

이광자 사차원 양자 시스템의 생성과 측정에 관한 연구

Preparation and complete tomographic measurement of a biphoton ququart state

백소영*, S. S. Straupe**, S. P. Kulik**, 김윤호*

*포항공과대학교 물리학과, **Faculty of Physics, Moscow State University, Russia

simply@postech.ac.kr

D-차원의 양자 시스템(quDit)은 벨 부등식(Bell's inequality)과 같은 양자역학의 검증과 양자정보 응용에서 활용성이 높은 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 4차원 양자 시스템인 ququart의 다양한 양자상태(pure state, mixed state, and general ququart state)를 만들고 maximum likelihood method를 이용해 밀도행렬(density matrix) 함수를 재생해내는 single ququart tomography scheme에 대해 다루고자 한다.

사차원 양자 시스템은 collinear SPDC로부터 생산되는 nondegenerate biphoton polarization state를 이용해 구성할 수 있다⁽¹⁾.

$$\{|H_{\lambda_1}, H_{\lambda_2}\rangle, |H_{\lambda_1}, V_{\lambda_2}\rangle, |V_{\lambda_1}, H_{\lambda_2}\rangle, |V_{\lambda_1}, V_{\lambda_2}\rangle\} \equiv \{|0\rangle, |1\rangle, |2\rangle, |3\rangle\}. \quad \text{식(1)}$$

이 때 H, V 는 광자의 수평, 수직 편광을 λ_1, λ_2 는 광자의 서로 다른 파장을 의미하며 식(1)의 네 가지 광자쌍 상태를 이용해 single ququart를 표현하는 4차원 Hilbert Space를 구성할 수 있다. single ququart가 가질 수 있는 임의의 양자상태는 pure ($\rho_{pure} = |\Psi\rangle\langle\Psi|$), mixed ($\rho_{mixed} = \sum_i p_i |\Psi_i\rangle\langle\Psi_i|$), general ququart state등이 있고 이들의 밀도함수는 그림 1의 실험 장치를 통해 실험적으로 구현가능하다. 본 실험에서는 펄스초 펄스를 서로 수직인 광축을 가지고 나란히 놓인 type-I 또는 type-II BBO 에 입사시켜 다양한 ququart state를 만들어 낸다.

case I. Pure state

펌프의 편광이 수직 또는 수평이면 펌프와 나란한 광축을 가진 type-I 또는 type-II BBO 결정에 의해 ququart basis state $|H_{\lambda_1}, H_{\lambda_2}\rangle, |V_{\lambda_1}, V_{\lambda_2}\rangle, |H_{\lambda_1}, V_{\lambda_2}\rangle, |V_{\lambda_1}, H_{\lambda_2}\rangle$ 들 중 하나가 생성된다. 이러한 basis pure state는 반파장판 등을 이용한 SU(2) 변환을 통해 여러 다른 중첩 상태로 변환이 가능하다. 예를 들어 $|H_{\lambda_1}, H_{\lambda_2}\rangle$ ququart state가 반파장판을 통과하면 단광자의 편광은 수직, 수평 편광의 중첩 상태($|H\rangle \rightarrow \alpha|H\rangle + \beta|V\rangle$)가 되므로 광자쌍은 식(1)의 ququart basic state들의 중첩상태 $|\psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle + c_2|2\rangle + c_3|3\rangle$ 로 변환된다. 일반적으로 임의의 ququart state를 만들기 위해서는 $\chi^{(2)}$ 결정 네 개가 필요하지만 위의 변환을 이용하면 두 개의 결정만으로 응용성이 좋은 ququart state들을 쉽게 만들 수 있다.

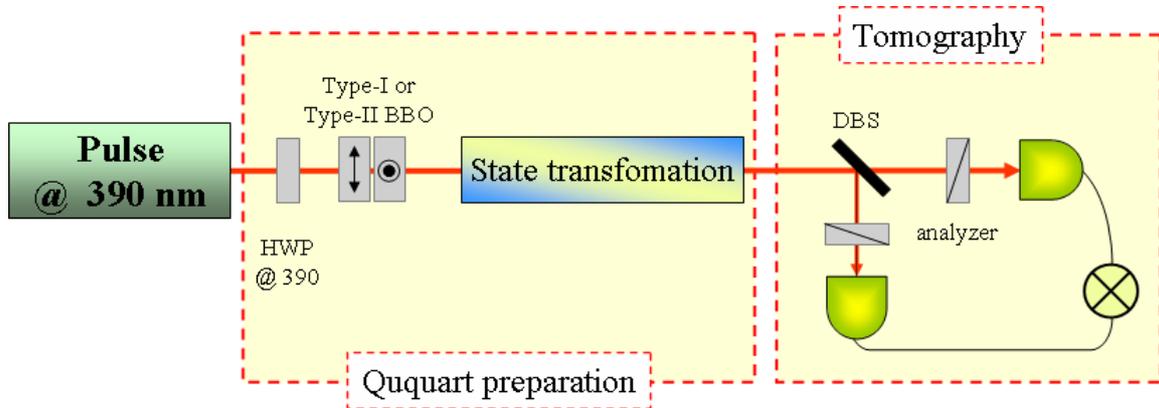


그림 1. Single ququart preparation and tomography

case II. Mixed state

펌프가 수직, 수평 외의 편광을 가지고 BBO 결정에 입사하면 두 개의 BBO가 독립적으로 단일 ququart state를 만들어 낸다. 그림1에서 type-I 결정을 나란히 놓을 경우, 입사광의 편광에 따라 $|H_{\lambda_1}, H_{\lambda_2}\rangle, |V_{\lambda_1}, V_{\lambda_2}\rangle$ ququart basis state가 일정 비율로 만들어지고 이들은 펌프 레이저의 군속도 분산에 의해 결어긋나게 되므로 mixed state 식(3)이 만들어진다.

$$\rho_{mixed} = (1 - \frac{\lambda}{2})|H_{\lambda_1}H_{\lambda_2}\rangle\langle H_{\lambda_1}H_{\lambda_2}| + \frac{\lambda}{2}|V_{\lambda_1}V_{\lambda_2}\rangle\langle V_{\lambda_1}V_{\lambda_2}| \quad (0 < \lambda \leq 1) \quad \text{식(2)}$$

Type-II SPDC의 경우, 다른 종류의 mixed state 생성이 가능하며, 모든 ququart basis state의 완전한 mixed state는 type-I, type-II를 동시에 필요로 한다.

case III. General state

식(2)로 준비된 mixed state가 SU(2) 변환과정을 거치면 pure와 mixed외의 일반적인 ququart state를 얻을 수 있다.

위의 과정으로 준비된 ququart state는 dichroic beamsplitter와 편광 분석기를 통해 projection measurement를 할 수 있다. 총 16개의 basis 조합에 대해 각각 동시계수 평균과 에러를 구하고 photonic tomography 방법 중 하나로 알려진 maximum likelihood method⁽²⁾ 이용해 밀도함수를 재생한다. 본 발표에서는 실험 데이터를 바탕으로 재생된 밀도함수 ρ_{exp} 와 상태 변환과정을 통해 얻어야 하는 이론적인 밀도 함수 ρ_{theory} 를 계산하여 생산된 ququart state들의 fidelity $F = (Tr \sqrt{\sqrt{\rho_{theory}} \rho_{exp} \sqrt{\rho_{theory}}})^2$ 를 구함으로써 single ququart state의 full tomography를 보여주도록 한다.

참고문헌

1. Y.I. Bogdanov *et al.*, Physical Review A 73, 063810 (2006).
2. D.F.V. James *et al.*, Physical Review A 64, 052312 (2001).