

주파수 상향변환 검출기를 이용한 1.5 μm 통신파장대역의 단일광자 측정

김현오^{1†} · 윤천주² · 조석범³ · 김용수¹

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

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

³SK 텔레콤 기반기술연구원 융합기술개발팀
☎ 100-999 서울시 중구 을지로 2가 11번지

(2011년 8월 3일 받음, 2011년 8월 18일 수정본 받음, 2011년 8월 23일 게재 확정)

1.5 μm 통신파장 대역 단일광자의 효율적인 측정을 위해서 PPLN WG(periodically poled LiNbO₃ waveguide)에서 준위상정합을 이용한 합주파수 생성에 의한 주파수 상향변환 검출기를 구성하고 검출 효율, 잡음 계수 및 타이밍 지터를 측정하였다. 974 nm에서 발진하는 펌프광의 세기가 300 mW일 때 최대 검출효율이 약 7%, 잡음 계수율은 약 480 kHz로 측정되었다. 피코초 펄스 레이저를 이용한 자발적 매개하향변환에서 발생한 펄스형 단일광자 신호를 이용하여 측정된 주파수 상향변환 검출기의 최소 타이밍 지터는 약 39.1 ps였다. 또한 아주 좁은 동시계수 시간 폭으로 펄스형의 주파수 상향변환된 단일광자를 측정하면 잡음의 효과를 최소화할 수 있고, 신호대 잡음비의 특성을 최대로 높일 수 있다.

Single-photon Detection at 1.5 μm Telecommunication Wavelengths Using a Frequency up-conversion Detector

Heonoh Kim^{1†}, Chun Ju Youn², Seok-Beom Cho³, and Yong Soo Kim¹

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

³Fusion Technology T&D Team, Corporate R&D Center, SK Telecom, Seoul 100-999, Korea

(Received August 3, 2011; Revised manuscript August 18, 2011; Accepted August 23, 2011)

We present a low jitter frequency up-conversion detector based on quasi-phase matched sum frequency generation in a periodically poled LiNbO₃ waveguide for efficient single-photon detection at 1.5 μm telecommunication wavelengths. The maximum detection efficiency and the noise count rate using the pump power of 300 mW and the pump wavelength of 974 nm are about 7% and 480 kHz, respectively. We also characterize the timing jitter of the frequency up-conversion detector by analyzing the time distribution of the detection outputs for photons generated through a picosecond pump pulsed spontaneous parametric down-conversion. The minimum timing jitter was measured to be about 39.1 ps. Coincidence measurement with a narrow time window for pulsed up-conversion photons can eliminate the unwanted noise counts and maximize signal to noise ratio.

Keywords: Quasi-phase matching, Frequency up-conversion, Single photon detector, Timing jitter

OCIS codes: (190.7220) Upconversion; (270.0270) Quantum optics; (270.5565) Quantum communications

[†]E-mail: quantum@ulsan.ac.kr

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

I. 서 론

통신과장대역의 단일광자 검출기술은 광섬유기반 장거리 양자통신의 실제적인 구현에 있어서 매우 중요한 기술이다. 현재 널리 사용되고 있는 InGaAs/InP APD(avalanche photodiode) 기반 1.5 μm 통신과장 대역 단일광자 검출기는 높은 애프터 펄스 발생확률, 낮은 양자효율, 그리고 게이트 모드(gated-mode)로 동작해야 하는 특성으로 인해 양자 정보통신 및 양자키분배(quantum key distribution, QKD)등에서 사용될 때 전송거리, 비트 속도의 한계를 결정짓는 단점이 있다. 반면에 가시광 영역에서 사용되고 있는 Si-APD 기반의 단일 광자 검출기는 연속 모드(free-running mode) 동작, 높은 검출 효율 그리고 낮은 잡음 계수(noise count)등의 특성으로 인해 InGaAs/InP APD 기반의 단일광자 검출기에 비해서 우수한 단일광자 검출 성능을 가지고 있다. GHz급 이상의 높은 전송속도를 갖는 양자 통신 시스템 구현을 위해서는 Si-APD 기반의 단일광자 검출기처럼 연속 모드 동작, 높은 검출 효율, 낮은 잡음 계수, 낮은 애프터 펄스 확률(after-pulse probability), 그리고 좁은 타이밍 지터(timing jitter) 등의 특성을 갖는 단일광자 검출 방법이 요구된다. 따라서 최근에는 1.5 μm 통신과장 대역의 단일광자를 가시광 영역으로 변환시켜서 단일광자를 효율적으로 측정하고자 하는 연구들이 많이 시도되고 있다^[1-7]. 이러한 연구는 1.5 μm 통신과장 대역의 신호 광자와 강한 펌프광을 PPLN과 같은 비선형 매질에 입사시켜 가시광 영역의 새로운 광을 생성하는 합주파수 생성(sum-frequency generation, SFG) 또는 주파수 상향변환을 이용하는 것이다. 그 대표적인 예로서, Illinois 대학의 P. G. Kwiat 그룹에서는 자유공간 광학계에서 PPLN 결정을 이용하여 1550 nm+1064 nm=631 nm의 SFG를 구현하였고^[2], Stanford 대학의 Yamamoto와 Fejer 그룹에서는 광섬유가 연결된 PPLN waveguide(PPLN WG)를 이용하여 1560 nm+1320 nm=713 nm의 SFG를 구현하였다^[3]. 또한 Switzerland 제네바 대학의 Nicolas Gisin 그룹에서는 GHz 속도의 빠른 QKD 구현을 위한 검출기를 위해서 타이밍 지터 특성이 좋은 Si-APD와 PPLN WG를 이용하여 1550 nm+980 nm=600 nm의 SFG를 구현하였다^[4].

이와 같이 비선형 광학을 이용한 SFG 또는 주파수 상향변환 방법은 가시광 영역의 단일광자 측정에 사용되는 Si-APD를 이용하기 때문에 상대적으로 양자효율이 높을 뿐만 아니라 연속모드에서 동작시킬 수 있으며, 또한 타이밍 지터가 수십 ps 정도로 짧다. 따라서 주파수 상향변환 방법은 양자 정보 통신과 QKD 시스템의 전송속도, 전송거리를 증가시킬 수 있을 뿐만 아니라 비트 에러율(bit error rate)을 줄일 수 있는 등의 효과를 가져올 수 있다^[4, 6]. 본 연구에서는 1.5 μm 통신과장 대역의 단일광자 장거리 전송 및 양자암호통신을 위해서 PPLN WG에서 준위상정합(quasi-phase matching, QPM)을 이용한 1552 nm+974 nm=598 nm의 SFG를 구현하여 주파수 상향변환 검출기(frequency up-conversion detector, UCD)를 구성하였다. 연속발진 레이저 다이오드(Laser diode,

LD)에서 나오는 1552 nm 파장의 신호광을 단일광자 수준으로 약하게 하여 UCD의 효율과 잡음 특성을 측정하였다. 또한 자발적 매개하향변환(spontaneous parametric down-conversion, SPDC)에서 생성된 수 ps 펄스폭을 갖는 1552 nm 파장의 단일광자가 입사하는 조건에서 동시계수 기반으로 UCD의 타이밍 지터 특성을 측정하고 분석하였다.

II. 준위상정합을 이용한 합주파수 생성

2차 비선형 광학현상중의 하나인 SFG는 비선형 매질에서 각진동수가 각각 ω_1 과 ω_2 인 두 광의 상호작용에 의해 각진동수가 $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ 인 새로운 광을 생성하는 과정이다. 이러한 과정이 효율적으로 일어나기 위해서는 일반적으로 다음과 같은 에너지 보존관계와 운동량 보존관계(위상정합조건)가 성립해야 한다.

$$\omega_{SFG} = \omega_s + \omega_p \Rightarrow \frac{1}{\lambda_{SFG}} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_p}, \vec{k}_{SFG} = \vec{k}_s + \vec{k}_p \quad (1)$$

여기서 ω 와 k 는 SFG에 수반되는 광의 각진동수와 파수벡터이고, 아래첨자 s와 p는 신호광과 펌프광을 나타낸다.

그림 1은 2차 비선형 계수 $\chi^{(2)}$ 를 갖는 비선형 매질에서 SFG와 에너지 준위관계를 보인 것이다. 비선형 매질에서 위상정합조건을 위해서는 주로 복굴절을 이용한 위상정합(birefringent phase-matching, BPM) 방법이 많이 이용되지만, 이러한 방법은 입사하는 광과 생성된 광의 편광상태가 동일한 경우(type-0)의 상호작용에는 이용할 수가 없다. 또한 LiNbO₃와 같은 비선형 물질에서 동일한 편광을 이용하는 상호작용에서는 비선형 계수가 type-I이나 type-II 상호작용을 이용하는 경우에 비해서 월등히 크다. 따라서 SFG와 같은 비선형 광학적 파장변환 과정을 효율적으로 구현하기 위해서 이용되는 또 다른 방법이 QPM을 이용하는 방법이다^[8,9]. QPM은 비선형 매질의 domain(비선형 계수의 부호가 동일한 영역)을 주기적으로 분극 반전시킨(periodically poled, PP) 구조에서 비선형 계수의 부호를 주기적으로 바꾸어 줌으로써 위상정합조건을 효율적으로 만족시키는 방법이다. QPM은 비선형 매질에서 광학적으로 투명한 모든 파장영역에서 이용이 가능하며, BPM을 이용할 경우에 비해서 상대적으로 높은 비선형 계수를 이용할 수 있고, 매질의 길이를 아주 길게 할 수 있다는 등의 장점이 있다.

그림 2는 주기적으로 분극 반전된 비선형 매질에서 QPM

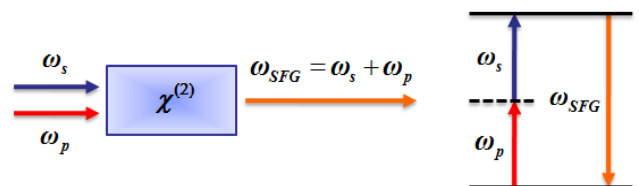


FIG. 1. Sum frequency generation.

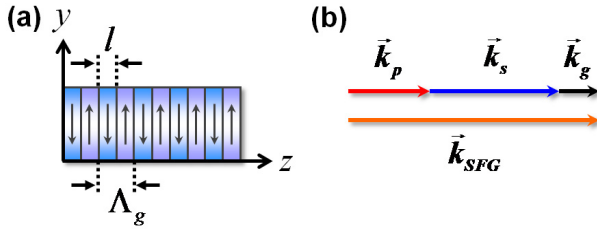


FIG. 2. Quasi-phase matched sum frequency generation. (a) Periodically poled nonlinear crystal, (b) quasi-phase matching.

을 이용한 합주파수 생성을 보인 것이다. 주기적으로 분극 반전된 구조에서 매질에 입사하는 펄스광과 신호광의 상호작용에 의해 생성된 SFG광은 매질의 z축을 따라 진행하면서 발생하는 $\Delta k_Q = k_p + k_s + k_g - k_{SFG} \neq 0$ 의 위상부정합(phase mismatch)에 의해 소멸된다. LiNbO₃와 같은 강유전성 물질의 domain을 주기적으로 반전시켜 배열하면 비선형 계수의 부호를 주기적으로 변화시킬 수 있고, 위상정합을 위해 z축을 따라 domain의 길이 l을 결맞음 길이로 하면 분극 반전된 domain에서는 비선형 계수의 부호가 바뀌어 π 의 위상차가 발생하게 된다. 따라서 분극 반전된 구조의 매질 내에서 상호작용하는 광의 파장에 따라 격자주기(grating period) Λ_g 및 매질의 비선형 굴절률을 조절하면 상호작용에 의한 출력 광이 효율적으로 생성되는 QPM을 얻을 수 있다. PPLN에서 QPM에 의한 SFG를 간단히 기술하기 위해서 SFG의 상호작용에 수반되는 전기장에 대한 결합된 모드 방정식은 다음과 같이 주어진다^[10].

$$\begin{aligned} \frac{dE_p}{dz} &= i \frac{\omega_p d(z)}{n_e(\lambda_p) c} E_s^* E_{SFG} \exp(i\Delta k_Q z) \\ \frac{dE_s}{dz} &= i \frac{\omega_s d(z)}{n_e(\lambda_s) c} E_p^* E_{SFG} \exp(i\Delta k_Q z) \\ \frac{dE_{SFG}}{dz} &= i \frac{\omega_{SFG} d(z)}{n_e(\lambda_{SFG}) c} E_p E_s \exp(-i\Delta k_Q z) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 E_p, E_s, E_{SFG} 는 각각 펄스광, 신호광, 그리고 SFG 광에 대한 전기장의 크기를 나타내고, $d(z)$ 는 QPM SFG 상호작용에 대한 비선형 계수, c 는 진공에서 빛의 속도, Δk_Q 는 위상부정합, 그리고 $n_e(\lambda_p), n_e(\lambda_s), n_e(\lambda_{SFG})$ 는 PPLN에서 펄스광, 신호광 그리고 SFG 광의 이상광선에 대한 굴절률을 나타낸다. 비선형 매질의 길이 방향(z)으로 주기적으로 변화는 비선형 계수는

$$d(z) = d_{eff} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{2}{m\pi} \sin\left(\frac{m\pi l}{\Lambda_g}\right) \exp\left(-i \frac{2m\pi}{\Lambda_g} z\right) \quad (3)$$

로 주어지며, 여기서 d_{eff} 는 single-domain bulk 매질의 경우에서와 같은 유효 비선형계수이다. $m=1$ 인 경우 즉, 제 1차

QPM만을 고려하면, l 은 반전된 구역의 길이이므로 $\frac{l}{\Lambda_g} = \frac{1}{2}$,

따라서 $d(z) = \frac{2}{\pi} d_{eff}$ 로 주어진다.

제 1차 QPM collinear SFG를 위한 위상부정합은

$$\Delta k_Q = k_p + k_s - k_{SFG} + \frac{2\pi}{\Lambda_g} \quad (4)$$

로 주어지며, QPM을 위해서 $\Delta k_Q = 0$ 의 조건을 만족시켜야 한다. QPM은 결정의 광축과 광의 진행방향이 서로 수직인 비임계(non-critical) 위상정합이므로 매질의 격자주기 및 온도를 변화시켜 위상정합조건을 만족시킬 수 있다. PPLN에서 SFG를 위한 QPM 조건은 식 (4)로부터 펄스광과 신호광의 파장이 결정되면 PPLN의 온도에 따라 SFG의 파장, 또는 격자주기는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{n_e(\lambda_{SFG}, T)}{\lambda_{SFG}} = \frac{n_e(\lambda_p, T)}{\lambda_p} + \frac{n_e(\lambda_s, T)}{\lambda_s} + \frac{1}{\Lambda_g} \quad (5)$$

여기서 $n_e(\lambda_p, T), n_e(\lambda_s, T), n_e(\lambda_{SFG}, T)$ 는 온도에 의존하는 Sellmeier 방정식으로부터 주어지는 펄스광, 신호광 그리고 SFG 이상광선의 굴절률이다^[11].

III. 실험결과 및 논의

3.1. 주파수 상향변환 검출기의 구성 및 효율측정

UCD는 통신파장 대역의 신호 광자와 강한 펄스광이 PPLN WG와 같은 비선형 매질과 상호작용을 통해서 가시광 영역의 새로운 광을 생성하는 SFG 또는 주파수 상향변환을 이용하는 것이다. 그림 3은 PPLN WG에서 SFG를 이용한 UCD 구성의 개략도이며, 1552 nm 통신파장대역의 광자를 598 nm 가시광 영역으로 주파수 상향변환을 하고, Si-APD를 이용하여 측정하는 과정을 보인 것이다.

본 연구에서 구성한 UCD의 셋업 및 실험사진은 그림 4와 같다. 그림 4(a)는 주파수 상향변환 검출기의 실험 구성도이며, 그림 4(b)는 펄스레이저, 신호광원을 포함한 광섬유 광학계 부분이고, 그림 4(c)는 PPLN WG로부터 Si-APD 검출기에 이르는 자유공간 광학계 부분이다. 특히 자유공간 광학계를 포함하는 부분은 외부로부터 빛을 차단하기 위해서 검은 상자 속에서 구성하였다. 974 nm 파장의 펄스광(Opto Link Corporation)과 1552 nm 통신파장 대역의 신호광(Agilent 81980A Tunable Laser)은 편광조절기(polarization controller, PC)를 거쳐 WDM(wavelength division multiplexer)에서 합쳐진 후 PPLN WG로 입사하게 된다. PPLN WG는 HC Photonics Corp.에서 제공하는 PPMgO:LN WG로 격자주기는 9.6 μm, 규격은 50 mm(L) × 3.0 mm(W) × 0.5 mm(T)이다. PPLN WG에서 1552 nm+974 nm=598 nm의 SFG 과정을 위한 위상정합 조건을 만족할 때 PPLN WG의 출구 쪽에는 598 nm의

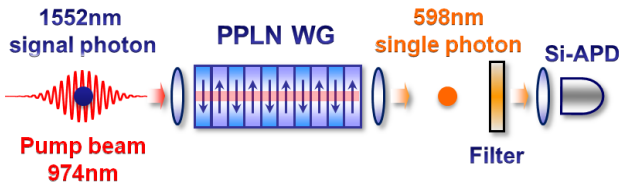


FIG. 3. Frequency up-conversion with single photons of telecommunication wavelength.

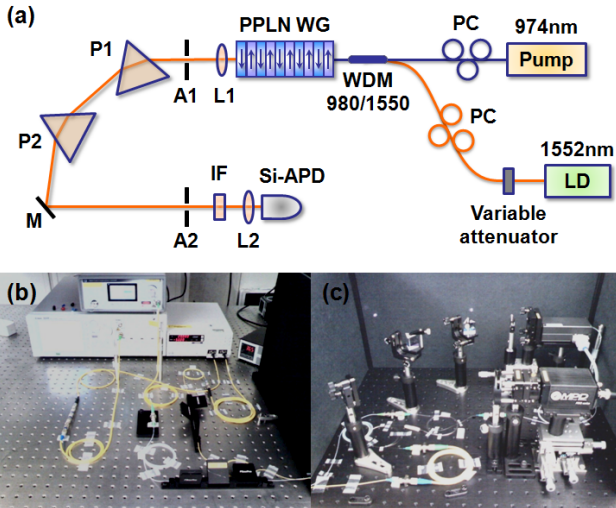


FIG. 4. Experimental setup for frequency up-conversion detector.

SFG 광, 974 nm의 펌프광 그리고 487 nm의 펌프광에 의한 SHG(second harmonic generation)광이 함께 방출된다. PPLN WG 출구에서의 광을 평행빔으로 만들기 위해서 초점거리가 8 mm인 렌즈(L1)를 이용하였다. PPLN WG 출력의 빔들은 두 개의 프리즘(P1, P2)과 거울(M)을 거치고 나면 PPLN WG로부터 Si-APD가 놓여 있는 곳까지 약 60 cm를 진행하게 되며, 이 위치에서 974 nm 펌프광과 487 nm의 펌프광에 의한 SHG 광은 598 nm SFG 광과 약 1cm정도 떨어지게 되므로 Si-APD에 직접적으로 입사되지는 않는다. 974 nm 펌프광과 487 nm의 펌프광에 의한 SHG 광은 상대적으로 세기가 아주 세기 때문에 구경(aperture) A2와 중심파장이 600 nm이고 선포이 40 nm, 최대 투과율 75%, 그리고 광학밀도(optical density)가 약 4인 간섭필터(interference filter, IF)를 설치하였다. 측정에서 사용한 Si-APD의 활성면적(active area)의 직경은 약 50 μ m이므로 초점거리가 11 mm인 렌즈를 이용하여 집광하였다. 가우시안 빔 광학을 이용했을 때 L1을 통과한 598 nm 광의 직경은 약 2 mm, L2를 통과한 후 Si-APD의 활성면적에서의 스폿크기는 약 4.2 μ m가 되므로 Si-APD는 SFG 광을 손실 없이 측정할 수가 있다.

본 연구에서 구성한 UCD 셋업에서 598 nm 파장의 SFG 광을 측정하는 검출기는 Micro Photon Devices(MPD)사에서 공급하는 Si-APD를 이용한 단일광자 측정모듈을 사용하였다. MPD사의 단일광자 측정모듈(single-photon detection module)

은 600 nm 파장대역에서 단일광자 검출효율이 약 42%, 불감시간은 78 ns이고, TTL 출력(펄스 진폭 3.36 V, 펄스 폭 22 ns)과 NIM 출력 펄스(펄스 진폭 -670 mV, 펄스 폭 24 ns)의 시간분해능은 각각 최대 250 ps와 50 ps 이하의 특성을 갖는다. 자유공간 광학계는 광섬유 광학계와 달리 광학계 정렬에 아주 민감하므로 Si-APD 검출기는 10 μ m이하의 정밀도를 갖는 3축 조절이 가능한 미세 이동기에 부착하였다. UCD의 검출효율 및 잡음 계수 측정을 위해서, 펌프광은 0~600 mA 범위에서 전류값을 조절하여 출력의 세기를 최대 300 mW까지 변화시켰다. 1552 nm 신호광의 세기는 연속발전 모드에서 편광조절기에 입사하는 평균광자수가 10^6 photon/sec가 되도록 고정/가변 광감쇄기의 조합을 이용하여 조절하였다. 여기서 펌프광의 세기는 펌프 레이저의 출구에서의 세기를 기준으로 하였다. 따라서 PPLN WG에 입사하는 세기는 PC와 WDM에서 발생하는 광손실(~1.2 dB), 그리고 PPLN WG에서의 결합 손실(25~30%) 등을 포함한 광손실 때문에 차이가 있을 수 있다.

UCD의 검출효율과 잡음 계수 특성을 측정하기 위한 선행 실험으로, PPLN WG의 동작온도 조건을 찾기 위해 펌프광의 세기는 300 mW로 설정하고, 편광조절기로 펌프광과 신호광의 편광이 PPLN WG의 분극 방향(poling axis)과 일치하도록 맞추었다. 전체 SFG 계수와 잡음 계수는 신호광이 있을 때와 없을 때 각각 발생하는 SFG 광을 측정하는 것이므로 가변 감쇠기의 출력부분을 on/off 하여 조절하였다. 전체 SFG 계수와 잡음 계수는 PPLN WG의 온도에 따라서 달라지며 펌프광의 세기에 따라서도 달라지는데, 여기서는 실험 과정에서 효율이 거의 최대로 나오는 지점을 선택하여 고정하고 PPLN WG의 온도를 0.1 $^{\circ}$ C 간격으로 변화시켰다. 펌프광의 세기가 300 mW, PPLN WG의 온도가 38 $^{\circ}$ C일 때 최대 효율이 약 7%, 잡음 계수는 약 480 kHz로 측정되었다.

그림 5는 펌프 레이저 출구에서의 광의 세기에 따른 UCD의 검출효율과 잡음 계수를 보인 것이다. 여기서 UCD의 검출효율은 PPLN WG의 입력과 출력에서 발생하는 광의 손실, SFG 효율, 광학부품에서의 광손실, 그리고 Si-APD의 광자 검출효율 등을 포함한 전체 시스템의 광자 검출효율을 나타낸다. 그래프에서 보인 검출효율은 신호광이 있을 때에만 측정된 순수한 SFG 계수를 입력 신호의 광자수로 나누어 정의하였다. PPLN WG에 입사되는 974 nm 펌프 빔의 세기에 따른 UCD의 검출효율을 위한 함수는

$$y = A_1 \sin^2(\sqrt{A_2 x}) \tag{6}$$

로 주어지며, 여기서 A_1 과 A_2 는 곡선맞춤을 위한 임의의 매개변수이고 x 는 mW 단위로 나타낸 펌프 빔의 세기를 나타낸다^[3, 12]. 실험에서 측정된 데이터의 곡선맞춤을 위해서 펌프광의 세기는 펌프 레이저 출구에서의 광의 세기를 기준으로 하였다. 여기서 잡음 계수는 신호광이 차단되었을 때 검출기에서 측정된 단일 계수(single count)이다. SFG를 이용하는 UCD에서는 측정효율도 중요하지만 사용하는 조건에서

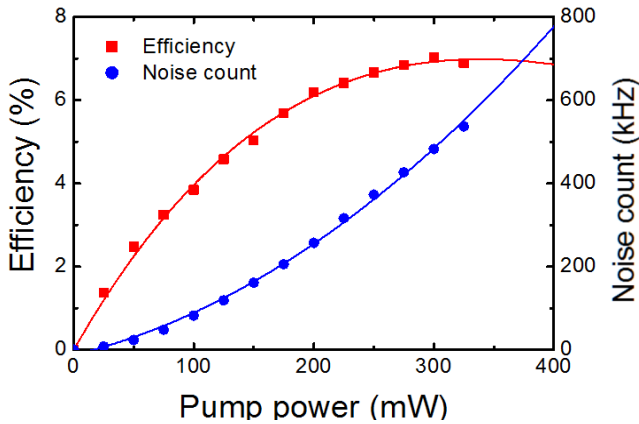


FIG. 5. Measured efficiency and noise count vs pump power for UCD.

잡음 계수를 가능한 낮추는 것이 중요하다. 잡음 계수를 유발시키는 요인으로는, 974 nm 펌프광과 487 nm SHG 광은 IF에서 모두 차단된다고 가정했을 때, 크게 두 가지로 생각할 수 있다. 한 가지는 세기가 강한 974 nm 펌프 레이저에 의한 자발적 라만 산란(spontaneous Raman scattering, SRS)에 의해 발생한 1552 nm 파장의 광이 974 nm 펌프광에 의해 1552 nm+974 nm=598 nm의 SFG를 발생시키는 경우이고, 또 다른 한 가지는 974 nm 펌프 레이저가 PPLN WG에서 SPDC에 의해 발생한 1552 nm 파장과 974 nm 펌프광이 SFG를 발생시키는 경우이다. 이와 같이 펌프광에 의해 자발적으로 생성되는 1552 nm 파장의 광에 의한 598 nm 파장의 광은 신호광에 의한 SFG 파장과 근본적으로 분리할 수가 없기 때문에, UCD의 성능을 개선하기 위해서는 이러한 잡음 계수를 줄이는 방법을 모색해야 한다^[4]. 또한 광학계 구성과 외부 환경 등에 대한 안정성을 포함하는 UCD를 안정적으로 동작시키는 것이 필요하다.

3.2. 주파수 상향변환 검출기의 시간분해능 측정

UCD에 이용되는 Si-APD는 연속모드에서 동작되며 상대적으로 짧은 불감시간과 낮은 애프터 펄스 특성 그리고 수십 ps 정도의 짧은 타이밍 지터 등의 특성으로 인해 높은 전송 속도를 위한 양자암호 통신에 보다 효율적으로 이용될 수 있다. 본 연구에서는 빠른 전송속도를 갖는 양자암호통신을 위한 주파수 상향변환 검출기의 타이밍 지터를 측정하는 방법과 실험장치 구성 및 측정결과를 기술하였다.

그림 6은 UCD의 타이밍 지터를 측정하기 위한 실험 장치도를 보인 것이다. UCD의 타이밍 지터를 측정하기 위해서는 그보다 훨씬 좁은 펄스폭을 갖는 신호광이 필요하다. 본 연구에서는 SPDC에서 발생한 수 ps 펄스폭을 갖는 광자를 신호광으로 사용하였다. 전체 셋업은 크게 (1) 1552 nm 신호광을 생성하는 부분, (2) SFG에 의해 1552 nm 파장의 광을 598 nm 파장의 광으로 변환시켜서 측정하는 UCD, (3) UCD 출력 펄스의 타이밍 지터를 측정하는 부분, 그리고 (4) 트리

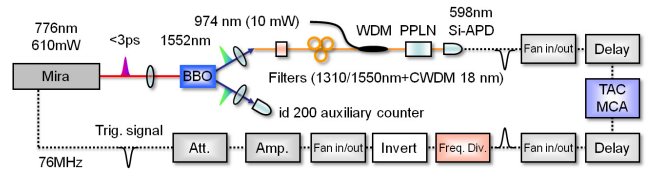


FIG. 6. Schematic setup for measuring timing jitter of up-conversion detector.

거 신호를 보내고 펄스 반복율을 조절하는 4가지 부분으로 나뉘어진다.

- (1) BBO 결정에서 SPDC에 의해 1552 nm 신호광을 생성하는 부분: 펄스 레이저에서 방출되는 펄스 폭이 3 ps 이하, 타이밍 지터 250 fs 이하, 파장이 776 nm, 그리고 펄스의 반복율이 76 MHz인 약 610 mW의 펄스를 BBO(β -BaB₂O₄) 결정에 입사시키면 noncollinear SPDC에 의해 1552 nm를 중심으로 넓은 파장대역의 광자쌍이 생성된다. 이러한 광을 광섬유에 집속시킨 후 밴드폭이 약 18 nm(FWHM)인 CWDM 필터를 통과한 빛을 UCD의 신호광으로 이용하였다. 트리거 신호의 반복율은 4 MHz, 게이트 폭 2.5 ns, 불감시간 1 μs의 조건에서 두 대의 InGaAs/InP APD 기반 단일광자 검출기(id quantique, id 200)로 측정된 단일 계수는 각각 34,500 Hz와 30,000 Hz, 그리고 동시계수(coincidence)는 1,600 Hz였다. 여기서 CWDM 필터는 중심파장이 1550 nm이지만 폭이 18 nm로 아주 넓고, PPLN WG에서 SFG를 위한 위상정합 밴드 폭이 약 1 nm 정도이므로 실제로 PPLN WG에서 유효한 신호광은 중심파장이 1552 nm이고, 폭이 약 1 nm인 신호광이 입사된다고 생각해도 된다.
- (2) UCD: PPLN WG에서 1552 nm+974 nm=598 nm의 SFG에 의해 생성된 598 nm광을 MPD사의 Si-APD로 측정하는 부분이다.
- (3) UCD 출력 펄스의 타이밍 지터를 측정하는 부분: UCD의 타이밍 지터는 TAC(time-to-amplitude converter, ORTEC 567)와 MCA(multi channel analyzer, ORTEC TRUMP™-PCI-8k)를 이용하여 측정하였다. TAC는 start와 stop 입력 펄스들 사이의 시간 차이를 전압의 크기(0~10 V)로 바꾸어주는 장치이며, 따라서 전체 시간범위 50 ns에서 200 mV/ns의 특성을 갖는다. MCA는 ADC(analog to digital converter)가 내장되어 있어서 입력 펄스의 전압 크기를 채널수로 변환시켜 주는 역할을 하며, 가장 정밀하게는 0~10 V에 대해서 8192 채널(6.104 ps/채널)로 변환이 가능하다. 본 실험에서 UCD의 타이밍 지터를 측정하기 위한 TAC/MCA의 시간 정밀도는 10 ps정도이다. 실험에 사용된 Si-APD 검출기의 타이밍 지터는 최대 50 ps(FWHM)인데, 제작사에서 제공한 측정값은 37 ps이다. 측정에 사용된 TAC/MCA

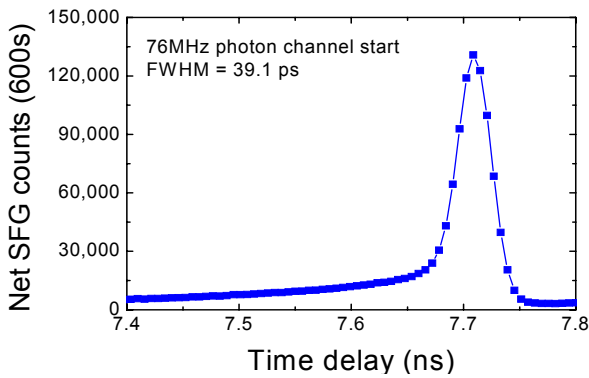


FIG. 7. Timing jitter for UCD NIM output signal.

의 타이밍 지터는 10 ps이고, Fan in/out, delay 등의 NIM 장치들이 수 ps의 독립적인 타이밍 지터 특성을 갖고 있지만 UCD의 타이밍 지터를 측정하기에는 충분하다.

- (4) 트리거 신호를 보내고 펄스 반복율을 조절하는 부분: 본 실험에서는 펄스 레이저에서 나오는 76 MHz의 펄스와 주파수 분할기(frequency divider)를 이용하여 4 MHz로 주파수가 1/19로 낮추어진 펄스의 경우에 대해서 UCD 출력 신호의 타이밍 지터를 측정하였다. 감쇄기(Att.)와 증폭기(Amp.)는 레이저의 낮은 전압의 트리거 펄스(140 mV)를 NIM 모듈(Fan in/out)의 입력 신호의 크기에 맞추기 위해서 사용하였다.

그림 7은 UCD의 NIM 출력 신호를 TAC의 start 입력으로, 피코초 레이저 펄스와 동기화 된 76 MHz의 트리거 신호를 stop 입력으로 설정하여 측정한 타이밍 지터이다. TAC의 측정 시간 범위는 50 ns로 설정하였으며, 타이밍 지터는 약 39.1 ps로 측정되었다. 이러한 짧은 타이밍 지터특성을 갖는 단일광자 검출기를 이용하면 수 GHz의 속도를 갖는 장거리 양자통신에 유용하게 활용될 수 있다.

3.3. 동시계수를 이용한 펄스형 단일광자 측정

UCD를 이용한 단일광자 검출에서는 비교적 높은 파워의 연속발진 974 nm 펌프광을 필요로 하며, 이로 인하여 광섬유와 PPLN WG에서 수반되는 비선형 효과에 의해 비교적 높은 잡음 계수가 발생하고, 결국 이는 광자 검출의 오류를 유발하게 된다. 하지만, 검출하고자 하는 광자가 펄스형인 경우에는 동시계수를 측정함으로써 이러한 잡음 계수의 영향을 최소화 할 수 있다. 본 연구에서는 피코초 펄스 레이저와 BBO 결정을 이용한 SPDC에서 생성되는 펄스형의 단일광자를 대상으로 하여, 본 연구에서 구성된 UCD와 동시계수를 통해 펄스형 단일광자검출 실험을 수행하였다. 그림 6의 실험 장치에서 776 nm 피코초 펄스 레이저의 출력은 850 mW, 974 nm UCD 펌프 레이저의 출력은 250 mW로 하였다. 먼저 동시계수 실험에 많이 이용되는 NIM 모듈 기반으로 펄스 판별기(discriminator)와 시간 지연기, 그리고 동시계

수기로 측정 장치를 구성하여 선행 실험을 진행하였다. 이러한 경우에 단일광자에 의해 발생하는 신호의 타이밍 지터는 50 ps 이하이고, 실험에 이용된 동시계수 회로(Philips scientific NIM model 756)의 최소 시간 분해능은 2 ns이므로 974 nm 펌프 레이저에 의해 비선형 과정으로 발생하는 잡음 계수를 줄이는 데는 한계가 있고(본 실험에서는 시간 분해능이 최소 2 ns일 때 SNR은 약 1.32 정도 되었다), 이러한 특성은 QKD에 적용할 때 단일광자 검출 성능을 저하시키는 단점을 나타낸다. 하지만 동시계수 분해능을 단일광자의 시간 분해능 정도로 줄인다면 잡음 계수를 제거한 순수한 SFG 신호만을 선택하여 측정하는 것이 가능하고, 따라서 SNR을 최대한으로 높일 수 있다.

실험에서는 피코초 펄스 레이저의 트리거 신호를 TAC의 start 입력으로, UCD의 출력 신호를 TAC의 stop 입력으로 하여 TAC의 출력을 분석하고 두 신호의 동시계수를 트리거 신호 대비 UCD 출력 신호의 시간분포를 측정하였다. 동시계수를 이용하여 주파수 상향변환된 광자를 검출하는 경우, 동시계수 시간 폭(coincidence time window)의 크기에 따라 신호대 잡음비의 특성이 달라진다는 것을 알 수 있다. 실제로 동시계수 측정 시간 범위를 점점 증가시키면 피코초 펄스형 광자에 의한 신호가 없는 시간 영역에서도 974 nm 펌프 레이저에 의해서 비선형적으로 발생하는 잡음 계수가 상당히 많이 존재한다. 동시계수 시간 폭이 UCD의 타이밍 지터의 약 2배에 해당되는 100 ps일 때 신호대 잡음의 비율은 최대 약 6 정도로 증가하였다.

IV. 결 론

장거리 양자암호통신을 위한 핵심기술의 중요한 요소 중의 하나는 1.5 μm 통신파장 대역의 효율적인 단일광자 검출방법을 개발하는 것이다. 이를 위해서 본 연구에서는 PPLN WG에서 주파수 상향변환 과정을 이용하여 1552 nm 통신파장의 단일광자를 효율적으로 측정하는 검출기를 구성하고, 효율 및 잡음 계수를 측정하고 분석하였다. 974 nm 펌프광의 세기가 300 mW일 때 최대효율이 약 7%, 잡음 계수는 약 480 kHz로 측정되었다. 이와 같이 통신파장대역의 광을 가시광 영역으로 변환시켜 측정하는 방법은 InGaAs/InP APD가 아닌 Si-APD를 이용하기 때문에 측정파장 대역에서 상대적으로 양자효율이 높을 뿐만 아니라 non gated mode에서 동작시킬 수 있기 때문에 통신파장 대역의 단일광자를 측정하는데 있어서 보다 효율적으로 이용될 수 있다. 또한 본 연구에서는 주파수 상향변환 검출기의 타이밍 지터를 측정하였다. 피코초 펄스 레이저를 이용한 매개하향변환에서 1552 nm 신호광자를 생성하고, PPLN WG에서 974 nm 파장의 펌프광과 상호작용에 의해 발생한 598 nm 파장의 광을 Si-APD의 NIM 출력 펄스로 측정하고 TAC/MCA를 이용하여 분석하였다. 76 MHz 광자 신호가 TAC의 start 입력으로 하고 76 MHz 트리거 신호가 stop 입력으로 했을 때 최소 타이밍 지터는 약 39.1 ps로 측정되었다. 또한 펄스형의 단일광자 신호와 좁은 시간

범위의 동시계수 기반으로 주파수 변환된 광자를 측정하면 주파수 변환에 수반되는 펌프광에 의해 광섬유 및 PPLN WG에서 비선형 효과로 발생하는 잡음 계수를 줄일 수 있고 신호대 잡음의 비율을 높이는 효과를 얻을 수 있다. 낮은 타이밍 지터와 상대적으로 높은 신호대 잡음비의 특성을 갖는 단일광자 검출기를 이용하면 수 GHz의 속도를 갖는 장거리 양자통신에 유용하게 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. M. A. Albota and F. N. C. Wong, "Efficient single-photon counting at 1.55μm by means of frequency upconversion," *Opt. Lett.* **29**, 1449-1451 (2004).
2. A. P. Vandevender and P. G. Kwiat, "High efficiency single photon detection via frequency up-conversion," *J. Mod. Opt.* **51**, 1433-1445 (2004).
3. C. Langrock, E. Diamanti, R. V. Roussev, Y. Yamamoto, M. M. Fejer, and H. Takesue, "Highly efficient single photon detection at communication wavelengths by use of upconversion in reverse-proton-exchanged periodically poled LiNbO₃ waveguides," *Opt. Lett.* **30**, 1725-1727 (2005).
4. R. T. Thew, S. Tanzilli, L. Krainer, S. C. Zeller, A. Rochas, I. Rech, S. Cova, H. Zbinden, and N. Gisin, "Low jitter up-conversion detectors for telecom wavelength GHz QKD," *New J. Phys.* **8**, 32 (2006).
5. H. Takesue, E. Diamanti, C. Langrock, M. M. Fejer, and Y. Yamamoto, "1.5 μm single photon counting using polarization-independent up-conversion detector," *Opt. Express* **14**, 13067-13072 (2006).
6. E. Diamanti, H. Takesue, C. Langrock, M. M. Fejer, and Y. Yamamoto, "100 km differential phase shift quantum key distribution experiment with low jitter up-conversion detectors," *Opt. Express* **14**, 13073-13082 (2006).
7. T. Honjo, S. Yamamoto, T. Yamamoto, H. Kamada, Y. Nishida, O. Tadanaga, M. Asobe, and K. Inoue, "Field trial of differential-phase-shift quantum key distribution using polarization independent frequency up-conversion detectors," *Opt. Express* **15**, 15920-15927 (2007).
8. J. A. Armstrong, N. Bloembergen, J. Ducuing, and P. S. Pershan, "Interactions between light waves in a nonlinear dielectric," *Phys. Rev.* **127**, 1918-1939 (1962).
9. P. A. Franken and J. F. Ward, "Optical harmonics and nonlinear phenomena," *Rev. Mod. Phys.* **35**, 23-39 (1963).
10. L. E. Myers, R. C. Eckardt, M. M. Fejer, and R. L. Byer, W. R. Bosenberg, and J. W. Pierce, "Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO₃," *J. Opt. Soc. Am. B* **12**, 2102-2116 (1995).
11. D. H. Jundt, "Temperature-dependent Sellmeier equation for the index of refraction, n_e, in congruent lithium niobate," *Opt. Lett.* **22**, 1553-1555 (1997).
12. E. Diamanti, H. Takesue, T. Honjo, K. Inoue, and Y. Yamamoto, "Performance of various quantum-key-distribution systems using 1.55-μm up-conversion single-photon detectors," *Phys. Rev. A* **72**, 052311 (2005).