

양자키분배를 위한 단일광자 생성 및 APD 기반의 저잡음 검출

박준범, Bouzid Abdessattar, 황성현, 임영근, 문성욱  
한국과학기술연구원 나노과학연구본부

Single-Photon Generation and Low-Noise Detection based on APD for Quantum Key Distribution

Jun-Bum Park, Bouzid Abdessattar, Sung-Hyen Hwang, Young-Geun Lim, Sung Moon  
Korea Institute of Science and Technology, Nano-Science Research Division

**Abstract** - 본 논문에서는 1.5um 파장대에서 감쇄기를 이용한 유사단일광원을 이용하여 단일광자검출의 특성을 실험적으로 분석하였다. Gated Geiger 모드에서 APD를 동작 하여 열적 노이즈에 따른 양자효율을 측정하였다. 또한 APD를 이용하여 단일광자를 고속으로 검출시 문제가 되는 afterpulsing 노이즈의 온도별 특성을 분석하였다.

1. 서 론

통신 네트워크의 발전에 따라 보안 문제는 점차 증대되고 있다. 이의 대안 기술이자 미래 보안 기술인 양자키분배 기술 연구가 활발히 진행 중에 있다. 양자키분배 구현에서 중요한 기술은 단일광자검출 기술이다. 단일광자검출은 300nm에서 1700nm의 넓은 파장 대역을 가진 Photomultiplier Tube(PMT)가 주로 사용되어 왔으나 장비의 크기, 비용, 진공 패키징, 낮은 양자효율(Quantum Efficiency) 등의 문제점을 갖고 있다. Si Avalanche Photodiode(APD)는 상대적으로 높은 양자효율과 저잡음의 특성을 보이나 파장대역(600nm~1000nm)이 광통신을 위한 파장 대역(1300nm, 1550nm)에는 적합하지 않다. InGaAs APD는 광통신 파장 대역을 갖고 있어 광섬유 기반의 양자키분배 시스템에서 단일광자검출 소자로 주로 사용되어 왔다[1,2]. 효율적인 시스템 구현을 위해 InGaAs APD는 저잡음, 고효율의 단일광자검출이 필수적이다. 본 논문에서는 1550nm 파장의 단일광자를 생성하고 InGaAs APD 모듈을 최적화하여 양자효율과 잡음(열적, afterpulsing)의 특성을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 단일광자광원

단일광자광원은 다이아몬드 결정구조에 질소 원자 한 개를 치환해서 여기 시키는 방법[3], 반도체 양자 우물 구조를 이용하는 방법[4], 반도체 양자점을 이용하는 방법[5], 광매개하향변환을 이용하는 방법[6] 등이 있으나 광자 발생 효율이 낮다. 본 실험에서는 광자 발생 효율은 낮으나 단일광자 생성이 비교적 용이한 유사단일광원을 사용한다. 원리는 센 빛을 감쇄기를 이용하여 단일광자 수준으로 감쇄하여 단일 광자를 생성하는 것으로서 실험 구성은 그림 1과 같다. DFB-Laser(1.5um)와 Variable attenuator 그리고 광량을 측정할 수 있는 광 검출기로 구성된다. 광 펄스의 에너지는 감쇄율 D(dB)에 따라 그 에너지와 평균 광자의 수가 정해진다. 펄스당 광자수는 식 1과 같으며 평균 광자 수는 식 2와 같다.

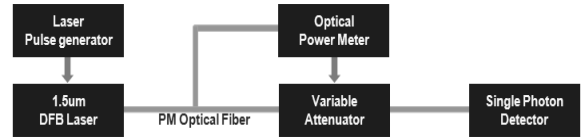
$$n_{photon} = \frac{E_{opt}}{h \cdot \nu} \tag{1}$$

$$\mu = \frac{n_{photon}}{10^{D/10}} \tag{2}$$

감쇄율 D에 따라서 펄스당 광자의 수가 정해지고 한 펄스당 발견될 확률을 계산하면 식 2과 같이 poisson 방정식이 된다.

$$P(x) = \frac{e^{-\mu} \cdot \mu^x}{x!} \tag{3}$$

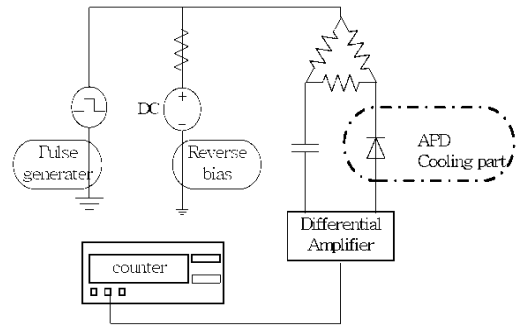
평균 광자수를 0.1로 할 경우, 펄스당 광자가 1개 있을 확률은 0.09이며 0개 있을 경우는 0.904, 2개 있을 경우는 0.004 이다. 0.1 평균 광자수를 사용하면 2개 광자가 생성될 확률이 낮으므로 양자키분배에서 보안 유지가 가능하게 된다. 실험에서는 펄스당 광자수가 7.8×10<sup>-7</sup>개로 확인되었으며 0.1 평균 광자수를 만들기 위해 -88.92dB의 감쇄량을 적용하였다.



<그림 1> 단일광자 실험 구성도

2.2 단일광자검출

단일광자 검출 소자로써는 상용 광통신에 사용되는 InGaAs APD를 사용하였다. 단일광자가 입사하면 전자 전공 쌍이 발생하고 avalanche breakdown에 의해 증가된 전송자를 감지하는 원리이다. 감지 모듈 회로는 그림 2와 같다. APD의 열적 노이즈를 줄이기 위해 gated Geiger 모드로 동작하며[7] 동시에 열전소자를 이용하여 온도를 낮춘다. APD의 breakdown 전압의 1V 이하로 역전압을 인가하며 병렬로 4~8V, 2.5ns의 펄스로 gate를 인가한다. gate의 주기는 10kHz를 사용하였다. 또한 단펄스생성기(short pulse generator)와 디지털지연생성기(digital delay generator)를 이용하여 단일광자와 gate 펄스를 동기화 하게 된다. APD의 캐패시터 성분에 기인된 노이즈 성분을 제거하기 위해 APD와 동일한 캐패시터를 병렬 연결 후, 차등증폭을 하여 카운트를 하게 된다. 또한 -55℃의 저온에서 수증기의 응결로 인한 회로 누설을 피하기 위해 APD, 열전소자, 회로 주변을 플라스틱 폼을 이용하여 단열 하였다.

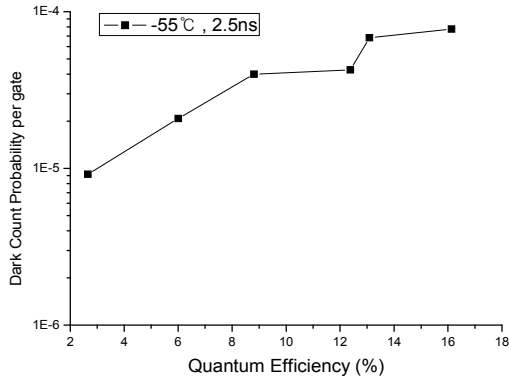


<그림 2> 감지모듈 회로

2.2.1 Quantum Efficiency

동작 속도(f<sub>rep</sub>)는 10kHz, 평균 광자수는 0.1, 그리고 측정된 카운트를 이용하여 양자효율을 나타낼 수 있으며 이는 식 4와 같다. 양자효율은 열적 노이즈와 함께 양자키분배에서 중요한 파라미터 중 하나로서 전송 거리와 직접적으로 연관 된다. 측정된 열적 노이즈에 따른 양자효율은 그림 3과 같다. -55℃온도에서 2.5ns의 Gate 펄스를 이용하여 동작하였을 때 양자효율의 증가와 동시에 열적 노이즈도 증가를 하였다. 양자키분배에 실제 적용하기 위한 최적 조건으로는 7.8E-05의 열적 노이즈와 16.13%의 양자효율이 측정되었다. gate 펄스를 조정하여 양자효율을 향상 시킬 수 있을 것으로 보이나 양자키분배에서 노이즈의 한계값이 있으므로 16.13%의 측정값이 양자키분배에 사용 가능한 최적값으로 보인다.

$$Quantum\ Efficiency(\%) = \frac{f_{count} - f_{dark}}{\mu f_{rep}} \times 100 \tag{4}$$



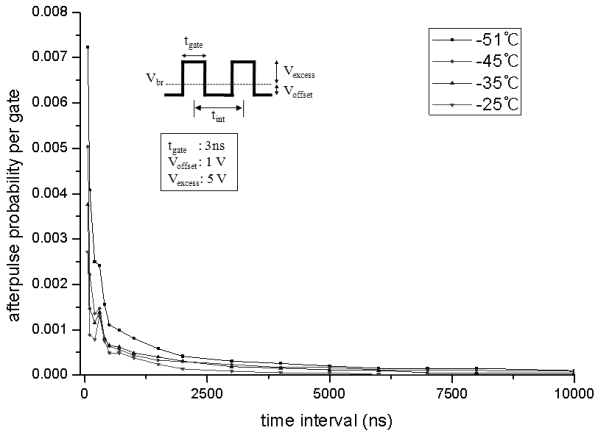
〈그림 3〉 열적 노이즈에 따른 양자효율

### 2.2.2 Afterpulsing

Afterpulsing은 단일광자검출의 중요 파라미터로서 단일광자 검출 및 동작 속도를 제한하게 된다. 단일광자를 고속으로 검출 및 동작할 경우 afterpulsing 노이즈가 증가하게 된다[7]. 이는 avalanche가 일어나 단일광자를 감지했을 경우 전송자가 quenching이 안되고 트랩 되어 있다가 다음번에 오는 gate 펄스에 avalanche를 일으켜 생기는 현상이다. 본 실험은 이중 펄스를 10kHz의 주기로 동작하고 3ns와 5V의 gate 펄스를 사용하였다. 또한 온도에 따른 경향을 알아보기 위하여 -25°C ~ -51°C의 동작 온도를 적용하였다. Afterpulsing probability는 식 5와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_a = \frac{f_{count} - f_{dark} - f_{rep}}{f_{rep}} \quad (5)$$

측정된 afterpulsing probability는 그림 4와 같다. 60ns의 이중 펄스 간격에서는 -51°C에서 0.0072가 측정되었다. 이는 1000번의 avalanche가 일어날 경우 60ns 뒤에 gate 펄스가 있다면 7번의 afterpulsing이 일어난다는 의미이다. -25°C에서는 0.0027이 측정되었다. 온도가 올라갈수록 afterpulsing probability는 줄어들었다. 또한 약 10us의 이중 펄스 간격에서는 같은 동작 조건에서 측정된 열적 노이즈 값과 유사하게 측정되었다. 따라서 APD를 100kHz(10us)로 동작하게 되면 afterpulsing 노이즈의 영향이 거의 없음을 알 수 있다.



〈그림 3〉 afterpulsing probability

### 3. 결 론

본 논문에서는 실험을 통해 유사단일광자를 생성하였으며 이를 이용하여 APD 기반의 단일광자 검출을 하였다. APD 검출 모듈의 최적 설계와 동작 조건에서 약 16%의 양자효율과 7.8E-05의 열적 노이즈를 측정하였으며 APD의 고속 동작시 증가되는 노이즈 성분인 afterpulsing을 정량적으로 분석하였다. 60ns에서 0.007의 afterpulsing probability가 측정되었으며 10us에서는 afterpulsing이 거의 없는 것으로 측정되었다. 또한 높은 온도에서 확률이 줄어들었다. 본 실험을 통해 측정된 최적 조건의 단일광자검출은 양자키분배 시스템에서 중요 기술로 적용 가능 할 것으로 보인다.