

## 얽힘상태 광을 이용한 광학계에서 잡광이 동시계수에 미치는 영향

김현오 · 고정훈 · 박구동 · 엄영호 · 김태수<sup>†</sup>

울산대학교 수학 및 물리기술학부

☎ 680-749 울산시 남구 무거2동 산29번지

(2001년 2월 12일 받음, 2001년 6월 1일 수정본 받음)

두 검출기를 이용하여 매개하향변환과정에서 발생하는 광자쌍을 동시계수할 때 배경 및 잡광이 동시계수에 미치는 영향을 조사하였다. 열광원에서 나온 광자들이 광자쌍과 함께 입사할 때 측정장치 내에서 분해시간에 의해 이러한 잡광을 효과적으로 제거하기 때문에 광자쌍의 동시계수에는 전혀 영향을 미치지 않았다. 이러한 얽힘 상태의 광원과 동시계수 측정방법은 신호광의 손실이나 잡광의 영향을 최소화하는 정보처리와 전송 및 통신체계에 효과적으로 이용될 수 있다.

분류코드 : OE.040, QO.010.

### I. 서 론

다양한 광원의 개발과 측정방법의 개선은 광학뿐만 아니라 물리학 전반에 걸쳐서 큰 관심의 대상이 된다. 레이저의 출현과 비선형 광학의 발전에 힘입어 최근에는 양자역학적으로만 설명이 가능한 다양한 광원들이 개발되어 연구에 사용되고 있다. 특히 얽힘상태(entangled state)의 광은 고전적으로 설명되지 않는 여러 가지 현상들을 나타내 보이기 때문에 지난 10여년 동안 양자역학의 근본적인 문제들을 검증하기 위한 이론 및 실험적인 도구로서 많은 관심을 모아왔다.<sup>[1,2]</sup>

얽힘상태는 상관관계를 갖는 양자계를 설명하기 위해 Schrödinger가 사용한 표현에서 비롯되었으며,<sup>[3]</sup> 공간적으로 멀리 떨어져 있는 두 입자 사이에 존재하는 비국소적인 상관관계를 갖는 양자계의 상태를 표현할 때 사용된다. 양자역학이 불완전하다는 것을 지적하기 위한 Einstein-Podolsky-Rosen (EPR)의 사고실험에서,<sup>[4]</sup> EPR은 교환관계가 성립하지 않는 두 물리량도 동시에 측정될 수 있으며 또한 동시에 실재성(reality)을 가질 수 있다는 것을 보이기 위해서 상관관계가 있는 한 쌍의 입자를 다루었기 때문에, 얽힘상태는 또한 EPR 상태라고도 한다. 얽힘상태 또는 EPR 상태에 있는 두 입자는, Bohm의 논의와 같이 스핀이 0인 입자에서 동시에 방출된 스핀  $\pm 1/2$ 인 한 쌍의 전자의 스핀상태를 이용하여 주로 설명하는데, 여기서 멀리 떨어져 있는 하나의 전자의 스핀을 측정함과 동시에 다른 하나의 스핀상태가 측정에 상관없이 결정되는 상관관계를 나타낸다. 이러한 상태에 있는 한 쌍의 전자는 개별적으로 다룰 수가 없고 또한 전체 상태는 개별적인 전자의 파동함수로 나누어서 표현할 수 없기 때문에 이와 같은 한 쌍의 전자의 상태를 단일항 상태(singlet state)라고도 한다.<sup>[5]</sup>

광학적으로 이러한 얽힘상태는 짧은 파장의 레이저광이 비선형 매질과 상호작용할 때 아주 짧은 시간간격으로 두 개의

광자가 동시에 발생하는 자발적인 매개하향변환과정(spontaneous parametric down-conversion process; SPDC)을 통해서 얻을 수 있다.<sup>[6-8]</sup> 양자역학적으로 하나의 펌프 광자가 비선형 결정내에서 한 쌍의 광자(관례적으로 signal과 idler라고 함)로 나누어지는 SPDC 과정에서는, 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 잘 만족될 때 효과적으로 일어나는데, 결정에서 방출되는 광자빔은 결정을 통과하는 펌프빔을 중심으로 원추형으로 방출된다. 하향변환은 결정의 광축과 결정에서 빠져나오는 광자들이 이루는 각도에 따라 위상조화조건을 만족하는 여러 가지 각도가 있을 수 있기 때문에 하나의 입사광자에 대해서 동시에 발생하는 광자쌍(또는 두 광자)은  $10^{-9} \sim 10^{-10}$  sec 정도의 짧은 시간간격으로 발생한다.<sup>[9]</sup>

따라서 이러한 에너지-시간에 대해서 얽힘상태에 있는 두 광자를 서로 멀리 떨어진 두 개의 검출기로 동시에 측정할 때, 두 검출기에서 짧은 시간간격동안 측정된 광자계수 사이의 상관관계(동시계수; coincidence)는 Bell 부등식을 포함하는 양자역학적인 물리계의 근본적인 성질을 규명하는 실험적 도구가 될 뿐만 아니라, 최근에 관심이 급격하게 증가하고 있는 양자정보처리 및 전송에 효과적으로 이용될 수가 있다.<sup>[10]</sup> 최근에 수행된 양자텔레포테이션(quantum teleportation),<sup>[11]</sup> 양자암호화(cryptography),<sup>[12]</sup> 고밀도 양자부호화(dense coding),<sup>[13]</sup> 얽힘상태의 교환(entanglement swapping)<sup>[14]</sup> 등의 실험들은 모두가 이와 같은 얽힘상태의 광자쌍과 두 광자 동시계수 방법을 이용한다.

본 논문에서는 SPDC 과정에서 두 개의 광자가 쌍으로 발생한다는 것과 이러한 광자쌍을 동시에 측정하는 방법을 이용하여, 광자쌍에 비해서 상대적으로 세기가 센 열광자들이 검출기에 섞여서 입사할 때 이러한 잡광(noise)이 두 광자 동시계수에 미치는 영향을 조사하였다. 먼저 상관관계가 없는 열광자들을 이용하여 검출기의 분해시간을 결정하고, 열광자에 의한 인위적인 잡광을 광자쌍과 섞어서 두 검출기에 입사시킬

<sup>†</sup>E-mail: tskim@mail.ulsan.ac.kr

때 열광원의 세기를 증가시킴에 따른 동시계수의 변화를 측정하였다. 그리고 펄프빔을 변조(on/off)시켜 검출기에서 2진부호(bit)로 신호를 관측할 경우에 잡광의 세기가 상대적으로 큰 경우에도 효과적으로 신호와 잡광을 분리해 낼 수 있고, 얽힘상태의 광을 신호전달에 이용할 경우 배경광(background)이나 잡광보다 미약한 신호를 통해서도 정보를 전달할 가능성이 있다는 것을 보였다. 이러한 얽힘 상태의 광원과 동시계수 측정 방법은 광의 손실이나 잡광의 영향을 최소화하는 정보처리와 전송 및 통신체계에 효과적으로 이용될 수가 있다.

### II. 광자계수장치의 분해시간

단위시간당 광자수로 나타낸 세기가  $I$ 인 광이 위치  $\vec{r}$ , 시간  $t$ 에 있는 양자효율이  $\mu$ 인 광검출기에 입사하여  $\Delta t$ 의 시간동안 측정할 때 광전자가 방출될 확률은

$$P(\vec{r}, t, \Delta t) = \mu \langle \hat{I}(\vec{r}, t) \rangle \Delta t \quad (1)$$

로 주어진다. 여기서  $\langle \rangle$ 는 세기요동의 앙상블 평균을 나타낸다. 만약에 광원으로 부터 각각  $\vec{r}_1$  과  $\vec{r}_2$  의 거리에 놓여있는 두 검출기에 입사할 때, 두 검출기가  $t_1$ 과  $t_2$  시간에  $\Delta t$ 의 시간간격동안 광자를 측정한다면, 두 검출기로부터 방출되는 광전자들에 대한 결합확률(joint probability)은

$$P_j(\vec{r}_1, t_1, \Delta t; \vec{r}_2, t_2, \Delta t) = \mu_1 \Delta t \mu_2 \Delta t \langle T: \hat{I}(\vec{r}_1, t_1) \hat{I}(\vec{r}_2, t_2) : \rangle \quad (2)$$

와 같이 표현된다.<sup>[15]</sup> 여기서  $T$ 는 시간순서화(time ordering)를 나타내고  $:$ 는 정상순서화(normal ordering)를 나타낸다.

광원에서 나온 광자들이 두 검출기에 도달할 때까지  $\tau$ 만큼의 시간차이가 있다면, 두 검출기에서 측정된 광의 세기요동에 대한 규격화된 세기상관함수(normalized intensity correlation function 또는 degree of correlation)는

$$\lambda_{12}(\tau) = \frac{\langle T: \hat{I}(\vec{r}_1, t_1) \hat{I}(\vec{r}_2, t_1 + \tau) : \rangle}{\langle \hat{I}(\vec{r}_1, t_1) \rangle \langle \hat{I}(\vec{r}_2, t_1 + \tau) \rangle} - 1 \quad (3)$$

으로 표현되는데, 이를 이용하면 식 (2)의 결합확률은

$$P_j(\vec{r}_1, t, \Delta t; \vec{r}_2, t + \tau, \Delta t) = P_1(\vec{r}_1, t, \Delta t) P_2(\vec{r}_2, t, \Delta t) [1 + \lambda_{12}(\tau)] \quad (4)$$

으로 나타낼 수 있다. 두 검출기  $D_1$ 과  $D_2$ 에서  $\Delta t$  시간동안 광자를 동시에 측정할 때, 두 검출기의 동시계수율은 결합확률  $P_j$ 를 검출기의 분해시간  $T_R$  동안에 대해서 적분하여 구할 수 있다.

$$N_c' = N_1' N_2' \int_{-T_R/2}^{T_R/2} [1 + \lambda_{12}(\tau)] d\tau \\ = N_1' N_2' \left[ T_R + \int_{-T_R/2}^{T_R/2} \lambda_{12}(\tau) d\tau \right] \quad (5)$$

여기서  $N_1'$ 과  $N_2'$ 은 두 검출기에서 1초 동안 발생한 광전자의 개수이다.

만약에 입사하는 광의 결맞음시간( $T_c$ )이 짧아서 검출기의 분해시간보다 아주 작은 경우( $T_R \gg T_c$ )에는

$$N_c' \approx N_1' N_2' \left[ T_R + \int_{-\infty}^{\infty} |\gamma(\tau)|^2 d\tau \right] \\ = N_1' N_2' [T_R + T_c] \\ \approx N_1' N_2' T_R \quad (6)$$

와 같이 간단하게 나타낼 수 있고, 이 식으로부터 검출기의 분해시간은

$$T_R = \frac{N_c'}{N_1' N_2'} \quad (7)$$

으로서 두 검출기의 동시계수와 각각의 검출기에서의 단일계수를 이용하여 구할 수 있다.

### III. 실험

실험장치는 크게 두 부분 즉, 하향변환 광원을 포함하는 광학계와 검출기를 포함하는 광자계수장치로 나눌 수 있다. 검출기는 전자의 눈사태(avalanche)효과를 이용한 Si-APD로서 EG&G의 SPCM(single photon counting modules; SPCM-AQ-141-FC)이다. 측정파장은 400~1060 nm 범위이며, 직경이 180  $\mu\text{m}$ 인 원형 광표면(active area)의 최대 양자효율은 700 nm 파장 영역에서 70%정도이다. 검출기의 정격전압은 DC+5 V이고, 전원이 공급된 상태에서 아무런 빛이 입사하지 않는 경우의 바탕계수(dark count)는  $100 \text{ s}^{-1}$  미만이고 빛이 입사하는 경우 최대  $10^7 \text{ s}^{-1}$ 까지 측정이 가능하다. 전원이 공급된 APD에 빛이 입사하면 SPCM에 내장된 선별기로부터 높이 +2 V와 폭 9 ns의 TTL 펄스가 발생하고, 이렇게 발생한 전압 펄스는 펄스변환기(inverter)에서 부호가 바뀐 후에 광자계수장치(LeCroy 1434A)에서 선별기(Discriminator; LeCroy 821)와 계수기(Scaler; LeCroy 2551), 그리고 동시계수기(Coincidence; LeCroy 622)를 거치면서 일정한 측정시간동안 검출기에서 발생하는 광전자들을 헤아리게 된다. 펄스변환기를 사용한 이유는, APD에서 발생하는 전압펄스는 “+” 신호이지만 광자계수장치에서는 “-” 신호를 인식하기 때문이다(그림 1).

본 실험에서는 시간적으로 상관관계가 있는 얽힘상태의 광자를 동시계수할 때, 배경이나 원치 않는 외부 잡광이 동시계수에 미치는 영향을 알아보기 위해서 광자쌍을 열광자와 섞여서 두 검출기에 입사시키고 두 검출기에서 측정된 단일 광자계수와 두 광자 동시계수를 측정하였다. 열광원을 이용하여 광

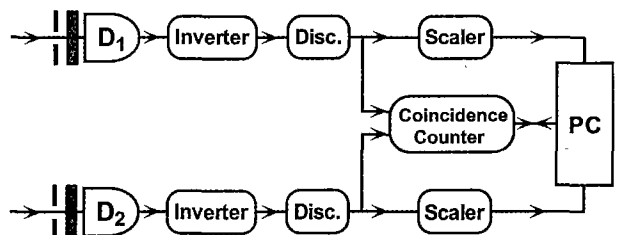


그림 1. 광검출기와 광자계수장치의 구조.

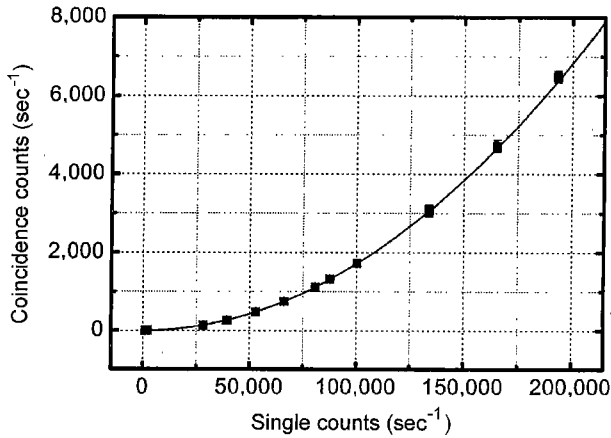


그림 2. 열광원에서 나온 상관관계가 없는 광자수의 증가에 따른 두 검출기의 동시계수. ■은 실험치를 나타내고, 실선은 광검출기의 분해시간  $T_R = 170.75 \pm 0.58 \text{ ns}$ 에 대해서 식 (7)에 따라 곡선 맞춤한 것이다.

검출기의 분해시간을 측정하고, 외부 잡광으로서 열광자들이 광자쌍과 섞여서 검출기에 입사할 때 잡광이 동시계수에 미치는 영향을 열광원의 세기를 증가시키면서 측정하였다. 열광원으로는 정전압 공급장치에 연결된 텅스텐 램프를 약 1시간정도 동작시켜 안정되게 한 후에 실험하였다.

### 3.1. 광검출기의 분해시간 결정

시간적으로 얽힌 상태에 있는 광자쌍의 동시계수를 측정할 때 하향변환된 광자쌍 이외의 광자들에 의한 우발동시계수 (accidental coincidence)를 광자쌍의 동시계수와 구분하기 위해서는 검출기의 분해시간(resolving time)을 결정해야 한다. 실제로 식 (7)의  $N_1'$ ,  $N_2'$ 와  $N_c'$ 를 측정하여 검출기의 분해시간을 결정하려면 시간적인 상관관계가 없는 열광자들을 이용한다. 그림 2는 안정된 전압을 공급하는 전원장치에 연결된 텅스텐 램프를 1시간 이상 동작시켜 방출되는 열광자들을 두 검출기에 입사시킨 후에 광자계수장치를 이용하여 10초 간격으로 1000번씩 반복 측정하여 그 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

그림 2에서 ■은 열광원에서 나온 상관관계가 없는 광자수의 증가에 따른 두 검출기의 동시계수에 대한 실험치이다. 두 검출기에 입사하는 열광자들의 수는 거의 같도록 조절하였고 ( $N_1' \approx N_2'$ ), 따라서 그래프에서 수평축의 단일계수( $N_1'$  또는  $N_2'$ )는 두 검출기에서 단위시간당 측정된 광자의 평균 개수를 나타내고, 수직축은 두 검출기의 동시계수  $N_c'$ 을 나타낸다. 식 (7)에서와 같이 검출기의 분해시간이 일정할 때 두 검출기의 동시계수는 각 검출기의 단일계수의 곱에 비례하고, 두 검출기에서의 단일계수가 같을 때 동시계수는 단일계수의 제곱에 비례한다. 측정을 통해 결정된 검출기의 분해시간은  $T_R = 170.75 \pm 0.58 \text{ ns}$ 이다. 그래프에서 실선은 식 (7)에 의해 결정된 광검출기의 분해시간에 대해서 실험치를 곡선 맞춤한 것이다.

### 3.2. 광자쌍을 이용한 광학계의 동시계수 측정

매개하향변환에서 동시에 발생한 얽힘상태 광자쌍의 동시계수에서 잡광의 영향을 측정하기 위한 장치는 그림 3과 같다.

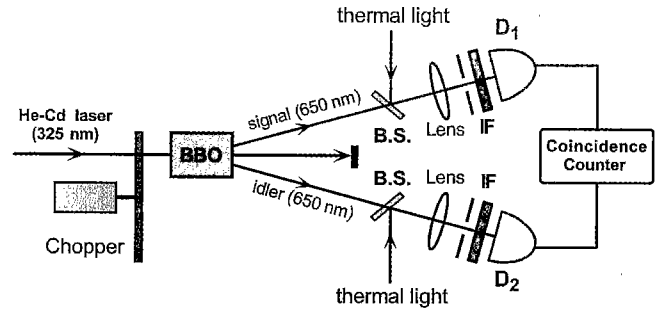


그림 3. 열광자들이 섞인 광자쌍 광학계의 동시계수 측정을 위한 실험장치도.

매개하향변환은 짧은 파장의 레이저빔(펌프빔)이 비선형 결정과 상호작용하여 긴 파장의 빔으로 자발적으로 변환되는 과정으로 양자역학적으로 표현하면 높은 진동수의 광자가 비선형 결정에 의해 낮은 진동수의 광자쌍으로 나뉘어지는 과정이다. 본 실험에서는 325 nm 파장에서 단일모드로 동작하는 He-Cd 레이저(He-Cd 3207N, Liconix)빔을  $5 \times 5 \times 7 \text{ mm}^3$  크기의 BBO( $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ , negative uniaxial crystal)결정에 입사시켜 650 nm의 광자쌍(signal과 idler)을 발생시켰다. 제1형의 위상 조화조건이 만족되도록 결정의 광축과 펌프빔의 각도는  $36.6^\circ$ 가 되도록 조정하였으며, 이상광선인 펌프빔의 편광은 지면에 수직하고 정상광선인 하향변환된 두 광자빔의 편광은 지면에 평행하다.

결정을 빠져나온 signal과 idler 광자는 렌즈와 구경을 통과해서 두 검출기( $D_1$ ,  $D_2$ )로 입사하게 된다. 하향변환된 두 광자빔은 세기가 아주 약하고( $\sim 10^5 \text{ s}^{-1}$ ) 결정으로부터 1 m 정도 떨어져 있는 두 검출기는 직경  $180 \mu\text{m}$ 의 광섬유로 연결되어 있기 때문에 광자들을 검출기에 모으기 위해 초점거리  $f = 10 \text{ cm}$ 의 렌즈를 사용하였다. 또한 하향변환에서 동시에 발생하는 두 광자는 펌프빔의 방향에 대해서 정반대 쪽에 위치하므로 두 검출기에 입사하는 광자쌍을 잘 선별하기 위해서 직경이 약 2 mm인 구경을 사용하였다. 두 검출기 앞에는 선폭이 9 nm인 간섭필터(IF)를 놓아서 광자쌍 이외의 형광이나 잡광 등이 입사하는 것을 차단하였다. 검출기는 일정시간동안 입사한 광자들을 계수하기 위해서 선별기와 계수기, 동시계수기 등으로 구성된 광자계수장치에 연결되어있다.

두 검출기로 동시에 발생한 광자쌍을 검출할 때, 배경광이나 잡광이 동시계수에 미치는 영향을 조사하기 위해서 비선형 결정과 검출기 사이에 얇은 유리판(BS)을 설치하여 열광원에서 안정되게 방출되는 상관관계가 없는 열광자들을 중첩시켜 입사시켰다. 유리판은 광자쌍의 편광방향에 대해 브루스터 각으로 설치하여 유리판에서 반사에 의한 상관관계의 손실(decorrelation)로 인한 동시계수의 감소가 최소화되도록 하였다.

하향변환된 광자쌍에 의한 단일계수는 두 검출기에서 약  $15,000 \text{ s}^{-1}$  정도이고, 동시계수는 약  $3,000 \text{ s}^{-1}$  정도였다. 동시계수 비율이 20%정도밖에 되지 않는 것은 광원과 검출기 사이에서 일어나는 광손실로 인한 상관관계의 감소(decorrelation) 때문이다. 두 검출기의 양자효율은 650 nm 파장에서 약 65% 정도이지만, BBO 결정 뒷면에서의 반사와 산란에 의한 손실

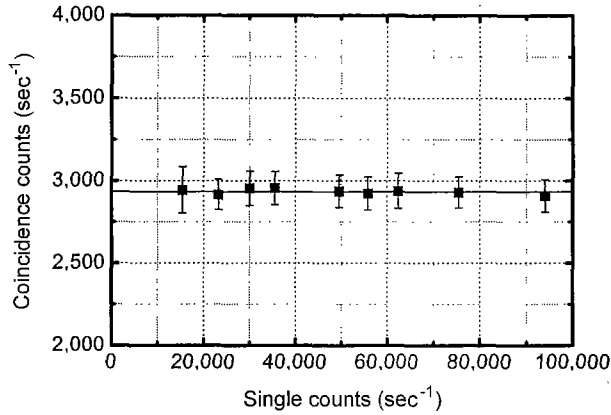


그림 4. 검출기  $D_1$ 에만 하향변환된 광자들과 열광자들이 섞여서 입사하고  $D_2$ 에는 하향변환된 광자들만 입사할 때 단일계수  $N_1'$ 의 증가에 따른 동시계수  $N_c'$ .

과 표면코팅이 되지않은 렌즈와 유리판 등에서 흡수와 반사등에 의한 상관관계의 감소 때문에 실제 검출기에서의 동시계수 측정효율(work efficiency)은 20~30%정도된다. 광손실은 이외에도 렌즈에서 검출기에 연결된 광섬유의 입구와 출구에서도 무시할 수 없을 정도로 많이 일어난다.

그림 4는 일정한 수의 광자쌍이 두 검출기에 입사할 때 한쪽 검출기  $D_1$ 에만 열광원에 의한 잡광을 섞어서 입사시켰을 때 열광자수의 증가에 따른 두 검출기의 동시계수에 대한 측정결과이다. 동시계수 측정값의 첫 번째 점은 두 검출기에 하향변환된 광자쌍만 입사할 때의 동시계수값을 나타낸 것으로  $N_1' = 15369 \text{ s}^{-1}$ ,  $N_2' = 16043 \text{ s}^{-1}$ ,  $N_c' = 2944 \text{ s}^{-1}$ 이다. 검출기  $D_2$ 에는 열광자가 입사하지 않으므로 거의 일정하게 유지되고,  $D_1$ 에는 열광자들의 수를 점점 증가시켰다. 그래프에서 보면  $D_1$ 에 입사하는 열광자수가 하향변환된 광자수의 10배정도 증가해도  $D_2$ 에서 측정되는 광자수에는 전혀 영향을 주지 않기 때문에 두 광자 동시계수는 일정하게 유지된다.

우리가 좀더 관심을 갖는 것은 두 검출기에 일정한 수의 열광자들이 동시에 입사할 때이다. 하향변환된 광자의 통계는 Poisson 분포를 따르고, 열광자들도 Poisson 분포를 갖기 때문에 검출기에서는 열광자수가 증가해도 평균 광자수만 증가할 뿐 광전자 분포는 여전히 Poisson 분포를 나타내므로 측정된 광전자의 분포로는 잡광자들과 하향변환된 광자들을 구분할 수가 없다. 또한 검출기 앞에는 중심파장이 650 nm인 좁은 선폭의 간섭필터를 놓았기 때문에 스펙트럼으로도 잡광자는 구분되지 않는다. 따라서 같은 수의 열광자들이 하향변환된 광자들과 섞여서 두 검출기에 입사할 때 잡광자들의 수가 증가하면 동시계수도 증가해야 직관적으로 이해가 편리하다.

그림 5는 두 검출기  $D_1$ 과  $D_2$ 에 거의 같은 수의 열광자들이 하향변환된 광자들과 섞여서 입사할 때, 열광자 수의 증가에 따른 동시계수에 대한 측정결과이다. 그래프에서 가로축의 단일광자계수(single counts)는 측정시간동안 두 검출기에 입사하는 각각의 광자수  $N_1'$ 과  $N_2'$ 를 평균한 값이다. 그림 4에서와 마찬가지로 측정값의 첫 번째 점은 하향변환된 광자쌍만 입사할 때 단일광자계수에 대한 동시계수값을 나타낸다. 일반

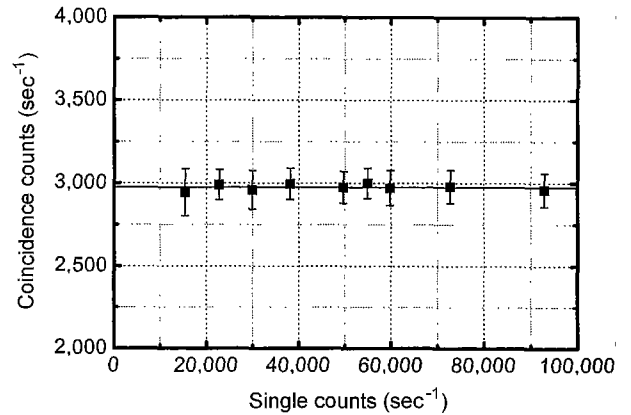


그림 5. 두 검출기  $D_1$ ,  $D_2$ 에 광자쌍과 열광자들이 섞여서 입사할 때, 열광자들에 의한 단일계수  $N_1'$ 과  $N_2'$ 의 증가에 따른 동시계수  $N_c'$ . 두 검출기에서의 단일계수  $N_1'$ 과  $N_2'$ 의 수는 거의 같고, 동시계수  $N_c'$ 는 검출기의 분해시간이내에서 발생하는 동시계수를 우발동시계수로 제거한 결과이다.

적으로 배경이나 열광원에서 나온 광자들은 상관관계가 없기 때문에, 측정시간 내에 두 검출기에 일정한 수의 광자들이 입사해도 분해시간( $T_R$ ) 약 171 ns 이내에서 동시계수는 거의 일어나지 않는다. 만약에 분해시간 이내에서 우연한 동시계수가 발생하더라도 광자계수장치에서 측정된 단일계수  $N_1'$ 과  $N_2'$ , 그리고 171 ns의 분해시간을 통해 우발동시계수(accidental coincidence)로 계산하여 일정한 시간간격동안 측정된 전체 동시계수에서 제거해 버린다. 그림 5의 동시계수  $N_c'$ 은 측정시간동안 계수된 전체 동시계수에서 우발동시계수를 제거한 결과이다. 따라서 동시에 발생한 광자쌍 이외의 잡광자들의 수가 증가해도 동시계수는 일정하게 유지된다.

### 3.3. 잡광의 영향을 최소화하는 동시계수 신호

상대적으로 세기준위가 높은 배경이나 잡광이 있는 조건에서 얽힘상태의 광자를 일정시간동안 동시계수할 때, 광자계수 장치의 분해시간에 의해서 잡광자들은 우발동시계수로 제거되기 때문에 동시계수에는 전혀 영향을 미치지 않는다는 것은 신호전달체계에 있어서도 아주 유용하게 이용될 수 있다. 그림 3과 같은 장치에서 펄프레이저를 변조시켜 통과시키거나 차단하게되면 광자쌍의 발생을 제어할 수 있고, 이는 두 검출기에서의 동시계수에 영향을 줄 수가 있다. 만약 펄프빔의 변조를 적절하게 할 수 있다면 이를 이용하여 2진부호의 신호를 만들 수 있다. 즉, chopper나 Pockels cell 등을 이용하여 펄프레이저를 통과시키면 하향변환된 광자들이 검출기에서 동시에 측정되기 때문에 이런 경우를 1로 한다면, 펄프빔이 차단되는 경우는 아무런 신호가 측정되지 않거나 또는 배경광이나 잡광에 의한 단일계수만 측정되어 동시계수 장치에서는 분해시간에 의해 우발동시계수로 처리되기 때문에 이런 경우는 0으로 할 수 있다.

1초 동안에 두 검출기에 입사하는 하향변환된 signal과 idler 빔의 평균광자수가  $R_s$ ,  $R_i$ 이고, 배경광 및 잡광 등에 의해 입사하는 평균광자수가  $r_1$ ,  $r_2$ 라고 한다면, 일정한 측정시간  $T$  동안에 입사하는 신호광자의 수는  $R_{s,i}T$ 이며 이는 실제로 신호

의 크기로 볼 수 있다. 그러면 측정장치에서 양자효율이 각각  $\mu_1, \mu_2$  인 두 검출기가 시간간격  $T$  동안에 측정하는 하향변환된 광자들의 평균 개수는  $\mu_{1,2}R_{1,2}T$ 이고, 배경광이나 잡광 등에 의한 계수는  $\mu_{1,2}r_{1,2}T$ 이다. 잡광이 하향변환된 광자들과 섞여서 입사할 때는 검출기가 측정시간동안 신호광과 잡광을 모두 측정하므로 이러한 경우 단일계수는

$$\langle N_{1,2}' \rangle = \mu_{1,2} (R_{1,2} + r_{1,2})T \quad (8)$$

이고, 2진 부호는 1에 해당된다. 만약 펄프레이저 빔을 차단하여 0의 신호가 만든다면 검출기에서는 원하지 않는 잡광만 측정되므로 이러한 경우의 단일계수는

$$\langle n_{1,2}' \rangle = \mu_{1,2}r_{1,2}T \quad (9)$$

이 된다.

만약 하향변환된 광의 세기보다 잡광의 세기가 아주 큰 경우 ( $r \gg R$ )에는 신호가 잡광에 묻혀버리기 때문에 각각의 검출기에서는 신호를 구별할 수가 없게 된다. 그러나 분해시간이 아주 짧은 동시계수측정장치를 이용하면 실제로 세기가 아주 약한 광신호를 통해서 정보를 보냈을 때 세기가 센 잡광이 섞이더라도 효과적으로 신호를 잡광으로부터 구별해낼 수가 있다.

하향변환에서 signal과 idler광자는 동시에 발생하기 때문에 각각의 검출기에서의 단일계수는 동시계수와 같다 ( $R_c = R_1 = R_2$ ). 하향변환된 광자쌍이 열광자들과 섞여서 검출기에 입사하여 동시계수 측정장치에서 분해시간  $T_R$  동안 두 광자를 동시에 측정할 경우 동시계수는 하향변환된 광자들에 의한 동시계수  $N_c' = \mu_1\mu_2R_c$ 와 배경광이나 잡광 등의 시간적인 상관관계가 없는 광자들에 의한 우발동시계수  $N_a' = \mu_1\mu_2 (r_1r_2 + R_1r_2 + R_2r_1)T_R$ 의 두 가지가 있을 수 있고, 따라서 식 (8)을 동시계수에 대해서 표현하면, 펄프빔이 통과(on)하여 1의 신호를 발생시키는 경우는

$$\begin{aligned} \langle N_c'(\text{on}) \rangle &= \mu_1\mu_2T[R_c + (r_1r_2 + R_1r_2 + R_2r_1)T_R] \\ &= [N_c' + (n_1'n_2' + N_1'n_2' + N_2'n_1')T_R] \end{aligned} \quad (10)$$

이다. 그리고 펄프빔이 차단(off)되어 0의 신호를 발생시키는 경우는  $R_c = R_1 = R_2 = 0$ 이므로

$$\langle N_c'(\text{off}) \rangle = \mu_1\mu_2T[r_1r_2T_R] = n_1'n_2'T_R \quad (11)$$

이 된다.

식 (10)과 (11)을 비교해보면, 잡광의 세기가 하향변환된 빔에 의한 신호보다 아주 큰 경우 ( $r \gg R$ )에도  $\langle N_c'(\text{on}) \rangle \gg \langle N_c'(\text{off}) \rangle$ 임을 알 수 있다. 물론 여기서 0과 1의 신호를 명확하게 구별하려면 하향변환된 빔의 세기가 아주 약하면 곤란하고  $R_c \gg r_1r_2T_R$ 의 조건을 어느정도 만족해야 한다. 실제로 배경광이나 잡광 등의 상관관계가 없는 광의 결맞음시간은 아주 짧기 때문에 측정장치의 분해시간 이내에서  $n_1'n_2'T_R \approx 0$ 이 되므로 하향변환된 광자들에 의해 동시계수만 일어난다면 이러한 광은 2진 부호의 신호를 만들어 전송·처리하는데 있어 아주 효과적으로 이용할 수가 있다.

그림 6은 펄프레이저 빔과 열광원을 1초 간격으로 교차시켜 하향변환된 광자쌍을 통과시킬 때(on)와 차단할 때(off) 두 검

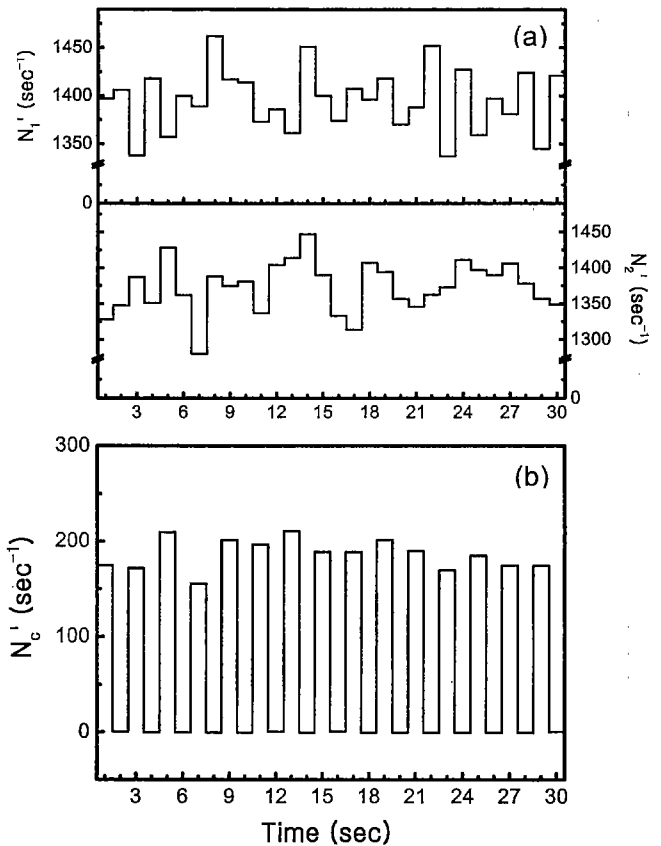


그림 6. 펄프빔과 열광원을 1초 간격으로 교차시켜 광자쌍을 on/off 시켰을 때 동시계수의 변화. 펄프빔이 on일 때는 광자쌍만 입사하고, off일 때는 열광원에서 나온 광자들만 입사한다. (a)는 각각의 검출기의 단일계수이고, (b)는 두 검출기의 동시계수이다.

출기에서 연속적으로 동시계수를 측정된 결과이다. 펄프빔이 통과할 때는 광자쌍만 두 검출기에 입사하고 차단될 때는 열광원에서 나온 열광자들만 입사된다. 실험에서 두 검출기에서 측정되는 하향변환된 광자들의 수는 거의 같으며, 열광자들에 의한 단일계수도 광자쌍에 의한 계수와 거의 같도록 열광원의 세기를 조절하였다. 따라서 단일계수에서는 펄프빔이 통과할 때와 차단될 때가 구별되지 않으며 검출기앞에 놓인 간섭필터 때문에 스펙트럼으로도 광자쌍에 의한 신호와 잡광에 의한 신호가 구별되지 않는다.

펄프빔이 통과하여 하향변환이 일어날 때(on), 측정시간 1초 동안 두 검출기  $D_1$ 과  $D_2$ 에서 측정된 광자쌍의 수는 각각  $\langle N_1' \rangle = 1378 \text{ s}^{-1}$ ,  $\langle N_2' \rangle = 1368 \text{ s}^{-1}$ , 그리고 동시계수는  $\langle N_c'(\text{on}) \rangle = 186 \text{ s}^{-1}$ 였다. 반면에 펄프빔을 차단하여(off) 하향변환이 일어나지 않은 경우 검출기에는 배경광을 포함한 열광원에서 나온 잡광자들만 측정되고  $\langle n_1' \rangle = 1413 \text{ s}^{-1}$ ,  $\langle n_2' \rangle = 1378 \text{ s}^{-1}$ , 그리고 동시계수는  $\langle N_c'(\text{off}) \rangle \approx 0$ 였다. 그림 5에서 나타난 결과를 생각해보면, 당연한 결과이지만 하나의 검출기에서는 전혀 구별이 되지 않는 광신호(on/off)가 동시계수에서는 명확하게 구별이 되는 것은 하향변환된 광자쌍의 얽힘에 기인하며 측정장치에서 신호이외의 잡광들을 효과적으로 제거하기 때문이다.

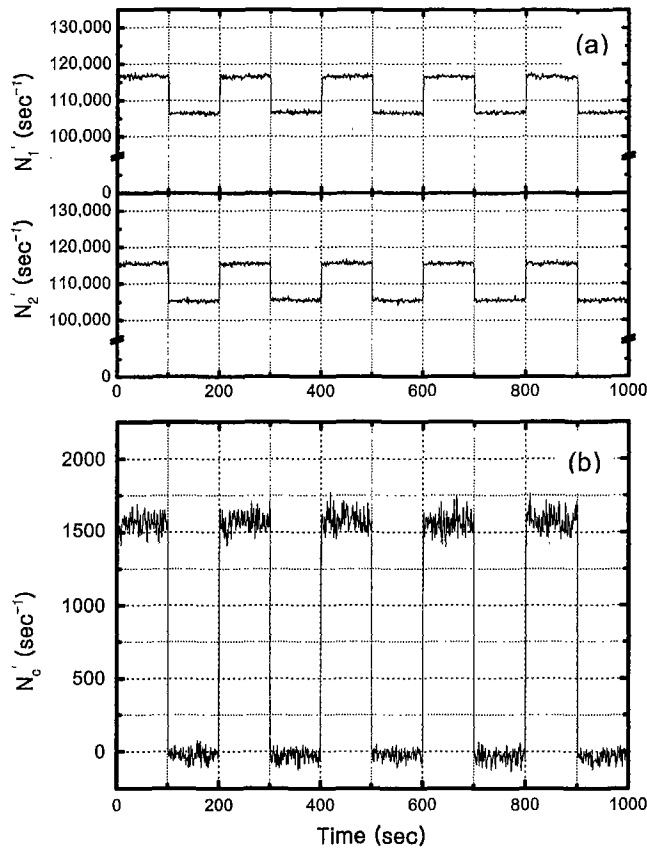


그림 7. 펄프빔만을 변조시켜 광자쌍을 on/off 시켰을 때 시간경과에 따른 동시계수의 변화. 펄프빔이 on일 때는 광자쌍이 열광자들과 섞여서 입사하고 off일 때는 열광원에서 나온 광자들만 입사한다. (a)는 각각의 검출기의 단일계수이고, (b)는 두 검출기의 동시계수이다.

이러한 특성은 상대적으로 센 잡광이 연속적으로 입사하고 있는 경우에도 유효하다. 그림 7은 광자쌍에 비해서 약 10배 정도 세기가 센 열광자들이 측정되는 검출기에 변조된 광자쌍을 입사시켰을 때 1초간격으로 측정된 광전자수를 나타낸 것이다. 처음 100번은 펄프빔이 통과하여 광자쌍이 열광자들과 섞여서 입사할 때이고, 다음 100번은 펄프빔을 차단하여 열광자들만 입사할 때이다. 이러한 측정을 반복할 때 각각의 검출기에서 단일광자 계수는 펄프빔이 통과할 때  $\langle n_1' \text{ (on)} \rangle = 116567 \text{ s}^{-1}$ 와  $\langle n_2' \text{ (on)} \rangle = 115485 \text{ s}^{-1}$ 이었고, 펄프빔이 차단될 때는  $\langle n_1' \text{ (off)} \rangle \approx 106648 \text{ s}^{-1}$ 와  $\langle n_2' \text{ (off)} \rangle \approx 105425 \text{ s}^{-1}$ 이었다. 그리고 동시계수는 각각  $\langle N_c' \text{ (on)} \rangle = 1571 \text{ s}^{-1}$ 와  $\langle N_c' \text{ (off)} \rangle \approx 0$ 이었다. 펄프빔의 변조에 따라 검출기의 단일계수에서도 광자수의 차이는 나지만 광자쌍에 의한 신호와 잡광에 의한 신호의 비율은 아주 낮다. 하지만 동시계수에서는 펄프빔의 on과 off에 따라 두 가지 신호가 명확하게 구분이 된다는 것을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

두 검출기를 이용하여 매개하향변환과정에서 발생하는 광자

쌍을 측정할 때 배경이나 잡광자들이 동시계수에 미치는 영향을 조사하였다. 시간적으로 상관관계가 없는 열광자들이 검출기에 입사할 때, 두 검출기에서 우연하게 동시측정된 광자수를 이용하여 두 검출기의 분해시간을 171 ns로 결정하였다. 따라서 광자계수장치에서는 검출기의 분해시간 이내에 발생하는 우발동시계수를 전체 동시계수에서 제거함으로써 상관관계를 갖는 광자들만 동시계수가 일어나도록 하였다.

하향변환에서 쌍으로 발생하는 얽힘상태의 두 광자를 동시계수할 때, 검출기의 한 쪽에만 잡광이 섞이든지 두 검출기에 모두 잡광이 추가되어도 동시계수에는 영향을 미치지 않았다. 실제로 두 검출기에 입사하는 잡광자들의 수가 약 10배까지 증가해도 동시계수는 일정하게 유지되었다. 이는 하향변환에서 발생하는 광자쌍들은 동시에 발생하는 반면에 배경광자들이나 열광자들은 검출기의 분해시간 이내에 우발적으로 발생하는 동시계수에는 시간적인 상관관계가 없기 때문이다.

펄프빔과 열광원을 1초 간격으로 교차(on/off)시켜 광자쌍과 열광자들이 번갈아가며 두 검출기에 입사할 때, 각각의 검출기에서 단일계수는 광자쌍에 의한 신호와 열광자에 의한 신호가 구별이 되지 않았다. 또한 광자쌍보다 약 10배정도 센 열광자들에 의한 잡광이 연속적으로 입사하고 있는 조건에서, 변조된 광자쌍이 주기적으로 두 검출기에 동시에 입사할 때 두 검출기의 단일계수에서는 광자쌍에 의한 신호와 잡광에 의한 신호의 비율이 아주 낮지만 두 광자 동시계수에서는 두 신호의 비율이 현저하게 구분이 되었다. 이와 같이 얽힘상태의 광자쌍을 두 검출기에서 동시계수하는 방법을 이용하면 배경계수나 외부 잡광의 세기가 상대적으로 큰 조건에서도 두 광자를 효과적으로 선별해 낼 수 있고, 이는 잡광의 영향을 최소화하는 신호처리나 전송에 유용하게 이용될 수 있다.

#### 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] E. Schrödinger, "Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik," *Naturwissenschaften*, vol. 23, pp. 807-812, 1935.
- [4] 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.
- [5] D. Bohm, *Quantum Theory* (Prentice-Hall, New York, 1951).
- [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] M. A. Horne, A. Shimony, and A. Zeilinger, "Two-particle interferometry," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 62, no. 19, pp. 2209-2212, 1989; D. M. Greenberg, M. A. Horne, and A. Zeilinger, "Multiparticle interferometry and the superposition principle," *Phys. Today*, vol. 46, no. 8, p. 22, 1993.
- [8] P. G. Kwiat, K. Mattle, H. Weinfurter, A. Zeilinger, A. V. Sergienko, and Y. H. Shih, "New high-intensity source of polarization-entangled photon pairs," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 75, no. 24, pp. 4337-4340, 1995; P. G. Kwiat, Edo Waks, A. G. White, Ian Appelbaum, and P. H. Eberhard, "Ultrabright source of polarization-entangled photons," *Phys. Rev. A*, vol. 60, no. 2, R773-R776, 1999; P. G. Kwiat, "Hyper-entangled states," *J. Mod. Optics*, vol. 44, no. 11/12, pp. 2173-2184, 1997.
- [9] 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.
- [10] C. H. Bennett, "Quantum information and computation," *Phys. Today*, vol. 48, no. 10, p. 24, 1995; L. Mandel, "Proposal for almost noise-free optical communications of high background," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 1, no. 1, pp. 108-110, 1984; 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.
- [11] C. H. Bennett, G. Brassard, C. Crepeau, R. Jozsa, A. Peres, and W. K. Wootters, "Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 70, no. 13, pp. 1895-1899, 1993; D. Bouwmeester, J. W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter, and A. Zeilinger, "Experimental quantum teleportation," *Nature*, vol. 390, no. 11, 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.
- [12] 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; A. V. Sergienko *et al.*, "Quantum cryptography using femtosecond-pulsed parametric down-conversion," *Phys. Rev. A*, vol. 60, no. 4, pp. R2622-R2625, 1999.
- [13] C. H. Bennett and S. J. Wiesner, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 69, no. 20, pp. 2881-2884, 1992; K. Mattle, H. Weinfurter, P. G. Kwiat, and A. Zeilinger, "Dense coding in experimental quantum communication," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 76, no. 25, pp. 4656-4659, 1996.
- [14] M. Zukowski, A. Zeilinger, M. A. Horne, and A. K. Ekert, "Event-ready-detectors" Bell experiment via entanglement swapping," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 71, no. 26, pp. 4287-4290, 1993; J. W. Pan, D. Bouwmeester, H. Weinfurter, and A. Zeilinger, "Experimental entanglement swapping: entangling photons that never interacted," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 80, no. 18, pp. 3891-3894, 1998.
- [15] L. Mandel and E. Wolf, *Optical Coherence and Quantum Optics* (Cambridge University Press, Cambridge, 1995).

### Effects of noise on coincidence detection in an optical system with entangled state photons

Heonoh Kim, Jeonghoon Ko, Goodong Park, Youngho Um, and Taesoo Kim<sup>†</sup>

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

<sup>†</sup>*E-mail: tskim@mail.ulsan.ac.kr*

(Received February 12, 2001 ; Revised manuscript received June 1, 2001)

The influences of background and environmental noise on coincidence detection are investigated with entangled photons produced by parametric down-conversion process. When the down-converted photons are mixed with thermal light, the coincidence rate did not vary with increasing noise level because the accidental coincidences are discriminated at the short resolving time window. The entangled photon source and the coincidence technique can effectively be used for a noise-free communication channel in the new field of quantum information transmission and processing.

*Classification codes* : OE.040, QO.010.