

Hong-Ou-Mandel 간섭계를 이용한 Bell 상태

권오성 · 김현오 · 박구동 · 김태수[†]

울산대학교 물리학과

☎ 680-749 울산시 남구 무거2동 산29번지

(2006년 10월 13일 받음, 2007년 1월 9일 수정본 받음)

제 1형의 매개하향변환에서 발생하는 광자쌍과 Hong-Ou-Mandel 간섭계를 이용하여 편광-얽힘 상태의 광자쌍을 선택적으로 발생시키고, 반파장판과 4분파장판을 조합하여 4개의 Bell 상태 $|\Psi^\pm\rangle$, $|\Phi^\pm\rangle$ 를 구현하였다. 동시계수 측정에 의한 각 상태의 평균 선명도는 77%이다.

주제어 : Polarization-entanglement, Bell state, Post-selection

I 서 론

자발적인 매개하향변환(spontaneous parametric down-conversion: SPDC)에서 발생하는 두 광자의 상관관계 특성을 이용한 여러 가지 실험적인 연구 중에서 특히 편광-얽힘 상태를 이용한 다양한 실험들이 Bell의 부등식과 양자역학의 타당성을 검증하기 위해서 수행되었다^[1,2]. 최초의 실험은 제 1형의 SPDC에서 발생하는 두 광자의 편광을 서로 수직되게 한 후, Hong-Ou-Mandel 간섭계의 두 출구에서 투과-투과 또는 반사-반사의 경우에 해당하는 두 광자의 편광-얽힘 상태를 이용한 것으로서 Ou와 Mandel 및 Shih 등에 의해 이루어졌다^[3,4]. 즉, 그들은 BS를 통과한 후의 두 광자를 선택하는 방법(post-selection)을 통해 SPDC에서 발생한 전체 광자의 50%만 얽힘-상태로 만든 것이다. 1993에는 Shih등이 유사한 실험을 제 2형의 SPDC에서 수행하였다^[5]. 1995년 P. G. Kwiat를 비롯한 연구자들이 제 2형 SPDC에서 편광이 서로 다른 광자쌍이 서로 중첩된 소위 편광-얽힘 상태(polarization-entangled state)의 광자쌍을 발생시키는데 성공하였다^[6], 이는 Bell 부등식의 위배를 검증하는 중요한 광원으로서 뿐만 아니라 그 후에 진행된 양자통신(quantum communication)^[7], 양자원격전송(quantum teleportation)^[8-11], 양자암호(cryptography)^[12-14], 양자컴퓨터에서 게이트(gate)^[15] 구성에 이르는 양자정보 전 분야의 연구에 효과적으로 이용되고 있다.

본 연구에서는 제 1형의 SPDC에서 발생하는 두 광자를 post-selection하는 방법 즉, HOM간섭계의 두 출구에서 광자쌍을 부분적으로 선택하여 두 광자의 편광-얽힘 상태를 만들고, 반파장판(half wave plate; HWP)과 1/4파장판(quarter wave plate; QWP)의 조합을 이용하여 4가지 Bell 상태 ($|\Psi^\pm\rangle$, $|\Phi^\pm\rangle$)를 구현하였다. 각각의 Bell 상태의 확인을 위해 두 검출기 앞에 편광자를 설치하고 두 편광자의 상대적인

각도를 변화시키면서 편광상태의 상관관계를 보여주는 4차 간섭무늬를 측정하였다.

II 이 론

비선형 매질과 두 개의 거울 및 1개의 빔분할기(BS)로 구성된 HOM 간섭계는 비선형 매질에 UV와 같은 짧은 파장의 빛(pump 광자)이 입사하면 SPDC로 두 개의 긴 파장 광자(signal 광자와 idler 광자)가 발생한다. 그리고, 광자가 BS에 도달하기 전 한 쪽 경로에 반파장판(HWP)을 삽입하여 인위적으로 한 쪽 경로에 있는 광자의 편광상태를 수평편광에서 수직편광으로 회전시킨다. 두 광자의 경로가 일치되어 있는 상태에서 BS를 지나는 두-광자는 투과-투과, 투과-반사, 반사-투과, 반사-반사 경우가 있으며 그 중에서 동시계수가 가능한 투과-투과, 반사-반사만을 고려하면, BS의 두 출구에서 광의 상태는

$$|\Psi^-\rangle = (|H_3, V_4\rangle - |V_3, H_4\rangle) / \sqrt{2} \quad (1)$$

와 같이 표현된다^[6]. 여기서, H와 V는 두 광자의 수평편광과 수직편광을 나타내며, 첨자 3, 4는 BS의 두 출구에서 두 광자의 경로를 나타낸 것이다. 이러한 상태를 편광-얽힘 상태라고 한다. 식(1)의 두 항이 서로 결맞음(coherence)이 있을 때에는 두 광자를 동시에 측정하는 과정에서 두 검출기 앞에 놓인 두 편광자의 임의적인 각도에서도 편광상관관계를 나타내게 된다.

BS이후의 한쪽 경로에 반파장판(HWP)을 추가로 삽입하여 수평편광(수직 편광)에 대해 수직편광(수평편광)으로 변화시키는데 사용하고, 1/4파장판(QWP)을 삽입하여 각도가 90° 변화하면 두 경로상의 위상 차이를 π 만큼 변화시키는데 사용한다. 이러한 편광의 변화를 이용하면 4가지 Bell 상태를 다음과 같이 만들 수 있다.

[†] E-mail: tskim@mail.ulsan.ac.kr

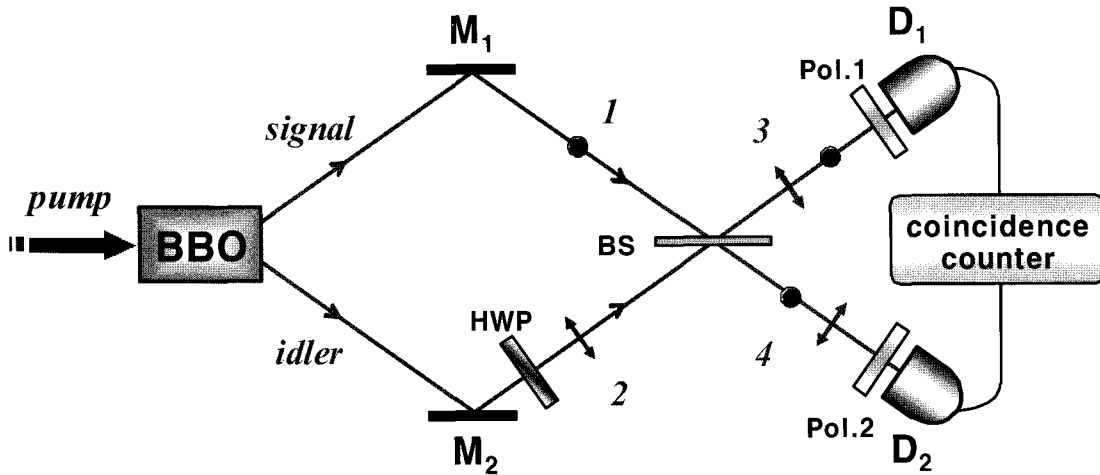


그림 1. HOM 간섭계에서의 편광-얽힘 실험 계략도.

$$|\Psi^\pm\rangle = (|H_3, V_4\rangle \pm |V_3, H_4\rangle) / \sqrt{2} \quad (2)$$

$$|\Phi^\pm\rangle = (|H_3, H_4\rangle \pm |V_3, V_4\rangle) / \sqrt{2} \quad (3)$$

4가지의 Bell 상태에 대해서 두 검출기의 동시계수를 구하기 위해서 두 편광자의 상대적인 각도에 따른 편광상태의 상관관계를 알아보자.

그림 1에서 BS의 두 출구 3과 4에서의 소멸연산자는

$$\hat{a}_3 = \frac{i}{\sqrt{2}} \hat{a}_1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{a}_2 \quad (4)$$

$$\hat{a}_4 = \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{a}_1 + \frac{i}{\sqrt{2}} \hat{a}_2$$

로 표현할 수 있다. 여기서, \hat{a}_1 과 \hat{a}_2 는 BS에 입사하는 두 경로의 소멸연산자를 말하며,

$$\hat{a}_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} (-i\hat{a}_3 + \hat{a}_4) \quad (5)$$

$$\hat{a}_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} (\hat{a}_3 - i\hat{a}_4)$$

와 같이 쓸 수 있다. 제 1형의 SPDC과정에서 발생하는 두 광자 중 한 개의 광자가 θ (광의 진행과 동일 방향을 기준으로 시계방향+ 반시계방향)만큼 편광방향이 기울어진 HWP를 통과한 후 BS에 입사한다면 이 때의 광의 상태는 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\begin{aligned} |\Psi\rangle_{\in} &= |H\rangle_1 |H\rangle_2 \quad (6) \\ &= |H\rangle_1 (\sin\theta |V\rangle_2 + \cos\theta |H\rangle_2) \\ &= \cos\theta \hat{a}_1^\dagger |0\rangle_1 \hat{a}_2^\dagger |0\rangle_2 + \sin\theta \hat{a}_1^\dagger |0\rangle_1 \hat{b}_2^\dagger |0\rangle_2 \\ &= (\cos\theta \hat{a}_1^\dagger \hat{a}_2^\dagger + \sin\theta \hat{a}_1^\dagger \hat{b}_2^\dagger) |0\rangle_1 |0\rangle_2 \end{aligned}$$

1과 2는 BS에 입사하는 두 경로를 나타낸 것이며, \hat{b}_2^\dagger 는 수

직 편광의 광자를 생성하는 연산자이다. 이때 2번 경로로 지나가는 광자는 HWP에 의해 θ 만큼 회전하게 되어 괄호와 같이 표현을 할 수 있다. 편광을 연산자에 대한 표현으로 바꾸기 위한 조건으로

$$\begin{aligned} \hat{a}_1^\dagger |0\rangle_1 &= |H\rangle_1 \\ \hat{b}_2^\dagger |0\rangle_2 &= |V\rangle_2 \end{aligned} \quad (7)$$

의 관계를 이용하였다. BS에 진공상태 $|0\rangle_1 |0\rangle_2$ 의 입력은 $|0\rangle_3 |0\rangle_4$ 의 출력상태가 되는 것을 고려하고, 식(6)에 식(5)를 대입하면 BS의 두 출구에서의 광자 상태를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} |\Psi\rangle_{out} &= \frac{\cos\theta}{2} (\hat{a}_3^\dagger \hat{a}_3^\dagger - \hat{a}_3^\dagger \hat{a}_4^\dagger + \hat{a}_4^\dagger \hat{a}_3^\dagger + i\hat{a}_4^\dagger \hat{a}_4^\dagger) |0\rangle_3 |0\rangle_4 \quad (8) \\ &\quad + \frac{\sin\theta}{2} (\hat{a}_3^\dagger \hat{b}_3^\dagger - \hat{a}_3^\dagger \hat{b}_4^\dagger + \hat{a}_4^\dagger \hat{b}_3^\dagger + i\hat{a}_4^\dagger \hat{b}_4^\dagger) |0\rangle_3 |0\rangle_4 \end{aligned}$$

BS의 두 출구에서의 표현을 연산자에서 편광으로 표현하기 위해 식(7)을 사용하여 정리하면,

$$\begin{aligned} |\Psi\rangle_{out} &= \frac{1}{2} \cos\theta \left(\sqrt{2} i |2H\rangle_3 |0\rangle_4 + \sqrt{2} i |0\rangle_3 |2H\rangle_4 - |H\rangle_3 |H\rangle_4 + |H\rangle_3 |H\rangle_4 \right) \quad (9) \\ &\quad + \frac{1}{2} \sin\theta \left(i |H, V\rangle_3 |0\rangle_4 + i |0\rangle_3 |H, V\rangle_4 - |H\rangle_3 |V\rangle_4 + |V\rangle_3 |H\rangle_4 \right) \end{aligned}$$

만약 HWP의 각도 θ 가 0° 이면 식(9)의 두 번째 항은 사라지고 두 광자가 쌍을 이루어 나타나는 것을 알 수 있다. 반면, θ 가 45° 일 때는 수직의 편광방향을 가진 두 광자가 동일한 출구에 존재하는 경우와 서로 다른 출구에 존재할 상태 즉, $|\Psi\rangle$ 상태가 동시에 발생한다. 각각의 출구에 검출기를 설치하고 동시계수를 측정할 때는 $|\Psi\rangle$ 상태만 측정된다. 이런 상태에서 HWP와 QWP를 설치하여 나머지 $|\Psi^+\rangle$, $|\Phi^+\rangle$, $|\Phi^-\rangle$ 를 각각 구현 할 수 있다. 검출기에 입사하는

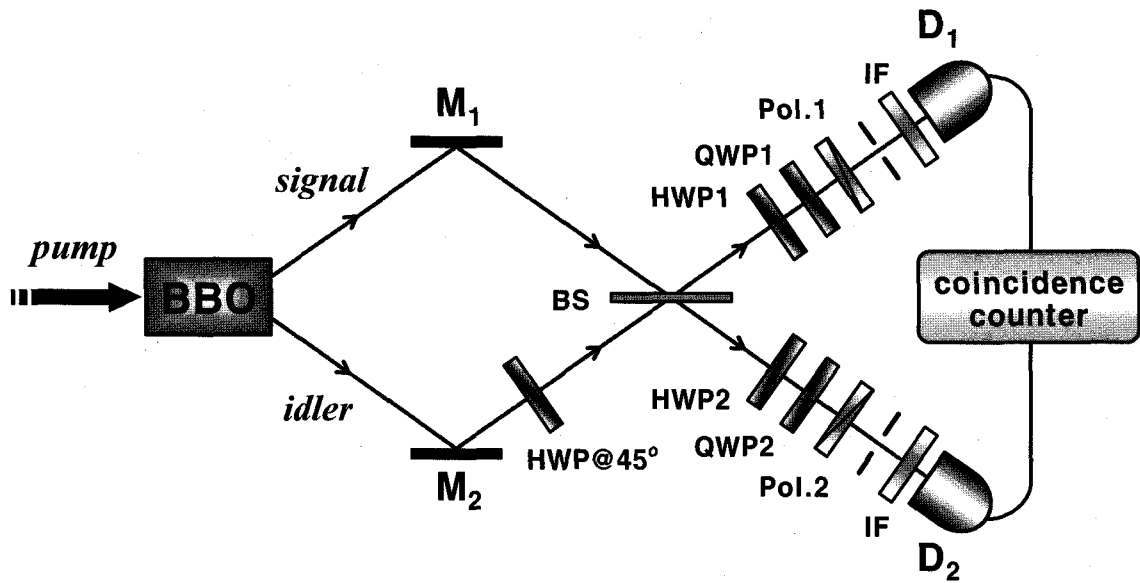


그림 2. Hong-Ou-Mandel 간섭계에서 편광-얽힘 상태 광자쌍의 발생과 편광상관관계를 측정하기 위한 실험장치도. BBO는 비선형 결정, M₁, M₂는 거울, HWP는 1/2파장판, QWP는 1/4파장판, Pol.1, Pol.2는 선형편광자, IF는 간섭필터, D₁, D₂는 단일광자 검출기를 나타낸다.

두 광자의 상태가 식(2)처럼 $|\Psi^\pm\rangle$ 상태에 있고, 두 편광자가 각각 θ_1 과 θ_2 로 놓여 있을 때 두 검출기가 두 광자를 동시에 측정할 확률 P는

$$\begin{aligned}
 P(|\Psi^\pm\rangle; \theta_1, \theta_2) &= |\langle \theta_2 | \langle \theta_1 | \Psi^\pm \rangle|^2 \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}} ({}_3\langle H | \cos \theta_1 + {}_3\langle V | \sin \theta_1) \\
 &\quad ({}_4\langle H | \cos \theta_2 + {}_4\langle V | \sin \theta_2) (|V\rangle_3 \langle H|_4 - |H\rangle_3 \langle V|_4) \\
 &= \frac{1}{2} (\sin \theta_1 \cos \theta_2 \pm \sin \theta_2 \cos \theta_1)^2 = \frac{1}{2} \sin^2(\theta_1 \pm \theta_2)
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

와 같이 된다. 여기서 편광-얽힘 상태의 경우에 두 검출기 앞에 놓인 편광자의 상대적인 각도에 따라 동시계수 측정확률이 주기적으로 변한다는 것을 알 수 있다.

식(10)의 경우와 같은 방법으로 $|\Phi^\pm\rangle$ Bell 상태에 대해서는,

$$P(|\Phi^\pm\rangle) = \frac{1}{2} \cos^2(\theta_1 \mp \theta_2)
 \tag{11}$$

와 같이 표현된다.

III. 실험

그림 2는 제 1형 SPDC에서 발생한 두 광자와 Hong-Ou-Mandel 간섭계를 이용하여 편광-얽힘 상태를 발생시키고, 편광상관관계 분석에 의한 간섭무늬의 측정실험을 위한 실제 장치도이다^[17,18]. He-Cd 레이저(Liconix)에서 발생하는

출력 20 mW, 325 nm의 단일 파장의 UV 빔을 비선형 결정인 BBO(β -BaB₂O₄) 결정에 입사시키면 제 1형의 SPDC에 의해 650 nm의 동일한 파장을 갖는 두 광자가 동시에 발생하게 된다. BBO 결정은 광축과 레이저 빔의 진행방향이 이루는 각도가 37°를 이룰 때 두 광자(signal과 idler)는 펌프빔과 약 $\pm 2.9^\circ$ 를 이루면서 결정을 빠져나오게 된다. BBO 결정에 입사하는 펌프빔의 편광은 광학대 면에 평행한 방향(수평편광, H)이며, 따라서 두 딸광자 즉, idler 광자와 signal 광자는 수직으로 편광된다. 두 개의 거울을 이용하여 두 광자가 BS에서 중첩되도록 간섭계의 경로를 정렬하였다. BBO로부터 BS에 이르는 실제 거리는 약 1.5 m 정도 된다.

HOM 간섭계에서 BBO 결정으로부터 BS에 도달하는 두 광자의 광학적인 경로차가 없더라도 idler 광자의 경로에 놓인 반파장판(HWP)의 각도가 수직방향으로부터 45°로 놓여 있는 경우에는 두 광자의 편광방향이 서로 직교하므로 편광구별 가능성 때문에 BS에서 두 광자 간섭효과(또는 4차 간섭)는 일어나지 않는다. 따라서 BS에 입사하는 두 광자는 서로 독립적으로 행동하여 식(9)에서 보는 바와 같이 두 광자의 투과-투과, 반사-반사, 투과-반사, 그리고 반사-투과의 4가지 경우에 해당하는 두 광자 확률 진폭들이 모두 존재하게 된다. 하지만, 여기서는 두 검출기에서 동시계수가 측정될 수 있는 경우 즉, BS의 두 출구에서 두 광자가 투과-투과 또는 반사-반사를 하는 경우에 해당하는 확률 진폭들만 고려하면, 두 광자의 편광방향이 서로 수직인 동시에 BS에서 검출기에 이르는 두 광자 편광상태가 중첩된 상태가 되므로 두 광자의 편광-얽힘 상태를 선택적으로 만들 수 있다. 여기서 선택적이라는 말은 BBO에서 발생하는 전체 광자 쌍 중에서 50%만 실제 동시계수 측정에 기여하게 된다는 것을 의미한다.

두 광자의 편광-얽힘 상태를 선택적으로 만든 후, BS이후

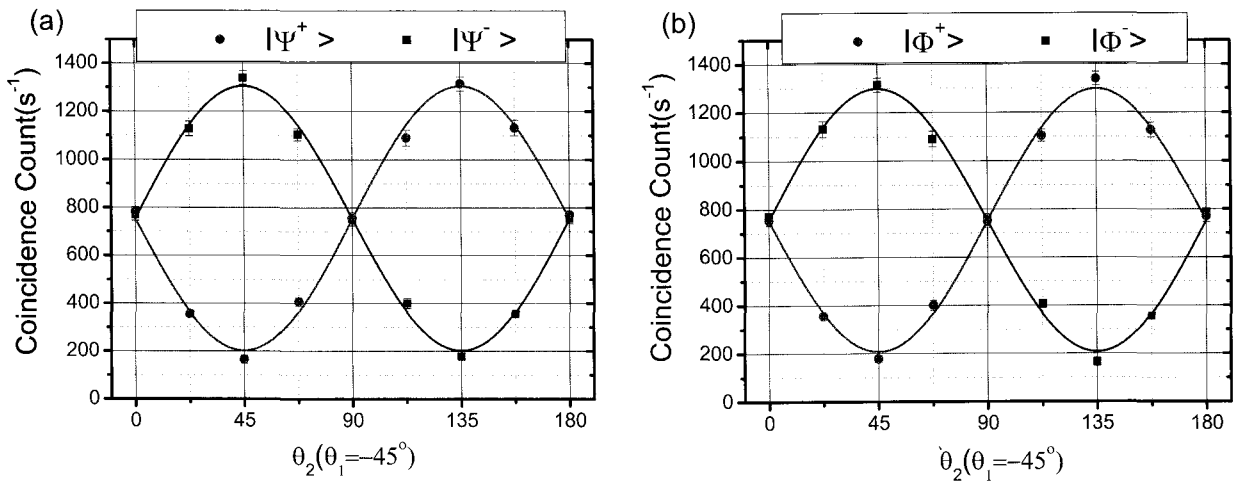


그림 3. 4가지 Bell 상태에서의 동시계수. (a) $|\Psi^+\rangle$ 상태일 때, (b) $|\Phi^+\rangle$ 상태일 때, 편광자 1을 -45° 로 두고 편광자 2를 0° 에서 180° 까지 변화시켰을 때의 동시계수 측정. 각 점은 50회 측정의 평균이고 수직선은 표준편차이다.

에 HWP와 QWP 그리고 편광자를 추가로 설치하고 이 파장판(wave plate)을 조합하면 4가지 Bell 상태를 만들 수가 있다. 여기서, QWP는 90° 로 회전시켜서 두 경로상의 위상차를 π 만큼 변화시키는데 사용하고, HWP는 45° 로 회전시켜 수평(수직)편광을 수직(수평)편광으로 변화시켜 BS이후 두 광자의 상태를 $|\Psi^\pm\rangle$ 에서 $|\Phi^\pm\rangle$ 로 변화하는데 사용하였다. 그리고 두 검출기 앞의 편광자는 임의적인 각도를 나타내어 편광상관관계를 알아볼 수 있게 하였다.

두 QWP와 두 HWP를 0° 로 맞추면 두 광자의 상태는 $|\Psi^+\rangle$ 가 된다. 그런 다음 검출기 D_1 앞에 있는 편광자 1을 $-45^\circ(\theta_1)$ 로 고정하고, 편광자 2의 각도(θ_2)를 0° 에서 180° 로 변화를 주면서, 동시계수의 변화를 측정하였다. 이 상태에서 HWP와 QWP의 각도 조합에 의하여 나머지 3가지 상태를 만들어서 두 편광자에 대한 동시계수 변화를 측정하였다.

IV. 결과 및 논의

하향변환된 빔의 결맞음 시간보다 빔 분할기(BS)에 두 광자의 도달 시간간격이 작게되면 두 광자의 파속(wave packet)이 시간과 공간적으로 중첩되고, 결과적으로 두 검출기의 동시계수 측정과정에서 경로의 구별가능성이 줄어든다. 따라서 두 광자가 모두 투과 또는 반사되는 경우에 대한 확률 진폭은 서로 소멸간섭을 일으키고, 두 광자가 어느 한 쪽 출구로만 쌍을 이루려는 경향이 증가하게 된다. 그리고, 동시계수가 최소가 되는 위치 즉, HOM's dip 의 위치에서 BS 이전의 한쪽 경로에 HWP를 삽입하여 편광을 θ 만큼 회전시키면 두 광자가 진행하는 두 경로는 부분적으로 구별 가능하게 된다. $\theta=0^\circ$ 일 때는 동일한 상태이므로 간섭현상이 발생하지만 $\theta=45^\circ$ 일 때는 두 경로는 완벽하게 구별 가능하게 되어 간섭현상은 사라진다. 따라서 θ 가 45° 일 때는 BS에 입사하는 두 광자는 서로 독립적으로 행동하여 두 광자의 투과-투

과, 반사-반사, 투과-반사, 그리고 반사-투과의 4가지 경우에 해당하는 두-광자 확률 진폭들이 모두 존재하게 된다.

그림 3은 SPDC에서 발생하는 광자쌍으로 만든 4가지 Bell 상태에 대해 두 검출기 앞에 설치한 편광자의 상대적인 각도를 변화 시키면서 동시계수를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 그림 3의 (a)는 $|\Psi^+\rangle$ 상태에서 검출기 D_1 앞에 놓인 편광자의 각도를 수직방향에 대해 -45° 로 고정시키고, D_2 앞에 놓인 편광자의 각도를 수직편광을 기준으로 0° 에서 180° 까지 22.5° 씩 변화시키면서 두 검출기에서 측정되는 동시계수의 평균과 표준편차를 나타낸 것이다. $|\Psi^+\rangle$ 와 $|\Psi^-\rangle$ 는 두 광자의 위상차이가 π 만큼 생기기 때문에 서로 반대의 간섭무늬를 가지게 되고, 결과에 나타난 실선은 식(10)의 이론적인 예측을 통한 결과인데 이것이 실험적인 결과와 잘 맞는다는 것을 알 수 있다. 그리고 각 점들마다 50번씩 반복 측정하여 평균을 나타낸 것으로 동시계수 검출의 오차가 매우 작다는 것을 보였다. $|\Psi^+\rangle$ 상태는 최대 동시계수 1339.6, 최소 동시계수 177.8로 76%의 선명도를 그리고 $|\Psi^-\rangle$ 상태는 최대 동시계수 1314.5, 최소 165.2로 78%의 선명도를 가진다. (b)는 HWP를 회전시켜 $|\Phi^+\rangle$ 를 만들고 두 편광자의 상대적인 각도 변화에 따른 동시계수를 측정된 것이다. 앞서와 마찬가지로 검출기 D_1 앞에 놓인 편광자의 각도를 수직방향에 대해 -45° 로 고정시키고, D_2 앞에 놓인 편광자의 각도를 수직편광을 기준으로 0° 에서 180° 까지 22.5° 씩 변화시키면서 두 검출기에서 측정되는 동시계수의 평균과 표준편차를 나타낸 것이다. 실선은 식(11)의 이론적으로 예측되는 결과이며, 실험적 결과와 일치하는 것을 알 수 있다. $|\Phi^+\rangle$ 상태는 최대 동시계수 1319.3, 최소 동시계수 169.7로 77%의 선명도를 그리고 $|\Phi^-\rangle$ 상태는 최대 동시계수 1321.4, 최소 동시계수 182.8로 76%의 선명도를 가진다.

그림 3에 나타난 결과는 우발적인 동시계수를 제거한 상태의 동시계수의 선명도를 나타낸 것이다. 우발적인 동시계수

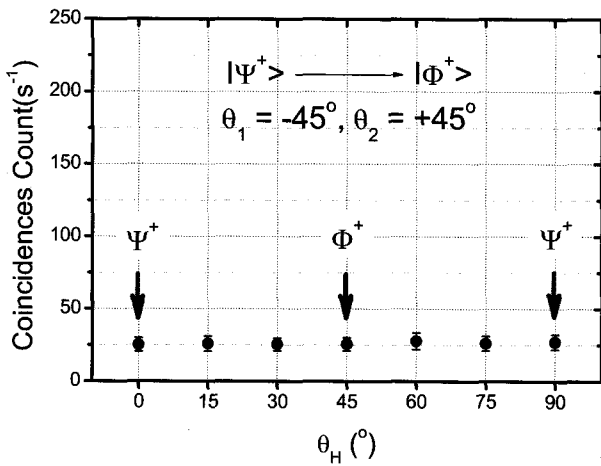


그림 4. θ_1 을 -45° , θ_2 를 $+45^\circ$ 로 고정된 상태에서 HWP의 각 θ_H 에 따른 동시계수 변화. HWP의 각을 0° 에서 90° 까지 변화시키면, HWP 각이 45° 회전했을 때, $|\Psi^+\rangle$ 상태에서 $|\Phi^+\rangle$ 상태로 바뀐다.

를 제거하지 않았을 때는 선명도가 평균적으로 80%를 나타낸다. 우발적 동시계수는 $N_{acc.coin} = N_1 N_2 N_R$ 에 의해 계산할 수 있고, N_1 , N_2 는 단일 계수를 나타내고, TR은 분해시간을 나타낸다.

그림 4는 BS 이후의 두 광자 상태를 $|\Psi^+\rangle$ 로 만든 다음 검출기 D1앞에 놓인 편광자 P1의 각도를 수직에 대해 -45° 로 검출기 D2앞에 있는 편광자 P2를 수직방향에 대해 $+45^\circ$ 로 고정하고 반파장판(HWP)를 회전시키면서 동시계수를 측정하는 것이다. 이 때 두 검출기에서 측정되는 동시계수는 그림 3의 (a)에서 확인하였듯이 최소가 된다. 한쪽 경로에 있는 HWP를 수직 방향에 대해 0° 에서 90° 까지 15° 씩 회전시키면서 각도에 대한 동시계수를 측정하였다. 식(10)과 식(11)에서 보는 바와 같이 동시계수 측정확률은 두 편광자의 상대적인 각도에 따라 주기적으로 변화하는 것을 알 수 있는 바와 같이 HWP의 변화에 따른 동시계수의 변화는 일어나지 않고 일정하게 측정되는 것을 확인하였다. 다시 말해, HWP가 45° 회전을 하면 수평편광은 수직편광으로 수직편광은 수평편광으로 바뀌게 되어 두 광자의 상태가 $|\Psi^+\rangle$ 에서 $|\Phi^+\rangle$ 로 변화하게 되지만 상태의 동시계수는 변화하지 않는다는 것을 알 수 있었다. 좀더 HWP를 회전시켜 90° 가 되더라도 다시 원래의 편광상태로 돌아오기 때문에 동시계수는 앞서와 동일하다.

그림 5는 두 검출기 D1앞에 놓인 편광자 P1의 각도를 수직에 대해 -45° 로 놓고, 검출기 D2앞에 있는 편광자 P2도 수직방향에 대해 $+45^\circ$ 로 놓은 다음 4분파장판(QWP)의 각도변화에 대하여 측정한 것이다.(HWP 또한 고정) 두 광자의 상태는 $|\Psi^+\rangle$ 와 $|\Phi^+\rangle$ 에 대해 두 검출기에서 측정하는 동시계수는 최소가 되며, 이 두 상태에 대해서 한 쪽 경로의 QWP를 0° 에서 180° 까지 30° 간격으로 회전하면서 동시계수를 측정하였다. ■는 $|\Psi^+\rangle$ 에 대한 동시계수 변화를 측정하는 것이고, ●는 $|\Phi^+\rangle$ 에 대한 동시계수 변화를 측정하는 것이다.

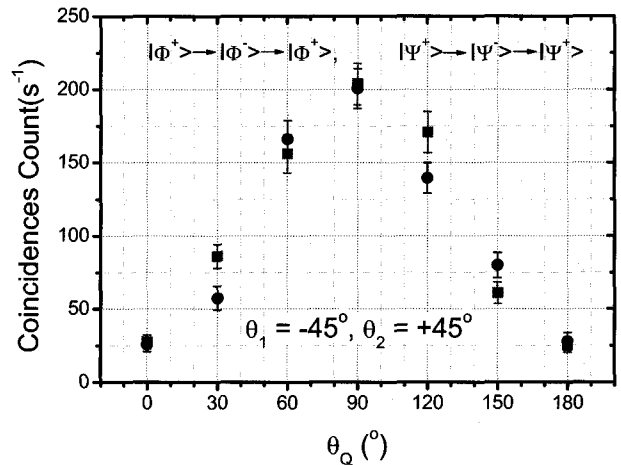


그림 5. θ_1 과 θ_2 를 각각 $-45^\circ, +45^\circ$ 로 고정된 상태에서 QWP의 각 θ_Q 에 따른 동시계수의 변화. Bell 상태에서 QWP를 0° 에서 180° 까지 변화시켰을 때, 90° 주기로 상태들이 $|\Psi^+\rangle(|\Phi^+\rangle)$ 상태에서 $|\Psi^-\rangle(|\Phi^-\rangle)$ 상태로 바뀐다.

QWP가 0° 일 때는 최소의 동시계수를 가지다가 QWP가 90° 회전하게 되면, 동시계수가 최대값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 QWP가 90° 회전하게 되면 두 경로상에 π 만큼의 위상차가 생겨 두 광자의 상태가 $|\Psi^+\rangle$ 는 $|\Psi^-\rangle$ 로 $|\Phi^+\rangle$ 는 $|\Phi^-\rangle$ 로 상태가 바뀌게 되는 것을 의미한다. 일정한 두 편광자의 각도에 대해 두 광자의 상태가 바뀌게 되면 동시계수는 최소값에서 최대값으로 변화하게 된다. QWP가 좀 더 회전하여 180° 가 되면 다시 처음의 위상차를 유지하기 때문에 두 광자 상태는 QWP가 0° 일 때와 마찬가지로 되어 동시계수가 다시 최소값을 가지는 것을 확인 하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 제 1형의 매개하향변환에서 발생하는 광자 쌍과 Hong-Ou-Mandel 간섭계를 이용하여 4가지 상태의 Bell 상태를 만들었다. 동시계수의 측정을 통하여 $|\Psi^+\rangle$ 상태는 76%, $|\Psi^-\rangle$ 상태는 78%, $|\Phi^+\rangle$ 는 77%, $|\Phi^-\rangle$ 상태는 76%의 선명도를 보이는 것을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2002-070-C00029).

참고문헌

- [1] A. Aspect, P. Grangier, and G. Roger, "Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bell's Theorem," Phys. Rev. Lett., vol. 47, no. 7, pp. 460-463, 1981. ; "Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedanken-

- nexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 47, no. 2, pp. 91-94, 1982.
- [2] Markus Aspelmeyer, Hannes R. Bohm, Tsewang Gyatso, Thomas Jennewein, Jørgen Kaltenbaek, Michael Lindenthal Taraba, Rupert Ursin, Philip Walther, Anton Zeilinger, "Long-Distance Free-Space Distribution of Quantum Entanglement," *Science*, vol. 301, pp. 621-623, 2003.
- [3] Z. Y. Ou and L. Mandel, "Violation of Bell's Inequality and Classical Probability in a Two-Photon Correlation Experiment," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 61, pp. 50-53, 1988.
- [4] Y. H. Shih and C. O. Alley, "New Type of Einstein-Podolsky-Bohm Experiment Using Pairs of Light Quanta Produced by Optical Parametric Down Conversion," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 61, pp. 2921-2924, 1988.
- [5] T. E. Kiess, T. H. Shih, A. V. Sergienko, and C. O. Alley, "Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Experiment Using Pairs of Light Quanta Produced by Type-II Parametric Down-Conversion," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 71, no. 24, 3893-3897, 1993.
- [6] Paul G. Kwiat, Klaus Mattle, Harald Weinfurter, and Anton Zeilinger, "New High-Intensity Source of Polarization-Entangled Photon Pairs," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 75, no. 24, pp. 4337-4342, 1995.
- [7] K. Mattle, H. Weinfurter, P. Kwiat, and A. Zeilinger, "Dense Coding in Experimental Quantum Communication," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 76, no. 25, pp. 4656-4659, 1996.
- [8] Dik Bouwmeester, Jian-Wei Pan, Klaus Mattle, Manfred Eibl, Harald Weinfurter, and Anton Zeilinger, "Experimental quantum teleportation," *Nature*, vol. 390, pp. 575-579, 1997.
- [9] D. Boschi, S. Branca, F. De Martini, L. Hardy, and S. Popescu, "Experimental Realization of Teleporting an Unknown Pure Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 80, no. 6, pp. 1121-1125, 1998.
- [10] Yoon-Ho Kim, Sergei P. Kulik, and Yanhua Shih, "Quantum Teleportation of a Polarization State with a Complete Bell State Measurement," *Phys. Rev. Lett.* vol. 86, no. 7, pp. 1370-1373, 2001.
- [11] Marcikic, H. de Riedmatten, W. Tittel, H. Zbinden, N. Gisin, "Long-distance teleportation of qubits at telecommunication wavelengths," *Nature*, vol. 421, pp. 509-513, 2003.
- [12] Thomas Jennewein, Christoph Simon, Gregor Weihs, Harald Weinfurter, and Anton Zeilinger, "Quantum Cryptography with Entangled Photons," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, no. 20, pp. 4729-4732. 2000.
- [13] Priscilla E. Greenwood, Lawrence M. Ward, David F. Russell, Alexander Neiman, and Frank Moss, "Stochastic Resonance Enhances the Electrosensory Information Available to Paddlefish for Prey Capture," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, no. 20, pp. 4773-4776, 2000.
- [14] W. Tittel, J. Brendel, H. Zbinden, and N. Gisin, "Quantum Cryptography Using Entangled Photons in Energy-Time Bell States," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, no. 20, pp. 4737-4740, 2000.
- [15] Sara Gasparoni, Jian-Wei Pan, Philip Walther, Terry Rudolph, and Anton Zeilinger, "Realization of a Photonic Controlled-not Gate Sufficient for Quantum Computation," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 93, no. 2, pp. 020504, 2004.
- [16] J. KO, H. Kim, and T. Kim, "another Quantum Eraser Experiment with Two-Photon States of Light," *J. Opt. Soc. Korea*, vol. 6, no. 3, pp. 100-104, 2002.
- [17] H. Kim, J. Ko, and T. Kim, "Two-particle interference experiment with frequency-entangled photon pairs," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 20, no. 4, pp. 760-763, 2003.
- [18] H. Kim, J. Ko, and T. Kim, "Quantum-eraser experiment with frequency-entangled photon pairs," *Phys. Rev. A*, vol. 67, no. 5, pp. 541021, 2003.

Generation of Bell states in a Hong-Ou-Mandel interferometer

Osung Kwon, Heonoh Kim, Gudong Park and Taesoo Kim[†]

Department of Physics, University of Ulsan, Ulsan 680-749

[†]*E-mail: tskim@mail.ulsan.ac.kr*

(Received October 13, 2006, Revised manuscript February 15, 2007)

Bell states have been investigated in a Hong-Ou-Mandel interferometer using photon pairs from a type-I SPDC. The four kinds of the Bell states, $|\Psi^+\rangle, |\Psi^-\rangle, |\Phi^+\rangle, |\Phi^-\rangle$ are created by placing 2 HWPs, 2 QWPs at outputs of the interferometer. They show an average visibility of 77% in the coincidence measurement.