

# 제1종 자발매개하향변환을 이용한 펄스형 편광 얽힘 광자쌍

## Pulsed polarization-entangled photon pairs based on type-I spontaneous parametric down-conversion

박희수, 최상경, 조재윤, 강명수, 이재용, 이동훈\*

한국표준과학연구원 전략기술연구부, \*한국표준과학연구원 기반표준부

hspark@kriss.re.kr

광자의 얽힘 상태(entangled state)는 광자기반 양자정보 기술의 가장 기본적인 요소이다. 한 개의 광자가 갖는 편광, 공간모드 등의 물리량에 대해서 두 개의 수직한 양자상태를  $|0\rangle$ 과  $|1\rangle$  상태로 정했을 때, 두 광자의 얽힘은 다음의 벨 상태로써 표현된다.

$$|\Phi_{12}^{(\pm)}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_1 0_2\rangle \pm |1_1 1_2\rangle), \quad |\Psi_{12}^{(\pm)}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_1 1_2\rangle \pm |1_0 2\rangle).$$

대부분의 광자기반 양자정보 실험은 광자의 편광을 통하여  $|0\rangle$ 과  $|1\rangle$  상태를 나타내는데, 가령 수평 편광 상태를  $|0\rangle$ 으로 정하면 수직편광 상태는  $|1\rangle$ 이다. 실제로 벨 상태의 광자쌍을 생성하려면 위 식들의 우변에 나타나는 두 경우의 광자쌍 상태가 서로 완전한 비분별성(indistinguishability)을 갖도록 겹쳐진 광원을 제작해야하는데, 이는 자발매개하향변환(spontaneous parametric down-conversion: SPDC)에서 생기는 비고전적 양자상태를 이용하면 실현 가능하다<sup>(1)</sup>. SPDC의 제1종(type-I) 및 제2종(type-II) 위상정합 조건이나, 연속파 펌프 및 펄스 펌프를 이용하여 모두 얽힘 광원을 제작할 수 있으나, 본 연구에서는 펄스 펌프를 이용한 제1종 SPDC를 사용하였다. 이는 세 광자 이상의 양자간섭을 구현하기 위해서는 펄스 형태가 필수적이며, 제1종 방식이 제2종 방식에 비해 잠재적으로 더 높은 효율을 나타낼 수 있기 때문이다<sup>(2,3)</sup>. 본 논문은 광자기반 양자정보기술 개발의 일환으로 제작된 얽힘 광원을 소개하고, 얽힘 광원의 특성 평가 방법 및 결과에 대해 설명하고자 한다.

제작된 얽힘 광원의 구조는 그림 1과 같다. 그림에서, 두 개의 동일한 BBO 결정을 광축이 서로 수직하도록 접합하고 펌프 광원을 45°-선편광으로 입사하면, 편광상태가  $|H\rangle_1|H\rangle_2$  또는  $|V\rangle_1|V\rangle_2$ 인 광자쌍이 각각 50%의 확률로 생성된다. 이때 두 경우가 갖는 양자상태의 위상차에 의해  $|\Phi^{(+)}\rangle$  또는  $|\Phi^{(-)}\rangle$  상

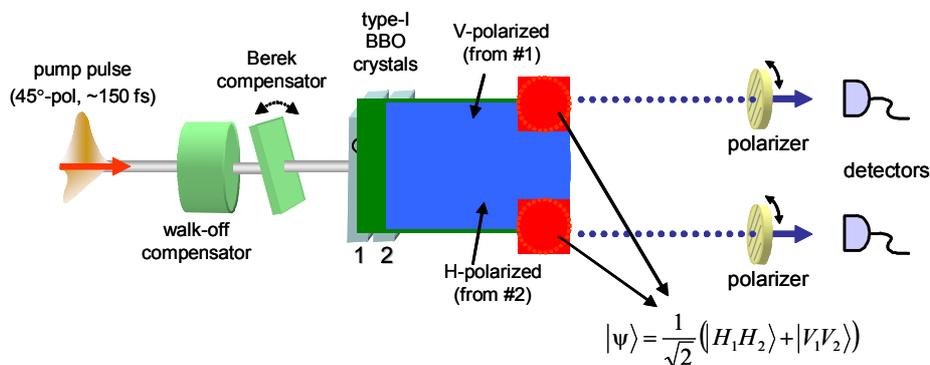


그림 1. Type-I SPDC를 이용한 얽힘 광원의 구조.

태가 되는데, 본 연구에서는 Berek 보상기의 복굴절 크기를 조절하여  $|\Phi^{(+)}\rangle$  상태를 생성했다. 그림에서 walk-off 보상기는 SPDC용 광결정의 복굴절에 의해서 두 경우의 광자쌍이 시간적으로 분리되는 효과를 보상하는 역할을 한다. 펌프 광원은 중심파장 780 nm, 펄스폭 150 fs인 Ti:sapphire 레이저의 출력을 이차조화파 발생기를 통하여 390 nm의 펄스로 변환한 것이며, 90 mW의 광출력을 갖는다. 두 개의 BBO 결정은 각각 두께 1 mm이며, 두 발산각을 일치시키기 위하여 펌프 광원의 진행 방향과 두 BBO 결정의 광축 사이의 각도를 각각 미세 조절할 수 있도록 하였다. 각 광자는 파장폭 10 nm인 파장필터를 통과한 후, 단일모드 광섬유로 연결된 광증배 다이오드(avalanche photodiode: APD) 및 TAC(time to amplitude converter)를 통해서 동시계수로써 측정되며, 그 크기는 약 50 counts/s였다.

광자쌍의 양자상태를 표현하는 방법인 밀도행렬(density matrix)을 구하기 위해서 양자상태 단층분석(quantum state tomography: QST) 및 최대가능성(maximum likelihood) 방법을 사용하였다<sup>(4)</sup>. 이는 각 광자계수기 앞단에 1/4-파장판과 1/2-파장판을 두어서 여러 편광 기준(basis) 하의 동시계수 값을 측정하고, 이 결과를 가장 잘 설명하는 밀도행렬을 수치해석적으로 구하는 방법이다. 밀도행렬의 실험값과 이상적인 값을 그림 2에 나타내었다. 두 행렬의 정량적인 비교를 위해 충실도를 계산하면 다음과 같으며, 이는 규격화 된 상태벡터의 내적을 밀도행렬로 확장한 개념으로 이해하면 된다.

$$F = \text{Tr} \left( \sqrt{\rho_{ideal}^{1/2} \rho_{exp} \rho_{ideal}^{1/2}} \right) \approx 0.894$$

또한 광자쌍의 비고전성을 직접적으로 검증하기 위해  $(-22.5^\circ, 22.5^\circ, 0^\circ, -45^\circ)$ 의 네 가지 선편광 성분 측정을 통한 CHSH 부등식 계수를 얻었으며, 그 결과는 2.22로써 비고전성을 검증하는 데는 충분했다<sup>(5)</sup>.

이와 같은 얽힘 광원을 다광자 얽힘 광원으로 확장하기 위해서는 광자쌍 생성효율의 향상이 필수적인데, 이 경우 향후 광자기반 양자정보기술 개발에 핵심요소로 유용하게 사용될 것으로 예상된다.

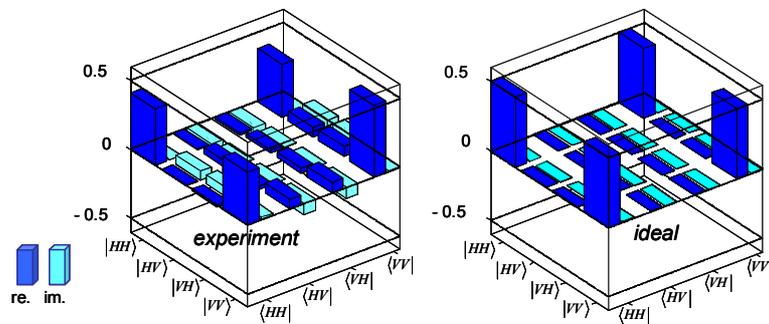


그림 2. 얽힘 광자쌍의 양자상태 밀도행렬.

1. Y. Shih, "Entangled biphoton source - property and preparation," Rep. Prog. Phys. 66, 1009-1044 (2003).
2. P. G. Kwiat *et al.*, "Ultrabright source of polarization-entangled photons," Phys. Rev. A 60, R773 (1999)
3. Y. Nambu *et al.*, "Generation of polarization-entangled photon pairs in a cascade of two type-I crystals pumped by femtosecond pulses," Phys. Rev. A 66, 033816 (2002).
4. D. F. V. James *et al.*, "Measurement of qubits," Phys. Rev. A 64, 052312 (2001).
5. J. F. Clauser *et al.*, "Proposed experiment to test local hidden-variable theories," Phys. Rev. Lett. 23, 880-884 (1969).