

1.5 μm 통신파장대역 진동수 얽힘 광자쌍의 양자간섭

김현오¹ · 김용수¹ · 윤천주² · 조석범^{3†}

¹울산대학교 물리학과, 기초과학 연구소
☎ 680-749 울산시 남구 대학로 102번지

²한국전자통신연구원 광모듈응용기술연구팀
☎ 305-700 대전시 유성구 가정로 218번지

³SK텔레콤 성장기술원 양자기술연구팀
☎ 463-784 경기도 성남시 분당구 수내동 9-1번지

(2011년 10월 18일 받음, 2011년 11월 21일 수정본 받음, 2011년 11월 22일 게재 확정)

펨토초 펄스형 자발적 매개하향변환에서 생성된 1.5 μm 통신파장대역 광자쌍의 진동수 얽힘상태를 구현하고, 광섬유 기반 Hong-Ou-Mandel 간섭계를 이용하여 양자간섭 실험을 수행하였다. 각진동수 ω_1 과 ω_2 에 대응하는 두 광자의 파장은 저밀도 파장 분할다중화(coarse wavelength division multiplexing, CWDM) 필터를 이용하여 선택하였고, 간섭계에서 경로차에 따른 두 검출기의 동시계수 측정에서 높은 선명도를 갖는 공간적인 맥놀이 형태의 간섭무늬를 관측하였다.

Quantum Interference Experiments with Frequency Entangled Photon Pairs at 1.5 μm Telecommunication Band

Heonoh Kim¹, Yong Soo Kim¹, Chun Ju Youn², and Seok-Beom Cho^{3†}

¹Department of Physics & Basic Science Research Institute, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

²The Convergence Components & Materials Research Laboratory, Electronics and Telecommunication Research Institute, Daejeon 305-700, Korea

³Quantum Technology Lab., Emerging Technology R&D Center, SK Telecom, Seongnam 463-784, Korea

(Received October 18, 2011; Revised manuscript November 21, 2011; Accepted November 22, 2011)

We performed experiments on Hong-Ou-Mandel type two-photon interference with frequency entangled photon pairs at 1.5 μm telecommunication band generated through femtosecond pulsed spontaneous parametric down-conversion. Two different angular frequencies ω_1 and ω_2 were selected using CWDM(coarse wavelength division multiplexing) filters at the output ports of the interferometer. The coincidence counting rates were measured with varying path-length difference between the two interferometer arms to observe the two-photon interference patterns of spatial beating. The obtained visibilities in the net coincidence were close to the theoretical limit of 100%.

Keywords: Spontaneous parametric down-conversion, 1.5 μm telecommunication band, Frequency entangled state, Hong-Ou-Mandel interference

OCIS codes: (270.0270) Quantum optics; (270.5565) Quantum communications

I. 서 론

고전물리학과 차별적으로 양자역학적으로만 설명될 수 있는 대표적인 특성으로 간주되고 있는 얽힘상태(entangled

state)는 순수학문적인 관점에서 양자역학 이론을 검증하는 실험적 도구로서의 역할 뿐만이 아니라, 최근에는 양자정보 및 양자정밀측정 분야에서 고전적인 한계를 넘어서는 응용 가능성을 위해서 중요한 실험적 도구로서 많이 연구되고 있

†E-mail: sbcho@sk.com

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

다^[1-5]. 얽힘상태를 생성하는 가장 대표적이고 신뢰성이 확보된 방법은 자발적 매개하향변환(spontaneous parametric down-conversion, SPDC)을 이용하는 것이다^[3]. SPDC에 의해 생성된 광자쌍은 편광, 운동량, 에너지, 시간 등 다양한 형태의 자유도를 활용하여 얽힘상태를 구현하는 것이 가능하며, 선형광학만을 이용하여 제어할 수 있고, 또한 장시간동안 결맞음을 유지할 수 있어서 안정적으로 활용이 가능하기 때문에 광자기반 양자정보분야에 유용한 광원으로 활용되고 있다^[6].

얽힘상태 광자의 생성과 특성을 분석하는 가장 대표적인 방법들 중의 하나는 간섭계를 이용하여 고전적인 한계를 벗어나는 간섭무늬의 선명도를 관측하는 것이다. SPDC에서 생성된 광자쌍을 이용한 대표적인 간섭실험은 C. K. Hong, Z. Y. Ou 그리고 L. Mandel(HOM)에 의해 수행되었다^[7]. 그들은 빔분할기에 도달하는 두 광자의 시간차가 없을 때 간섭계의 두 출구에서 동시에 측정된 두 검출기의 동시계수(coincidence count)가 사라지는 두-광자 뭉침 효과(bunching effect)를 관측하였다. 비슷한 시기에 서로 다른 진동수를 갖는 두-광자 중첩상태를 이용한 간섭실험에서 공간적인 맥놀이(spatial beating) 형태의 간섭효과가 Z. Y. Ou와 L. Mandel에 의해 관측되었다^[8]. 이러한 경우는 서로 다른 진동수의 독립적인 두 광자가 빔분할기에서 간섭을 일으키는 것이 아니라, 중첩상태에 있는 두-광자 상태가 빔분할기를 거쳐서 두 검출기에 이르는 구별할 수 없는 두-광자 확률 진폭의 간섭으로 해석된다^[9, 10]. HOM 간섭실험은 자유공간(free space) 간섭계에서 가시광과 근적외선 파장영역에서 생성된 광자들을 이용하여 주로 많이 수행되었고, 최근에는 광섬유 기반 양자통신에 응용가능성을 염두에 두고 통신파장대역의 얽힘상태 광자를 생성하고 비고전적인 특성을 규명하는 연구도 많이 진행되고 있다.

통신파장대역의 얽힘 광자를 이용한 연구는 스위스 제네바 대학의 Nicolas Gisin 그룹에서 선두적으로 수행하였다. 그들은 1998년 단일모드 다이오드 레이저와 제 1형의 위상정합을 만족하는 KNbO₃ 결정을 이용하여 1310 nm 통신파장대역에서 광자쌍을 생성하고, 광섬유 기반 Franson 간섭계를 구성하여 고전적인 한계를 넘는 양자 상관관계가 10 km 이상의 거리에서도 유지된다는 것을 보였다^[11, 12]. Northwestern 대학의 P. Kumar 그룹에서는 광섬유에서 사광파 혼합(four-wave mixing)을 이용하여 1.5 μm 통신파장대역의 편광 얽힘 광자쌍을 생성하고 특성 분석 및 응용 가능성에 대한 연구를 수행하였다^[13]. 1.5 μm 통신파장대역 광자쌍의 얽힘상태는 광섬유 기반 장거리 양자암호통신에 적용하기에 가장 적합한 광원으로서, 현재도 LBO(lithium triborate), BBO(beta barium borate), PPLN(periodically poled lithium niobate), waveguide 형태의 비선형 결정 그리고 광섬유 자체에서 비선형 광학특성을 이용하여 광자쌍을 생성하는 연구가 많이 수행되고 있다^[14-18].

본 연구에서는 775 nm 파장의 펄스 레이저와 제 1형의 BBO 결정을 이용한 SPDC에서 1.5 μm 통신파장대역 진동수 얽힘상태 광자쌍을 생성하고, 원추형으로 방출되는

특정 스펙트럼의 공간적인 세기분포를 측정하였다. 또한 투과 스펙트럼 폭이 18 nm인 저밀도 파장분할다중화(coarse wavelength division multiplexing, CWDM) 필터를 이용하여 선택한 중심파장이 각각 1530 nm와 1570 nm인 진동수 얽힘상태를 구현하고, 광섬유 기반 HOM 간섭계를 이용하여 공간적인 맥놀이 양자간섭 실험을 수행하였다. 두 광자의 중심파장이 서로 40 nm 분리되어 있는 진동수 얽힘상태 광자쌍의 간섭에서 맥놀이 진동수가 5.03×10¹² Hz이고 높은 선명도를 갖는 간섭무늬를 측정하였다.

II. 1.5 μm 통신파장대역 광자쌍의 생성

SPDC는 χ⁽²⁾의 비선형성을 갖는 매질과 입사광의 상호작용에서 양자역학적인 상관관계를 갖는 두 개의 광자(또는 광자쌍)를 생성하는 방법으로 다음과 같은 위상정합조건을 잘 만족한다^[3].

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i, \quad \vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i \quad (1)$$

여기서 아래첨자 p, s, i 는 각각 pump, signal, 그리고 idler를 나타내며, 식(1)은 매질에 입사하는 광과 SPDC에서 생성된 광 사이에 에너지 보존 및 운동량 보존을 잘 만족한다는 것을 의미한다. 에너지 보존법칙은 $\lambda_i = \frac{\lambda_s \lambda_p}{\lambda_s - \lambda_p}$ 와 같이 파장으로 표현할 수 있으며, 이는 SPDC에서 생성된 에너지 또는 진동수 상관관계를 갖는 광자들은, 임의의 시간과 공간상에서 측정된 하나의 광자가 특정한 진동수로 결정되면 다른 하나의 광자의 진동수는 자동적으로 결정되어 버리는 특성을 갖는다. 또한 운동량 보존법칙을 동시에 만족하기 때문에 두 광자의 방출방향도 밀접한 상관관계를 가진다. 특히 운동량 보존은 벡터 위상정합조건을 만족하기 때문에 동시에 발생한 두 광자의 방향이 하나의 평면에 제한되지 않으며, 따라서 SPDC에서 방출되는 광은 원추형의 특정 방출 스펙트럼 특성을 나타낸다. 이러한 원추형의 방출스펙트럼을 관측하는 것은 SPDC를 직접적으로 증명하는 하나의 방법이 된다. 가시광 영역에서 생성된 SPDC 광의 스펙트럼은 간단한 렌즈의 조합만으로도 눈으로 관측하는 것이 가능하며, 디지털 카메라로 그 이미지를 포착할 수 있다.

펄스 레이저를 펌프 광원으로 이용하는 SPDC에서 생성된 1.5 μm 통신파장대역 광자쌍의 방출스펙트럼 특성을 알아보기 위해서, 그림 1(a)와 같이 초점 거리가 서로 다른 몇 가지 렌즈 조합을 이용한 이미징 시스템을 구성하였다. Ti:Sapphire 레이저에서 나온 중심파장이 775 nm이고 76 MHz의 반복율과 150 fs의 시간 폭을 갖는 펄스를 제 1형의 위상정합조건을 만족하는 BBO 결정에 입사시키면 SPDC에 의해 1550 nm 파장을 중심으로 넓은 스펙트럼이 하나의 원추형으로 방출된다. 본 실험에서 이용한 제 1형의 SPDC에서는 결정의 광축(optic axis)과 775 nm 펄스광의 진행 방향 그리고

펌프광의 편광이 모두 동일 평면상에 놓여 있으며, 1550 nm 파장의 광자쌍은 동일한 편광 방향이며 펄스광의 편광과는 서로 수직이다. 그리고 펄스광의 진행 방향과 광축이 이루는 각도가 $\theta_{pm} = 19.84^\circ$ 일 때 1550 nm 광자쌍의 진행 방향은 775 nm 펄스광의 진행 방향과 같다(collinear). θ_{pm} 가 증가하면 식 (1)의 위상정합조건을 만족하기 위해서 1550 nm 파장의 두 광자는 펄스광의 진행 방향을 중심으로 공간적인 방출 각도가 증가하게 된다. 이러한 스펙트럼의 공간적인 세기분포를 관측하기 위해서 BBO 결정을 위상정합 각도로부터 약 1.08° 만큼 기울여 중심파장이 1550 nm인 SPDC 광의 방출 각도가 약 $\pm 2.3^\circ$ 가 되도록 하였다.

펌프광의 평균 출력은 800 mW이며, 초점거리 200 mm인 구면 렌즈(L1)를 이용하여 크기가 7 mm(W) × 7 mm(H) × 8 mm(L)인 BBO 결정의 중간 위치에 초점을 맞추었다. BBO에서 원추형으로 방출되는 SPDC 광은 초점거리 200 mm인 구면 렌즈(L2)를 이용하여 평행광이 되도록 하였고, SPDC 광의 방출각도를 고려하여 지름이 2 인치인 렌즈를 사용하였다. SPDC 방출 스펙트럼의 2차원 세기분포는 초점거리 4.6 mm인 비구면 렌즈가 부착된 광섬유 집속기(fiber collimator)

를 수평과 수직으로 각각 25 mm 만큼 움직일 수 있는 위치 이동기에 부착하고 0.5 mm 간격으로 움직이면서 단일광자 검출기를 이용하여 측정하였다. 단일광자 검출기는 게이트 모드에서 동작하는 InGaAs/InP APD(avalanche photo diode)이며, 외부 게이트 신호를 이용했을 때 최대 4 MHz까지 동작이 가능하다. 본 실험에서는 Ti:Sapphire 레이저에서 나온 출력신호를 1/19로 낮춘 4 MHz의 신호를 단일광자 검출기의 외부 게이트 입력신호로 이용하였다. BBO 결정을 통과한 펄스 광을 차단하기 위해서 1.5 μ m 파장대역의 빛은 투과시키면서 775 nm 파장대역은 반사시키는 이색성 거울(dichroic mirror)을 설치하였고, L2와 L3 사이에는 중심파장이 1550 nm이고 투과 파장 폭이 10 nm인 간섭필터(interference filter)를 설치하였다.

그림 1(b)는 BBO 결정에서 방출된 SPDC 스펙트럼의 세기 분포를 측정한 결과를 보인 것이다. 측정된 스펙트럼의 세기 분포에서 아래쪽이 위쪽 보다 넓게 보이는 것은 펄스 광이 수직편광이고 따라서 SPDC 광의 방출각도를 조절하기 위해서 BBO 결정을 상하로 기울여서 생기는 어긋남(walk-off) 때문이다. 그래프의 위쪽과 오른쪽에 보인 계수(counts)는 L3의 위치가 $x=12.5$ mm 또는 $y=12.5$ mm 일 때 세로 또는 가로 방향으로 L3의 위치에 따라 1초당 측정된 단일광자계수(single counts)이다. 본 연구에서 구현한 진동수 얽힘 광자쌍의 간섭실험을 위한 광섬유기반 간섭계 구성에서는 펄스광을 중심으로 좌우 방향으로 방출되는 광자쌍을 이용하였기 때문에 방출과정에서 발생하는 공간적인 어긋남에 의해 광섬유 집속기에 집속되는 광의 손실을 최소화 할 수 있다.

III. 진동수 얽힘상태 광자쌍의 간섭

SPDC에서 생성된 광자쌍의 양자상태는 단일모드로 간단하게 표현하면 다음과 같다.

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|w_1\rangle_s |w_2\rangle_i + |w_2\rangle_s |w_1\rangle_i) \quad (2)$$

여기서 w_1 과 w_2 는 동시에 발생한 두 광자의 각진동수를 나타내고, 아래첨자 s 와 i 는 각각 signal 모드와 idler 모드를 나타낸다. SPDC에서 발생한 하나의 광자가 signal 모드에서 $w_1(w_2)$ 의 진동수를 갖게 되면 식 (1)의 에너지 보존관계식으로부터 idler 모드에 있는 다른 하나의 광자의 진동수는 $w_2(w_1)$ 를 갖는다. SPDC에서 두 광자의 생성과정은 완전히 불확정적이기 때문에 측정되기 전의 signal 또는 idler 모드에 있는 광자들은 w_1 과 w_2 의 진동수가 서로 중첩된 상태로 있고, 두 개의 진동수만 제한적으로 고려하면 두 광자의 상태는 식 (2)와 같은 중첩상태로 표현된다. 이와 같이 서로 다른 진동수를 갖는 두 광자가 두 모드에서 중첩된 상태로 존재할 때 두 광자의 전체 상태는 진동수 얽힘상태가 된다. 본 연구에서는 1.5 μ m 통신파장대역에서 이러한 진동수 얽힘상태를 구현하기 위해서 두 광자의 파장을 1530 nm와 1570 nm로

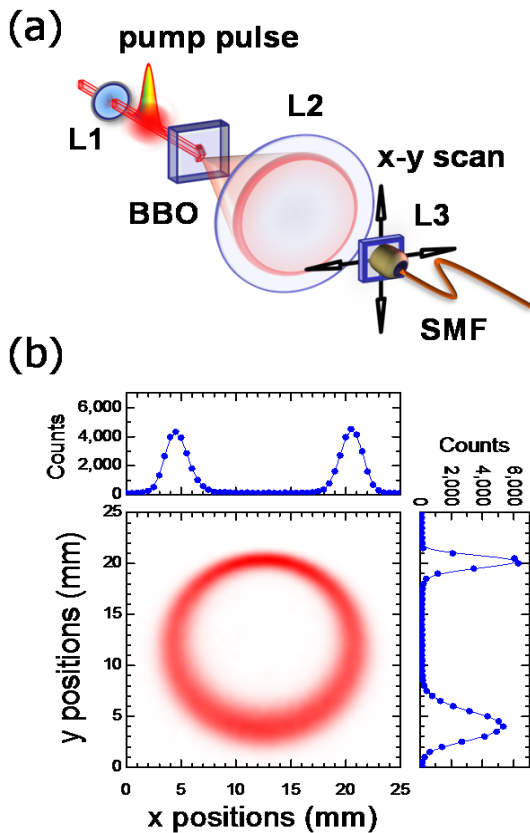


FIG. 1. Generation of correlated photon pairs in the 1.5 μ m telecommunication wavelength. (a) Setup to measure the SPDC conical emission pattern. L1, L2, spherical lens; L3, aspheric lens (fiber optic collimator); SMF, single mode fiber. (b) Measured spatial intensity distribution.

선택하였다. 펄스 레이저를 펌프 광원으로 이용하는 펄스형 SPDC에서는 상관관계를 갖는 두 광자의 스펙트럼이 넓은 파장범위에 걸쳐서 분포한다. 실험에서 사용된 Ti:Sapphire 레이저에서 나온 중심파장이 775 nm인 펄스의 반치폭(full width at half maximum, FWHM)은 약 6.06 nm이다. 따라서 signal 모드에서 측정되는 1530 nm 단일파장의 광자 한 개와 상관관계를 갖는 idler 모드의 광자는 1570 nm를 중심으로 FWHM이 약 24.87 nm인 비교적 넓은 스펙트럼을 갖는다.

그림 2는 펄스형 SPDC에 의해 생성된 1.5 μm 통신파장대역의 진동수 얽힘상태 광자쌍과 광섬유 기반 HOM 간섭계를 이용한 간섭실험을 위해서 구성된 광원 부분을 나타낸 것이다. 그림 1에서 보인 공간적인 세기분포를 측정하기 위한 장치 구성에서 L2를 제거하고 거울과 렌즈를 추가적으로 설치한 후 광섬유 집속기(fiber collimator, FC)를 통해서 SPDC 광을 단일모드 광섬유(single mode fiber, SMF)에 집속시켰다. 그림 3은 진동수 얽힘상태 광자쌍을 수반하는 광섬유 기반 HOM 간섭계의 구성을 보인 것이며, 광경로와 편광을 조절하는 부분, signal 모드와 idler 모드의 광을 합치는 부분, 그리고 간섭필터를 거쳐서 광자를 측정하는 부분으로 구성되어 있다. HOM 간섭계에서 간섭무늬의 선폰도는 대부분 빔분할기에 입사하는 두 모드의 시간과 공간적인 매칭, 편광의 일치, 그리고 투과율과 반사율의 균형에 의해서 결정된다. 단일모드 광섬유 기반으로 구성된 간섭계는 자유공간 간섭계에 비해서 공간적인 모드 매칭이 편리하다는 장점을 갖고 있다.

광섬유 기반 HOM 간섭계에서 투과율과 반사율이 50:50인 광섬유 빔분할기를 사용하였고, BBO에서 생성된 두 광자가 빔분할기에 도달하는 시간차($\delta t = \delta l/c$)는 50 nm의 분해능을 갖는 위치이동기가 부착된 광경로 지연기(optical delay line, ODL)를 이용하였다. ODL과 빔분할기 사이에 편광조절기(polarization controller, PC)를 설치하여 두 광의 편광방향을 일치시켰다. 빔분할기에서 결합된 두 광은 1310/1550 nm FWDM (filter wavelength division multiplexer)과 CWDM 필터를 거

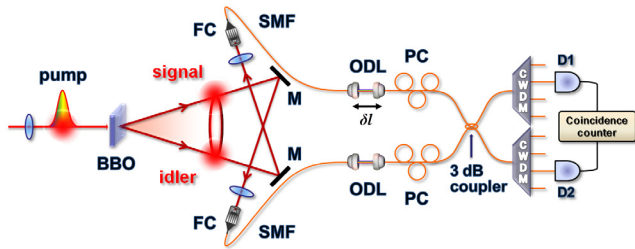


FIG. 2. Experimental setup for generation of frequency entangled photon pairs. pump, Ti:Sapphire laser output pulse (wavelength 775 nm, pulse width 150 fs, repetition rate 76 MHz); BBO (β -BaB₂O₄), type-I angle phase matched nonlinear crystal; FC, fiber collimator; M, mirror; SMF, single mode fiber; ODL, optical delay line; PC, polarization controller; CWDM, coarse wavelength division multiplexing filter; D1 and D2, single photon detector.

쳐서 단일광자 검출기(single photon detection module, SPDM)에서 측정된다. FWDM은 FC에 집속된 넓은 파장범위의 광에서 1310 nm 파장 대역의 광은 반사시키고 본 실험에 필요한 1550nm 파장 대역의 광은 투과시키기 위해서 설치하였다. CWDM 필터는 4 개의 채널(1510/1530/1550/1570 nm)로 구성되어 있고, 본 실험에서는 1530 nm와 1570 nm의 두 채널을 이용하였다. EDFA(erbium-doped fiber amplifier)에서 출력되는 ASE(amplified spontaneous emission) 광원을 이용하여 CWDM 필터의 투과 스펙트럼 특성을 측정하고 중심파장은 각각 1530.21 nm와 1570.54 nm이었고, FWHM은 각각 18.13 nm와 17.93 nm인 거의 사각형(square)에 가까운 투과 스펙트럼 특성을 나타내었다. 두 채널의 파장차이가 40 nm이므로 필터를 거쳐서 두 검출기에서 측정되는 두 광자의 스펙트럼은 서로 겹치지 않는다. 광자의 검출은 게이트 모드에서 동작하는 InGaAs/InP APD 기반 단일광자 측정모듈(id 200, id-Quantique)을 이용하였고, 검출기의 NIM(nuclear instrumentation module) 출력 신호는 신호 판별기(discriminator)와 시간 지연기(delay), 동시계수 측정기(coincidence logic, Phillips Scientific 756)를 거치고, 단일광자계수 및 두 광자 동시계수는 카운터(NI, PCI 6602)로 측정하였다. 펄스 레이저의 펄스 반복주기는 약 13.2 ns이므로 이웃하는 펄스에 의해 발생한 광자들이 동시계수기에서 겹치지 않도록 동시계수기의 시간분해능은 5 ns로 설정하였다.

1.5 μm 통신파장 대역의 진동수 얽힘상태 광자쌍을 이용한 HOM 간섭계의 구성은 그림 3과 같다. 광원에서 빔분할기에 이르는 부분은 동일하지만, 그림 3(a)는 간섭계의 두 출구에 놓인 두 검출기로 서로 다른 파장(1530 nm와 1570 nm)의 두 광자를 측정하고^[15], 반면에 그림 3(b)는 간섭계의 한

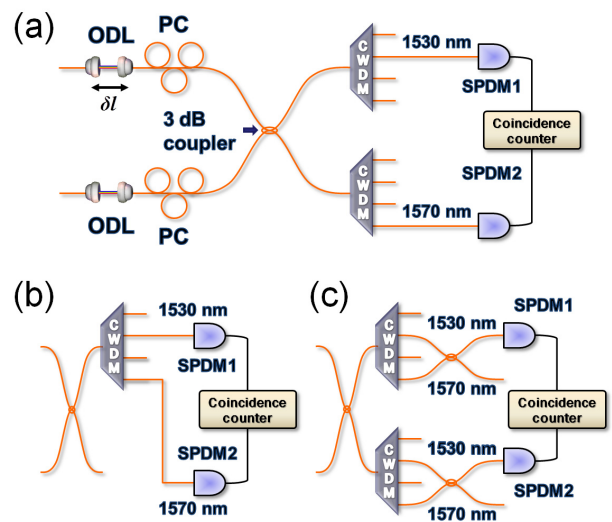


FIG. 3. Fiber-optic Hong-Ou-Mandel interferometer employing photons with different wavelengths. ODL, optical delay line; δl , path-length difference; PC, polarization controller; CWDM, 4 channel coarse wavelength division multiplexing filter; SPDM, single photon detection module.

쪽 출구에서 CWDM 필터로 파장을 분리하여 측정하게 된다. 잘 알려진 바와 같이 HOM 간섭계에서 광원으로부터 빔 분할기에 이르는 두 경로가 일치할 때, 간섭계에 입사하는 두 광자는 50%의 확률로 한 쪽 출구로만 쌍을 이루어 빠져 나가는 두-광자 뭉침 효과가 나타난다. 이러한 효과는 빔 분할기에 입사하는 두 광자가 서로 다른 파장의 중첩상태에 있을 때에도 동일하게 관측될 수 있다. 다만 필터에 의해 결정되는 SPDC 광의 결맞음 시간 이내에 경로차에 따라 전체 간섭무늬는 $\cos(\Delta\omega\delta t)$ 로 변하는 공간적인 맥놀이 형태의 간섭무늬가 관측된다^{8, 9}. 여기서 $\Delta\omega$ 는 두 광자의 각진동수 차이이고, δt 는 빔분할기에 도달하는 두 광자의 상대적인 시간차를 나타낸다. 그림 3(a)의 간섭계에서 $\delta t = 0$ 일 때 빔분할기에 도달하는 중첩상태의 두 광자가 두 검출기에서 측정될 확률을 보면, signal 모드에 있는 광자 ω_1 과 idler 모드에 있는 광자 ω_2 가 빔분할기에서 각각 반사되어 두 검출기 SPDM1과 SPDM2에서 동시에 측정될 경우와 signal 모드에 있는 광자 ω_2 와 idler 모드에 있는 광자 ω_1 이 빔분할기에서 각각 투과되어 두 검출기에서 동시에 측정될 경우가 서로 구별되지 않는다. 이러한 구별이 불가능한 두-광자 확률 진폭은 서로 소멸간섭을 일으키며, 따라서 그림 3(a)의 구성에서는 $\delta t = 0$ 일 때 두 광자 동시계수는 최소(dip)가 되는 반면에, 그림 3(b)의 구성에서는 동시계수가 최대(peak)가 된다. 그림 3(c)의 구성은 3(a)의 구성과 동일하지만 간섭계의 두 출구에 놓인 CWDM 필터에서 서로 다른 두 파장의 광자가 합쳐진 후에 두 검출기에서 측정된다. 이는 자유공간 광학계에서 두 검출기 앞에 이중슬릿을 설치한 경우나 또는 두 파장이 서로 겹치지 않는 이중 필터(dual-band filter)를 설치한 경우와 유사하다¹⁹. 간섭계의 정렬을 확인하기 위해서 수행한 선행 실험으로, 파장이 1550 nm인 광자쌍의 HOM 간섭에서는 우발적인 동시계수(accidental coincidence count)를 제거했을 때 거의 100%의 간섭무늬의 선명도를 나타내었다¹⁵.

그림 4는 1.5 μm 통신파장 대역 진동수 얽힘상태 광자쌍을 이용한 HOM 간섭실험의 결과를 보인 것이다. 그림 4(a), 4(b), 그리고 4(c)는 서로 다른 간섭계의 구성인 그림 3(a), 3(b), 그리고 3(c)의 결과이다. 각 그래프의 점들은 ODL의 위치변화에 따라 주어지는 간섭계의 두 경로의 차이에 따라 20초 동안 측정된 동시계수이며, 우발적인 동시계수는 제거하였다. 펄스형 SPDC에서 우발적인 동시계수는 $N_1 N_2 / f_{\text{trig}}$ 로 주어지며, 여기서 N_1 과 N_2 는 두 검출기에서 단위시간당 측정된 단일계수이고 f_{trig} 는 단일광자 검출기에 입력되는 게이트 신호의 반복율인 약 4 MHz이다. SPDC에서 생성된 넓은 선폭을 갖는 진동수 얽힘상태 광자쌍의 동시계수 측정 확률은 다음과 같이 주어지며^{8, 17},

$$P \propto 1 - VF(\delta t)\cos[(\omega_1 - \omega_2)\delta t] \quad (3)$$

여기서 V 는 동시계수 측정에서 관측되는 간섭무늬의 선명도를 나타내고, $\delta t = \delta l/c$ 는 빔분할기에 도달하는 두 광자의

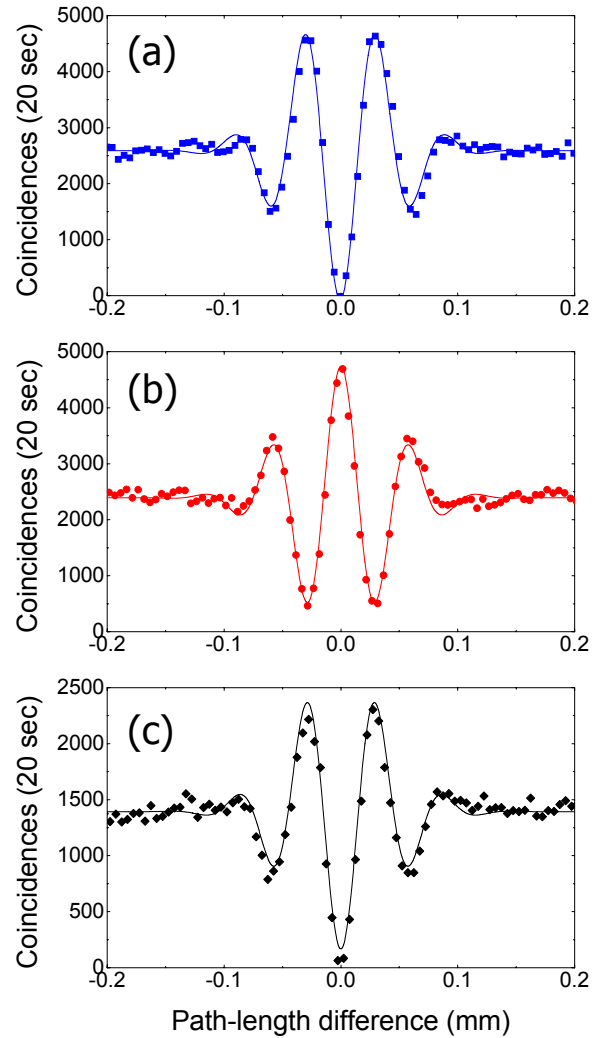


FIG. 4. Net coincidence counts per 20 sec as a function of path-length difference in the fiber optical HOM interferometer employing two photons with different wavelengths. The solid lines are fits to Eq. (3), where (a) $\sigma=2.95 \times 10^{12}$ Hz, $V=1.03 \pm 0.02$, (b) $\sigma=2.92 \times 10^{12}$ Hz, $V=0.98 \pm 0.02$, (c) $\sigma=2.95 \times 10^{12}$ Hz, $V=0.88 \pm 0.03$.

상대적인 시간차를 나타낸다. $F(\delta t)$ 는 두 검출기 SPDM1과 SPDM2에서 측정된 두 광자의 스펙트럼 특성에 해당하는 함수인데, 이는 실험에서 사용된 CWDM 필터의 투과 스펙트럼 특성에 의해 결정된다. CWDM 필터는 투과 파장 폭이 약 18 nm이고 파장 투과 특성은 거의 사각형 구조를 갖는다. 중심파장이 775 nm이고 FWHM이 6 nm인 펄스에 의해 생성된 SPDC 광자 하나가 중심파장이 1530 nm인 CWDM 필터를 통해서 측정될 때, 펄스 폭과 CWDM 필터의 폭을 동시에 고려한 중심파장이 1570 nm인 다른 하나의 광자의 상관관계 폭(correlated bandwidth)은 약 44 nm가 된다. 이러한 광자쌍의 진동수 상관관계 특성 때문에 두 검출기에서 측정되는 동시계수에 기여하는 스펙트럼은 거의 가우시안(Gaussian)에 가까운 특성을 나타낸다.

그림 4의 그래프에서 보인 실선은 식 (3)의 두 광자의 스펙트럼에 대한 함수를 $F(\delta t) = \exp(-\sigma^2 \delta t^2 / 2)$ 로 하고 측정값에 대해서 곡선 맞춤한 것인데, 여기서 σ 는 가우시안 스펙트럼 특성을 갖는 필터의 대역폭에 의해서 결정된다. 그림 4(a)의 결과에서 두 검출기의 단일계수는 각각 약 411,830 Hz와 316,772 Hz, 그리고 $f_{trig.}$ 가 4 MHz일 때 우발적인 동시계수는 약 1,631 Hz였다. 두 필터의 중심파장이 각각 1530.21 nm와 1570.54 nm일 때, 진동수 얽힘상태 광자쌍의 간섭에서 맥놀이 진동수(beat frequency) $(\omega_1 - \omega_2) / 2\pi$ 는 5.03×10^{12} Hz, 간섭무늬의 진동 주기는 약 198.77 fs, 이에 대응하는 경로차(path-length difference)는 59.63 μm이다. 이는 측정값의 곡선 맞춤한 값으로부터 얻어진 62.25 μm와 거의 일치하며, 동시계수 측정에서 나타난 간섭무늬의 선명도는 1.03 ± 0.02 였다. 또한 가우시안 포락선(Gaussian envelope)의 FWHM은 101.61 μm인데, 이는 투과 파장 폭이 약 18 nm인 필터의 스펙트럼 특성과 관련된 SPDC 광자의 결맞음 길이(coherence length)에 해당된다^[15].

그림 4(b)는 그림 3(b)의 구성과 같이 간섭계의 한 쪽 출구에서 CWDM 필터로 파장을 분리하여 측정한 결과이며, $\delta l = 0$ 일 때 동시계수는 최대가 되고, 간섭무늬의 선명도는 0.98 ± 0.02 이었다. 이는 빔분할기에 도달하는 두 광자의 중심 파장이 40 nm 정도로 분리되어 있고 필터의 폭이 18 nm로서 두 광자의 스펙트럼이 전혀 겹치지 않지만, 두 광자의 상태가 식 (2)와 같은 중첩상태에 있기 때문에 간섭에 의해 간섭계의 한 쪽 출구로만 향하는 것을 직접적으로 관측하는 것이 가능하다는 것을 보여준다. 진동수 얽힘상태 광자가 수반되는 HOM 간섭계에서 $\delta l = 0$ 일 때 간섭계의 두 출구에서 두-광자 상태는

$$|\psi\rangle_{out} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\omega_1, \omega_2\rangle_1 |0\rangle_2 + |0\rangle_1 |\omega_1, \omega_2\rangle_2) \quad (4)$$

와 같이 되므로, 그림 3(b)의 구성에서 간섭계의 1번 출구 또는 2번 출구에 놓인 두 검출기가 동시계수를 기록할 사건은 완전히 무작위로 일어난다. 이러한 무작위 동시계수 사건은 일련의 비트(bit)를 생성할 수 있고, 양자정보통신에서 얽힘상태 기반 난수 발생기(random number generator)로 이용할 수 있다^[20]. 또한 SPDC 광원, 빔분할기 그리고 간섭계의 한 쪽 출구에 놓인 두 검출기를 포함하는 부분을 송신부(transmitter)로 하고 간섭계의 다른 쪽 출구에 놓인 두 검출기 부분을 수신부(receiver)로 하면, 진동수 얽힘상태 광을 이용한 양자암호통신에서 비밀키(secret key)를 생성하는데도 활용할 수 있다. 그림 4(c)는 간섭계의 두 출구에 놓인 CWDM 필터를 통해서 1530 nm와 1570 nm의 파장이 합쳐진 후에 두 검출기에서 측정된다. 이러한 구성은 두 검출기 앞에 이중 슬릿을 설치한 경우와 원리적으로는 동일하며, 또한 그림 3(a)에서 CWDM 필터의 각각의 투과 밴드를 서로 번갈아 교환하면서 측정하는 것과 같은 경우가 된다. 이러한 구성은 자유공간 광학계에 비해서 광섬유 기반 간섭계에서는 보다 손쉽고 효

율적으로 구현할 수 있다. 간섭계의 출구에 놓인 각각의 검출기는 CWDM을 통과한 서로 구별되는 스펙트럼의 두 광자들을 모두 측정할 수 있지만 동시계수 측정에서는 그림 4(a)와 동일한 형태의 간섭무늬가 관측된다.

IV. 결 론

펄스 레이저를 이용한 자발적 매개하향변환에서 1.5 μm 통신파장대역의 진동수 얽힘상태 광자쌍을 생성하고, 광섬유 기반 HOM 간섭계에서 양자간섭 실험을 수행하였다. 중심 파장의 차이가 40 nm이고 투과 파장 폭이 약 18 nm인 CWDM 필터를 이용하여 중심파장이 각각 1530 nm와 1570 nm인 두 광자를 선택하고, 공간적인 맥놀이 형태로 나타나는 두-광자 간섭효과를 관측하였다. 실험에서 사용된 CWDM 필터의 투과스펙트럼 특성은 거의 사각형 구조를 갖지만 40 nm 이상으로 넓어진 광자쌍의 상관관계 폭으로 인해서 공간적인 맥놀이 간섭무늬의 포락선은 가우시안의 특성을 나타내었다. 진동수 차이가 5.03×10^{12} Hz인 두 광자의 중첩상태가 수반되는 HOM 간섭계에서 광섬유 빔분할기에 도달하는 두 광자의 시간차에 따른 두 검출기의 동시계수 측정에서 이론적 한계에 가까운 높은 선명도를 갖는 간섭무늬를 관측하였다. 진동수 얽힘상태를 형성하는 기본상태 $|\omega_s, \omega_i\rangle$ 는 양자정보에서 기본적인 단위인 큐비트(qubit)으로 활용이 가능하며, 얽힘상태에 있는 각각의 광자의 진동수를 다양하게 선택할 수 있기 때문에 원자, 이온, 분자 등 다른 시스템과의 상호작용을 이용하는 양자메모리(quantum memory), 양자중계기(quantum repeater)와 같은 양자 연결 장치(quantum interface)에 효과적으로 이용할 수 있다. 또한 광섬유 기반 장거리 양자암호통신에서 편광 얽힘상태 광과 더불어 효율적인 광원으로 활용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 2009년도 대학중점연구소 지원사업(2009-0093818)과 2010년도 기초연구사업(2010-0025115)의 지원을 받아 수행된 연구이며, 또한 부분적으로 ETRI 코히어런트 광송수신소자 개발사업(2010-GU-TD-200408-001, MKE/KIAT)의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. A. M. Steinberg, R. Y. Chiao, and P. G. Kwiat, "Quantum optical tests of the foundations of physics," in *Atomic, Molecular, and Optical Physics Handbook*, G. W. F. Drake, ed. (AIP Press, Woodbury, NY, USA, 1996).
2. G. Jaeger and A. V. Sergienko, "Multi-photon quantum interferometry," *Progress in Optics* **42**, 277-324 (2001).
3. Y. Shih, "Entangled biphoton source-property and preparation," *Rep. Prog. Phys.* **66**, 1009-1044 (2003).

4. Z.-S. Yuana, X.-H. Baoa, C.-Y. Lua, J. Zhanga, C.-Z. Penga, and J.-W. Pan, "Entangled photons and quantum communication," *Physics Reports* **497**, 1-40 (2010).
5. J.-W. Pan, Z.-B. Chen, C.-Y. Lu, H. Weinfurter, A. Zeilinger, and M. Zukowski, "Multiphoton entanglement and interferometry," to be published in *Rev. Mod. Phys.* (2011).
6. P. Kok, W. J. Munro, K. Nemoto, T. C. Ralph, J. P. Dowling, and G. J. Milburn, "Linear optical quantum computing with photonic qubits," *Rev. Mod. Phys.* **79**, 135-174 (2007).
7. C. K. Hong, Z. Y. Ou, and L. Mandel, "Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference," *Phys. Rev. Lett.* **59**, 2044-2046 (1987).
8. Z. Y. Ou and L. Mandel, "Observation of spatial quantum beating with separated photodetectors," *Phys. Rev. Lett.* **61**, 54-57 (1988).
9. H. Kim, J. Ko, and T. Kim, "Two-particle interference experiment with frequency-entangled photon pairs," *J. Opt. Soc. Am. B* **20**, 760-763 (2003).
10. H. Kim, J. Ko, and T. Kim, "Quantum-eraser experiment with frequency-entangled photon pairs," *Phys. Rev. A* **67**, 054102 (2003).
11. W. Tittel, J. Brendel, B. Gisin, T. Herzog, H. Zbinden, and N. Gisin, "Experimental demonstration of quantum correlations over more than 10 km," *Phys. Rev. A* **57**, 3229-3232 (1998).
12. W. Tittel, J. Brendel, H. Zbinden, and N. Gisin, "Violation of bell inequalities by photons more than 10 km apart," *Phys. Rev. Lett.* **81**, 3563-3566 (1998).
13. X. Li, P. L. Voss, J. E. Sharping, and P. Kumar, "Optical-fiber source of polarization-entangled photons in the 1550 nm telecom band," *Phys. Rev. Lett.* **94**, 053601 (2005).
14. T.-G. Noh, H. Kim, C. J. Youn, S.-B. Cho, J. Hong, T. Zyung, and J. Kim, "Noncollinear correlated photon pair source in the 1550 nm telecommunication band," *Opt. Express* **14**, 2805-2810 (2006).
15. S.-B. Cho and T.-G. Noh, "Two-photon quantum interference in the 1.5 μm telecommunication band," *Opt. Express* **15**, 7591-7595 (2007).
16. T.-G. Noh, H. Kim, T. Zyung, and J. Kim, "Efficient source of high purity polarization-entangled photon pairs in the 1550 nm telecommunication band," *Appl. Phys. Lett.* **90**, 011116 (2007).
17. X. Li, L. Yang, X. Ma, L. Cui, Z. Y. Ou, and D. Yu, "All-fiber source of frequency-entangled photon pairs," *Phys. Rev. A* **79**, 033817 (2009).
18. T. Suhara, "Generation of quantum-entangled twin photons by waveguide nonlinear-optic devices," *Laser & Photon. Rev.* **3**, 370-393 (2009).
19. J. G. Rarity and P. R. Tapster, "Two-color photons and nonlocality in fourth-order interference," *Phys. Rev. A* **41**, 5139-5146 (1990).
20. O. Kwon, Y.-W. Cho, and Y.-H. Kim, "Quantum random number generator using photon-number path entanglement," *Appl. Opt.* **48**, 1774-1778 (2009).