

진동수가 서로 다른 얹힘상태 광자쌍의 4차 간섭

김현오 · 고정훈 · 김태수[†]

울산대학교 수학 및 물리기술학부

⊕ 680-749 울산시 남구 무거2동 산29번지

(2002년 3월 5일 받음, 2002년 6월 12일 수정본 받음)

매개하향변환과정에서 동시에 발생한 서로 다른 진동수의 광자쌍을 이용한 4차 간섭실험에서 비고전적인 맥놀이 효과를 측정하였다. 각진동수가 각각 ω_1 과 ω_2 인 광자쌍을 빔분할기에서 중첩시키고, 빔분할기의 두 출구에 놓인 두 검출기로 동시계수할 때, 두 광자가 빔분할기에 도달하는 시간 간격에 따라 $\cos(\omega_1 - \omega_2)$ 의 함수로 동시계수의 변화를 나타내었다. 두 광자의 파장 차이가 41 nm일 때 측정된 맥놀이 진동수 $(\omega_1 - \omega_2)/2\pi$ 는 0.29×10^{14} Hz이었고, 진동수 차이에 해당하는 두 광자의 시간간격은 34.82 fs로 측정되었다.

주제어 : spontaneous parametric down-conversion, entangled state photon pairs, coincidence counting, quantum beating, fourth-order interference

I. 서 론

간섭은 일반적으로 고전적인 파동현상으로 받아들이지만, 광자수가 적을 때나 공간적으로 서로 떨어져 있는 두 검출기로 광자들간의 상관관계를 측정할 때는 비고전적인(양자적) 효과가 두드러진다.^[1-5] 이러한 경우에 관측된 간섭효과는 공간적으로 중첩된 두 빔의 간섭이라기 보다는 광자들이 검출기에 도달하는 구별이 불가능한 경로들에 대한 확률진폭들의 간섭으로 해석된다. 따라서 서로 다른 광원에서 나온 광자들일지라도 측정과정에서 광자들의 경로가 구별이 되지 않으면 간섭을 관측할 수가 있다. 그렇다면 진동수가 서로 다른 광자들을 적절히 중첩시켰을 때도 광자의 경로가 구별되지 않을 경우 간섭효과를 관측할 수가 있을 것인가? 이에 대한 대답은 ‘예’이다. 물론 중첩된 빔의 진동수 차이가 측정장치의 분해능을 벗어난다면 검출기에서 시간에 따른 세기의 변화를 실제적으로 관측할 수는 없다. 하지만 양자역학적인 상관관계가 있는 광자들의 중첩에서 두 검출기를 이용하여 2차 상관관계(전기장에 대해서는 4차)를 측정하면 가능해진다.^[6-10]

본 논문에서는 서로 다른 진동수를 갖는 광자들의 중첩에서 일어나는 비고전적인 맥놀이 효과를 두 광자의 경로차에 따라 공간적으로 고정된 간섭무늬로 측정하였다. 맥놀이(beat)란 진동수가 약간 다른 두 파동이 서로 중첩될 때, 두 파동의 간섭에 의해, 중첩된 파동의 진폭이 주기적으로 변하는 현상을 말한다. 이 때 중첩된 파동의 진동수는 시간에 따라 아주 빠르게 변하지만 합성 진폭은 각 파동의 진동수의 차이(맥놀이 진동수)에 따라 주기적으로 천천히 변한다.

음파(acoustic wave)의 경우에, 가청주파수 이내에서 두 파동의 진동수가 비슷한 경우 진폭이 주기적으로 변하는 소리의 세기변화를 직접 감지할 수 있다. 하지만 진동수 차이가 너무

커서 사람의 귀로 구별할 수 있는 범위를 넘어서면 맥놀이는 일어나더라도 아주 짧은 주기로 진동하기 때문에 실제로 감지할 수는 없다. 전자기파동인 빛의 경우에는, 가시광 영역의 진동수는 약 $4.3 \sim 7.5 \times 10^{14}$ Hz정도이고, 이 범위 내에서 파장이 1 nm만 차이가 나도 진동수 차이는 대략 10^{12} Hz정도이기 때문에, 사람의 눈으로 맥놀이를 관측한다거나 광 검출기를 이용해서 직접적으로 맥놀이를 관측하는 것은 불가능하다. 대부분의 광검출기의 반응시간 또는 분해시간은 10^{-9} sec정도의 범위이고, 최근에 비고전적인 광의 간섭현상을 측정하는데 많이 이용되는 단일광자 검출장치의 경우에도 시간분해능(single photon timing resolution)은 10^{-10} sec정도이므로 시간적으로 10^2 배 이상 빠른 맥놀이는 직접적으로 관측이 불가능하다.

그러나 얹힘상태(entangled state)의 광자쌍과 두 검출기를 이용하여 이들의 상관관계를 측정하는 동시계수법을 이용하면 검출기의 분해시간보다 훨씬 짧은 영역에서 일어나는 비고전적인 맥놀이 현상을 관측할 수가 있다. 얹힘상태란 둘 또는 그 이상의 입자들의 상태가 각각의 단일입자 상태들(single-particle states)의 곱으로 단순하게 표현될 수 없는 상태를 일컬으며,^[11] 특히 두-입자 얹힘상태(two-particle entangled state)의 대표적인 예로는 1935년 EPR의 논문에서 처음으로 언급되었고,^[12] 그 후에 Bohm의 스핀이 1/2인 한쌍의 전자사이에 존재하는 스핀의 상관관계를 도입하여 표현하였다.^[13] 얹힘상태에 있는 입자들은 두 입자 중에서 어느 한 입자의 특정한 물리량(예를 들면 위치, 운동량 또는 스핀)을 측정하는 동시에 다른 한 입자의 물리량은 1의 확률로 특정한 값으로 결정되어져 버리는 특성을 갖는다. 얹힘상태는 최근에 양자역학의 타당성을 검증하는 실험이나 양자정보(quantum information)의 분야에 잠재적인 응용가능성을 검증하기 위해서 많이 연구되고 있다.^[14,15] 특히 비국소적인 상관관계(공간적으로 서로 멀리 떨어져 있는 검출기에서 측정된 결과들이 서로 연관성을 나타내는 것)를 갖는 광자쌍은 광학적인 간섭실험에서 나

[†]E-mail: tskim@mail.ulsan.ac.kr

타나는 비고전적인 현상들을 관측하기 위해서 많이 이용되었 다.^[1-5, 7] 이러한 얹힘상태의 광자쌍은 짧은 파장의 레이저광과 비선형 매질과의 상호작용에서 발생하며, 비선형 매질에서 에너지 보존과 운동량 보존에 해당하는 위상조화조건이 만족될 때 효율적으로 일어난다.

본 논문에서는 진동수(또는 파장)가 서로 다른 광자쌍을 이용한 간섭실험에서 관측된 비고전적인 4차 간섭효과를 보고하고자 한다. 두 검출기 앞에 투과 진동수(또는 파장)가 서로 다른 간섭필터를 부착하고 두 광자의 경로차에 따른 두 검출기의 동시계수의 변화를 측정하였다. 동시계수의 변화는 검출기 앞에 설치한 두 간섭필터의 투과 진동수 차이인 맥놀이 진동수의 cosine 함수로 나타났으며, 이는 맥놀이 진동수의 차이가 검출기 분해시간의 약 10³배 이상인 조건에서도 비고전적인 맥놀이 현상이 관측될 수 있다는 것을 보여준다. 이와 같이 고전적으로 설명될 수 없는 4차 간섭 현상을 두 광자의 얹힘(entanglement)과 두 광자 동시계수의 관점에서 논의하였다.

II. 얹힘상태 광자쌍의 4차 간섭

결맞음 상태의 레이저빔을 $\chi^{(2)}$ 의 비선형 계수를 갖는 매질에 입사시켰을 때 짧은 파장의 펌프광자 하나가 긴 파장을 갖는 한 쌍의 광자(a pair of photons)로 자발적으로 변환되는 과정을 매개하향변환(Spontaneous parametric down-conversion: PDC)이라고 한다.^[16] PDC에서 발생한 얹힘상태에 있는 두-광자(signal과 idler)의 상태는 일반적으로

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

와 같이 표현된다. 여기서 ω_p 는 펌프빔의 각진동수, ω_s 는 signal 광자, $\omega_p - \omega_i$ 는 signal과 쌍을 이루는 idler 광자의 각진동수를 나타내고, $\phi(\omega_s, \omega_i)$ 는 하향변환된 빔의 발생확률에 관련된 가중함수(weight function)이다. 식(1)의 표현을 상호작용 해밀토니안(interaction Hamiltonian)으로 나타낼 때는, 위상조화조건($\omega_s + \omega_i = \omega_p$, $\mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i = \mathbf{k}_p$) 만족할 때, 매질에 입사하는 펌프광자의 소멸에 대해서 signal과 idler 광자의 발생확률은 델타함수 [$\delta(\omega_s + \omega_i - \omega_p)$]로 주어진다. 따라서 PDC에서 ω_s 와 ω_i 는 임의로 주어지지만 $\omega_s + \omega_i = \omega_p$ 의 조건에서 식(1)의 가중함수 $\phi(\omega_s, \omega_i)$ 는 최대값을 갖는다.

그림 1과 같이 PDC에서 동시에 발생한 진동수가 서로 다른 두 광자(signal과 idler)가 범분할기(BS)의 두 입구에 입사할 때 입사광의 상태는 signal의 경로와 idler 경로에는 각각 광자가 하나씩 있는 두-광자 상태(two-photon Fock state) $|1_{signal}\rangle |1_{idler}\rangle$ 가 된다. BS에서 중첩 된 후 두 검출기에 입사 할 때, 두 검출기 D_1 과 D_2 에서 전기장 연산자 \hat{E}_1 과 \hat{E}_2 는 BS에 입사하는 signal과 idler 광자에 대응하는 전기장 연산자 \hat{E}_s 와 \hat{E}_i 를 이용하여

$$\begin{aligned} \hat{E}_1^{(+)}(t) &= \sqrt{T} \hat{E}_s^{(+)}(t-t') + i\sqrt{R} \hat{E}_i^{(+)}(t-t'+\delta\tau) \\ \hat{E}_2^{(+)}(t) &= \sqrt{T} \hat{E}_i^{(+)}(t-t') + i\sqrt{R} \hat{E}_s^{(+)}(t-t'-\delta\tau) \end{aligned} \quad (2)$$

와 같이 표현할 수 있다. 여기서 R 과 T 는 범분할기의 반사율

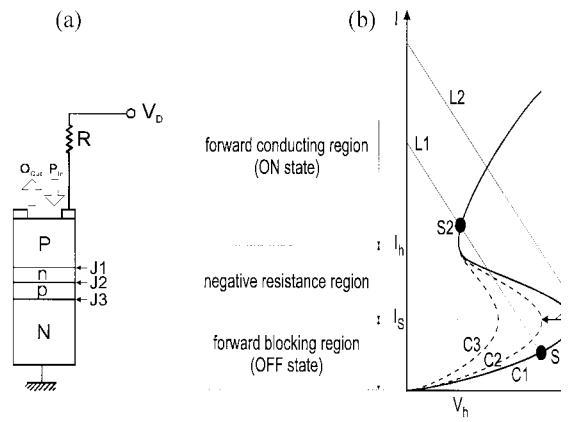


그림 1. 각진동수가 각각 ω_1 과 ω_2 인 두 광자의 간섭. 진동수 얹힘상태의 signal(E_{signal})과 idler(E_{idler}) 빔이 범분할기(BS)의 두 입구에 입사하여 서로 중첩될 때, 검출기 D_1 에 입사하는 전기장 E_1 과 D_2 에 입사하는 E_2 는 BS에 도달하는 두 광자의 시간차에 따라 두-광자 결합확률에서 비고전적인 4차 간섭을 나타낸다.

과 투과율이고, t' 은 비선형 결정으로부터 두 검출기에 이르는 signal과 idler 광자의 진행시간이다. 그리고 $\pm\delta\tau$ 는 광원에서 범분할기까지 두 광자의 진행시간이 같아지는 범분할기의 위치로부터 미세한 범위를 나타내며, 그 범위는 하향변환된 광자의 결맞음 길이 이내이다. 두 검출기 앞에 진동수의 투과함수가 각각 $F_1(\omega)$ 과 $F_2(\omega)$ 인 두 간섭필터(interference filter: IF) IF_1 과 IF_2 를 설치하면, 두 검출기에 입사하는 광자에 대한 표현은 식 (2)와 두 입사 광자에 대한 진동수 연산자 $\hat{f}_1(\omega)$ 와 $\hat{f}_2(\omega)$ 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{E}_1^{(+)}(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty [\sqrt{T} \hat{f}_1(\omega) e^{-i\omega(t-t')} + i\sqrt{R} \hat{f}_2(\omega) e^{-i\omega(t-t'+\delta\tau)}] \\ &\quad \times F_1(\omega) d\omega \\ \hat{E}_2^{(+)}(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty [\sqrt{T} \hat{f}_2(\omega) e^{-i\omega(t-t')} + i\sqrt{R} \hat{f}_1(\omega) e^{-i\omega(t-t'-\delta\tau)}] \\ &\quad \times F_2(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (3)$$

임의의 측정시간 t 에 검출기 D_1 에서 하나의 광자(signal 또는 idler)를 검출하고 $t+\tau$ 에 다른 검출기 D_2 에서 그 쌍에 해당하는 다른 하나의 광자(idler 또는 signal)를 검출할 때 두 검출기에서 동시에 검출되는 광자의 수는 결합확률(joint probability) $P_{12}(\tau)$ 에 의해 주어진다.^[17]

$$P_{12}(\tau) = K_{12} \langle \Psi | \hat{E}_1^{(-)}(t) \hat{E}_2^{(-)}(t+\tau) \hat{E}_2^{(+)}(t+\tau) \hat{E}_1^{(+)}(t) | \Psi \rangle \quad (4)$$

여기서 K_{12} 는 두 검출기의 측정효율이다. 두 검출기 앞의 간섭필터는 진동수의 함수로 주어지지만, 진동수와 시간은 서로 Fourier 변환관계에 있으므로, 필터의 복소 진동수 성분을 시간의 함수로 Fourier 변환을 한 후에 동시계수 장치의 분해시간(두 광자의 결맞음 시간보다는 약 10⁶배 정도 길다)의 범위에서 적분을 취하면, 임의의 측정시간동안 두 검출기에서 동

시계수율 R_C 는

$$R_C = C(T^2 + R^2) \left[1 - \frac{2TR}{T^2 + R^2} \exp\left(-\frac{\sigma^2 \delta\tau^2}{2}\right) \cos(\omega_1 - \omega_2) \delta\tau \right] \quad (5)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 C 는 검출기의 효율 및 측정 조건을 포함하는 임의의 상수이고, σ 는 두 검출기 앞에 놓여 있는 간섭필터의 투과 진동수의 반치폭(약 10^{13} Hz)을 나타낸다. 식 (5)에서 보는 바와 같이 $\delta\tau=0$ 일 때 R_C 는 0이 된다. 이러한 현상은 빔분할기를 통과한 광자들의 상태함수로도 해석이 가능하다.

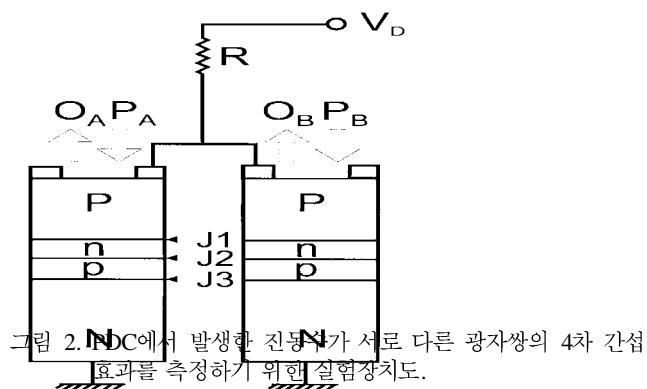
PDC 과정에서 BBO에 입사하는 하나의 펌프 광자에 대해서 한 쌍의 하향변환 광자들(signal, idler)이 발생하기 때문에, 이러한 경우 BS의 양쪽 입구에 입사하는 광자의 상태는 signal과 idler 광경로에 각각 광자가 하나씩 있는 상태($|\Psi_m\rangle = |1_{signal}, 1_{idler}\rangle$)가 되고, BS의 위치가 대칭적인 위치(두 광자의 경로차가 없는)에 있을 경우, BS의 출구에서 광자의 상태는

$$|\Psi_{out}\rangle = (R-T)|1_1, 1_2\rangle + i(2RT)^{1/2}|2_1, 0_2\rangle + i(2RT)^{1/2}|0_1, 2_2\rangle \quad (6)$$

와 같이 된다. 여기서 R 과 T 는 BS의 반사율과 투과율이고, 아래첨자 1과 2는 BS의 두 출구를 나타낸다. 만약 BS의 반사율과 투과율이 각각 50:50인 경우, $|1_1, 1_2\rangle$ 의 상태는 소멸 간섭에 의해 사라지고, BS의 두 출구에는 항상 두 광자가 쌍을 이루는 상태가 된다. 이러한 경우 두 검출기에서는 동시에 발생한 두 광자가 측정장치의 분해시간 이내에서 동시에 검출되는 동시계수는 없어지고 결과적으로 입사하는 두 광자는 BS에서 항상 쌍을 이루어 D_1 또는 D_2 로만 향하게 된다. 따라서 두 검출기 D_1 과 D_2 로 BS에 동시에 입사하는 광자쌍을 측정할 경우 동시계수는 0이 된다.^[18]

III. 실험

PDC에서 발생한 두 광자의 간섭에서 맥놀이 효과를 측정하기 위한 장치를 그림 2에서 나타내었다. 325 nm의 단일파장에서 연속적으로 발진하는 He-Cd 레이저빔을 5 mm×5 mm×7 mm 크기의 BBO(β -BaB₂O₄) 결정에 입사시키면, 입사하는 펌프 광자의 일부가 긴 파장의 signal과 idler 광자로 자발적으



로 변환된다. 이 과정에서 펌프빔의 진동수가 ω_0 , 변환된 두 광자의 진동수가 각각 ω_1 , ω_2 일 때, 위상조화조건을 만족하는 특정한 방향으로 두 광자는 동시에 발생된다. 따라서 펌프빔이 투과하는 BBO 결정의 뒷면에서는 원추형으로 하향변환이 일어나며, 아주 넓은 스펙트럼을 갖는다.

BBO 결정은 type-I의 위상조화조건을 만족하도록 절단(cutting)이 되어 있어서 펌프빔의 편광이 지면에 수직방향일 때 하향변환된 signal과 idler 광자들의 편광방향은 서로 같으며 지면에 평행한 방향이 된다. 실험에 사용한 펌프빔의 파장이 325 nm이므로 하향변환된 광자쌍의 파장이 650 nm에서 위상조화조건이 만족하도록 BBO 결정은 광축에 대해 36.6°를 이루도록 절단되었다. 동시에 발생한 signal과 idler 광자들은 두 거울 M_1 과 M_2 에서 반사된 후 빔분할기(BS)로 향하고, BS에서 중첩된 광자들은 간섭필터(IF)를 거쳐 두 검출기 D_1 과 D_2 로 입사하게 된다. 실험에서 BBO결정과 BS사이의 거리는 대략 1 m정도이다. BS는 입사하는 두 광자의 상태적인 경로차($\pm c\delta t$)를 조정하기 위해서 분해능이 0.5 μm인 미세 이동기(micro translation stage)에 부착하였다.

측정장치는 단일광자계수 모드로 동작하는 두 검출기와 광자계수장치(photon counting system)로 이루어져 있다. 두 검출기는 Si-APD로서 EG&G의 SPCM(single photon counting modules; SPCM-AQ-141-FC)이며, 측정이 가능한 파장영역은 400~1060 nm, 최대 양자효율은 700 nm파장 영역에서 70%정도이다. DC+5 V의 전원이 공급된 APD에 빛이 입사하면 SPCM으로부터 높이 +2 V와 폭 9 ns의 전압펄스가 발생하고, 이렇게 발생한 펄스는 CAMAC으로 동작하는 photon counting system(LeCroy 1434A)에서 Discriminator(LeCroy 821)과 Scaler(LeCroy 2551), 그리고 동시계수기(Coincidence; LeCroy 622)를 거치면서 일정한 측정시간동안 검출기에서 발생하는 광전자들을 헤아리게 된다. 동시계수기는 두 검출기에 입사하는 광자들의 시간간격이 분해시간(T_R) 6.38 ns 이내에서 동시에 측정될 때에만 동시계수 신호를 발생시키도록 되어 있다.

BBO 결정에서 빔분할기에 이르는 두 광자의 경로차가 없으면 동시에 발생한 두 광자의 경로를 원리적으로 구별할 수가 없기 때문에, 이러한 구별이 불가능한 두 광자가 취할 수 있는 두 경로에 대한 확률진폭들은 서로 간섭할 수 있고, BS의 위치를 이동시켜 두 광자의 경로차($\pm c\delta t$)를 변화시키면 두 검출기 D_1 과 D_2 의 동시계수 측정에서 4차 간섭무늬를 관측할 수 있다. PDC에서 동시에 발생한 signal과 idler 광자 사이에는 위상관계가 정의되지 않기 때문에 두 검출기 D_1 또는 D_2 의 단일계수에서는 두 광자 사이의 위상차에 의존하는 2차 간섭효과가 나타나지 않는다.

본 실험에서는 BBO에서 발생한 두 광자가 BS에 도달하는 광경로를 하향변환된 빔의 결맞음 시간 이내에서 일치시켜야 간섭효과를 관측할 수가 있다. 따라서 먼저 결정(BBO)을 투과하는 펌프빔의 진행방향에 대해서 대칭적으로 발생하는 650 nm의 광자쌍을 이용하여 두 광자의 경로차가 없을 때 동시계수가 최소가 되는 위치를 결정하였다. 이 과정에서는 그림 2의 두 검출기 앞에 중심파장이 650 nm이고 투과폭이 10 nm인 동일한 간섭필터를 부착하였고, BBO와 BS 사이의 두 광자의

경로에 추가적으로 지름이 약 2 mm인 조리개를 설치하였다. 그 다음으로 서로 다른 진동수의 광자쌍의 간섭에서 나타나는 맥놀이 효과를 관측하기 위해서, 두 검출기 앞에 650 nm의 간섭필터를 제거하고 중심파장이 각각 630.5 nm와 671 nm이고 투과폭이 약 10 nm인 간섭필터를 부착하였다. 650 nm의 광자쌍과 630.5 nm–671 nm의 광자쌍은 결정으로부터 방출되는 각도가 다르기 때문에 앞에서 설치한 조리개를 제거한 후 BS를 ±25 μm 정도 이동시키면서 두 검출기의 동시계수를 측정하였다.

IV. 결과 및 논의

본 실험에 앞서 2차 간섭효과를 확인하기 위해서 단일계수를 측정하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 두 광자의 경로차에 따른 각 검출기의 단일계수에서의 2차 간섭효과는 나타나

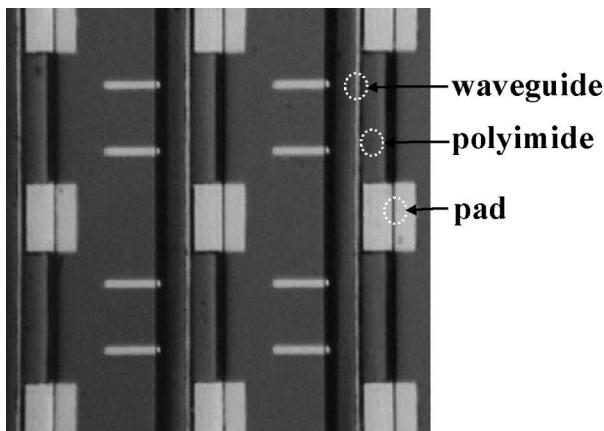


그림 3. 두 검출기 앞에 중심파장이 650 nm인 간섭필터를 부착했을 때 BS의 위치이동($\pm c\delta t$)에 따라 측정된 두 검출기의 단일계수. 두 광자는 위상관계가 정의되지 않기 때문에 두 광자의 경로차에 따른 간섭무늬를 보이지 않고 일정하게 유지된다.

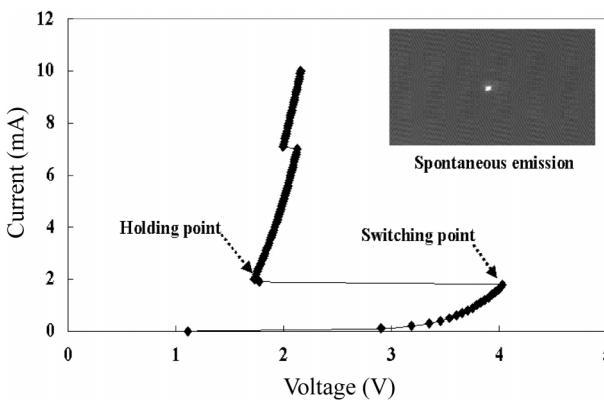


그림 4. 두 검출기 앞에 중심파장이 650 nm인 간섭필터를 부착했을 때 BS의 위치이동($\pm c\delta t$)에 따라 측정된 동시계수의 변화. Dip의 폭(FWHM)은 두 광자 파속의 길이 또는 두 광자 사이의 시간간격을 나타낸다. 동시계수에서 나타나는 간섭무늬의 선명도는 약 $V \approx 90\%$ 이다.

지 않으며, 이 경우 두 검출기에서 측정시간 동안의 평균적인 단일계수는 BS의 위치변화에 상관없이 $N_1=13976\pm79/\text{sec}$, $N_2=12799\pm67/\text{sec}$ 로 일정하게 유지되었다. 이는 PDC에서 동시에 발생한 signal과 idler 광자 사이에는 위상관계가 정의되지 않기 때문이다.

그림 4는 두 검출기 앞에 650 nm의 간섭필터를 설치하고 BS의 위치를 이동시키면서 측정한 동시계수를 나타낸 것이다. 동시계수에서 측정된 두 광자의 간섭무늬의 선명도(visibility)는 약 90%정도 되었다. 하향변환에서 발생한 광자쌍은 유한한 선폭을 갖기 때문에 BS의 위치이동($\pm c\delta t$)에 따라 dip은 어느 정도의 폭을 갖게 되는데, 이 폭은 하향변환된 빔의 결맞음 길이에 대응하며 실제 실험에서는 두 검출기 앞에 놓인 간섭필터에 따라 결정된다. 본 실험에 사용한 간섭필터의 투과 진동수 폭($\Delta\nu$)은 약 $7.1 \times 10^{12} \text{ Hz}$ 이고, 이에 대응하는 결

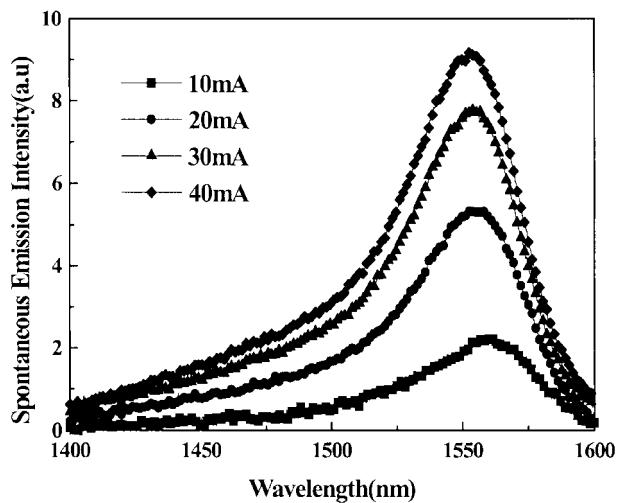


그림 5. 파장이 서로 다른 두 광자쌍의 4차 간섭에서 나타나는 공간적인 맥놀이 효과. 이 결과는 중심파장이 각각 630.5 nm, 671 nm인 간섭필터를 두 검출기에 부착하고 그림 3의 결과를 얻을 때와 동일한 실험을 반복해서 얻었다. (a)는 BS의 위치가 이동함에 따른 두 광자쌍의 위상변화 때문에 나타나는 동시계수의 변화이고, (b)는 두 검출기 D_1 과 D_2 에서 측정된 단일계수이다. 단일계수는 두 광자의 경로차에 따른 간섭무늬는 보이지 않고 일정하게 유지된다. 두 광자의 진동수 차이는 $|\omega_1 - \omega_2| = 1.8 \times 10^{14} \text{ rad/s}$ 이고, 동시계수의 선명도는 약 $V \approx 83\%$ 이다.

맞음길이($L_{coh.}=c/\Delta\nu$)는 약 $42.25\text{ }\mu\text{m}$, 결맞음시간은 약 141 fs 인데, 이는 실험결과와도 잘 일치한다. 그래프에서 가로축의 눈금은 실험에서 BS를 이동시킨 거리로서, 그림 2에서 보는 바와 같이 BS의 이동에 따라 BS에 도달하는 두 광자의 상태적인 시간차는 실제로 2배가 된다.

그림 5는 진동수(또는 파장)가 서로 다른 두 광자쌍의 4차 간섭에서 나타나는 공간적인 맥놀이 효과를 보인 것이다. 이 결과는 그림 3의 결과를 얻을 때 사용한 650 nm 의 간섭필터를 두 검출기로부터 제거한 후 중심파장이 각각 630.5 nm , 671 nm 인 간섭필터를 부착하고 그림 4의 결과를 얻을 때와 동일한 실험을 반복해서 얻었다. 이 과정에서 650 nm 의 광자쌍과 630.5 nm 와 671 nm 의 광자쌍은 결정으로부터 방출되는 각도가 다르기 때문에 결정과 BS 사이에 놓았던 조리개를 제거한 후 BS를 $\pm 25\text{ }\mu\text{m}$ 정도 이동시키면서 두 검출기의 동시계수를 측정하였다. 그림 5에서 (a)는 BS의 위치가 이동함에 따라 파장이 서로 다른 두 광자쌍의 위상변화 때문에 나타나는 동시계수의 변화이고, (b)는 두 검출기 D_1 과 D_2 에서 측정된 단일계수이다. 그림 3에서와 마찬가지로 단일계수는 두 광자의 경로차에 따른 간섭무늬를 보이지 않았으며, 동시계수에서 측정된 4차 간섭무늬의 설명도는 약 83%정도 되었다. 그림 5(a)의 그래프에서 점선은 식 (5)에 따라 이론적으로 기대되는 최대값을 나타낸 것이고, 실선은 설명도에 해당하는 0.83을 곱하여 나타낸 것이다. 간섭무늬의 설명도가 이론적으로 기대되는 값보다 적게 나오는 것은 주로 간섭계의 정렬이 완전하지 않기 때문이며, 두 간섭필터의 투과폭이 동일하지 않아도 설명도는 낮아진다. 그림 4에서 나타난 간섭효과와 마찬가지로 진동수가 서로 다른 두 광자의 간섭에서 나타나는 맥놀이 효과는 고전적으로는 설명할 수 없는 명백한 비고전적인 간섭효과이다. 이러한 효과는 또한 검출기 앞에 부착한 간섭필터의 두 진동수 폭이 서로 겹쳐지지 않음에도 불구하고 간섭계내에서 진동수가 서로 다른 얹힘상태의 두 광자가 선형중첩 상태에 있기 때문에 가능하다.

실험에서 두 검출기 앞에 설치한 두 간섭필터 IF_1 과 IF_2 의 투과 파장의 차이는 약 41 nm 이므로 스펙트럼으로 서로 겹쳐지지 않으며, 하향변환이 펌프빔을 중심으로 원추형으로 발생하기 때문에 진동수가 서로 다른 광자들은 공간적으로도 서로 중첩되지 않는다. BS가 대칭적인 위치로부터 $\pm c\delta\tau$ 만큼 좌우로 이동시켰을 때 signal과 idler 광자가 동시에 BS에 도달할 때는($\delta\tau=0$) 두 광자의 확률진폭들간의 소멸간섭에 의해 동시계수가 최소가 되지만, BS의 위치를 좌우로 이동시켜 $|\omega_1-\omega_2|\delta\tau$ 에서 $\pm\pi$ 까지 변화되면 추가된 위상변화가 반사와 투과에 의한 두 확률진폭의 위상차를 보정시키는 역할을 하므로 소멸간섭은 보강간섭으로 변하게 된다. 따라서 BS의 위치가 이동함에 따라 $c\delta\tau$ 가 연속적으로 변하므로 중첩된 광속의 위상이 주기적으로 변하고, 맥놀이 진동수에 해당하는 주기($2\pi/(\omega_1-\omega_2)$)에 따라 소멸간섭과 보강간섭이 교대로 일어나게 된다. 본 실험에서 관측된 맥놀이는 PDC에 발생한 두 광자의 진동수의 차이에 따라 일어나지만, 이러한 형태의 간섭효과는 진동수가 다른 서로 다른 광자들간의 간섭이 아니라 얹힘상태에 있는 두-광자들이 간섭계 내에서 취할 수 있는 가능한 경로에

대한 확률진폭들간의 간섭이다.

PDC에서 동시에 방출된 signal과 idler 광자의 경로에는 진동수가 각각 ω_1 과 ω_2 (또는 ω_2 와 ω_1)인 광자들이므로, 진동수 얹힘상태인 두-광자의 상태는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$|\Psi\rangle_{\omega_1, \omega_2} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\omega_1\rangle_s | \omega_2\rangle_i + |\omega_2\rangle_s | \omega_1\rangle_i) \quad (7)$$

즉 동시에 발생한 두-광자의 상태는 $|\omega_1\rangle_s | \omega_2\rangle_i$ 또는 $|\omega_2\rangle_s | \omega_1\rangle_i$ 의 상태의 중첩으로 표현된다.

얽힘상태에 있는 두 광자들이 간섭계 내에서 중첩될 때 얹힘상태에 있는 광자쌍들 사이에서는 간섭을 나타낸다. 이러한 현상은 근본적으로 하향변환에서 발생한 광자쌍의 얹힘 때문에 가능하며, 관측된 간섭효과는 두 검출기를 이용하는 동시에 계수에서 나타나는 4차 간섭이다. 비록 측정된 맥놀이 간섭무늬는 두 광자의 진동수 차이에 따라 일어나지만, 이것은 진동수가 다른 각각의 광자들간의 간섭이 아니라 얹힘상태에 있는 두-광자들간의 간섭으로 해석된다. 따라서 서로 다른 진동수의 광자쌍이 중첩상태에 있을 때 광자쌍이 취할 수 있는 구별할 수 없는 경로에 대한 확률진폭들은 언제든지 간섭을 나타낼 수 있다. 실험에 사용된 동시계수 측정장치의 분해시간(6.38 ns)이 두 광자의 진동수 차의 역수에 해당하는 시간(34.82 fs)보다 약 10^5 배정도 길다는 사실에도 불구하고 범분할기에 도달하는 광자쌍들은 항상 동시에 발생하기 때문에 동시계수 측정에서는 공간적으로 고정된 맥놀이 간섭무늬가 관측될 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 제1형의 위상조화조건을 만족하는 매개하향변환에서 동시에 발생한 진동수가 41 nm 만큼 다른 두 광자의 간섭에서 맥놀이 효과를 관측하였다. 실험을 위해서 간섭계를 구성하여 두 광자를 중첩시키고 두 검출기로 광자쌍을 동시에 계수하는 방법을 이용하였다. 먼저 두 검출기 앞에 투과 파장이 같은 650 nm 의 간섭필터를 부착하고 범분할기의 위치를 변화시켜 범분할기에 도달하는 두 광자의 시간간격에 따른 동시계수의 변화를 측정하였다. 측정된 동시계수 변화의 반비폭은 하향변환된 각각의 광자의 파속의 길이 또는 결맞음 길이를 나타내며 $42.25\text{ }\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 이는 또한 두 광자가 BS에 도달하는 시간간격에 해당되며 이는 검출기 앞에 설치한 간섭필터의 진동수 투과폭인 약 $7.1\times 10^{12}\text{ Hz}$ 에 의해 결정된다. 필터의 진동수 투과폭으로부터 결정된 결맞음시간은 약 141 fs 인데 이는 실험결과와도 잘 일치하였다.

다음으로 두 검출기 앞에 투과파장이 각각 630.5 nm 과 671 nm 인 간섭필터를 설치하고 범분할기의 위치를 두 광자의 도달 시간차가 없는 대칭적인 위치로부터 약 $\pm 25\text{ }\mu\text{m}$ 만큼 이동시키면서 경로차에 따른 동시계수의 변화를 측정하였다. 동시계수의 변화는 두 광자의 진동수차에 해당하는 주기로 $\cos(\omega_1-\omega_2)$ 의 함수로 나타났으며, 두 광자의 파장 차이가 41 nm 일 때 측정된 맥놀이 진동수는 $0.29\times 10^{14}\text{ Hz}$ 이었고, 진동수 차이에 해당하는 두 광자의 시간간격은 34.82 fs 로 측정되었다.

감사의 글

이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 연구비에 의하여 지원되었음(KRF-99-041-D00220).

참고문헌

- [1] C. K Hong, Z. Y. Ou, and L. Mandel, "Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 59, no. 18, pp. 2044-2046, 1987.
- [2] R. Ghosh and L. Mandel, "Observation of nonclassical effects in the interference of two photons," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 59, no. 17, pp. 1903-1905, 1987.
- [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, no. 1, pp. 50-53, 1988; Z. Y. Ou and L. Mandel, "Further evidence of nonclassical behavior in optical interference," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 62, no. 25, pp. 2941-2944, 1989.
- [4] 박정권, 박구동, 김태수, 홍순철, 나상균, 홍정기, "매개하향 변환과정에서 발생되는 광자쌍의 4차간섭현상," 새물리 제33권 1호, pp. 37-42, 1993.
- [5] 하 향, 김태수, 김희상, 홍정기, "두 광자 간섭실험에서 '양 자지우기' 효과," 새물리 제35권 3호, pp. 322-328, 1995.
- [6] Z. Y. Ou, E. C. Gage, B. E. Magill, and L. Mandel, "Observation of beating between blue and green light," *Optics Commun.*, vol. 69, no. 1, pp. 1-5, 1988.
- [7] 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; Z. Y. Ou and L. Mandel, "Determination of the average time interval between two photons with sub-optical period accuracy," *Optics News, December*, p. 23, 1988.
- [8] J. G. Rarity and P. R. Tapster, "Two-color photons and non-locality in fourth-order interference," *Phys. Rev. A*, vol. 41, no. 9, pp. 5139-5146, 1990.
- [9] Y. H. Shih, and A. V. Sergienko, "Observation of quantum beating in a simple beam-splitting experiment: Two-particle entanglement in spin and space-time," *Phys. Rev. A*, vol. 50, no. 3, pp. 2564-2568, 1994.
- [10] T. S. Larchuk, R. A. Compos, J. G. Rarity, P. R. Tapster, E. Jakeman, B. E. A. Saleh, and M. C. Teich, "Interfering entangled photons of different colors," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 70, no. 11, pp. 1603-1606, 1993.
- [11] E. Schrödinger, "Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik," *Naturwissenschaften*, vol. 23, pp. 807-812, 1935.
- [12] 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.
- [13] D. Bohm, *Quantum Theory*, (Prentice-Hall, New York, 1951).
- [14] D. Bouwmeester, J. W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter, and A. Zeilinger, "Experimental quantum teleportation," *Nature (London)*, vol. 390, no. 11, December, pp. 575-579, 1997; 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.
- [15] T. Jannewein *et al.*, "Quantum cryptography with entangled photons," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, no. 20, pp. 4729-4732, 2000; W. Tittel *et al.*, "Quantum cryptography using entangled photons in energy-time Bell states," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, no. 20, pp. 4737-4740, 2000.
- [16] D. N. Klyshko, *Photons and Nonlinear Optics*, (New York, Gordon and Breach, 1988) p. 325; 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.
- [17] R. J. Glauber, "The quantum theory of optical coherence," *Phys. Rev.*, vol. 130, no. 6, pp. 2529-2539, 1963.
- [18] Taesoo Kim, Jongtae Shin, Yang Ha, Heonoh Kim, Goodong Park, Tae Gon Noh, and Chung Ki Hong, "The phase-sensitivity of a Mach-Zehnder interferometer for the Fock state inputs," *Opt. Comm.*, vol. 156, pp. 37-42, 1998.

The fourth-order interference between entangled state photon pairs with different frequencies

Heonoh Kim, Jeonghoon Ko, and Taesoo Kim[†]

School of Mathematics and Applied Physics, University of Ulsan, Ulsan 680-749, KOREA
[†]E-mail: tskim@uou.ulsan.ac.kr

(Received March 5, 2002 ; revised manuscript received June 12, 2002)

One of the nonclassical effects in two-photon interference experiments, spatial quantum beating, is observed in fourth-order interference with pairs of photons produced by a spontaneous parametric down-conversion process. When photon pairs in different frequencies ω_1 and ω_2 are mixed together, and directed to two detectors, the coincidence counts exhibit a cosine modulation with difference frequency $|\omega_1 - \omega_2|$. The measured coincidence counts turned out to have an interference pattern with periodicity of $10.45 \mu\text{m}$ in position or 34.82 fs in time delay, which corresponds to the period $2\pi/|\omega_1 - \omega_2|$ for the beat frequency of $0.29 \times 10^{14} \text{ Hz}$.

Classification codes : OE.040, OS.010, QO.010, SM.020.