psi\rangle_{graph} = \prod_{(i,j) \in E} CZ_{i,j} |+\rangle^{\otimes |V|} \quad (1)$$

여기서 $CZ_{i,j}$ 는 제어된 위상 게이트 연산자이고 위에서 정의한 V 및 E 이다. 그래픽적으로, 수학적 식 (1)에 의해 정의되는 클러스터 상태는 물리적 큐비트($|+\rangle$ 상태에서 초기화됨)를 나타내는 꼭지점 V 와 이들 사이의 얽힘(즉, 다양한 CZ 게이트의 적용)을 나타내는 에지 E 를 포함하는 그래프로 나타낼 수도 있다. 내결함성 MBQC

방식과 관련된 경우와 같은 일부 경우에는, $|\Psi\rangle_{graph}$ 는 3차원 그래프의 형태를 취할 수 있다. 도 1a 및 도 7의 (c)에 도시된 예와 같이, 이러한 그래프는 반복되는 단위 셀로부터 형성되는 규칙적인 구조를 가질 수 있고, 따라서 종종 "격자(lattice)"로 지칭된다. 3차원 격자로 표현하면 이 격자의 2차원 경계(boundary)를 식별할 수 있다. 이러한 경계에 속하는 큐비트는 "경계 큐비트(boundary qubit)"라고 하고 다른 모든 큐비트는 "벌크 큐비트(bulk qubit)"라고 한다.

$|\Psi\rangle_{graph}$ 가 생성된 후, 서로 얽힌 큐비트의 이 큰 상태는, 예를 들어 격자 벌크의 모든 물리적 큐비트에 대해 X 측정을 수행하고 경계 큐비트에 대해 Z 측정을 수행함으로써, 안정기 측정(stabilizer measurement)이 수행될 수 있을 만큼 충분히 오래 보존되어야 한다.

도 1a는 라우센도르프 등(Raussendorf et al.)이 소개하고 Robert Raussendorf, Jim Harrington, and Kovid Goyal. A., Fault-Tolerant One-Way Quantum Computer, Annals of Physics, 321(9):2242-2270, 2006에서 더 상세히 설명된 바와 같이 일반적으로 라우센도르프 격자(Raussendorf Lattice)라고 불리는 토폴로지 클러스터 상태(topological cluster state)로서, MBQC에서 사용될 수 있는 내결함성 클러스터 상태의 일 예를 도시한 도면이다. 클러스터 상태는 셀의 면과 에지에 물리적 큐비트(예를 들어, 물리적 큐비트 116)가 배열된 반복 격자 셀(예를 들어, 셀 120)의 형태이다. 물리적 큐비트 간의 얽힘은 물리적 큐비트를 연결하는 에지(예를 들어, 에지 118)로 나타내며, 각 에지는 수학적 식 (1)을 참조하여 위에서 설명한 바와 같이 CZ 게이트의 적용을 나타낸다. 여기에 도시된 클러스터 상태는 다수중 하나의 예시일 뿐이며, 본 개시의 범위를 벗어나지 않으면서 다른 토폴로지 오류 수정 코드(topology error correcting code)가 사용될 수 있다. 예를 들어, 국제특허출원 공개번호 WO/2019/173651에 개시된 것과 같은 볼륨 코드(volume code)가 사용될 수 있으며, 그 내용이 모든 목적을 위해 그 전체가 참조에 의해 본 명세서에 편입된다. 또한 국제특허출원 공개번호 WO/2019/178009에 기술된 비입방 단위 셀(non-cubic unit cell)에 기반한 코드가 본 개시의 범위를 벗어나지 않고 사용될 수 있으며, 그 내용이 모든 목적을 위해 그 전체가 참조에 의해 본 명세서에 편입된다. 또한, 여기에 나타낸 예는 3개의 공간 차원으로 표현되는 한편, 순수하게 공간적으로 얽힌 클러스터 상태에 기초하지 않고 오히려 2D 공간에서의 얽힘과 시간에서의 얽힘을 모두 포함할 수 있는 코드의 다른 구현으로부터도 동일한 구조를 얻을 수 있다: 예를 들어, 2+1D 표면 코드 구현 또는 다른 임의의 엮리상 코드(foliated code)를 사용할 수 있다. 이러한 코드의 클러스터 상태 구현을 위해, 내결함성 양자 연산에 필요한 모든 양자 게이트는 격자를 구성하는 물리적 큐비트에 대한 일련의 단일 입자 측정(single particle measurement)을 수행하여 구성할 수 있다.

도 1a로 돌아가면 라우센도르프 격자의 덩어리(chunk)가 표시된다. 이러한 얽힌 상태는 많은 얽힌 물리적 큐비트를 사용하여 하나 이상의 논리적 큐비트(즉, 하나 이상의 오류 수정 큐비트)를 인코딩하는 데 사용될 수 있다. 복수의 물리적 큐비트(예를 들어, 물리적 큐비트 116)의 단일 입자 측정 결과의 집합은 오류를 수정하고 디코더를 사용하여 논리적 큐비트에 대한 내결함성 연산을 수행하는 데 사용할 수 있다. 국제특허출원 공개번호 WO2019/002934A1에 기술된 바와 같은 유니온-파인드 디코더(Union-Find decoder)의 한 예와 함께 많은 디코더가 이용 가능하며, 이의 개시 내용은 모든 목적을 위해 그 전체가 참조에 의해 본 명세서에 편입된다. 당업자는, 단일 논리적 큐비트를 인코딩하는 데 필요한 물리적 큐비트의 수는 물리적 큐비트가 경험하는 물리적 오

류, 노이즈 등의 정확한 특성에 따라 달라질 수 있지만, 내결함성을 달성하기 위해, 현재까지의 모든 제안은 단일 논리적 큐비트를 인코딩하기 위해 수천 개의 물리적 큐비트의 얽힌 상태를 필요로 한다는 것을 이해할 것이다. 이러한 큰 얽힌 상태를 생성하고 유지하는 것은 MBQC 접근 방식을 실제로 구현하는 데 있어 핵심 과제로 남아 있다.

[0043] 도 1b 내지 1c는 논리적 큐비트의 디코딩이 라우센도르프 격자에 기반한 클러스터 상태에 대해 어떻게 진행될 수 있는지를 예시한다. 도 1a에 도시된 바와 같이, 클러스터 상태의 기하학적 구조는 도 1a의 클러스터 상태에 중첩되어 도시된 입방 격자(격자 셀 120)의 기하학적 구조와 관련되어 있다. 도 1b는 클러스터 상태의 각 물리적 큐비트의 상태가 측정된 후 단일 입자 측정 결과(입방 격자에도 중첩됨)를 나타낸 것으로, 측정 결과는 측정된 물리적 큐비트의 이전 위치에 배치되었다(명확성을 위해 표면 큐비트의 측정으로부터의 측정 결과만 표시됨).

[0044] 일부 실시예에서, 측정된 큐비트 상태는 모든 큐비트가 측정된 후 1 또는 0의 수치 비트 값(numerical bit value)으로 표현될 수 있으며, 예를 들어 x 기준으로, 1 비트 값은 +x 측정 산출에 대응하고 0 비트 값은 -x 측정 산출에 대응한다(또는 그 반대). 큐비트에는 두 가지 타입이 있는데, 단위 셀의 예시에 있는 큐비트(예를 들어, 예지 큐비트 122)와 단위 셀의 면에 있는 큐비트(예를 들어, 면 큐비트 124)이다. 경우에 따라, 큐비트의 측정값을 얻지 못하거나 큐비트 측정의 결과가 유효하지 않을 수 있다. 이러한 경우에, 대응하는 측정된 큐비트의 위치에 할당된 비트 값이 없지만, 대신 여기에서 그 산출은, 예를 들어 굵은 선(126)으로 예시된, 소거(erasure)로 지칭된다. 누락된 것으로 알려진 이러한 측정 산출은 디코딩 과정에서 재구성될 수 있다.

[0045] 물리적 큐비트의 오류를 식별하기 위해, 물리적 큐비트의 측정으로 인한 측정 산출의 집합으로부터 신드롬 그래프를 생성할 수 있다. 예를 들어, 각 예지 큐비트와 연관된 비트 값들은, 도 1b에 도시된 바와 같이, 각각의 예지들의 교차점으로부터의 귀결인 꼭지점(예를 들어, 꼭지점 128)과 연관된 신드롬 값(syndrome value)들을 창출하기 위해 결합될 수 있다. 여기에서 패리티 검사(parity check)라고도 하는 신드롬 값의 세트는, 도 1c에 도시된 바와 같이, 신드롬 그래프의 각 꼭지점과 연관된다. 보다 구체적으로, 도 1c에는, 신드롬 그래프의 꼭지점 패리티 검사 중 일부의 연산된 값이 도시된다. 일부 실시예에서, 패리티 연산은 주어진 꼭지점으로 입사하는 예지 값의 합이 짝수 또는 홀수인 정수인지 여부를 결정하는 것을 수반하며, 그 꼭지점에 대한 패리티 결과는 합 mod(나머지연산) 2의 결과로 정의된다. 양자 상태 또는 큐비트 측정에서 오류가 발생하지 않은 경우 모든 신드롬 값은 짝수(또는 0)이어야 한다. 반대로 오류가 발생하면 홀수(또는 1)인 신드롬 값으로 귀결된다. 큐비트 측정의 비트 값 중 절반만이 도시된 신드롬 그래프와 연관된다(신드롬 그래프의 예지와 정렬된 비트). 도시된 격자의 면과 연관된 모든 비트 값을 포함하는 또 다른 신드롬 그래프가 있다. 이것은 이러한 비트에 대해 동등한 디코딩 문제를 야기한다.

[0046] 상기한 바와 같이, 큐비트의 대규모 클러스터 상태를 생성하고 후속적으로 저장하는 것은 도전적일 수 있다. 그러나, 여기에 설명된 일부 실시예, 방법 및 시스템은 양자 오류 수정을 수행하기 위해 필요한 상관관계를 포함하는 고전적 측정 데이터 세트(예를 들어, 신드롬 그래프의 신드롬 그래프 값에 대응하는 고전적 데이터 세트)의 생성을 제공하며, 오류 수정 코드에서 큐비트의 큰 얽힌 상태를 먼저 생성할 필요가 없다. 예를 들어, 본 명세서에 개시된 실시예는, 본 명세서에서 "융합 측정" 또는 "융합 게이트"라고도 하는 2-큐비트(즉, 공동) 측정이, 클러스터 상태를 실제로 생성할 필요 없이, 특정한 선택된 클러스터 상태에 대한 신드롬 그래프를 생성 및 디코딩하는데 필요한 장거리 상관관계를 포함하는 고전적 데이터의 세트를 생성하기 위해 훨씬 더 작은 얽힌 상태의 집합에 대해 수행될 수 있는 시스템 및 방법을 설명했다. 다시 말해, 여기에 설명된 일부 시스템 및 방법에서는, 비교적 작은 얽힌 상태(여기에서 리소스 상태(resource state)라고 함)의 집합만 생성된 다음 이러한 리소스 상태에 대해 공동 측정을 수행하여, 양자 오류 수정 코드(예를 들어, 라우센도르프 격자와 같은 토폴로지 코드)를 형성하는 큰 클러스터 상태를 먼저 생성(및 측정)해야 할 필요 없이, 신드롬 그래프 데이터를 생성한다.

[0047] 예를 들어, 아래에서 더 자세히 설명하는 바와 같이, 라우센도르프 격자 코드 구조를 사용하는 선형 광학 양자 컴퓨팅의 경우, 신드롬 그래프 데이터를 생성하기 위해, 융합 게이트는 서로 얽혀 있지 않으므로 더 큰 라우센도르프 격자 클러스터 상태의 일부가 아닌 작은 얽힌 상태(예를 들어, 4-GHZ 상태)의 집합에 적용될 수 있다. 개별 리소스 상태의 큐비트가 융합 측정 이전에 서로 얽히지 않았다는 사실에도 불구하고, 융합 측정으로부터 유래하는 측정 산출은 양자 오류 수정을 수행하는 데 필요한 모든 상관관계를 포함하는 신드롬 그래프를 생성한다. 이러한 시스템 및 방법은 본 명세서에서 융합 기반 양자 컴퓨팅(Fusion Based Quantum Computing, FBQC)이라 지칭된다. 유리하게, 리소스 상태는 수행되는 연산 또는 사용되는 코드 거리(code distance)와 무관한 크기(size)를 가지며, 이는 MBQC의 클러스터 상태와 완전히 대조된다. 이를 통해 FBQC에 사용되는 리소스 상태가

일정한 수의 순차 오퍼레이션으로 생성될 수 있다. 결과적으로 FBQC에서는 리소스 상태의 오류가 제한되며 이는 내결함성에 중요하다.

[0048] 2. FBQC를 위한 시스템

[0049] 도 2는 하나 이상의 실시예에 따른 양자 컴퓨팅 시스템을 도시한다. 양자 컴퓨팅 시스템 201은 양자 컴퓨팅(QC) 서브시스템 206에 통신 가능하게 결합된 사용자 인터페이스 장치 204를 포함하며, 이는 도 3을 참조하여 아래에 더 상세히 설명된다. 사용자 인터페이스 장치 204는 임의의 타입의 사용자 인터페이스 장치, 예를 들어 디스플레이, 키보드, 마우스, 터치스크린 등을 포함하는 단말기일 수 있다. 또한, 사용자 인터페이스 장치는 그 자체가 개인용 컴퓨터(PC), 랩톱, 태블릿 컴퓨터 등과 같은 컴퓨터일 수 있다. 일부 실시예에서, 사용자 인터페이스 장치 204는 사용자가 QC 서브시스템 206과 직접 또는 근거리 통신망, 광역 통신망, 또는 인터넷을 통해 상호작용할 수 있는 인터페이스를 제공한다. 예를 들어, 사용자 인터페이스 장치 204는 텍스트 편집기, 대화형 개발 환경(IDE), 명령 프롬프트, 그래픽 사용자 인터페이스 등과 같은 소프트웨어를 실행할 수 있으며, 그리하여 사용자가 하나 이상의 양자 알고리즘을 실행하기 위해 QC 서브시스템을 프로그래밍하거나 그렇지 않으면 기타 상호 작용을 할 수 있다. 다른 실시예에서, QC 서브시스템 206은 사전 프로그래밍될 수 있고 사용자 인터페이스 장치 204는 단순히 사용자가 양자 연산을 개시하고, 그 진행을 모니터링하고, QC 서브시스템 206으로부터 결과를 수신할 수 있는 인터페이스일 수 있다. QC 서브시스템 206은 하나 이상의 양자 컴퓨팅 칩 210에 결합된 고전적 컴퓨팅 시스템 208을 더 포함할 수 있다. 일부 예에서, 고전적 컴퓨팅 시스템 208 및 양자 컴퓨팅 칩 210은 다른 전자 부품 212, 예를 들어 펄스 펌프 레이저, 마이크로파 발진기, 전원 공급 장치, 네트워킹 하드웨어 등에 결합될 수 있다. 극저온 오퍼레이션(cryogenic operation)을 필요로 하는 일부 실시예에서, 양자 컴퓨팅 시스템 201은 저온 유지 장치(cryostat), 예를 들어 저온 유지 장치 214 내에 수용될 수 있다. 일부 실시예에서, 양자 컴퓨팅 칩 210은 하나 이상의 구성 칩, 예를 들어 전자 칩 216과 집적 광자 칩(integrated photonics chip) 218의 집적(직접 또는 이중)을 포함할 수 있다. 신호는 예를 들어 광학 상호연결부 220 및 다른 전자 상호연결부 222를 통해 다양한 방식으로 온칩 및 오프칩 라우팅될 수 있다. 또한, 컴퓨팅 시스템 201은 양자 컴퓨팅 프로세스, 예를 들어 아래에서 더 상세히 설명되는 융합 기반 양자 컴퓨팅 프로세스를 채용할 수 있다.

[0050] 도 3은 일부 실시예에 따른 QC 시스템 301의 블록도를 도시한 도면이다. 그러한 시스템은 도 2를 참조하여 위에서 소개된 컴퓨팅 시스템 201과 연관될 수 있다. 도 3에서 실선은 양자 정보 채널(quantum information channel)을 나타내고 이중 실선은 고전적인 정보 채널(classical information channel)을 나타낸다. QC 시스템 301은 큐비트 얽힘 시스템(qubit entangling system) 303, 큐비트 융합 시스템(qubit fusion system) 305 및 고전적 컴퓨팅 시스템 307을 포함한다. 일부 실시예에서, 큐비트 얽힘 시스템 303은 입력으로서 N개의 물리적 큐비트(이하 "양자 서브시스템"으로도 지칭됨), 예를 들어 물리적 큐비트 309(개략적으로 입력 311a, 311b, 311c, 쥘, 311N으로서도 표현됨)의 집합을 취할 수 있으며, 또한 얽힌 리소스 상태 315를 생성하기 위해 그들 중 둘 이상의 사이에 양자 얽힘을 생성할 수 있다(여기에서 그들 자체가 양자 서브시스템의 얽힌 상태로 구성된 "양자 시스템"이라고도 함). 예를 들어, 광자 큐비트의 경우, 큐비트 얽힘 시스템 303은 도파관, 빔 스플리터, 광자 검출기, 지연 라인 등을 포함하는 집적 광자 회로와 같은 선형 광학 시스템일 수 있다. 일부 예들에서, 얽힌 리소스 상태 315는 큐비트의 비교적 작은 얽힌 상태(예를 들어, 3 내지 30 큐비트를 갖는 큐비트 얽힌 상태)일 수 있다. 일부 실시예에서, 리소스 상태는, 이러한 상태의 특정 큐비트에 적용된 융합 오퍼레이션이 양자 오류 수정에 필요한 상관관계를 포함하는 신드롬 그래프 데이터를 생성하도록, 선택될 수 있다. 유리하게는, 도 3에 도시된 시스템은, 리소스 상태가 MBQC에 필요한 전형적인 격자 클러스터 상태를 형성하기 위해 서로 얽힐 필요 없이, 비교적 작은 리소스 상태를 사용하여 내결함성 양자 연산을 제공한다.

[0051] 일부 실시예에서, 입력 큐비트 309는 양자 시스템(본 명세서에서 양자 서브시스템이라고도 함) 및/또는 입자의 집합일 수 있고 임의의 큐비트 아키텍처를 사용하여 형성될 수 있다. 예를 들어, 양자 시스템은 원자, 이온, 핵 및/또는 광자와 같은 입자일 수 있다. 다른 예에서, 양자 시스템은, 플럭스 큐비트, 위상 큐비트, 또는 전하 큐비트(예를 들어, 초전도 조셉슨 접합으로부터 형성됨), 토폴로지 큐비트(예를 들어, 메이저라나 페르미온(majorana fermions)), 공동 중심(예를 들어, 다이아몬드의 질소 공동)에서 형성된 스핀 큐비트, 또는 다중 양자 시스템으로 인코딩된 큐비트(예를 들어, 고즈만-키타예프-프레스킬(Gottesman-Kitaev-Preskill, GKP) 인코딩 큐비트) 등과 같은 다른 공학적 양자 시스템일 수 있다. 또한, 설명의 명확성을 위해, 시스템이 이진 비트(binary bit)와 연관되는 것은 아닌 방식으로 정보를 인코딩하는 양자 정보 캐리어를 채용할 수도 있지만, 용어 "큐비트(qubit)"가 여기에서 사용된다. 예를 들어, 쿼디트(qudits)(즉, 2개 이상의 양자 상태로 정보를 인코딩할 수 있는 양자 시스템)가 일부 실시예에 따라 사용될 수 있다.

[0052] 일부 실시예에 따르면, QC 시스템 301은 하나 이상의 양자 알고리즘 또는 소프트웨어 프로그램을 실행할 수 있는 융합 기반 양자 컴퓨터일 수 있다. 예를 들어, QC 시스템 301에서 실행될 양자 알고리즘을 나타내는 소프트웨어 프로그램(예를 들어, 기계 판독 가능 명령어 세트)은 고전적 컴퓨팅 시스템 307(예를 들어, 상기한 도 2의 시스템 208에 대응함)으로 전달될 수 있다. 고전적인 컴퓨팅 시스템 307은, PC, 하나 이상의 블레이드 서버(blade server) 등과 같은 임의의 타입의 컴퓨팅 장치, 또는 슈퍼컴퓨터, 서버 팜(server farm) 등과 같은 고성능 컴퓨팅 시스템일 수 있다. 이러한 시스템은 하나 이상의 컴퓨터 메모리, 예를 들어, 메모리 306에 결합된 하나 이상의 프로세서(미도시)를 포함할 수 있다. 이러한 컴퓨팅 시스템은 본 명세서에서 "고전적 컴퓨터(classical computer)"로 지칭될 것이다. 일부 예에서, 소프트웨어 프로그램은 본 명세서에서 융합 패턴 생성기(fusion pattern generator) 313로 지칭되는 고전적 컴퓨팅 모듈에 의해 수신될 수 있다. 융합 패턴 생성기 313의 한 기능은 입력 소프트웨어 프로그램(양자 컴퓨터를 프로그래밍하기 위해 사용자가 더 쉽게 작성할 수 있는 고급 코드로서 창안될 수도 있음)으로부터 기계 수준 명령 세트를 생성하는 것이다.

[0053] 일부 실시예에서, 융합 패턴 생성기 313는 양자 컴퓨터 상에서 실행될 소프트웨어 프로그램을 위한 컴파일러로서 동작할 수 있다. 융합 패턴 생성기 313는 순수 하드웨어, 순수 소프트웨어, 또는 하나 이상의 하드웨어 또는 소프트웨어 구성요소 또는 모듈의 임의의 조합으로 구현될 수 있다. 다양한 실시예에서, 융합 패턴 생성기 313는 런타임(runtime)에 또는 미리 동작할 수 있고; 어느 경우든, 융합 패턴 생성기 313에 의해 생성된 기계 수준 명령어는(예를 들어, 메모리 306에) 저장될 수 있다. 일부 예에서, 컴파일된 기계 수준 명령어는, 큐비트 융합 시스템 305이 양자 컴퓨터의 주어진 클럭 사이클에서 별도의, 즉 얽히지 않은 리소스 상태 315로부터의 특정 큐비트 사이에 하나 이상의 융합을 만들도록 지시하는 하나 이상의 데이터 프레임의 형태를 취한다. 예를 들어, 융합 패턴 데이터 프레임 317은, 프로그램이 실행됨에 따라, 특정 클럭 사이클 동안 서로다른 얽힌 리소스 상태 315의 특정 큐비트 쌍 사이에 적용되어야 하는 융합 측정(예컨대, 도 18 내지 21을 참조하여 이하에서 보다 상세히 설명되는 타입 II 융합 측정) 세트의 일례이다. 일부 실시예에서, 몇몇 융합 패턴 데이터 프레임 317은 메모리 306에 고전적 데이터로서 저장될 수 있다. 일부 실시예에서, 융합 패턴 데이터 프레임 317은, XX 타입 II 융합이 큐비트 융합 시스템 305의 융합 어레이 321 내의 특정 융합 게이트에 적용되어야 하는지 여부(또는 임의의 다른 타입의 융합이 적용될지 여부)를 지시할 수 있다. 또한, 융합 패턴 데이터 프레임 317은 타입 II 융합이 예를 들어, XX, XY, ZZ 등과 같은 다른 기반으로 수행될 것임을 표시할 수 있다. 본 명세서에서 사용되는 용어 XX 타입 II 융합, YY 타입 II 융합, XY 타입 II 융합, ZZ 타입 II 융합 등은, 특정 2-입자 투영 측정(two-particle projective measurement), 예를 들어 선택된 벨 기준에 따라 2개의 큐비트를 4개의 벨 상태 중 하나에 투영할 수 있는 벨 투영법,을 적용하는 융합 오퍼레이션을 의미한다. 이러한 투영 측정은 선택한 기준으로 측정된 해당 관측 가능 항목 쌍의 고유값(eigenvalue)에 해당하는 두 가지 측정 산출을 생산한다. 예를 들어, XX 융합은 XX 및 ZZ 관측 가능 항목을 측정하는 벨 투영법(각각 +1 또는 -1 고유값을 가질 수 있음 - 또는 사용된 규칙에 따라 0 또는 1일 수 있음)이고, XZ 융합은 관측 가능 항목 XZ 및 ZX 관측 가능 항목 등을 측정하는 벨 투영법이다. 아래의 도 18 내지 21은 선형 광학 시스템에서 다양한 기준의 선택에 대해 타입 II 융합을 수행하기 위한 예시적인 회로를 보여주지만, 본 개시의 범위를 벗어나지 않고 다른 큐비트 아키텍처에서 다른 벨 투영 측정이 가능하다. 당업자는 선형 광학 시스템에서 타입 II 융합이 확률적 벨 측정을 수행한다는 것을 이해할 것이다. 도 18 내지 21은 융합 "성공" 및 "실패" 산출의 맥락에서 선형 광학 융합의 확률적 특성을 논의하며 명확성을 위해 여기에서 반복하지 않을 것이다.

[0054] 큐비트 융합 시스템 205의 융합 컨트롤러 회로 319는 융합 패턴 데이터 프레임(fusion pattern data frames) 317을 인코딩하는 데이터를 수신할 수 있고, 이 데이터에 기초하여 융합 어레이 321 내의 하드웨어를 구동하는 구성 신호(configuration signal), 예를 들어 아날로그 및/또는 디지털 전자 신호를 생성할 수 있다. 예를 들어, 광자 큐비트의 경우, 융합 게이트는 하나 이상의 도파관, 빔 스플리터, 간섭계, 스위치, 편광기(polarizer), 편광 회전자(polarization rotor) 등에 결합된 광자 검출기(photon detector)를 포함할 수 있다. 보다 일반적으로, 검출기는 리소스 상태 315에 있는 큐비트 중 하나 이상의 양자 상태를 검출할 수 있는 임의의 검출기일 수 있다. 당업자는 채용된 특정 큐비트 아키텍처에 따라 많은 타입의 검출기가 사용될 수 있음을 이해할 것이다.

[0055] 일부 실시예에서, 융합 패턴 데이터 프레임 317을 융합 어레이 321에 적용한 결과는, 판독되고 선택적으로 전처리되어 디코더 333로 전송되는 고전적 데이터(융합 게이트의 검출기에 의해 생성됨)의 생성이다. . 더 구체적으로, 융합 어레이 321은 2개의 상이한 리소스 상태로부터의 특정 큐비트 간의 공동 측정을 구현하고 공동 측정과 연관된 측정 산출의 집합을 생성하는 측정 장치의 집합을 포함할 수 있다. 이러한 측정 산출은 측정 산출 데이터 프레임, 예를 들어 데이터 프레임 322에 저장될 수 있고 추가 처리를 위해 고전적 컴퓨팅 시스템으로 다

시 전달될 수 있다.

[0056] 일부 실시예에서, QC 시스템 301의 임의의 서브모듈, 예를 들어, 컨트롤러 323, 양자 게이트 어레이 325, 융합 어레이 321, 융합 컨트롤러 319, 융합 패턴 생성기 313, 디코더 323, 및 논리 프로세서 308는, 프로세서(CPU, GPU, TPU) 메모리(RAM, ROM의 모든 형태), 하드 코딩된 논리 구성요소(AND, OR, XOR 등과 같은 고전적인 논리 게이트) 및/또는 필드 프로그래머블 게이트 어레이(FPGA 등)와 같은 프로그래밍 가능한 논리 구성요소 등의 임의의 수의 고전적 컴퓨팅 구성요소를 포함할 수 있다. 이러한 모듈에는 주문형 집적 회로(ASIC), 마이크로컨트롤러(MCU), 시스템 온 칩(SOC) 및 기타 유사한 마이크로 전자 장치가 포함될 수도 있다.

[0057] 일부 실시예에서, 얽힌 리소스 상태 315는, 융합 오퍼레이션이 수행될 때 내결함성 양자 연산을 수행하는 데 필요한 상관관계를 포함하는 측정 산출 데이터 프레임을 생산하는 임의의 타입의 얽힌 리소스 상태일 수 있다. 도 3은 동일한 리소스 상태의 집합의 예를 보여주는 한편, 다양한 타입의 리소스 상태를 생성하고 실행 중인 양자 알고리즘의 요구 사항에 따라 생성되는 리소스 상태 타입을 동적으로 변경할 수도 있는 시스템을 사용할 수 있다. 여기에 설명된 바와 같이, 논리적 큐비트 측정 산출 327은 물리적 큐비트의 측정 산출 322로부터, 예를 들어 디코더 333을 통해 내결함적으로 복구될 수 있다. 논리 프로세서 308는 프로그램 실행의 일부로서 논리 산출을 처리할 수 있다. 도시된 바와 같이, 논리 프로세서는 연산이 내결함성 있게 진행되는 것을 보장하기 위해, 다운스트림 게이트 및/또는 측정에 영향을 미치도록 융합 패턴 생성기 313에 정보를 피드백할 수 있다.

[0058] 도 4는 일부 실시예에 따른 큐비트 얽힘 시스템 401의 예를 도시한 도면이다. 이러한 시스템은 일부 실시예에 따라 얽힌 상태(예를 들어, 아래 도 7 내지 도 9에 도시된 예시적인 예에서 사용되는 리소스 상태)에서 큐비트(예를 들어, 광자)를 생성하는 데 사용될 수 있다. 큐비트 얽힘 시스템 401은, 위의 도 3에 도시된 큐비트 얽힘 시스템 303과 같은 FBQC 시스템에서 사용될 수 있는 시스템의 예이다. 당업자는 임의의 큐비트 얽힘 시스템이 본 개시내용의 범위를 벗어나지 않고 사용될 수 있음을 이해할 것이다. 큐비트 얽힘 시스템의 예는, 발명의 명칭이 "Generation of entangled qubit state"인 미국 특허 출원 No. 16/621,994(미국특허공개 No. 20200287631로 공개됨), 발명의 명칭이 "GENERATION OF ENTANGLED PHOTONIC STATES"인 미국 특허 출원 No. 16/691,459(미국특허공개 No. XXXXX로 공개됨) 및 발명의 명칭이 "GENERATION OF AN ENTANGLED PHOTONIC STATE FROM PRIMITIVE RESOURCES"인 미국 특허 출원 No. 16/691,450(미국 특허 공개 No. XXXXX로 공개됨)에서 찾을 수 있으며, 그 개시 내용은 모든 목적을 위해 그 전체가 참조에 의해 여기에 편입된다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 단일 광자를 생성하는 대신에, 광자 소스는 얽힌 리소스 상태를 직접 생성할 수 있거나, 또는 얽힌 상태 생성기 400에서 추가적인 얽힘 오퍼레이션을 겪을 수 있는 더 작은 얽힌 상태를 생성하여 FBQC에 사용될 최종 리소스 상태를 생산할 수 있다. 이와 같이, 본 명세서에서 사용된 바와 같이, 용어 "광자 소스(photon source)"의 범위는 적어도 단일 광자의 소스, 얽힌 상태의 다중 광자의 소스, 또는 보다 일반적으로 광자 상태의 임의의 소스를 포함하는 것으로 의도된다. 당업자는 리소스 상태 생성 하드웨어의 특정한 형태가 중요하지 않으며 본 개시의 범위를 벗어나지 않고 임의의 시스템이 채용될 수 있음을 이해할 것이다.

[0059] 예시적인 광자 아키텍처에서, 큐비트 얽힘 시스템 401은 얽힌 상태 생성기 400에 광학적으로 연결된 광자 소스 시스템 405을 포함할 수 있다. 광자 소스 시스템 405 및 얽힌 상태 생성기 400 모두는 고전적 처리 시스템 403에 결합되어, 고전적 처리 시스템 403이(예를 들어, 고전적 정보 채널 430a 내지 b를 통해) 광자 소스 시스템 405 및/또는 얽힌 상태 생성기 400과 통신 및/또는 제어할 수 있다. 광자 소스 시스템 405는 상호 연결 도파관 402를 통해 출력 광자 상태(예를 들어, 단일 광자 또는 벨 상태, GHZ 상태 등과 같은 다른 광자 상태)를 얽힌 상태 생성기 400에 제공할 수 있는 단일 광자 소스의 집합을 포함할 수 있다. 얽힌 상태 생성기 400는 출력 광자 상태를 수신하고 이를 하나 이상의 얽힌 광자 상태(또는 소스 자체가 얽힌 광자 상태를 출력하는 경우 더 큰 광자 상태)로 변환한 다음 이러한 얽힌 광자 상태를 출력 도파관 440으로 출력할 수 있다. 일부 실시예에서, 출력 도파관 440은 양자 연산을 수행하기 위해 얽힌 상태를 사용할 수 있는 일부 다운스트림 회로(downstream circuit)에 결합될 수 있다. 예를 들어, 얽힌 상태 생성기 400에 의하여 생성된 얽힌 상태는 다운스트림 양자 광 회로(도시되지 않음)를 위한 리소스로서 사용될 수 있다.

[0060] 일부 실시예에서, 광자 소스 시스템 405 및 얽힌 상태 생성기 400은 도 3에 예시된 양자 컴퓨팅 시스템과 함께 사용될 수 있다. 예를 들어, 도 3에 예시된 큐비트 얽힘 시스템 303은 광자 소스 시스템 405 및 얽힌 상태 생성기 400을 포함할 수 있고, 도 4의 고전적 컴퓨터 시스템 403은 도 3에 예시된 다양한 고전적 컴퓨팅 구성요소 중 하나 이상을 포함할 수 있다(예를 들어, 고전적 컴퓨팅 시스템 307). 이 경우, 출력 도파관 440을 통해 떠나는 얽힌 광자는 큐비트 융합 시스템 305에 의해 함께 융합될 수 있는데, 예를 들어 FBQC 방식에서 사용하기 위해 공동 측정의 집합을 수행하는 검출 시스템에 입력될 수 있다.

- [0061] 일부 실시예에서, 시스템 401은 구성요소 간의 고전적 정보를 상호 연결하고 제공하기 위한 고전적 채널 430(예를 들어, 고전적 채널 430-a 내지 430-d)을 포함할 수 있다. 고전적 채널 430-a 내지 430-d가 모두 동일할 필요는 없다는 점에 유의해야 한다. 예를 들어, 고전적 채널 430-a 내지 430-c는 하나 이상의 기준 신호(reference signal), 예를 들어 하나 이상의 클럭 신호, 하나 이상의 제어 신호, 또는 예를 들어, 헤럴드 신호(heralding signal), 광자 검출기 판독 신호 등의 클래식 정보를 전달하는 임의의 다른 신호를 전달하는 양방향 통신 버스를 포함할 수 있다.
- [0062] 일부 실시예에서, 큐비트 얽힘 시스템 401은 광자 소스 시스템 405 및/또는 얽힌 상태 생성기 400과 통신 및/또는 제어하는 고전적인 컴퓨터 시스템 403을 포함한다. 예를 들어, 일부 실시예에서 고전적 컴퓨터 시스템 403은, 양자 연산을 수행하는 데 사용되는 임의의 다운스트림 양자 광자 회로뿐만 아니라, 예컨대 광자 소스 405 및 얽힌 상태 생성기 400에 제공될 수 있는 시스템 클럭을 사용하여, 하나 이상의 회로를 구성하기 위해 사용될 수 있다. 일부 실시예에서, 양자 광자 회로는 광학 회로, 전기 회로, 또는 임의의 다른 타입의 회로를 포함할 수 있다. 일부 실시예에서, 고전적 컴퓨터 시스템 403은 메모리 404, 하나 이상의 프로세서(들) 402, 전원, 입/출력(I/O) 서브시스템, 및 이들 구성요소를 상호 연결하거나 통신 버스를 포함한다. 프로세서(들) 402는 메모리 404에 저장된 소프트웨어 모듈, 프로그램, 및/또는 명령을 실행하고 그에 의해 처리 오퍼레이션을 수행할 수 있다.
- [0063] 일부 실시예에서, 메모리 404는 하나 이상의 프로그램(예를 들어, 명령 세트) 및/또는 데이터 구조를 저장한다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 얽힌 상태 생성기 400은 연속적인 단계 및/또는 독립적인 인스턴스에 걸쳐 얽힌 상태를 생산하려고 시도할 수 있으며, 이들 중 어느 하나는 얽힌 상태를 생산하는데 성공할 수 있다. 일부 실시예에서, 메모리 404는 각각의 스테이지가 성공적인지 여부를 결정하고 이에 따라 (예를 들어, 스테이지가 성공한 경우 광자를 출력으로 전환하거나, 또는 스테이지가 아직 성공적이지 않은 경우 광자를 얽힌 상태 생성기 400의 다음 스테이지로 전달하도록 얽힌 상태 생성기 400을 구성함으로써) 얽힌 상태 생성기 400을 구성하기 위한 하나 이상의 프로그램을 저장한다. 이를 위해, 일부 실시예에서, 메모리 404는 고전적 컴퓨팅 시스템 403이 스테이지가 성공했는지 여부를 결정할 수 있는 검출 패턴(detection pattern)을 저장한다. 또한, 메모리 404는, 예를 들어 구성요소에 대한 하나 이상의 위상 시프트(phase shift)를 설정함으로써 구성되는 본 명세서에 설명된 다양한 구성 가능 구성요소(예를 들어, 스위치)에 제공되는 설정을 저장할 수 있다.
- [0064] 일부 실시예에서, 진술한 기능의 일부 또는 전부는 광자 소스 시스템 405 및/또는 얽힌 상태 생성기 400 상의 하드웨어 회로로 구현될 수 있다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 광자 소스 시스템 405은 하나 이상의 컨트롤러 407-a(예를 들어, 로직 컨트롤러)(예를 들어, 필드 프로그래머블 게이트 어레이(FPGA), 애플리케이션 특정 집적 회로(ASICs), 고전적인 프로세서와 메모리 등을 포함하는 "시스템 온 칩" 등)를 포함한다. 일부 실시예에서, 컨트롤러 407-a는 광자 소스 시스템 405이 성공적인지(예를 들어, 주어진 클럭 사이클 동안 주어진 시도에 대해) 결정하고 광자 소스 시스템 405이 성공했는지 여부를 가리키는 기준 신호를 출력한다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 컨트롤러 407-a는 광자 소스 시스템 405이 성공적일 때 고전적 채널 430-a 및/또는 고전적 채널 430-c에 논리적 하이(logical high) 값을 출력하고, 광자 소스 시스템 405이 성공적이지 않을 때 고전적 채널 430-a 및/또는 고전적 채널 430-c에 논리적 로우(logical low) 값을 출력한다. 일부 실시예에서, 컨트롤러 407-a의 출력은 컨트롤러 107-b에서 하드웨어를 구성하기 위해 사용될 수 있다.
- [0065] 얽힌 상태 생성기 400은, 얽힌 상태 생성기(400)의 각 스테이지가 성공했는지 여부를 판단하고, 상술한 스위칭 로직을 수행하며, 기준 신호를 고전적 채널 430-b 및/또는 430-d로 출력하여 다른 구성 요소에 얽힌 상태 생성기 400의 성공 여부를 알리는 하나 이상의 컨트롤러 407-b(예를 들어, 로직 컨트롤러) (예를 들어, 필드 프로그래머블 게이트 어레이(FPGA), 애플리케이션 특정 집적 회로(ASICs) 등을 포함할 수 있음)를 포함한다.
- [0066] 일부 실시예에서, 시스템 클럭 신호는 외부 소스(도시되지 않음)를 통해 또는 고전적 채널 430-a 및/또는 430-b를 통해 고전적 컴퓨팅 시스템 403에 의해 광자 소스 시스템 405 및 얽힌 상태 생성기 400에 제공될 수 있다. 사용될 수 있는 클럭 생성기의 예는 미국 특허 제10,379,420호에 기술되어 있으며, 이의 내용은 모든 목적을 위해 그 전체가 참조에 의해 여기에 편입되지만; 그러나 본 개시의 범위를 벗어나지 않으면서 다른 클럭 생성기가 또한 사용될 수 있다. 일부 실시예에서, 광자 소스 시스템 405에 제공된 시스템 클럭 신호는 광자 소스 시스템 405이 도파관당 하나의 광자를 출력하는 것을 시도하도록 트리거(trigger)한다. 일부 실시예에서, 얽힌 상태 생성기 400에 제공된 시스템 클럭 신호는, 얽힌 상태 생성기 400이 광자 검출을 시도하도록 그의 검출기 세트를 트리거 또는 게이트(gate)한다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 광자 검출을 시도하기 위해 얽힌 상태 생성기 400에서 검출기 세트를 트리거하는 것은 검출기 세트를 게이팅(gating)하는 것을 포함한다.

- [0067] 일부 실시예에서, 광자 소스 시스템 405 및 얽힌 상태 생성기 400은 내부 클럭을 가질 수 있음을 주의해야 한다. 예를 들어, 광자 소스 시스템 405는 컨트롤러 407-a에 의해 생성 및/또는 사용되는 내부 클럭을 가질 수 있고, 얽힌 상태 생성기 400은 컨트롤러 407-b에 의해 생성 및/또는 사용되는 내부 클럭을 가질 수 있다. 일부 실시예에서, 광자 소스 시스템 405 및/또는 얽힌 상태 생성기 400의 내부 클럭은 (예를 들어, 위상 고정 루프(phase-locked loop)를 통해) 외부 클럭(예를 들어, 고전적 컴퓨터 시스템 403에 의해 제공되는 시스템 클럭)에 동기화된다. 일부 실시예에서, 임의의 내부 클럭 자체가 시스템 클럭으로 사용될 수 있으며, 예를 들어 광자 소스의 내부 클럭이 시스템의 다른 구성요소에 분배되고 마스터/시스템 클럭으로 사용될 수 있다.
- [0068] 일부 실시예에서, 광자 소스 시스템 405은 공간적으로 및/또는 시간적으로 다중화될 수 있는 복수의 확률적 광자 소스, 즉 소위 다중화된 단일 광자 소스를 포함한다. 이러한 소스의 일 예에서, 소스는, 일부 비선형 과정(예를 들어, 자발적인 4파 혼합, 2차 고조파 생성 등)을 통해 0, 1 또는 그 이상의 광자를 생성할 수 있는 광학 공진기에 결합되는 펌프, 예를 들어 광 펄스에 의해 구동된다. 본 명세서에 사용된 바와 같이, "시도(attempt)"라는 용어는 비결정적으로(non-deterministically) 출력 광자를 생산할 수 있는 일종의 구동 신호(driving signal), 예를 들어 펌프 펄스(pump pulse)로 광자 소스(photon source)를 구동하는 행위를 지칭하기 위해 사용된다(즉, 구동 신호에 응답하여 광자 소스가 하나 이상의 광자를 생성할 확률은 1보다 작을 수 있다). 일부 실시예에서, 각각의 광자 소스는 각각의 시도에서 0개의 광자를 생산할 가능성이 가장 높을 수 있다(예를 들어, 단일 광자를 생산하려는 시도당 0개의 광자를 생산할 확률이 90%일 수 있다.). 시도에 대해 두 번째로 가능성이 높은 결과는 단일 광자의 생산일 수 있다(예를 들어, 단일 광자를 생산하려는 시도당 단일 광자를 생산할 확률이 9%일 수 있다.). 시도에 대해 세 번째 가능성이 높은 결과는 두 개의 광자의 생산일 수 있다(예를 들어, 단일 광자를 생산하려는 시도당 두 개의 광자를 생성할 확률이 약 1%일 수 있다.). 어떤 상황에서는, 2개 이상의 광자를 생산할 확률이 1% 미만일 수 있다.
- [0069] 일부 실시예에서, 광자 소스의 겉보기 효율(apparent efficiency)은 복수의 단일 광자 소스를 사용하고 복수의 광자 소스의 출력을 다중화(multiplexing)함으로써 증가될 수 있다. 일부 실시예에서, 광자 소스는 또한 생성의 성공을 알리는(또는 예고하는) 고전적 헤럴드 신호를 생산할 수 있다. 일부 실시예에서, 이 고전적 신호는 검출기의 출력으로부터 얻어지며, 여기서 광자 소스 시스템은 항상 쌍으로 광자 상태를 생산하고(예를 들어 SPDC에서), 하나의 광자 신호의 검출은 프로세스의 성공을 예고하는 데 사용된다. 이 헤럴드 신호는 멀티플렉서에 제공될 수 있으며, 아래에서 더 자세히 설명하는 바와 같이, 성공적인 생성을 멀티플렉서 출력 포트에 적절하게 라우팅하는 데 사용할 수 있다.
- [0070] 사용된 광자 소스의 정확한 타입은 중요하지 않으며, 자발 4파동 혼합(spontaneous four wave mixing, SPFW), 자발 매개변수 하향 변환(spontaneous parametric down-conversion, SPDC) 또는 기타 프로세스와 같은 임의의 광자 생성 프로세스를 채용하여 임의의 타입의 소스를 사용할 수 있다. 원자 및/또는 인공 원자 시스템(artificial atomic system), 예를 들어 양자점 소스(quantum dot source), 결정의 색상 중심 등을 사용하는 것과 같이, 비선형 재료만을 필요로 하는 것은 아닌 소스의 다른 부류도 사용될 수 있다. 일부 경우에, 소스는, 예를 들어 공동(cavity)에 결합된 양자점과 같은 인공 원자 시스템의 경우와 같이, 광자 공동(photonic cavity)에 결합될 수 있다. 광기계 시스템(optomechanical system) 등과 같은 SPWM 및 SPDC를 위한 다른 타입의 광자 소스도 존재한다. 일부 예들에서, 광자 소스는 이미 얽힌 상태에 있는 다수의 광자를 방출할 수 있으며, 이 경우 얽힌 상태 생성기 400가 필요하지 않을 수 있거나, 대안적으로 얽힌 상태를 입력으로 취하고 더 큰 얽힌 상태를 생성할 수 있다.
- [0071] 일부 실시예에서, 여러 비결정적 광자 소스의 공간 다중화(MUX 광자 소스라고도 함)가 사용될 수 있다. 본 개시의 범위를 벗어나지 않으면서 많은 상이한 공간 MUX 아키텍처가 가능하다. 시간적 다중화(Temporal MUXing)은 공간 다중화 대신 또는 공간 다중화와 조합으로 구현될 수 있다. 로그 트리, 일반화된 마하-젠더(Mach-Zehnder) 간섭계, 다중 모드 간섭계, 체인 소스(chained source), 덤프-펌프 방식(dump-the-pump scheme)이 있는 체인 소스, 비대칭 다결정 단일 광자 소스 또는 그밖의 임의의 타입의 MUX 아키텍처를 채용하는 MUX 방식을 사용할 수 있다. 일부 실시예에서, 광자 소스는 양자 피드백 제어(quantum feedback control) 등을 갖는 MUX 방식을 사용할 수 있다. $n \times m$ 다중화 소스의 한 예가 미국 특허 번호 10,677,985에 개시되어 있으며, 그 내용은 모든 목적을 위해 그 전체가 참조에 의해 여기에 편입된다.
- [0072] 도 5는 일부 실시예에 따른 큐비트 융합 시스템 501의 일례를 도시한 도면이다. 일부 실시예에서, 큐비트 융합 시스템 501은 도 3에 도시된 큐비트 융합 시스템 305과 같은 더 큰 FBQC 시스템 내에 채용될 수 있다.
- [0073] 큐비트 융합 시스템 501은 융합 어레이 521에 결합된 융합 컨트롤러 519를 포함한다. 융합 컨트롤러 519는, 도

3의 융합 컨트롤러 회로 319를 참조하여 위에서 설명된 바와 같이 작동하도록 구성된다. 융합 어레이 521은 서로 다른 리소스 상태(미도시)로부터 2개 이상의 큐비트를 각각 수신하고 2개 이상의 리소스 상태에서부터 선택된 큐비트에 대해 하나 이상의 융합 오퍼레이션(예를 들어, 타입 II 융합)을 수행하는 융합 사이트(fusion site)의 집합을 포함한다. 큐비트에서 수행되는 융합 오퍼레이션은 융합 컨트롤러 519로부터 제어 채널 503a, 503b 등을 통해 융합 사이트 각각으로 전송되는 고전적 신호를 통해 융합 컨트롤러 519에 의해 제어될 수 있다. 각 융합 사이트에서 수행된 공동 측정에 기초하여, 고전적 데이터 형태의 고전적 측정 산출이 출력되고, 이어서 도 3을 참조하여 도시되고 상기에서 설명된 바와 같이, 디코더 시스템(decoder system)에 제공된다. 타입 II 융합 게이트로서 채용될 수 있는 광자 회로의 예는 도 6 및 도 18 내지 20을 참조하여 아래에 설명되어 있다.

[0074] 도 6은 일부 실시예에 따른 내결함성 양자 연산을 위해 디코더에 측정 산출을 제공하기 위해 융합 컨트롤러 319와 함께 작동하도록 구성된 융합 사이트 601의 하나의 가능한 예를 도시한다. 이 예에서, 융합 사이트 601은 융합 어레이 321(도 3에 도시됨)의 요소일 수 있고, 예시의 목적으로 단지 하나의 인스턴스(instance)만이 도시되어 있지만, 융합 어레이 321은 융합 사이트 601의 임의의 수의 인스턴스를 포함할 수 있다.

[0075] 진술한 바와 같이, 큐비트 융합 시스템 305는 융합될 2 이상의 큐비트(큐비트 1 및 큐비트 2, 여기에 이중 레일 인코딩(dual rail encoding)으로 도시됨)을 수신할 수 있다. 큐비트 1은 첫 번째 리소스 상태의 일부로 하나 이상의 다른 큐비트(도시되지 않음)와 얽혀 있는 하나의 큐비트이고, 큐비트 2는 두 번째 리소스 상태의 일부로 하나 이상의 다른 큐비트(도시되지 않음)와 얽혀 있는 다른 큐비트이다. 유리하게도, MBQC와 대조적으로, 내결함성 양자 연산을 용이하게 하기 위해 제1 리소스 상태로부터의 큐비트 중 어느 것도 제2(또는 임의의 다른) 리소스 상태로부터의 임의의 큐비트와 얽힐 필요가 없다. 또한 유리하게도, 융합 사이트 601의 입력에서, 리소스 상태의 집합이 상호 얽히지 않아 양자 오류 수정 코드의 형태를 취하는 클러스터 상태를 형성하므로, 전체 클러스터 상태에 걸쳐 장거리 얽힘이 있는 큰 클러스터 상태를 저장 및/또는 유지할 필요가 없다. 또한 유리하게도, 융합 사이트에서 발생하는 융합 오퍼레이션은 큐비트 1 및 큐비트 2에 대한 완전히 파괴적인 공동 측정이 될 수 있으므로, 측정 후에 남은 것은, 예를 들어 검출기 603, 605, 607, 609와 같은 검출기의 측정 산출을 나타내는 고전적 정보이다. 이 시점에서, 고전적 정보는 디코더 333이 양자 오류 수정을 수행하는 데 필요한 전부이며, 더 이상의 양자 정보는 시스템을 통해 전파되지 않는다. 이것은, 융합 사이트를 채용하여 리소스 상태를 그 자체가 토폴로지 코드 역할을 하는 클러스터 상태로 융합하고 그 다음에 큰 클러스터 상태의 각 큐비트에 대한 단일 입자 측정을 통해서만 필요한 고전적 정보를 생성하는 MBQC 시스템과 대조될 수 있다. 이러한 MBQC 시스템에서는, 단일 입자 측정이 이루어지기 전에 큰 클러스터 상태가 시스템에 저장되고 유지되어야 할 뿐만 아니라, 디코더가 양자 오류 수정을 수행하는 데 필요한 신드롬 그래프 데이터를 연산하는 데 필요한 고전적 정보를 생성하기 위해 클러스터 상태의 모든 큐비트에 추가적인 단일 입자 측정 단계가 (클러스터 상태를 생성하는 데 사용되는 융합에 추가하여) 적용되어야 한다.

[0076] 도 6은 광자 양자 컴퓨터 아키텍처의 일부로서의 융합 사이트를 구현하는 한 가지 방법에 대한 예시를 도시한 도면이다. 이 예에서 큐비트 1과 큐비트 2는 이중 레일로 인코딩된 광자 큐비트일 수 있다. 광자 큐비트의 이중 레일 인코딩에 대한 간략한 소개는 도 11 내지 14를 참조하여 아래 섹션 4에 제공된다. 따라서 큐비트 1 및 큐비트 2는 각각 도파관 쌍 621, 623 및 도파관 쌍 625, 627에 입력될 수 있다. 간섭계 624 및 628은 각 큐비트에 일렬로 배치될 수 있으며, 각 간섭계 624, 628의 하나의 아암(arm) 내에 융합 오퍼레이션이 적용되는 기초(basis)에 영향을 미치도록 프로그램 가능한 위상 시프터(phase shifter) 630, 632가, 예를 들어 도 21에 도시된 특정 모드 결합을 구현하여 본 명세서에서 XX, XY, YY 또는 ZZ 융합이라고 지칭되는 것을 구현함으로써, 선택적으로 적용될 수 있다. 프로그램 가능한 위상 시프터 630, 632는 제어 라인 629, 631을 통해 융합 컨트롤러 319에 결합될 수 있어, 융합 컨트롤러 319로부터의 신호는 융합 오퍼레이션이 큐비트에 적용되는 기초를 설정하는 데 사용될 수 있다. 일부 실시예에서 기초는 융합 컨트롤러 319 내에서 하드 코딩될 수 있거나, 일부 실시예에서 기초는 외부 입력, 예를 들어 융합 패턴 생성기 313에 의해 제공되는 명령에 기초하여 선택될 수 있다. 공동 측정을 수행하기 위한 판독 메커니즘을 제공하기 위하여, 추가적인 모드 결합기(mode coupler), 예를 들어 모드 결합기 633 및 632는, 단일 광자 검출기 603, 605, 607, 609 앞의 간섭계 다음에 적용될 수 있다.

[0077] 일부 실시예에서, 융합은 확률적 오퍼레이션일 수 있는데, 즉 이하의 도 20에 설명된 바와 같이, 측정이 때때로 성공하고 때때로 실패하는 확률적 벨 측정을 구현한다. 일부 실시예에서, 그러한 오퍼레이션의 성공 확률은 오퍼레이션이 작용하는 것에 추가하여 추가적인 양자 시스템을 사용함으로써 증가될 수 있다. 추가적인 양자 시스템을 사용하는 실시예는 일반적으로 "부스트된(boosted)" 융합이라 한다. 도 6의 예에서, 융합 사이트는 인입 큐비트에 대해 부스트되지 않은 타입 II 융합 오퍼레이션을 구현한다. 당업자는 본 게시내용의 범위를 벗어나지 않고 임의의 타입의 융합 오퍼레이션이 적용될 수 있음(그리고 부스트되거나 부스트되지 않을 수 있음)을

이해할 것이다. 타입 II 융합 회로의 추가적인 예가, 편광 인코딩과 이중 레일 경로 인코딩 모두에 대해 아래 섹션 5에 설명되어 있다. 일부 실시예에서, 융합 컨트롤러 319는 또한 검출기 603, 605, 607, 609에 제어 신호를 제공할 수 있다. 제어 신호는 예를 들어 검출기를 게이팅하거나 검출기의 오퍼레이션을 제어하는 데 사용할 수 있다. 검출기 603, 605, 607, 609의 각각은 광자 검출 신호(검출기에 의해 검출된 광자의 수를 나타냄, 예를 들어 검출된 0개의 광자, 검출된 1개의 광자, 검출된 2개의 광자 등)를 제공하고, 이 광자 검출 신호는 측정 산출(예를 들어, 융합 성공 여부)을 결정하기 위해 융합 사이트 601에서 전처리되거나 추가 처리를 위해 디코더 333으로 직접 전달된다.

[0078] 3. GHZ 리소스 상태를 사용하는 FBQC의 예(An example of FBQC employing GHZ Resource States)

[0079] 도 7의 (a) 내지 (b)는 하나 이상의 실시예에 따른 내결함성 양자 연산을 위한 FBQC 방식을 예시한 도면이다. 이 예에서 라우센도르프 격자로 알려진 토폴로지 코드(또한 엽리상면 코드(foliated surface code)로도 알려짐)가 사용되지만, 본 개시의 범위를 벗어나지 않고 임의의 다른 오류 수정 코드가 사용될 수 있다. 예를 들어, FBQC는 다양한 볼륨 코드(예를 들어, 다이아몬드 코드, 트라이아몬드 코드 등)에 대해 구현될 수 있고, 다양한 색상 코드 또는 다른 토폴로지 코드가 본 개시의 범위를 벗어나지 않고 사용될 수 있다.

[0080] 도 7의 (a)는 라우센도르프 격자의 하나의 단위 셀 702를 예시한 도면이다. 측정 기반 양자 컴퓨팅의 경우, 신드롬 그래프(여기서 P_{cell} 이라함)의 값을 결정하기 위해 단위 셀의 중심에서 단위 셀의 6개 면에 있는 큐비트를 x 기반으로 측정하여 6개의 M_x 측정 각각에 대해 0 또는 1개의 고유값 세트가 결정된다. 이러한 고유값은 다음과 같이 결합된다:

$$P_{cell-MBQC} = \left[\sum_{i=1}^6 M_x(S_i) \right] \text{mod } 2. \quad (2)$$

[0081]

[0082] 여기서 $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ 은 단위 셀의 면들의 6개 사이트에 해당하고, $M_x(S_i)$ 는 x 기반으로 해당 면 큐비트를 측정하여 얻은 측정 산출(0 또는 1)에 해당한다. (S_1, S_2 및 S_3 은 도 7에 표시되어 있으며; S_4, S_5 및 S_6 은 단위 셀 702의 숨겨진 면에 있다.)

[0083] FBQC에서, 목표는, 두 개 이상의 큐비트에 대한 일련의 공동 측정(예를 들어, 양의 오퍼레이터 값 측정(positive-operator valued measure, POVM)이라고도 함)을 통해, 일부 양자 오류 수정 코드의 오류 신드롬(error syndrome)에 해당하는 고전적 데이터 세트를 생성하는 것이다. 예를 들어, 도 7의 (a)의 라우센도르프 단위 셀을 예시로 사용하면, FBQC 접근 방식에서 신드롬 그래프 값을 생성하는 데 사용할 수 있는 측정 세트가 도 7의 (b)에 도시되어 있다. 이 예에서, GHZ 상태가 리소스 상태로서 사용되지만, 본 개시의 이점을 갖는 통상의 기술자는 본 개시의 범위를 벗어나지 않고 임의의 적절한 리소스 상태가 사용될 수 있음을 이해할 것이다. 도 7의 (a)에 도시된 MBQC 방식으로부터 도 7의 (b)에 도시된 FBQC 방식으로 전환하기 위해, 도 7의 (a)의 모든 면 큐비트(face qubit)는 뚜렷하게 분리된(즉, 얽히지 않은) 리소스 상태로부터의 개별 큐비트로 대체된다. 예를 들어, 도 7의 (b)에 표시된 네 개의 리소스 상태 $R1, R2$ 및 $R3$ (점선 타원으로 둘러싸여 있음)는 각각 라우센도르프 셀의 면 큐비트 $S2$ 가 될 것에 적어도 하나의 큐비트를 기여하고 있다. 예를 들어, 도 7의 (a)의 면 큐비트 $S2$ 는, 3개의 다른 리소스 상태로부터, 4개의 큐비트로 대체된다: 리소스 상태 $R1$ 은 2개의 큐비트에 기여하고; 리소스 상태 $R2$ 는 세 번째 큐비트에 기여하고; 리소스 상태 $R3$ 은 네 번째 큐비트에 기여한다. 오퍼레이션 중에, 시스템은 각 면에서 두 개의 융합을 수행한다(예를 들어, 도 7의 (b)의 원 721, 722는 각각 리소스 상태 $R2$ 및 $R1$ 과, $R3$ 및 $R1$ 의 기여 큐비트 간의 융합을 나타냄). 융합이 Type II 융합인 예에서는, 4개의 면 큐비트를 모두 측정하여 4개의 측정 결과를 생성한다. 셀에 대한 신드롬 그래프 값은 위의 식(2)에 의하여 얻어지지만, 지금은 식(3)으로 얻어진다:

$$M_x(S_i) = [F_{1,xx}(S_i) + F_{2,xx}(S_i)] \text{mod } 2 \quad (3)$$

[0084]

[0085] 여기서, i 번째 면의 경우, $F_{1,xx}(S_i)$ 는 융합 1(예를 들어, 원 721로 표시됨)과 연관된 큐비트에 대해 공동 측정을 수행하여 얻은 측정 산출이며, 융합 1은 XX 기반에서 수행되는 타입 II 융합이고, 또한 여기서 $F_{2,xx}(S_i)$ 는 융합 2(예를 들어, 원 722로 표시됨)와 연관된 큐비트에 대해 공동 측정을 수행하여 얻은 측정 산출이며, 융합 2 역시 XX 기반에서 수행되는 타입 II 융합이다. 식 (2)를 참조하여 위에서 설명한 X 관측 가능 항목과 연관된 측정과 유사하게, 관측 가능 항목 XX (및 ZZ)의 융합 측정은 측정된 연산자(이 예에서는 XX 및 ZZ)의 양수 또는 음

수 고유 벡터(eigenvector)에 각각 해당하는 0 또는 1의 값을 취한다. 식 (3)을 고려하면, 각 면 $M_x(S_i)$ 에 대한 측정을 얻으려면, 융합 측정 $F_{1,xx}(S_i)$ 및 $F_{2,xx}(S_i)$ 모두에 대해 올바른 융합 산출이 필요하다. 그러나, 일부 오류로 인해 융합이 실패하여 연산자에 대한 값을 복구할 수 없는 경우, 일부 실시예에서, 면 측정은 실패한 것으로 간주되고 결과적으로 신드롬 그래프 데이터에서 적어도 하나의 소거된 예지가 발생한다. 본 개시물의 이점을 갖는 당업자는 예가 도 1a 내지 도 1c를 참조하여 위에서 설명된 것과 유사한 방식으로 디코더에 의해 처리될 수 있다는 것을 이해할 것이다. 또한 당업자는 식 (3)에 대한 여기의 설명이 XX 관측 가능 항목에 초점을 맞추고 있지만, 융합은 ZZ 관측 가능 항목의 측정도 생산할 수 있으며, 이러한 산출은 식 (3)에 따라 결합되어 독립적인 신드롬 그래프 데이터 세트를 생산할 수 있다는 것을 인식할 것이다. 일부 실시예에서 이러한 두 세트의 신드롬 데이터는 제1(primal) 및 이중(dual) 신드롬 그래프로 지칭된다.

[0086] 도 7의 (c)는 라우센도르프 격자의 여러 단위 셀로 구성된 클러스터 상태의 예를 도시한 도면이다. MBQC 접근 방식에서, 이 전체 클러스터 상태는, 한 표면 경계에서 다른 표면 경계로 격자를 가로질러 확장되는 상태의 얽힘과 함께 많은 큐비트의 얽힌 상태를 형성하며 생성되어야 할 필요가 있다. MBQC 접근 방식에서, 양자 오류 수정 코드 역할을 하여 논리적 큐비트를 인코딩할 수 있는 것은 이 큰 얽힌 클러스터 상태이다. 연산은, 도 1a 내지 1c를 참조하여 위에서 설명한 바와 같이, 디코더에 제공되는 신드롬 그래프를 생성하는데 사용되는 측정 산출을 생성하기 위해, 얽힌 상태의 각 큐비트에 대해 단일 큐비트 측정을 수행함으로써 진행된다. 이와 같이 연산의 허용 오차(error tolerance)를 높이려면 격자의 크기가 증가해야 하므로 얽힌 상태의 크기가 증가해야 한다. 본 명세서에 개시되는 FBQC 접근 방식의 하나 이상의 실시예에서, 그러한 큰 얽힌 클러스터 상태는 필요하지 않지만, 요구되는 오류 허용 오차와 리소스 상태의 크기가 무관한 더 작은 리소스 상태가 생성된다. 도 7을 참조하여 위에서 상세히 설명된 바와 같이, FBQC 접근 방식은, 격자의 각 노드를 둘 이상의 인접한 리소스 상태 사이의 융합의 세트로 교체함으로써, 임의의 내결함성 격자로부터 구성될 수 있다. 격자의 각 노드를 리소스 상태/융합으로 교체하는 구성은 FBQC 방식을 얻는 한 가지 예일 뿐이며, 본 개시의 이점을 가진 당업자는, 본 개시의 범위를 벗어나지 않고, 내결함성 격자에서 FBQC 방식을 구성하는 다양한 방법이 채용될 수 있음을 인식할 것이다.

[0087] 또한 아래에서 더 자세하게 설명하는 것처럼, 프로세스는 아래 도 8 내지 9에 설명된 대로, 주어진 클록 사이클에서 리소스 상태 레이어(layer)를 생성하고 각 레이어 내에서 융합을 수행하여 진행할 수 있다. 예를 들어, 도 7의 (c)에서 수평 방향은 x-y 평면의 임의의 주어진 레이어에 있는 큐비트의 전체 또는 하위 세트가 동일한 클록 사이클에서 생성/초기화될 수 있다는 의미에서 시간을 나타내는데, 예를 들어 레이어 1의 큐비트는 클록 사이클 1에서 생성될 수 있으며, 레이어 2의 큐비트는 클록 사이클 2에서 생성될 수 있고, 레이어 3의 큐비트는 클록 사이클 3에서 생성될 수 있는 등이다. 아래에서 더 자세하게 설명하겠지만, 각 레이어의 특정 하위 세트의 큐비트는, 내결함성을 활성화하는 데 필요한 경우, 후속 레이어의 리소스 상태로부터의 큐비트와 융합되는데 활용될 수 있도록 저장/지연될 수 있다.

[0088] 일부 실시예에서, 원하는 오류 신드롬을 생성하기 위해, 다수의 더 작은 얽힌 리소스 상태의 융합으로부터 적절한 신드롬 그래프를 생성하는 격자 준비 프로토콜(lattice preparation protocol, LPP)이 설계될 수 있다. 도 8 내지 도 9는 일부 실시예에 따른 격자 준비 프로토콜의 예를 도시한 도면이다. 설명을 위해, 리소스 상태는 도 8a에 도시된 리소스 상태 800과 같은 상태이나, 본 개시의 범위를 벗어나지 않고 다른 리소스 상태가 사용될 수 있다. 리소스 상태 800은 단일 큐비트에 아다마르(Hadamard) 게이트를 적용할 때까지 GHZ 상태와 동일하다. 예를 들어, 본 명세서에 개시된 예에서 사용된 상태는 도 8a의 2개의 종단 큐비트(terminating end qubit) 800a-3 및 800a-4에 대한 아다마르 게이트를 적용할 때까지의 GHZ 상태와 동일하다. 보다 구체적으로, 4-GHZ 상태는 다음의 안정기(stabilizer)를 갖는 안정기 상태로 식별될 수 있다: $\langle XXXX, ZZII, ZIZI, ZIIZ \rangle$. 도 8a에 도시된 리소스 상태 800은 이러한 GHZ 상태와 밀접하게 관련되어 있지만, 상태 800의 안정기는 $\langle XXZZ, ZZII, ZIXI, ZIIX \rangle$ 이다(연산자의 순서는 각각 큐비트 800a-1, 800a-2, 800a-3 및 800a-4에 해당함). 당업자는, 큐비트 800-a3 및 800-a4에 아다마르 게이트를 적용하면 4-GHZ 상태와 리소스 상태 800이 동등하다는 것을 이해할 것이다.

[0089] 도 8 내지 9의 시간 방향은 페이지에 수직이므로, 리소스 상태 810과 같은 모양의 리소스 상태는, 동일한 클록 사이클 내에서 서로 얽혀 있는 큐비트 1, 2 및 3과, 예를 들어 큐비트 2 및 3과 시간 차원에서 얽혀 있는 큐비트 4와 같은, 큐비트들의 집합을 나타낸다. 이러한 리소스 상태는 예를 들어 단일 클록 사이클에서 전체 4큐비트 리소스 상태를 생성한 다음 고정된 시간(예를 들어, 한 클록 사이클) 동안 큐비트 4를 메모리에 저장하여 창출될 수 있다. 본 명세서에서 사용된 용어 "메모리(memory)"는 임의의 타입의 메모리, 예를 들어 양자 메모리(quantum memory), 큐비트 지연 라인(qubit delay line), 큐비트용 시프트 레지스터(shift register for

qubit), 큐비트 자체 등을 포함한다. 광자 리소스 상태의 경우, 이와 같은 큐비트 메모리는 큐비트 지연과 동등하므로 광섬유를 사용하여 구현될 수 있다. 도 8c에 도시된 예에서, 큐비트 4로의 지연은 큐비트의 기존의 광 경로와 인라인으로 배치되지만 큐비트 1 내지 3의 광 경로에는 존재하지 않는 추가적인 광 경로 길이의 루프(예를 들어, 광섬유에 의해 제공됨)로 개략적으로 표현된다. 이 예에서 광섬유의 길이는 지속 시간 T의 단일 클럭 사이클 지연을 구현하지만, 예를 들어 2T, 3T 등과 같은 다른 지연도 가능하도록 한다. 물리적 지연 시간의 관점에서, 이러한 지연은 500ps - 500ns의 범위에 있을 수 있지만, 본 개시의 범위를 벗어나지 않고 임의의 지연이 가능하다.

[0090] 여기에 개시된 FBQC 프로세스로 돌아가서, 도 8 내지 9는 FBQC에 대한 격자 준비 및 측정 프로토콜이 레이어에 따라 진행될 수 있는 방법의 예를 도시한다. 도 8a는 레이어 810(도 7의 (c)에 도시된 레이어 1의 일부에 대응)으로 도시된 라우센도르프 격자의 하부 레이어의 일부를 도시한다. 여기에 도시된 예에서, 도 8a에 도시된 것과 같은 레이어를 처리하기 위해, 제1 다중 리소스 상태 800이 생성된다(예를 들어, 도 3의 큐비트 얽힘 시스템 303에서). 이 예에서, 리소스 상태 800은 4개의 물리적 큐비트(여기에서 양자 서브시스템이라고도 함)를 포함하는 얽힌 상태이다: 큐비트 800a-1, 800a-2, 800a-3, 800a-4. 일부 실시예에서, 리소스 상태 800은 2개의 종단 큐비트 800a-4 및 800a-3이 아다마르 오퍼레이션을 거친 4-GHZ 상태의 형태를 취할 수 있다(예를 들어, 이중 레일 인코딩된 큐비트의 경우, 큐비트를 구성하는 두 레일 사이에 50:50 빔 스플리터를 적용함으로써). 일부 실시예에서, 레이어의 모든 큐비트가 이 클럭 사이클에서 융합의 대상이 되는 것은 아니지만, 오히려 특정 리소스 상태로부터 이 클럭 사이클 동안 생성된 큐비트 중 일부가 지연될 수 있는데, 예를 들어 큐비트 820, 중복하여 인코딩된 큐비트 805, 또는 임의의 다른 큐비트의 측정은 다음 클럭 사이클에서 큐비트가 활용될 수 있도록 지연될 수 있다. 그 다음 그러한 지연된 큐비트는 다음 클럭 사이클에서만 융합에 활용될 수 있는 리소스 상태로부터의 하나 이상의 큐비트와 융합될 수 있다.

[0091] 광자 구현을 사용하는 예에서, 리소스 상태로부터의 큐비트는, 양자 오류 수정을 구현하는 융합 측정 세트를 활성화하기 위해, 큐비트 융합 시스템(예를 들어, 도 3의 큐비트 융합 시스템 305)으로 적절하게(집적된 도파관, 광섬유 또는 기타 적절한 광자 라우팅 기술을 통해) 라우팅될 수 있는데, 즉 선택한 오류 신드롬에 해당하는 측정 산출을 집합하게 된다. 이 예에서는 라우센도르프 격자에 기반한 토폴로지 코드를 명시적으로 사용하고 있지만, 본 발명의 범위를 벗어나지 않으면서 어떠한 코드도 사용할 수 있다.

[0092] 도 8b는 배열된 GHZ 리소스 상태의 집합의 예를 도시한 도면으로서, 즉 미리 라우팅되어 주어진 융합 게이트로 전송될 큐비트가 그래픽으로 서로 인접하게 배치된다. 이 예시에서 서로 인접한 큐비트의 경우, 큐비트 쌍 사이에서 각각의 융합이 수행될 수 있다(본 명세서에서 각각의 양자 서브시스템이라고도 하며, 융합 사이트에서 입력되는 큐비트 쌍의 각 큐비트는 서로 다른 리소스 상태에 속함). 예를 들어, 사이트 802에서 두 개의 타입 II 융합 측정이 적용될 수 있는데, 하나는 큐비트 822와 824 사이이고 다른 하나는 큐비트 826과 828 사이이다. 융합이 수행되기 전에 큐비트 822 및 824(또는 큐비트 826 및 828)가 서로 얽혀 있지 않고 대신 개별 리소스 상태의 각 부분이라는 점에 유의해야 한다. 따라서 라우센도르프 격자로 알려진 큰 얽힌 클러스터 상태는 융합 측정이 수행되기 전에 존재하지 않는다.

[0093] 도 9a를 참조하면, 기본 코드 구조의 제2 레이어의 일부가 레이어 910(도 7의 (c)에 도시된 레이어 2에 대응)으로 도시되어 있다. FBQC 시스템에서, 도 9b에 도시된 것과 같은 단일 레이어를 처리하기 위해, FBQC 방법은 도 8a 내지 8b를 참조하여 위에서 설명한 것과 동일한 라인을 따라 진행되며, 따라서 자세한 내용은 여기에서 반복하지 않는다.

[0094] 도 10의 (a) 내지 (e)는 하나 이상의 실시예에 따라 FBQC를 수행하기 위한 방법을 더 상세히 도시한 도면이다. 보다 구체적으로, 여기에 설명된 방법은 일부 실시예에 따라 특정 양자 오류 수정 코드에 대한 공동 측정을 수행하는 단계를 포함하며, 여기서 코드의 서로다른 레이어들은, 도 8 내지 9를 참조하여 전술한 바와 같이 서로 다른 시간 단계(클럭 사이클)에서 생성되고, 양자 오류 수정을 수행하는 데 필요한 신드롬 정보를 추출하기 위한 융합 측정을 제공하는 방식으로 서로 얽힐 수 있다. 본 명세서에 제공된 다른 예와 같이, 라우센도르프 격자는 예시를 위해 사용되지만 본 개시의 범위를 벗어나지 않고 다른 코드가 사용될 수 있다.

[0095] 예를 들어, 도 10의 (a) 및 10b는 각각 도 7의 (c)의 라우센도르프 격자로부터의 레이어 1 및 3, 레이어 2 및 4의 부분을 도시한다(여기에서 양자 오류 수정(QEC) 코드라고 함). 도 10의 (c) 및 10d는 사용될 수 있는 예시적인 리소스 상태를 포함하여 FBQC 시스템에서 이러한 레이어를 처리하기 위한 방법을 도시한 도면이다. 예시를 위하여, QEC 코드의 꼭지점 1, 2, 3, 및 4로 한정하여 설명하며, FBQC 시스템에서 리소스 상태 생성 및 측정을 수행하는 방법을 중점적으로 설명한다.

[0096] 도 10의 (a)로 돌아가면, 단계 1001에서, 리소스 상태의 제1 세트가 제1 클럭 사이클 동안 제공된다. 도 10의 (d)는, 꼭지점 1, 2, 3, 4, 5 등에 제공되고 격자를 가로질러 서로 얽혀 있는 단일 큐비트(MBQC 시스템의 경우) 대신에, 각각 서로다르고, 얽혀있지 않으며, 서로 다른 리소스 상태(예를 들어 각각의 리소스 상태 A, B, C, D, E, F 및 G)로부터 유래하는 2개 이상의 큐비트가 제공되는 하나의 예를 도시한 도면이다. 본 명세서에서 사용된 바와 같이, 표기법 A_j^i 는 i 번째 레이어의 A 번째 리소스 상태로부터의 j 번째 큐비트를 나타내기 위해 사용된다. 예를 들어, 도 10의 (d)에서 레이어 1의 A 번째 리소스 상태는, 도시된 바와 같이, $A_1^1, A_2^1, A_3^1, A_4^1$ 로 레이블이 지정된 4개의 큐비트를 포함하는 GHZ 상태이다. 마찬가지로, 레이어 1의 일부로 제공되는 리소스 상태 B를 구성하는 큐비트는 $B_1^1, B_2^1, B_3^1, B_4^1$ 로 레이블될 수 있다(그러나 이번에는 다이어그램을 복잡하게 만드는 것을 피하기 위해 도면에 명시적으로 표시되지 않은 레이블이 있음). 꼭지점 1, 2, 3, 4, 5와 연관된 실패 정보 생성을 위해 융합될 큐비트도 도 10의 (d)에서 실선 타원 1, 2, 3, 4로 둘러싸인 것으로 도시된다. 본 명세서에 사용된 바와 같이, 이들 꼭지점은 각각 도 3 내지 6을 참조하여 위에서 설명된 바와 같이 융합 사이트에서 타입 II 융합을 수행하기 위한 하드웨어와 연관되어 있다.

[0097] 일부 실시예에서, 임의의 주어진 레이어에 대한 리소스 상태는 도 3 및 4를 참조하여 위에서 설명된 것과 같은 큐비트 얽힘 시스템에 의해 생성/제공될 수 있다. 그러나, 본 개시물의 이점을 갖는 당업자는 임의의 큐비트 얽힘 시스템이 채용될 수 있고, 주어진 큐비트 얽힘 시스템이 서로다른 타입의 리소스 상태를 생성하는 경우에도, 많은 서로다른 타입의 리소스 상태 생성기를 채용할 수 있음을 이해할 것이다. 이러한 의미에서, FBQC 시스템은 리소스 상태의 선택과 큐비트 얽힘 시스템을 위한 아키텍처의 선택 또는 심지어 큐비트 자체의 아키텍처에 대해 완전히 불가지론적이며, 따라서 시스템 설계자는 주어진 오류/소음 발생원에 대해 가장 높은 임계값을 산출하는 시스템을 구현할 수 있는 상당한 유연성을 갖게 된다.

[0098] 단계 1003에서, 고전적 데이터 형태의 융합 명령(본원에서 융합 패턴으로도 지칭됨.)이 융합 사이트에 제공된다. 다시 도 3을 참조하면, 예를 들어, 융합 패턴 데이터 프레임 317은, FBQC 시스템에서 양자 애플리케이션이 실행됨에 따라 특정 클럭 사이클 동안 융합 사이트에서 서로다른 얽힌 리소스 상태로부터의 한쌍의 큐비트 사이에 적용될 수 있는 융합 명령(예를 들어, XX 기반 타입 II 융합 측정)의 세트의 한 예이다. 또한 위에서 설명된 바와 같이, 일부 실시예에서, 몇몇 융합 패턴 데이터 프레임은 메모리에 고전적 데이터로서 저장될 수 있다. 일부 실시예에서, 융합 패턴 데이터 프레임은 융합 사이트 내의 특정 융합 게이트에 대해 XX 타입 II 융합이 적용될지 여부(또는 임의의 다른 타입의 융합이 적용될지 여부)를 지시할 수 있다. 또한, 융합 패턴 데이터 프레임은 타입 II 융합이 서로다른 기준(예를 들어, XX, XY, ZZ 등)에서 수행됨을 나타낼 수 있다.

[0099] 도 10의 (d)로 돌아가면, 레이어 1에 대한 융합 명령은 서로다른 리소스 상태(본 명세서에서, 큐비트가 각각 별개의 리소스 상태에 존재하거나 그 일부이기 때문에, 각 양자 서브시스템이라고도 함)로부터 2개 이상의 큐비트를 융합하기 위한 융합 파라미터(큐비트의 위치(location) 및 기준(basis))를 포함할 수 있다. 예를 들어, 융합 사이트 1의 경우 융합 명령은, XX 타입 II 융합이 리소스 상태 A^1, B^1 및 C^1 으로부터의 큐비트 간에 수행되어야 함을 나타내기 위해 융합 매개변수를 지정할 수 있다(또한 E^1, F^1 및 G^1 사이의 사이트 3에 대해서도 유사). 보다 구체적으로, 융합 사이트 1에서 수행될 두 개의 타입 II 융합은 A_1^1 와 B_2^1 사이, 그리고 C_1^1 과 B_3^1 사이에서 수행되는 것으로 지정될 수 있다. 레이어의 다른 융합 사이트에 대해서도 유사한 명령이 제공된다. 예를 들어, 융합 사이트 2의 경우, 융합 명령은 XX 타입 II 융합이 리소스 상태 B^1, D^1 및 F^1 의 큐비트 간에 수행되어야 함을 나타내는 융합 매개변수를 지정할 수 있다. 보다 구체적으로, 융합 사이트 2에서 수행될 두 개의 타입 II 융합은 B_4^1 와 D_2^1 사이 및 D_3^1 과 F_4^1 사이에서 수행되는 것으로 지정될 수 있다. 그러나 모든 큐비트가 측정된 융합 사이트 1의 경우와 달리, 융합 사이트 2에는 두 번째 클럭 사이클까지 측정되지 않은 큐비트가 포함된다. 이는 QEC 격자의 기본 구조가, 서로다른 클럭 사이클에서 서로다른 레이어의 큐비트에 융합될 때까지 이 큐비트의 양자 상태가 보존될 것을 요구하기 때문인데, 즉, 만약 이것이 MBQC 방식이라면, 이 꼭지점과 연관된 큐비트는 다른 레이어의 큐비트, 예를 들어 각각 도 10의 (b)와 10c에 도시된 큐비트 2 및 6과 얽혀있는 큐비트일 것이다.

[0100] 도 10의 (d)에 도시된 명시적인 예로 돌아가서, 융합 명령은 D_4^1 가 다음 클럭 사이클까지 측정되지 않도록 지정할 수 있으며, 여기서 이는 도 10의 (e)에 도시된 레이어 2와 같은 이후의 레이어의 큐비트로부터 융합된다.

광자 구현에서 광섬유는 상기한 기능에 대한 큐비트 지연을 구현할 수 있으며, 이는 미래의 클럭 사이클에 필요할 때까지 큐비트를 저장하는 안정적인 양자 메모리 역할을 한다. 본 명세서에서 사용되는 바와 같이, 이러한 측정되지 않은(지연된) 큐비트는 측정되지 않은 양자 서브시스템으로 지칭된다.

[0101] 융합 사이트 4로 이동하여, 이 사이트는 레이어 간 융합, 즉 이번 클럭 사이클에서 생성된 리소스 상태에서부터의 큐비트와, 이전 클럭 사이클에서 생성되었지만 그 당시에는 측정되지 않고 대신에 다음 클럭 사이클까지 지연되거나, 또는 동등하게, 저장된 리소스 상태에서부터의 큐비트와의 사이의 융합을 포함하는 예이다. 융합 사이트 4의 경우, 융합 명령은, XX 타입 II 융합이 3개의 서로다른 레이어 C^1 , B^0 , 및 B^2 에 있는 리소스 상태에서부터의 큐비트 간에 수행되어야 함을 나타내는 융합 매개변수를 지정할 수 있다. 융합 명령은 큐비트 C^1_2 및 C^1_3 을 다음 클럭 사이클까지 지연(측정하지 않음)하라는 명령도 포함할 수 있다. 예를 들어, 이 경우 융합 명령은 다음 시간 단계에서 C^1_2 가 B^0_4 와 융합되고 C^1_3 이 B^2_1 과 융합될 것임을 나타낼 수 있다.

[0102] 단계 1003에서, 융합 명령에 의해 지정된 융합 오퍼레이션을 수행하여 융합 측정 산출의 형태로 고전적 데이터를 생성한다. 도 3 내지 도 6 및 식 (2)를 참조하여 상술한 바와 같이, 이 고전적 데이터는 디코더로 전달되고 양자 오류 수정에 사용할 신드롬 그래프를 구성하는 데 사용된다.

[0103] 이러한 예는 예시이다. 오류 수정 코드의 선택은, 큐비트 융합 시스템의 출력이 신드롬 그래프를 직접 구성할 수 있는 고전적 데이터가 되도록, 특정 리소스 상태에서부터 융합되는 큐비트 쌍의 세트를 결정한다. 일부 실시예에서, 고전적 오류 신드롬 데이터는 임의의 나머지 큐비트에 대한 추가적인 단일 입자 측정을 수행할 필요 없이 큐비트 융합 시스템으로부터 직접 생성된다. 일부 실시예에서, 큐비트 융합 시스템에서 수행되는 공동 측정은 공동 측정이 수행되는 큐비트를 파괴한다.

[0104] 4. 큐비트 및 경로 인코딩(Path Encoding) 소개

[0105] 광자, 전자, 원자, 이온, 분자, 나노구조 등과 같은 양자 객체의 역학은 양자 이론의 규칙을 따른다. 보다 구체적으로, 양자 이론에서 양자 객체, 예를 들어 광자의 양자 상태는 물리적 속성(physical property)의 세트로 설명되며, 그 전체 세트를 모드(mode)라고 한다. 일부 실시예에서, 모드는 양자 객체의 하나 이상의 속성의 값(또는 값의 분포)을 지정함으로써 정의된다. 예를 들어, 다시 광자의 경우, 모드는 광자의 주파수, 광자의 공간 내 위치(예를 들어 광자가 내부에서 전파하는 도파관 또는 도파관의 중첩), 연관 전파 방향(예를 들어, 자유 공간의 광자에 대한 k-벡터), 광자의 편광 상태(예를 들어, 광자의 전기장 및/또는 자기장의 방향(수평 또는 수직)) 등에 의해 정의될 수 있다.

[0106] 도파관에서 전파하는 광자의 경우, 광자의 상태를 이산 시공간 모드(discrete spacio-temporal mode)의 세트 중 하나로 표현하는 것이 편리하다. 예를 들어, 광자의 공간 모드 k_i 는 유한한 이산 도파관 세트 중 광자가 전파될 수 있는 도파관 중 하나에 따라 결정된다. 또한, 시간 모드 t_j 는 광자가 존재할 수 있는 이산 시간 기간(discrete time period) 세트(본원에서 "빈(bin)"이라고 함) 중 하나에 의해 결정된다. 일부 실시예에서, 시스템의 시간적 이산화는 광자를 생성하는 책임을 맡은 펄스 레이저의 타이밍에 의해 제공될 수 있다. 아래 예에서 공간 모드는 설명의 복잡성을 피하기 위해 주로 사용된다. 그러나, 당업자는 시스템 및 방법이 임의의 타입의 모드, 예를 들어 시간 모드, 편광 모드, 및 양자 상태를 지정하는 역할을 하는 임의의 다른 모드 또는 모드들의 세트에 적용될 수 있음을 이해할 것이다. 또한, 다음 설명에서, 광자의 공간 모드를 정의하기 위해 광자 도파관을 사용하는 실시예가 설명될 것이다. 그러나, 본 개시의 이점을 갖는 통상의 기술자는 임의의 타입의 모드, 예를 들어, 편광 모드, 시간 모드 등이 본 개시의 범위를 벗어나지 않고 사용될 수 있음을 이해할 것이다.

[0107] 구별할 수 없는 여러 입자의 양자 시스템의 경우, 시스템에서 각 입자의 양자 상태를 설명하기보다는 포크(Fock) 상태의 형식을 사용하여 전체 다체 시스템(many-body system)의 양자 상태를 설명하는 것이 유용하다(중중 점유 번호 표시(occupation number representation)라고도 함). 포크 상태 설명에서 다체 양자 상태는 시스템의 각 모드에 있는 입자 수로 지정된다. 모드는 속성의 완전한 세트이므로, 이 설명으로 충분하다. 예를 들어, 다중 모드, 2 입자 포크 상태 $|1001\rangle_{1,2,3,4}$ 는, 모드 1의 광자 1개, 모드 2의 광자 0개, 모드 3의 광자 0개, 모드 4의 광자 1개가 있는 2 입자 양자 상태를 지정한다. 다시, 위에서 소개한 바와 같이, 모드는 양자 객체의 속성의 임의의 세트가 될 수 있다(그리고 양자 상태를 정의하는 데 사용되는 단일 입자 기본 상태에 따라 달라질 수 있음). 광자의 경우, 전자기장의 두 가지 모드를 사용할 수 있는데, 예를 들어 선형 광학(linear

optics)으로 수동적으로 조작할 수 있는 자유도(degree of freedom)와 관련된 모드를 사용하도록 시스템을 설계할 수 있다. 예를 들어, 편광(polarization), 공간 자유도(spatial degree of freedom) 또는 각운동량(angular momentum)이 사용될 수 있다. 예를 들어, 2 입자 포크 상태 $|1001\rangle_{1,2,3,4}$ 로 표시되는 4개 모드 시스템은, 4개중 2개의 도파관(각각 모드 1 및 모드 4를 나타냄)이 그 내부에서 이동하는 하나의 광자를 갖는, 4개의 별개의 도파관으로서 물리적으로 구현될 수 있다. 이러한 다체 양자 시스템 상태의 다른 예는, 각각 하나의 광자를 포함하는 도파관을 나타내는 4개의 광자 포크 상태 $|1111\rangle_{1,2,3,4}$ 와, 각각 2개의 광자를 포함하는 도파관 1 및 2와 0개의 광자를 포함하는 도파관 3 및 4를 나타내는 4개의 광자 포크 상태 $|2200\rangle_{1,2,3,4}$ 이다. . 광자가 존재하지 않는 모드의 경우 "진공 모드(vacuum mode)"라는 용어가 사용된다. 예를 들어, 4개의 광자 포크 상태 $|2200\rangle_{1,2,3,4}$ 에 대해, 모드 3 및 4는 여기에서 "진공 모드"(또한 "부속(ancilla) 모드"라고도 함)라고 한다.

[0108] 본 명세서에서 사용되는 바와 같이, "큐비트(qubit)"(또는 양자 비트(quantum bit)는 정보를 인코딩하는 데 사용될 수 있는 연관된 양자 상태를 갖는 물리적 양자 시스템이다. 큐비트는, 고전적 비트와 달리, 0과 1과 같은 논리 값의 중첩(superposition)인 상태를 가질 수 있다. 일부 실시예에서, 큐비트는, 큐비트의 논리 값이 정확히 하나의 광자(단일 광자)에 의한 두 가지 모드 중 하나의 점유에 의해 인코딩되도록, "이중 레일 인코딩(dual-rail encoding)"된다. 예를 들어, 두 개의 별개의 도파관과 연관된 광자 시스템의 두 가지 공간 모드를 고려하라. 일부 실시예에서, 논리적 0 및 1 값은 다음과 같이 인코딩될 수 있다:

[0109] $|0\rangle_L = |10\rangle_{1,2}$ (1)

[0110] $|1\rangle_L = |01\rangle_{1,2}$ (2)

[0111] 여기서 아래 첨자 "L"은 케트(ket)가 논리 값(예를 들어, 큐비트 값)을 나타낸다는 것을 가리키고, 상기한 바와 같이, 상기 식 (1) 내지 (2)의 오른쪽의 표기법(notiation) $|ij\rangle_{1,2}$ 은 각각 제1 도파관에 i 광자가 있고 제2 도파관에 j 광자가 있음을 가리킨다(예를 들어, 여기서 i와 j는 정수). 이 표기법에서 논리값 $|01\rangle_L$ (첫 번째 큐비트는 '0' 논리 상태에 있고 두 번째 큐비트는 '1' 논리 상태에 있는 두 큐비트의 상태를 나타냄)을 갖는 두 큐비트 상태는, $|1001\rangle_{1,2,3,4}$ (즉, 첫 번째 도파관에 1개의 광자, 두 번째 도파관에 0개의 광자, 세 번째 도파관에 0개의 광자, 네 번째 도파관에 1개의 광자)에 의해, 4개의 별개의 도파관에 걸친 광자 점유를 사용하여 나타낼 수 있다. 일부 경우에, 본 개시 전체에 걸쳐 불필요한 수학적 혼란을 피하기 위해 다양한 아래첨자가 생략된다. 5. LOQC의 소개

[0112] 5.1. 이중 레일 광자 큐비트

[0113] 큐비트(및 큐비트에 대한 오퍼레이션)는 다양한 물리적 시스템을 사용하여 구현할 수 있다. 여기에 설명된 일부 예에서, 큐비트는 도파관, 빔 스플리터(또는 방향성 결합기), 광자 스위치 및 단일 광자 검출기를 사용하는 통합 광자 시스템에 제공되며, 광자가 점유할 수 있는 모드는 도파관 내 광자의 존재에 해당하는 시공간 모드이다. 모드는 광학적 빔 스플리터와 같은 모드 결합기를 사용하여 결합되어 변환 오퍼레이션을 구현하고, 측정 오퍼레이션은 단일 광자 검출기를 특정 도파관에 결합하여 구현할 수 있다. 본 개시내용에 접근할 수 있는 당업자는 임의의 적절한 자유도 세트에 의해 정의된 모드, 예를 들어 편광 모드, 시간 모드 등이 본 개시내용의 범위를 벗어나지 않고 사용될 수 있음을 이해할 것이다. . 예를 들어, 단지 편광만이 다른 모드(예를 들어, 수평(H) 및 수직(V))의 경우, 모드 결합기는, 예를 들어 파장판(waveplate) 등의 복굴절 재료(birefringent material)와 같이, 일관되게 편광을 회전시키는 임의의 광학 요소일 수 있다. 이온 트랩 시스템(ion trap system) 또는 중성 원자 시스템(neutral atom system)과 같은 다른 시스템의 경우, 모드 결합기는 두 가지 모드를 결합할 수 있는 물리적 메커니즘(physical mechanism)일 수 있다(예를 들어, 원자/이온의 두 내부 상태를 결합하도록 조정되는 펄스 전자기장).

[0114] 이중 레일 인코딩을 사용하는 광자 양자 컴퓨팅 시스템의 일부 실시예에서, 큐비트는 한 쌍의 도파관을 사용하여 구현될 수 있다. 도 11a는 이중 레일 인코딩된 광자 큐비트를 제공하는 데 사용될 수 있는 한 쌍의 도파관 1102, 1104의 일부의 두 가지 표현 (1100, 1100')을 도시한 도면이다. 1100에서, 광자 1106은 도파관 1102에 있고, 도파관 1104에는 광자가 없다(진공 모드라고도 함): 일부 실시예에서 이것은 광자 큐비트의 $|0\rangle$ 상태에 해당한다. 1100'에서, 광자 1108은 도파관 1104에 있고 도파관 1102에는 광자가 없다: 일부 실시예에서 이것은 광자 큐비트의 $|1\rangle$ 상태에 해당한다. 알려진 상태의 광자 큐비트를 준비하기 위해, 광자 소스(도시되지 않

음)가 도파관 중 하나의 일단에 결합될 수 있다. 광자 소스는 결합된 도파관으로 단일 광자를 방출하도록 오퍼레이션되어, 알려진 상태의 광자 큐비트가 준비될 수 있다. 광자는 도파관을 통해 이동하고, 광자 소스를 주기적으로 오퍼레이션함으로써, 논리적 상태가 광자 시스템의 서로다른 시간 모드에 매핑되는 큐비트를 갖는 양자 시스템이 동일한 도파관 쌍에서 생성될 수 있다. 또한 여러 쌍의 도파관을 제공하여 논리적 상태가 서로다른 시공간 모드에 해당하는 큐비트를 갖는 양자 시스템을 만들 수 있다. 그러한 시스템의 도파관은 서로에 대해 특정한 공간적 관계를 가질 필요가 없다는 것을 이해해야 한다. 예를 들어, 병렬로 배열될 수 있지만 반드시 그럴 필요는 없다.

[0115] 점유 모드(occupied mode)는, 원하는 도파관에서 전파되는 광자를 생성하기 위해, 광자 소스를 사용하여 창출될 수 있다. 광자 소스는, 예를 들어, 헤럴드 단일 광자 소스(heralded single photon source)라고도 하는, 광자 쌍을 방출하는 공진기 기반 소스(resonator-based source)일 수 있다. 이러한 소스의 한 예에서, 소스는, 비선형 광학 프로세스(예를 들어, 자발적 4파 혼합(Spontaneous Four Wave Mixing, SFWM), 자발적 파라메트릭 다운변환(Spontaneous Parametric Down-Conversion, SPDC), 2차 고조파 생성 등)를 통해 한 쌍의 광자를 생성할 수 있는 광학 공진기 시스템에 결합된 펌프, 예를 들어 펄스에 의해 구동된다. 다양한 타입의 광자 소스가 채용될 수 있다. 광자 쌍 소스의 예는 마이크로링 기반(microring-based) 자발적 4파 혼합(SPFWM) 헤럴드 광자 소스(HPS)를 포함할 수 있다. 그러나 사용된 광자 소스의 정확한 타입은 중요하지 않으며 SPFW, SPDC 또는 기타 프로세스와 같은 프로세스를 채용하는 임의의 타입의 소스를 사용할 수 있다. 원자 및/또는 인공 원자 시스템, 예를 들어 양자점 소스, 결정의 색상 중심 등을 사용하는 것과 같이 반드시 비선형 재료를 필요로 하지 않는 소스의 다른 부류도 사용될 수 있다. 일부 경우에, 소스는, 예를 들어 공동에 결합된 양자점과 같은 인공 원자 시스템의 경우와 같이, 광자 공동에 결합될 수도 있고 그렇지 않을 수도 있다. 광기계 시스템(optomechanical system) 등과 같은 SPWM 및 SPDC를 위한 다른 타입의 광자 소스도 존재한다.

[0116] 그러한 경우에, 광자 소스의 오퍼레이션은, 주어진 펌프 펄스가 광자 쌍을 생산하거나 생산하지 않을 수 있도록, 결정적이거나 비결정적일 수 있다(때때로 "확률적(stochastic)"이라고도 함). 일부 실시예에서, 여러 비결정적 소스의 일관된 공간적 및/또는 시간적 다중화(본원에서 "능동" 다중화로 지칭됨)는, 하나의 모드가 주어진 사이클 동안 점유되어 1에 접근할 확률을 허용하는 데 사용될 수 있다. 당업자는 공간적 및/또는 시간적 다중화를 통합하는 많은 서로다른 능동 다중화 아키텍처가 가능하다는 것을 이해할 것이다. 예를 들어, 로그 트리(log-tree), 일반화된 마하-젠더 간섭계, 다중 모드 간섭계, 체인 소스, 덤프 펌프 방식이 있는 체인 소스, 비대칭 다결정 단일 광자 소스 또는 기타 타입의 능동 다중화 아키텍처를 채용하는 능동 다중화 방식이 사용될 수 있다. 일부 실시예에서, 광자 소스는 양자 피드백 제어 등을 갖는 능동 다중화 방식을 채용할 수 있다.

[0117] 측정 오퍼레이션은 광자가 검출기에 의해 검출되었음을 가리키는 고전적 신호(예를 들어, 디지털 논리 신호)를 생성하는 단일 광자 검출기에 도파관을 결합하여 구현될 수 있다. 단일 광자에 대한 감도를 갖는 임의의 타입의 광검출기가 사용될 수 있다. 일부 실시예에서, (예를 들어, 도파관의 출력단에서) 광자의 검출은 점유 모드를 가리키는 한편, 검출된 광자의 부재는 비점유 모드를 가리킬 수 있다. 일부 실시예에서, 측정 오퍼레이션은 특정 기준(particular basis)(예를 들어, 파울리 행렬(Pauli matrix) 중 하나에 의해 정의되고 X, Y, 또는 Z로 지칭되는 기준)에서 수행되고, 아래에 설명된 바와 같은 모드 결합(mode coupling)은 큐비트를 특정 기준으로 변환하기 위해 적용될 수 있다.

[0118] 아래에 설명된 일부 실시예는, 시스템의 양자 상태를 변환하는 것으로 이해될 수 있는 양자 시스템의 모드를 결합하는 유니터리 변환 오퍼레이션(unitary transform operation)의 물리적 구현에 관한 것이다. 예를 들어, 양자 시스템의 초기 상태(모드 결합 이전)가 한 모드가 확률 1로 점유되고 다른 모드가 확률 1로 점유되지 않은 상태인 경우(예를 들어, 숫자가 각 상태의 점유를 가리키는 포크 표기법에서의 $|10\rangle$ 상태), 모드 결합은 두 모드가 점유될 확률이 0이 아닌 상태(예를 들어 $a_1|10\rangle + a_2|01\rangle$ 상태)가 될 수 있으며, 여기서 $|a_1|^2 + |a_2|^2 = 1$ 이다. 일부 실시예에서, 이러한 종류의 오퍼레이션은 빔 스플리터를 사용하여 모드를 함께 결합하고 가변 위상 시프터를 사용하여 하나 이상의 모드에 위상 시프트를 적용함으로써 구현될 수 있다. 진폭 a_1 및 a_2 는 빔 스플리터의 반사율(또는 투과율)과 도입된 위상 변이에 따라 달라진다.

[0119] 도 11b는 2가지 모드의 결합을 위한 개략도 1110(회로도 또는 회로 표기법으로도 지칭됨)를 도시한 도면이다. 모드는 수평선 1112, 1114으로 도시되고, 모드 결합기 1116은 결합되는 모드를 식별하기 위해 노드(채워진 점)로 끝나는 수직선으로 표시된다. 선형 양자 광학의 보다 구체적인 언어에서, 도 11b에 도시된 모드 결합기 1116은 다음의 전달 행렬을 구현하는 50/50 빔 스플리터를 나타낸다:

$$T = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

[0120]

[0121]

여기서 T는 두 가지 모드에서 광자 생성 연산자에 대한 선형 맵(linear map)을 정의한다. (특정 상황에서, 전달 행렬 T는 1차 허수 아마다르 변환(first-order imaginary Hadamard transform)을 구현하는 것으로 이해될 수 있다.) 관례에 따라, 전달 행렬의 첫 번째 열은 최상위 모드(여기에서 모드 1이라고 하며 수평선 1112로 표시됨)의 창출 연산자(creation operator)에 해당하고, 두 번째 열은 두 번째 모드(여기에서 모드 2라고 하며 수평선 1114로 표시됨)의 창출 연산자에 해당하며, 시스템에 두 개 이상의 모드가 포함된 경우에도 마찬가지이다. 보다 명시적으로 매핑은 다음과 같이 작성할 수 있다:

$$\begin{pmatrix} a_1^\dagger \\ a_2^\dagger \end{pmatrix}_{\text{input}} \mapsto \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1^\dagger \\ a_2^\dagger \end{pmatrix}_{\text{output}}, \quad (5)$$

[0122]

[0123]

여기서, 창출 연산자의 아래 첨자는 오퍼레이션되는 모드를 가리키고, 아래 첨자 입력 및 출력은 각각 빔 스플리터 전후의 창출 연산자의 형태를 식별하며, 여기서:

[0124]

$$a_i |n_i, n_j\rangle = \sqrt{n_i} |n_i - 1, n_j\rangle$$

[0125]

$$a_j |n_i, n_j\rangle = \sqrt{n_j} |n_i, n_j - 1\rangle \quad (6)$$

[0126]

$$a_j^\dagger |n_i, n_j\rangle = \sqrt{n_j + 1} |n_i, n_j + 1\rangle$$

[0127]

예를 들어, 도 11b에 도시된 모드 결합기를 적용하면 다음 매핑이 생성된다:

[0128]

$$a_{1\text{input}}^\dagger \mapsto \frac{1}{\sqrt{2}} (a_{1\text{output}}^\dagger - i a_{2\text{output}}^\dagger) \quad (7)$$

[0129]

$$a_{2\text{input}}^\dagger \mapsto \frac{1}{\sqrt{2}} (-i a_{1\text{output}}^\dagger + a_{2\text{output}}^\dagger)$$

[0130]

따라서, 식 (4)에 의해 설명되는 모드 결합기의 동작은 입력 상태 $|10\rangle$, $|01\rangle$ 및 $|11\rangle$ 를 취하여 다음을 수행한다:

[0131]

$$|10\rangle \mapsto \frac{|10\rangle - i|01\rangle}{\sqrt{2}}$$

[0132]

$$|01\rangle \mapsto \frac{-i|10\rangle + |01\rangle}{\sqrt{2}} \quad (8)$$

[0133]

$$|11\rangle \mapsto \frac{-i}{2} (|20\rangle + |02\rangle)$$

[0134]

도 11c는 일부 실시예에 따른 2개의 광자 모드에 대해 식 (4)의 전달 행렬 T를 구현하는 모드 결합의 물리적 구현을 도시한 도면이다. 이 예에서, 모드 결합은, 종종 방향성 결합기 또는 모드 결합기라고도 불리는 도파관 빔 스플리터 1120를 사용하여 구현된다. 도파관 빔 스플리터 1120는, 2개의 도파관 1122, 1124을 하나의 도파관의 소멸 필드(evanescent field)가 다른 것으로 결합할 수 있을 만큼 충분히 근접하게 함으로써, 실현될 수

있다. 도파관 1122, 1124 사이의 간격 d 및/또는 결합 영역의 길이 l 을 조정함으로써, 모드 간의 서로다른 결합을 얻을 수 있다. 이러한 방식으로, 도파관 빔 스플리터 1120은 원하는 투과율을 갖도록 구성될 수 있다. 예를 들어, 빔 스플리터는 0.5와 동일한 투과율을 갖도록 엔지니어링될 수 있다(즉, 위에서 소개된 전달 행렬 T 의 특정 형태를 구현하기 위한 50/50 빔 스플리터). 다른 전달 행렬이 필요한 경우, 반사율(또는 투과율)은, 본 개시내용의 범위를 벗어나지 않고, 0.6 초과, 0.7 초과, 0.8 초과, 또는 0.9 초과가 되도록 엔지니어링될 수 있다. 모드 결합에 더하여, 일부 유니터리 변환은 하나 이상의 모드에 적용된 위상 시프트를 포함할 수 있다. 일부 광자 구현에서, 가변 위상 시프터는 집적 회로에 구현되어 여러 모드에 걸쳐 확산된 광자 상태의 상대적 위상에 대한 제어를 제공할 수 있다. 이러한 위상 시프트를 정의하는 전달 행렬의 예는 (각각 $+i$ 및 $-i$ 위상 시프트를 두 번째 모드에 적용하기 위해) 다음과 같이 주어진다:

[0135]

$$s = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix} \quad (9)$$

[0136]

$$s^\dagger = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix}$$

[0137]

실리카-온-실리콘(silica-on-silicon) 물질의 경우 일부 실시예는 열광학 스위치를 사용하여 가변 위상 시프터를 구현한다. 열광학 스위치는 칩 표면에 제작된 저항 요소를 사용하는데, 이는 열광학 효과를 통해 10-5K 정도의 양만큼 도파관의 온도를 높임으로써 굴절률 n 의 변화를 제공할 수 있다. 본 개시내용에 접근할 수 있는 당업자는 도파관의 일부의 굴절률을 변경하는 임의의 효과가 가변적이고 전기적으로 조정가능한 위상 시프트를 생성하기 위해 사용될 수 있음을 이해할 것이다. 예를 들어, 일부 실시예는, 전기 광학 효과를 지원하는 임의의 재료, 예를 들어 리튬 니오바이트(lithium niobite), BBO, KTP, BTO, PZT 등과 같은 소위 χ_2 및 χ_3 재료 및 심지어 실리콘, 게르마늄 등과 같은 도핑된 반도체를 기반으로 하는 빔 스플리터를 사용한다.

[0138]

5.2. 광자 모드 결합기: 빔 스플리터

[0139]

가변 투과율 및 출력 모드 간의 임의의 위상 관계를 갖는 빔 스플리터는, 또한 예를 들어 도 11d에 도시된 바와 같이, 마하-젠더 간섭계(MZI) 구성 1130에서 방향성 결합기 및 가변 위상 시프터를 조합함으로써 달성될 수 있다. 이중 레일 인코딩에서 2개의 모드 1132a, 1132b의 상대적 위상 및 진폭에 대한 완전한 제어는, 위상 시프터 1136a, 1136b, 및 1136c에 의해 부여된 위상 및 결합 영역 1134a 및 1134b의 길이 및 근접성을 변화시킴으로써 달성될 수 있다. 도 11e는 위상 시프터 1137에 의해 부여된 위상을 변화시킴으로써 모드 1132a, 1132b 사이의 가변 투과율을 허용하는 MZI 1140의 약간 더 간략한 예를 도시한 도면이다. 도 11d 및 11e는 물리적 장치에서 모드 결합기를 구현할 수 있는 방법의 예이지만, 본 개시의 범위를 벗어나지 않고 임의의 타입의 모드 결합기/빔 스플리터가 사용될 수 있다.

[0140]

일부 실시예에서, 빔 스플리터 및 위상 시프터는 다양한 전달 행렬을 구현하기 위해 조합되어 사용될 수 있다. 예를 들어, 도 12a는 다음의 전달 행렬을 구현하는 모드 결합기 1200를, 도 11a와 유사한 개략적인 형태로, 도시한 도면이다:

[0141]

$$T_r = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

[0142]

따라서 모드 결합기 1200은 다음의 매핑을 적용한다:

[0143]

$$|10\rangle \mapsto \frac{|10\rangle + |01\rangle}{\sqrt{2}}$$

[0144]

$$|01\rangle \mapsto \frac{|10\rangle - |01\rangle}{\sqrt{2}} \quad (11)$$

$$|11\rangle \leftrightarrow \frac{1}{2}(|20\rangle + |02\rangle).$$

[0145]

[0146]

식 (10)의 전달 행렬 T_r 은 제2 모드에서의 위상 시프트에 의해 식 (4)의 전달 행렬 T 와 관련된다. 이것은 모드 결합기 1216이 제1 모드(라인 1212)에 결합되는 폐쇄 노드 1207 및 모드 결합기 1216이 제2 모드(라인 1214)에 결합되는 개방 노드 1208에 의해 도 12a에 개략적으로 예시된다. 보다 구체적으로, $T_r = sT$ 이며, 도 12a의 우측에 도시된 바와 같이, 모드 결합기 1216는, 선행 및 후속 위상 시프트(열린 삼각형 1218a, 1218b로 표시됨)와 함께, (위에서 설명된 바와 같은) 모드 결합기 1216를 사용하여 구현될 수 있다. 따라서, 전달 행렬 T_r 은, 도 12b에 도시된 물리적 빔 스플리터에 의해 구현될 수 있으며, 여기서 열린 삼각형은 +i 위상 시프트를 나타낸다.

[0147]

5.3. 광자 확산 회로의 예

[0148]

모드 결합기와 위상 시프트의 네트워크는 2개 이상의 모드 간의 결합을 구현하는 데 사용할 수 있다. 예를 들어, 도 13은 4가지 모드에서 "확산기(spreaders)" 또는 "모드 정보 소거(mode-information erasure)" 변환을 구현하는 4가지 모드 결합 방식이 도시되어 있는데, 즉, 입력 모드 중 하나에서 광자를 취하고 4가지 출력 모드 각각에서 광자를 비편재화(delocalize)하여, 광자가 4가지 출력 모드 중 하나에서 검출될 확률이 동일하도록 한다. (잘 알려진 아다마르 변환은 스프레더 변환의 한 예이다.) 도 11a에서와 같이, 수평선 1312 내지 1315는 모드에 대응하고, 모드 결합은 결합되는 모드를 식별하기 위해 노드(점)가 있는 수직선 1316으로 표시된다. 이 경우 4가지 모드가 결합된다. 회로 표기법 1302는 1차 모드 결합(first-order mode coupling)의 네트워크인 회로도 1304와 동등한 표현이다. 보다 일반적으로, 고차 모드 결합이 1차 모드 결합의 네트워크로서 구현될 수 있는 경우, (적절한 수의 모드를 갖는) 표기법 1302와 유사한 회로 표기법이 사용될 수 있다.

[0149]

도 14는 일부 실시예에 따라 도 13에 개략적으로 도시된 4-모드 모드-확산 변환(four-mode mode-spreading transform)을 구현할 수 있는 예시적인 광학 장치 1400을 도시한 도면이다. 광학 장치 1400은, 제1 재료 레이어(도 14에서 실선으로 표시됨)에 형성된 제1 광 도파관 세트 1401, 1403 및, 제1 재료 레이어와 구별되고 분리된 제2 재료 레이어(도 14에서 점선으로 표시됨)에 형성된 제2 광 도파관 세트 1405, 1407를 포함한다. 제2 재료 레이어와 제1 재료 레이어는 기관에서 서로 다른 높이에 위치한다. 당업자는, 적절한 저손실 도파관 교차(low loss waveguide crossing)가 채용된다면, 도 14에 도시된 것과 같은 간접계가 단일 레이어로 구현될 수 있음을 이해할 것이다.

[0150]

제1 광 도파관 세트의 적어도 하나의 광 도파관 1401, 1403은, 임의의 타입의 적합한 광 결합기를 사용하여 제2 광 도파관 세트의 광 도파관 1405, 1407과 결합된다. 예를 들어, 도 14에 도시된 광학 장치는 4개의 광 결합기 1418, 1420, 1422, 1424를 포함한다. 각 광 결합기는 두 개의 도파관이 병렬로 전파되는 결합 영역을 가질 수 있다. 도 14에서는 2개의 도파관이 결합 영역에서 서로 오프셋(offset)되어 있는 것으로 도시되어 있지만, 2개의 도파관은 오프셋 없이 결합 영역에서 서로 직상방 및 하방에 위치할 수 있다. 일부 실시예에서, 광 결합기 1418, 1420, 1422, 및 1424 중 하나 이상은, 2개의 도파관 사이에서 약 50%의 결합 효율(예를 들어, 49%와 51% 사이의 결합 효율, 49.9%와 50.1% 사이의 결합 효율, 49.99% ~ 50.01% 사이의 결합 효율, 50%의 결합 효율 등)을 갖도록 구성된다. 예를 들어, 두 도파관의 길이, 두 도파관의 굴절률, 두 도파관의 너비와 높이, 두 도파관 사이에 위치한 물질의 굴절률, 및 두 도파관 사이의 거리는 두 도파관 사이의 50%의 결합 효율을 제공하도록 선택된다. 이를 통해 광 결합기가 50/50 빔 스플리터처럼 작동할 수 있다.

[0151]

또한, 도 14에 도시된 광 소자는 2개의 레이어간 광 결합기 1414, 1416를 포함할 수 있다. 광 결합기 1414는 제1 재료 레이어 상의 도파관에서 전파하는 광을 제2 재료 레이어 상의 도파관으로 전달하는 것을 허용하고, 광 결합기 1416은 제2 재료 레이어 상의 도파관에서 전파하는 광을 제1 재료 레이어 상의 도파관으로 전달할 수 있게 한다. 광 결합기 1414, 1416은 적어도 2개의 서로다른 레이어에 위치된 광 도파관이 다채널 광 결합기에서 사용될 수 있게 하고, 이는 다시 소형 다채널 광 결합기를 가능하게 한다.

[0152]

또한, 도 14에 도시된 광학 장치는 비결합 도파관 교차 영역(non-coupling waveguide crossing region) 1426을 포함한다. 일부 구현에서, 2개의 도파관(이 예에서 1403 및 1405)은 비결합 도파관 교차 영역 1426의 교차점에 존재하는 병렬 결합 영역(parallel coupling region) 없이 서로 교차한다(예를 들어, 도파관은 거의 90도 각도로 서로를 교차하는 2개의 직선 도파관일 수 있다.).

[0153]

당업자는 전술한 예들이 예시적이며 빔 스플리터 및/또는 위상 시프트를 이용한 광자 회로가 임의의 차수의 실수 및 허수 아다마르 변환을 위한 전달 행렬, 이산 푸리에 변환 등을 포함하여 많은 다른 전달 행렬을 구현하기

위해 사용될 수 있음을 이해할 것이다. 여기에서 "확산기" 또는 "모드 정보 소거(Mode-information erasure, MIE)" 회로라 불리는 광자 회로의 한 클래스는, 입력이 하나의 입력 모드에 국한된 단일 광자일 경우, 광자가 출력 모드 중 어느 하나에서 검출될 확률이 같도록, 회로가 여러 출력 모드 중 각각에서 광자를 비편재화하는 특성을 갖는다. 스프레더 또는 MIE 회로의 예로는 아다마르 전달 행렬을 구현하는 회로가 있다. (확산기 또는 MIE 회로는 하나의 입력 모드에 국한된 단일 광자가 아닌 입력을 수신할 수 있으며 이러한 경우 회로의 동작은 구현된 특정 전달 행렬에 따라 다름을 이해하여야 한다.) 다른 예에서, 광자 회로는, 하나의 입력 모드의 단일 광자에 대해 다른 출력 모드에서 광자를 검출할 불균등한 확률을 제공하는 전달 행렬을 포함하여, 다른 전달 행렬을 구현할 수 있다.

[0154] 5.4. 광자 벨 상태 생성기 회로(Photonic Bell State Generator Circuit)의 예

[0155] 벨 쌍(Bell pair)은, 벨 상태(Bell state)라고 하는 임의의 타입의 최대 얽힌 상태에 있는 큐비트의 쌍이다. 이중 레일 인코딩 큐비트의 경우 벨 상태(벨 기준 상태라고도 함)의 예는 다음과 같다:

[0156]
$$|\Phi^+\rangle = \frac{|0\rangle_L|0\rangle_L + |1\rangle_L|1\rangle_L}{\sqrt{2}} = \frac{|1010\rangle + |0101\rangle}{\sqrt{2}}$$

[0157]
$$|\Phi^-\rangle = \frac{|0\rangle_L|0\rangle_L - |1\rangle_L|1\rangle_L}{\sqrt{2}} = \frac{|1010\rangle - |0101\rangle}{\sqrt{2}}$$

[0158]
$$|\Psi^+\rangle = \frac{|0\rangle_L|1\rangle_L + |1\rangle_L|0\rangle_L}{\sqrt{2}} = \frac{|1001\rangle + |0110\rangle}{\sqrt{2}}$$

[0159]
$$|\Psi^-\rangle = \frac{|0\rangle_L|1\rangle_L - |1\rangle_L|0\rangle_L}{\sqrt{2}} = \frac{|1001\rangle - |0110\rangle}{\sqrt{2}}$$

[0160] 두 가지 상태가 있는 연산 기반(예를 들어, 논리적 기반)에서, 그린버거-혼-자일링거(Greenberger-Horne-Zeilinger) 상태는, 두 상태중 제2 상태에 있는 모든 큐비트와 중첩된 제1 상태에 있는 모든 큐비트의 양자 중첩이다. 위에서 설명한 논리적 기반을 사용하여 일반적인 M 큐비트 GHZ 상태는 다음과 같이 작성할 수 있다:

[0161]
$$|\text{GHZ}\rangle = \frac{|0\rangle^{\otimes M} + |1\rangle^{\otimes M}}{\sqrt{2}}$$

[0162] 일부 실시예에서, 다중 광자 큐비트의 얽힌 상태는 2개(또는 그 이상의) 큐비트의 모드를 결합하고 다른 모드에 대한 측정을 수행함으로써 창출될 수 있다. 예로서, 도 15는 일부 이중 레일 인코딩된 광자 실시예에서 사용될 수 있는 벨 상태 생성기 1500에 대한 회로도도 도시한 도면이다. 이 예에서, 모드 1532(1) 내지 1532(4)는 초기에 각각 광자(파선으로 표시됨)에 의해 점유되고; 모드 1532(5) 내지 1532(8)은 초기에 진공 모드이다. (해당 분야의 당업자는 점유 및 비점유 모드의 다른 조합이 사용될 수 있음을 이해할 것이다.)

[0163] 모드 결합기 1531(1) 내지 1531(4)에 의해 도시된 바와 같이, 점유 및 비점유 모드 쌍에 대해 1차 모드 결합(예를 들어, 식 (4)의 전달 행렬 T의 구현)이 수행된다. 그 후, 모드 결합기 1537에 의해 도시된 바와 같이, 모드-정보 소거 결합(예를 들어, 도 13에 도시된 바와 같은 4개 모드 모드 확산 변환의 구현)이 4개의 모드(모드 1532(5) 내지 1532(8))에 대해 수행된다. 모드 1532(5) 내지 1532(8)은, 벨 상태가 다른 4가지 모드 1532(1) 내지 1532(4)에서 성공적으로 생성되었는지 여부를 측정하고 결정하는데 사용되는 "헤럴드(herald)" 모드 역할을 한다. 예를 들어, 검출기 1538(1) 내지 1538(4)는 2차 모드 결합기 1537 이후에 모드 1532(5) 내지 1532(8)에 결합될 수 있다. 검출기 1538(1) 내지 1538(4)의 각각은 광자를 검출했는지 여부(또는 검출된 광자의 수)를 가리키는 고전적 데이터 신호(예를 들어, 도전체의 전압 레벨)를 출력할 수 있다. 이들 출력은, 고전적 출력 데이터에 기초하여 벨 상태가 다른 4개의 모드 1532(1) 내지 1532(4)에 존재하는지 여부를 결정하는 고전적 결정 논리 회로 1540에 결합될 수 있다. 예를 들어, 결정 논리 회로 1540은, 검출기 1538(1) 내지 1538(4)의 정확히 두 개의 각각에 의해 단일 광자가 검출된 경우에만 벨 상태가 확인되도록(벨 상태 생성기의 "성공"이라고도 함) 구성될 수 있다. 모드 1532(1) 내지 1532(4)는 도 15에 도시된 바와 같이 두 큐비트(큐비

트 1 및 큐비트 2)의 논리 상태에 매핑될 수 있다. 특히, 이 예에서 큐비트 1의 논리 상태는 모드 1532(1) 및 1532(2)의 점유를 기반으로 하고, 큐비트 2의 논리 상태는 모드 1532(3) 및 1532(4)의 점유를 기반으로 한다. 벨 상태 생성기 1500의 오퍼레이션은 비결정적일 수 있다는 점에 유의해야 한다: 즉, 도시된 대로 4개의 광자를 입력한다고 해서 모드 1532(1) 내지 1532(4)에 벨 상태가 창출되는 것이 보장되는 것은 아니다. 한 구현에서 성공 확률은 4/32이다.

[0164] 일부 실시예에서, 다중 얽힌 큐비트(벨 상태가 2개 큐비트의 리소스 상태로 이해될 수 있지만 일반적으로 3개 이상의 큐비트)의 리소스 상태를 형성하는 것이 바람직하다. 더 큰 얽힌 시스템을 형성하는 한 가지 기술은 "융합" 게이트를 사용하는 것이다. 융합 게이트는 두 개의 입력 큐비트를 수신하며, 각 큐비트는 일반적으로 얽힌 시스템의 일부이다. 융합 게이트는, 초기의 두 개의 얽힌 시스템이 단일의 얽힌 시스템으로 융합되는 방식으로, 1("타입 I 융합") 또는 0("타입 II 융합")의 출력 큐비트를 생산하는 입력 큐비트에 대해 "융합" 오퍼레이션을 수행한다. 융합 게이트는, 큐비트 간의 얽힘을 창출하는 데 채용될 수 있고 특히 광자 아키텍처에 적합한 2-입자 투영 측정의 일반적인 클래스의 특정한 예이다. 타입 I 및 타입 II 융합 게이트의 예가 이제 설명될 것이다.

[0165] 6. 융합 게이트 광자 회로(Fusion gate Photonic Circuits)의 예

[0166] 도 16 내지 21은 타입 II 융합을 사용하는 일부 실시예에 따라 사용될 수 있는 광자 큐비트에 대한 융합 게이트 또는 융합 회로의 광자 회로 구현의 일부 실시예를 도시한 도면이다. 이들 예시적인 실시예는 예시적이며 제한적이지 않다는 것을 이해해야 한다. 보다 일반적으로, 본 명세서에 사용된 바와 같이, "융합 게이트"라는 용어는 선택된 벨 기준에 따라 두 개의 연산자(예를 들어, 연산자 XX, ZZ, 연산자 XX, ZY 등)를 측정할 수 있는 2-입자 투영 측정(two-particle projective measurement)(예를 들어, 벨 투영(Bell projection))을 구현할 수 있는 장치를 지칭한다. 편광 인코딩에서, 타입 II 융합 회로(또는 게이트)는, 두 입력 모드를 취하여, 편광 빔 스플리터(polarization beam splitter, PBS)에서 혼합한 다음, 연산 기반에서 측정하기 전에 각 모드를 45°만큼 회전한다. 도 16은 일 예를 도시한다. 경로 인코딩에서, 타입 II 융합 회로는 네 모드를 취하고, 두 번째와 네 번째 모드를 교환하고 두 쌍의 인접 모드 사이에 50:50 빔 스플리터를 적용한 다음 모두 검출한다. 도 17은 일 예를 도시한다.

[0167] 융합 게이트는 큐비트의 소위 "중복 인코딩(redundant encoding)"을 사용하여 더 큰 얽힌 상태를 구성하는 데 사용될 수 있다. 이것은 여러 광자로 표현되는 단일 큐비트로 구성되는데, 즉:

[0168]
$$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \rightarrow \alpha|0\rangle^{\otimes n} + \beta|1\rangle^{\otimes n},$$

[0169] 이며, 논리적 큐비트는 n개의 개별 큐비트로 인코딩된다. 이것은 X 기반으로 인접한 큐비트를 측정하여 달성된다.

[0170] 그 사이에 예지가 없는 n 큐비트로 그래픽으로 도시된(도 18(b)에서와 같이) 이 인코딩은, 중복 큐비트에 대한 Pauli 측정은 클러스터를 분할하지 않고, 오히려 중복 인코딩에서 측정된 광자를 제거하고 인접한 큐비트를 입력 큐비트의 결합을 상속하는 단일 큐비트로 결합하며, 아마도 위상을 추가할 수 있다는 이점이 있다. 또한, 이러한 타입의 융합의 또 다른 장점은 손실 내성(loss tolerant)이 있다는 것이다. 두 모드 모두 측정되므로, 광자 중 하나가 손실될 경우 성공을 예고(herald)하는 검출 패턴(detection pattern)을 얻을 수 있는 방법이 없다. 마지막으로 타입 II 융합은, 성공적인 융합의 예고(heralding)를 위해 두 개의 검출기가 클릭(click)해야 하고 각 검출기의 광자 수가 1인 경우에만 발생할 수 있기 때문에, 서로 다른 광자 수를 분별할 필요가 없다.

[0171] 편광 인코딩에서의 각 검출기에서 단일 광자가 검출되면 50%의 확률로 융합이 성공한다. 이 경우 전송되는 큐비트에 대해 벨 상태 측정을 효과적으로 수행하여 논리적 큐비트 쌍을 최대의 얽힌 상태로 투영한다. 게이트가 실패하면(검출기 중 하나에서 0 또는 2개의 광자에 의해 예고된바와 같이), 각 광자를 연산 기반으로 측정하여 중복 인코딩으로부터 제거하지만 논리적 큐비트는 파괴하지 않는다. 클러스터 생성에서 융합의 효과는 도 18의 (a) 내지 (d)에 묘사되어 있는데, 여기서 도 18의 (a) 및 18b는 X 기반의 선형 클러스터에서 큐비트를 측정하여 그 이웃과 단일의 논리적 큐비트로 결합하는 것을 도시하며, 도 18의 (c) 및 18d는 게이트의 성공과 실패가 클러스터의 구조에 미치는 영향을 도시한다. 성공적인 융합으로 2차원 클러스터를 구축할 수 있음을 알 수 있다.

[0172] 상태의 게이트에 의해 구현된 크라우스(Kraus) 연산자와 검출 패턴 사이의 대응 관계를 추출할 수 있다. 이 경우 두 큐비트가 모두 검출되므로, 이들은 다음과 같은 투영(projector)이다:

$$h_1h_2, v_1v_2 \rightarrow \frac{h_1h_2 + v_1v_2}{\sqrt{2}}$$

$$h_1v_2, v_1h_2 \rightarrow \frac{h_1h_2 - v_1v_2}{\sqrt{2}}$$

$$h_1^2, v_1^2 \rightarrow \pm h_1v_2$$

$$h_2^2, v_2^2 \rightarrow \pm v_1h_2,$$

[0173]

[0174]

여기서 처음 두 줄은 '성공' 산출에 해당하여 두 큐비트를 벨 상태로 투영하고, 맨 아래 두 줄은 '실패' 산출에 해당하여, 이 경우 두 큐비트는 생산 상태(product state)로 투영된다.

[0175]

일부 실시양태에서, 타입 II 융합의 성공 확률은 부속적 벨 쌍(ancillary Bell pair) 또는 단일 광자의 쌍을 사용하여 증가될 수 있다. 단일 부속 벨 쌍(ancilla Bell pair) 또는 단일 광자의 두 쌍을 사용하면 성공 확률을 75%까지 높일 수 있다.

[0176]

융합 게이트를 향상시키는 데 사용되는 한 가지 기술은, 성공할 때 입력 큐비트에 대한 벨 상태 측정과 동일하다는 인식에서 비롯된다. 따라서 융합 게이트의 성공 확률을 높이는 것은 그것이 구현하는 벨 상태 측정의 성공 확률을 높이는 것과 같다. 벨 상태를 분별할 확률을 향상시키는 두 가지 기술은 Grice(벨 쌍 사용)와 Ewert & van Loock(<https://arxiv.org/pdf/1403.4841.pdf>)(단일 광자 사용)에 의해 개발되었다.

[0177]

전자는 부속적 벨 쌍이 75%의 성공 확률을 달성할 수 있도록 하며, 이론적으로, 점점 더 복잡해지는 간섭계와 큰 얽힌 상태를 사용하여 절차를 반복하여 임의의 성공 확률에 도달할 수 있음을 보여주었다. 그러나 회로의 복잡성과 필요한 얽힌 상태의 크기로 인해 이것은 비실용적일 수 있다.

[0178]

두 번째 기술은 4개의 단일 광자를 사용하여 두 가지 모드에서 반대 편광을 갖는 쌍으로 입력하여, 성공 확률을 75%로 높였다. 78.125%의 확률을 얻기 위해 두 번째 절차를 반복할 수 있음을 수치적으로 보여주었지만, 다른 방식과 같이 임의로 성공률을 높일 수는 없는 것으로 나타났다.

[0179]

도 19는 편광 및 경로 인코딩 모두에서 이 두 가지 기술을 사용하여 한 번 향상된 타입 II 융합 게이트를 도시한 도면이다. 두 회로의 성공 확률은 75%이다.

[0180]

융합의 성공을 예고하는 검출 패턴은 두 가지 타입의 회로에 대해 아래에 설명되어 있다.

[0181]

벨 상태를 사용하여 융합을 향상시키는 경우, '성공' 검출 패턴 뒤에 있는 논리는, 두 쌍의 검출기를 고려하여 가장 잘 이해된다: 입력 광자 모드에 해당하는 그룹(편광 모드 1 및 2 및 경로 인코딩의 상위 4개 모드)과, 벨 쌍 입력 모드에 해당하는 그룹(편광 모드 3 및 4 및 경로 인코딩의 하위 4 모드). 이것을 각각 '주(main)' 및 '부속(ancilla)' 쌍이라고 한다. 그런 다음 성공적인 융합은 다음과 같은 경우에 예고된다: (a) 총 4개의 광자가 검출되고; 그리고 (b) 각 검출기 그룹에서 4개 미만의 광자가 검출된다.

[0182]

4개의 단일 광자가 부속적 리소스로 사용될 때, 게이트의 성공은 다음과 같은 경우에 예고된다: (a) 6개의 광자가 전체적으로 검출되고; 그리고 (b) 각 검출기에서 4개 미만의 광자가 검출된다.

[0183]

게이트가 성공하면 2개의 입력 큐비트가 4개의 Bell 쌍 중 하나에 투영되는데, 이는 부속적 리소스를 사용하여 서로 분별할 수 있기 때문이다. 특정 투영은 이전과 같이 획득된 검출 패턴에 따라 다르다.

[0184]

각각 하나의 벨 쌍과 4개의 단일 광자를 부속적으로 사용하도록 설계된 향상된 타입 II 융합 회로(boosted Type II fusion circuits) 모두는, 부속적인 것이 없거나 일부만 있는 경우 다양한 성공 확률로 타입 II 융합을 수행하는 데 사용할 수 있다(4개의 단일 광자 부속의 경우). 이는 활용 가능한 리소스에 따라 유연한 방식으로 융합을 수행하기 위해 동일한 회로를 채용할 수 있기 때문에 특히 유용하다. 부속(ancilla)이 있으면 게이트에 입력하여 융합 성공 확률을 높일 수 있다. 그러나 그렇지 않은 경우 게이트를 사용하여 낮지만 0이 아닌 성공 확률로 융합을 시도할 수 있다.

[0185]

하나의 벨 쌍을 사용하여 향상된 융합 게이트에 관한 한, 고려해야 할 유일한 경우는 부속(ancilla)이 없는 경우이다. 이 경우, 성공을 예고하는 검출 패턴의 논리는 위에서 설명한 검출기의 쌍을 다시 고려하여 이해할 수 있다. 융합은 다음과 같은 경우에 여전히 성공적이다: (a) 2개의 광자가 서로다른 검출기에서 검출되고, 그리고 (b) '주요(principal)' 쌍에서 1개의 광자가 검출되고 '부속(ancilla)' 검출기 쌍에서 1개의 광자가 검출된

다.

- [0186] 4개의 단일 광자를 사용하여 향상된 회로의 경우, 부속(ancilla)의 전체 또는 일부를 제거하여 다중 수정이 가능하다. 이는 동일한 원리를 기반으로 하는 향상된 벨 상태 생성기(Boosted Bell State Generator)와 유사하다.
- [0187] 먼저 부속(ancilla)이 전혀 없는 경우를 고려하라. 예상대로 향상되지 않은 융합(non-boosted fusion)의 성공률인 50%의 확률로 융합에 성공한다. 이 경우 두 개의 서로다른 검출기에서 2개의 광자가 검출될 때마다 융합이 성공한다.
- [0188] 향상된 BSG의 경우, 홀수 개의 부속(ancilla)의 존재는 게이트의 성공 확률에 이롭지 못한(detrimental) 것으로 판명되었는데, 1개의 광자가 존재하는 경우 게이트는 시간의 32.5%만 성공하는 한편, 3개의 광자가 존재하는 경우, 성공 확률은 향상되지 않은 경우와 마찬가지로 50%이다.
- [0189] 4개의 부속(ancillar) 중 2개만 있으면 두 가지 효과가 가능하다.
- [0190] 편광 인코딩에서 서로다른 모드, 즉 경로 인코딩에서 부속적 모드의 서로다른 인접 쌍으로 입력되는 경우, 성공 확률은 25%로 낮아진다.
- [0191] 그러나 두 개의 부속(ancillar)이 동일한 편광 모드, 즉 경로 인코딩에서 인접 모드의 동일한 쌍에서 입력되는 경우, 성공 확률은 최대 62.5%까지 증가한다. 이 경우 성공을 예고하는 패턴은 검출기를 두 쌍으로 그룹화하여 다시 이해할 수 있다: 부속(ancillar)이 입력되는 회로 분기의 쌍(그룹 1)과 다른 분기의 쌍(그룹 2). 이러한 구분은 편광으로 인코딩된 다이어그램에서 특히 명확하다. 이러한 그룹을 고려하면 다음과 같은 경우 융합이 성공한다: (a) 4개의 광자가 전체적으로 검출되고; (b) 그룹 1의 각 검출기에서 4개 미만의 광자가 검출되고; 그리고 (c) 그룹 2의 각 검출기에서 2개 미만의 광자가 검출된다.
- [0192] 이 예에서 융합 게이트는 성공할 때 입력 큐비트를 최대로 얽힌 상태로 투영하여 작동한다. 이러한 상태가 인코딩되는 기준은, 입력 큐비트가 게이트에 들어가기 전에, 즉 편광 인코딩에서의 PBS에서 혼합되기 전에, 입력 큐비트의 로컬 회전(local rotation)을 도입하여 변경할 수 있다. PBS에서 간섭하기 전에 광자의 편광 회전을 변경하면, 광자의 상태가 투영되는 서로다른 부분 공간(subspace)이 생성되어, 클러스터 상태에서 서로다른 융합 오퍼레이션으로 귀결된다. 경로 인코딩에서, 이는, 큐비트를 구성하는 모드의 쌍(위의 도면에서 이웃 쌍) 사이에 원하는 회전에 해당하는 로컬 빔 스플리터 또는 빔 스플리터의 조합과 위상 시프트를 적용하는 것에 해당한다.
- [0193] 이것은 성공 및 실패 사례 모두에서 다양한 타입의 클러스터 오퍼레이션을 구현하는 데 유용할 수 있으며, 이는 작은 얽힌 상태에서 큰 클러스터 상태의 구성을 최적화하는 데 매우 유용할 수 있다.
- [0194] 도 20은 두 개의 작은 얽힌 상태를 융합하는 데 사용되는 타입 II 융합 게이트의 몇 가지 회전 변형의 효과를 도시한 표이다. 편광 인코딩의 게이트 다이어그램, 수행된 효과적인 투영 및 클러스터 상태에 대한 최종 효과가 도시된다.
- [0195] 서로다른 기준 상태(basis state)로의 회전은, 경로 인코딩을 사용하는 타입 II 융합 게이트 구현을 위한 광자 회로의 예를 도시한 도 21에 추가로 설명되어 있다. ZX 융합, XX 융합, ZZ 융합 및 XZ 융합을 위한 융합 게이트가 도시된다. 각각의 경우에 빔 스플리터 및 위상 시프트의 조합(예를 들어, 전술한 바와 같은)이 사용될 수 있다.
- [0196] 7. 추가적인 실시예
- [0197] 본 개시 내용에 접근할 수 있는 당업자는 여기에 설명된 실시예가 예시적이며 제한적이지 않으며 많은 수정 및 변형이 가능하다는 것을 이해할 것이다. 수행된 측정과 그것이 작동하는 상태는 측정 산출이 내결합성을 발생시키는 리던던시(redundancy)를 갖도록 선택될 수 있다. 예를 들어, 측정과 함께 코드가 직접 입력되거나, 또는 내결합성 방식으로 측정의 파괴성과 측정의 얽힘 차단 성질을 모두 직접 처리하는 측정에서 상관 관계가 생성될 수 있다. 이것은 고전적 디코딩의 일부로 처리될 수 있다: 예를 들어, 실패한 융합 오퍼레이션은 코드에 의해 소거된 것으로 처리될 수 있다.
- [0198] 첨부된 도면을 참조하면, 메모리를 포함할 수 있는 구성요소는 비일시적 기계 판독 가능 매체를 포함할 수 있다. 본 명세서에서 사용되는 용어 "기계 판독 가능 매체" 및 "컴퓨터 판독 가능 매체"는 기계가 특정 방식으로 작동하게 하는 데이터 제공에 참여하는 임의의 저장 매체를 지칭한다. 위에서 제공된 실시예에서, 다양한

기계 판독 가능 매체는 실행을 위해 프로세서 및/또는 다른 장치(들)에 명령어/코드를 제공하는 데 관련될 수 있다. 추가적으로 또는 대안적으로, 기계 판독가능 매체는 그러한 명령/코드를 저장 및/또는 전달하기 위해 사용될 수 있다. 많은 구현들에서, 컴퓨터 판독가능 매체는 물리적 및/또는 타입의 저장 매체이다. 그러한 매체는 비휘발성 매체, 휘발성 매체 및 전송 매체를 포함하지만 이에 제한되지 않는 많은 형태를 취할 수 있다. 컴퓨터 판독 가능 매체의 일반적인 형태에는 예를 들어 자기 및/또는 광학 매체, 펀치 카드, 종이 테이프, 구멍 패턴이 있는 기타 물리적 매체, RAM, 프로그램 가능한 읽기 전용 메모리(PROM), 지울 수 있는 프로그램 가능한 프로그램이 포함된다. EPROM(읽기 전용 메모리), FLASH-EPROM, 기타 메모리 칩 또는 카트리지가, 이하에서 설명하는 반송과 또는 컴퓨터가 명령 및/또는 코드를 읽을 수 있는 기타 매체가 포함된다.

[0199] 여기에서 논의된 방법, 시스템 및 장치는 예이다. 다양한 실시예는 다양한 절차 또는 구성요소를 적절하게 생략, 대체 또는 추가할 수 있다. 예를 들어, 특정 실시예와 관련하여 설명된 특징은 다양한 다른 실시예에서 결합될 수 있다. 실시예의 상이한 측면 및 요소는 유사한 방식으로 결합될 수 있다. 본 명세서에 제공된 도면의 다양한 구성요소는 하드웨어 및/또는 소프트웨어로 구현될 수 있다. 또한, 기술은 발전하고, 따라서 많은 요소는 본 개시의 범위를 그러한 특정 예에 제한하지 않는 예이다.

[0200] 비트, 정보, 값, 요소, 기호, 문자, 변수, 용어, 숫자, 숫자 등과 같은 신호를 참조하는 것이 주로 일반적인 사용을 위해 때때로 편리한 것으로 입증되었다. 그러나, 이들 또는 유사한 용어 모두는 적절한 물리량과 연관되어야 하며 단지 편리한 라벨일 뿐이라는 것을 이해해야 한다. 달리 구체적으로 언급되지 않는 한, 위의 논의에서 명백한 바와 같이, 본 명세서 전반에 걸쳐 "처리", "연산", "계산", "결정", "확인", "식별", "연관", "측정", "수행" 등은 특수 목적 컴퓨터 또는 유사한 특수 목적 전자 컴퓨팅 장치와 같은 특정 장치의 동작 또는 프로세스를 지칭한다. 따라서, 이 명세서의 맥락에서, 특수 목적 컴퓨터 또는 이와 유사한 특수 목적 전자 컴퓨팅 디바이스는, 일반적으로 메모리, 레지스터 또는 기타 정보 저장 디바이스, 전송 디바이스, 또는 특수 목적 컴퓨터 또는 유사한 특수 목적 전자 컴퓨팅 디바이스의 디스플레이 디바이스 내에서 물리적 전자적, 전기적 또는 자기적 양으로 표시되는 신호를 조작하거나 변환할 수 있다.

[0201] 당업자는 여기에 설명된 메시지를 전달하는 데 사용되는 정보 및 신호가 다양한 상이한 기술 및 기술 중 임의의 것을 사용하여 표현될 수 있음을 이해할 것이다. 예를 들어, 위의 설명 전체에서 참조될 수 있는 데이터, 지시, 명령, 정보, 신호, 비트, 기호 및 칩은, 전압, 전류, 전자기파, 자기장 또는 입자, 광학 필드 또는 입자, 또는 임의의 이들의 조합에 의해 표현될 수 있다.

[0202] 본 명세서에 사용된 용어 "및", "또는" 및 "안/또는"은 또한 그러한 용어가 사용되는 문맥에 적어도 부분적으로 의존할 것으로 예상되는 다양한 의미를 포함할 수 있다. 일반적으로 "또는"은 A, B 또는 C와 같은 목록을 연결하는 데 사용되는 경우, 배타적인 의미로 사용되어 A, B 또는 C를 의도할 뿐만 아니라, 포괄적인 의미로 사용되어 A, B 및 C를 의도하기도 한다. 또한, 본 명세서에 사용된 용어 "하나 이상"은 임의의 특징, 구조 또는 특성을 단수로 설명하는 데 사용될 수 있거나, 특징, 구조 또는 특성의 일부 조합을 설명하는 데 사용될 수 있다. 그러나 이것은 단지 예시적인 예이며 청구된 주제가 이 예에 제한되지 않는다는 점에 유의해야 한다. 또한, A, B 또는 C와 같은 목록을 연관시키는 데 사용되는 경우 용어 "다음 중 하나 이상"은, A, B, C, AB, AC, BC, AA, AAB, ABC, AABCCC 등과 같이, A, B 및/또는 C의 임의의 조합을 의미하는 것으로 해석될 수 있다.

[0203] 본 명세서 전반에 걸쳐 "일 예", "예", "특정 예" 또는 "예시적인 구현"에 대한 참조는, 특징 및/또는 예와 관련하여 설명된 특정 특징, 구조 또는 특성이 청구된 발명의 적어도 하나의 특징 및/또는 예에 포함될 수 있음을 의미한다. 따라서, 본 명세서 전반에 걸쳐 다양한 위치에 있는 "일 예에서", "예에서", "특정 예에서", "특정 구현에서" 또는 기타 유사한 구의 출현이 반드시 모두 동일한 특징, 예 및/또는 제한을 지칭하는 것은 아니다. 더욱이, 특정 특징, 구조, 또는 특징은 하나 이상의 예 및/또는 특징에서 조합될 수 있다.

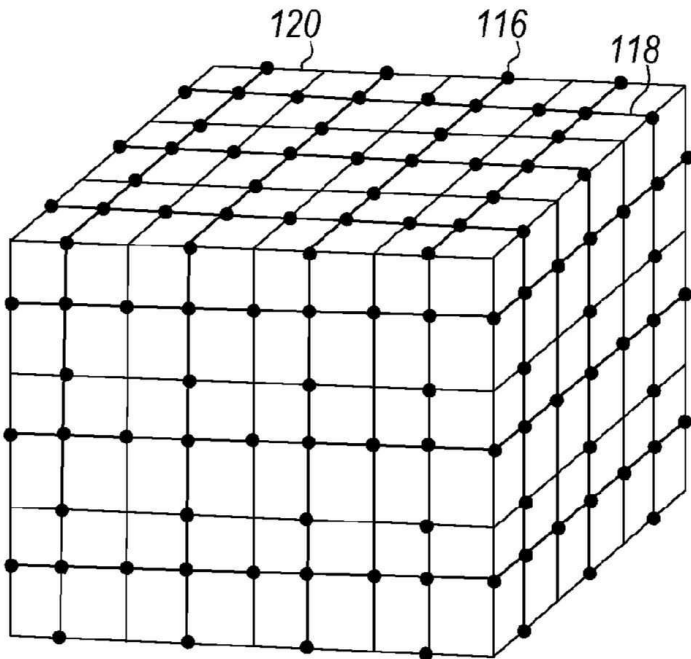
[0204] 일부 구현에서, 동작 또는 처리는 물리량의 물리적 조작을 포함할 수 있다. 일반적으로, 반드시 그런 것은 아니지만, 그러한 양은 저장, 전송, 결합, 비교 또는 달리 조작될 수 있는 전기 또는 자기 신호의 형태를 취할 수 있다. 주로 일반적인 사용을 위해 비트, 데이터, 값, 요소, 기호, 문자, 용어, 숫자, 수치 등과 같은 신호를 참조하는 것이 때때로 편리한 것으로 입증되었다. 그러나, 이들 또는 유사한 용어 모두는 적절한 물리량과 연관되어야 하며 단지 편리한 라벨일 뿐이라는 것을 이해해야 한다. 달리 구체적으로 언급되지 않는 한, 위의 논의에서 명백한 바와 같이, "처리", "연산", "계산", "결정" 등과 같은 용어를 사용하는 본 명세서 전반에 걸친 논의는, 특수 목적 컴퓨터, 특수 목적 컴퓨팅 디바이스 또는 유사한 특수 목적 전자 컴퓨팅 디바이스와 같은, 특정 장치의 동작(action) 또는 프로세스(process)를 지칭한다. 따라서 이 명세서의 맥락에서 특수 목적 컴퓨터 또는 이와 유사한 특수 목적 전자 컴퓨팅 디바이스는 신호를 조작하거나 변환할 수 있으며, 일반적으로

메모리, 레지스터 또는 기타 정보 저장 디바이스, 전송 디바이스, 또는 특수 목적 컴퓨터 또는 이와 유사한 특수 목적 전자 컴퓨팅 디바이스의 디스플레이 디바이스 내에서 물리적 전자 또는 자기 양으로 표시된다.

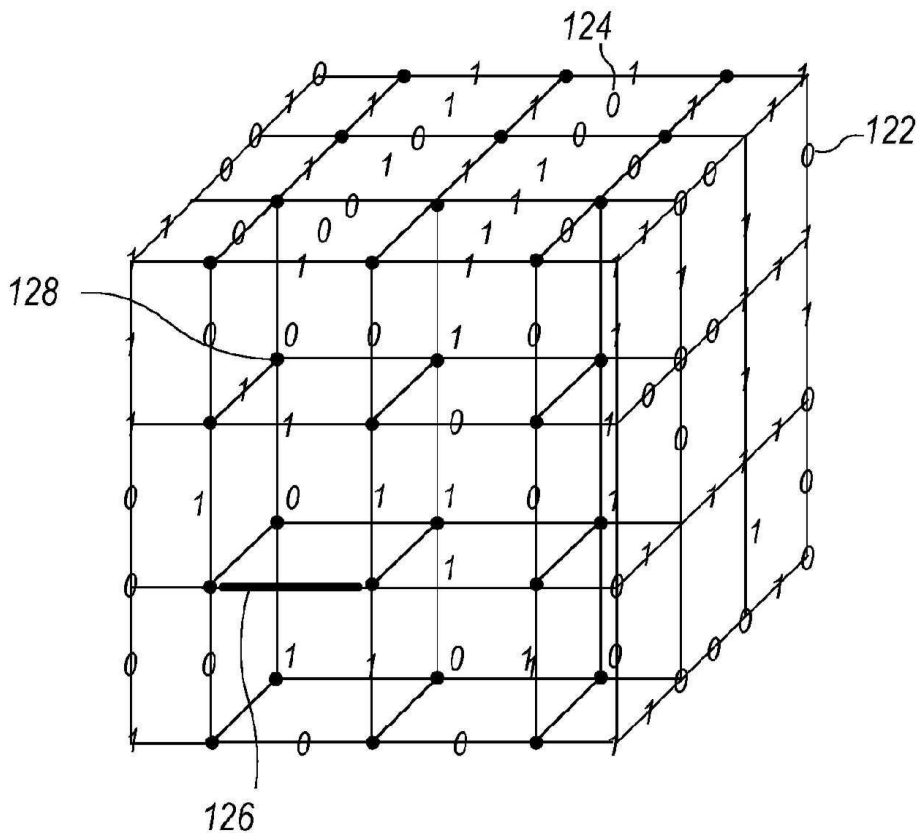
- [0205] 상기의 상세한 설명에서, 청구된 주제에 대한 철저한 이해를 제공하기 위해 다수의 특정 세부사항이 제시되었다. 그러나, 청구된 주제가 이러한 특정 세부사항 없이 실시될 수 있다는 것이 당업자에 의해 이해될 것이다. 다른 예에서, 통상의 기술자에게 공지된 방법 및 장치는 청구된 주제를 모호하게 하지 않기 위해 상세하게 설명되지 않았다. 따라서, 청구된 요지는 개시된 특정 예에 제한되지 않고, 그러한 청구된 요지는 또한 첨부된 청구범위 및 그 균등물의 범위 내에 속하는 모든 양태를 포함할 수 있는 것으로 의도된다.
- [0206] 펌웨어 및/또는 소프트웨어를 포함하는 구현의 경우, 방법론은 여기에 설명된 기능을 수행하는 모듈(예를 들어, 절차, 기능 등)로 구현될 수 있다. 명령을 유형적으로 구현하는 임의의 기계 판독 가능 매체가 여기에 설명된 방법론을 구현하는 데 사용될 수 있다. 예를 들어, 소프트웨어 코드는 메모리에 저장되고 프로세서 유닛에 의해 실행될 수 있다. 메모리는 프로세서 유닛 내에서 또는 프로세서 유닛 외부에서 구현될 수 있다. 여기에서 사용된 용어 "메모리"는 장기, 단기, 휘발성, 비휘발성 또는 기타 메모리의 모든 타입을 의미하며 특정 타입의 메모리 또는 메모리의 수 또는 메모리가 저장되는 미디어 타입으로 제한되지 않는다.
- [0207] 펌웨어 및/또는 소프트웨어로 구현되는 경우, 기능은 컴퓨터 판독 가능한 저장 매체에 하나 이상의 명령 또는 코드로 저장될 수 있다. 예는 데이터 구조로 인코딩된 컴퓨터 판독 가능 매체 및 컴퓨터 프로그램으로 인코딩된 컴퓨터 판독 가능 매체를 포함한다. 컴퓨터 판독 가능 매체에는 물리적 컴퓨터 저장 매체가 포함된다. 저장 매체는 컴퓨터에서 액세스할 수 있는 모든 사용 가능한 매체일 수 있다. 예를 들어, 이러한 컴퓨터 판독 가능 매체는, 명령어 또는 데이터 구조의 형태로 원하는 프로그램 코드를 저장하는 데 사용할 수 있고 컴퓨터에서 액세스할 수 있는, RAM, ROM, EEPROM, 콤팩트 디스크 읽기 전용 메모리(CD-ROM) 또는 기타 광 디스크 저장 장치, 자기 디스크 저장 장치, 반도체 저장 장치 또는 기타 저장 장치, 또는 임의의 기타 매체를 포함할 수 있으며; 여기에 사용된 디스크 및 디스크에는 디스크가 일반적으로 자기적으로 데이터를 재생하는 반면 디스크는 레이저로 데이터를 광학적으로 재생하는 CD(컴팩트 디스크), 레이저 디스크, 광학 디스크, DVD(디지털 다목적 디스크), 플로피 디스크 및 Blu-ray 디스크가 포함된다. 위의 조합도 컴퓨터 판독 가능 매체의 범위에 포함되어야 한다.
- [0208] 컴퓨터 판독 가능한 저장 매체에 저장하는 것 외에, 명령어 및/또는 데이터는 통신 장치에 포함된 전송 매체에 신호로서 제공될 수 있다. 예를 들어, 통신 장치는 명령 및 데이터를 나타내는 신호를 갖는 트랜시버를 포함할 수 있다. 명령 및 데이터는 하나 이상의 프로세서가 청구범위에 요약된 기능을 구현하도록 구성된다. 즉, 통신 장치는 개시된 기능을 수행하기 위한 정보를 나타내는 신호를 갖는 전송 매체를 포함한다. 처음에, 통신 장치에 포함된 전송 매체는 개시된 기능을 수행하기 위한 정보의 제1 부분을 포함할 수 있고, 제2 시간에 통신 장치에 포함된 송신 매체는 개시된 기능을 수행하기 위한 정보의 제2 부분을 포함할 수 있다.
- [0209] 일부 정의, 주제 면책 조항 또는 부인을 제외하고 또한 포함된 자료가 본 문서의 명시적 개시 내용과 일치하지 않는 경우를 제외하고(이러한 경우 본 개시의 언어가 우선한다), 여기에 인용된 모든 특허 출원, 특허 및 인쇄된 간행물은, 그 전체가 참조로 여기에 포함된다.

도면

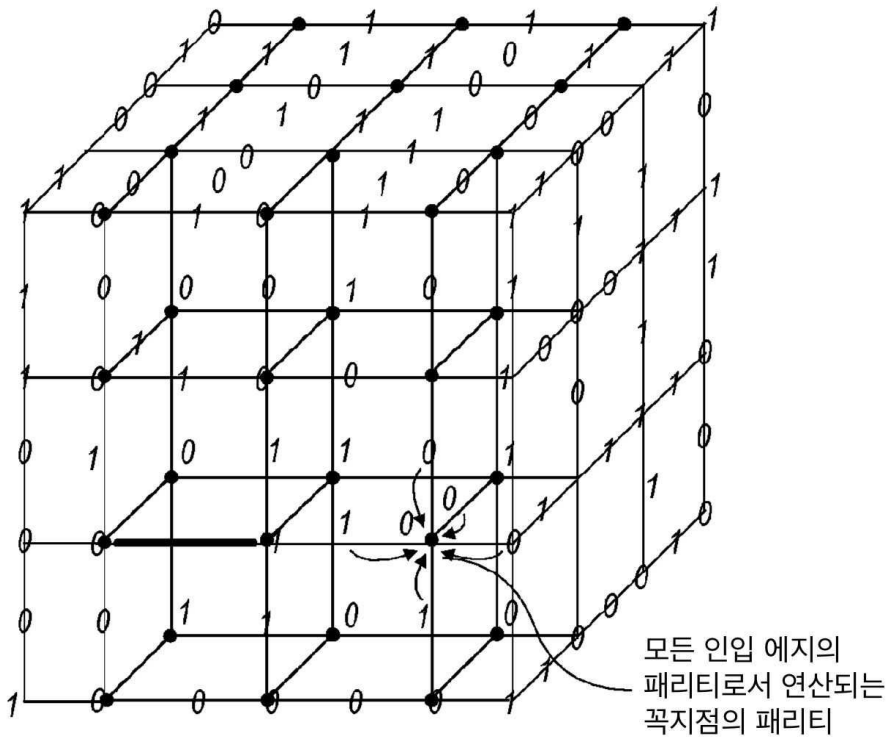
도면1a



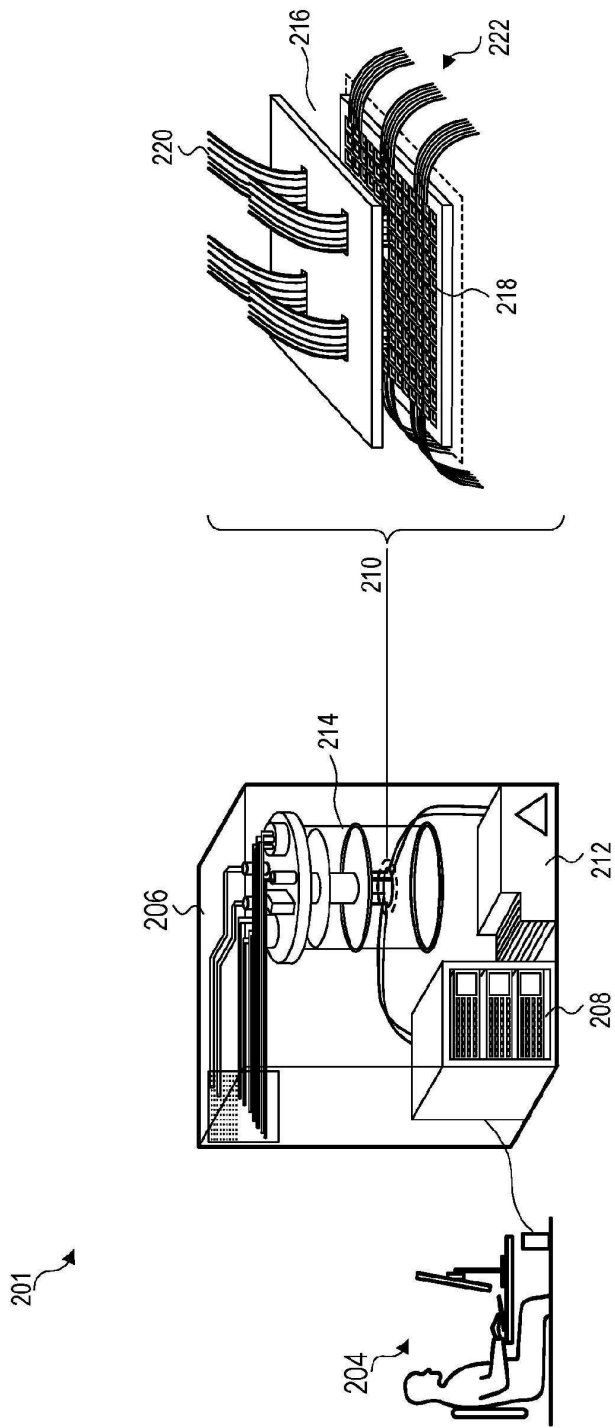
도면1b



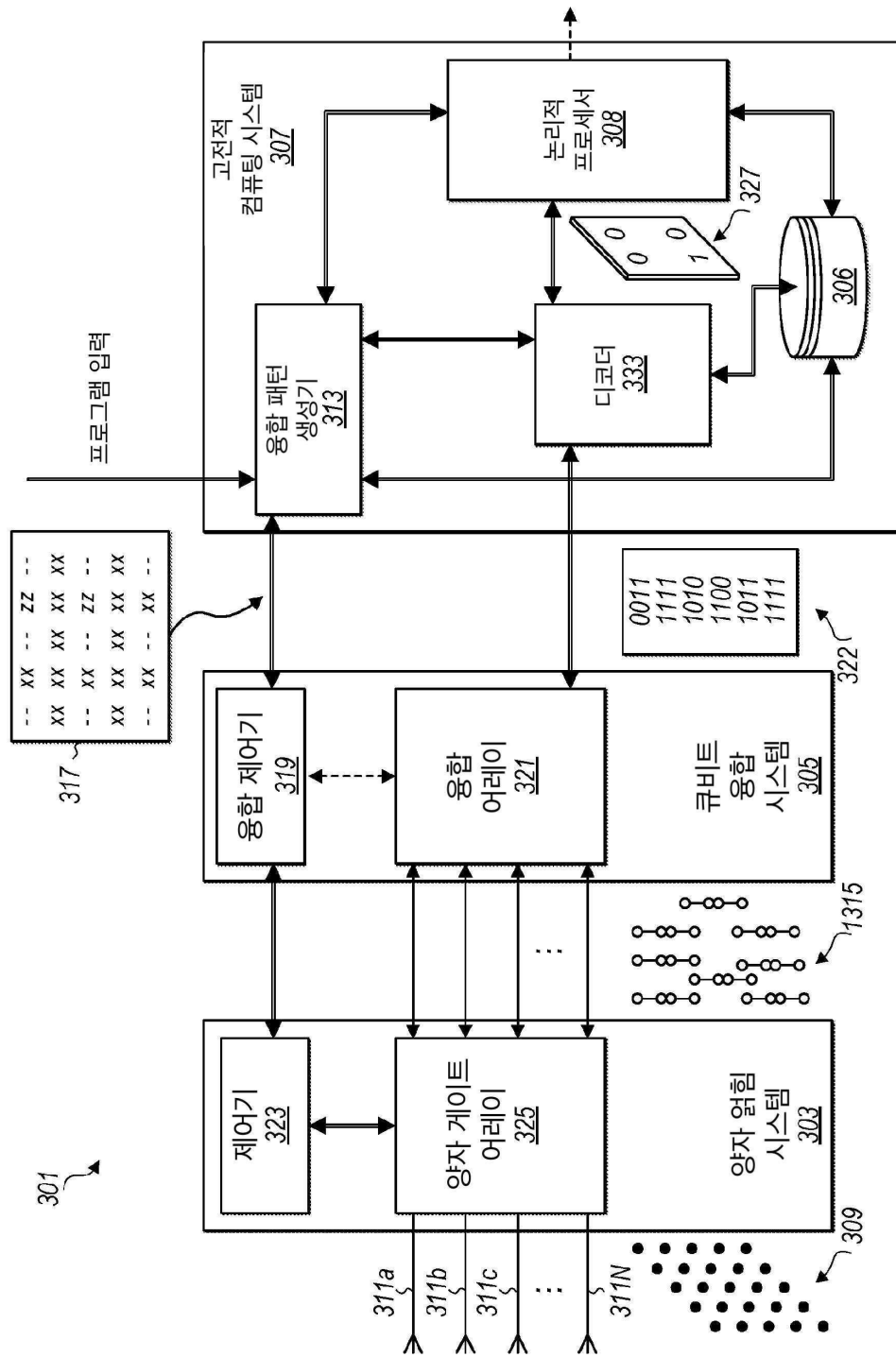
도면1c



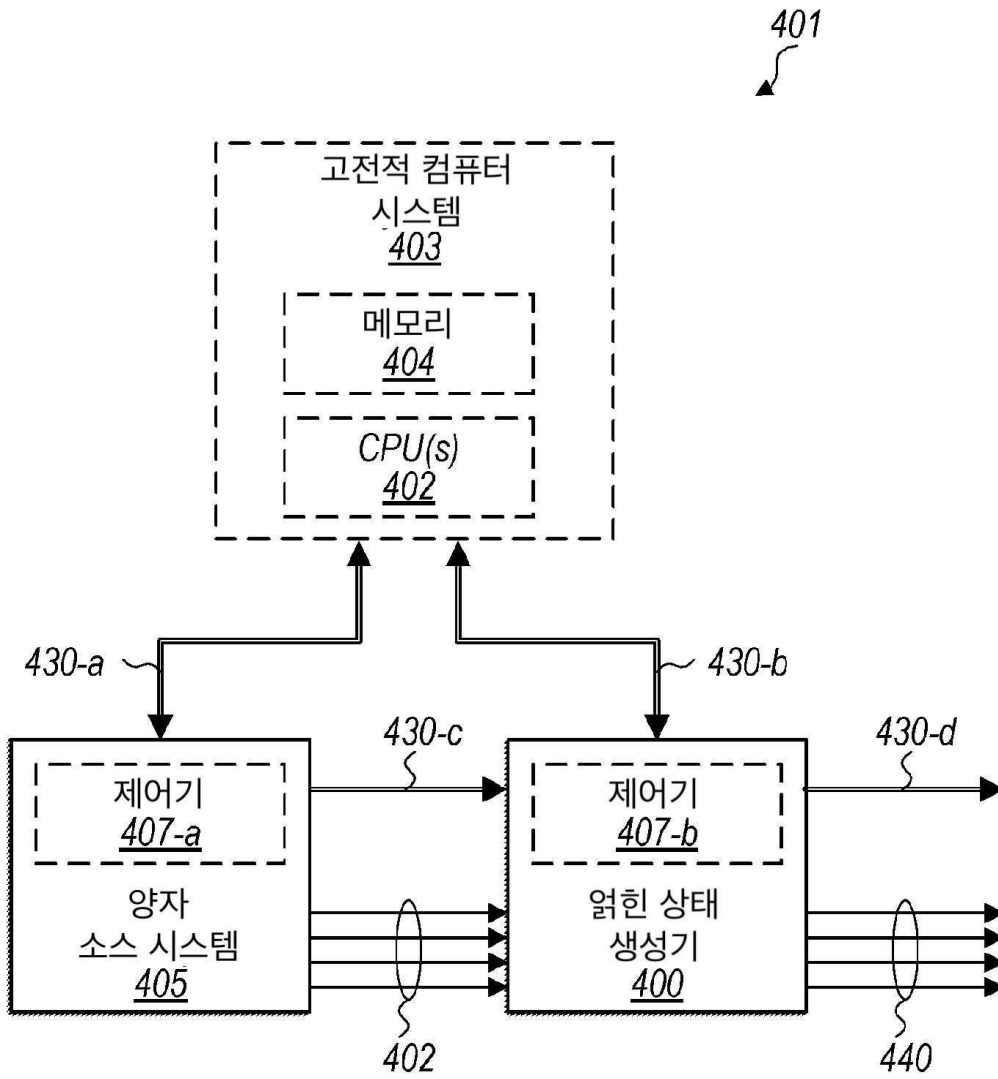
도면2



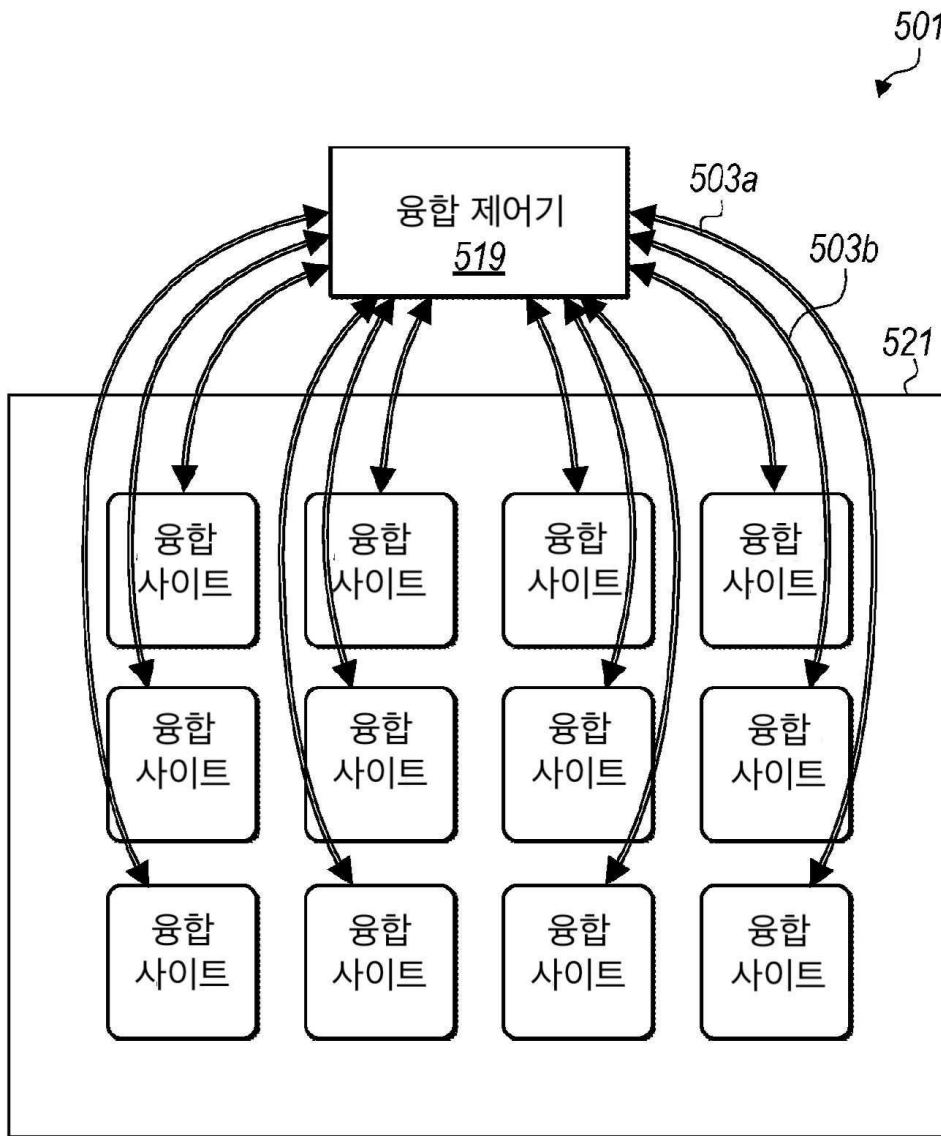
도면3



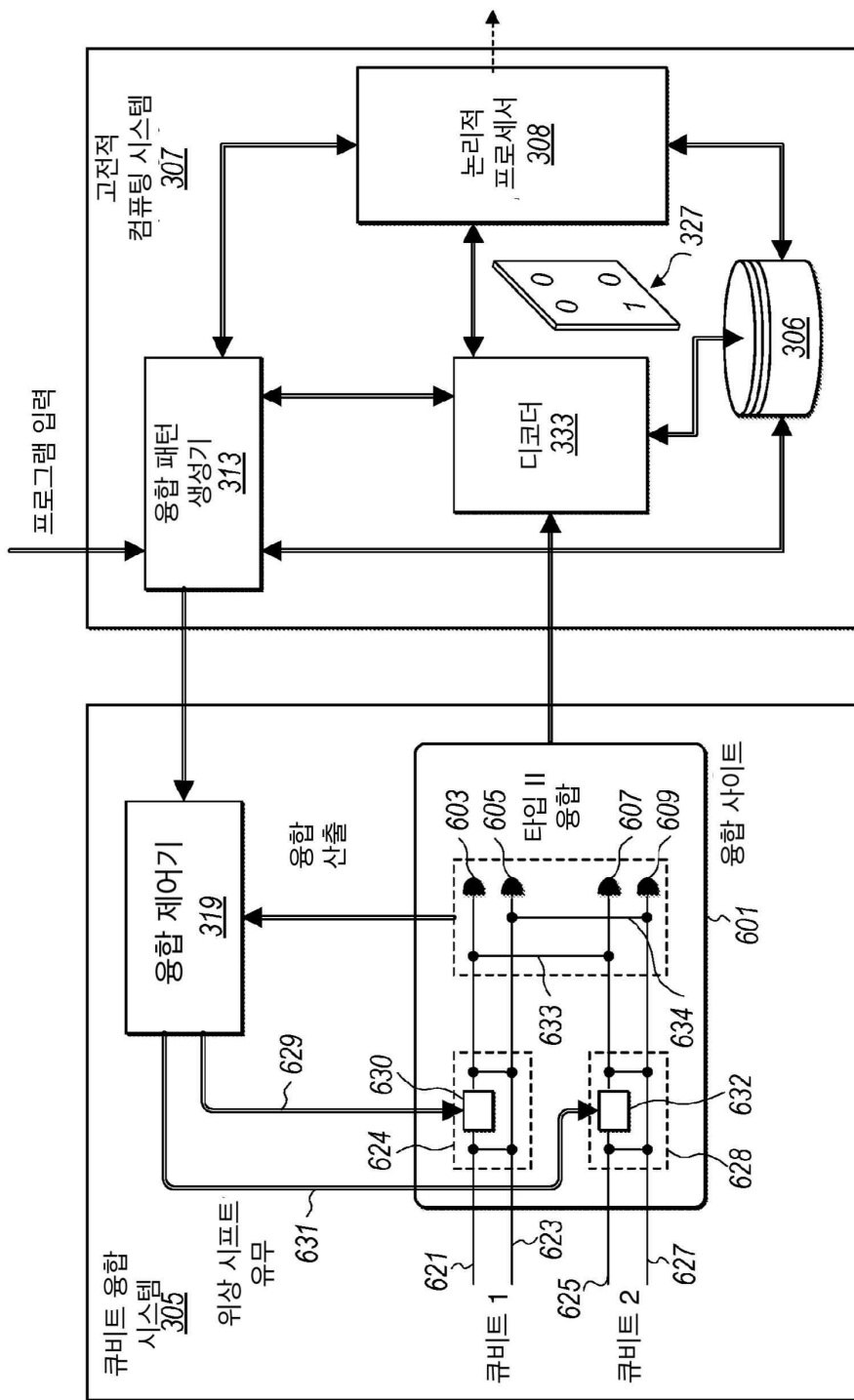
도면4



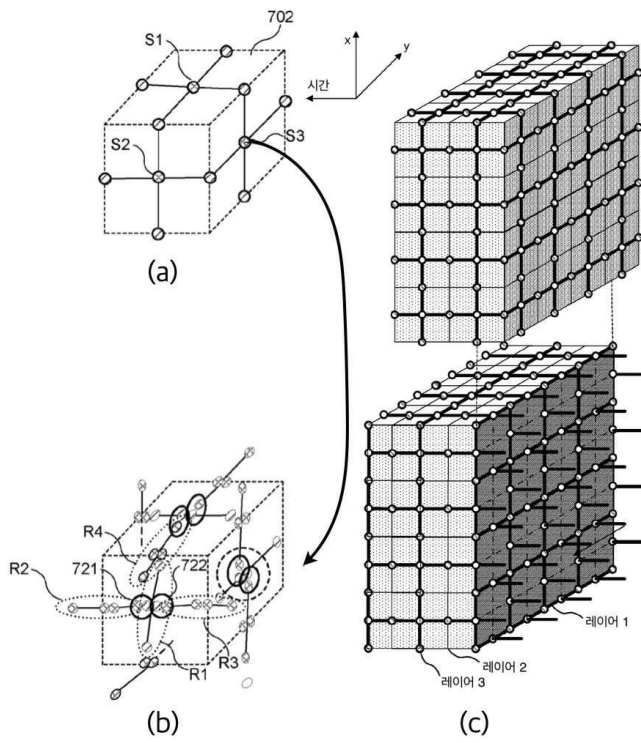
도면5



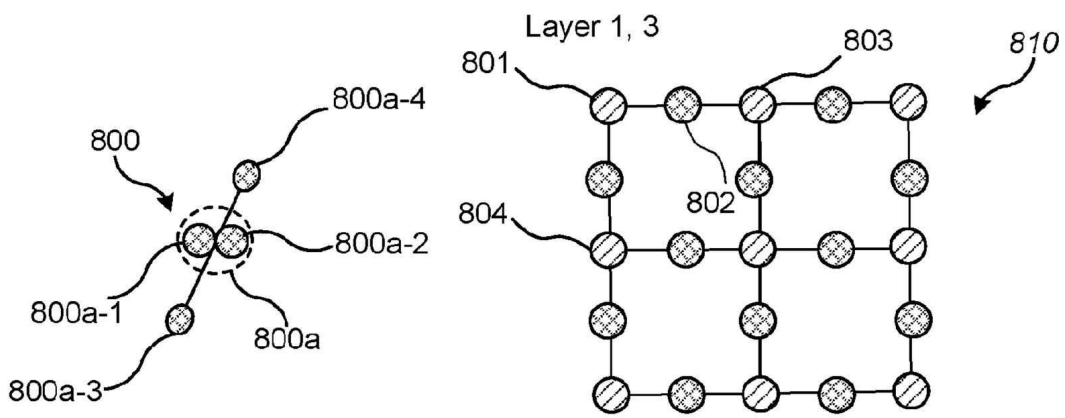
도면6



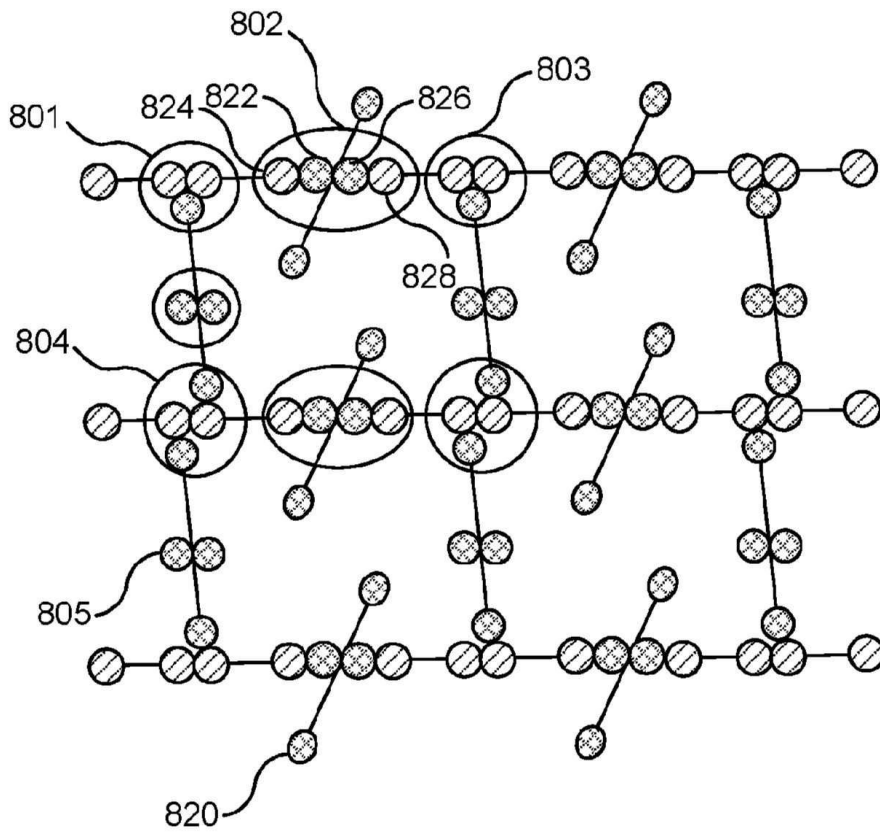
도면7



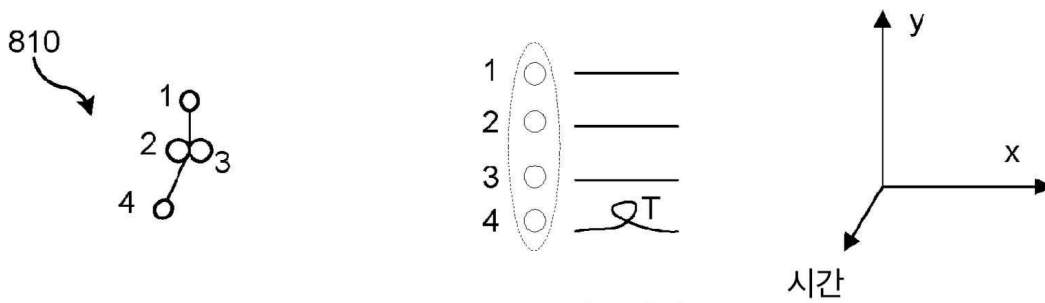
도면8a



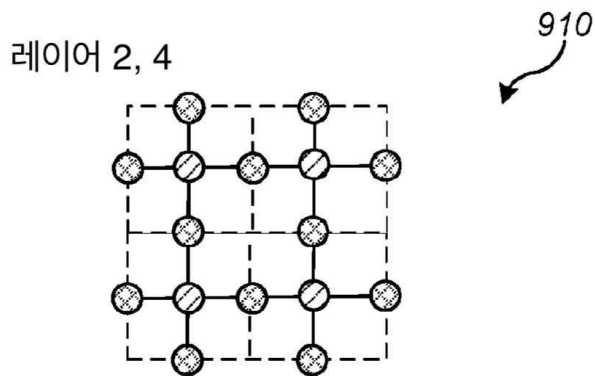
도면8b



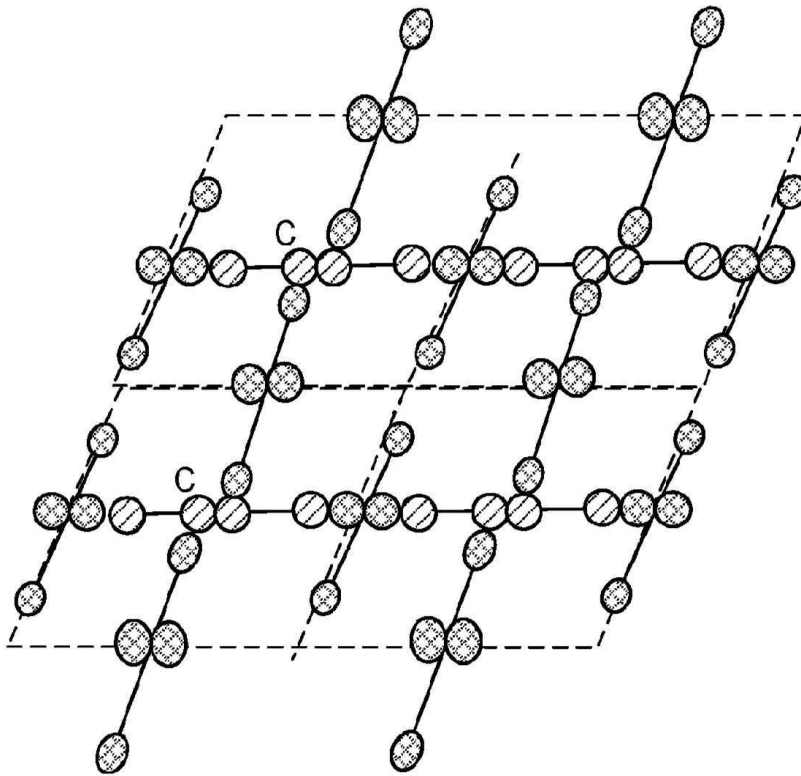
도면8c



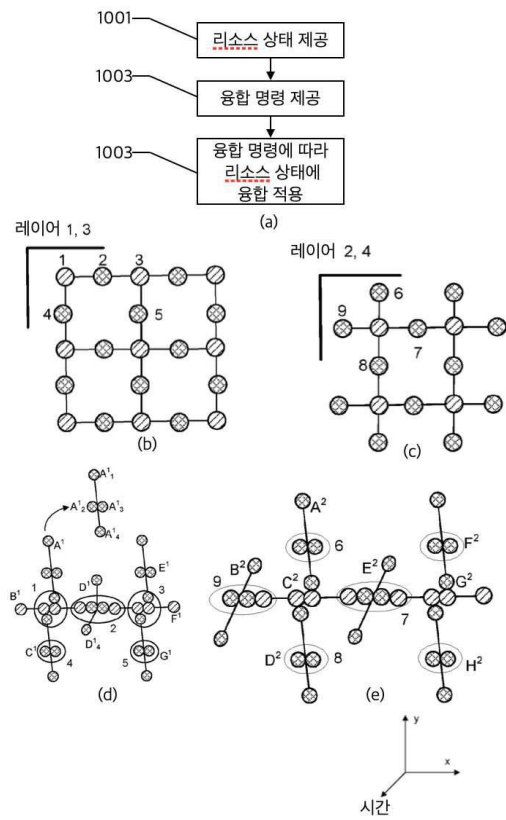
도면9a



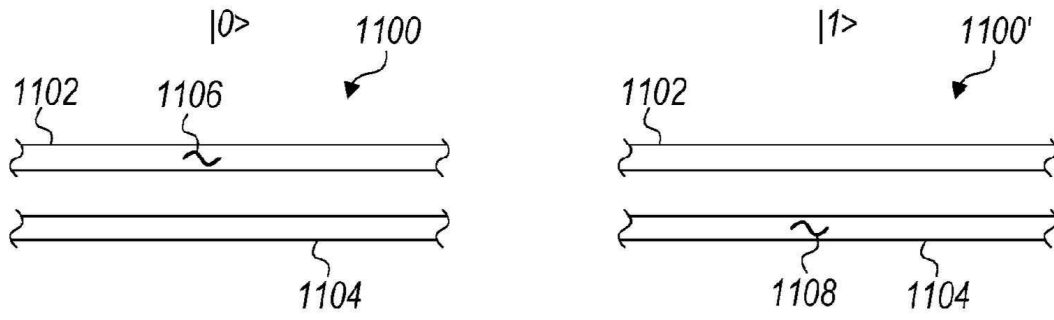
도면9b



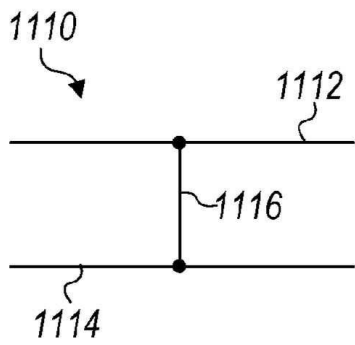
도면10



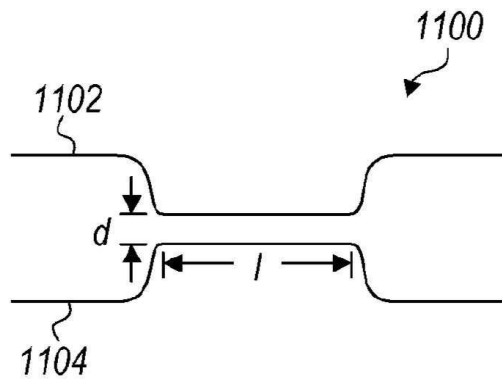
도면11a



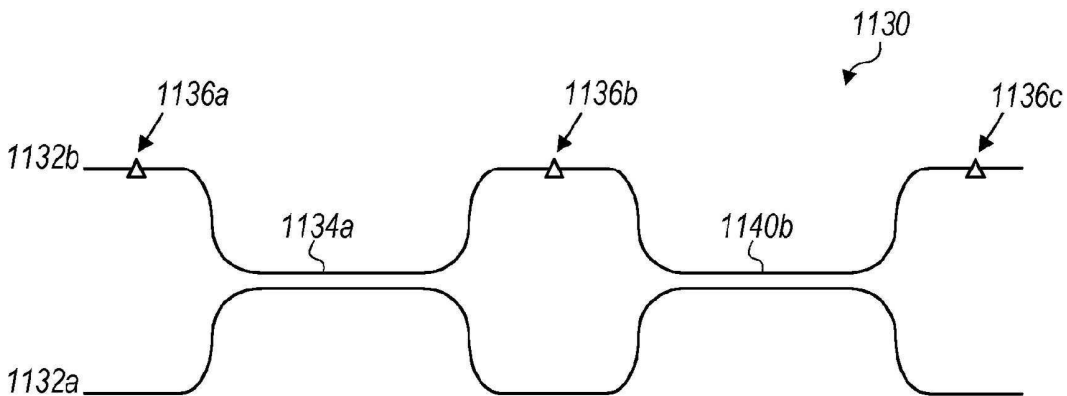
도면11b



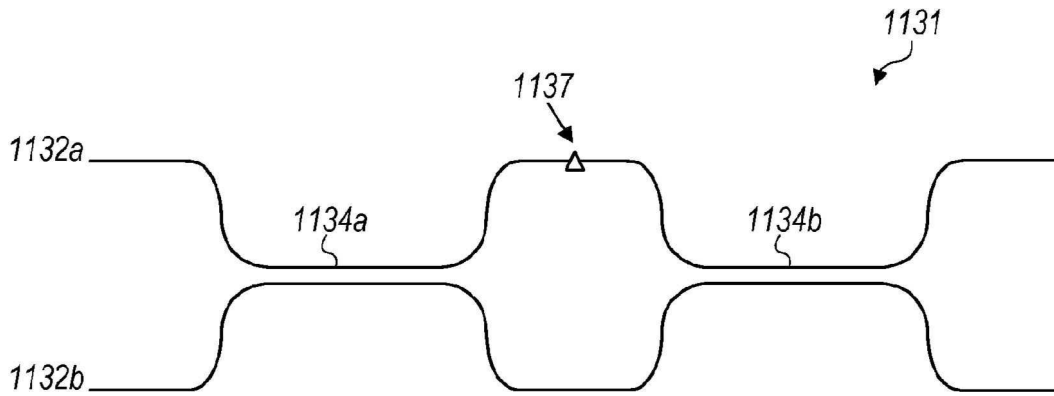
도면11c



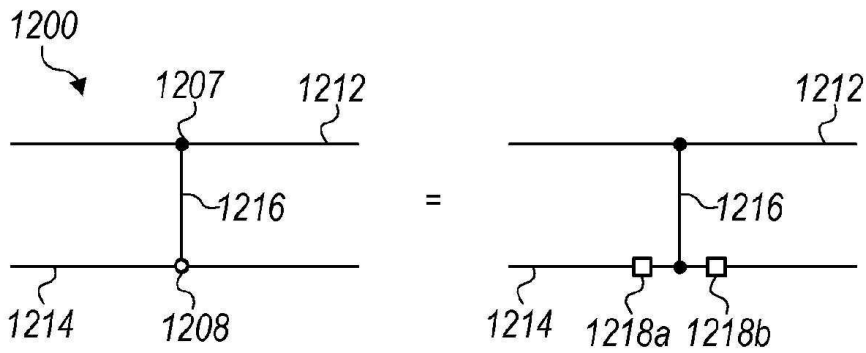
도면11d



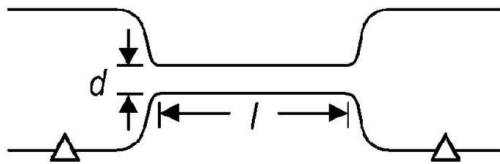
도면11e



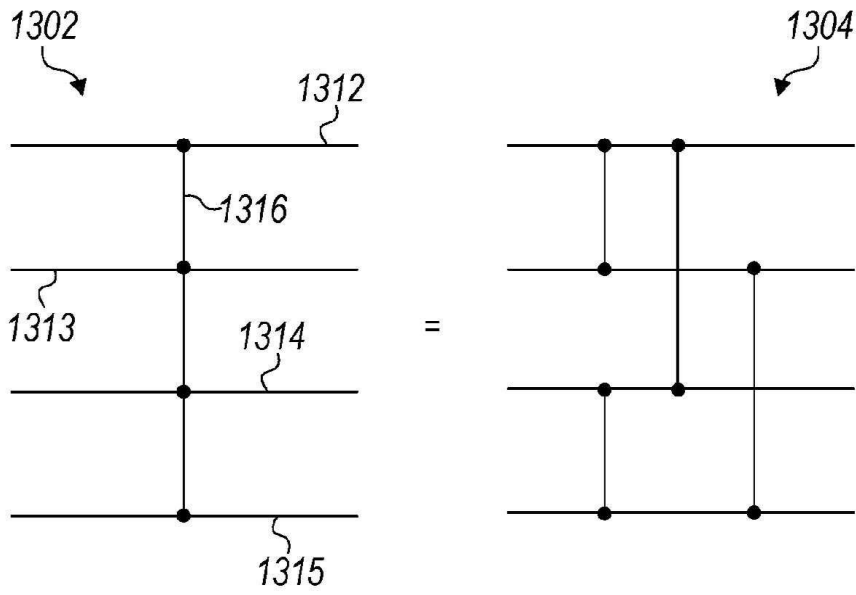
도면12a



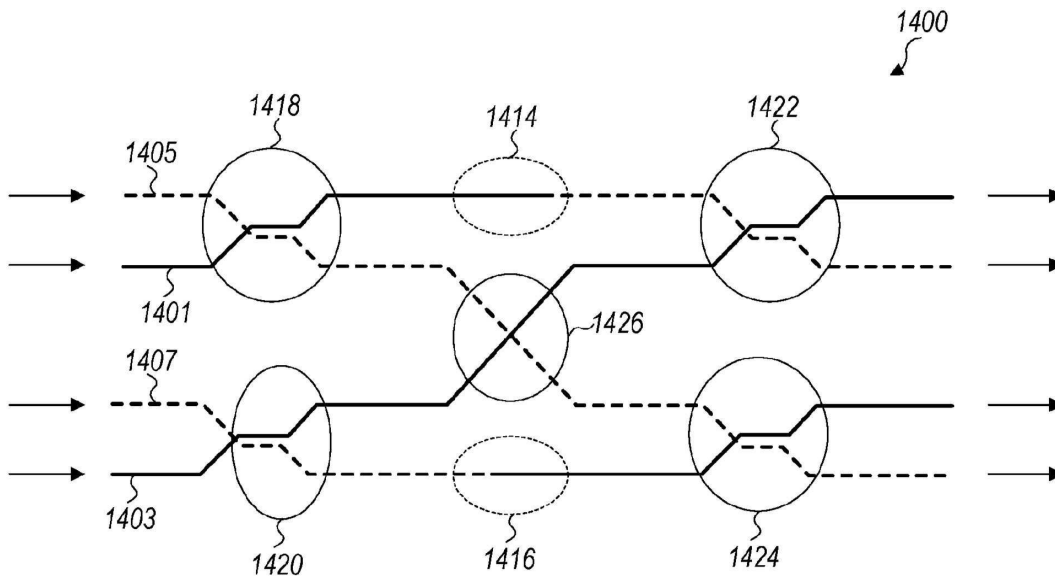
도면12b



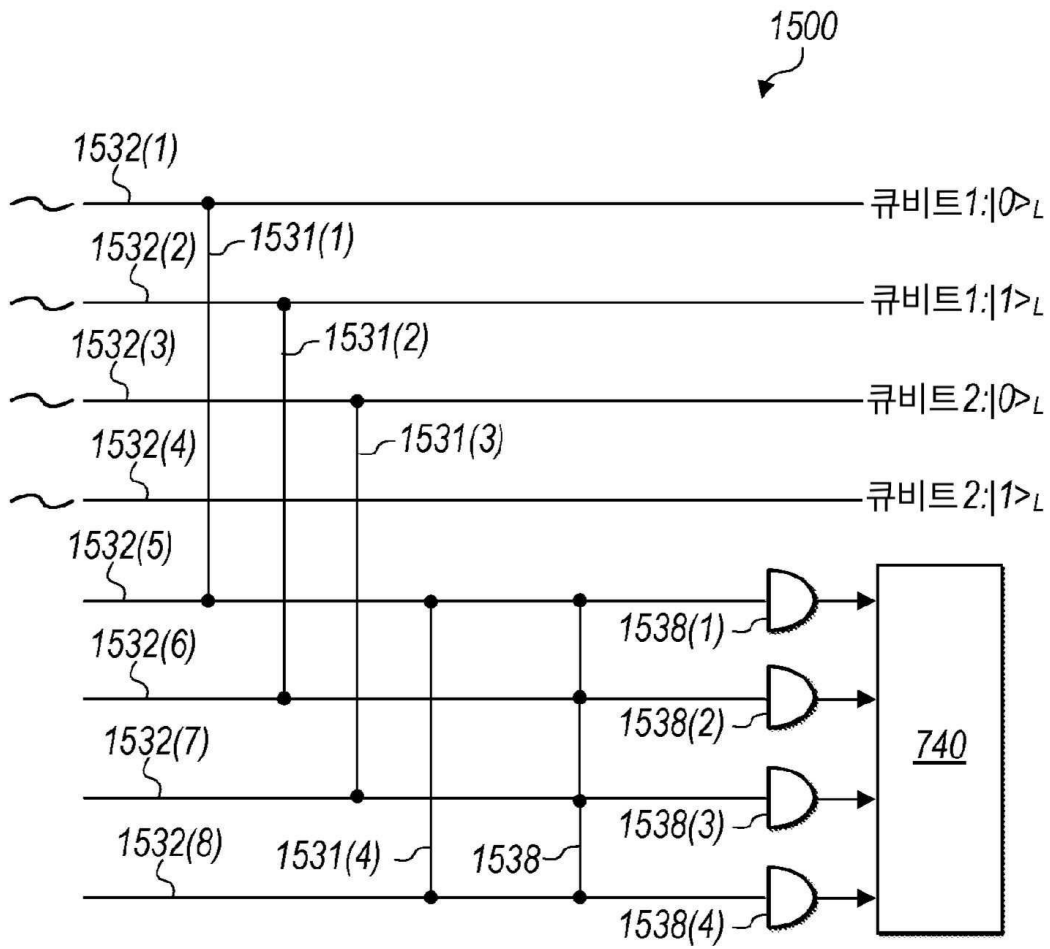
도면13



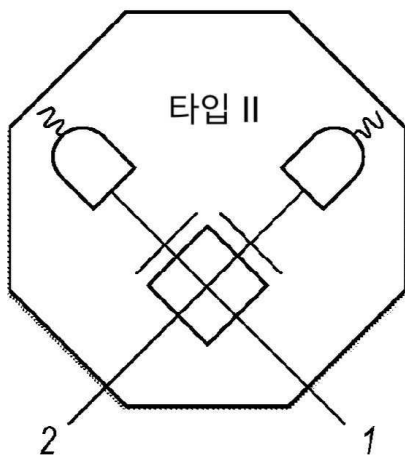
도면14



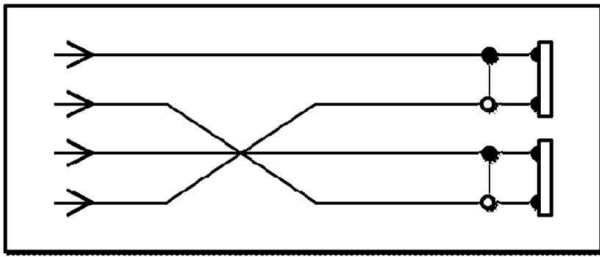
도면15



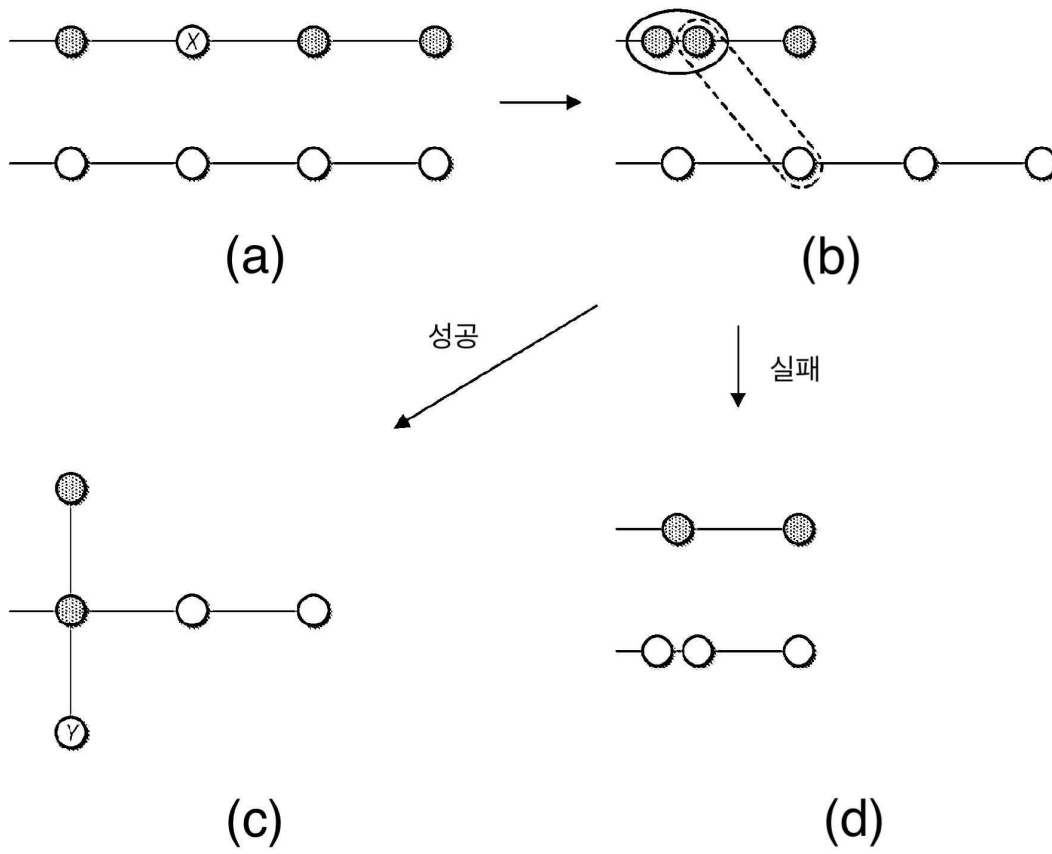
도면16



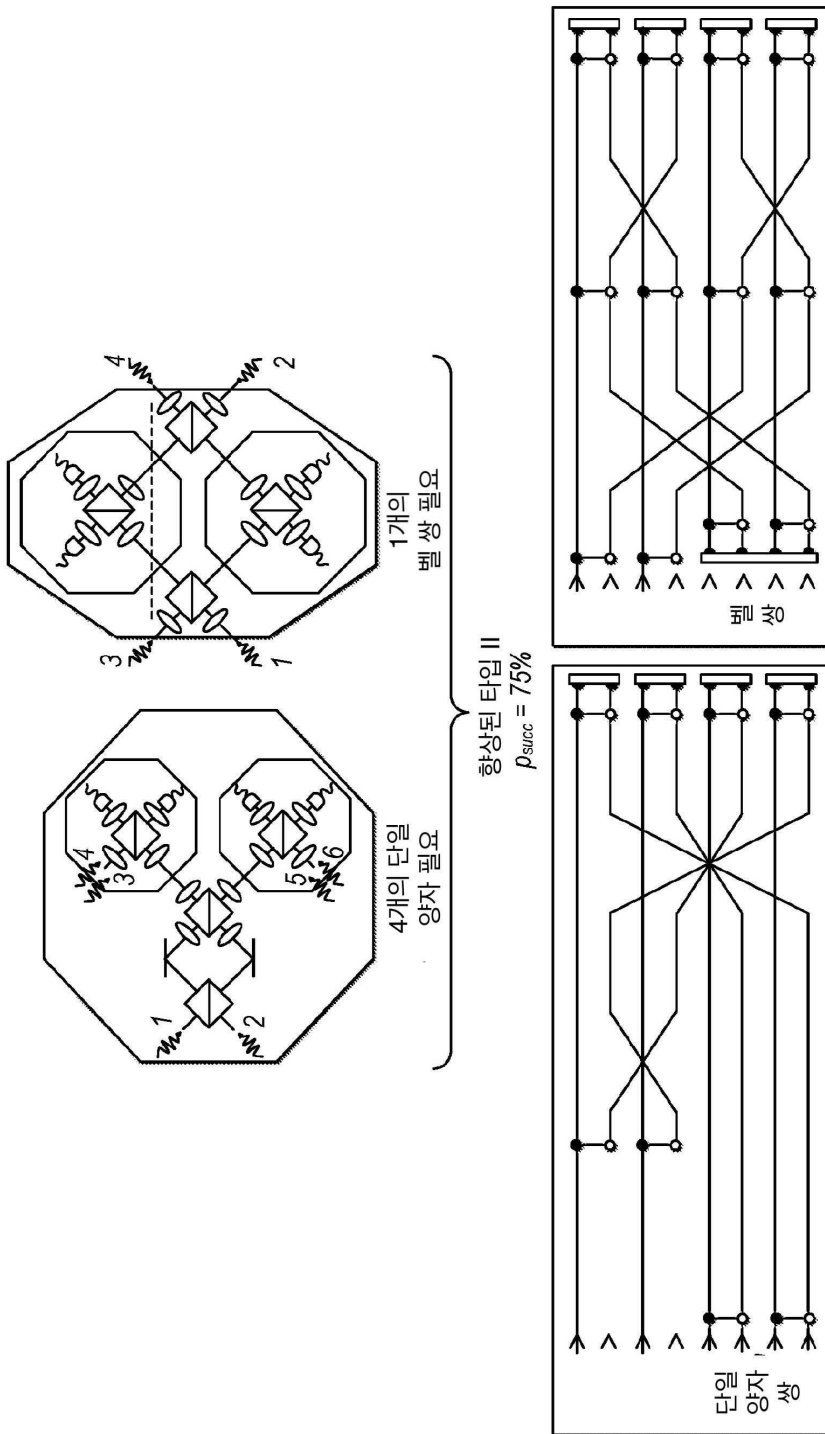
도면17



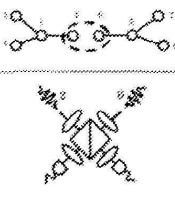


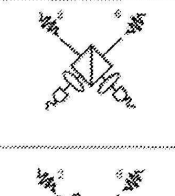


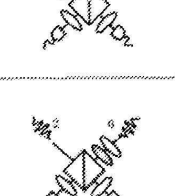
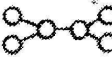

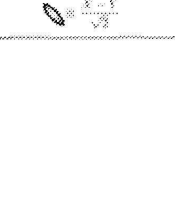

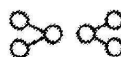
도면18



도면19



도면20

게이트	성공		실패	
	유호 투영	산출	유호 투영	산출
	$\frac{ ++\rangle \pm --\rangle}{\sqrt{2}}$ _{2,6}	$\frac{ 0++\rangle + 1--\rangle}{\sqrt{2}}$ 	$ +-\rangle_{2,6}$ or $ -+\rangle_{2,6}$	$ 0++\rangle$ 
	$\frac{ 00\rangle \pm 11\rangle}{\sqrt{2}}$ _{2,6}	$\frac{ 0++\rangle + 1--\rangle}{\sqrt{2}}$ 	$ 01\rangle_{2,6}$ or $ 10\rangle_{2,6}$	$(0++\rangle + 1--\rangle)$ $\times (0++\rangle + 1--\rangle)$ 
	$\frac{ +0\rangle \pm 1-\rangle}{\sqrt{2}}$ _{2,6}	$\frac{ 0++\rangle + 1--\rangle}{\sqrt{2}}$ 	$ +1\rangle_{2,6}$ or $ - 0\rangle_{2,6}$	$ 0++\rangle$ $\times (0++\rangle + 1--\rangle)$ 
	$\frac{ 0(+i)\rangle \pm 1(-i)\rangle}{\sqrt{2}}$ _{2,6}	$\frac{ 0++\rangle + 1--\rangle}{\sqrt{2}}$ 	$ 0(-i)\rangle_{2,6}$ or $ 1(+i)\rangle_{2,6}$	$(0++\rangle + 1--\rangle)$ $\times (0++\rangle + i 1--\rangle)$ 

도면21

