

광자쌍의 뭉침현상이 단일계수에 미치는 영향

김현오 · 신하림 · 박구동 · 김태수[†]

울산대학교 수학 및 물리기술학부

☎ 680-749 울산시 남구 무거2동 산29번지

(2003년 7월 2일 받음, 2003년 11월 10일 수정본 받음)

Hong-Ou-Mandel 간섭계를 이용한 광자쌍의 4차 간섭실험에서 두 광자의 뭉침이 단일계수에 미치는 영향을 조사하였다. 검출기의 단일광자 시간 분해능보다 짧은 시간간격으로 두 광자가 검출기에 입사할 때 하나의 검출기에서 측정되는 단일계수가 현저하게 줄어드는 변화를 확인하였다.

주제어 : parametric down-conversion, Hong-Ou-Mandel interferometer, photon bunching effect, coincidence counts, single counts.

I. 서 론

자발적인 매개하향변환 과정(Spontaneous parametric down-conversion; SPDC)에서 발생하는 광자쌍(photon pair, two-photon, 또는 biphoton)을 이용한 실험들이 1980년대 후반부터 다양한 방법으로 수행되었다.^[1,2] 이러한 광자쌍은 얽힘상태(entangled state)에 있기 때문에 초기에는 양자역학 이론을 근본적으로 검증하는 순수 학문적인 입장에서 많이 연구되었고,^[3] 최근에는 양자 전송(quantum teleportation), 암호화(cryptography), 통신(communication) 그리고 양자 컴퓨터(computer) 등을 포함하는 양자정보 분야의 응용에 효과적으로 이용되고 있다.^[4] 얽힘상태의 광자쌍을 이용한 간섭실험에서 나타나는 비고전적인 효과들은 2차(세기의 2차 또는 전기장의 4차)이상의 상관관계를 통해서만 관측이 가능하다. 따라서 대부분의 실험에서는 한 쌍의 검출기를 이용하는 동시계수(coincidence counts) 측정을 통해서 이루어지며, 하나의 검출기에서는 간섭효과가 관측되지 않는다.^[5]

SPDC에서 발생한 두 광자를 빔분할기(Beam Splitter; BS)에서 중첩시키고 빔분할기의 두 출구에 두 검출기를 설치하여 동시계수를 측정하는 4차 간섭실험은 Hong-Ou-Mandel(HOM) 효과 의해 처음으로 수행되었다.^[6] 이들은 두 광자가 BS에 동시에 입사할 때 동시계수가 극소가 되는 현상을 관측하였다. 이것은 두 광자가 BS에서 동시에 중첩되면 쌍을 이루어 진행한다는 것을 의미한다. 두 광자가 BS에 도달하는 시간차가 없을 때 두 검출기에서 측정되는 동시계수의 감소는, 입사하는 두 광자가 BS를 거쳐 두 검출기에 이르는, 서로 구별할 수 없는 두 광자의 경로에 대한 확률진폭들의 소멸간섭으로 잘 설명된다. 특히 주목되는 것은 두 검출기의 동시계수는 BS에 입사하는 두 광자의 시간차에 대한 정보를 나타내지만 각각의 검출기에서 측정된 단일계수는 아무런 변화를 나타내지 않는다는 것이다. 따라서 SPDC에서 동시에 발생한 두 광자는 위

상관계가 정의되지 않는 조건부 단일광자 상태로 생각할 수 있다. 하지만 단일계수 측정에서도 동시계수에서 나타나는 효과와는 비교할 수 없을 정도로 적지만 단일계수가 감소하는 현상을 관측할 수 있다는 것이 최근에 보고되었다.^[7-9] BS에 입사하는 두 광자의 상대적인 시간차이가 간섭필터에 의해 결정되는 결맞음시간보다 짧으면 BS의 출구에서 두 광자가 쌍을 이루어 빠져나가는 공간적인 뭉침(spatial bunching)현상이 두드러지게 나타난다.^[10-12] 따라서 검출기에 입사하는 평균적인 광의 세기가 일정하고, 이상적인 효율을 갖는 검출기라 할지라도, 검출기의 단일광자 분해시간(single photon timing resolution)보다 짧은 시간간격으로 입사하는 두 광자는 하나의 광자로 인식하므로 하나의 검출기에서도 단일 계수의 변화를 관측할 수 있다.

본 논문에서는 제 1형의 SPDC에서 발생한 광자쌍과 HOM 간섭계를 이용한 4차 간섭실험에서 비고전적인 간섭현상으로 설명되는 두 광자의 뭉침효과가 하나의 검출기를 이용한 단일계수에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. BS에 입사하는 두 광자의 시간차에 따라 검출기에 입사하는 광자들의 통계적인 특성 그리고 검출기의 단일광자 시간분해능의 한계와 연관하여 분석하였다.

II. 광자쌍의 2차 및 4차 간섭

그림 1과 같이 투과율과 반사율이 각각 50%-50%인 빔분할기(BS; beam splitter)의 두 입구에 두 광자가 동시에 입사할 경우, 입사하는 두 광자에 대한 소멸연산자를 \hat{a}_s 과 \hat{a}_i 라면, BS의 두 출구 1과 2에서 두 검출기 D_1 과 D_2 를 이용하여 동시계수(coincidence)를 측정할 때 광자의 소멸연산자는,

$$\hat{a}_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}[i\hat{a}_s + \hat{a}_i], \hat{a}_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}[\hat{a}_s + i\hat{a}_i] \quad (1)$$

와 같이 표현되고, 여기서 아래첨자 s 와 i 는 각각 입사하는 signal과 idler 광자를 나타낸다. 따라서 2차 간섭은

[†]E-mail: tskim@mail.ulsan.ac.kr

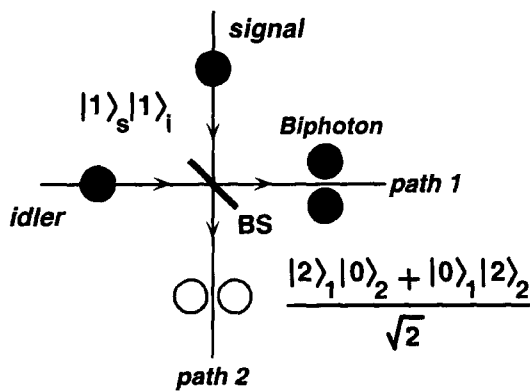


그림 1. 빔분할기. 50%-50%의 빔분할기의 두 입구에 두 광자가 동시에 입사하면 한 쪽 출구 쪽으로만 두 광자가 쌍을 이루는 뭉침효과가 일어난다.

$$N_1 = \langle n_s, n_i | \hat{a}_1^\dagger \hat{a}_1 | n_s, n_i \rangle = \frac{1}{2}(n_s + n_i) \tag{2}$$

로 일정한 값을 가진다. BS의 두 출구에서 두 검출기로 두 광자를 동시에 측정할 때 동시계수 N_C 는

$$N_C = \langle n_s, n_i | \hat{a}_1^\dagger \hat{a}_2^\dagger \hat{a}_1 \hat{a}_2 | n_s, n_i \rangle = \frac{1}{4}[n_s(n_s-1) + n_i(n_i-1)] \tag{3}$$

와 같이 표현되고,^[13] 만약에 $n_s = n_i = 1$ 이라면 식 (3)의 동시계수는 0이 된다. 이는 BS에 입사하는 두 광자가 BS의 출구에서는 항상 검출기 D_1 쪽으로 또는 D_2 쪽으로만 뭉쳐서(bunching) 간다는 것을 의미하며, 이러한 동시계수의 감소를 HOM dip 이라고 한다. 일반적으로 자발적인 매개하향변환에서 발생하는 signal과 idler 두 광자는 위상이 정의되지 않기 때문에 식 (2)에서 보노바와 같이 BS에 도달하는 두 광자의 시간차에 따른 하나의 검출기에서의 세기의 변화 즉, 2차 간섭효과는 관측되지 않으며, 다만 두 광자의 동시계수를 측정하는 4차 간섭에서만 관측된다.^[6]

그림 1에서 두 광자가 절맞음시간보다 긴 시간차를 두고 ($\delta\tau > \tau_c$) BS에 입사하는 경우 BS의 출구에서의 두-광자 상태는

$$|\Psi(\delta\tau > \tau_c)\rangle = \frac{1}{2}(|2\rangle_1|0\rangle_2 + |0\rangle_1|2\rangle_2) + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle_1|1\rangle_2 \tag{4}$$

와 같이 표현할 수 있으며, 아래첨자 1과 2는 BS의 출구로부터 두 검출기로 향하는 두 모드 또는 두 경로를 나타낸다. 따라서 BS의 출구에서 광자들을 발견할 확률은, signal 광자가 반사되고 idler 광자는 투과되어 경로 1에 두 광자가 있는 상태 $|2\rangle_1|0\rangle_2$ 와 signal 광자가 투과되고 idler 광자는 반사되어 경로 2에 두 광자가 있는 상태 $|0\rangle_1|2\rangle_2$ 에 대한 확률이 각각 1/4이고, 두 광자가 모두 투과되거나 반사되어 경로 1과 경로 2에 각각 하나의 광자가 있는 상태 $|1\rangle_1|1\rangle_2$ 에 대한 확률이 1/2이 된다. 하지만 두 광자가 시간차 없이($\delta\tau = 0$) BS에 동시에 입사하게 되면 두 광자가 모두 투과하는 경우와 모두 반사되는 경우에 해당하는 두-광자 확률진폭이 π 만큼의 위상차이

가 생기므로,^[6] 결과적으로 이러한 두-광자에 대한 확률진폭들이 서로 소멸간섭을 일으켜 식 (4)는

$$|\Psi(\delta\tau = 0)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|2\rangle_1|0\rangle_2 + |0\rangle_1|2\rangle_2) \tag{5}$$

와 같이 된다. 즉, 두 광자가 BS를 빠져나갈 때 어느 한 쪽 경로로만 쌍을 이루어 진행되는 공간적인 뭉침(bunching)효과가 일어난다.^[10,12] 따라서 BS의 두 출구에 검출기를 두고 동시계수를 측정하는 경우 동시계수가 감소하는 HOM dip을 관측할 수 있다. 이러한 조건에서 입사하는 광자의 수가 많을 경우 단일계수의 측정에서도 동시계수에서 나타나는 dip과 유사한 형태의 변화를 관측할 수 있다. 하지만 BS에 입사하는 두 광자 사이에는 위상관계가 존재하지 않으므로 두 광자의 도달시간차에 따른 주기적인 2차 간섭무늬는 아니다.

검출기에 입사하는 광의 평균세기가 일정한 경우에도 검출기의 단일광자 시간분해능보다 짧은 시간에 두 개의 광자가 동시에 입사하면 검출기는 두 개의 광자를 하나의 광자로 인식하여 이에 대응하는 신호를 발생시키게 된다. 즉, 이러한 경우 검출기 $D_1(D_2)$ 은 입사하는 $|1\rangle_1|1\rangle_2$ 상태의 광자와 $|2\rangle_1|0\rangle_2(|0\rangle_1|2\rangle_2)$ 상태의 광자를 구별할 수가 없다. 만약 효율이 1인 이상적인 검출기라면, 식 (4)에서와 같은 상태의 광자들이 입사하는 경우에는 전체 광자수의 75%를 측정하지만 광자들이 식 (5)의 상태에 있는 경우에는 50%만 측정하게 된다. 따라서 $\delta\tau > \tau_c$ 인 조건에서 측정되는 단일계수에 비해서 $\delta\tau = 0$ 인 조건에서는 단일계수가 다소 감소하는 현상을 관측할 수 있다.

III. 실험

매개하향변환에서 발생하는 광자쌍을 이용한 4차 간섭실험의 장치도(HOM 간섭계)는 그림 2와 같다. 실험장치의 구조는 광자쌍의 발생장치(UV 펌프레이저와 BBO 결정), 빔분할기(BS), 두 개의 광검출기(D_1, D_2), 그리고 검출기에서 측정된 광자의 수를 헤아리는 광자계수장치로 이루어진다. 연속적으로 발진하는 He-Cd 레이저(3207N, Liconix)에서 나오는 325 nm 파장의 자외선 광을 제 1형의 위상조화조건이 만족되도록 제작된 BBO결정에 입사시키면, 650nm의 동일한 파장과 동일한 편광(수평)을 갖는 두 광자(signal과 idler)가 펌프광의 진행방향에 대해서 약 2.4°를 이루면서 원추형으로 발행한다. 두 광자는 두 거울 M_1 과 M_2 에서 반사된 후 투과율과 반사율이 각각 50%-50%인 빔분할기(BS)에 입사한다. BS는 두 광자의 경로에 대해서 대칭적으로 놓여 있고 BBO로 부터 도달하는 경로차 (또는 시간차 $\delta\tau$)를 조절하기 위해서 분해능이 0.5 μm 인 미세 이동기(micro translation stage)에 부착하였다. 두 검출기 D_1 과 D_2 는 BS의 두 출구에 놓여서 각 출구에서의 광자를 측정하는 동시에 두 검출기의 동시계수(coincidence)를 측정할 수 있다.

두 검출기는 Si-APD로서 EG&G의 SPCM(single photon counting modules; SPCM-AQ-141-FC)으로서 광섬유에 연결되어 있고, 650nm 파장에서 양자효율은 약 65%정도이다. 두

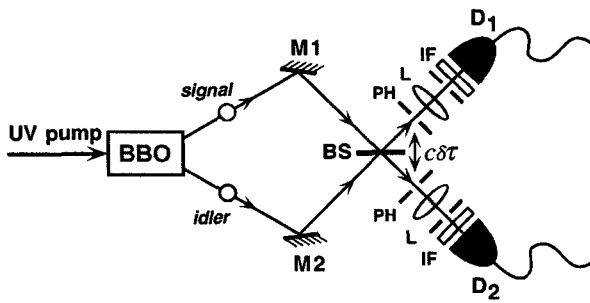


그림 2. Hong-Ou-Mandel 간섭계. 매해하향변환에서 발생한 650 nm 파장의 signal과 idler 광자가 두 거울 M_1 과 M_2 에서 반사되어 빔분할기(BS)에서 중첩된 후 두 검출기 D_1 과 D_2 에서 동시계수와 단일광자 측정이 이루어진다. UV pump는 He-Cd 레이저에서 나온 325 nm의 광이고 BBO는 비선형 결정, PH는 크기를 조절할 수 있는 조리개, L은 초점거리 10 cm의 렌즈 그리고 IF는 투과 파장폭이 10 nm인 간섭필터이다.

검출기 앞에는 중심파장이 650 nm이고 투과 파장폭이 10 nm인 간섭필터(IF; interference filter)를 부착하여 입사하는 광의 결맞음시간을 결정하고 또한 측정에 불필요한 잡광들을 제거하도록 하였다. BS와 검출기 사이에는 입사하는 광의 양을 조절하도록 하기 위해서 크기를 조절할 수 있는 조리개(PH)를 설치하였고, 검출기에 연결된 광섬유에 광을 집속하기 위해서 초점거리 10 cm인 렌즈를 설치하였다. 두 검출기에 연결된 광자계수장치(LeCroy 1434A)는 선별기(LeCroy 821)와 계수기(LeCroy 2551), 그리고 동시계수기(Coincidence; LeCroy 622)로 이루어져 있고, 일정한 시간동안 검출기에서 측정되는 단일계수와 동시계수는 실시간으로 관측이 가능하게 되어 있다.

앞에서 언급한바와 같이 매해하향변환에서 동시에 발생한 650 nm 파장의 두 광자가 BS에 도달하는 시간간격이 광자의 결맞음시간보다 짧으면 두 광자는 쌍을 이루어 BS를 빠져나간다. 따라서 BS 뒤에서 두 검출기를 놓고 광자계수 장치의 분해시간 이내에서 두 검출기에 동시에 입사하는 광자의 수를 측정하면, 광자의 도달 시간간격이 없을 때, 동시계수는 최소가 되는 HOM dip을 관측할 수 있다. 그림 3은 두 검출기

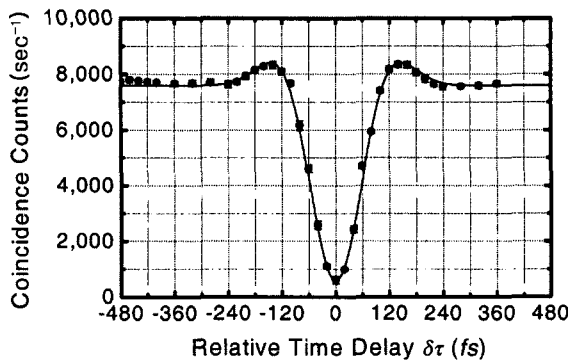


그림 3. HOM의 동시계수 dip. BS에 도달하는 signal과 idler 광자의 시간차에 따라 두 검출기 D_1 과 D_2 에서 측정된 동시계수의 변화를 나타낸다. 동시계수 dip의 폭(FWHM)은 약 141fs이다.

D_1 과 D_2 앞에 투과 파장폭이 650 ± 5 nm인 간섭필터를 설치하고 BS의 위치를 이동시키면서 측정된 동시계수를 나타낸 것이다. BBO 결정에서부터 BS를 경유하여 두 검출기 D_1 과 D_2 에 이르는 두 광자의 경로(signal의 반사와 idler의 반사 그리고 signal의 투과와 idler의 투과)가 서로 구별이 되지 않아, 이러한 경우 구별이 되지 않는 두 광자의 확률진폭들이 서로 소멸 간섭을 일으키기 때문이다. 그림에서 BS의 위치이동에 따른 두 광자의 도달 시간차($\pm \delta\tau$)에 따라 나타나는 동시계수 dip의 폭(FWHM)은 하향변환된 빔의 결맞음 길이 또는 결맞음 시간에 대응하며, 실제 실험에서는 두 검출기 앞에 놓인 간섭필터의 특성에 따라 결정된다. 본 실험에서 사용한 간섭필터의 투과 진동수 폭($\Delta\nu$)은 약 7.1×10^{12} Hz이고, 이에 대응하는 결맞음시간은 약 141 fs인데, 이는 실험결과와도 잘 일치한다. 동시계수에서 측정된 4차 간섭무늬의 선명도(visibility)는 약 88% 정도 되며, 이는 주로 광학계의 정렬과 BS의 투과율과 반사율의 균형에 영향을 받는다. 만약 광학계의 정렬이 완벽하고 투과율과 반사율이 일치하면 dip의 극소는 0의 값을 갖게 된다. 그래프에서 가로축의 눈금은 실험에서 BS를 이동시킨 거리를 두 광자의 상대적인 도달 시간차로 바꾼 것이다.

IV. 결과 및 논의

두 광자의 4차 간섭실험에서 동시계수는 BS의 위치변화 또는 두 광자의 경로차에 따라 변화를 나타내지만, 일반적으로 각각의 검출기 D_1 또는 D_2 에서 측정된 단일계수는 일정하게 유지된다. 하지만 검출기에 입사하는 광자의 수가 많아지면 하나의 검출기에서도 동시계수에서 나타나는 dip을 관측하는 것이 가능하다. 본 실험에 사용된 검출기의 단일광자 시간분해능은 약 300 ps, 광자계수장치의 동시계수 분해시간은 6.38 ns, 그리고 이중 펄스 분해시간은 9 ns이다. 검출기에 입사하는 평균적인 광의 세기가 일정한 경우에도 BS의 한 쪽 출구쪽으로 빠져나온 두 광자가 분해시간보다 짧은 시간간격으로 검출기에 도달한다면 검출기는 하나의 광자가 입사하는 경우와 두 광자가 입사하는 경우를 구별할 수가 없다. 따라서 검출기는 두 광자가 입사하는 경우에도 이를 하나의 광자만 인식하게 된다. 그림 3에서 보인바와 같이 두 광자의 뭉침현상이 일어나는 범위는 입사하는 광의 결맞음시간인 141 fs 정도이고 이보다 훨씬 긴 300 ps의 시간분해능을 갖는 검출기는 141 fs 이내에 있는 두 개의 광자를 구별할 수 없으므로 하나의 검출기에서도 단일계수가 감소하는 현상이 일어난다.

그림 4는 동시계수 dip을 측정할 때 두 검출기 D_1 과 D_2 에서 측정된 단일계수를 나타낸 것이다. 각각의 점들은 반복 측정된 결과들의 표준편차를 함께 나타낸 평균값이고, 실선은 그림 3에서의 동일한 곡선에서 선명도만 다르게 하여 나타내었다. 단일계수 dip의 폭은 그림 3의 동시계수 dip의 폭과 일치하며, 선명도는 약 1.1% 정도 되었다.

일반적으로 사용되는 광검출기는 두 광자가 검출기의 분해시간 이내에 입사하는 경우와 하나의 광자가 입사하는 경우를 구별할 수 없다. 광자의 단일광자 측정효율이 η 인 검출기에 두 개의 광자가 동시에 입사할 경우 검출기의 측정확률은 $\eta + (1 -$

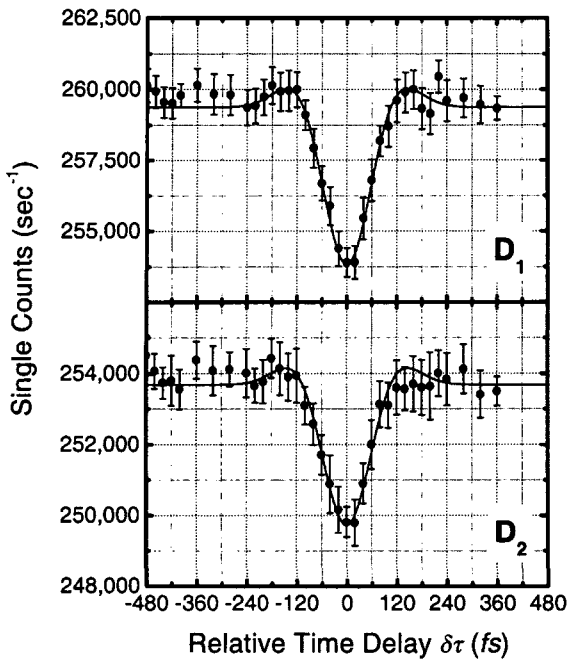


그림 4. BS에 도달하는 signal과 idler 광자의 시간차에 따라 두 검출기 D_1 과 D_2 에서 측정된 단일계수의 변화. 측정에서 나타나는 dip의 폭은 동시계수 dip의 폭과 일치한다.

η) $\eta = 2\eta - \eta^2$ 와 같이 주어진다.^[7] 따라서 하나의 검출기에서 측정되는 전체 광자의 수는

$$N = P_1\eta + P_2(2\eta - \eta^2) \tag{6}$$

와 같이 쓸 수 있다. 여기서 P_1 과 P_2 는 각각 검출기에 하나의 광자와 두 광자가 입사할 확률을 나타낸다. BS에 입사하는 광자들이 식 (4)와 같은 상태에 있을 때 ($\delta\tau > \tau_c$)는 $P_1 = 1/2$, $P_2 = 1/4$ 이므로 식 (6)은 $\eta - 0.25\eta^2$ 이 되고, 입사하는 광자가 식 (5)와 같은 상태에 있을 때 ($\delta\tau = 0$)는 $P_1 = 0$, $P_2 = 1/2$ 이므로 $\eta - 0.5\eta^2$ 이 된다.

단일광자와 두 광자가 검출기에 입사할 때 각각의 검출기에서 측정되는 광자의 수는 식 (4)~(6)에서와 같이 BS에 도달하는 두 광자의 시간차에 따라 서로 다른 통계적인 특성을 나타낸다. BS에 입사하는 두 광자의 시간차가 결맞음시간보다 클 경우에 광자들의 상태는 $11\sqrt{2}(|2\rangle_1|0\rangle_2 + |0\rangle_1|2\rangle_2)$ 의 상태에 있든지 $1|1\rangle_1|1\rangle_2$ 의 상태에 있을 수 있다는 것을 알 수 있다. 하지만 두 광자의 시간차가 없을 때는 모든 광자들은 $11\sqrt{2}(|2\rangle_1|0\rangle_2 + |0\rangle_1|2\rangle_2)$ 의 상태에 있게 된다. 만약 검출기가 이상적인 효율을 갖고 있다면, 식 (6)으로부터 $\delta\tau > \tau_c$ 인 경우는 BS에 입사하는 전체 광자의 75%를 측정하지만 $\delta\tau = 0$ 인 경우는 50%밖에 측정할 수 없게 되고, 최대 20%의 선폭도를 갖는 단일계수의 감소를 관측할 수 있다. 여기서 단일계수의 감소는 검출기의 측정효율에 의존한다기 보다는, 검출기에 입사하는 단일광자의 상태와 두 광자의 상태를 구별하지 못하기 때문에 나타나는 현상이다. 만일 검출기가 하나의 광자와 뭉침상태에 있는 두 개의 광자에 대한 신호를 구별하여 발생할 수 있고 측정장치의 분해능이 이러한 신호를 구별할 수 있다

면 이러한 효과는 사라지게 된다.

측정결과로부터 두 광자의 시간차가 없을 때 BS의 출구에서 두 광자의 공간적인 뭉침 효과는 검출기의 단일계수에 뚜렷한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 측정시간동안 검출기에 입사하는 평균적인 빛의 세기는 일정하게 유지되지만 두 광자가 검출기의 시간분해능보다 짧은 시간차로 입사하는 경우에는 검출기가 두 개의 광자를 하나의 광자로 인식하기 때문에 단일계수가 감소하게 된다. 본 실험에서 두 광자의 4차 간섭, 즉 HOM dip을 관측할 수 있는 두 광자의 최대 시간 간격은 간섭필터의 투과 진동수 폭으로 결정되는 141 fs이며, 이는 검출기의 단일광자 시간분해능 300 ps보다 훨씬 짧다. 따라서 검출기는 입사하는 단일광자 상태와 두 광자 상태의 경우에 모두 하나의 펄스만을 만들어 낸다. 만약 검출기가 두 개의 펄스를 발생시켜도 광자계수장치의 이중펄스 분해능이 9ns로 아주 길기 때문에 전체적인 측정효율은 상대적으로 줄어들게 된다. 입사하는 광자의 수가 줄어들면 $\delta\tau > \tau_c$ 인 경우와 $\delta\tau = 0$ 인 경우에 측정된 평균적인 단일계수가 각각의 측정통계의 요동범위속에 묻혀버리기 때문에 이러한 현상을 관측할 수가 없게 된다.

V. 결 론

본 논문에서는 제 1형의 SPDC에서 발생한 광자쌍과 HOM 간섭계를 이용한 4차 간섭실험에서 나타나는 비고전적인 간섭 현상의 두 광자 뭉침효과가 하나의 검출기를 이용한 단일계수에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. 이러한 효과는 하나의 검출기에 입사하는 단일광자 상태와 두 광자 상태의 측정확률과 연관되며, 검출기에 입사하는 광자의 수가 많을 때는 통계적인 특성의 변화를 뚜렷하게 관측할 수 있었다. BS에 입사하는 두 광자의 시간차가 결맞음시간인 141 fs보다 짧을 때 검출기에 두개의 광자가 뭉쳐서 입사하는 확률이 증가하고, 따라서 300 ps의 단일광자 시간분해능을 갖는 검출기는 단일광자 상태와 두 광자 상태를 구별할 수 없기 때문에 단일계수 측정에서도 dip을 관측할 수 있었다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] H. Hariharan and B. C. Sanders, *Quantum phenomena in optical interferometry* (Elsevier Science B. V.), vol. 36, pp. 49-128, 1996.
- [2] Gregg Jaeger and Alexander V. Sergienko, *Multi-photon quantum interferometry* (Elsevier Science B. V.), vol. 42, pp. 277-324, 2001.
- [3] R. Y. Chiao, P. G. Kwiat, and A. M. Steinberg, *Advances in atomic, molecular, and optical physics* (Academic Press, INC), Vol. 34, pp. 35-83, 1994.

- [4] D. Bouwmeester, A. Ekert, and A. Zeilinger, *The Physics of Quantum Information* (Springer, Berlin, 2000).
- [5] 예외로 하나의 검출기를 이용한 경우는 다음 문헌에서 볼 수 있다. X. Y. Zou, L. J. Wang, and L. Mandel, *Phys. Rev. Lett.* vol. 67, pp. 318-321, 1991; Y.-H. Kim *et al.*, *Phys. Rev. A* vol. 61, no. 5, 051803, 2002.
- [6] 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.
- [7] K. J. Resch, J. S. Lundeen, and A. M. Steinberg, "Experimental observation of nonclassical effects on single-photon detection rates," *Phys. Rev. A* vol. 63, no. 2, 020102, 2001.
- [8] Y.-H. Kim and Warren P. Grice, "Observation of correlated-photon statistics using a single detector," *Phys. Rev. A* vol. 67, no. 6, 065802, 2003.
- [9] 김현오, 고정훈, 김태수, "단일광자 검출에서 비고전적인 간섭효과의 측정," *Proceeding of the Optical Society of Korea Summer Meeting 2001.* pp. 202-203, 2001.
- [10] 김현오, 고정훈, 박구동, 김태수, "광자쌍을 이용한 Hanbury Brown-Twiss 실험," *한국광학회지* vol. 14, no. 2, pp. 130-134, 2003.
- [11] 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.
- [12] H. Kim, J. Ko, G. Park, and T. Kim. "Two-Photon interference experiment in a Mach-Zehnder interferometer," *J. Opt. Soc. Korea*, Vol. 7, No. 2, pp. 150-155, 2003.
- [13] T. Kim, J. Shin, Y. Ha, H. Kim, G. Park, T. G. Noh, and C. K. Hong, "The phase-sensitivity of a Mach-Zehnder interferometer for the Fock state inputs," *Opt. Comm.* vol. 156, pp. 37-42, 1998.

Effect of two-photon spatial bunching on single photon detection rates

Heonoh Kim, Harim Shin, Goodong Park, and Taesoo Kim[†]

School of Mathematics and Applied Physics, University of Ulsan, Ulsan 680-749, KOREA

[†]*E-mail: tskim@uou.ulsan.ac.kr*

(Received July 2, 2003, Revised manuscript November 10, 2003)

We report an effect of photon pairs on single-photon detection rates, while Hong-Ou-Mandel's two-photon interference experiment is performed with photons produced in noncollinear type-I parametric down-conversion. Photon pairing behavior or spatial bunching is measured and shown to cause a decrease in the single photon counting rate. Such a dip is found to result from the fact that the single-photon timing resolution of photodetectors is much longer compared to the time interval between the two photons incident on the single-photon detector.

OCIS codes : 030.5260, 190.4410, 230.5160, 270.0270.