



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2021-0052969
(43) 공개일자 2021년05월11일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H04B 10/70 (2013.01) H04B 10/61 (2013.01)
(52) CPC특허분류
H04B 10/70 (2013.01)
H04B 10/614 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0138667
(22) 출원일자 2019년11월01일
심사청구일자 2019년11월01일

(71) 출원인
경희대학교 산학협력단
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)
(72) 발명자
신현동
경기도 수원시 영통구 청명로 132, 323동 501호(영통동, 벽산삼익아파트)
자만 파카르
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732(서천동)
유나이드 우르 레만
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동)
(74) 대리인
특허법인도담

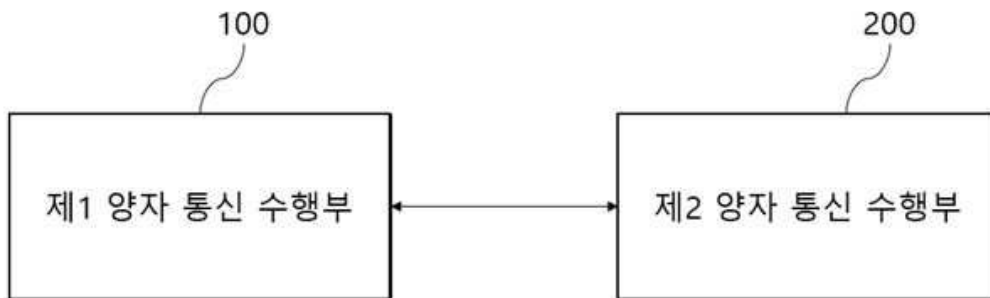
전체 청구항 수 : 총 20 항

(54) 발명의 명칭 양자 이중 코딩 방법 및 이를 이용한 양자 통신 시스템

(57) 요약

본 기술은 양자 통신 시스템에 관한 것으로, 본 기술에 따른 동시에 양방향 이중 통신이 가능한 양자 통신 시스템은, 제1 양자 통신 수행부 및 제2 양자 통신 수행부를 포함하는 양자 통신 시스템에 있어서, 상기 제1 양자 통신 수행부로부터 전자를 수신하고, 상기 전자를 미리 설정된 회전각만큼 회전시키는 편광 회전자, 상기 제2 양자 통신 수행부로부터 광자를 수신하고, 상기 광자를 H 성분 및 V 성분으로 분광하는 빔 스플리터 및 상기 빔 스플리터를 통과한 상기 광자의 H 성분과 상기 편광 회전자를 통과한 상기 전자를 수신하고, 반사실성을 가지지 않는 광자를 상기 전자를 통해 흡수하고, 반사실성을 가지는 광자를 출력하는 DQ 게이트를 포함하고, 상기 DQ 게이트는 상기 전자의 스핀 방향에 따라 결정되는 흡수성 물체의 존재 여부에 따라, 서로 다른 결과값을 출력하는 QZ 게이트를 포함한다.

대표도 - 도1



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	2019R1A2C2007037
부처명	교육부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	이공분야기초연구사업/중견연구자지원사업
연구과제명	양자네트워킹 핵심기술 연구
기 여 율	1/1
과제수행기관명	경희대학교 산학협력단
연구기간	2019.03.01 ~ 2024.02.28

명세서

청구범위

청구항 1

제1 양자 통신 수행부 및 제2 양자 통신 수행부를 포함하는 양자 통신 시스템에 있어서,
 상기 제1 양자 통신 수행부로부터 전자를 수신하고, 상기 전자를 미리 설정된 회전각만큼 회전시키는 편광 회전자;
 상기 제2 양자 통신 수행부로부터 광자를 수신하고, 상기 광자를 H 성분 및 V 성분으로 분광하는 빔 스플리터;
 및
 상기 빔 스플리터를 통과한 상기 광자의 H 성분과 상기 편광 회전자를 통과한 상기 전자를 수신하고, 반사실성을 가지지 않는 광자를 상기 전자를 통해 흡수하고, 반사실성을 가지는 광자를 출력하는 DQ 게이트를 포함하고,
 상기 DQ 게이트는 상기 전자의 스핀 방향에 따라 결정되는 흡수성 물체의 존재 여부에 따라, 서로 다른 결과값을 출력하는 QZ 게이트를 포함하는 양자 통신 시스템.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 DQ 게이트는,
 하나 또는 그 이상의 개별 DQ 게이트가 직렬로 연결된 양자 통신 시스템.

청구항 3

제2항에 있어서, 상기 편광 회전자는,
 하나 또는 그 이상의 개별 편광 회전자가, 상기 개별 DQ 게이트에 각각 연결된 양자 통신 시스템.

청구항 4

제3항에 있어서, 상기 DQ 게이트는,
 상기 QZ 게이트로부터 출력된 광자를 H 성분 및 V 성분으로 분광하는 내부 빔 스플리터를 더 포함하는 양자 통신 시스템.

청구항 5

제1항에 있어서, 상기 QZ 게이트는,
 상기 흡수성 물체가 존재하면 상기 광자의 H 성분을 $\cos^{2N} \theta_N$ 의 확률로 그대로 출력하고, 상기 흡수성 물체가 존재하지 않으면 1의 확률로 상기 광자와 수직한 성분을 출력하는 양자 통신 시스템.

청구항 6

제5항에 있어서, 상기 QZ 게이트는,

상기 흡수성 물체의 존재 여부에 따라 반사실성을 가지는지 여부가 결정되는 양자 통신 시스템.

청구항 7

제1항에 있어서, 상기 QZ 게이트는,

온 상태에서 광자가 통과할 수 없도록 제어하고, 오프 상태에서 광자가 통과할 수 있도록 제어하는 변환 미러를 포함하고,

상기 변환 미러는 미리 설정된 사이클마다 온-오프 상태를 반복하는 양자 통신 시스템.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 반사실성을 가지는 광자의 양자 상태가 $|0\rangle_A |+\rangle_B$ 이면, 상기 제1 양자 통신 수행부가 전송한 정보는 0, 상기 제2 양자 통신 수행부가 전송한 정보는 0이라고 판단하고, $|1\rangle_A |+\rangle_B$ 이면, 상기 제1 양자 통신 수행부가 전송한 정보는 1, 상기 제2 양자 통신 수행부가 전송한 정보는 0이라고 판단하고, $|0\rangle_A |-\rangle_B$ 이면, 상기 제1 양자 통신 수행부가 전송한 정보는 0, 상기 제2 양자 통신 수행부가 전송한 정보는 1이라고 판단하고, $|1\rangle_A |-\rangle_B$ 이면, 상기 제1 양자 통신 수행부가 전송한 정보는 1, 상기 제2 양자 통신 수행부가 전송한 정보는 1이라고 판단하는 양자 통신 시스템.

청구항 9

제1 양자 통신 수행부 및 제2 양자 통신 수행부를 포함하는 양자 통신 시스템에 있어서,

상기 제1 양자 통신 수행부의 제1 양자 정보, 상기 제2 양자 통신 수행부의 제2 양자 정보 및 상기 제2 양자 정보로부터 획득한 앤실라 큐비트가 모두 얽힌 상태에 있는 인코딩 상태를 출력하는 이중 DNOT 게이트;

상기 인코딩 상태를 디코딩하여, 얽힌 상태가 풀린 디코딩된 제2 양자 정보를 획득하는 CNOT 게이트; 및

상기 앤실라 큐비트를 제어 큐비트로, 상기 제1 양자 정보를 타겟 큐비트로 파울리 z 연산을 수행하여, 얽힌 상태가 풀린 디코딩된 제1 양자 정보를 획득하는 CZ 게이트를 포함하는 양자 통신 시스템.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 CZ 게이트의 수행 전, 상기 앤실라 큐비트에 대해 하드마드 연산을 수행하는 하드마드 게이트를 더 포함하는 양자 통신 시스템.

청구항 11

제9항에 있어서, 상기 이중 DNOT 게이트는,

상기 제1 양자 정보, 상기 제2 양자 정보 및 상기 앤실라 큐비트를

$|\psi_2\rangle_{ABC} = \alpha\gamma|000\rangle_{ABC} + \alpha\delta|011\rangle_{ABC} + \beta\gamma|110\rangle_{ABC} + \beta\delta|101\rangle_{ABC}$ 의 얽힌 상태로 출력하는 DCQZ 게이트; 및

상기 제1 양자 정보, 상기 제2 양자 정보 및 상기 앤실라 큐비트를

$|\psi_{2K}\rangle_{ABC} = \alpha\gamma|000\rangle_{ABC} + \beta\delta|111\rangle_{ABC} + \beta\gamma|012\rangle_{ABC} + \alpha\delta|113\rangle_{ABC}$ 의 얽힌 상태로 출력하는 DDQ 게이트를 포함하는 양자 통신 시스템.

청구항 12

제11항에 있어서, 상기 DCQZ 게이트는,

상기 제2 양자 통신 수행부로부터 수신한 광자를 H 성분과 V 성분으로 분광하는 빔 스플리터; 및

전자의 스핀 방향에 따라 결정되는 흡수성 물체의 존재 여부에 따라, 서로 다른 광자의 성분을 출력하는 CQZ 게이트를 포함하는 양자 통신 시스템.

청구항 13

제12항에 있어서, 상기 CQZ 게이트는,

상기 흡수성 물체가 존재하면 상기 광자의 상기 CQZ 게이트에 입력된 광자의 성분을 λ_1 의 확률로 그대로 출력하고, 상기 흡수성 물체가 존재하지 않으면 λ_0 의 확률로 상기 CQZ 게이트에 입력된 광자의 성분과 수직인 성분을 출력하는 양자 통신 시스템.

청구항 14

제13항에 있어서, 상기 CQZ 게이트는,

상기 흡수성 물체의 존재 여부에 관계없이 반사실성을 가지는 양자 통신 시스템.

청구항 15

제9항에 있어서,

상기 디코딩된 제1 양자 정보로부터 상기 제2 양자 정보를 획득하고, 상기 디코딩된 제2 양자 정보로부터 상기 제1 양자 정보를 획득하는 양자 통신 시스템.

청구항 16

제15항에 있어서,

상기 제1 양자 정보는 $|\eta_1\rangle_A = \alpha|0\rangle_A + \beta|1\rangle_A$, 상기 제2 양자 정보는 $|\eta_2\rangle_B = \gamma|0\rangle_B + \delta|1\rangle_B$ 이고,

상기 디코딩된 제1 양자 정보는 $\gamma|0\rangle_A + \delta|1\rangle_A$, 상기 디코딩된 제2 양자 정보는 $\alpha|0\rangle_B + \beta|1\rangle_B$ 인 양자 통신 시스템.

청구항 17

고전 정보 및 양자 정보를 송수신하는 양자 통신 시스템에 있어서,

벨 상태의 얽힌 상태로 존재하는 전자와 광자의 양자 쌍 중, 상기 광자에서 반사실성을 가지지 않는 광자를 상기 전자를 통해 흡수하고, 반사실성을 가지는 광자의 상태를 기초로 상대방이 전송한 상기 고전 정보를 획득하는 고정 정보 전송부; 및

각 사용자가 전송한 양자 정보와 상기 양자 정보의 특정 방향 성분인 앤실라 큐비트를 얽힘 상태로 인코딩하고, 인코딩된 양자 상태에서부터 CNOT 게이트와 CZ 게이트를 통해 디코딩된 양자 상태를 획득하고, 상기 디코딩된 양자 상태를 기초로 상대방이 전송한 상기 양자 정보를 획득하는 양자 정보 전송부를 포함하는 양자 통신 시스템.

청구항 18

제17항에 있어서, 상기 고전 정보 전송부는,

상기 반사실성을 가지는 광자의 양자 상태가 $|0\rangle_A |+\rangle_B$ 이면, Alice가 전송한 정보는 0, Bob이 전송한 정보는 0이라고 판단하고, $|1\rangle_A |+\rangle_B$ 이면, 상기 Alice가 전송한 정보는 1, 상기 Bob이 전송한 정보는 0이라고 판단하고, $|0\rangle_A |-\rangle_B$ 이면, 상기 Alice가 전송한 정보는 0, 상기 Bob이 전송한 정보는 1이라고 판단하고, $|1\rangle_A |-\rangle_B$ 이면, 상기 Alice가 전송한 정보는 1, 상기 Bob이 전송한 정보는 1이라고 판단하는 양자 통신 시스템.

청구항 19

제17항에 있어서, 상기 양자 정보 전송부는,

상기 각 사용자가 전송한 양자 정보의 확률 변수를 교환하는 연산을 통해, 상대방이 전송한 상기 양자 정보를 획득하는 양자 통신 시스템.

청구항 20

제19항에 있어서,

상기 각 사용자가 전송한 양자 정보는 $|\eta_1\rangle_A = \alpha |0\rangle_A + \beta |1\rangle_A$, $|\eta_2\rangle_B = \gamma |0\rangle_B + \delta |1\rangle_B$ 이고,

상기 확률 변수가 교환된 양자 정보는 $\gamma |0\rangle_A + \delta |1\rangle_A$, $\alpha |0\rangle_B + \beta |1\rangle_B$ 인 양자 통신 시스템.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 전자 장치에 관한 것으로, 보다 구체적으로, 양자 이중 코딩 방법 및 이를 이용한 양자 통신 시스템에 관한 것이다.

배경 기술

[0003] 양자 통신은 기존의 통신에서는 불가능한 새로운 보안 통신 방법을 제공한다. 특히, 멀리 떨어진 두 장치간 어떠한 물리적 입자의 전송도 없이 정보를 전달하는 반사실적 양자 통신(Counterfactual quantum communication)은 양자 프로토콜의 독특한 특징이라고 할 수 있다. 이는 양자 얽힘, 양자의 비국지성(nonlocality), 비복제성(no-cloning theorem)에 기반한 양자 통신의 특징이라고 할 수 있다.

[0004] 양자 얽힘(quantum entanglement)은 양자 통신, 양자 암호 및 양자 계측학 등 양자 정보 처리의 재료

(resource)이다. 양자역학에서, 양자 얽힘 또는 간단히 얽힘은 두 부분 계 사이에 존재할 수 있는 일련의 비고전적인 상관관계이다.

[0005] 얽힘은 두 부분계가 공간적으로 서로 멀리 떨어져 있어도 존재할 수 있다. 예를 들어, 두 입자를 일정한 양자상태에 두어 두 입자의 스핀이 항상 반대가 되도록 할 수 있다. (예를 들어 두 스핀의 단일항 상태.) 양자역학에 따르면, 측정하기 전까지는 두 입자의 상태를 알 수 없다. 하지만 측정을 한다면, 그 순간 한 계의 상태가 결정되고 이는 즉시 그 계와 얽혀 있는 다른 계의 상태까지 결정하게 된다. 이는 마치 정보가 순식간에 한 계에서 다른 계로 이동한 것처럼 보일 수 있다.

[0006] 벨 상태(Bell state)는 두 개의 큐비트로 표현할 수 있는 가장 간단하고 양자 얽힘이 최대인 양자 상태이다. 벨 상태의 양자를 이용한 양자 통신으로 복수의 장치가 존재하는 상황에서 두 개의 비트를 단일 큐비트를 이용하여 전송하는 고밀집 코딩(super-dense coding)이나 종래의 채널을 통하여 알려지지 않은 큐비트를 전송하는 양자 텔레포테이션(quantum teleportation)이 있다.

[0007] 반사실적 양자 통신에서는 고전 채널(Classical channel)에 어떠한 물리적 입자도 남기지 않고 정보를 전달할 수 있다. 기존의 반사실적 양자 통신은 멀리 떨어진 장치 간에 한 번에 한 방향으로만 정보를 전달할 수 있는 단순 코딩(simplex coding)만이 가능하였다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0009] 본 발명의 실시 예는, 동시에 반사실적 양방향 통신이 가능한 양자 이중 코딩 방법 및 이를 이용한 양자 통신 시스템을 제공한다.

과제의 해결 수단

[0011] 본 기술은 양자 통신 시스템에 관한 것으로, 본 기술에 따른 동시에 양방향 이중 통신이 가능한 양자 통신 시스템은, 제1 양자 통신 수행부 및 제2 양자 통신 수행부를 포함하는 양자 통신 시스템에 있어서, 상기 제1 양자 통신 수행부로부터 전자를 수신하고, 상기 전자를 미리 설정된 회전각만큼 회전시키는 편광 회전자, 상기 제2 양자 통신 수행부로부터 광자를 수신하고, 상기 광자를 H 성분 및 V 성분으로 분광하는 빔 스플리터 및 상기 빔 스플리터를 통과한 상기 광자의 H 성분과 상기 편광 회전자를 통과한 상기 전자를 수신하고, 반사실성을 가지지 않는 광자를 상기 전자를 통해 흡수하고, 반사실성을 가지는 광자를 출력하는 DQ 게이트를 포함하고, 상기 DQ 게이트는 상기 전자의 스핀 방향에 따라 결정되는 흡수성 물체의 존재 여부에 따라, 서로 다른 결과값을 출력하는 QZ 게이트를 포함한다.

[0012] 또한 본 기술에 따른 양자 통신 시스템은, 제1 양자 통신 수행부 및 제2 양자 통신 수행부를 포함하는 양자 통신 시스템에 있어서, 상기 제1 양자 통신 수행부의 제1 양자 정보, 상기 제2 양자 통신 수행부의 제2 양자 정보 및 상기 제2 양자 정보로부터 획득한 엔실라 큐비트가 모두 얽힌 상태에 있는 인코딩 상태를 출력하는 이중 DNOT 게이트, 상기 인코딩 상태를 디코딩하여, 얽힌 상태가 풀린 디코딩된 제2 양자 정보를 획득하는 CNOT 게이트 및 상기 엔실라 큐비트를 제어 큐비트로, 상기 제1 양자 정보를 타겟 큐비트로 파울리 z 연산을 수행하여, 얽힌 상태가 풀린 디코딩된 제1 양자 정보를 획득하는 CZ 게이트를 포함한다.

[0013] 또한, 고전 정보 및 양자 정보를 송수신하는 양자 통신 시스템에 있어서, 벨 상태의 얽힌 상태로 존재하는 전자와 광자의 양자 쌍 중, 상기 광자에서 반사실성을 가지지 않는 광자를 상기 전자를 통해 흡수하고, 반사실성을 가지는 광자의 상태를 기초로 상대방이 전송한 상기 고전 정보를 획득하는 고정 정보 전송부 및 각 사용자가 전송한 양자 정보와 상기 양자 정보의 특정 방향 성분인 엔실라 큐비트를 얽힘 상태로 인코딩하고, 인코딩된 양자 상태에서부터 CNOT 게이트와 CZ 게이트를 통해 디코딩된 양자 상태를 획득하고, 상기 디코딩된 양자 상태를 기초로 상대방이 전송한 상기 양자 정보를 획득하는 양자 정보 전송부를 포함한다.

발명의 효과

[0015] 본 기술에 따르면, 동시에 반사실적 양방향 통신이 가능한 양자 이중 코딩 방법 및 이를 이용한 양자 통신 시스템이 제공된다.

도면의 간단한 설명

- [0017] 도 1은 본 발명의 실시 예에 따른 양자 통신 시스템을 설명하기 위한 도면이다.
- 도 2는 본 발명의 실시 예에 따른 QZ 게이트를 설명하기 위한 도면이다.
- 도 3은 본 발명의 실시 예에 따른 CQZ 게이트를 설명하기 위한 도면이다.
- 도 4는 본 발명의 실시 예에 따른 QZ 게이트와 CQZ 게이트의 동작을 설명하기 위한 표이다.
- 도 5는 본 발명의 실시 예에 따른 양자 이중 코딩의 반사실성을 설명하기 위한 도면이다.
- 도 6은 본 발명의 실시 예에 따른 고전 정보를 전달하기 위한 양자 이중 코딩을 설명하기 위한 도면이다.
- 도 7은 본 발명의 실시 예에 따른 DQ 게이트를 설명하기 위한 도면이다.
- 도 8은 본 발명의 실시 예에 따른 DNOT 게이트를 설명하기 위한 도면이다.
- 도 9는 고전 정보에 대한 양자 이중 코딩의 효과를 설명하기 위한 도면이다.
- 도 10은 본 발명의 실시 예에 따른 양자 정보를 전달하기 위한 양자 이중 코딩을 설명하기 위한 도면이다.
- 도 11은 본 발명의 실시 예에 따른 DDQ 게이트를 설명하기 위한 도면이다.
- 도 12는 도 10의 양자 이중 코딩을 상세하게 설명하기 위한 도면이다.
- 도 13은 양자 정보에 대한 양자 이중 코딩의 효과를 설명하기 위한 도면이다.
- 도 14는 본 발명의 실시 예에 따른 양자 용량(Quantum capacity)를 설명하기 위한 도면이다.
- 도 15는 본 발명의 실시 예에 따른 양자 통신 시스템의 고전 정보의 전송을 설명하기 위한 순서도이다.
- 도 16은 본 발명의 실시 예에 따른 양자 통신 시스템의 양자 정보의 전송을 설명하기 위한 순서도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0018] 본 명세서 또는 출원에 개시되어 있는 본 발명의 개념에 따른 실시 예들에 대해서 특정한 구조적 내지 기능적 설명들은 단지 본 발명의 개념에 따른 실시 예를 설명하기 위한 목적으로 예시된 것으로, 본 발명의 개념에 따른 실시 예들은 다양한 형태로 실시될 수 있으며 본 발명의 개념에 따른 실시 예들은 다양한 형태로 실시될 수 있으며 본 명세서 또는 출원에 설명된 실시 예들에 한정되는 것으로 해석되어서는 아니 된다.
- [0019] 본 발명의 개념에 따른 실시 예는 다양한 변형을 가할 수 있고 여러 가지 형태를 가질 수 있으므로 특정 실시 예들을 도면에 예시하고 본 명세서 또는 출원에 상세하게 설명하고자 한다. 그러나, 이는 본 발명의 개념에 따른 실시 예를 특정한 개시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변형, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다.
- [0020] 제1 및/또는 제2 등의 용어는 다양한 구성 요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성 요소들은 상기 용어들에 의해 한정되어서는 안 된다. 상기 용어들은 하나의 구성 요소를 다른 구성 요소로부터 구별하는 목적으로만, 예컨대 본 발명의 개념에 따른 권리 범위로부터 이탈되지 않은 채, 제1 구성요소는 제2 구성요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성요소는 제1 구성요소로도 명명될 수 있다.
- [0021] 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "연결되어" 있다거나 "접속되어" 있다고 언급된 때에는, 그 다른 구성요소에 직접적으로 연결되어 있거나 또는 접속되어 있을 수도 있지만, 중간에 다른 구성요소가 존재할 수도 있다고 이해되어야 할 것이다. 반면에, 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "직접 연결되어" 있다거나 "직접 접속되어" 있다고 언급된 때에는, 중간에 다른 구성요소가 존재하지 않는 것으로 이해되어야 할 것이다. 구성요소들 간의 관계를 설명하는 다른 표현들, 즉 "~사이에"와 "바로 ~사이에" 또는 "~에 이웃하는"과 "~에 직접 이웃하는" 등도 마찬가지로 해석되어야 한다.
- [0022] 본 명세서에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시 예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도

가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 명세서에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 서술된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.

- [0023] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가지고 있다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥상 가지는 의미와 일치하는 의미를 가지는 것으로 해석되어야 하며, 본 명세서에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.
- [0024] 실시 예를 설명함에 있어서 본 발명이 속하는 기술 분야에 익히 알려져 있고 본 발명과 직접적으로 관련이 없는 기술 내용에 대해서는 설명을 생략한다. 이는 불필요한 설명을 생략함으로써 본 발명의 요지를 흐리지 않고 더욱 명확히 전달하기 위함이다.
- [0025] 이하, 첨부한 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시 예를 설명함으로써, 본 발명을 상세히 설명한다. 이하, 본 발명의 실시 예를 첨부된 도면을 참조하여 상세하게 설명한다.
- [0026] 도 1은 본 발명의 실시 예에 따른 양자 통신 시스템을 설명하기 위한 도면이다.
- [0027] 도 1을 참조하면, 본 발명의 실시 예에 따른 양자 통신 시스템은 제1 양자 통신 수행부(100) 및 제2 양자 통신 수행부(200)를 포함할 수 있다.
- [0028] 제1 양자 통신 수행부(100) 및 제2 양자 통신 수행부(200)는 각각 사용자 Alice와 Bob이 사용하는 양자 통신 수행부일 수 있다. Alice는 송신자로서 양자 채널(quantum channel)을 통해 양자 정보를, 고전 채널(Classical channel)을 통해 일반 정보를 Bob에게 전송할 수 있다.
- [0029] 제1 양자 통신 수행부(100)는 송신 기기로, 제2 양자 통신 수행부(200)는 수신 기기로 표시하였지만, 실시 예에 따라 그 역도 성립할 수 있다. 또한, 제1 양자 통신 수행부(100)가 송신 또는 수신 기기로 동작함에 따라, 제2 양자 통신 수행부(200)는 이에 대응하여 수신 또는 송신 기기로 동작할 수 있다.
- [0030] 제1 양자 통신 수행부(100)와 제2 양자 통신 수행부(200)는 양자 암호 통신을 통해 암호화된 양자 정보 및 일반 정보를 교환할 수 있다. 이를 위해 양자 시스템은 사전에 양자 얽힘(quantum entanglement)을 준비할 수 있다.
- [0031] 벨 상태(Bell state)는 두 개의 큐비트로 표현할 수 있는 가장 간단하고 양자 얽힘이 최대인 양자 상태일 수 있다. 본 발명에서는, 벨 상태의 양자를 이용하여 동시에 양방향 통신이 가능한 반사실적 양자 통신을 제공할 수 있다.
- [0032] 반사실성(Counterfactuality)이란, 발생하지 않은 사건에 대한 결과를 얻는 것일 수 있다. 반사실성의 기본 개념은 간섭계에서 물리적인 측정을 수행하지 않고, 흡수성 물체(absorptive object)의 존재 유무를 확인하기 위한 상호작용이 없는 측정(Interaction-free Measurement, IFM)에서 도입되었다.
- [0033] IFM은 간섭계 중 어느 하나에 흡수성 물체가 존재할 때, 광자를 흡수하지 않고 광자의 간섭 패턴을 파괴하는 Mach-Zehnder 간섭계를 통해 제안되었다. 이러한 IFM의 최대 달성 효율은 50%일 수 있으나, 양자 제노 효과(Quantum zeno effect, QZ 효과)와 빔 스플리터를 사용할 경우 100%까지 증가될 수 있다.
- [0034] 반사실적 양자 통신은 흡수성 물체의 존재 또는 부존재로 인코딩된 고전 정보를 이용한 QZ 효과를 통해 수행될 수 있다. 예를 들어, 간섭계 내에 흡수성 물체가 존재하면 '1'로, 존재하지 않으면 '0'으로 인코딩될 수 있다. '1'은 존재 상태, '0'은 부존재 상태에 대응될 수 있다.
- [0035] QZ 효과는 측정되는 시간 사이의 간격이 충분히 짧으면 양자가 초기 상태로 돌아가는 효과일 수 있다. QZ 효과는 간섭계에 존재하는 흡수성 물체로 인해 불안정한 상태에 있는 양자에 대해 IFM을 수행하기 위해 입증되었다.
- [0036] 흡수성 물체가 존재하는 통신 프로토콜은 반사실적이라고 판단될 수 있다. 반면, 흡수성 물체가 존재하지 않으면, 통신 프로토콜은 물리적인 입자는 전송 채널에 약한 흔적(weak trace)을 남기고, 반사실적이지 않다고 판단될 수 있다. 최근에는, 이러한 약한 흔적을 제거함으로써 반사실성을 가지도록 수정된 통신 프로토콜이 제안되었다.
- [0037] 고전 정보를 반사실적으로 전달하기 위해, 간섭계의 흡수성 물체는 발신자(Alice)에 의해 고전적인 방법으로 제

어될 수 있다. 고전 정보의 전송과 관련한 흡수성 물체의 동작은 후술되는 도 7을 통해 설명될 수 있다. 반면, 양자 정보를 전송하기 위해서는 존재 및 부존재의 중첩 상태의 흡수성 물체(전자)가 사용될 수 있다.

- [0038] 본 발명에서는 서로 다른 스핀 방향을 가질 수 있는 전자의 중첩 상태를 흡수성 물체로 사용할 수 있다. 후술되는 도 11에서 양자 정보의 전송과 관련된 흡수성 물체의 동작이 설명될 수 있다.
- [0039] 다시 도 1을 참조하면, 제1 양자 통신 수행부(100)와 제2 양자 통신 수행부(200)는 고전 정보 및 양자 정보를 송수신할 수 있다. 종래에는, 제1 양자 통신 수행부(100)에서 제2 양자 통신 수행부(200)로 정보를 전달하는 동시에, 제2 양자 통신 수행부(200)에서 제1 양자 통신 수행부(100)로 정보를 전달할 수 없었다. 즉, 동시간대에 한 방향 통신만이 가능한 양자 단일 코딩(quantum simplex coding)만이 가능하였다.
- [0040] 본 발명의 실시 예에 따른 양자 이중 코딩(quantum duplex coding) 방법은, 제1 양자 통신 수행부(100) 및 제2 양자 통신 수행부(200)이 동시에 반사실적으로 정보를 송수신할 수 있다.
- [0041] 양자 이중 코딩은 고전 정보와 양자 정보를 동시에 양방향 전송이 가능하고, 전송 채널에 어떠한 물리적 입자도 존재하지 않는 전송 방식일 수 있다.
- [0042] 고전 정보에 대한 양자 이중 코딩은 하나 또는 그 이상의 DNOT 연산자를 통해 수행될 수 있다. DNOT 연산자는 QZ 게이트를 포함할 수 있다.
- [0043] 이 프로토콜에서는 사전에 벨 상태로 공유된 양자 쌍을 사용하여, 동시에 양방향 통신이 가능한 반사실적 양자 통신을 수행할 수 있다. 고정 정보의 전달을 위한 양자 이중 코딩에 관하여는 후술되는 도 5 내지 도 9를 통해 설명될 수 있다.
- [0044] 또한, 양자 정보에 대한 양자 이중 코딩은 이중 DNOT 게이트를 통해 수행될 수 있다. 이중 DNOT 게이트는 QZ 게이트 및 CQZ 게이트를 포함할 수 있다.
- [0045] 양자 정보의 양자 이중 코딩에서는 사전에 공유된 벨 상태의 양자 쌍이 필요하지 않을 수 있다. 후술되는 도 10 내지 도 14에서 양자 정보에 대한 양자 이중 코딩에 대해 설명하도록 한다.
- [0046] 본 발명의 실시 예에 따른 고전 정보의 전달에는 QZ 게이트가, 양자 정보의 전송에는 QZ 게이트 및 CQZ 게이트가 사용될 수 있다. 이하 도 2를 통해 QZ 게이트의 구조 및 동작 방법을, 도 3을 통해 CQZ 게이트의 구조 및 동작 방법에 대하여 설명하도록 한다.
- [0047] 도 2는 본 발명의 실시 예에 따른 QZ 게이트를 설명하기 위한 도면이다. 도2는 QZ 게이트(300)의 구조를 도시하고 있다.
- [0048] QZ 게이트(300)는 흡수성 물체(340)의 고전적인 동작을 확인하는 동작을 수행할 수 있다. 구체적으로, QZ 게이트(300)는 흡수성 물체(340)와 직접적인 상호 작용 없이, 흡수성 물체(340)의 존재 또는 부존재를 확인하는 동작을 수행할 수 있다. DQ 게이트(300)는 전자의 스핀 방향에 따라 결정되는 흡수성 물체(340)의 존재 여부에 따라, 서로 다른 결과값을 출력할 수 있다.
- [0049] 흡수성 물체(340)가 존재하는 상태는 존재 상태($|1\rangle_{AO}$), 흡수성 물체(340)가 존재하지 않는 상태는 부존재 상태($|0\rangle_{AO}$)일 수 있다.
- [0050] QZ 게이트(300)는 H(또는 V) 방향으로 편광된 광자($|H(V)\rangle_p$)를 수신할 수 있다. 변환 미러(310)는 광자가 통과할 수 있도록 초기에는 오프 상태일 수 있다. 이후, N 사이클 동안 광자가 통과한 뒤, 변환 미러(310)는 온 상태가 되어 광자가 통과할 수 없도록 제어될 수 있다.
- [0051] 다시 N 사이클이 경과한 뒤, 변환 미러(310)는 다시 오프 상태가 되고 광자가 통과할 수 있도록 제어될 수 있다. 이러한 과정은 N 사이클마다 반복되어 수행될 수 있다.
- [0052] 편광 회전자(320)는 제1 양자 통신 수행부로부터 전자를 수신하고, 미리 설정된 회전각만큼 전자를 회전시키는 동작을 수행할 수 있다. $\theta_N = \pi/(2N)$ 만큼 회전된 광자는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$PR_N^{H(V)} : \begin{cases} |H(V)\rangle_p \rightarrow \cos \theta_N |H(V)\rangle_p + \sin \theta_N |V(H)\rangle_p \\ |V(H)\rangle_p \rightarrow \cos \theta_N |V(H)\rangle_p - \sin \theta_N |H(V)\rangle_p \end{cases}$$

편광 회전자(320)를 통과한 광자의 상태는 아래의 수학적 식 1과 같을 수 있다.

수학적 식 1

$$|\phi\rangle = \cos \theta_N |H(V)\rangle_p + \sin \theta_N |V(H)\rangle_p$$

이후, 빔 스플리터(330)는 광자를 H 성분과 V 성분으로 분리시키고, 각 성분을 서로 다른 경로에 제공할 수 있다.

H 성분은 Horizontal의 약자로 수평 성분, V 성분은 Vertical의 약자로 수직 성분일 수 있다. 다만, 실시 예에 따라 수평, 수직은 절대적이지 않을 수 있으며, V 성분이 수평 성분, H 성분이 수직 성분일 수도 있다.

일 실시 예에 따르면, H-빔 스플리터(PBS^H)는 H 성분은 그대로 통과시키고, V 성분은 미리 설정된 방향으로 분광시킬 수 있다. 반면, V-빔 스플리터(PBS^V)는 V 성분은 그대로 통과시키고, H 성분은 미리 설정된 방향으로 분광시킬 수 있다.

도 2의 QZ 게이트(300)에서, 빔 스플리터(330)에 의해 분광된 광자의 성분은 각각 제1 검출기(350)와 제2 검출기(360)에 제공될 수 있다. 이때, 제2 검출기(360)에 제공된 광자의 성분만이 흡수성 물체(340)와 상호 작용할 수 있다.

흡수성 물체(340)가 존재하는 존재 상태($|1\rangle_{AO}$)에서는, V(또는 H) 성분은 흡수성 물체(340)에 의해 흡수될 수 있다. 각 사이클마다 광자가 흡수성 물체(340)에 의해 흡수될 확률은 $\sin^2 \theta_N$ 일 수 있다.

광자가 흡수되지 않으면, 광자는 초기 상태 $|H(V)\rangle_p$ 로 붕괴될 수 있다. N 사이클 이후, 광자는 $\cos^{2N} \theta_N$ 의 확률로 흡수되지 않고, 초기 상태 $|H(V)\rangle_p$ 로 남을 수 있다.

흡수성 물체(340)가 존재하지 않는 부존재 상태($|0\rangle_{AO}$)에서는, 제2 검출기(360)에 제공된 V(또는 H) 성분의 광자가 제2 검출기(360)에서 반사되어 빔 스플리터(330)로 돌아올 수 있다. 따라서, 광자의 상태는 변하지 않고, $n (< N)$ 사이클이 경과한 후, 광자의 상태는 아래 수학적 식 2와 같을 수 있다.

수학적 식 2

$$|\phi\rangle = \cos (n\theta_N) |H(V)\rangle_p + \sin (n\theta_N) |V(H)\rangle_p$$

도 3은 본 발명의 실시 예에 따른 CQZ 게이트를 설명하기 위한 도면이다.

도 3을 참조하면, CQZ 게이트(400)는 흡수성 물체(440)의 고전적인 동작을 확인하는 동작을 수행할 수 있다. 구체적으로, CQZ 게이트(400)는 흡수성 물체(440)와 직접적인 상호 작용 없이, 흡수성 물체(440)의 존재 또는 부존재를 확인하는 동작을 수행할 수 있다.

CQZ 게이트(400)는 흡수성 물체가 존재하면 CQZ 게이트에 입력된 광자의 성분을 λ_1 의 확률로 그대로

출력하고, 흡수성 물체가 존재하지 않으면 λ_0 의 확률로 CQZ 게이트에 입력된 광자의 성분과 수직인 성분을 출력할 수 있다.

[0067] 외부 QZ 게이트(410)는 H(또는 V) 방향으로 편광된 광자를 수신할 수 있다. 변환 미러(420)는 광자가 통과할 수 있도록 초기에는 꺼져 있는 상태일 수 있다. 이후, L 사이클 동안 광자가 통과한 뒤, 변환 미러(420)는 켜진 상태가 되어 광자가 통과할 수 없도록 제어될 수 있다.

[0068] 다시 L 사이클이 경과한 뒤, 변환 미러(420)는 다시 꺼진 상태가 되고 광자가 통과할 수 있도록 제어될 수 있다. 이러한 과정은 L 사이클마다 반복되어 수행될 수 있다.

[0069] 흡수성 물체(440)가 존재하는 존재 상태($|1\rangle_{AO}$)에서, 전술한 바와 같이 QZ 게이트는 광자의 V(또는 H) 성분과 H(또는 V) 성분이 결합하여 광자를 변하지 않는 상태로 유지할 수 있다. 따라서, 내부 QZ 게이트(430)는 외부 QZ 게이트(410)에 대해서 변환 미러와 같이 동작할 수 있다.

[0070] $[1 - \sin^2(m\theta_M) \sin^2 \theta_N]^{LN}$ 의 확률로 광자가 폐기(또는 흡수)되지 않으면, 양자는 아래 수학적 식 3과 같은 회전된 상태를 가질 수 있다.

수학적 식 3

[0071]
$$|\phi\rangle = \cos(n\theta_N) |H(V)\rangle_P + \sin(n\theta_N) |V(H)\rangle_P$$

[0072] 따라서, $m(< M)$ 의 외부 사이클동안 광자가 흡수성 물체(440)에 의해 흡수되지 않으면, 외부 QZ 게이트

(410)는 입력된 $|H(V)\rangle_P$ 상태의 광자를, $\lambda_1 = \prod_{m=1}^M [1 - \sin^2(m\theta_M) \sin^2 \theta_N]^{LN}$ 의 확률로 입력된 광자의 성분과 수직인 성분인 $|V(H)\rangle_P$ 로 변환할 수 있다.

[0073] 흡수성 물체(440)가 존재하지 않는 부존재 상태($|0\rangle_{AO}$)에서, 전술한 바와 같이 QZ 게이트는 입력된 광자의 성분과 수직인 광자의 성분을 출력할 수 있다. 따라서, 내부 QZ 게이트(430)는 N 사이클 이후 $|V(H)\rangle_P$ 의 광자 상태를 $|H(V)\rangle_P$ 로 변환할 수 있다. 변환된 광자의 성분은 빔 스플리터(450)를 통과하면서 분광된 후, 측정기(D)에서 검출될 수 있다.

[0074] 변환 미러(420)는 내부 QZ 게이트(430)가 L 사이클동안 이러한 동작을 반복하도록 제어함으로써, 전송 채널 내에 광자가 약한 흔적(weak trace)을 남기는 것을 방지할 수 있다. 따라서, 부존재 상태($|0\rangle_{AO}$)의 내부 QZ 게이트(430)는 외부 QZ 게이트(410)에 대해 흡수성 물체로 동작할 수 있다.

[0075] M의 외부 사이클이 수행되는 동안 광자가 폐기(또는 흡수)되지 않으면, 광자는 $\cos^2 \theta_M$ 의 확률로 초기 상태 $|H(V)\rangle_P$ 로 붕괴될 수 있다.

[0076] CQZ 게이트(400)는 흡수성 물체의 존재 상태 및 부존재 상태 모두에 대해서 반사실성(counterfactuality)를 가질 수 있다. 또한, 반사실성을 유지하므로 CQZ 게이트(400)의 전송 채널에서는 어떠한 물리적인 입자도 검출될 수 없다.

[0077] 도 4는 본 발명의 실시 예에 따른 QZ 게이트와 CQZ 게이트의 동작을 설명하기 위한 표이다.

[0078] 도 4를 참조하면, QZ 게이트와 CQZ 게이트 모두 광자의 H 또는 V 성분($|H(V)\rangle_P$)을 입력으로 수신하고, 이를

그대로 출력하거나($|H(V)\rangle_P$) 이와 수직한 성분($|V(H)\rangle_P$)을 출력할 수 있다.

[0079] 각 게이트는 흡수성 물체의 존재 여부를 제어 변수(control)로 가질 수 있다. 흡수성 물체가 존재하는 상태는 $|1\rangle_{AO}$ 로, 흡수성 물체가 존재하지 않는 상태는 $|0\rangle_{AO}$ 일 수 있다.

[0080] QZ 게이트에서, 흡수성 물체가 존재하면 광자의 H 성분을 $\cos^{2N} \theta_N$ 의 확률로 그대로 출력하고, 흡수성 물체가 존재하지 않으면 1의 확률로 상기 광자의 $|H(V)\rangle_P$ 에 수직한 $|V(H)\rangle_P$ 을 출력할 수 있다.

[0081] 흡수성 물체의 존재 상태에서, N 사이클동안 흡수성 물체에 의해 흡수되지 않을 확률이 $\cos^{2N} \theta_N$ 이므로, $\cos^{2N} \theta_N$ 의 확률로 $|H(V)\rangle_P$ 상태의 광자가 출력될 수 있다.

[0082] 흡수성 물체가 존재하지 않으면 전송 채널에 약한 흔적이 남을 수 있고, 따라서 반사실성을 갖지 않을 수 있다. 반면, 흡수성 물체가 존재하면 전송 채널에 약한 흔적이 제거되고 반사실성을 가질 수 있다.

[0083] CQZ 게이트에서, 전술한 부존재 상태의 QZ 게이트의 동작에 따라, 도 3의 내부 QZ 게이트(430)는 입력된 광자의 성분($|V(H)\rangle_P$)과 반대되는 성분($|H(V)\rangle_P$)을 출력하고, 변환 미러에 의해 위 과정이 수 사이클동안 반복되어 수행될 수 있다.

[0084] 반복되어 수행되는 내부 QZ 게이트(430)의 동작에 따라 전송 채널의 약한 흔적은 제거될 수 있고, 따라서 내부 QZ 게이트(430)는 외부 QZ 게이트(410)에 대하여 흡수성 물체로 동작할 수 있다.

[0085] 따라서, CQZ 게이트에서는 QZ 게이트와 비교하여, 부존재 상태에서도 일정한 확률로 반사실성이 유지될 수 있는 차이가 있다.

[0086] 또한, 존재 상태에서는 QZ 게이트를 통과한 광자의 H 성분과 V 성분이 결합하여 광자 상태가 변하지 않고 유지될 수 있다. 따라서 내부 QZ 게이트(430)는 외부 QZ 게이트(410)에 대하여 변환 미러로 동작할 수 있고, 각 QZ 게이트에 대해 흡수성 물체가 존재하므로 CQZ 게이트 또한 반사실성이 유지될 수 있다.

[0087] 도 5는 본 발명의 실시 예에 따른 양자 이중 코딩의 반사실성을 설명하기 위한 도면이다.

[0088] 도 5를 참조하면, 제1 양자 통신 수행부(Alice)는 흡수성 물체(510)를 포함하고, 제2 양자 통신 수행부(Bob)은 CQZ 게이트(520), 빔 스플리터(530) 및 검출기(D0, D1)를 포함할 수 있다.

[0089] Alice는 0 또는 1의 고전 정보 b를 Bob에게 전송할 수 있다. Alice는 고전 정보 b를 $AO = |b\rangle_{AO}$ 로 인코딩할 수 있다. $|1\rangle_{AO}$ 로 인코딩된 고전 정보 b는 존재 상태, $|0\rangle_{AO}$ 으로 인코딩된 고전 정보 b는 부존재 상태일 수 있다.

[0090] 전술한 바와 같이, QZ 게이트는 존재 상태일 때에는 반사실성을 가지지만, 부존재 상태에서는 반사실성을 가지지 않을 수 있다(semi-counterfactual). CQZ 게이트를 이용하면 존재 및 부존재 상태 모두에 대해서 반사실성을 가지므로, Alice와 Bob은 CQZ 게이트(520)를 이용하여 반사실적 양자 통신을 수행할 수 있다.

[0091] Bob은 Alice로부터 인코딩된 고전 정보를 수신하고, CQZ 게이트(520)와 빔 스플리터(530)를 통해 Alice가 전송한 정보를 확인할 수 있다.

[0092] 구체적으로, CQZ 게이트(520)를 통과한 양자의 성분이 H 또는 V인지 여부($|H(V)\rangle_P$)에 따라, 빔 스플리터(530)는 서로 다른 경로에 제공할 수 있다.

[0093] 도 5에서, CQZ 게이트(520)를 통과한 양자의 성분이 H이고, 빔 스플리터(530)가 H-빔 스플리터(PBS^H)인 경우, 양자는 D0 검출기에서 검출될 수 있다. 반면, CQZ 게이트(520)를 통과한 양자의 성분이 H이고, 빔 스플리터가 V-빔 스플리터(PBS^V)인 경우, 양자는 D1 검출기에서 검출될 수 있다.

[0094] CQZ 게이트(520)를 이용함으로써, 흡수성 물체(510)의 존재 여부에 관계없이 양자 통신 시스템은 반사실성을 가질 수 있다.

[0095] 도 6은 본 발명의 실시 예에 따른 고전 정보를 전달하기 위한 양자 이중 코딩을 설명하기 위한 도면이다.

[0096] 도 6을 참조하면, Alice는 Bob에게 고전 정보 b1을, Bob은 Alice에게 고전 정보 b2를 전송할 수 있다.

[0097] 이를 위해 Alice와 Bob은 사전에 아래 수학적 식 4와 같은 벨 상태(Bell state)의 양자 쌍을 공유할 수 있다.

수학적 식 4

$$|\Phi^+\rangle_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}} |00\rangle_{AB} + \frac{1}{\sqrt{2}} |11\rangle_{AB}$$

[0099] Alice와 Bob이 전송하고자 하는 정보 b1b2는 아래 수학적 식 5와 같이 제1 양자상태($|\psi_1\rangle_{AB}$)로 인코딩될 수 있다. 이때, σ_0 는 항등 연산자(Identity operator), σ_x 는 파울리 x 연산자, σ_z 는 파울리 z 연산자일 수 있다.

수학적 식 5

$$|\psi_1\rangle_{AB} : \begin{cases} 00 \rightarrow (\sigma_0 \otimes \sigma_0) |\Phi^+\rangle_{AB} = |\Phi^+\rangle_{AB} \\ 01 \rightarrow (\sigma_0 \otimes \sigma_x) |\Phi^+\rangle_{AB} = |\Psi^+\rangle_{AB} \\ 10 \rightarrow (\sigma_z \otimes \sigma_0) |\Phi^+\rangle_{AB} = |\Phi^-\rangle_{AB} \\ 11 \rightarrow (\sigma_z \otimes \sigma_x) |\Phi^+\rangle_{AB} = |\Psi^-\rangle_{AB} \end{cases}$$

[0101] 상기 수학적 식에서 인코딩된 벨 상태는 아래 수학적 식 6과 같고, 인코딩된 고전 정보 b1b2는 네 개의 벨 상태 중 어느 하나의 상태일 수 있다.

수학적 식 6

$$\begin{aligned} |\Phi^\pm\rangle_{AB} &= \frac{1}{\sqrt{2}} |00\rangle_{AB} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} |11\rangle_{AB} \\ |\Psi^\pm\rangle_{AB} &= \frac{1}{\sqrt{2}} |01\rangle_{AB} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} |10\rangle_{AB} \end{aligned}$$

[0103] b1, b2의 고전 정보를 동시에 양방향으로 전송하기 위하여, Alice와 Bob은 DNOT 게이트를 수행할 수 있다. 이때, Alice측의 큐비트는 타겟 비트로, Bob측의 큐비트는 제어 큐비트로 동작할 수 있다. 제어 큐비트의 값에 따라 타겟 비트의 연산값이 결정될 수 있다.

[0104] DNOT 게이트를 거치면서 벨 상태로 인코딩된 양자 상태는 얽힘이 풀리고(disentangle), 수학적 식 7의 네 개의 상태 중 어느 하나의 양자 상태 ($|\psi_2\rangle_{AB}$)를 가질 수 있다. $|\pm\rangle = (|0\rangle \pm |1\rangle)/\sqrt{2}$ 는 하다마드 기저(Hadamard basis)일 수 있다.

수학식 7

$$|\Phi^{\pm}\rangle_{AB} \rightarrow |0\rangle_A |\pm\rangle_B$$

$$|\Psi^{\pm}\rangle_{AB} \rightarrow |1\rangle_A |\pm\rangle_B$$

[0105]

[0106]

상기 수학식 7로부터 고전 정보를 디코딩 하기 위해, Alice는 결과값을 측정하고 Bob이 전송한 b2를 읽을 수 있다. Bob은 하다마드 연산을 수행하는 하다마드 게이트(H)를 적용한 후, 결과값을 측정하여 Alice가 전송한 b1을 읽을 수 있다.

[0107]

구체적으로, DNOT 게이트를 통과한 양자 상태 $|\psi_2\rangle_{AB}$ 가 $|0\rangle_A |+\rangle_B$ 이면, Alice가 전송한 고전정보 b1은 0, Bob이 전송한 고전 정보 b2는 0이라고 판단할 수 있다. $|1\rangle_A |+\rangle_B$ 이면, Alice가 전송한 고전정보 b1은 1, Bob이 전송한 고전 정보 b2는 0이라고 판단할 수 있다. $|0\rangle_A |-\rangle_B$ 이면, Alice가 전송한 고전정보 b1은 0, Bob이 전송한 고전 정보 b2는 1이라고 판단할 수 있다. $|1\rangle_A |-\rangle_B$ 이면, Alice가 전송한 고전정보 b1은 1, Bob이 전송한 고전 정보 b2는 1이라고 판단할 수 있다.

[0108]

본 발명의 실시 예에서, 인코딩 및 디코딩 과정을 거친 양자 쌍은 상대방이 전송하고자 하는 정보를 포함할 수 있다. 이를 통해 동시에 양방향으로 전송이 가능한 양자 통신 시스템을 구현할 수 있다.

[0109]

도 7은 본 발명의 실시 예에 따른 DQ 게이트를 설명하기 위한 도면이다.

[0110]

도 7을 참조하면, DQ 게이트(600)는 흡수성 물체(610, 620), QZ 게이트(630) 및 빔 스플리터(640)를 포함할 수 있다.

[0111]

본 발명의 실시 예에 따른 고전 정보를 전달하기 위한 양자 통신 시스템은 DNOT 게이트를 포함할 수 있다. 이때, DNOT 게이트는 하나 또는 그 이상의 DQ 게이트로 구성될 수 있다. 따라서, DQ 게이트를 통해 DNOT 게이트의 동작이 이해될 수 있다.

[0112]

도 7을 참조하면, 서로 다른 스핀 방향을 가지는 전자를 흡수성 물체(610, 620)로 사용할 수 있다. 전자는 $|\uparrow\rangle_e$ 와 $|\downarrow\rangle_e$ 의 스핀 방향을 가질 수 있다.

[0113]

각각의 스핀 방향은 α 및 β 의 확률로 중첩되어 존재할 수 있다. 각 확률은 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ 의 관계를 만족하고, 이러한 전자의 상태는 아래의 수학식 8과 같이 표현될 수 있다.

수학식 8

$$|\text{electron}\rangle_e = \alpha |\uparrow\rangle_e + \beta |\downarrow\rangle_e$$

[0114]

[0115]

전자의 상태가 $|\uparrow\rangle_e$ 이면 흡수성 물체가 존재하고, $|\downarrow\rangle_e$ 이면 흡수성 물체가 존재하지 않는다고 판단될 수 있다. 반대로, 전자의 상태가 $|\uparrow\rangle_e$ 이면 흡수성 물체가 존재하지 않고, $|\downarrow\rangle_e$ 이면 흡수성 물체가 존재한다고 판단될 수 있다. 초기 양자는 수학식 9와 같은 상태일 수 있다.

수학식 9

[0116] $|\phi_0\rangle_{ep} = |\text{electron}\rangle_e |H(V)\rangle_p$

[0117] 흡수성 물체(610)와 QZ 게이트(630)가 상호 작용을 한 후, 양자의 상태는 $|\phi_1\rangle_{ep}$ 일 수 있다. 이후, 빔 스플리터(640)와 흡수성 물체(620)를 통과한 후 양자의 상태는 $|\phi_2\rangle_{ep}$ 일 수 있다.

수학식 10

[0118]
$$\begin{aligned} |\phi_0\rangle_{ep} &\rightarrow |\phi_1\rangle_{ep} = \alpha |\uparrow H\rangle_{ep} + \beta |\downarrow V\rangle_{ep} \\ &\rightarrow |\phi_2\rangle_{ep} = |\uparrow(\downarrow)\rangle_e |H(V)\rangle_p \end{aligned}$$

[0119] 양자 상태 $|\phi_1\rangle_{ep}$ 에서, 두번째 항 $\beta |\downarrow V\rangle_{ep}$ 는(수학식 9, 10에서 괄호 안의 상태일 경우 첫번째 항 $\alpha |\uparrow H\rangle_{ep}$) 흡수성 물체가 부존재할 때의 출력값일 수 있다. 이 출력값은 반사실성을 가지지 않으므로, 반사실성을 요하는 양자 통신 시스템에서 폐기(또는 흡수)될 필요가 있다.

[0120] 반사실성에 반하는 출력값은 빔 스플리터(640) 및 파울리 x 게이트를 통해 폐기(또는 흡수)될 수 있다. 광자는 전자에 의해 흡수되고, QZ 게이트(600)는 광자와 전자를 모두 출력하지 않을 수 있다.

[0121] 반사실성을 가지는 결과를 성공적으로 출력한 경우, DQ 게이트(600)는 $|\uparrow(\downarrow)\rangle_e$ 와 $|H(V)\rangle_p$ 를 출력할 수 있다.

[0122] 각 출력값에 대해 Alice와 Bob은 아래 수학식 11을 통해 상대방이 전송한 고전 정보를 확인할 수 있다. 예를 들어, 전자가 $|\uparrow\rangle_e$ 상태면 Alice의 정보를 0, 전자가 $|\downarrow\rangle_e$ 상태면 Alice의 정보를 1, 광자의 성분이 H이면 Bob의 정보를 0, 광자의 성분이 V이면 Bob의 정보를 1이라고 판단할 수 있다.

수학식 11

[0123]
$$\begin{aligned} |0\rangle_A &= |\uparrow\rangle_e \\ |1\rangle_A &= |\downarrow\rangle_e \\ |0\rangle_B &= |H\rangle_p \\ |1\rangle_B &= |V\rangle_p \end{aligned}$$

[0124] 도 7의 DQ 게이트는 하나의 QZ 게이트와 중첩 상태의 전자를 이용하여 구성될 수 있다. 후술되는 도 8은 복수의 DQ 게이트를 직렬로 연결한 양자 회로일 수 있다. 도 8의 실시 예에 따르면, 반사실성의 정확도가 증가될 수 있다.

[0125] 도 8은 본 발명의 실시 예에 따른 DNOT 게이트를 설명하기 위한 도면이다.

[0126] 도 8을 참조하면, 본 발명의 실시 예에 따른 DNOT 게이트(700)는 하나 또는 그 이상의 DQ 게이트(730-1, 730-2, 730-K)로 구성될 수 있다.

[0127] Alice는 중첩 상태의 전자를, Bob은 광자를 사용하여 고전 정보를 전송할 수 있다. Alice의 전자와 Bob의 전자는 사전에 벨 상태로 얽힌 양자 쌍일 수 있다.

[0128] Bob은 빔 스플리터1(710)에 광자를 입력하고, 입력된 광자의 H 성분은 파울리 x 연산자로, V 성분은 빔 스플리터2(740)에 각각 제공될 수 있다.

[0129] 편광 회전자(720)는 θ_K 만큼 전자를 회전시킬 수 있다. θ_K 만큼 회전된 전자의 상태는 아래의 수학적식 12와 같을 수 있다.

수학적식 12

$$|0\rangle_A \rightarrow \cos \theta_K |0\rangle_A + \sin \theta_K |1\rangle_A$$

$$|1\rangle_A \rightarrow \cos \theta_K |1\rangle_A - \sin \theta_K |0\rangle_A$$

[0130]

[0131] Bob은 파울리 x 연산자를 수행한 H 성분의 광자를 DQ 게이트1(730-1)에 제공할 수 있다. DQ 게이트1(730-1)를 통과한 양자의 상태($|\psi_{21}\rangle_{AB}$)는 수학적식 13의 네 개의 상태 중 어느 하나일 수 있다.

수학적식 13

$$|\Phi^\pm\rangle_{AB} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle_{AB} \pm \cos \theta_K |11\rangle_{AB} \mp \sin \theta_K |01\rangle_{AB})$$

$$|\Psi^\pm\rangle_{AB} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (\pm |11\rangle_{AB} + \cos \theta_K |01\rangle_{AB} + \sin \theta_K |11\rangle_{AB})$$

[0132]

[0133] DQ 게이트(730-1, 730-2, 730-K)는 빔 스플리터(710)를 통과한 광자의 H 성분과 편광 회전을 통과한 전자를 수신하고, 반사실성을 가지지 않는 광자를 전자를 통해 흡수하고, 반사실성을 가지는 광자를 출력할 수 있다.

[0134] 도 7의 양자 회로와 다르게, 도 8의 DNOT 게이트(700)는 복수 개의 DQ 게이트(730-1, 730-2, 730-K)를 포함할 수 있다.

[0135] 복수의 DQ 게이트를 통해 DNOT 게이트의 반사실성을 높일 수 있다. 또한, 원하는 회전각을 얻기 위해 하나의 DQ 게이트를 사용하면 광자가 전자에 의해 지나치게 많이 흡수될 수 있으므로, 복수의 DQ 게이트를 통해 원하는 회전각을 얻음으로써, 광자가 전자에 의해 지나치게 흡수되는 것을 방지할 수 있다.

[0136] K개의 DQ 게이트를 통과한 후 양자 상태($|\psi_{2K}\rangle_{AB}$)는 아래 수학적식 14 중 어느 하나일 수 있다.

수학적식 14

$$|\Phi^\pm\rangle_{AB} \rightarrow |0\rangle_A |\mp\rangle_B$$

$$|\Psi^\pm\rangle_{AB} \rightarrow |1\rangle_A |\pm\rangle_B$$

[0137]

[0138] 이후, Bob은 파울리 z 연산을 수행하고, 수행한 결과는 수학적식 15일 수 있다. 이는 수학적식 7과 동일한 결과로, 복수의 DQ 게이트(730-1, 730-2, 730-K)로 DNOT 게이트(700)를 구성했을 때 동일한 결과를 얻었음을 확인할 수 있다.

수학식 15

$$|\Phi^{\pm}\rangle_{AB} \rightarrow |0\rangle_A |\pm\rangle_B$$

$$|\Psi^{\pm}\rangle_{AB} \rightarrow |1\rangle_A |\pm\rangle_B$$

[0139]

[0140] 수학식 15의 결과와 수학식 11을 통해, Alice와 Bob은 상대방이 전송한 고전 정보를 확인할 수 있다.

[0141] 도 9는 고전 정보에 대한 양자 이중 코딩의 효과를 설명하기 위한 도면이다.

[0142] 도 9를 참조하면, K는 DNOT 게이트에 포함된 DQ 게이트의 수일 수 있다. N은 각각의 DQ 게이트의 동작이 수행된 사이클의 횟수일 수 있다. 도 8의 그래프로부터, 특정한 K, N 값에서 성능(capacity)가 최대가 됨을 확인할 수 있다.

[0143] 도 10은 본 발명의 실시 예에 따른 양자 정보를 전달하기 위한 양자 이중 코딩을 설명하기 위한 도면이다.

[0144] 고전 채널을 이용하여 양자 정보를 전송할 수 없으나, 사전에 준비된 양자 얽힘을 이용하면 고전 채널을 통한 양자 정보의 전송이 가능할 수 있다. 본 발명의 양자 통신 시스템에서는, 사전에 공유된 얽힘 상태의 양자를 이용하지 않고 반사실적 양자 통신이 가능한 통신 프로토콜의 구현할 수 있다.

[0145] 또한, 본 발명의 양자 통신 시스템을 통해, 동시에 양방향 정보 전달이 가능한 양자 통신 시스템을 구현할 수 있다.

[0146] 도 10을 참조하면, Alice는 Bob에게 제1 양자 정보 $|\eta_1\rangle_A$ 을, Bob은 Alice에게 제2 양자 정보 $|\eta_2\rangle_B$ 를 전송할 수 있다. 각 양자 정보는 아래 수학식 16으로 표현될 수 있다.

수학식 16

$$|\eta_1\rangle_A = \alpha|0\rangle_A + \beta|1\rangle_A$$

$$|\eta_2\rangle_B = \gamma|0\rangle_B + \delta|1\rangle_B$$

[0147]

[0148] Alice와 Bob의 양자 정보는 이중 DNOT 게이트(800)를 통해 얽힘을 형성(entangle)하고, 다시 얽힘이 풀리면서(disentangle), 서로의 양자 정보를 교환할 수 있다.

[0149] DNOT 게이트(800)는 Alice의 제1 양자 정보($|\eta_1\rangle_A$), Bob의 제2 양자 정보($|\eta_2\rangle_B$) 및 제2 양자 정보로부터 획득한 앤실라 큐비트($|0\rangle_C$)이 모두 얽힌 상태에 있는 인코딩 상태(제3 양자 상태, $|\psi_3\rangle_{ABC}$)를 출력할 수 있다.

[0150] 구체적으로, Bob의 제2 양자 정보는 국지적 파울리 x 연산자(810)을 통해 앤실라 큐비트($|0\rangle_C$)와 얽힘을 형성할 수 있다.

수학식 17

$$|\psi_1\rangle_{ABC} = (\alpha|0\rangle_A + \beta|1\rangle_A)(\gamma|00\rangle_{BC} + \delta|11\rangle_{BC})$$

[0151]

[0152] 상기 수학식 17을 보면, Bob의 큐비트와 앤실라 큐비트는 얽혀 있고, Alice의 큐비트는 아직 얽히지 않은 것을 확인할

수 있다.

[0153] 이후, Alice와 Bob 사이에 CNOT 연산자(820, 830)를 수행하여 제1 양자 정보, 제2 양자 정보, 앤실라 큐비트가 모두 얽힌 상태에 있는 인코딩 상태(제3 양자 상태, $|\psi_3\rangle_{ABC}$)를 획득할 수 있다.

[0154] CNOT 연산자(820)는 Alice의 큐비트를 제어 큐비트로, Bob의 큐비트를 타겟 큐비트로 CNOT 연산을 수행하며, CNOT 연산자(830)은 Bob의 큐비트를 제어 큐비트로, Alice의 큐비트를 타겟 큐비트로 CNOT 연산을 수행할 수 있다.

수학식 18

$$\begin{aligned} |\psi_1\rangle_{ABC} \rightarrow |\psi_2\rangle_{ABC} &= \alpha\gamma|000\rangle_{ABC} + \alpha\delta|011\rangle_{ABC} + \beta\gamma|110\rangle_{ABC} + \beta\delta|101\rangle_{ABC} \\ &\rightarrow |\psi_3\rangle_{ABC} = \alpha\gamma|000\rangle_{ABC} + \alpha\delta|111\rangle_{ABC} + \beta\gamma|010\rangle_{ABC} + \beta\delta|101\rangle_{ABC} \\ &= \gamma|00\rangle_{AC}(\alpha|0\rangle_B + \beta|1\rangle_B) + \delta|11\rangle_{AC}(\alpha|1\rangle_B + \beta|0\rangle_B). \end{aligned}$$

[0155]

[0156] Bob은 제3 양자 상태(인코딩 상태)를 디코딩하여, 얽힘이 풀린 디코딩된 제2 양자 정보를 획득하기 위해 CNOT 게이트(840)를 수행할 수 있다. CNOT 게이트(840)를 수행한 제4 양자 상태는 수학식 19와 같다.

수학식 19

$$|\psi_3\rangle_{ABC} \rightarrow |\psi_4\rangle_{ABC} = (\gamma|00\rangle_{AC} + \delta|11\rangle_{AC})(\alpha|0\rangle_B + \beta|1\rangle_B)$$

[0157]

[0158] CZ 게이트(850)는 앤실라 큐비트를 제어 큐비트로, 상기 제1 양자 정보를 타겟 큐비트로 파울리 z 연산을 수행하여, 얽힌 상태가 풀린 디코딩된 제1 양자 정보를 획득할 수 있다.

[0159] CZ 게이트(850)는 Alice와 Bob이 공유하는 양자 쌍의 얽힘을 풀기 위해, Bob은 하다마드 게이트(H)를 통과한 큐비트를 제어 큐비트로, Alice의 큐비트를 타겟 큐비트로 파울리 z 연산자(850)를 수행할 수 있다.

[0160] 최종적으로 Alice와 Bob은 수학식 20의 제5 양자 상태($|\psi_5\rangle_{AB}$)를 가질 수 있다. 양자 통신 시스템은 디코딩된 제1 양자 정보로부터 제2 양자 정보를 획득하고, 디코딩된 제2 양자 정보로부터 제1 양자 정보를 획득할 수 있다.

수학식 20

$$|\psi_4\rangle_{ABC} \rightarrow |\psi_5\rangle_{AB} = (\gamma|0\rangle_A + \delta|1\rangle_A)(\alpha|0\rangle_B + \beta|1\rangle_B)$$

[0161]

[0162] 구체적으로, 수학식 20에서 Alice의 양자 상태는 0이 γ 의 확률로, 1이 δ 의 확률로 존재할 수 있다. 또한, Bob의 양자 상태는 0이 α 의 확률로, 1이 β 의 확률로 존재할 수 있다. α , β , γ , δ 는 각 사용자(Alice, Bob)이 전송한 양자 정보의 확률 변수일 수 있다.

[0163] 수학식 20을 Alice와 Bob이 상대방에게 전송한 제1 양자 상태(수학식 16)와 비교할 수 있다. α , β 는 Alice가 Bob에게 전송한 정보에서 0과 1이 각각 존재할 확률을 의미할 수 있다. 즉, Alice가 Bob에게 전송하는 양자 정보는 α , β 일 수 있다. γ , δ 는 Bob이 Alice에게 전송한 정보에서 0과 1이 각각 존재할 확률을 의미할

수 있다. 즉, Bob이 Alice에게 전송하는 양자 정보는 γ , δ 일 수 있다.

[0164] 양자 통신 시스템을 통해 출력된 제5 양자 상태에서부터, Alice는 γ , δ 의 확률을 획득하고, Bob은 α , β 의 확률을 획득할 수 있다. 따라서, 도 10의 양자 통신 시스템을 통과한 Alice와 Bob의 정보는 교환될 수 있다.

[0165] 도 11은 본 발명의 실시 예에 따른 DDQ 게이트를 설명하기 위한 도면이다.

[0166] 도 11을 참조하면, DDQ 게이트(900)는 흡수성 물체(901, 902), QZ 게이트(912, 913) 및 빔 스플리터(903, 904, 905, 906)를 포함할 수 있다. DQZ 게이트(910)는 QZ 게이트(912, 913), 빔 스플리터(903, 911)를 포함할 수 있다.

[0167] 본 발명의 실시 예에 따른 양자 정보를 전달하기 위한 양자 통신 시스템은, 도 10에서 전술한 이중 DNOT 게이트를 포함할 수 있다. 이중 DNOT 게이트는 하나 또는 그 이상의 DDQ 게이트로 구성될 수 있으므로, DDQ 게이트를 통해 이중 DNOT 게이트의 동작이 이해될 수 있다.

[0168] 도 11을 참조하면, 서로 다른 스핀 방향을 가지는 전자를 흡수성 물체(901, 902)로 사용할 수 있다. 전자는 $|\uparrow\rangle_e$ 와 $|\downarrow\rangle_e$ 의 스핀 방향을 가질 수 있다.

[0169] 각각의 스핀 방향은 α 및 β 의 확률로 중첩되어 존재할 수 있다. 각 확률은 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ 의 관계를 만족하고, 이러한 전자의 상태는 아래의 수학식 21과 같이 표현될 수 있다.

수학식 21

[0170]
$$|\text{electron}\rangle_e = \alpha |\uparrow\rangle_e + \beta |\downarrow\rangle_e$$

[0171] 전자의 상태가 $|\uparrow\rangle_e$ 이면 흡수성 물체가 존재하고, $|\downarrow\rangle_e$ 이면 흡수성 물체가 존재하지 않는다고 판단될 수 있다. 반대로, 전자의 상태가 $|\uparrow\rangle_e$ 이면 흡수성 물체가 존재하지 않고, $|\downarrow\rangle_e$ 이면 흡수성 물체가 존재한다고 판단될 수도 있다.

[0172] 도 11의 DQZ 게이트 및 DDQ 게이트의 동작은 도 7의 DQ 게이트의 동작과 유사할 수 있다. 다만, 도 11의 실시 예에서는, 빔 스플리터(911)를 통과한 앤실라 상태 $|0\rangle_a$ 또는 $|1\rangle_a$ 와 광자가 $|\text{photon}\rangle_{pa} = \gamma |H0\rangle_{pa} + \delta |V1\rangle_{pa}$ 로 얽힘을 형성한다는 점에서 차이가 있다.

[0173] DQZ 게이트(910) 및 DDQ 게이트(900)를 통과한 양자는 제1 양자 상태($|\phi_1\rangle_{epa}$)를 거쳐 제2 양자 상태($|\phi_2\rangle_{epa}$)로 출력될 수 있다. 제1 양자 상태 및 제2 양자 상태는 수학식 22로 표현될 수 있다.

수학식 22

[0174]
$$\begin{aligned} |\phi_0\rangle_{epa} &\rightarrow |\phi_1\rangle_{epa} = \alpha\gamma |\uparrow H0\rangle_{epa} + \beta\gamma |\downarrow V0\rangle_{epa} + \alpha\delta |\uparrow H1\rangle_{epa} + \beta\delta |\downarrow V1\rangle_{epa} \\ &\rightarrow |\phi_2\rangle_{epa} = \gamma |\uparrow H0\rangle_{epa} + \delta |\downarrow V1\rangle_{epa} \end{aligned}$$

[0175] 도 11의 양자 회로에 도시된 제1 양자 상태, 제2 양자 상태는 도 10의 양자 회로의 제1 양자 상태, 제2 양자 상태에 각각 대응될 수 있다.

- [0176] 흡수성 물체(901, 902)를 통해 반사실성을 가지지 않는 광자는 전자에 의해 흡수되거나 폐기될 수 있다. 따라서, 양자 통신 시스템은 반사실성을 가지도록 제어될 수 있다.
- [0177] 도 12는 도 10의 양자 이중 코딩을 상세하게 설명하기 위한 도면이다.
- [0178] 도 12를 참조하면, 본 발명의 실시 예에 따른 이중 DNOT 게이트(1000)는 DCQZ 게이트(1010), 하나 또는 그 이상의 DDQ 게이트(1020-1, 1020-2, 1020-K), 복수의 빔 스플리터(PBS) 및 흡수성 물체(QA0-II)를 포함할 수 있다.
- [0179] Alice는 중첩 상태의 전자를, Bob은 광자를 사용하여 양자 정보를 전송할 수 있다. Alice은 흡수성 물체인 전자를, Bob은 DCQZ 게이트(1010)를 통해 양자 통신 시스템이 반사실성을 갖도록 제어할 수 있다. Alice의 전자와 Bob의 광자는 사전에 얽히지 않은 양자 쌍일 수 있다.
- [0180] DCQZ 게이트(1010)를 통과한 후, Alice의 전자와 Bob의 광자는 서로 얽힘 상태에 있을 수 있다.
- [0181] 도 12의 제1 양자 상태 내지 제3 양자 상태는 각각 도 10의 제1 양자 상태 내지 제3 양자 상태에 대응될 수 있다. 따라서, 각 양자 상태는 전술한 수학적 식 18로 표현될 수 있다.
- [0182] 이중 DNOT 게이트(1000)는 하나 또는 그 이상의 DDQ 게이트(1020-1, 1020-2, 1020-K)를 포함할 수 있다.
- [0183] 복수 개의 DDQ 게이트를 통해 이중 DNOT 게이트(1000)의 반사실성을 높일 수 있다. 또한, 원하는 회전각을 얻기 위해 하나의 DDQ 게이트를 사용하면 광자가 전자에 의해 지나치게 많이 흡수될 수 있다. 따라서, 복수 개의 DDQ 게이트를 사용하여 원하는 회전각을 얻음으로써 광자가 전자에 의해 지나치게 흡수되는 것을 막을 수 있다.
- [0184] DDQ 게이트1(1020)을 통과한 양자 상태 $|\psi_{21}\rangle_{ABC}$ 는 아래 수학적 식 23일 수 있다.

수학적 식 23

$$\begin{aligned} |\psi_{21}\rangle_{ABC} = & \alpha\gamma|000\rangle_{ABC} + \beta\delta|111\rangle_{ABC} \\ & + \beta\gamma(\sin\theta_K|012\rangle_{ABC} - \cos\theta_K|112\rangle_{ABC}) \\ & + \alpha\delta(\cos\theta_K|013\rangle_{ABC} + \sin\theta_K|113\rangle_{ABC}) \end{aligned}$$

[0185]

- [0186] K 개의 DDQ 게이트(1020-1, 1020-2, 1020-K)를 통과한 양자 상태 $|\psi_{2K}\rangle_{ABC}$ 는 아래 수학적 식 24일 수 있다.

수학적 식 24

$$|\psi_{2K}\rangle_{ABC} = \alpha\gamma|000\rangle_{ABC} + \beta\delta|111\rangle_{ABC} + \beta\gamma|012\rangle_{ABC} + \alpha\delta|113\rangle_{ABC}$$

[0187]

- [0188] 수학적 식 24의 양자 상태는 도 10의 제2 양자 상태와 동일할 수 있다.
- [0189] 이후 도 10에 대한 설명에서 전술한 과정을 통해 Alice와 Bob의 양자 정보가 상대방에게 전송될 수 있다.
- [0190] 구체적으로, 각 사용자가 전송한 양자 정보와 양자 정보의 특정 방향 성분인 엔실라 큐비트를 얽힘 상태로 인코딩한 양자 상태에서부터, CNOT 게이트와 CZ 게이트를 통해 디코딩된 양자 상태를 획득하고, 디코딩된 양자 상태를 기초로 상대방이 전송한 상기 양자 정보를 획득할 수 있다.
- [0191] 도 13은 양자 정보에 대한 양자 이중 코딩에서 양자 정보의 전송 효율을, 도 14는 사이클 횟수 N 및 M에 따른 양자 용량(Quantum capacity)을 도시한 것이다.
- [0192] 도 15는 본 발명의 실시 예에 따른 양자 통신 시스템의 고전 정보의 전송을 설명하기 위한 순서도이다.
- [0193] 도 15를 참조하면, S1501 단계에서, Alice와 Bob은 DNOT 게이트에 광자 및 전자를 제공할 수 있다. Alice는 전자를, Bob은 광자를 제공할 수 있으나, 반대로 Alice는 광자를, Bob은 전자를 제공할 수도 있다.

- [0194] S1503 단계에서, DNOT 게이트에 입력된 광자는 빔 스플리터에 의해 H 성분과 V 성분으로 분광될 수 있다. H 성분은 Horizontal의 약자로 수평 방향을, V 성분은 Vertical의 약자로 수직 방향을 의미할 수 있다. 다만, 실시예에 따라 기준은 절대적이 않을 수 있으며, H 성분이 수직 방향을, V 성분이 수평 방향을 의미할 수도 있다.
- [0195] S1505 단계에서, 전자는 편광 회전자에서 일정한 회전각 만큼 회전될 수 있다. S1507 단계에서, 양자 통신 시스템은 적어도 하나 이상의 DQ 게이트를 통해 반사실성을 가지는 광자를 획득할 수 있다. 이때, 전자는 반사실성을 가지지 않는 광자를 흡수하는 흡수성 물체로 동작할 수 있다.
- [0196] S1509 단계에서, 양자 통신 시스템은 DNOT 게이트를 통과한 광자에 하다마드 게이트를 연산하고, 결과값으로부터 상대방이 전송한 고전 정보를 획득할 수 있다.
- [0197] 도 16은 본 발명의 실시예에 따른 양자 통신 시스템의 양자 정보의 전송을 설명하기 위한 순서도이다.
- [0198] 도 16을 참조하면, S1601 단계에서 양자 통신 시스템은 Bob의 제2 양자 정보와, 제2 양자 정보로부터 획득한 엔실라 큐비트를 국지적 CNOT 연산자를 통해 얽힘 상태로 생성할 수 있다.
- [0199] S1603 단계에서, 양자 통신 시스템은 Alice의 제1 양자 정보에 대해 CNOT 연산자를 수행하여, 제1 양자 정보, 제2 양자 정보 및 엔실라 큐비트가 얽힌 상태인 인코딩 상태를 생성할 수 있다.
- [0200] S1605 단계에서, 인코딩 상태는 CNOT 게이트를 통해 디코딩 되고, 양자 통신 시스템은 디코딩된 제2 양자 정보를 획득할 수 있다. 또한, S1607 단계에서, 양자 통신 시스템은 CZ 게이트를 통해, 엔실라 큐비트를 제어 큐비트로, 상기 제1 양자 정보를 타겟 큐비트로 파울리 z 연산을 수행하여 디코딩된 제1 양자 정보를 획득할 수 있다.
- [0201] 디코딩된 제1 양자 정보는 제2 양자 정보에 관한 정보를, 디코딩된 제2 양자 정보는 제1 양자 정보에 관한 정보를 포함할 수 있다. 따라서, S1609 단계에서, 양자 통신 시스템은 디코딩된 제1 양자 정보와 디코딩된 제2 양자 정보로부터 상대방이 전송한 양자 정보를 획득할 수 있다.
- [0202] 상술한 실시예에 따른 반사실적 양자 이중 코딩 분석 방법은, 회로 등을 이용하여 구현될 수도 있으나, 컴퓨터 장치에 의해 구동될 수 있는 프로그램의 형태로 구현되는 것도 가능하다. 여기서 프로그램은, 프로그램 명령, 데이터 파일 및 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 프로그램은 기계어 코드나 고급 언어 코드를 이용하여 설계 및 제작된 것일 수 있다. 프로그램은 상술한 방법을 구현하기 위하여 특별히 설계된 것일 수도 있고, 컴퓨터 소프트웨어 분야에서 통상의 기술자에게 기 공지되어 사용 가능한 각종 함수나 정의를 이용하여 구현된 것일 수도 있다. 또한, 여기서, 컴퓨터 장치는, 프로그램의 기능을 실현 가능하게 하는 프로세서나 메모리 등을 포함하여 구현된 것일 수 있으며, 필요에 따라 통신 장치를 더 포함할 수도 있다.
- [0203] 상술한 반사실적 양자 벨 상태 분석 방법을 구현하기 위한 프로그램은, 컴퓨터에 의해 관독 가능한 기록 매체에 기록될 수 있다. 컴퓨터에 의해 관독 가능한 기록 매체는, 예를 들어, 하드 디스크나 플로피 디스크와 같은 자기 디스크 저장 매체, 자기 테이프, 콤팩트 디스크나 디브이디와 같은 광 기록 매체, 플롭티컬 디스크와 같은 자기-광 기록 매체 및 롬, 램 또는 플래시 메모리 등과 같은 반도체 저장 장치 등 컴퓨터 등의 호출에 따라 실행되는 특정 프로그램을 저장 가능한 다양한 종류의 하드웨어 장치를 포함할 수 있다.
- [0204] 이상 반사실적 양자 이중 코딩 방법, 장치 및 시스템의 실시예에 대해 설명하였으나, 반사실적 양자 이중 코딩 방법, 장치 및 시스템은 오직 상술한 실시예에 한정되는 것은 아니다. 해당 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 상술한 실시예를 기초로 수정 및 변형하여 구현 가능한 다양한 장치나 방법 역시 상술한 반사실적 양자 벨 상태 분석 방법, 장치 및 시스템의 일례가 될 수 있다. 예를 들어, 설명된 기술들이 설명된 방법과 다른 순서로 수행되거나, 및/또는 설명된 시스템, 구조, 장치, 회로 등의 구성 요소들이 설명된 방법과 다른 형태로 결합 또는 조합되거나 다른 구성 요소 또는 균등물에 의하여 대치되거나 또는 치환되더라도 상술한 반사실적 양자 이중 코딩 방법, 장치 및 시스템의 일 실시예가 될 수 있다.

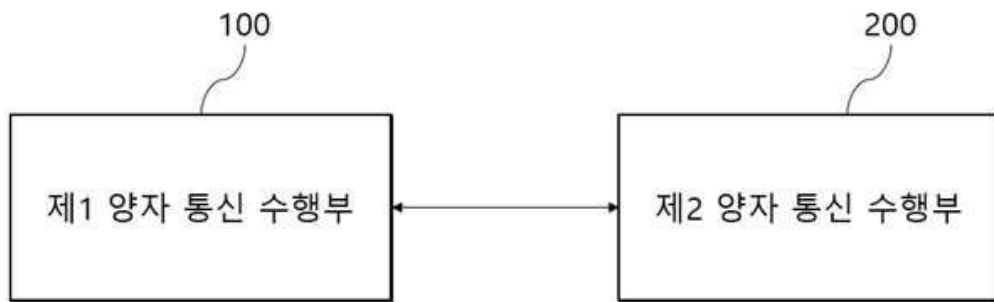
부호의 설명

- [0206] 100: 제1 양자 통신 수행부
200: 제2 양자 통신 수행부
300: QZ 게이트

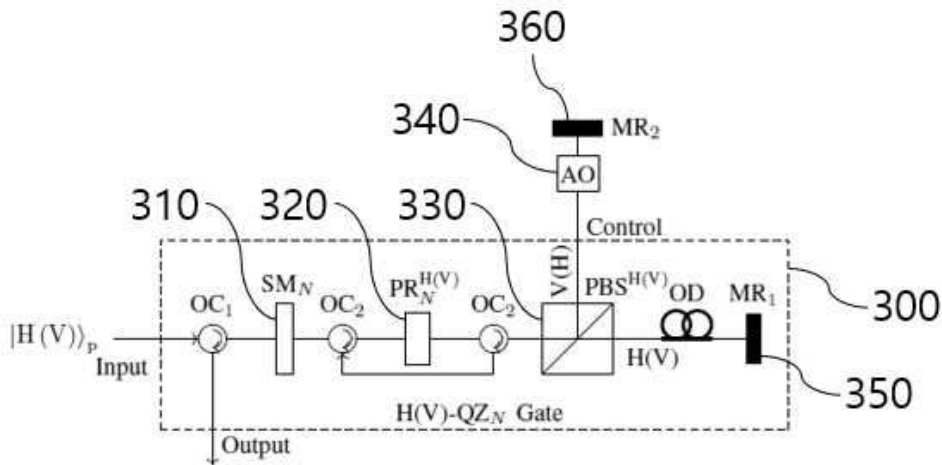
- 400: CQZ 게이트
- 600: DQ 게이트
- 700: DNOT 게이트
- 800: 이중 DNOT 게이트
- 900: DDQ 게이트

도면

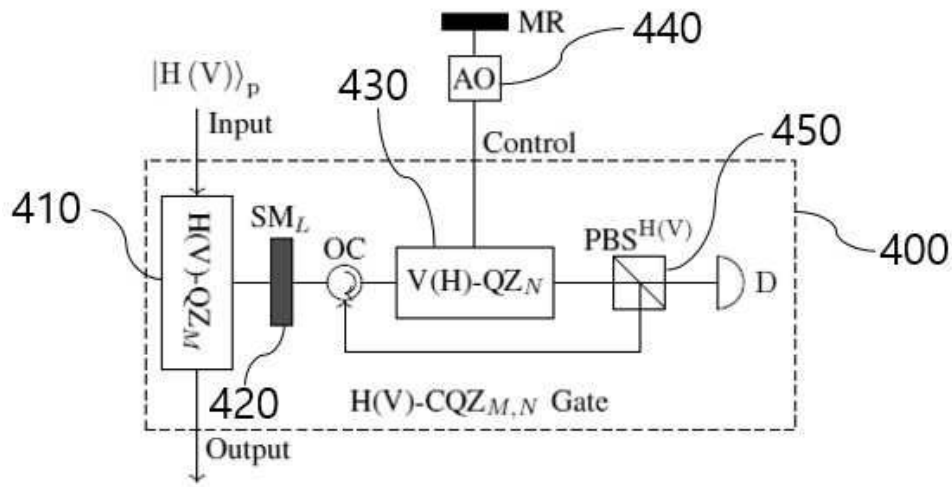
도면1



도면2



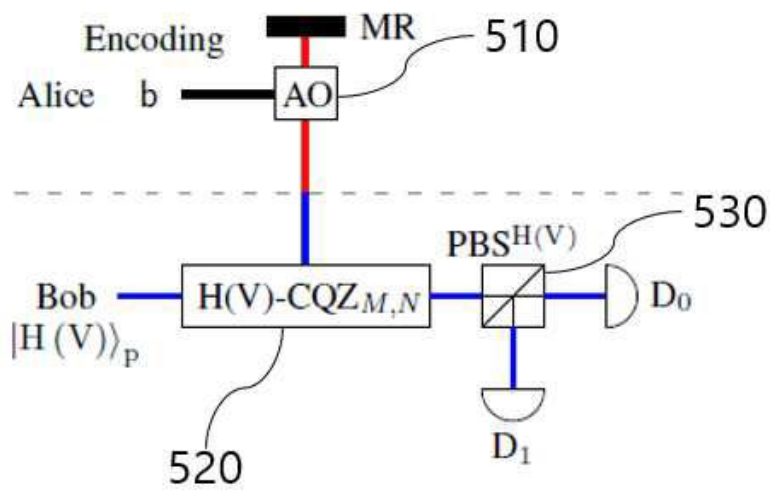
도면3



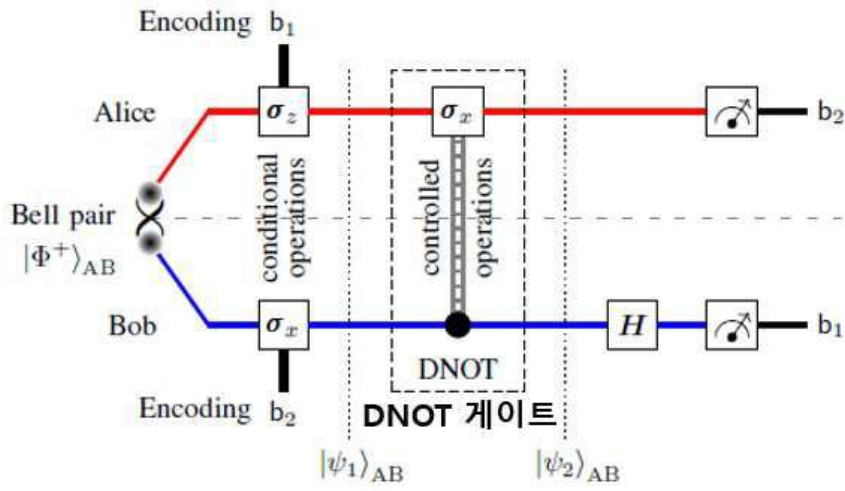
도면4

Input	Control	QZ Gate			CQZ Gate		
		Output	Probability	Counterfactuality	Output	Probability	Counterfactuality
$ H(V)\rangle_p$	$ 0\rangle_{AO}$	$ V(H)\rangle_p$	1	No	$ H(V)\rangle_p$	λ_0	Yes
	$ 1\rangle_{AO}$	$ H(V)\rangle_p$	$\cos^2 \theta_N$	Yes	$ V(H)\rangle_p$	λ_1	Yes

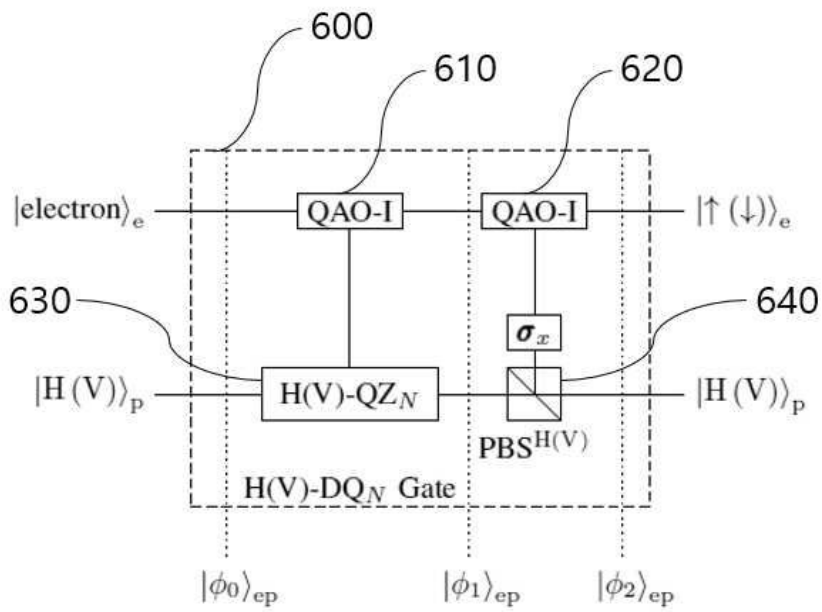
도면5



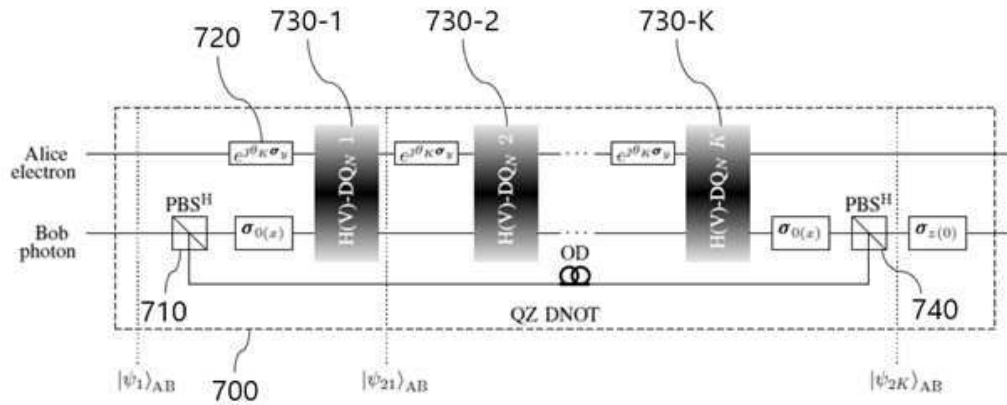
도면6



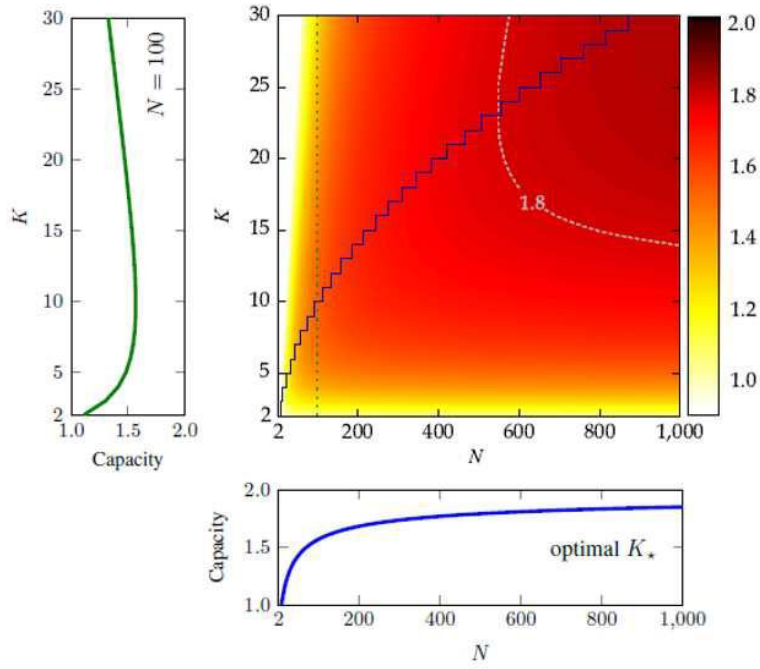
도면7



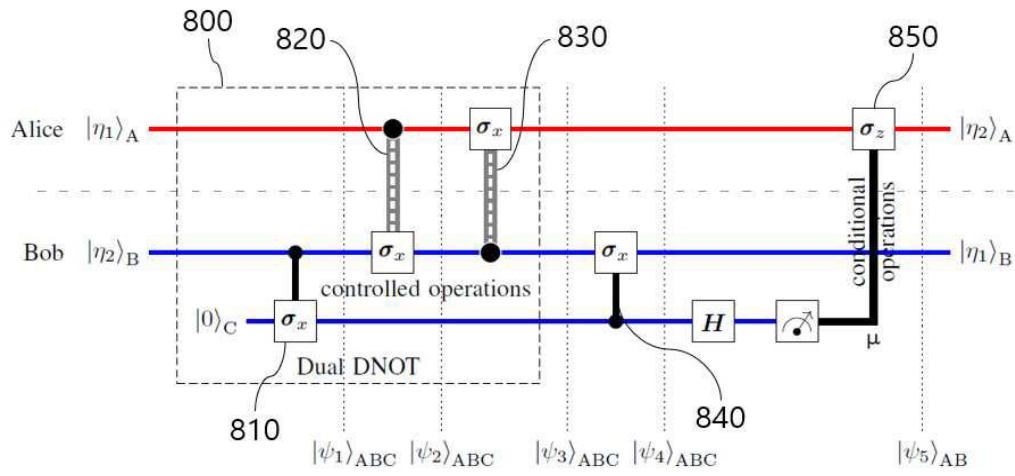
도면8



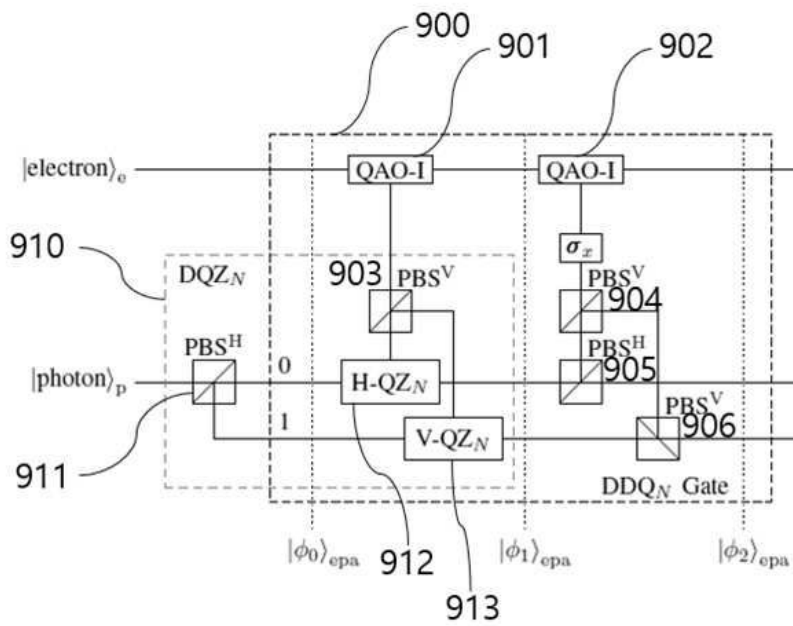
도면9



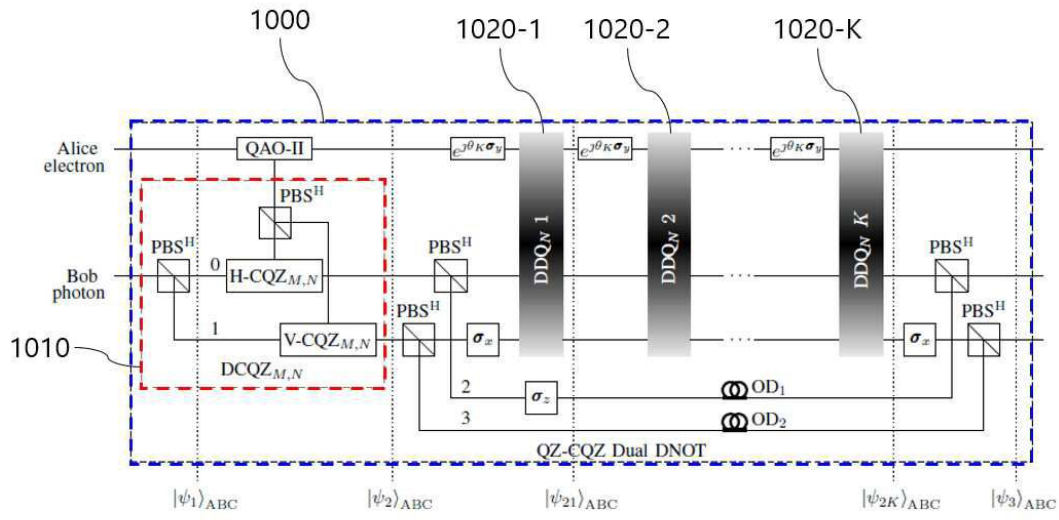
도면10



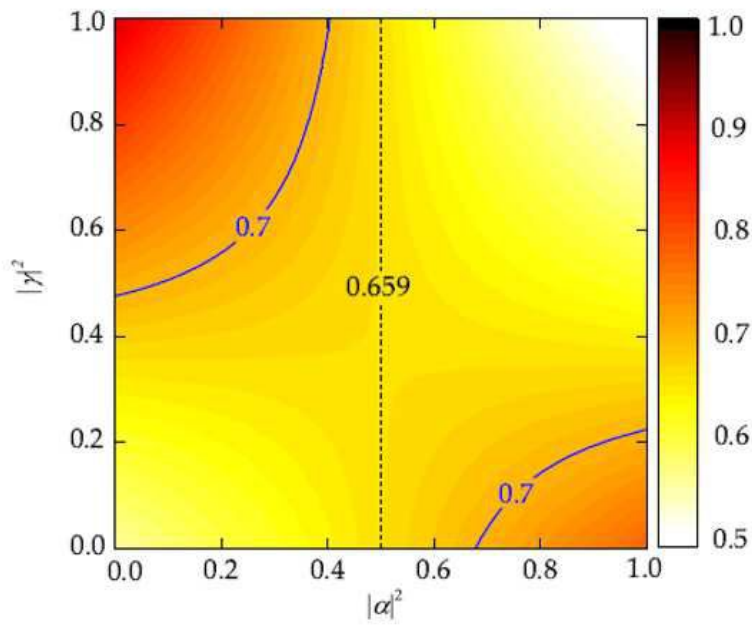
도면11



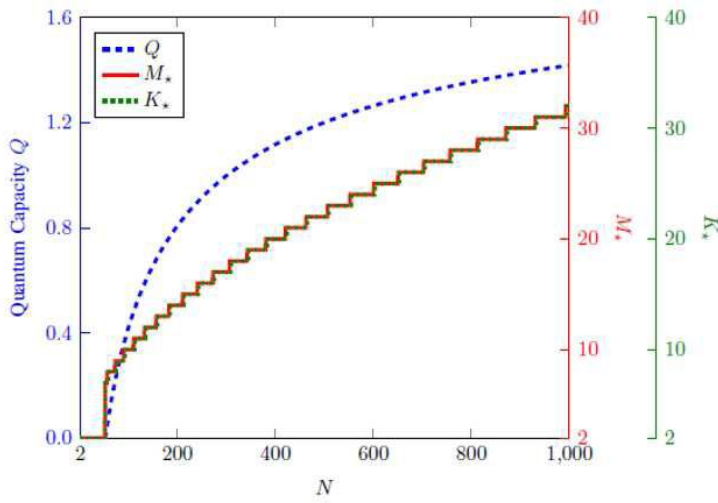
도면12



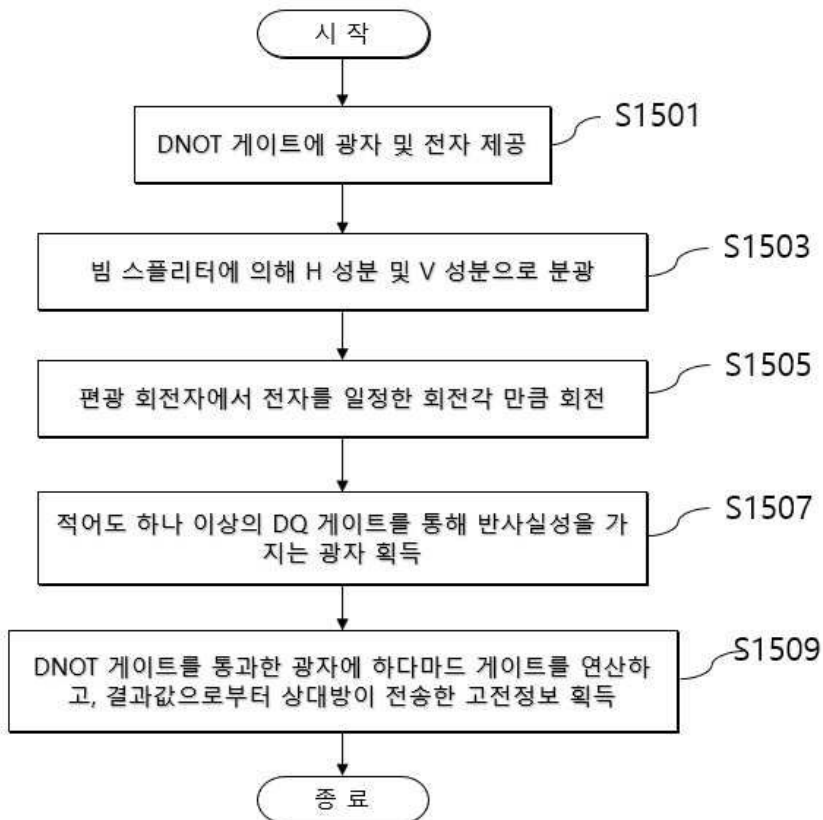
도면13



도면14



도면15



도면16

