

# 양자얽힘 품질향상을 위한 가변 편광의존손실 소자 Tunable Polarization-Dependent Loss Element for Quantum Entanglement Distillation

박희수, 김현오, 최상경  
한국표준과학연구원  
hspark@kriss.re.kr

양자얽힘상태에 동반되는 잡음을 억제하고 얽힘상태의 품질을 높이는 얽힘정제(entanglement distillation) 기술은 양자정보기술의 실현을 도울 뿐만 아니라 기초양자이론의 실험적 연구를 위한 중요한 도구이다<sup>(1,2)</sup>. 제안된 얽힘정제 방법들 중 특히 국소필터(local filter)를 사용한 방법<sup>(2,3)</sup>은 광자에 기반한 양자상태에 비교적 쉽게 적용할 수 있는 장점을 갖는다. 여기에서 국소필터란 큐비트(qubit: quantum bit)의 특정 기저(basis)에 대해 임의의 손실을 유도하는 장치를 뜻하며, 광자의 편광을 양자비트로 사용하는 경우 편광 벡터와 손실 크기를 임의로 조절할 수 있는 가변 편광의존손실(PDL: polarization-dependent loss) 소자에 해당한다. 본 연구는 이러한 가변 편광의존손실 소자를 새롭게 제안 및 구현하고 얽힘정제에 적용하여 두 개의 광자로 이루어진 양자얽힘상태의 품질을 높일 수 있음을 보인다.

광자의 편광 큐비트를 위한 국소필터가 가져야 하는 두 가지 요건은, (1) 편광들 사이의 상대 위상 및 간섭성이 안정하게 유지되어야 하며 (2) PDL의 크기를 임의로 조절할 수 있어야 하는 점이다. 아직 이 두 가지 특성을 모두 만족하는 소자를 얽힘정제에 적용한 연구결과는 찾을 수 없었다. 예를 들어 입력 광자의 편광을 편광빔분할기로 나눈 후 하나의 경로에 회전 가능한 반파장판을 두고 다시 두 번째 편광빔분할기로 합치는 구조의 경우 두 편광 성분 사이의 위상을 안정하게 유지하기 어렵고, 흔히 쓰이는 구조인 편광에 따른 투과율 차이를 유도하는 기울어진 유리판의 경우, PDL의 가변 범위가 수 dB에 국한된다는 단점을 갖는다.

본 연구에서는 위의 요구조건을 만족하는 새로운 가변 편광의존손실 소자를 그림 1과 같이 제안하였다. 입력 광은 첫 번째 빔변위프리즘(BDP: beam displacing prism)을 지나면서 두 수직한 편광성분에 해당하는 두 평행 광으로 나뉘고,  $\lambda/2$ -파장판(HWP)을 지난 후 두 번째 BDP를 지나면서 다시 합쳐진다. 이때, 두 번째 BDP의 주축(principal axis)은 첫 번째 BDP의 주축과  $\theta$ 의 각도를 이루고, 가운데의 HWP의 주축은 첫 번째 BDP의 주

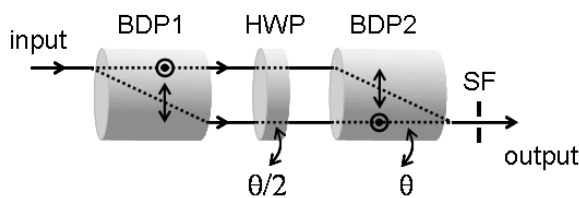


그림 1. 가변 편광의존손실 소자의 구조. BDP, beam displacing prism; HWP, half-wave plate; SF, spatial-mode filter.

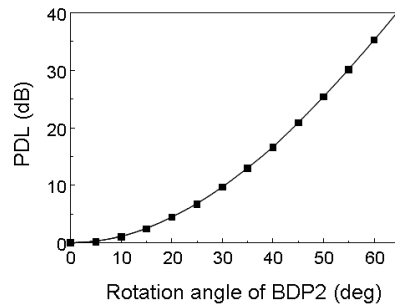


그림 2. 제작된 소자의 편광의존손실 특성

축과  $45^\circ + \theta/2$ 의 각도를 이룬다. HWP와 두 번째 BDP를 회전시켜  $\theta$ 를 조절하는 경우, 두 번째 BDP를 정상파동(ordinary wave)으로 진행하는 편광 성분은 변하지 않는 최종 광경로로 출력되지만 이상파동(extraordinary wave)로 진행하는 편광 성분은 각도에 따라 공간적으로 수평 이동된 광경로로 출력된다. 따라서, 그림처럼 공간 모드필터(spatial-mode filter)의 모드를 두 번째 BDP의 정상파동에 일치시키면, 두 번째 BDP의 이상파동 성분에만 각도에 의존하는 손실을 인가할 수 있다. 두 BDP가 동일한 경우 두 편광성분이 각각 지나는 두 개의 광경로가 같은 길이를 가지며 또한 같은 광소자를 지난다. 따라서 편광 사이의 간섭성이 유지되며 주변 진동에 의한 위상 불안정성이 작다.

그림 2는 제작된 소자의 편광의 손실을 각도  $\theta$ 를 변화시키면서 측정한 결과이다. 측정을 위해서 광원은 모드록킹 된 티타늄 사파이어 레이저(중심파장 780 nm, 반복률 76 MHz, 펄스폭 200 fs, 공간모드 반치폭 1.2 mm)를 사용하였고, 각 BDP는 방해석 재질로써 두께 28 mm, 파장 500 nm에서 비껴나감(walkoff) 각도  $5.5^\circ$ 를 갖는다. 공간모드필터로는 단일모드광섬유를 사용하였으며, 빛을 초점거리 11 mm인 비구면렌즈를 통해 광섬유로 집속하였다. 그림에 나타난 바와 같이 회전각도  $0^\circ$ 와  $60^\circ$  사이의 구간에서 0 dB로부터 35 dB에 이르는 PDL을 얻을 수 있었다.

가변 PDL 소자를 사용한 얽힘정제 장치의 구조는 그림 3과 같다. 각 국소필터는 가변 PDL 소자와 함께  $\lambda/4$ -파장판(QWP)과 HWP를 포함하는데, 이들 파장판은 필터의 편광 벡터를 결정하는 역할을 한다. 즉, 대상이 되는 편광을 BDP1의 보통파동으로 전환시킨다. 양자상태단층분석(quantum state tomography) 장치는 광자쌍의 양자상태를 동시계수에 기반하여 측정한다. 그림의 장치를 활용하여 얽힘척도인 동시성(concurrence)이  $0.61 \pm 0.01$ 인 광자쌍 상태를  $0.81 \pm 0.02$ 인 상태로 만들 수 있음을 확인하였다<sup>(4)</sup>. 동시성은 고전적인 상태들은 모두 0, 최대 얽힘상태는 1인 값을 갖는 척도이다. 얽힘정제 된 동시성은 초기 상태의 양자상태 밀도행렬로부터 도달할 수 있는 최대값을 이론적으로 계산한 값(0.79)와 부합한다.

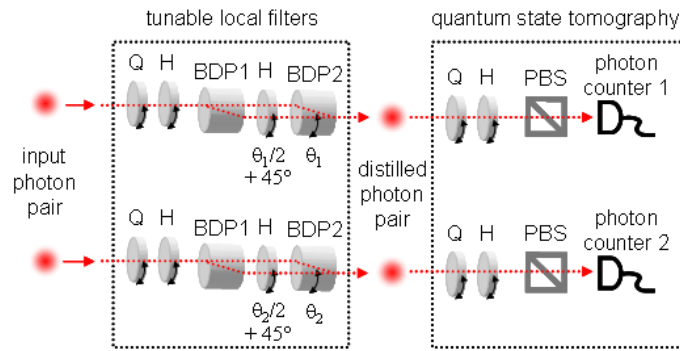


그림 3 얽힘정제장치 및 양자상태 측정장치의 구성도. Q/H, quarter/half-wave plate; BDP, beam displacing prism; PBS, polarization beam splitter.

1. R. Horodecki, P. Horodecki, M. Horodecki, and K. Horodecki, "Quantum entanglement," arXiv:quant-ph/072225v2 (2007).
2. P. G. Kwiat, S. Barraza-Lopez, A. Stefanov, and N. Gisin, "Experimental entanglement distillation and 'hidden' non-locality," Nature 409, 1014-1017 (2001).
3. F. Verstraete, J. Dehaene, and B. DeMoor, "Local filtering operations on two qubits," Phys. Rev. A 64, 010101(R) (2001).
4. H. S. Park, H. Kim, and S.-K. Choi, "Entanglement distillation of two-photon polarization qubits using tunable local filters," CLEO/IQEC 2009, submitted.