

광자의 편광 큐비트와 경로 큐비트 기반 2-광자 4-큐비트 얽힘상태 생성

Two-Photon Four-Qubit Entangled State Based on Photonic Polarization and Path Qubits

박희수, 조재윤*, 이재용, 이동훈, 최상경
한국표준과학연구원, *University College London
hspark@kriss.re.kr

광자를 기반으로 한 양자정보기술의 핵심 중 하나는 다중 광자 또는 다중 큐비트 간의 양자역학적 얽힘상태를 구현하는 일이다. 광자는 큐비트를 구현할 수 있는 여러 물리계 중 결맞음을 없애는 내부 잡음 요인이 비교적 적다는 장점을 갖고 있으나, 현실적으로 광자 생성장치들의 낮은 효율 때문에 많은 수의 광자로 이루어진 얽힘상태를 만들기 어렵다는 단점도 갖고 있다⁽¹⁾. 이러한 낮은 효율의 문제를 극복하고자 하는 노력 중 하나로서 하나의 광자에 둘 이상의 큐비트를 저장하는 방법이 제안되었으며⁽²⁾, 광자의 편광과 경로에 각각 하나씩의 큐비트를 저장한 2-광자 4-큐비트 (2P4Q) 얽힘상태가 구현되어 발표된 바 있다⁽³⁾. 본 연구 그룹에서는 기존의 2P4Q 상태 생성방법보다 잠재적 자원 효율성이 좋은 새로운 방법을 제안 및 구현하여 최근 발표하였다⁽⁴⁾. 구체적으로, 기존의 방법은 초얽힘 (hyperentanglement) 광원을 바탕으로 함으로써 두 개의 편광얽힘 광자쌍 생성기를 필요로 했으나 본 연구에서 제안한 방법은 하나의 광자쌍 생성기만을 필요로 한다.

그림 1(a)은 본 연구의 2P4Q 얽힘상태 생성장치의 개념도이다. 제 1종 (type-I) 자발매개하향변환 (spontaneous parametric down-conversion; SPDC) 과정을 통해 3°의 발산각을 갖고 발생하는 얽힘상태 (벨 상태) 광자쌍은 그림처럼 각 광자의 경로 상에 놓여진 편광빔분할기(PBS), 빔분할기(BS), 반파장판 (HWP)을 지나는데, 편광 측정을 위한 좌표축을 -45°만큼 회전시키고, 수평편광과 광경로 a, c 상태를 큐비트 $|0\rangle$ 으로, 수직편광과 광경로 b, d 에 큐비트 $|1\rangle$ 을 대응시키면 위의 상태는 다음의 4 큐비트 상태로 표현할 수 있다.

$$|\Psi\rangle = 1/2(|+,0,+,0\rangle + |+,0,-,1\rangle + |-1,-,0\rangle + |-1,+,1\rangle)$$

여기에서 앞과 뒤의 두 큐비트는 각각 광자 1과 광자 2의 편광 및 경로 큐비트이고, $|\pm\rangle$ 상태는 $1/2^{1/2}(|0\rangle \pm |1\rangle)$ 상태이다. 위의 상태는 4-큐비트 선형 클러스터 상태로 지칭되는데, 그림 1(b)에 나타낸 바와 같이 4개의 큐비트를 $|+\rangle$ 상태로 초기화 한 후에 이웃한 큐비트들 사이에 얽힘 게이트인 controlled-Z 게이트들을 한번씩 적용했을 때 얻어지는 상태로써 단방향 양자연산의 중요한 자원이다.

실험적으로 구현된 4-큐비트 상태의 특성을 측정하기 위해 각 큐비트에 대한 투영측정(projection measurement)들로 이루어진 얽힘지수(entanglement witness)⁽⁵⁾를 측정했다. 얽힘지수는 이상적인 상태의 경우 -1의 값을 갖고, 음수인 값을 갖는 경우 두 상태의 텐서 곱셈으로 표현할 수 없는 (non-biseparable) 4-큐비트 순수얽힘(genuine entanglement)을 갖고 있음을 증명하는 척도이다. 이를 위해 편광 큐비트의 상태는 파장판과 편광기를 이용하여 투영하였고, 경로 큐비트의 상태는 두 경로의

위상과 상대적인 투과율을 조절한 후 BS로 결합하는 방법으로 투영하였다. 광자들은 파장폭 10 nm인 파장필터를 통과한 후, 단일모드 광섬유로 연결된 광자검출기 및 동시계수장치로 측정된다. 그림 2는 투영측정들의 실험결과이다. 이를 이용해 측정된 얽힘지수의 값은 -0.44 ± 0.04 로써 순수얽힘을 증명하기에 충분했으며, 이상적인 상태에 대한 충실도(fidelity)는 0.72 이상이었다.

1. P. Kok *et al.*, "Linear optical quantum computing with photonic qubits," Rev. Mod. Phys. 79, 135-174 (2007).
2. Y.-H. Kim, "Single-photon two-qubit entangled states: Preparation and measurement," Phys. Rev. A 67, 040301(R) (2003).
3. G. Vallone *et al.*, "Realization and characterization of a two-photon four-qubit linear cluster state," Phys. Rev. Lett. 98, 180502 (2007).
4. H. S. Park *et al.*, "Two-photon four-qubit cluster state generation based on a polarization-entangled photon pair," Opt. Exp. 15, 17960-17966 (2007).
5. G. Tóth *et al.*, "Entanglement detection in the stabilizer formalism," Phys. Rev. A 72, 022340 (2005).

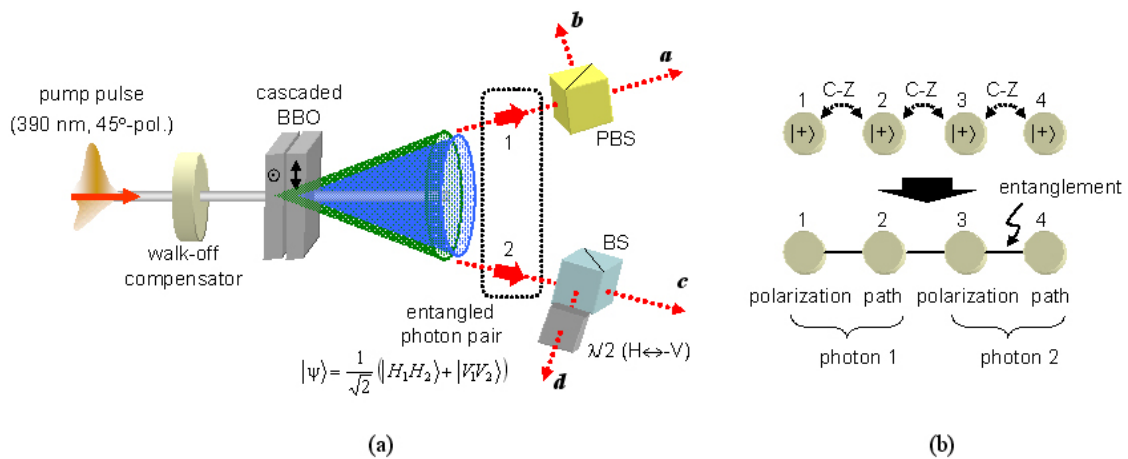


그림 1 2-광자 4-큐비트 얽힘상태. (a) 생성 원리, (b) 얽힘상태 구조.

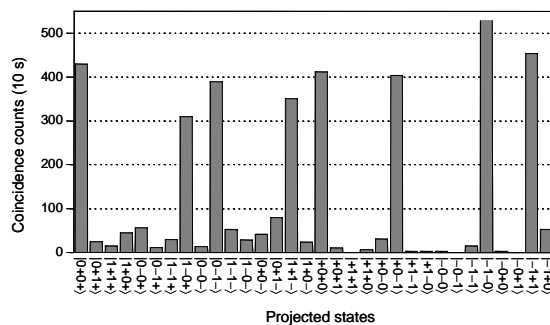


그림 2 생성된 4-큐비트 얽힘상태의 투영측정 결과.