Sagnac 형태로 변형된 Mach-Zehnder 간섭계를 이용한 단일광자 간섭실험

엄자윤¹ · 김용수¹ · 김현오^{2†}

¹울산대학교 물리학과

☎ 680-749 울산시 남구 대학로 102번지

²울산대학교 기초과학연구소

☎ 680-749 울산시 남구 대학로 102번지

(2012년 2월 13일 받음, 2012년 3월 26일 수정본 받음, 2012년 3월 27일 게재 확정)

Sagnac 형태로 변형된 Mach-Zehnder 간섭계(SMZI)는 모든 광경로가 동일한 광부품을 서로 공유하기 때문에 위상 흔들림을 최소화할 수 있는 안정된 간섭계이다. 본 연구에서는 단일광자 수준까지 감쇄시킨 레이저 광과 제 2형의 매개하향변환에서 발생한 편광 상관관계가 있는 광자로부터 준비된 단일광자를 이용한 간섭실험에서 매우 안정된 간섭무늬를 관측하였다. SMZI의 위상은 약 ± 0.18 rad으로 안정적인 반면에 보통의 MZI는 ± 1.02 rad의 위상 요동을 나타내었다.

Single Photon Interference Experiments in a Sagnac-type Mach-Zehnder Interferometer

Jayoon Um¹, Yong Soo Kim¹, and Heonoh Kim^{2†}

¹Department of Physics, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

²Basic Science Research Institute, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

(Received February 13, 2012; Revised manuscript March 26, 2012; Accepted March 27, 2012)

A Sagnac-type Mach-Zehnder interferometer(SMZI) is a very stable instrument with respect to phase drift because all optical paths can share common optical components. We have observed very stable interference fringes in single photon interference experiments with an extremely attenuated laser beam, and with heralded single photons prepared from polarization correlated photon pairs in type-II spontaneous parametric down-conversion. The phase stability is measured to be about ± 0.18 rad for the SMZI, in contrast, conventional MZI showed the phase fluctuation of around ± 1.02 rad.

Keywords: Sagnac interferometer, Mach-Zehnder interferometer, Single photon, Spontaneous parametric down-conversion

OCIS codes: (270.0270) Quantum optics; (120.3180) Interferometry; (030.5260) Photon counting; (000.2060) Education

I. 서 론

정밀측정은 기초과학 및 응용기술 분야에서 가장 중요한 주제중의 하나이며, 미세한 길이 변화를 가장 정밀하게 측정할 수 있는 대표적인 방법은 간섭계를 이용하는 것이다^[1-3]. 간섭계는 빛이 진행하는 두 경로의 길이차이에 따라 발생하는 간섭무늬를 측정하여 입사하는 빛의 특성 측정이나 광경로 상에 놓인 매질의 굴절률, 두께 등의 광학적인 특성을 평가하는데 많이 이용된다^[4-6]. 간섭계를 구성하는데 있어서 가장 중요한 것은 미세한 광학계의 정렬과 더불어 간섭계의 두

경로 사이의 상대적인 위상이 안정되게 유지되어야 한다^[7-9]. 빛의 간섭현상을 이용하는 산업 및 연구용 측정 장비 등에 포함되는 간섭계나 교육용 광학실험에서 많이 활용되는 간섭실험에서 일반적으로 가장 많이 사용되는 간섭계는 Michelson 간섭계와 Mach-Zehnder 간섭계(Mach-Zehnder interferometer, MZI)이다. 하지만 이러한 간섭계는 빛이 진행하는 두 경로에 놓인 광부품들이 서로 분리되어 있어서 광마운트의 열팽창이나 공기의 흐름, 미세한 진동에 의해서도 간섭계의 위상이 쉽게 흔들릴 수 있기 때문에 안정적인 간섭계를 구성하기가 쉽지 않다. 장거리 광섬유기반 간섭계의 경우에는 위상의

[†]E-mail: quantum@ulsan.ac.kr

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

흔들림을 극복하기 위해서 참조광(reference beam)을 이용하여 위상의 흔들림을 능동적으로 제어하는 것이 요구되기도 한다^{8, 9}. 또한 간섭무늬를 관측하기 위해서 파장범위내에서 정밀하게 위치 제어가 가능한 거리이동장치를 이용해야 한다. 반면에 Sagnac 간섭계는 간섭계 내에 진행하는 두 빛이 동일한 광경로를 경유하고 광부품들을 서로 공유하기 때문에 위상의 흔들림을 최소화 할 수 있다^{7, 10}.

본 연구에서는 Sagnac 간섭계를 MZI 형태로 변형시켜(Sagnac type MZI, SMZI) 간섭계에서 진행하는 빛이 동일한 광부품을 서로 공유하면서도 서로 다른 광경로를 진행하도록 구성하고 단일광자 수준에서 간섭실험을 수행하였다. 미세한 광경로차 또는 위상변화를 도입하기 위해서는 두께가 얇은 유리판을 간섭계의 한 쪽 경로에 설치하고 회전시킴으로 유리판의 회전각도에 따른 광경로의 변화가 발생하도록 하였다. 간섭계에 입사하는 빛의 파장과 유리판의 굴절률, 그리고 유리판의 두께가 위상변화와 직접적인 관계가 있기 때문에 이러한 방식을 이용하면 안정적인 간섭무늬의 측정을 통해서 광학적인 특성을 분석하는데 유용하게 활용될 수 있다. 또한 최근에 양자정보(quantum information) 및 양자 기술(quantum technology) 분야에서는 단일광자 수준에서 빛을 제어하고 측정하는 것이 아주 중요하며, 특히 다중광자 얽힘(multi-photon entanglement)을 구현하는데 있어서 장시간 동안 위상이 안정화된 간섭계는 실험에서 중요한 역할을 한다. SMZI는 이러한 요구를 충족할 수 있는 장치로서 최근에 다양한 실험에서 많이 이용되고 있다¹¹⁻¹³. 본 실험에서는 광학 실험에서 흔히 접할 수 있는 광원으로서는 주파수 및 출력이 안정화된 단일모드 He-Ne 레이저에서 나온 632.8 nm 파장의 광을 단일광자 수준까지 감쇄시킨 미약한 결맞은 광(coherent light)과 단일광자 검출기를 이용하는 광자계수법(photon counting)으로 간섭실험을 수행하였다. 또한 제 2형의 자발적인 매개 하향변환(spontaneous parametric down-conversion, SPDC)에서 발생한 편광 상관관계가 있는 광자쌍(photon pair)으로부터 조건적으로 준비된 단일광자(single photon)를 이용하여 간섭실험을 수행하였다.

II. Sagnac-type Mach-Zehnder 간섭계

MZI는 두 개의 입구와 두 개의 출구를 갖고 있어서 간섭실험을 구현하는데 다양성을 갖고 있다. 광학적인 간섭실험에서, 표현을 간단하게 하기 위해서 간섭계의 두 입구에 입사하는 빛을 단일모드로 취급하여, 간섭계의 두 입구의 공간 모드 1과 2에 해당하는 내림연산자(annihilation operator)를 각각 $\hat{a}_1$ 과 $\hat{a}_2$ 라고 하면, 투과율과 반사율이 각각 50:50인 빔분할기(bean splitter)를 거치고 난 후 간섭계 내의 두 경로에 대한 내림연산자는 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{a}_3 = \frac{i}{\sqrt{2}}\hat{a}_1 + \frac{1}{\sqrt{2}}\hat{a}_2, \quad \hat{a}_4 = \frac{1}{\sqrt{2}}\hat{a}_1 + \frac{i}{\sqrt{2}}\hat{a}_2 \quad (1)$$

여기서 아래첨자 3과 4는 간섭계 내의 두 경로를 나타내고, 아래첨자 1과 2는 간섭계의 두 입구를 나타낸다. 그러면 간섭계의 두 출구 5와 6에서 내림연산자는 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{a}_5 = \frac{1}{2} [(-\hat{a}_1 + i\hat{a}_2)e^{i\phi_3} + (\hat{a}_1 + i\hat{a}_2)e^{i\phi_4}] \quad (2)$$

$$\hat{a}_6 = \frac{1}{2} [(i\hat{a}_1 + \hat{a}_2)e^{i\phi_3} + (\hat{a}_1 - \hat{a}_2)e^{i\phi_4}]$$

간섭계의 위상변화에 따라 간섭계의 두 출구에서 측정되는 평균 광자수는

$$\langle \hat{n}_5 \rangle = \hat{a}_5^\dagger \hat{a}_5 = \frac{1}{2} [n_1(1 - \cos \phi) + n_2(1 + \cos \phi)] \quad (3)$$

$$\langle \hat{n}_6 \rangle = \hat{a}_6^\dagger \hat{a}_6 = \frac{1}{2} [n_1(1 + \cos \phi) + n_2(1 - \cos \phi)]$$

와 같이 표현되고, 여기서 $\phi = |\phi_3 - \phi_4| = k\Delta l$ 는 간섭계 내에서 발생하는 경로차에 의한 전체 위상차를 나타낸다. 만약에 그림 1(a)에서와 같이 간섭계의 한 쪽 입구 ‘in’에서만 광이 입사하는 경우 즉, $n_1 = N$, $n_2 = 0$ 인 경우에 간섭계의 한 쪽 출구 ‘out₁’에서 측정되는 평균 광자수는

$$\langle \hat{n}_{out_1} \rangle = \frac{N}{2}(1 + \cos \phi) \quad (4)$$

와 같이 표현된다. 즉, 간섭계 내의 상대적인 위상차가 없을 때($\phi = 0$) 간섭계의 한 쪽 입구 ‘in’으로 입사하는 모든 광자는 한 쪽 출구 ‘out₁’에서만 관측된다. 일반적으로 간섭계의

FIG. 1. (a) Mach-Zehnder interferometer, (b) Sagnac-type Mach-Zehnder interferometer, (c) phase shift vs CG rotation angle, and (d) Normalized output intensity vs CG rotation angle, where $\lambda = 632.8\text{nm}$ and CG thickness $t = 65\ \mu\text{m}$. BS, beam splitter; PS, phase shifter; C, phase compensator; CG, cover glass. See text for details.

두 경로를 지나는 세기가 I_0 인 두 빛이 간섭할 때, 간섭계의 한 쪽 출구에서 측정되는 빛의 세기는 두 빛의 상대적인 위상차 ϕ 에 따라 $I_{out} = I_0(1 + \cos \phi)$ 로 주어진다. 여기서 빛의 세기는 평균 광자수에 비례하므로, 결과적으로 관측되는 간섭무늬는 식 (4)와 동일한 형태를 나타낸다.

광학적인 간섭실험에 많이 이용되는 MZI는 간섭계에서 서로 다른 경로를 진행하는 빛이 서로 다른 광학부품들을 경유하기 때문에 미세한 외부요인에 의해서도 위상이 쉽게 흔들리므로 안정성이 떨어진다. 또한 광경로차에 따른 미세한 위상변화를 도입하기 위해서는 간섭을 일으키는 빛의 파장보다 훨씬 작은 범위에서 경로를 변화시킬 수 있는 미세 위치이동기를 필요로 한다. 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하는 안정적인 간섭계를 구성하기 위해서 MZI와 동일한 역할을 하면서도 간섭계를 통과하는 빛이 동일한 광학부품을 공유하게 함으로써 위상의 흔들림을 최소화할 수 있도록 SMZI를 구성하였다. 또한 미세한 위상변화를 도입하기 위해서 두께가 얇은 유리판(cover glass, CG)을 간섭계의 한 쪽 경로에 설치하고 빛이 진행하는 방향을 기준으로 회전시키는 방법을 이용하였다. 그림 1(b)와 같은 SMZI에서 광경로에 놓인 CG면에 수직으로 빛이 입사하는 경우를 기준으로 입사하는 각도 θ 의 증가에 따른 광경로의 증가는 $d = t/\cos[\sin^{-1}(n_0/n \sin \theta)]$ 로 주어지며, 여기서 t 는 CG의 두께이고 $n(n_0)$ 은 CG(공기층)의 굴절률을 나타낸다. 따라서 CG를 통과하는 빛의 입사각 θ 에 따라 간섭계의 한 쪽 출구에서 측정되는 광의 세기 또는 평균 광자수는

$$R \propto 1 + v \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} (d - t) \right] \quad (5)$$

와 같이 주어진다. 여기서 λ 는 입사하는 빛의 파장, v 는 측정된 간섭무늬의 선명도(visibility)이며 $(R_{\max.} - R_{\min.})/(R_{\max.} + R_{\min.})$ 로 주어진다. 그림 1(c)는 SMZI의 한 쪽 경로에 놓인 CG의 회전각도에 따른 두 경로의 상대적인 위상차를 파장 단위로 나타낸 것이다. 여기서 파장은 632.8 nm, CG의 두께는 65 μ m, 굴절률은 1.52라고 가정하였고, 이는 실제 실험에서 사용된 매개변수와 유사한 값이다. CG면에 수직으로 빛이 입사하는 경우를 기준으로 약 12.2°만큼 회전하면 간섭계의 두 경로사이에 한 파장(2π rad)에 해당하는 만큼의 상대적인 위상차가 발생하게 된다. 입사각도가 증가할수록 CG를 통과하면서 발생하는 광경로 d 가 증가하는 비율이 점점 더 커지므로 2π rad의 추가적인 위상차가 발생하게 되는 CG의 회전각도의 주기는 점점 짧아지게 된다. 그림 1(d)는 CG의 회전각도에 따른 SMZI의 두 출구 out_1 과 out_2 에서 측정되는 광의 세기 즉, 간섭무늬를 나타낸 것이다.

III. SMZI를 이용한 단일광자 간섭실험

SMZI를 이용한 단일광자 수준의 간섭실험을 위해서 먼저 광학 실험에서 흔히 접할 수 있는 광원인 주파수 및 출력

안정화된 단일모드 He-Ne 레이저에서 나온 광을 단일광자 수준까지 감쇄시킨 미약한 광을 이용하여 간섭무늬를 관측하고, 간섭계의 안정성을 검증하기 위해서 광경로의 길이가 동일한 보통의 MZI 간섭계와 비교하였다. 또한 진정한 단일광자 간섭실험을 위해서 SPDC에서 발생한 편광 상관관계가 있는 광자쌍으로부터 조건적으로 준비된 단일광자를 이용하여 동일한 간섭실험을 수행하였다. 먼저 He-Ne (Spectra-Physics Model 117A, stabilized He-Ne Laser) 레이저에서 나온 632.8 nm 파장의 광은 출력이 0.5 mW이며, 가시광 영역에서 평균적인 소광비율(extinction ratio)이 $10^5:1$ 인 두 개의 선형 편광자(linear polarizer)를 이용하여 단일광자 수준까지 레이저 광을 감쇄시켰다. 이상적인 상황에서는 두 편광자의 투과 축을 서로 직교하게 놓으면 편광자를 통과한 후 검출기에 1초 동안 입사하는 레이저 광에 포함된 평균 광자수를 1.6×10^5 개까지 낮출 수 있다. SMZI는 가시광 영역에서 투과율과 반사율이 각각 50:50인 빔분할기와 직경이 2 인치인 세 개의 거울로 구성이 되어 있다. 빔분할기의 한 쪽 입구에 입사한 광은 두 경로로 나누어지고 세 개의 거울에서 각각 반사가 된 후 빔분할기에서 다시 합쳐진다. 간섭계의 각각의 경로에는 두께가 $65.6 \pm 0.15 \mu\text{m}$ 인 CG를 설치하고 하나는 미세한 위상변화기(phase shifter, PS)로 이용하고 다른 하나는 CG에 의한 광경로차를 보정(compensator, C)하기 위해서 사용하였다. CG는 분해능이 1°인 회전이 가능한 광마운트에 부착하였다. 간섭계의 두 출구로 빠져나온 광은 광섬유 집속기(fiber collimator)를 통해서 코어의 직경이 62.5 μm 인 다중모드 광섬유(multimode fiber)와 결합하게 되고 최종적으로 단일광자 검출기(Perkin Elmer, SPCM AQR-14)를 통해서 측정된다. 단일광자 검출기는 입사하는 광이 없을 때 바탕계수(dark count)가 약 200 Hz이고, 측정 파장영역에서 광자 측정 효율은 약 65%이다. 단일광자 검출기에서 측정된 광에 대한 TTL(transistor-transistor logic) 출력신호는 계수기(NI, PCI 6602)를 통해서 단위시간동안 측정된 평균 광자수로 측정된다.

그림 2는 CG의 각도를 -20°에서 +20°까지 1°씩 회전시키면서 SMZI의 두 출구에서 두 개의 단일광자 검출기로 1초당 측정된 단일계수(single counts)를 보인 것이다. 그림 2(a)와 2(b)의 점들은 간섭계의 두 출구 out_1 과 out_2 에서 1초 단위로 20번씩 반복 측정된 단일계수의 평균값이고, 측정값들의 표준편차는 점의 크기보다 작다. 실선은 식 (5)를 이용해서 곡선 맞춤한 것이며, 이는 그림 1(d)에서와 같이 입사하는 광의 파장, CG의 두께 등의 매개변수 값들을 이용했을 때 이론적으로 예측한 결과와 오차범위 내에서 잘 일치한다. 간섭무늬의 선명도는 각각 97%와 95%를 나타내었다. 일반적으로 간섭실험에서는 간섭계의 위상변화에 따라 보강간섭과 소멸간섭을 명확히 구분할 수 있어야 하며, 특히 간섭계에 수반되는 빛의 파장만큼 즉, 간섭무늬의 한 주기만큼의 위상변화를 얼마나 정확히 도입할 수 있는가 하는 것이 중요하다. 그림 1(c)에서 볼 수 있듯이 간섭계에 수반되는 빛의 파장이 632.8 nm인 SMZI는 CG의 회전각도가 0°인 점을 기준으로

FIG. 2. Measured count rates as a function of CG rotation angle at (a) output port 1 and (b) output port 2 of SMZI, respectively.

$\pm 8.6^\circ$ 만큼 회전했을 때 $\pm \pi$ rad만큼의 위상변화를 도입할 수 있다. 실험에서 CG를 회전하기 위한 광마운트의 분해능은 1° 인데 CG의 회전각도가 0° 인 점을 기준으로 2π rad의 위상변화를 도입하기 위해서 그림 2(a)의 경우는 17.48° , 그림 2(b)의 경우는 18.04° 의 각도 범위에서 한 주기에 해당하는 안정적인 간섭무늬가 관측되었다. CG의 회전각도가 증가하면서 발생하는 두 빔의 공간적인 어긋남(walk-off)은 간섭계의 출구에서 단일모드 광섬유를 이용하면 해결할 수 있다.

본 연구에서 구현한 SMZI는 일반적으로 많이 사용되는 그림 1(a)와 같은 보통의 MZI에 비해서 간섭계의 두 경로사이의 상대적인 위상을 장시간에 걸쳐서 안정적으로 유지할 수 있다. SMZI와 보통의 MZI의 안정성을 비교하기 위해서 He-Ne 레이저에서 나온 세기가 감쇄된 광을 빔분할기로 나눈 후 두 간섭계의 한 쪽 입구에 각각 입사시키고 각 간섭계의 출구에서 단일광자 검출기를 이용하여 단일계수를 측정하였다. 두 간섭계의 광경로는 약 20 cm로 동일하게 하였고, 실험환경은 잡광(noise), 공기의 흐름 및 외부 진동에 의한 영향은 최소화 되도록 하였다. 간섭계 자체의 불안정에 의한 위상 흔들림의 영향만을 측정하기 위해서 CG를 이용하여 간섭계의 두 경로사이에 $\pi/2$ rad의 위상변화를 도입하였고, 각각의 검출기에서 측정된 단일계수가 중간값으로부터 얼마나 변하는지를 측정하였다.

그림 3은 1시간 동안 두 간섭계에서 측정된 단일계수의 변화를 보인 것이다. 간섭계의 두 경로사이에 위상차가 없을 때 즉, 보강간섭이 일어나는 조건에서 두 검출기에서 측정된 단일계수는 약 60,000 Hz이었고, SMZI와 MZI에서 측정된 단일계수의 중간값은 각각 29,504 Hz와 30,733 Hz이었다. MZI에서 측정된 단일계수의 변화로부터 알 수 있는 위상의

FIG. 3. Detected count rates in both SMZI and conventional MZI.

흔들림은 1시간 동안 ± 1.02 rad인 반면에 SMZI의 위상은 ± 0.18 rad 이내에서 안정적으로 유지되었다. 즉, 보통의 MZI는 중간값으로부터 $\pm \pi/2$ rad의 범위내에서 $\pm 32.51\%$ 만큼의 위상 흔들림을 보였지만, SMZI는 $\pm 5.88\%$ 로 안정적으로 유지되었다.

SMZI를 이용한 단일광자 수준의 간섭실험은 최근에 양자광학 및 양자정보 실험분야에서 많이 수행되고 있는 다중광자 얽힘 상태가 수반되는 간섭실험들에 유용하게 활용될 수 있다^[11-13], 이러한 경우 장시간동안 간섭계의 위상이 안정되게 유지되는 것이 필수적으로 요구된다. 실험적인 기술로는 국소적인 간섭계에서 단일광자 수준에서 일어나는 간섭현상을 관측하며, 보강간섭과 상쇄간섭이 일어나는 위상변화를 정확하게 도입하는 것이다. 이러한 목적을 위해서 본 연구에서는 추가적으로 제 2형의 SPDC에서 생성된 단일광자 상태와 위상이 안정적으로 동작하는 SMZI를 이용한 간섭실험을 수행하였다. 그림 4와 같이 중심파장이 403.3 nm인 다이오드 레이저가 제 2형의 위상정합조건을 만족하는 BBO 결정에 입사하면 806.6 nm의 편광 상관관계를 갖는 동일한 파장의 광자쌍이 발생하며 펄스빔의 진행방향과 동일한 방향으로 진행한다. 단일광자 검출기가 편광 빔분할기(polarizing beam splitter, PBS)에서 반사된 수직편광의 광자 하나를 측정하면 PBS의 투과 경로에는 조건적으로 수평편광을 갖는 하나의 광자가 준비된다. BBO 결정에서 발생한 서로 직교하는 편광을 갖는 두 광자는 이색성 거울(dichroic mirror, DM)을 통과한 후 PBS에서 수직편광의 광자는 반사되어 단일광자 검출기 D_{sig} 로 입사되고 수평편광의 광자는 SMZI를 거친 후 다른 하나의 단일광자 검출기(SPCM)로 향하게 된다. SMZI의 구조는 그림 1(b)와 동일하지만 PS와 C에 해당하는 CG의 두께는 120 μm 인 것을 사용하였다.

간섭계에 수반되는 단일광자의 파장이 806.6 nm이고 위상변화기로 이용한 CG의 두께가 120 μm 인 CG를 이용한 SMZI는 CG의 회전각도가 0° 인 점을 기준으로 $\pm 7.32^\circ$ 만큼 회전했을 때 $\pm \pi/2$ rad의 위상변화를 도입할 수 있다. 그림 5는 SPDC에서 생성된 광자쌍으로부터 준비된 단일광자를 이

FIG. 4. Sagnac-type Mach-Zehnder interferometer for interference experiment with heralded single photons prepared in a collinear type-II SPDC. (a) Setup for generation of polarization correlated photon pairs, (b) Sagnac-type Mach-Zehnder interferometer employing heralded single photons. BBO(β -BaB₂O₄), type-II birefringence phase matched nonlinear crystal; DM, dichroic mirror; PBS, polarizing beam splitter; BS, nonpolarizing beam splitter; IF, interference filter; D_{trig.}, and SPCM, single photon counting module.

FIG. 5. Interference fringe observed in single and coincidence count rates as a function of CG rotation angle.

용한 간섭실험의 결과를 보인 것이다. SMZI의 한쪽 경로에 놓인 CG의 각도를 -18° 에서 $+18^\circ$ 까지 1° 씩 회전시키면서 간섭계의 두 출구에 놓인 두 개의 단일광자 검출기로 1초당 20

번씩 단일계수 및 동시계수(coincidence counts)를 반복 측정하였으며, 동시계수에서 측정된 간섭무늬의 선명도는 0.89 ± 0.19 이었다. 검출기 D_{trig.}에서 측정된 단일계수는 약 286,707 Hz이었고, 실험에 사용된 동시계수기의 시간분해능은 5 ns이므로 보강간섭이 일어날 때 발생하는 최대 우발 동시계수(accidental coincidence)는 약 188 Hz로써 실험값에는 거의 영향을 주지 않는다. 그림 2에서 보인 결과에 비해서 간섭무늬의 선명도가 다소 낮게 측정된 것은 CG의 두께가 약 2배로 증가함에 따라서 발생하는 공간적인 어긋남의 정도가 증가하고 검출기와 연결된 다중모드 광섬유가 이러한 어긋남을 충분히 보정하지 못하기 때문인 것으로 추정된다. SMZI를 이용한 단일광자 간섭실험은 SPDC에서 생성된 광자쌍을 이용한 두-광자 간섭실험으로 쉽게 확장이 가능하며, 기존의 MZI를 이용하는 것에 비해서 보다 안정적이고 효율적으로 활용할 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 위상의 흔들림을 최소화할 수 있는 보다 안정된 간섭계를 구현하기 위해서 Sagnac 간섭계를 MZI 형태로 변형시킨 SMZI를 구성하여 단일광자 간섭실험을 수행하였다. 광원으로는 주파수 및 출력이 안정화된 단일모드 He-Ne 레이저에서 나온 632.8 nm 파장의 광을 단일광자 수준까지 감쇄시킨 미약한 결맞음 광과 제 2형의 SPDC에서 발생한 편광 상관관계가 있는 광자쌍으로부터 조건적으로 준비된 단일광자를 이용하였고, 간섭계내의 미세한 위상변화를 도입하기 위해서 두께가 각각 65.6 μm 와 120 μm 인 CG를 회전시키면서 간섭무늬를 측정하였다. 세기가 감쇄된 632.8 nm 파장의 레이저 광을 이용하는 간섭실험에서는 CG의 회전각도의 분해능이 1° 인 경우에 18.04° 의 회전각도 범위에서, 그리고 SPDC에서 생성된 806.6 nm 파장의 단일광자를 이용한 간섭실험에서는 14.64° 의 회전각도 범위에서 한 주기에 해당하는 안정적인 간섭무늬를 관측할 수 있었다. 보통의 MZI와 SMZI의 위상 안정성을 검증하는 실험에서, 1시간 동안 보통의 MZI는 ± 1.02 rad의 위상 요동을 나타낸 반면에 SMZI의 위상 흔들림은 약 ± 0.18 rad로 훨씬 안정적이었다. SPDC에서 생성된 광자쌍을 이용하는 SMZI는 단일광자 간섭실험에서뿐만 아니라 다중광자 상태를 이용한 MZI 간섭실험에서 보통의 MZI 간섭계를 이용하는 것 보다 SMZI를 이용하면 소형의 간섭계 구성이 가능하고 또한 장시간에 걸쳐서 간섭계의 상대적인 위상을 안정되게 유지시킬 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 2009년도 대학중점연구소 지원사업(2009-0093818)과 2010년도 기초연구사업(2010-0025115), 그리고 SK 텔레콤 성장기술원의 2011년도 산학위탁연구사업의 지원을 받아 수행된 것임.

References

1. C. M. Caves, "Quantum-mechanical noise in an interferometer," *Phys. Rev. D* **23**, 1693-1708 (1981).
2. V. Giovannetti, S. Lloyd, and L. Maccone, "Quantum-enhanced measurements: beating the standard quantum limit," *Science* **306**, 1330-1336 (2004).
3. P. Hariharan, *Basics of Interferometry* (Academic Press, New York, USA, 2006).
4. S. Tolansky, *Multiple-beam Interferometry of Surfaces and Films* (Clarendon Press, Oxford, England, 1948).
5. K. Betzler, A. Grone, N. Schmidt, and P. Voigt, "Interferometric measurement of refractive indices," *Rev. Sci. Instrum.* **59**, 652-653 (1988).
6. M. Ikram and G. Hussain, "Michelson interferometer for precision angle measurement," *Appl. Opt.* **38**, 113-120 (1999).
7. J. Minář, H. de Riedmatten, C. Simon, H. Zbinden, and N. Gisin, "Phase-noise measurements in long-fiber interferometers for quantum-repeater applications," *Phys. Rev. A* **77**, 052325 (2008).
8. S.-B. Cho and T.-G. Noh, "Stabilization of a long-armed fiber-optic single-photon interferometer," *Opt. Express* **17**, 19027-19032 (2009).
9. G. B. Xavier and J. P. von der Weid, "Stable single-photon interference in a 1 km fiber-optic Mach-Zehnder interferometer with continuous phase adjustment," *Opt. Lett.* **36**, 1764-1766 (2011).
10. E. J. Post, "Sagnac effect," *Rev. Mod. Phys.* **19**, 475-493 (1967).
11. T. Nagata, R. Okamoto, J. L. O'Brien, K. Sasaki, and S. Takeuchi, "Beating the standard quantum limit with four-entangled photons," *Science* **316**, 726-729 (2007).
12. J.-C. Lee, Y.-C. Jeong, Y.-S. Kim, and Y.-H. Kim, "Experimental demonstration of decoherence suppression via quantum measurement reversal," *Opt. Express* **19**, 16309-16316 (2011).
13. S. M. Lee, H. S. Park, J. Cho, Y. Kang, J. Y. Lee, H. Kim, D.-H. Lee, and S.-K. Choi, "Experimental realization of a four-photon seven-qubit graph state for one-way quantum computation," *Opt. Express* **20**, 6915-6926 (2012).