《연구논문》 Hankook Kwanghak Hoeji, Volume 14, Number 2, April 2003

광자쌍을 이용한 Hanbury Brown-Twiss 실험

김헌오 · 고정훈 · 박구동 · 김태수†
울산대학교 수학 및 물리기술학부
㉾ 680-749 울산시 남구 무거2동 산29번지

(2002년 8월 21일 받음, 2003년 3월 6일 수정본 받음)

매개하향변환과정에서 발생한 광자쌍과 Hong-Ou-Mandel 간섭계를 이용한 4차 간섭실험에서 두 광자가 빔분할기에 동시에 입사할 때 빔분할기의 한 쪽 출구로만 두 광자가 쌍을 이루어 빠져나가는 두-광자의 공간적인 뭉침 효과를 관측하였다. 또한 검출기의 단일광자 시간 분해능보다 짧은 시간에 두 광자가 쌍으로 입사할 때 하나의 검출기에 의한 단일계수와 비교하였다.

주제어 : parametric down-conversion, Hong-Ou-Mandel interferometer, Hanbury Brown-Twiss effect, photon bunching effect.

I. 서 론

두 빔의 중첩에서 하나의 검출기를 이용하여 간섭 현상을 측정하는 것은 광원의 결맞음 길이(또는 시간)나 단색성의 정도에 따라 선명도가 변하는 2차 간섭실험이다. 이러한 2차 간섭의 측정은 레이저로부터 나오는 결맞음 광과 동일한 스펙트럼의 필터를 통과한 열광원과 같이 광원의 통계적 성질은 완전히 다르지만 동일한 진동수 분포를 갖고 있는 광원들의 상태는 구별할 수가 없다. 1950년대에 Hanbury Brown과 Twiss는 두 검출기를 이용하여 입사하는 광의 세기요동의 상관관계(intensity correlation)를 측정하는 새로운 방법을 고안해 내었다.[1,2] 초기에는 별의 직경을 측정하기 위해 사용된 이 방법은 서로 다른 광원의 통계적인 성질을 측정할 뿐만 아니라 고전적으로 설명되지 않는 양자역학적인 간섭현상을 측정하는데 이용되고 있으며,[3,4] 또한 최근에는 양자정보 분야에 이용하기 위한 단일광자(single photon) 광원의 홑어짐(antibunching) 현상을 측정하는데 유용하게 이용되고 있다.[5-7]

세기요동의 상관관계가 없는 광이 빔분할기에서 분리된 후 두 검출기에서 측정될 때 동시계수는 검출기에 도달하는 광의 시간차에 상관없이 일정한 값을 나타낸다. 이러한 현상은 일정한 출력의 레이저에서 나오는 광에서 흔히 관찰된다. 하지만 열광원에서 나온 광자들이 빔분할기를 거쳐 두 검출기에 입사하면 두 광자들의 도달시간이 같을 때 측정된 동시계수는 한 쪽 검출기에 입사하는 광을 결맞음 시간보다 더 긴 시간동안 지연시킨 후에 측정된 동시계수보다 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 광원에서 방출된 광자들이 빔분할기에서 분리되기 전에 쌍으로 또는 뭉쳐져 있기 때문이다. 이러한 현상을 광자의 뭉침(bunching) 효과 또는 Hanbury Brown-Twiss 효과라고 한다. 이러한 광자의 뭉침 효과를 실제로 측정하기 위해서는 선폭이 아주 좁은 광원이 필요하며 따라서 광의 결맞음 시간보다 검출기의 분해시간이 짧아야 한다. Arecchi 등은 회전하고 있는 연마된 유리판(ground glass plate)에 레이저 광을 쪼였을 때 산란된 광의 결맞음 시간이 아주 길다는 것을 이용하여 열광원에서 나온 광자의 뭉침 효과를 측정하기도 했다.[8]

본 논문에서는 매개하향변환에서 발생한 광자쌍과 Hong-Ou-Mandel(HOM) 간섭계[9]를 이용한 4차 간섭에서 빔분할기에 입사하는 두 광자의 시간차가 없을 때 광자들이 실제로 빔분할기의 한 쪽 출구로만 쌍을 이루어 빠져나가는 두 광자의 공간적인 뭉침 효과(two-photon spatial bunching)를 측정하였다. 이는 단일광자를 이용한 Hanbury Brown-Twiss 효과에서 나타나는 광자뭉침 효과와 유사하며, 두 검출기를 이용하는 동시계수 방법을 이용하여 측정하였다.

II. Hanbury Brown-Twiss 효과

그림 1(a)에서 임의의 광원으로부터 나온 빔이 빔분할기(BS; beam splitter)에서 분리된 후 BS뒤에 놓인 두 검출기 D_1과 D_2를 이용하여 동시계수(coincidence)를 측정할 때, 시간 t에 D_1에 입사하는 광자수가 $n_1(t)$이고 시간 $t+\tau$에 D_2에 입사하는 광자의 수가 $n_2(t+\tau)$라면 두 검출기의 두 광자를 동시계수할 때 광자수의 상관관계는

$$g^{(2)}(\tau)=\frac{\langle n_1(t)n_2(t+\tau)\rangle}{\langle n_1\rangle\langle n_2\rangle} \tag{1}$$

와 같이 표현된다.[10] 여기서 $<n_1>$과 $<n_2>$는 측정시간동안 각 검출기에서의 평균 광자수이다. 측정시간이 입사하는 광의 결맞음 시간보다 짧고 두 검출기가 광자를 측정하는 시간의 차이(time delay)가 없을 때($t=0$) 상관관계가 1보다 큰 값을 나타내는 것($g^2(0)>1$)을 광자 뭉침 효과라고 한다. 그림 1(b)는 열광원에서 나온 광자의 뭉침 효과를 보인 것이다. 만약 시간차가 없을 때 2차 세기상관함수가 1보다 작은 값을 갖는다면($g^2(0)<1$) 광자 홑어짐 효과라고 한다. 광자의 뭉침 효과

†E-mail: tskim@mail.ulsan.ac.kr

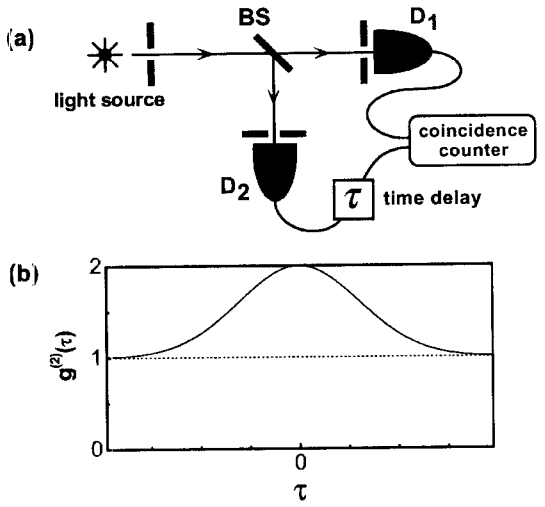

그림 1. (a) 입사빔의 세기상관 측정으로 광자의 뭉침 효과를 관측하기 위한 Hanbury Brown-Twiss의 실험장치도와 (b) 열광원의 경우 시간차에 따른 2차 상관함수.

는 광자수 분포가 Bose-Einstein 분포를 나타내는 열광원에서 나타나고, 반면에 광자의 흩어짐 효과는 광자수 상태(Fock state)나 단일광자 상태와 같은 비고전적인 광원에서 관측될 수 있다.

투과율이 각각 50%-50%인 빔분할기의 두 입구에 두 광자가 동시에 입사할 경우 입사하는 두 모드에 대한 광자 소멸연산자를 $\hat{a}_s$ 과 $\hat{a}_i$ 라면, BS의 두 출구모드 1과 2에서 광자 소멸연산자는

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

와 같이 표현되고, 여기서 아래첨자 s와 i는 각각 signal과 idler 광자를 나타낸다. 따라서 BS의 두 출구에서 측정된 두 검출기의 동시계수는

$$N_C\rangle=\langle n_s, n_i|:\hat{n}_1\hat{n}_2:|n_s, n_i\rangle$$
$$=\frac{1}{4}[n_s(n_s-1)+n_i(n_i-1)] \quad (3)$$

와 같이 된다.[11] 매개하향변환에서는 $n_s=n_i=1$이므로 식 (3)의 동시계수는 사라지게 된다. 이는 두 광자가 검출기 D_1쪽으로 또는 D_2쪽으로만 쌍으로 뭉쳐서 간다는 것을 의미한다.

Hanbury Brown-Twiss의 실험에서와 같이 두 광자가 BS의 한 쪽에만 입사하는 경우는 두 검출기에서 측정되는 광자사이에 시간차를 주면서 동시계수를 측정하지만, 본 실험에서와 같이 BS의 두 입구에 광자를 입사시키는 경우는 BS에 도달하는 두 광자 사이에 시간차를 주고 두 검출기에서는 시간차를 주지 않는다. 따라서 검출기의 분해시간이 입사하는 광원의 결맞음 시간보다 짧지 않아도 광자의 뭉침 효과를 관측할 수가 있다는 것이 장점이다. 매개하향변환에서 발생하는 광의 결맞음 시간은 대략 0.1 ps정도이므로 검출기의 분해시간을 이용하여 광자의 뭉침 효과를 관측한다는 것은 실제로 불가능하다.

III. 광자쌍의 4차 간섭실험

광자쌍을 이용한 Hanbury Brown-Twiss 효과를 측정하기 위한 실험장치는 그림 2와 같다. 325nm의 단일파장에서 연속적으로 발진하는 He-Cd 레이저(3207N, Liconix)를 펌프 광원으로 하여 BBO결정에 입사시키면, 650nm의 동일한 파장과 동일한 편광(수평)을 갖는 광자쌍(signal과 idler)이 펌프광의 진행방향에 대해서 약 2.4°를 이루면서 발생한다. 두 광자는 두 거울 M_1과 M_2에서 반사된 후 투과율과 반사율이 각각 50%-50%인 빔분할기(BS)에 입사한다. BS는 두 광자의 경로에 대해서 대칭적으로 놓여 있고 BBO로 부터 도달하는 경로차 $c\delta\tau$(또는 시간차 $\delta\tau$)를 조절하기 위해서 분해능이 0.5 μm인 미세 이동기(micro translation stage)에 부착하였다. BS의 한 쪽 출구에 추가적으로 또 하나의 빔분할기 BS'을 설치하여 BS에서 나오는 광을 나눌 수 있게 했다. 두 검출기 D_1과 D_2는 BS'의 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 단일광자 측정시간 분해능은 300 ps이며, 650 nm 파장에서 양자효율은 약 65%정도이다. 두 검출기 앞에는 측정에 불필요한 잡광들을 제거하기 위해 중심파장이 650 nm이고 투과 파장폭이 10 nm인 간섭필터(IF; interference filter)를 부착하였다. 검출기 D_2'은 D_1과 D_2'의 동시계수를 측정하면서 두 광자의 경로를 맞추기 위해서 이용되었다.

두 검출기에 입사하는 광자에 의해 발생한 전압펄스는 광자계수장치(LeCroy 1434A)에서 선별기(LeCroy 821)와 계수기(LeCroy 2551), 그리고 동시계수기(Coincidence; LeCroy 622)를 거치면서 일정한 측정시간동안 검출기에서 발생하는 광전자들의 수로서 측정된다. 동시계수기는 두 검출기에 입사하는 광자들의 시간간격이 분해시간(T_R) 6.38ns 이내에서 동시에 측정될 때에만 동시계수 신호를 발생시키도록 되어 있다. 본 실험에서는 먼저 두 검출기 D_1과 D_2'을 이용하여 BBO로부터 BS에 이르는 signal과 idler 광자의 상대적인 시간차가 없을 때 광자쌍의 4차 간섭에 의해 두 검출기의 동시계수가 사라지는 dip 위치를 결정하였다. 그리고 BS의 한 쪽 출구에 BS'을 추가적으로 설치하여 두 광자의 상대적인 시간차 $\delta\tau$에 따른 두

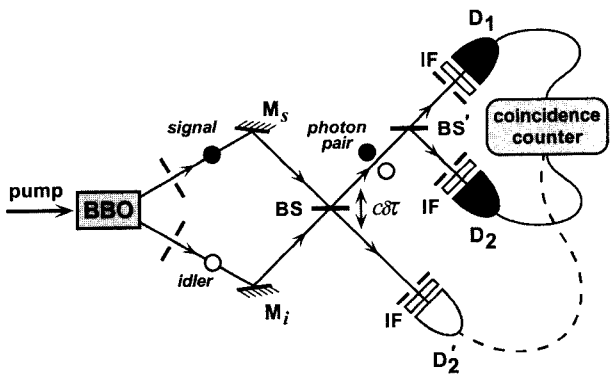

그림 2. 두 광자의 뭉침 효과를 측정하기 위한 실험 장치도.

검출기 D_1과 D_2의 동시계수를 측정하였다.

IV. 결과 및 논의

그림 3은 두 검출기 D_1과 D_2'앞에 파장 투과폭이 650±5 nm의 간섭필터를 설치하고 BS의 위치를 이동시키면서 측정한 동시계수를 나타낸 것이다. BS의 위치이동($\pm c\delta\tau$)에 따른 두 광자의 도달 시간차에 따라 나타나는 동시계수 dip의 폭은 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 결맞음길이($L_{coh.}=c/\Delta\nu$)는 약 42.25 μm, 결맞음시간은 약 141 fs인데, 이는 실험결과와도 잘 일치한다. 동시계수에서 측정된 4차 간섭무늬의 선명도(visibility)는 약 87%정도 되었다. 선명도가 100%에 미치지 못하는 것은 주로 광학계의 정렬이 완전하지 않기 때문이다. 그래프에서 가로축의 눈금은 실험에서 BS를 이동시킨 거리를 두 광자의 상대적인 도달 시간차로 바꾼 것이며, 그림 2의 실험장치에서 보는바와 같이 실제 BS의 이동거리의 두 배에 해당한다.

BS가 대칭적인 위치로부터 결맞음 길이에 비해서 많이 벗어나면 두 광자는 BS에서 마치 독립적인 고전 입자처럼 행동하므로 BS에서 취할 수 있는 두 광자의 경로는 두 광자가 모두 투과 또는 반사하는 경우와 두 광자가 한 쪽 출구로만 가는 경우로 모두 4가지 경로가 가능하다. 따라서 이러한 경우 두 검출기 D_1과 D_2'이 두 광자를 동시에 측정할 확률은 1/2이 되며, 그림 3에서 측정된 동시계수는 약 6400±75/sec였다. 각 측정치의 표준편차는 각 데이터 점들의 크기와 비슷하다. 본 실험에서 측정된 광자쌍 측정효율은 최근까지 보고된 자료에 비해서 아주 높은 편이다. 본 실험에서 펌프 빔으로 이용한 He-Cd 레이저의 출력은 약 10 mW로 비교적 낮지만 단일광자 검출기의 효율이 650 nm 파장에서 65% 정도로 아주 높으며, 또한 검출기의 면적(active area)이 180 μm인 점을 감안하여 두 검출기 앞에 초점거리 10cm의 렌즈를 설치했기 때문이다.

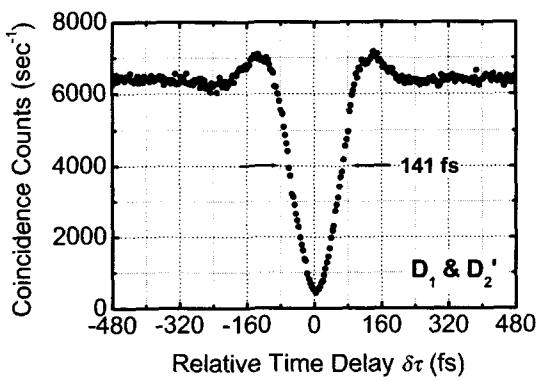

그림 3. BBO로부터 BS에 이르는 signal과 idler 광자의 시간차에 따라 두 검출기 D_1과 D_2'에서 측정된 동시계수. 경로차가 없으면($c\delta\tau=0$) 두 광자는 쌍을 이루어 BS를 빠져나가므로 동시계수가 사라지는 dip이 형성된다. 간섭필터의 투과 파장폭(650±5nm)에 의해 결정되는 동시계수 dip의 반치폭(FWHM)은 약 141 fs이다.

만약 BS가 하향변환된 빔의 결맞음 시간보다 두 광자의 도달시간 간격이 작은 대칭적인 위치로 접근하면 두 광자의 파속(wave packet)이 시간적으로 중첩되고 결과적으로 두 검출기의 동시계수 측정과정에서 경로의 구별가능성이 줄어든다. 따라서 두 광자가 모두 투과 또는 반사되는 경우에 대한 확률진폭은 서로 소멸간섭을 일으키고, 두 광자가 어느 한 쪽 출구로만 쌍을 이루려는 경향(두 광자 뭉침; two-photon spatial bunching)이 증가하게 된다. 두 광자의 시간차가 전혀 없는 경우에 두 검출기의 동시계수는 완전히 사라지고 BS에 입사하는 두 광자는 대부분 쌍을 이루게 된다.

본 실험에서 관심이 있는 것은 두 광자가 BS에 동시에 입사할 때 실제로 두 광자가 쌍을 이루어 BS의 두 출구중 한 쪽 출구로만 빠져나가는 현상이 일어나는지를 알아보는 것이다. 따라서 BS의 한 쪽 출구에 추가적으로 BS'을 설치하여 빔을 나누고, 두 검출기 D_1과 D_2를 이용하여 BS의 이동에 따른 동시계수를 측정하였다. 그림 4는 BS에 도달하는 두 광자의 시간차에 따라 두 검출기 D_1과 D_2에서 측정된 동시계수를 나타낸 것이다. 그림 3과는 달리 두 광자의 시간차가 없는 위치에서 동시계수는 최대값을 나타내었고, 이는 실제로 두 광자가 쌍을 이루어 BS를 빠져나간다는 것을 보여준다. 이러한 동시계수 peak의 반치폭은 dip(그림 3)의 폭과 같다. 그림 3에서와 같이 BS가 대칭적인 위치로부터 많이 벗어났을 때 BS'의 출구에 놓인 두 검출기 D_1과 D_2가 두 광자를 동시에 측정할 확률은 1/8이 되며, 측정된 동시계수는 약 1827±48/sec였다. 동시계수에서 측정된 간섭무늬의 선명도는 약 30%정도 되었다. 본 실험에서 광학계의 정렬이 완전하다면 최대 33.3%의 선명도를 기대할 수 있다.

매개하향변환에서 발생한 signal과 idler 광자는 고전적인 파동에서 간섭효과를 일으키는 위상관계가 정의가 되지 않는다. 따라서 하나의 검출기에 입사하는 빛의 세기 변화로 나타나는 2차 간섭효과는 일어나지 않는다. 하지만 그림 4에서 보인 것과 같은 두 광자의 공간적인 뭉침 효과는 검출기의 단일광자 측정에도 영향을 줄 수 있다. 측정시간동안 검출기에 입사하는 평균적인 빛의 세기는 일정하게 유지되어도 입사하는 광에

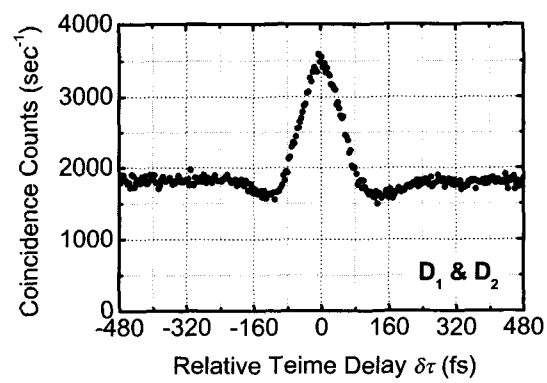

그림 4. BS에 도달하는 두 광자의 시간차에 따라 두 검출기 D_1과 D_2에서 측정된 동시계수. 두 광자의 시간차가 없는 위치에서 동시계수는 최대값을 나타내고, 동시계수 peak의 반치폭은 dip(그림 3)의 폭과 같다.

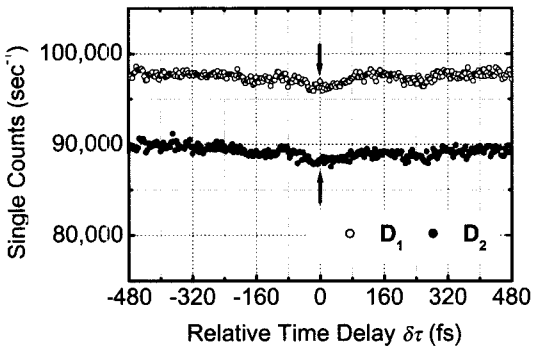

그림 5. BS에 도달하는 두 광자의 시간차에 따라 각각의 검출기 D_1과 D_2에서 측정된 단일계수. 두 광자의 시간차가 없을 때(화살표 지점) 단일계수가 감소한다.

반응하는 광검출기의 비선형성 때문에 검출기의 시간분해능보다 짧은 시간에 두 개의 광자가 동시에 입사하는 경우 검출기는 두 개의 광자를 하나의 광자로 인식하게 된다. 그림 5는 두 검출기 D_1과 D_2로 동시계수를 측정할 때(그림 4) 각 검출기의 단일계수를 보인 것이다. 두 광자의 시간차가 없을 때(그림의 화살표 위치) 검출기의 단일계수가 약간 감소하는 것을 볼 수 있는데, 선명도가 거의 0에 가까운 것은 BS에 쌍으로 도달하는 두 광자가 투과와 반사할 확률이 동일하기 때문이다. 하지만 두 검출기 D_1과 D_2'으로 동시계수를 측정할 때(그림 3)는 dip 위치에서 광자는 항상 쌍으로 검출기에 입사하므로 단일계수에 미치는 광자쌍의 효과를 뚜렷하게 볼 수 있다.[12]

V. 결 론

제1형의 매개하향변환과정에서 동시에 발생한 광자쌍의 4차 간섭에서 두-광자 Hanbury Brown-Twiss 효과를 관측하였다. 파장이 650nm로 동일한 두 광자가 HOM 간섭계의 빔분할기에 동시에 입사할 때 두 광자는 빔분할기의 한 쪽 출구쪽으로 쌍을 이루어 빠져나가는 두-광자 뭉침 효과를 확인할 수 있었다. 이는 동시에 발생한 두 광자가 빔분할기에서 중첩된 후 두 출구로 빠져나가는 과정에서 구별할 수 없는 가능한 경로에 대한 확률진폭들이 서로 소멸간섭을 일으켜 두 광자가 모두 투과되거나 모두 반사되는 경우는 사라지기 때문이다. 이러한 광자쌍을 또 다른 빔분할기를 이용하여 분리하고 두 검출기로 동시계수 할 때, 첫 번째 빔분할기에 도달하는 두 광자의 경로차 또는 시간간격이 없을 때 동시계수가 증가하는 두-광자 뭉침 효과를 나타내었다.

감사의 글

이 논문은 한국표준과학연구원의 2002 연 · 학 협동연구사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

[1] R. Hanbury Brown and R. Q. Twiss, "Correlation between photons in two coherent beams of light," *Nature*, vol. 177, pp. 27-27, 1956.

[2] R. Hanbury Brown, *The Intensity Interferometer* (London; Taylor and Francis, 1974).

[3] 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.

[4] Z. Y. Ou and L. Mandel, "Observation of spatial quantum beating with separated photondetectors," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 61, no. 1, pp. 54-57, 1988.

[5] Christian Kurtsiefer, Sonja Mayer, Patrick Zarda, and Harald Weinfurter, "Stable solid-state source of single photons," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 85, no. 2, pp. 290-293, 2000.

[6] V. Zwiller, H. Blom, P. Jonsson, N. Panev, S. Jeppesen, T. Tsegaye, and E. Goobar, M. E. Pistol, L. Samuelson, and G. Bjork, "Single quantum dots emit single photons at a time: Antibunching experiments," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78, no. 17, pp. 2476-2478, 2001.

[7] Axel Kuhn, Markus Hennrich, and Gerhard Rempe, "Deterministic single-photon source for distributed quantum networking," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 89, no. 6, 067901, 2002.

[8] F. T. Arecchi, E. Gatti, and A. Sona, "Time distribution of photons from coherent and gaussian sources," *Phys. Lett.*, vol. 20, pp. 27-29, 1966.

[9] 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.

[10] R. Loudon, *The quantum thoery of light* (Clarendon press, Oxford, 1990).

[11] T.-S. Kim, J-T. Shin, Y. Ha, H.-n. Kim, G.-D. 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.

[12] K. J. Resch, J. S. Lundeen, and A. M. Steinberg, "Experimental observation of nonclassical effects on single-photon detection rates," vol. 63, 020102R, 2001.

Hanbury brown-Twiss effect in a two-photon interference experiment

Heonoh Kim, Jeonghoon Ko, 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 August 21, 2002, Revised manuscript March 6, 2003)

We present experimental observations of two-photon spatial bunching effect in a two-photon interference experiment by using the photon pairs produced by parametric down-conversion and the Hong-Ou-Mandel interferometer. We show that this pairing behavior is observed by coincidence detection, but gives a negligible effect for a single count.

OCIS Code : 270.558.