

파장 640 nm와 660 nm 광자쌍의 간섭

김현오[†] · 신하림 · 김원식 · 권오성 · 김태수

울산대학교 물리학과

Ⓣ 680-749 울산시 남구 무거2동 산29번지

(2004년 5월 31일 받음, 2004년 9월 9일 수정본 받음)

매개하향변환과정에서 발생한 640 nm와 660 nm 파장을 갖는 광자쌍의 진동수 얽힘상태를 이용하여 양자간섭실험을 수행하였다. 두 광자의 파장에 대응하는 각진동수가 각각 ω_1 과 ω_2 인 광자쌍을 간섭계의 출구에 놓인 두 검출기로 서로 다른 진동수의 광자들을 동시계수할 때, 광의 결맞음 시간이내에서 두 광자가 빔분할기에 도달하는 시간 간격의 변화 δt 에 따라 동시계수가 변하는 간섭무늬를 관측하였다.

주제어 : parametric down-conversion, frequency-entangled photon pairs, coincidence counts.

I. 서 론

얽힘상태(entangled state)란 양자역학에서 나타나는 가장 기본적인 특성중의 하나로써, 둘 이상의 입자들이 서로 중첩된 상태에 있어서 그 전체 상태가 개별적인 입자들의 파동함수의 곱으로 기술할 수 없을 때 사용되는 표현이다. 이는 Einstein-Podolsky-Rosen이 제안한 두입자계의 비국소적 상관관계(nonlocal correlation)를 표현하기 위해 E. Schrödinger가 사용한 말이다.^[1,2] 특히 두입자 얽힘상태의 대표적인 예로는 Bohm이 제안한 스핀이 1/2인 한쌍의 전자 사이에 존재하는 스핀의 비대칭 상관관계와 중첩으로 표현되는 상태이며, $|\Psi\rangle = 1/\sqrt{2}(|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2)$ 와 같이 표현된다.^[3] 공간적으로 서로 멀리 떨어져 있는 두 입자 1과 2는 스핀-up($|\uparrow\rangle$)의 상태와 스핀-down($|\downarrow\rangle$)의 상태가 서로 중첩된 스핀-얽힘상태에 있으며, 한 입자의 스핀이 측정을 통해 결정됨과 동시에 다른 입자의 스핀은 자동적으로 특정한 방향으로 결정되어져 버린다.

1980년대 중반까지는 주로 원자의 다단천이(atomic cascade)에 의해 발생하는 광자들을 얽힘상태 광원으로 이용하였지만^[4,5], 1970년 Burnham과 Weinberg가 비선형 결정에 짧은 파장의 레이저빔을 입사시켰을 때 매개하향변환과정(parametric down-conversion: PDC)에 의해 발생하는 한 쌍의 광자들의 밀접한 상관관계에 관한 실험결과를 발표한 후^[6], 80년대 후반부터 지금까지 PDC는 얽힘상태의 광자들을 만드는 가장 유용한 광원으로 이용되고 있다.^[7,8] PDC에서 발생하는 얽힘상태의 광자쌍을 이용한 일반적인 간섭계는 Horne 등에 의해 소개되었다.^[9] 그들은 공간적으로 서로 분리된 두 입자들의 중첩에서 상대적인 위상변화에 의존하여 동시계수가 변한다는 것을 보였고, Rarity와 Tapster는 Bell 부등식과

연관시켜 실험적으로 증명해 보였다.^[10,11]

최근에 우리는 PDC에서 발생한 630.5 nm와 671 nm의 파장을 갖는 두 광자의 진동수 얽힘상태를 이용하여 비고전적이고 비국소적인 간섭효과를 보고한 바가 있다.^[12,13] 두광자 간섭계에서 진동수의 선택과 두 광자를 동시에 측정하는 두 검출기의 배열, 그리고 두광자 확률진폭들 사이의 위상변화에 따라 다른 간섭무늬를 측정할 수 있었다. 본 논문에서는 640 nm와 660 nm의 파장을 갖는 두 광자의 진동수 얽힘상태와 관련된 양자간섭효과를 보고하고자 한다. 두 광자가 빔분할기에서 시간적, 공간적으로 중첩되지 않는 경우에도 두광자의 경로를 서로 구별할 수 없을 때, 이에 대응하는 두광자 확률진폭들의 중첩으로부터 일어나는 간섭효과를 관측하였다.

II. 매개하향변환과정에 의한 진동수 얽힘상태의 발생

2.1. 매개하향변환(Parametric down-conversion)

매개하향변환(PDC)은 레이저에서 나온 높은 진동수의 광을 $\chi^{(2)}$ 의 비선형 계수를 갖는 매질에 입사시켰을 때 입사하는 광의 일부가 상대적으로 낮은 진동수를 갖는 한 쌍의 광자들로 자발적으로 변환되는 과정이다.^[6] PDC에서 발생한 얽힘상태에 있는 두광자(signal과 idler)의 상태는

$$|\Psi\rangle_{s,i} = \int d\omega \phi(\omega_s, \omega_i) |\omega_s\rangle_s |\omega_0 - \omega_s\rangle_i \quad (1)$$

와 같이 표현된다. 여기서 ω_0 는 펌프빔의 각진동수, ω_s 는 signal 광자, $\omega_0 - \omega_s$ 는 signal과 동시에 발생하는 idler 광자의 각진동수를 나타내고, $\phi(\omega_s, \omega_i)$ 는 하향변환된 빔의 스펙트럼에 관련된 가중함수(weight function)이다. PDC는 비선형 매질내

[†] E-mail: heon-oh@etri.re.kr

에서 펌프빔과 하향변환된 광자들 사이에 위상조화조건이 잘 만족될 때 효율적으로 일어나는데, 이는 다음과 같은 에너지 보존법칙과 운동량 보존법칙에 해당한다.

$$\omega_s + \omega_i = \omega_0, \quad \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i = \mathbf{k}_0 \quad (2)$$

따라서 PDC에서 발생하는 광자들의 각진동수(또는 파장) ω_s 와 ω_i (또는 파장 λ_s 와 λ_i)는 임의의 값을 가질 수 있지만,

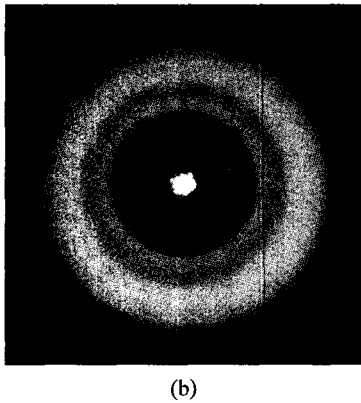
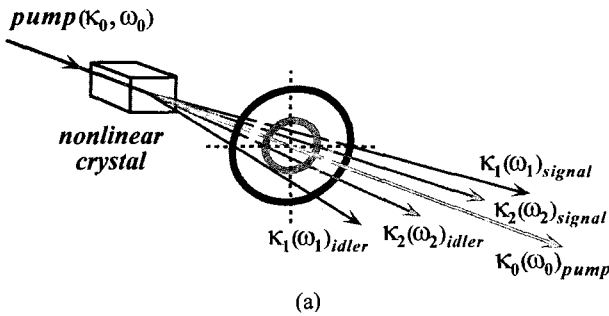


그림 1. (a) 매개하향변환. 비선형 결정에 레이저 빔이 입사하면 넓은 스펙트럼을 갖는 하향변환된 광이 펌프빔의 진행방향 주위로 원추형으로 발생한다. (b) 디지털 카메라로 촬영된 단면 사진.

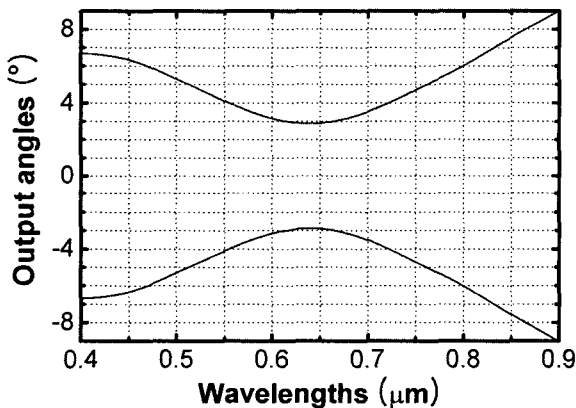


그림 2. PDC에서 발생한 광자들의 파장에 따른 방출각도.

임의의 각진동수와 파수벡터를 갖고 하나의 signal 광자가 발생하면 식 (2)의 조건을 만족시키는 특정한 각진동수와 파수벡터를 갖는 idler 광자가 반드시 발생하게 된다. 식 (2)의 에너지 보존법칙으로부터, 발생한 하나의 signal 광자의 파장 λ_s 에 대응하는 idler 광자의 파장은 $\lambda_i = \frac{\lambda_s \lambda_0}{\lambda_s - \lambda_0}$ 로 주어진다. 또한 운동량보존법칙에 따라 signal, idler 그리고 펌프빔의 파수벡터는 반드시 동일 평면상에 있어야 하지만, 두 광자가 발생하는 각도는 임의의 방향을 가질 수 있기 때문에 펌프빔의 진행방향에 대해서 signal과 idler 광자는 원추형으로 발생하게 된다(그림 1).

PDC에서 발생하는 광자들의 방출각도는 결정의 광축과 펌프빔의 진행방향이 이루는 각도 ϕ 에 따라 달라진다. 그림 2는 ϕ 가 37° 인 BBO ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$) 결정에 325 nm 파장의 레이저빔을 입사시켰을 때 PDC에 의해 발생하는 광자들의 파장에 따른 방출각도를 나타낸 것이다. 본 실험에서 이용한 640 nm와 660 nm의 파장에 해당하는 광자들은 펌프빔의 진행방향으로부터 각각 약 2.9° 와 3.0° 를 이루면서 결정을 빠져 나간다.

2.2. 진동수 얽힘상태 광자쌍의 간섭

그림 3은 PDC에서 발생한 진동수 얽힘상태 광자쌍들의 간섭현상을 관측하기 위한 간섭계의 개념도를 나타낸 것이다. 각진동수 ω_1 또는 ω_2 인 하나의 광자가 signal 경로를 따라서 발생하고, 이와 동시에 발생하는 다른 하나의 광자가 ω_2 또는 ω_1 의 각진동수를 갖고 idler 경로를 따라서 발생한다. 이 과정에서 펌프빔과 하향변환된 두 광자들 사이에 식 (2)의 위상조화조건을 만족한다면, 간섭계에서 signal과 idler 광자의 경로에는 각진동수가 각각 ω_1 과 ω_2 또는 ω_2 와 ω_1 인 광자들이 중첩된 상태에 있으므로, 이러한 경우 진동수 얽힘상태의 두-광자는 다음과 같이 표현된다.

$$|\Psi\rangle_{\omega_1, \omega_2} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\omega_1\rangle_s |\omega_2\rangle_i + |\omega_2\rangle_s |\omega_1\rangle_i) \quad (3)$$

즉 동시에 발생한 두-광자의 상태는 $|\omega_1\rangle_s |\omega_2\rangle_i$ 인 상태와 $|\omega_2\rangle_s |\omega_1\rangle_i$ 의 상태의 중첩으로 표현되고, 양자역학적으로는

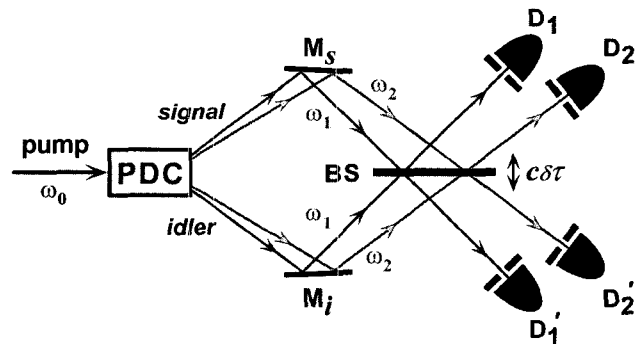


그림 3. 진동수 얽힘상태 두-광자 간섭계

두 광자가 $|\omega_1\rangle_s|\omega_2\rangle_i$ 인 상태와 $|\omega_2\rangle_s|\omega_1\rangle_i$ 인 상태에 동시에 존재한다고 표현하기도 한다.

PDC에 의해 발생한 각진동수 ω_1 인 signal 광자(ω_1^s)와 ω_2 인 idler 광자(ω_2^i)는 두 거울 M_s 와 M_i 에서 반사된 후 빔분할기(BS)를 거쳐 두 검출기 D_1 (또는 D_1')과 D_2 (또는 D_2')로 입사하게 된다. 마찬가지로 각진동수 ω_2 인 signal 광자(ω_2^s)와 ω_1 인 idler 광자(ω_1^i)는 BS를 거쳐 D_2 (또는 D_2')와 D_1 (또는 D_1')으로 입사하게 된다. 본 논문에서는 PDC 과정에서 한번에 두 개의 광자쌍이 발생하는 경우는 고려하지 않는다. 그러면 서로 다른 각진동수의 광자쌍을 동시에 측정하는 한 쌍의 검출기 (D_1 - D_2' , D_1' - D_2 , D_1 - D_2 , 그리고 D_1' - D_2')를 이용하여 두 광자를 동시에 측정할 확률은 두 광자가 BS에 도달하는 시간차에 따라 다음과 같이 주어진다.^[9,14]

$$P_{D_1, D_2'}(\delta\tau) = P_{D_1', D_2}(\delta\tau) = \frac{1}{4} \left[1 - \exp\left(-\frac{4\nu^2\delta\tau^2}{2}\right) \cos(\omega_1 - \omega_2)\delta\tau \right] \quad (4)$$

$$P_{D_1, D_2}(\delta\tau) = P_{D_1', D_2'}(\delta\tau) = \frac{1}{4} \left[1 + \exp\left(-\frac{4\nu^2\delta\tau^2}{2}\right) \cos(\omega_1 - \omega_2)\delta\tau \right] \quad (5)$$

여기서 검출기의 효율은 이상적으로 1이라고 가정하였고, 4ν 는 두 광자 ω_1 과 ω_2 의 평균적인 진동수 선폰을 나타낸다. 식 (4)는 두 검출기가 BS의 서로 다른 출구에 놓여 있을 때이고, 반면에 식 (5)는 두 검출기가 BS의 같은 출구에 놓여 있을 때이다.

양자역학에서 두-광자 간섭현상은 두-광자가 동시에 취할 수 있는 구별이 불가능한 경로에 대한 확률진폭들이 중첩될 때 일어난다. 그림 3의 간섭계에서 두 광자가 D_1 과 D_2' (또는 D_1' 과 D_2)에 의해 검출되는 경우는 BS에 도달하는 두 광자가 모두 투과하거나 모두 반사하는 경우이다. 즉 ω_1^s 과 ω_2^s 가 모두 투과되거나 ω_1^i 과 ω_2^i 가 모두 반사되어 D_1 과 D_2' 로 향하는 경우와 ω_1^s 과 ω_2^s 가 모두 투과되거나 ω_1^i 과 ω_2^i 가 모두 반사되어 D_1' 과 D_2 로 향하는 경우이다. 이러한 경우 BS의 위치가 대칭적인 위치에 놓여있다면($\delta\tau = 0$) 두 검출기는 원리적으로도 두 광자의 경로(반사-반사와 투과-투과)를 구별할 수가 없고, 두-광자 확률진폭들은 π 만큼의 위상차 때문에 서로 소멸간섭을 일으킨다. 따라서 식 (4)로부터 $\delta\tau = 0$ 일 때 두 검출기의 동시계수 확률은 0이 된다. 반면에 두 검출기 D_1 과 D_2 (또는 D_1' 과 D_2')로 두 광자를 측정하는 경우는 두 광자 중에서 하나는 반사되고 다른 하나의 광자는 투과되는 경우이다. 이러한 경우에는 위상차가 없으므로 서로 보강간섭을 일으키고, 따라서 식 (5)로부터 $\delta\tau = 0$ 일 때 두 검출기의 동시계수 확률은 1/2이 된다. 그림 3의 간섭계에서 두 가지 경우의 검출기 배열에 대해서 동시계수를 측정할 때 두-광자가 동시에 취할 수 있는 구별이 불가능한 경로를 그림 4에서 보였다.

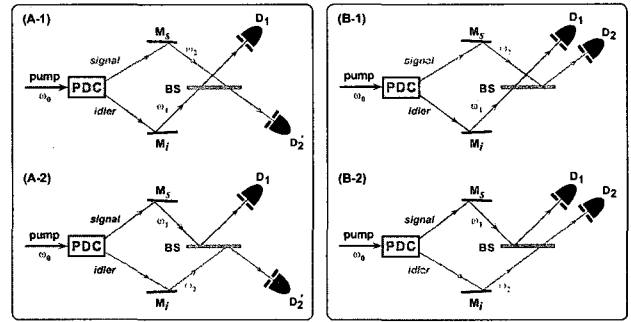


그림 4. 구별할 수 없는 두-광자 확률진폭 또는 동시계수에서 구별할 수 없는 두-광자의 경로. (A-1)과 (A-2)는 두 광자가 BS에서 투과-투과 또는 반사-반사에 의해 두 검출기 D_1 과 D_2 으로 향하는 경우, (B-1)과 (B-2)는 두 광자가 반사-투과 또는 투과-반사에 의해 D_1 과 D_2 로 향하는 경우이다.

III. 실험

PDC에서 발생하는 진동수 얽힘상태 광자쌍들의 간섭현상을 측정하기 위한 실제 실험장치를 그림 5에서 나타내었다. 325 nm의 단일파장에서 연속적으로 발진하는 He-Cd 레이저 빔을 비선형 결정 BBO (β -BaB₂O₄)에 입사시키면, PDC에 의해 입사하는 펌프 광자의 일부가 긴 파장의 signal과 idler 광자로 자발적으로 변환된다. 이 과정에서 펌프빔의 각진동수가 ω_0 , 변환된 두 광자의 각진동수가 각각 ω_1 과 ω_2 일 때, 위상조화조건을 만족하는 특정한 방향으로 두 광자는 동시에 발생된다. 본 실험에 이용된 BBO 결정은 type-I의 위상조화조건을 만족하도록 제작되었으며, 입사하는 펌프빔의 파장이 325 nm일 때 650 nm 파장의 두 광자가 펌프광의 방향과 같은 방향으로 발생하도록 결정의 광축과 펌프광의 진행방향이 이루는 각도 ϕ 가 36.6°로 절단(cutting)이 되어 있다. PDC에서는 ϕ 가 증가할수록 signal과 idler 광자들의 방출각도가 증가한다. 따라서 본 실험에서는 측정의 편리함을 위해서 ϕ 를 조절하여 37°가 되도록 하였고, 이 때 650 nm 파장의 광자들은 펌프광의 진행방향에 대해서 약 2.9°의 각도를 이루면서 발생한다.

PDC에서는 넓은 스펙트럼의 범위에 걸쳐서 광자들이 발생하지만, 본 실험에서는 두-광자의 진동수 얽힘상태를 얻기 위해서 640 nm와 660 nm에 해당하는 두 파장의 광자쌍을 선택하였다. 광의 결맞음 시간은 검출기 앞에 부착된 한 쌍의 간섭필터(IF; interference filter)의 진동수 투과폭에 의해 결정되며, 실험에서 사용한 필터의 투과 파장폭은 중심파장으로부터 ± 5 nm이다. 동시에 발생한 signal과 idler 광자들은 두 거울 M_s 와 M_i 에서 반사된 후 BS1로 향하고, BS1에서 투과 또는 반사된 광자들은 간섭필터를 거쳐 두 검출기 D_1 과 D_2 (또는 D_1' 과 D_2')로 입사하게 된다. 첫 번째 실험에서는 BS2가 없는 상태에서 BS1의 이동거리 $c\delta\tau$ 의 변화에 따른 두 검출기 D_1 과 D_2 의 동시계수를 측정하고, 두 번째로는 BS2를 추가적으로 설치하여 $c\delta\tau$ 의 변화에 따른 D_1 과

D_2 의 동시계수를 측정하였다. 실험에서 BBO 결정과 BS1사이의 거리는 약 1.5 m 정도 된다. 간섭계의 서로 다른 경로를 거쳐서 BS1에 입사하는 두 광자의 상대적인 시간차($\pm \delta t$)를 결맞음시간(τ_c) 이내에서 미세하게 조정하기 위해서 BS1을 분해능이 0.5 μ m인 미세 이동기(micro translation stage)에 부착하였다.

광자를 검출하는 측정장치는 단일광자계수 모드로 동작하는 두 검출기(EG&G, single photon counting modules; SPCM-AQ-141-FC)와 광자계수장치(photon counting system)로 이루어져 있다. 두 검출기는 Si-APD로서 측정가능한 파장영역은 400~1060 nm이며, 700 nm에서 약 70%의 양자효율을 가지고 있다. DC +5 V의 전원이 공급된 APD에 빛이 입사하면 SPCM으로부터 높이 +2 V와 폭 9 ns의 전압펄스가 발생하고, 이렇게 발생한 펄스는 CAMAC으로 동작하는 광자계수장치(LeCroy 1434A)에서 Discriminator(LeCroy 821)와 Scaler(LeCroy 2551), 그리고 동시계수기(Coincidence; LeCroy 622)를 거치면서 일정한 측정시간동안 검출기에서 발생하는 광전자들을 헤아리게 된다. 동시계수기는 두 검출기에 입사하는 광자들의 시간간격이 분해시간 6.38 ns이내에서 동시에 측정될 때에만 동시계수 신호를 발생시키도록 되어 있다.

그림 1에서 보인 바와 같이 PDC에서 발생하는 signal과 idler 광자들의 경로에는 여러 가지 다른 진동수의 광자들이 넓은 스펙트럼 영역에서 발생하므로, 본 실험에서 이용한 두 광자의 파장 640 nm와 660 nm에 해당하는 각진동수 ω_1 와 ω_2 는 간섭계의 두 경로에 모두 있을 수 있다. 즉, signal의 경로에 ω_1 에 해당하는 광자가 있으면 idler의 경로에는 ω_2 에 해당하는 광자가 있게 되고, 또한 signal의 경로에 ω_2 의 광자가 있으면 idler의 경로에는 ω_1 의 광자가 있게 된다. 따라서 이러한 두 광자의 상태는 진동수가 서로 다른 광자쌍의 중첩상태 즉, 진동수 얽힘상태로 존재하게 된다. 실제로 PDC에서 서로 다른 진동수에 해당하는 광자의 굴절률이 서로 달라서 그 방출각도가 서로 다르지만(그림 2) 그림 5의 실험장치에서는 간단하게 하기 위해서 같은 경로로 나타내

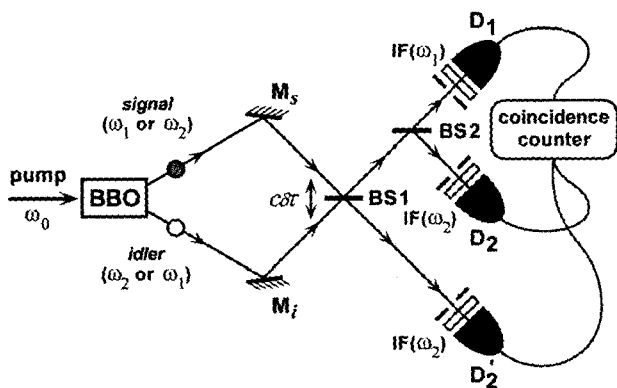


그림 5. 진동수 얽힘상태 광자쌍(ω_1, ω_2 또는 ω_2, ω_1)의 중첩에서 간섭현상을 관측하기 위한 실험장치도.

었다.

본 실험에서는 BS1이 대칭적으로 놓인 위치에서 벗어났을 때 BBO에서 BS1에 이르는 광자의 경로차이($\omega_1 - \omega_1'$, 또는 $\omega_2 - \omega_2'$) 또는 이에 대응하는 시간차이가 하향변환된 빛의 결맞음 시간 τ_c 보다 짧아야만 간섭효과를 관측할 수 있다. 먼저 BBO를 투과하는 펄프빔의 진행방향에 대해서 대칭적으로 발생하는 650 nm의 광자쌍을 이용하여 두 광자의 경로차가 없을 때 BS1의 출구에 놓인 두 검출기의 동시계수가 최소가 되는 위치를 결정하였다.^[15-17] 이 과정에서는 그림 5의 두 검출기 앞에 투과파장이 650 \pm 5 nm인 간섭필터를 부착하였고 BS2는 설치하지 않았다. 그 다음 본 실험으로 두 검출기 D_1 과 D_2 앞에 중심파장이 각각 640 nm와 660 nm인 간섭필터를 부착한 후 $c\delta t$ 의 변화에 따른 동시계수를 측정하고, BS2를 추가적으로 설치하여 D_1 과 D_2 의 동시계수를 측정하였다.

IV. 결과 및 논의

그림 6(a)는 BS1의 이동거리 $c\delta t$ 의 변화에 따라 측정된 두 검출기 D_1 과 D_2 의 동시계수를 나타낸 것이다. 그래프에서 가로축은 BS1의 위치(위)와 그에 대응하는 두 광자의 도달 시간차(아래)를 나타내고, 세로축은 1초 간격으로 측정된 동시계수(왼쪽)와 동시계수 측정확률(오른쪽)을 나타낸다. 실험에서 시간차 δt 를 변화시키기 위해서 BS1의 위치를 변화시켰으므로 실제로 시간차는 BS1의 이동거리에 따른 두 광자의 광경로 차이의 약 2배가 된다. $\delta t \geq \tau_c$ 인 조건에서 동시계수는 약 3100/sec, 그리고 단일계수는 각각 약 45632/sec와 87605/sec이었고, 이때 두 검출기가 서로 다른 파장의 광자를 동시에 측정할 확률은 25%가 된다. 본 실험에서 BBO에서 발생한 진동수 얽힘상태의 두 광자는 ω_1 의 광자가 signal 경로에 있고 ω_2 의 광자가 idler 경로에 있을 확률과 ω_2 가 signal 경로에 있고 ω_1 이 idler 경로에 있을 확률이 각각 50%로 중첩된 상태에 있다. 따라서 BS1의 투과율과 반사율이 50/50인 경우, D_1 이 signal 광자 ω_1 을 측정하고 D_2 이 idler 광자 ω_2 를 측정할 확률(반사-반사의 경우)과 D_1 이 idler 광자 ω_1 을 측정하고 D_2 이 signal 광자 ω_2 를 측정할 확률(투과-투과의 경우)이 각각 12.5%가 된다.

그래프에서 BS1의 위치가 대칭적인 위치에 놓여 있어서 $\delta t = 0$ 인 경우에는 동시계수가 최소가 되는 것을 볼 수 있다. PDC에서 발생한 두 광자의 파장이 동일한 경우, BS1에 입사하는 두 광자의 시간차가 없을 때 동시계수가 최대가 되는 Hong-Ou-Mandel(HOM) 간섭효과는 다양한 실험에서 많이 보고된 바가 있다. HOM 효과는 BS1의 출구에서 두 광자가 쌍을 이루는 광자의 공간적인 뭉침효과(bunching effect)라는 광자의 보손(boson)적인 성질을 검증해주는 대표적인 실험일 뿐만 아니라, 최근 양자정보에서 핵심적인 부분을 차지하는 Bell-상태 측정의 원리가 된다. 하지만 본 실험에서와 같이 두 광자의 파장이 20 nm의 차이가 있고 또한 두 광자

의 스펙트럼이 서로 겹쳐지지 않는 경우에도 두 광자의 공간적인 뭉침효과는 일어난다. 이는 근본적으로 두-광자 간섭현상이 BS1에 도달하는 두 광자가 취할 수 있는 경로에 대한 확률진폭 즉, 간섭계에서 원리적으로도 구별할 수 없는 두 광자의, 반사-반사와 투과-투과에 해당하는, 양자역학적인 확률진폭들이 서로 소멸간섭을 일으키기 때문이다.

본 실험에서 이용한 640 nm와 660 nm의 파장에 해당하는 광자들은 펄프빔의 진행방향으로부터 각각 약 2.9°와 3.0°을 이루면서 발생하며, BBO 결정으로부터 BS1까지의 거리는 약 1.5 m이다. BBO 결정에 입사하는 레이저빔의 직경은 약 1 mm이고 발산각이 0.5 mrad이므로 BS에 도달하는 두 광자의 스펙트럼은 공간적으로 겹쳐지지 않는다는 것을 알 수 있다. 또한 본 실험에서 사용된 한 쌍의 간섭필터 $IF(\omega_1)$ 과 $IF(\omega_2)$ 의 투과 파장의 차이는 약 20 nm이고 각각의 필터의 투과 파장폭이 중심파장으로부터 ± 5 nm이므로 검출기에 입사하는 두 광자는 스펙트럼으로도 서로 겹쳐지지 않는다.

그래프에서 \circ 은 두 검출기에서 측정된 동시계수를 나타내고, 실선은 640 nm와 660 nm의 파장을 갖는 두 광자에 대해서 이론적으로 예상되는 곡선이다. 그리고 점선은 두 광자의 파장이 동일할 때 보여지는 전형적인 HOM 간섭무늬의 형태이다.^[15,16] 실험에 사용된 두 간섭필터의 투과 진동수폭은 각각 $\Delta\nu_1 \approx 7.3 \times 10^{12}$ Hz, $\Delta\nu_2 \approx 6.9 \times 10^{12}$ Hz이고, 평균적인 진동수폭은 $\Delta\nu \approx 7.1 \times 10^{12}$ Hz이므로, 이로부터 결정되는 광의 결맞음시간은 약 141 fs임을 알 수 있는데, 이는 그래프의 반치폭(FWHM)에 해당한다. 또한 두 광자의 진동수 차이 $\nu_1 - \nu_2$ 는 약 1.42×10^{13} Hz이고 이에 대응하는 간섭무늬의 주기는 약 70 fs로써, 이는 BS1의 이동거리인 약 10.6 μ m의 2배에 해당하며 실험결과와 잘 일치한다.

그림 6(b)는 BS1의 한 쪽 출구에 빔분할기 BS2를 추가적으로 설치하여 $c\delta\tau$ 의 변화에 따른 D_1 과 D_2 의 동시계수를 측정한 결과이다. 여기서 검출기 D_2 앞에는 중심파장이 660 nm인 간섭필터를 설치하였다. $\delta\tau \geq \tau_c$ 인 조건에서 동시계수는 약 686/sec, 단일계수는 각각 약 35112/sec와 42732/sec 이었고, 두 검출기는 6.25%의 확률로 서로 다른 파장의 광자를 동시에 측정하게 된다. $\delta\tau = 0$ 일 때는 그림 6(a)와는 달리 동시계수가 최대가 되는 것을 볼 수 있다. 이는 BS1에 도달하는 두-광자 확률진폭들의 간섭으로 인해 두 광자가 50%의 확률로 두 검출기 D_1 과 D_2 가 있는 쪽으로 또는 반대쪽으로만 빠져나가기 때문이다. 이러한 경우 두 검출기는 12.5%의 확률로 두 광자를 동시에 측정하게 된다.

표 1은 두 검출기 D_1 과 D_2' 그리고 D_1 과 D_2 로 서로 다른 진동수(ω_1^i 와 ω_2^j 또는 ω_1^i 와 ω_2^j)의 광자들을 동시에 측정할 확률을 BS1에 도달하는 두 광자의 시간차가 결맞음 시간보다 클 때($\delta\tau > \tau_c$)와 시간차가 없을 때($\delta\tau = 0$)의 두 가지 경우에 있어서 보인 것이다. R과 T는 BS1에서 광자들의 반사와 투과를 나타낸 것이며, 위첨자 s와 i는 signal과 idler 광자를 나타낸다. 두 검출기 D_1 과 D_2 를 이용한 동시계수 측정

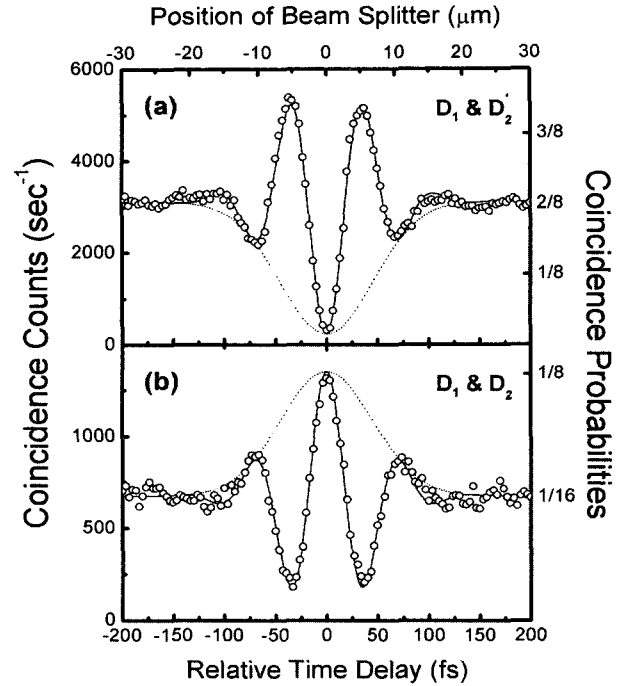


그림 6. BS1에 도달하는 두 광자의 시간차(또는 BS1의 위치변화)에 따른 두 검출기 (a) D_1 과 D_2' , (b) D_1 과 D_2 의 동시계수. 오른쪽 세로축은 두 검출기가 두 광자를 동시에 측정할 확률을 나타낸 것이다. \circ 은 실험치, 실선은 이론적으로 예상되는 곡선, 그리고 점선은 두 광자의 파장이 동일할 때 보여지는 간섭무늬의 형태이다.

표 1. $\delta\tau > \tau_c$ 와 $\delta\tau = 0$ 인 경우 두 검출기의 동시계수 측정확률

		$\delta\tau > \tau_c$	$\delta\tau = 0$	
D_1 & D_2'	$P = \frac{1}{4}$	$T(\omega_1^i) \ \& \ T(\omega_2^s)$ $R(\omega_1^i) \ \& \ R(\omega_2^s)$	$P = 0$	
D_1 & D_2	$P = \frac{1}{16}$	$R(\omega_1^i) \ \& \ T(\omega_2^s)$ $T(\omega_1^i) \ \& \ R(\omega_2^s)$	$P = \frac{1}{8}$	$R(\omega_1^s) \ \& \ T(\omega_2^i)$ $T(\omega_1^s) \ \& \ R(\omega_2^i)$

과정에서는 BS2를 추가적으로 설치했기 때문에 두 광자의 동시계수 측정확률은 전체적으로 $\frac{1}{4}$ 만큼 감소한다.

V. 결 론

본 논문에서는 매개하향변환에서 발생한 640 nm와 660 nm 파장에 해당하는 광자쌍으로 진동수 얽힘상태를 만들고 간섭계에서 두-광자의 경로와 연관된 확률진폭들의 중첩으로부터 양자간섭효과를 관측하였다. 두 검출기 앞에 각각의 광자의 파장에 대응하는 간섭필터를 설치하고 BS1의 위치를 대칭적인 위치로부터 약 $\pm 30 \mu$ m만큼 이동시킬 때까지 경로차(또는 시간차)에 따른 동시계수가 두 광자의 진동수 차에

따라 변하는 간섭효과를 나타내었다. BS1이 대칭적으로 놓여있고 두 검출기가 BS1의 서로 다른 두 출구에 놓여있을 때는 동시계수가 감소하는 두-광자 소멸간섭이 관측되고, 반면에 한 쪽 출구에만 설치하였을 때는 동시계수가 증가하였다. 특히 진동수가 다른 두 광자가 BS1에서 공간적으로 중첩되지 않고 또한 시간적으로 동시에 입사하지 않는 경우에도 간섭효과를 관측할 수 있었다. 이는 두-광자의 간섭이 진동수가 다른 두 광자 사이의 간섭이 아니라 진동수 얽힘상태에 있는 두-광자의 경로에 대한 확률진폭의 간섭이라는 것을 보여주었다.

감사의 글

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

참고문헌

[1] A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, "Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?," *Phys. Rev.*, vol. 47, pp. 777-780, 1935.
 [2] E. Schrödinger, "Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik," *Naturwissenschaften*, vol. 23, pp. 807-812; 823-828; 844-849, 1935; '얽힘'이란 말은 독일어로 된 Schrödinger의 논문에서 'Verschränkung'이란 단어를 영어로 번역하는 과정에서 'Entanglement'로 표기했다.
 [3] D. Bohm, *Quantum Theory*, (Prentice-Hall, New York, 1951).
 [4] S. J. Freedman and J. F. Clauser, "Experimental test of local hidden-variable theories," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 28, no. 14, pp. 938-941, 1972.
 [5] 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.
 [6] D. C. Burnham and D. L. Weinberg, "Observation of

simultaneity in parametric production of optical photon pairs," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 25, no. 2, pp. 84-87, 1970.
 [7] L. Mandel, "Quantum effects in one-photon and two-photon interference," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 71, no. 2, pp. S274-S282, 1999.
 [8] A. Zeilinger, "Experiment and the foundations of quantum physics," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 71, no. 2, pp. S288-S297, 1999.
 [9] M. A. Horne, A. Shimony, and A. Zeilinger, "Two-particle interferometry," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 62, no. 19, pp. 2209-2212, 1989.
 [10] J. G. Rarity and P. R. Tapster, "Experimental violation of Bell's inequality based on phase and momentum," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 64, no. 21, pp. 2495-2498, 1990.
 [11] J. G. Rarity and P. R. Tapster, "Two-color photons and nonlocality in fourth-order interference," *Phys. Rev. A*, vol. 41, no. 9, pp. 5139-5146, 1990.
 [12] Heonoh Kim, Jeonghoon Ko, and Taesoo Kim, "Two-particle interference experiment with frequency-entangled photon pairs," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 20, no. 4, pp. 760-763, 2003.
 [13] Heonoh Kim, Jeonghoon Ko, and Taesoo Kim, "Quantum-eraser experiment with frequency-entangled photon pairs," *Phys. Rev. A*, vol. 67, no. 5, 054102, 2003.
 [14] Z. Y. Ou and L. Mandel, "Observation of spatial quantum beating with separated photodetectors," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 61, no. 1, pp. 54-57, 1988.
 [15] 김현오, 고정훈, 김태수, "진동수가 서로 다른 얽힘상태 광자쌍의 4차 간섭," *한국광학회지*, 제 13권 4호, pp. 308-313, 2002.
 [16] 김현오, 고정훈, 박구동, 김태수, "광자쌍을 이용한 Hanbury Brown-Twiss 실험," *한국광학회지*, 제 14권 2호, pp. 130-134, 2003.
 [17] 김현오, 신하림, 박구동, 김태수, "광자쌍의 뭉침현상이 단일계수에 미치는 영향," *한국광학회지*, 제 14권 6호, pp. 573-577, 2003.

Interference experiment using entangled photons with wavelengths of 640 nm and 660 nm

Heonoh Kim[†], Harim Shin, Wonsik Kim, Osung Kwon, and Taesoo Kim

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

[†]E-mail: heon-oh@etri.re.kr

(Received May 31, 2004, Revised manuscript September 9, 2004)

We present a quantum interference experiment with frequency-entangled pairs of photons with wavelength of 640 nm and 660 nm produced in the process of parametric down-conversion. When photon pairs in different angular frequencies ω_1 and ω_2 are registered by two detectors the coincidence counts exhibits a two-photon fringe as a function of relative time delay $\delta\tau$ of two photons within the coherence time depending on the arrangement of the detector pairs.

OCIS Codes : 030.5260, 190.4410, 230.5160, 270.0270.