

매개하향변환 과정에서 발생하는 광자쌍의 상관관계에 따른 동시계수 측정

김현오 · 고정훈 · 김태수[†]

울산대학교 수학 및 물리기술학부

④ 680-749 울산시 남구 무거2동 산29번지

(2001년 8월 21일 받음, 2001년 11월 9일 수정본 받음)

자발적인 매개하향변환과정에서 발생하는 광자쌍을 이용하여, 광학계내의 광손실에 따른 상관관계의 감소가 단일광자계수와 두-광자 동시계수에 미치는 영향을 조사하였다. 두 검출기 앞에 얇은 유리판을 설치하고 유리판의 편광에 따른 투과율을 변화시켜 두 광자들간의 상관관계를 인위적으로 조절하였다. 상관관계의 정도에 따라 측정된 단일광자계수는 광자를 측정하는 검출기 앞에 놓인 유리판의 투과율에 비례하는 반면에, 두-광자 동시계수는 두 검출기 앞에 놓인 두 유리판의 투과율의 곱에 비례하였다.

분류코드 : OE.040, OS.010, QO.010, SM.020.

I. 서 론

자발적인 매개하향변환(spontaneous parametric down-conversion; SPDC)은 레이저 광원(펌프빔)에서 나온 광자들이 $\chi^{(2)}$ 의 비선형성을 갖는 매질과 상호작용을 통해 signal과 idler라 불리는 광자쌍을 발생시키는 비선형 과정이다.^[1] 양자역학적으로는 짧은 파장의 광자 하나가 긴 파장의 두 광자(광자쌍)로 자발적으로 나뉘어지는 과정으로 생각할 수 있고, 두 광자는 시간적으로 강한 상관관계를 나타낸다.^[2,3] SPDC에서는 여러 가지 파장의 광자 빔이 결정을 빠져나올 때 원추형으로 방출되는데, 이 과정에서 에너지 보존($\omega_p = \omega_s + \omega_i$)과 운동량 보존($\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i$)에 해당하는 위상조화(phase matching)조건이 만족될 때 효율적으로 일어난다. 따라서 특정한 방향에서 하나의 광자가 측정되면, 쌍을 이루는 다른 하나의 광자는 위상조화 조건을 만족하는 곳에서 반드시 측정된다.

SPDC에서 동시에 발생하는 광자쌍을 두 검출기로 동시계수하는 방법을 이용하면, 표준광원이나 표준측정장치를 이용하지 않고도 광검출기의 양자효율을 절대적으로 측정할 수 있고, 또한 가시광 영역을 벗어난 스펙트럼의 세기를 효과적으로 측정할 수 있다.^[4] 실제로 이러한 방법으로 측정된 결과는 종래의 방법으로 측정된 결과와 근소한 오차범위 내에서 아주 잘 일치한다는 것이 보고되었다.^[5,6] 또한 SPDC에서 생성된 두 광자는 양자역학적인 얹힘(entanglement)의 특성을 갖기 때문에 양자역학의 근본적인 난제들을, 예를 들면 Bell 부등식과 같은, 실험적으로 검증하는데 효과적으로 이용되었다.^[7-10] 최근에는 양자정보처리 및 전송의 분야에서 양자통신,^[11] 양자텔레포테이션(teleportation),^[12] 양자암호화(cryptography)^[13] 등에 광자들간의 얹힘특성의 응용가능성을 실험하는데 있어서 유용한 광원으로 이용되고 있다.

최근에 우리는 Mach-Zehnder 간섭계를 이용하여 간섭계의 위상차를 측정할 때, 고전적인 한계를 능가하는 정밀도를 얻기 위해서는 상관관계가 있는 광원을 간섭계에 입사시키는 것이 중요하다는 것을 보고한 바가 있다.^[14-16] 또한 위상차 측정의 정밀도를 높이기 위해서는 검출기의 양자효율이 결정적인 역할을 하는데, 이는 상관관계가 있는 광원을 이용하는 경우 양자효율은 간섭계의 출구에 위치한 두 검출기가 상관관계가 있는 광자들을 동시에 측정할 확률과 직접적으로 관계되기 때문이다. 이상적인 상관관계가 있는 광원을 이용하더라도 실제로 검출기가 입사하는 광자들을 모두 측정할 수는 없기 때문에 검출기의 효율은 광의 측정에 있어서 아주 중요한 역할을 한다. 광을 측정하는 실험에서는 광원을 제외한 모든 광학계를 하나의 검출기로 생각할 수 있고, 특히 광자쌍을 이용하는 광학계에서 광손실은 동시계수 측정효율을 떨어뜨리는 결정적인 역할을 한다.

본 연구에서는 제1형의 위상조화조건을 만족하는 매개하향변환에서 발생한 상관관계가 있는 광자쌍과 두-광자 동시계수법을 이용하여, 광자쌍이 광학계를 통과하면서 생기는 광손실에 의한 상관관계의 감소가 동시계수에 미치는 영향을 조사하였다. 광자쌍의 상관관계를 인위적으로 변화시키기 위해서 두 검출기 앞에 두께가 0.3 mm인 얇은 유리판을 놓고 광자쌍의 편광방향에 수평과 수직방향으로 각도를 변화시키면서 편광에 의존하는 투과율을 조절하였다. 두 검출기의 단일광자계수(single count)와 두 검출기에서의 동시계수(coincidence count)를 측정하여 측정된 결과를 입사하는 광자쌍의 편광방향에 수직 또는 수평으로 유리판의 각도변화에 따른 투과율의 변화와 비교, 분석하였다.

II. 광자쌍의 상관관계가 동시계수에 미치는 영향

매개하향변환과정에서 signal과 idler 광자쌍은 동시에 발생

[†]E-mail: tskim@mail.ulsan.ac.kr

하기 때문에 100%의 상관관계를 가진다. 이러한 광자쌍을 양자효율이 1인 이상적인 두 검출기를 이용하여 동시에 측정할 경우, 각각의 검출기에서 측정되는 단일계수와 두 검출기에서 동시에 측정되는 동시계수는 정확히 일치하게 된다. 하지만 실제로 유효율이 1인 이상적인 검출기는 있을 수 없으며 대부분의 검출기는 1보다 적은 유효율을 갖는다. 또한 광을 측정하는 검출장치는 광학부품들을 필수적으로 수반하기 때문에 반사, 흡수, 산란 등의 피할 수 없는 광손실이 수반된다. 이러한 검출기의 유효율과 광학계 내에서 발생하는 광자쌍의 손실로 인한 상관관계의 감소는 두 검출기의 단일계수와 동시계수에 차이를 가져오고 결과적으로 동시계수 측정유효율을 떨어뜨리는 요인이 된다.

하향변환에서 두 광자는 반드시 동시에 발생하기 때문에 각각의 검출기에 입사하는 광자들의 수와 광자쌍의 수는 정확히 일치한다. 두 검출기에 입사하는 광자쌍의 수를 N 이라고 하면 양자효율이 μ_1, μ_2 인 두 검출기로 동시에 두 광자를 측정할 경우 각각의 검출기에서 측정되는 단일광자계수는

$$\begin{aligned} N_1 &= \mu_1 N \\ N_2 &= \mu_2 N \end{aligned} \quad (1)$$

이고, 두 검출기에서 동시에 측정되는 동시계수는

$$N_C = \mu_1 \mu_2 N \quad (2)$$

와 같다. 유효율이 1보다 작은 검출기로 두 광자를 동시에 측정하면 식 (1)과 (2)로부터 각각의 검출기에서 검출하는 단일광자계수와 동시계수로부터 두 검출기의 유효율을 결정할 수 있다.

$$\mu_1 = \frac{N_C}{\mu_2 N} = \frac{N_C}{N_2}, \mu_2 = \frac{N_C}{\mu_1 N} = \frac{N_C}{N_1} \quad (3)$$

이와 같이 광자쌍을 이용하여 검출기의 유효율을 절대적으로 결정하기 위해서는 식 (3)으로부터 광검출기에 입사하는 두 광자가 1의 상관관계를 유지해야 한다. 만약 상관관계가 현저하게 감소하면 추가적으로 보정하는 과정을 거쳐야만 한다.

광자쌍을 이용하는 광학계에서 두 광자간의 상관관계가 동시계수 측정에 미치는 영향을 알아보자. 입사하는 광이 선편광되어 있는 경우 두 검출기 앞에 유리판을 놓고 광의 진행방향과 유리판이 이루는 각도를 조절하여 입사광의 편광에 의존하는 유리판의 투과율을 결정하면 인위적으로 입사하는 광의 손실을 조절할 수 있고, 따라서 두 광자간의 상관관계를 조절할 수 있다. 두 검출기 앞에 놓인 유리판의 각도에 따른 투과율을 각각 $T_1(\theta), T_2(\theta)$ 라고 할 때, 투과율에 따른 단일광자계수와 동시계수는

$$\begin{aligned} N_1'(T) &= T_1(\theta) N_1 \\ N_2'(T) &= T_2(\theta) N_2 \end{aligned} \quad (4a)$$

$$N_C'(T) = T_1(\theta) T_2(\theta) N_C \quad (4b)$$

와 같이 표현할 수 있다. 여기서 N_1 과 N_2 는 유리판이 없는 상태에서 측정된, 유효율이 각각 μ_1 과 μ_2 인 두 검출기의 단일계수이고 ($N_{1,2} = \mu_{1,2} N$), N_C 는 동시계수이다 ($N_C = \mu_1 \mu_2 N$). 식 (4)

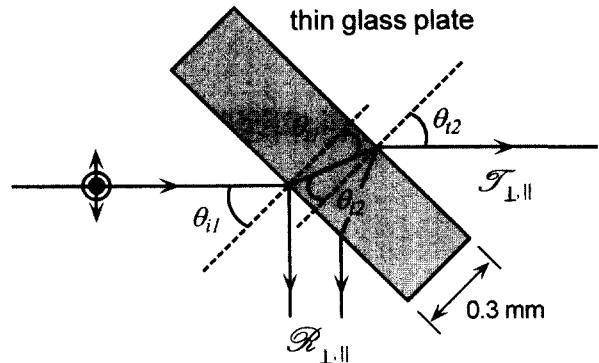


그림 1. 입사면에 수직(●) 또는 수평(↑)방향으로 선편광된 광이 입사할 때 유리판의 각도에 따른 투과율의 변화.

의 오른쪽 항들은 두 검출기의 유효율에 대한 효과가 포함되어 있으며, 이는 유리판의 각도와 상관없이 일정한 값이므로 여기서는 단지 입사하는 광자들간의 상관관계의 영향만 고려한다.

본 실험에 이용된 하향변환된 광자쌍은 광학대의 면에 평행하게 편광되어 있고, 유리판에 입사하는 광의 편광방향이 수직(θ_{\perp}) 또는 수평(θ_{\parallel})이 되도록 설치하고 각도를 변화시키면 편광에 의존하는 투과율의 변화로 광자쌍의 상관관계를 조절할 수 있다.

그림 1에서 공기중에서 유리판의 앞면에 입사하는 각도가 θ_{i1} 이고 유리판 내부에서 굴절각(또는 투과각)이 θ_{t1} 이면, 입사면에 평행하게 편광된 광(↑)의 경우에, 유리판의 각도에 따른 투과율은

$$T(\theta_{\parallel}) = \frac{\sin 2\theta_{i1} \sin 2\theta_{t1}}{\sin^2(\theta_{i1} + \theta_{t1}) \cos^2(\theta_{i1} - \theta_{t1})} \quad (5)$$

이고, 입사면에 수직방향으로 편광된 광(●)의 각도에 따른 투과율은

$$T(\theta_{\perp}) = \frac{\sin 2\theta_{i1} \sin 2\theta_{t1}}{\sin^2(\theta_{i1} + \theta_{t1})} \quad (6)$$

이다.^[17] 유리판은 두께를 갖고 있기 때문에 유리판 전체의 투과율은 유리판 앞면에서의 투과율과 뒷면에서의 투과율을 동시에 고려해야 한다. 유리판이 평행하다고 가정하면, 유리판 내부에서 공기중으로 입사하는 각도 θ_{i2} 는 θ_{i1} 과 같고 유리판 내부에서 공기중으로 빠져나갈 때 굴절각 θ_{t2} 는 앞면의 입사각 θ_{i1} 과 같다. 따라서 전체 투과율은 수평편광인 경우에는

$$T(\theta_{\parallel}) = \frac{\sin 2\theta_{i1} \sin 2\theta_{t1}}{\sin^2(\theta_{i1} + \theta_{t1}) \cos^2(\theta_{i1} - \theta_{t1})} \cdot \frac{\sin 2\theta_{i2} \sin 2\theta_{t2}}{\sin^2(\theta_{i2} + \theta_{t2}) \cos^2(\theta_{i2} - \theta_{t2})} \quad (7)$$

이고, 수직편광인 경우에는

$$T(\theta_{\perp}) = \frac{\sin 2\theta_{i1} \sin 2\theta_{t1}}{\sin^2(\theta_{i1} + \theta_{t1})} \cdot \frac{\sin 2\theta_{i2} \sin 2\theta_{t2}}{\sin^2(\theta_{i2} + \theta_{t2})} \quad (8)$$

이 된다. 검출기에 입사하는 광의 편광방향이 입사면에 평행

한 경우 검출기 앞에 놓인 유리판의 각도를 동일하게 입사면에 평행하게 변화시키면 유리판에서 다른 손실이 없는 경우 Brewster 각 ($\theta_B \approx 56.4^\circ$)에서 투과율은 최대 1이 된다. 반면에 입사면에 수직하게 편광된 광의 경우에는 유리판의 각도가 증가할수록 투과율은 계속해서 감소하게 된다.

III. 광자쌍의 상관관계에 따른 동시계수 측정

그림 2는 매개하향변환과정(SPDC)에서 동시에 발생한 광자쌍이 두 검출기에 입사할 때 광학계 내에서 광손실로 인한 상관관계의 감소가 두-광자 동시계수에 미치는 영향을 측정하기 위한 실험장치의 구조이다. 325 nm 파장에서 단일모드로 동작하는 He-Cd 레이저(He-Cd 3207N, Liconix)에서 나오는 광을 펌프빔으로 사용하여 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ 크기의 BBO($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$)결정에 입사시키면 $\chi^{(2)}$ 의 비선형성을 갖는 결정내의 원자들과 입사광의 상호작용에 의해 여러 가지 파장의 하향변환 빔이 결정으로부터 원추형으로 방출된다. 본 실험에서는 펌프빔의 진행방향에 대해서 대칭적인 650 nm 파장의 광자쌍(signal 광자와 idler 광자)을 이용하였다. BBO 결정은 펌프빔의 진행방향과 결정의 광축의 각도가 36.6° 가 되도록 절단되어 있으며, 이러한 경우 제I형의 위상조화조건(type-I phase matching condition)이 만족하여 동시에 하향변환된 광자들은 편광방향이 서로 같다. 이상광선인 펌프빔의 편광은 광학대 면에 수직이고 정상광선인 하향변환 빔의 편광은 광학대 면에 평행하다.

결정을 빼어 나온 signal과 idler 광자쌍은 결정으로부터 약 1 m정도 떨어져 있는 두 검출기로 입사한다. 검출기 앞에는 초점거리 10 cm인 볼록렌즈로 광을 집속하고, 광자쌍 이외의 다른 광이 입사하는 것을 차단하기 위해서 선폭이 약 10 nm인 간섭필터(IF)를 놓았다. 두 검출기는 광섬유에 연결되어 수광면(active area)이 직경 180 μm 인 검출기(APD)에 입사하게 된다. 하향변환된 두 광자빔의 세기는 아주 약하고, 또한 렌즈를 통과해서 광섬유의 끝으로 입사하기 때문에 실험에서 측정되는 광의 세기는 광학계의 정렬에 아주 민감하다. 두 검출기의 양자효율은 650 nm 파장에서 약 65%정도인데, 실제로는 측정과정에서 광의 손실이 많기 때문에 두 검출기의 실제효율은 약 30%가 된다.

실험에서 사용한 두 검출기는 전자의 눈사태(avalanche)효과를

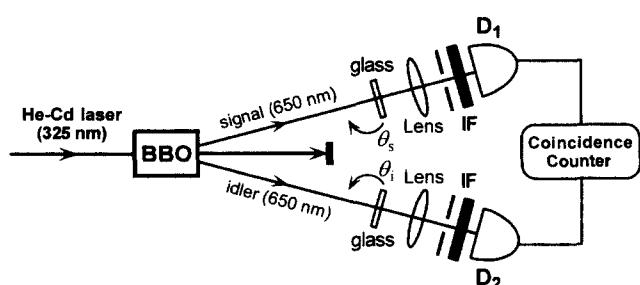


그림 2. 광원(BBO)과 검출기 사이에 놓인 얇은 유리판의 투과율의 변화에 따라 두 검출기에 입사하는 광자쌍의 상관관계가 변할 때 동시계수 측정을 위한 실험장치도.

이용한 Si-APD로서 EG&G의 SPCM(single photon counting modules; SPCM-AQ-141-FC)이다. 측정파장은 400~1060 nm 범위이며, 직경이 180 μm 인 원형 광표면(active area)의 최대 양자효율은 700 nm파장 영역에서 70%정도이다. 검출기의 정격전압은 DC+5 V이고, 전원이 공급된 상태에서 바탕계수(dark count)는 100 s^{-1} 미만이며 빛이 입사하는 경우 최대 10^7 s^{-1} 까지 측정이 가능하다. 검출기는 입사하는 광으로부터 발생한 광전자들을 해아리기 위해서 광자계수장치에 연결되어 있다. 전원이 공급된 APD에 빛이 입사하면 SPCM으로부터 높이 +2 V와 폭 9 ns의 전압펄스가 발생하고, 이렇게 발생한 펄스는 광자계수장치(LeCroy 1434A)에서 선별기(Discriminator; LeCroy 821)와 계수기(Scaler; LeCroy 2551), 그리고 동시계수기(Coincidence; LeCroy 622)를 거치면서 일정한 측정시간 동안 검출기에서 발생하는 광전자들을 해아리게 된다. 두 검출기로 동시계수를 하는 경우에 주변의 미세한 광에 의해 우연한 동시계수가 발생할 수 있으므로, 광자쌍에 의한 동시계수만을 선별하기 위해서 검출기의 분해시간 171 ns이내에서 발생하는 우발동시계수들은 전체 동시계수에서 제거하였다. 분해시간은 안정되게 동작하는 열광원에서 방출되는 상관관계가 없는 광자들을 두 검출기에 입사시켰을 때, 광자계수장치에서 일정한 측정시간 T동안 측정되는 단일계수(N_1 , N_2)와 동시계수(N_C)를 이용하여 식 $T_R = N_C T / N_1 N_2$ 에 의해 결정하였다.

BBO 결정에서 발생한 signal과 idler 광자쌍을 두 검출기에서 동시계수 할 때 두 광자의 상관관계를 인위적으로 조절하기 위해서 실험은 크게 두 가지로 행해졌다. 먼저 두 검출기 앞에 크기를 조절할 수 있는 조리개(aperture)을 놓고, 한 쪽 검출기 앞의 조리개는 완전히 개방된 상태에서 다른 쪽 검출기 앞에 놓인 구경의 크기를 증가시키면서 단일계수와 동시계수를 측정하였다. 두 번째는 광원인 BBO 결정에서 두 검출기에 이르는 두 경로에 두께가 0.3 mm인 얇은 유리판을 설치하고 유리판의 각도를 광자쌍의 편광에 수직과 수평으로 변화시키면서 단일계수와 동시계수를 측정하였다.

유리판의 각도변화에 따른 측정결과를 분석하기 위해서, 검출기 앞에 놓인 유리판의 각도를 광자쌍의 편광방향에 수직 또는 수평으로 변화시킬 때 유리판의 투과율의 변화는 그림 1을 통해 알 수 있다. 검출기 앞에는 렌즈가 설치되어 있으므로 두께가 0.3 mm인 유리판의 각도변화에 따른 입사빔의 미세한 편향효과는 고려하지 않아도 되며 다만 유리판의 각도변화는 투과율에만 영향을 미친다. 실제 실험에서는 광자쌍의 편광은 광학대 면에 평행하게 고정되어 있는 상태에서 유리판의 각도를 광학대 면에 수직과 수평으로 변화시켰다.

IV. 결과 및 논의

그림 3은 검출기 D_2 앞에 놓인 구경은 완전히 개방된 상태에서 D_1 앞의 구경을 변화시켰을 때 D_1 에서 측정된 단일계수 N_1 의 변화에 대한 두 검출기의 동시계수 N_C 의 변화를 나타낸 것이다. 실험치는 측정시간 간격을 1초로 하여 3000번 반복 측정하고 그 평균값을 취한 것이다. 두 검출기 앞의 구경이 완전히 개방될 때 측정되는 단일계수 N_1 과 N_2 의 개수는 약

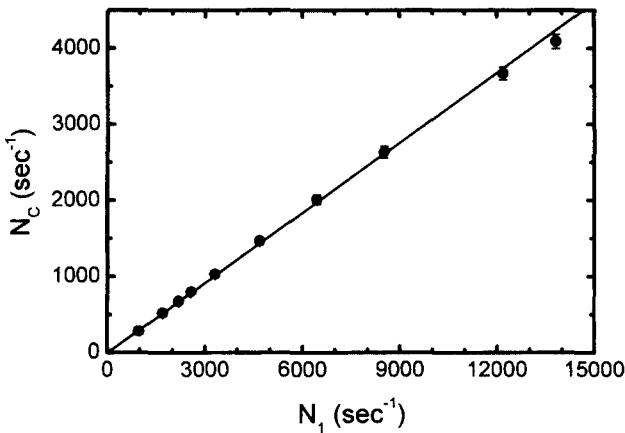


그림 3. D_2 앞의 구경이 완전히 개방된 상태에서 D_1 앞의 구경의 크기를 증가시켰을 때 D_1 의 단일계수(N_1)의 변화에 따른 동시계수(N_c)의 변화. D_1 의 효율은 일정한 값을 갖기 때문에 D_1 에 입사하는 광자수가 증가함에 따라 동시계수도 비례해서 증가한다. 그래프에서 N_c/N_1 은 D_2 의 효율에 비례한다.

20,000s⁻¹정도이다.

그림에서 N_1 의 개수가 증가하면 단일계수와 동시계수의 비율 즉, N_c/N_1 이 일정한 값을 갖도록 동시계수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 식 (3)에 따라 검출기 D_2 의 효율이 일정한 값을 갖기 때문인데, 광원과 검출기 사이에서 광의 손실을 무시할 수 없는 실제적인 조건에서 N_c/N_1 은 검출기 D_2 의 실제효율을 나타내며, 본 실험에서 측정된 효율은 약 30% 정도 된다. 따라서 구경이 커짐에 따라 D_1 에 입사하는 광자수가 증가하면 D_2 가 측정하는 광자에 대응하는 광자들을 D_1 에서 동시에 측정할 확률이 일정하게 증가하게 된다.

그림 4와 5는 광자쌍의 편광방향이 입사면에 수평(θ_{\parallel}) 또는 수직(θ_{\perp})이 되도록 두 유리판의 각도를 0°에서 80°까지 변화시켰을 때, 각도에 따라 측정된 검출기 D_1 의 단일광자계수 $N_1'(\theta_{\parallel})$ 와 두 검출기 D_1 과 D_2 에서 동시에 측정된 두-광자 동시계수 $N_c'(\theta_{\parallel})$ 를 보인 것이다. 그림 4의 경우는 그림 1에서 유리판의 각도를 입사면에 평행하게 회전시키는 경우에 해당하며, 유리판의 각도에 따른 투과율의 변화는 식 (7)로 나타낼 수 있다. 그리고 그림 5는 광의 편광이 입사면에 수직인 경우에 해당하여 투과율의 변화는 식 (8)과 같다.

그림 4(a)에서 그래프의 왼쪽 세로축은 유리판의 각도에 따라 측정된 D_1 의 단일광자계수(●)이고, 오른쪽 세로축은 유리판의 각도에 따른 투과율 $T(\theta)$ 을 나타낸 것이다. 검출기에 입사하는 광의 편광방향과 나란하게 유리판의 각도를 회전시키면 광의 진행방향과 유리판이 이루는 각도가 Brewster 각을 이룰 때 유리판의 입사면에 나란하게 편광된 광의 투과율이 최대가 되며, 그 이상으로 각도가 증가하면 투과율이 급격하게 감소하게 된다. 그래프에서 실선으로 나타낸 것은 식 (7)을 이용하여 투과율이 최대가 되는 56.4°를 기준으로 실험치에 곡선맞춤한 것이다. 식 (4a)에서 알 수 있듯이 단일광자계수는 검출기 앞에 놓인 유리판의 투과율의 변화에 직접 비례하며, 이는 실험 결과와도 잘 일치하였다($N_1'(T) = T_1(\theta)N_1$).

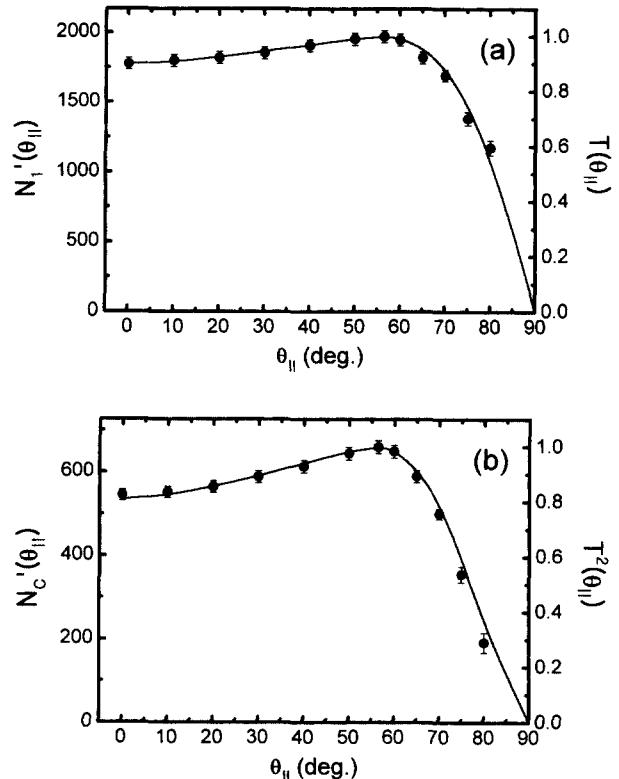


그림 4. 광자쌍의 편광방향이 입사면에 평행하게 유리판의 각도를 변화시켰을 때, 각도에 따라 측정된 (a)검출기 D_1 의 단일광자계수 $N_1'(\theta_{\parallel})$ 와 (b)두 검출기 D_1 과 D_2 에서 동시에 측정된 두-광자 동시계수 $N_c'(\theta_{\parallel})$. 단일광자계수는 검출기 앞에 놓인 유리판의 각도에 따른 투과율에 비례하며, 동시계수는 두 유리판의 투과율의 곱에 비례한다.

그림 4(b)는 두 검출기 D_1 과 D_2 에서 동시에 측정된 두-광자 동시계수를 나타낸 것이다. 그림 4(a)와 마찬가지로 유리판의 각도 θ_{\parallel} 가 0°에서 56.4°까지 증가할 때는 입사면에 평행하게 편광된 signal과 idler 광자의 투과율이 점점 증가하므로 두 검출기에서 측정되는 두 광자의 상관관계가 증가하게 되고, θ_{\parallel} 가 Brewster 각보다 커지면 두 광자의 투과율이 급격하게 감소하므로 광자의 상관관계도 아주 빠르게 감소하게 된다. 유리판의 투과율이 증가하면 각각의 검출기에서 단일광자계수는 투과율에 비례하는 반면에 동시계수는 $N_c'(T) = T_1(\theta)T_2(\theta)N_c$ 와 같이 두 검출기 앞에 놓인 유리판의 투과율의 곱에 비례한다. 본 실험에서 광학계는 대칭적으로 구성되어 있고, 또한 각 광학부품들의 특성이 거의 같기 때문에(특성은 별도의 실험을 통해서 검증) 두 검출기에 입사하는 광자수는 거의 비슷하다. 따라서 그래프의 오른쪽 세로축은 두 유리판의 각도에 따른 투과율이 같다고 가정하고 $T_1(\theta)T_2(\theta) = T^2(\theta)$ 으로 하였다. 여기서도 각도가 Brewster 각이 되는 즉, 두 광자의 상관관계가 최대가 되는 지점을 기준으로 실험치에 곡선맞춤 하였고 실험 결과와도 잘 일치한다.

그림 5는 두 검출기에 입사하는 광자쌍의 편광방향이 입사면에 수직이 되도록 유리판의 각도를 변화시켰을 때, 각도에 따라 측정된 검출기 D_1 의 단일광자계수 $N_1'(\theta_{\perp})$ 와 두 검출기

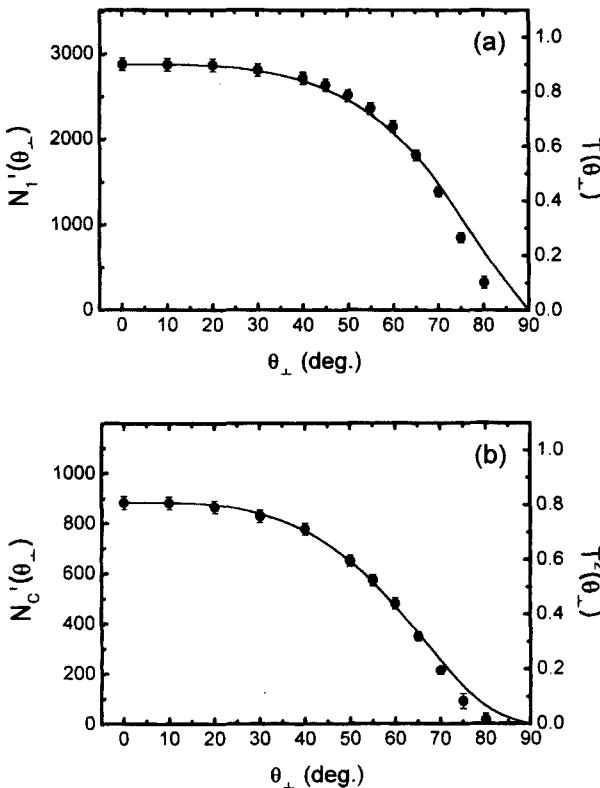


그림 5. 광자쌍의 편광방향이 입사면에 수직이 되도록 유리판의 각도를 변화시켰을 때, 각도에 따라 측정된 (a)검출기 D_1 의 단일광자계수 $N_1'(\theta_{\perp})$ 와 (b)두 검출기 D_1 과 D_2 에서 동시에 측정된 두-광자 동시계수 $N_c'(\theta_{\perp})$.

D_1 과 D_2 에서 동시에 측정된 두-광자 동시계수 $N_c'(\theta_{\perp})$ 를 나타낸 것이다. 이 경우에는 유리판의 회전각도가 증가할수록 편광방향에 의존하는 투과율은 계속해서 단조롭게 감소한다. 그럼 4에서와 마찬가지로 단일광자계수는 검출기 앞에 놓인 유리판의 각도에 따른 투과율에 비례하는 반면에, 동시계수는 두 유리판의 투과율의 곱에 비례하였다.

그림 4와 5의 결과를 이용하면 식(3)으로 표현된 검출기의 효율에 대한 식을 광자쌍의 손실에 의한 상관관계의 감소가 있을 때의 효율에 대한 식으로 나타낼 수도 있다.

$$\mu_2'(\theta) = \frac{T_1(\theta)T_2(\theta)N_c}{T_1(\theta)N_1} = T_2(\theta)\mu_2 \quad (9)$$

이 식은 검출기 D_1 의 단일광자계수와 두-광자 동시계수를 이용하여 검출기 D_2 의 효율을 결정할 때 두 광자간의 상관관계가 효율측정에 미치는 효과를 나타낸 것이다. 매개하향변환에서 발생한 광자쌍의 상관관계를 이용하여 광검출기의 양자효율을 절대적으로 측정하는 방법들이 여러 문헌에서 소개되었다.^[16-23] 실제로 광자쌍을 이용하는 방법으로 효율을 결정하기 위해서는 광학계 내에서 광자쌍의 상관관계가 최대한 유지되는 상태에서 광의 검출이 있어야 한다는 실험적인 제약조건이 따른다. 식 (9)를 이용하면, 상관관계가 있는 광자쌍을 이용하여 검출기의 효율을 결정할 때 광학계 내에서 상관관계의 감

소(decorrelation)가 효율측정의 정확도에 미치는 영향을 알아 볼 수 있고, 오차요인을 효과적으로 보정하는데 참고가 될 수 있다.

V. 결 론

매개하향변환과정에서 발생하는 광자쌍을 두 검출기로 동시 계수 할 때 광자쌍이 광학계를 통과하면서 생기는 광손실에 의한 상관관계의 감소가 단일광자계수와 동시계수에 미치는 영향을 조사하였다. 하향변환된 광자쌍은 발생과정에서 100%의 상관관계를 갖지만, 광을 검출하는 측정장치는 렌즈, 필터, 빔분할기 등의 광학부품들을 필수적으로 수반하기 때문에 광학계를 통과하는 동안 흡수나 반사 등에 의한 피할 수 없는 손실을 겪게 된다. 따라서 이러한 손실은 광학계에 입사하는 모든 광자들이 검출기에 도달하지 못하게 하고, 또한 광자쌍을 이용하는 광학계에서 각 검출기에 입사하는 광자들에 대해서 두 광자를 동시에 측정할 확률(동시계수 측정효율)을 떨어뜨리는 요인이 된다.

본 실험에서는 광자쌍을 동시에 측정하는 두 검출기 앞에 크기를 조절할 수 있는 구경과 각도를 변화시킬 수 있는 얇은 유리판을 놓고 광자쌍의 상관관계를 인위적으로 조절하면서 단일광자계수와 두-광자 동시계수를 측정하였다. 한 쪽 검출기 앞의 구경은 완전히 개방된 상태에서 다른 쪽 검출기 앞의 구경을 점점 크게 하였을 때, 측정되는 단일광자계수가 증가할 수록 동시계수도 비례적으로 증가하였다. 이는 검출기의 양자효율이 입사하는 광에 상관없이 일정한 값을 갖기 때문이며, 따라서 구경이 커짐에 따라 검출기에 입사하는 광자수가 증가할수록 구경이 개방된 검출기에서 어떤 순간 측정되는 광자에 대응하는 쌍의 광자를 측정할 확률이 그 검출기의 양자효율만큼 비례해서 증가하기 때문이다.

두 검출기 앞에 두께가 0.3 mm인 얇은 유리판을 놓고 유리판의 각도를 하향변환된 광자쌍의 편광방향에 대해 수직 또는 수평으로 변화시키면서 동시에 측정한 결과, 유리판의 각도에 따른 단일광자계수 즉, 하나의 검출기에서 측정되는 광자의 수는 검출기 앞에 놓인 유리판의 투과율에 직접 비례하는 반면에 동시계수는 두 유리판의 투과율의 곱에 비례하였다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] 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.
- [2] D. N. Klyshko, *Photons and Nonlinear Optics* (New York, Gordon and Breach, 1988) p. 325.
- [3] S. Friberg, C. K. Hong, and L. Mandel, "Measurement of time delays in the parametric production of photon pairs,"

- Phys. Rev. Lett.*, vol. 54, no. 18, pp. 2011-2013, 1985.
- [4] A. L. Migdall, "Correlated-photon metrology without absolute standards," *Physics Today*, January, pp. 41-46, 1999.
- [5] J. G. Rarity, K. D. Ridley, and P. R. Tapster, "Absolute measurement of detector quantum efficiency using parametric downconversion," *Appl. Opt.*, vol. 26, no. 21, pp. 4616-4619, 1987; A. N. Penin and A. V. Sergienko, "Absolute standardless calibration of photodetectors based on quantum two-photon fields," *Appl. Opt.*, vol. 30, no. 25, pp. 3582-3588, 1991; P. G. Kwiat, A. M. Steinberg, R. Y. Chiao, P. H. Eberhard, and M. D. Petroff, "Absolute efficiency and time-response measurement of single-photon detectors," *Appl. Opt.*, vol. 33, no. 10, pp. 1844-1853, 1994.
- [6] 안경진, 김희상, 홍정기, 하양, 박정권, 신종태, 김태수, "광자쌍을 이용한 광검출기의 양자효율 절대측정," *한국광학회지*, vol. 4, no. 4, pp. 452-456, 1993.
- [7] 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.
- [8] J. Brendel, E. Mohler, and W. Martiensson, "Experimental test of Bell's inequality for energy and time," *Europhys. Lett.*, vol. 20, no. 7, pp. 575-580, 1992.
- [9] P. G. Kwiat, A. M. Steinberg, and R. Y. Chiao, "High-visibility interference in a Bell-inequality experiment for energy and time," *Phys. Rev. A*, vol. 47, no. 4, pp. 2472-2475, 1993.
- [10] T. B. Pittman, Y. H. Shih, A. V. Sergienko, and M. H. Rubin, "Experimental tests of Bell's inequalities based on space-time and spin variables," *Phys. Rev. A*, vol. 51, no. 5, pp. 3495-3498, 1995.
- [11] C. K. Hong, S. R. Friberg, and L. Mandel, "Optical communication channel based on coincident photon pairs," *Appl. Opt.*, vol. 24, no. 22, pp. 3877-3882, 1985; S. F. Pereira, Z. Y. Ou, and H. J. Kimble, "Quantum communication with correlated nonclassical states," *Phys. Rev. A*, vol. 62, 042311, 2000.
- [12] 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.
- [13] T. Jannewein *et al.*, "Quantum cryptography with entangled photons," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, no. 20, pp. 4729-4732, 2000; D. S. Naik *et al.*, "Entangled state quantum cryptography: eavesdropping on the Ekert protocol," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, no. 20, pp. 4733-4736, 2000; W. Tittle *et al.*, "Quantum cryptography using entangled photons in energy-time Bell states," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, no. 20, pp. 4737-4740, 2000.
- [14] T. Kim, O. Pfister, M. J. Holland, J. Noh, and J. L. Hall, "Influence of decorrelation on Heisenberg-limited interferometry with quantum correlated photons," *Phys. Rev. A*, vol. 57, no. 5, pp. 4004-4013, 1998.
- [15] 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. Commun.*, vol. 156, pp. 37-42, 1998.
- [16] T. Kim, Y. Ha, J. Shin, H. Kim, G. Park, K. Kim, T. G. Noh, and C. K. Hong, "Effect of the detector efficiency on the phase sensitivity in a Mach-Zehnder interferometer," *Phys. Rev. A*, vol. 60, no. 1, pp. 708-711, 1998.
- [17] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics* (Pergamon press, 1983) p. 44.

Effects of the decorrelation on the coincidence detection with correlated photons in a parametric down-conversion

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

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

[†]E-mail: tskim@mail.ulsan.ac.kr

(Received August 21, 2001 ; revised manuscript received November 9, 2001)

The effect of decorrelation on the coincidence is investigated with correlated photons produced by parametric down-conversion process. The degree of correlation between photon pairs is adjusted by changing the polarization dependent transmissivities of thin glass plates in front of two detectors. It was found that the single counts of each detectors are proportional to the transmissivity and the coincidence is proportional to the product of transmissivities of the glasses in front of two detectors.

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