

통신용 파장에서 발진하는 레이저의 광자계수 분포

Photon-number distribution of the laser operating at telecom wavelength

장현주*, 권순홍, 김세현, 이용희
 한국과학기술원 물리학과
 hjchang@kaist.ac.kr

광자의 다발로 이루어진 빛의 세기가 매우 약할 경우 입사된 빛의 광자수를 분해하는 검출기에 관한 연구가 여러 실험실에서 수행되고 있다^{(1),(2)}. 이러한 연구는 양자 정보 기술이 발전함에 따라 더욱 활발하게 진행될 것이다. 또한, 광자수 분해 검출기는 빛의 본질을 연구하는데 중요한 도구가 될 수 있다. 좁은 선폭의 필터를 통과시킨 혼돈광(chaotic light)과 결맞은 빛(coherent light)은 모두 1차 간섭성을 가지지만 그것의 고차 간섭성을 살펴보면 서로 다른 특성을 가진다. 특히, 빛의 2차 간섭성은 빛의 광통계와 관련되어 있는데, 단일 모드 혼돈광에서 방출되는 광자수의 확률 분포(P_n)는 식 (1)과 같이 Bose-Einstein distribution으로 주어지는 반면, 레이저와 같은 결맞은 빛에서 나오는 빛은 평균 광자수($\langle n \rangle$)를 중심으로 혼돈광에 비해서 불확정도(Δn)가 훨씬 적은 Poisson 분포로 나타난다. 이것은 식(2)로 주어진다.

$$P_n = \frac{\langle n \rangle^n}{(1 + \langle n \rangle)^{1+n}} \tag{1}$$

$$P_n = \frac{\langle n \rangle^n e^{-\langle n \rangle}}{n!} \tag{2}$$

일반적으로 통신용 파장에서의 저광량(low-light-level) 빛은 아발란치 포토다이오드(APD)의 자이거 모드(Geiger mode)을 이용하여 쉽게 검출할 수 있다. APD는 상대적으로 광전자증배관(PMT)에 비해 검출 효율이 높은 반면 입사된 광자수를 분해할 수 없다는 단점이 있다. 이러한 APD를 이용하여 가시광선 영역에서 광 분할기와 광섬유 루프를 도입하여 입사된 광자수를 분해 할 수 있음이 보고되었다⁽¹⁾. 그러나 가시광선에서 실험한 경우와 달리, 광통신 파장에서는 APD의 검출 효율이 낮고, 이전 펄스 안에 있는 광자에 의해서 형성된 광 전자(photoelectron)들이 다음 번째 바이어스에 의해 다시 검출되는 afterpulse effect 때문에 바이어스를 걸어주는 repetition rate 이 느리다는 단점이 있다.

실험 장치는 그림 1과 같다. 1550nm에서 발진하는 단일 모드 DFB레이저광을 20kHz로 변조시킨다. 이 빛을 광감쇠기를 이용하여 매우 적은 광량으로(low-light-level) 감쇠 시킨 후 3개의 50/50 광 분할기(coupler)와 두 개의 광섬유 루프를 이용하여 하나의 입사 펄스를 최종 8개의 펄스로 만든다. 이때 두 번째 루프는 첫 번째 루프에 정확히 두 배 만큼 길어야 된다. 루프의 길이는 각각 1km, 2km이며 이는 afterpulse effect를 줄이기 위해서이다. afterpulse effect를 줄이기 위해서는 두 루프 사이의 길이차를 크게 하는 것이 좋지만 그럴 경우 광섬유에 의한 광손실이 커지기 때문에 afterpulse effect와 광손실 사이의 trade-off가 존재한다.

그림 2는 8개의 펄스 중에서 갈라진 하나의 펄스 안에 있는 평균 광자수($\langle n \rangle'$)가 각각 0.38, 0.58, 0.93, 1.78일 경우의 검출될 확률 분포를 나타낸 것이다. 이때, 평균 광자수는, $\langle n \rangle' = \langle n \rangle_0 \eta L / 8$ 로 주어지며, $\langle n \rangle_0$ 은 루프로 입사되기 전의 평균 광자수를 나타내고, η 는 검출기의 검출 효율, L은 감쇠기와 광섬유 루프를 고려한 광손실을 의미한다. 처음에 평균 광자수가 $\langle n \rangle_0$ 로 주어진 Poisson 분포를 가진 빛은 광섬유 루프에 의

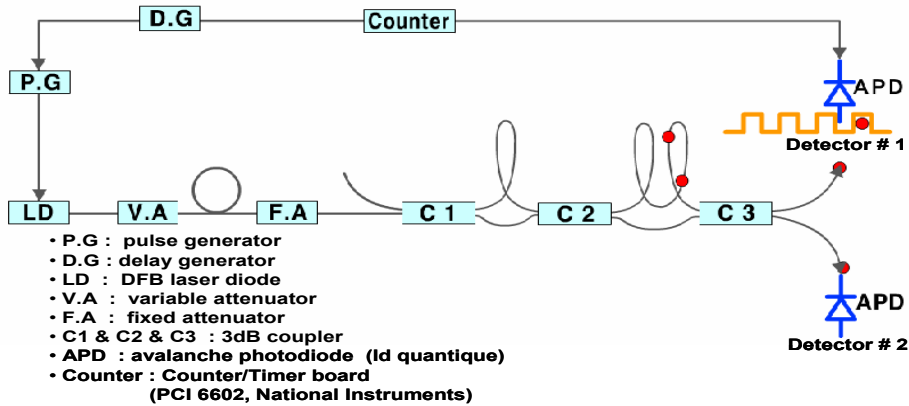


그림 1 실험 도식화

해 평균 광자수가 $\langle n \rangle'$ 으로 바뀐 8개의 Poisson 분포를 가진 펄스로 갈라져 각각 검출기로 들어가는데 앞에서 언급하였듯이, APD는 광자수를 분해 할 수 없기 때문에 식 (3)과 같이 Binomial law로 나타낼 수 있다. 여기서, $P_0 = \exp(-\langle n \rangle')$ 는 검출되지 않을 확률이다. 그림 2의 회색 히스토그램은 식 (3)을 이용하여 실험 결과에 fitting한 그래프로, 실험 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 완벽하게 맞지 않은 이유는 서로 다른 광 경로를 지난 빛의 손실이 다르지만 식(3)에는 그런 상황을 고려하지 않고 최종 갈라진 빛의 세기가 동일하다고 가정하였기 때문이다.

$$P(m) = \frac{8!}{(8-m)!m!} (P_0)^{L-m} (1-P_0)^m \quad (\text{for } m \leq 8) \quad (3)$$

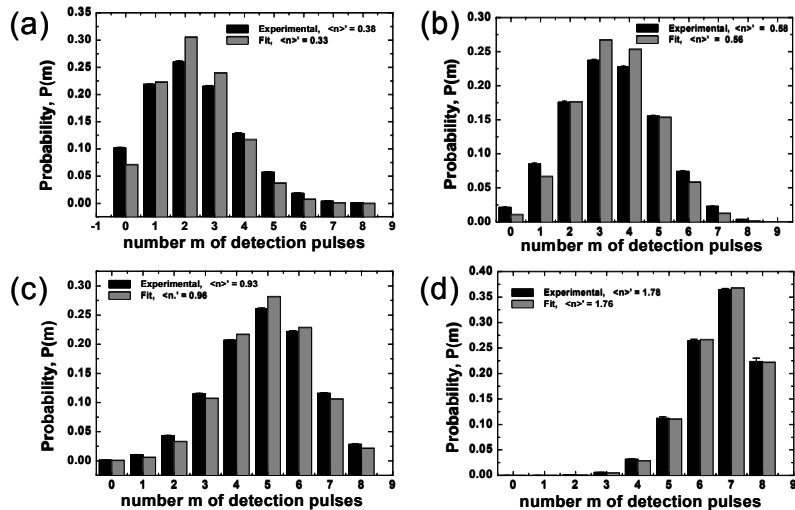


그림 2 8개의 펄스 중에서 m개의 펄스가 검출될 확률

- (a) 평균광자수 $\langle n \rangle' = 0.38$, (b) 평균광자수 $\langle n \rangle' = 0.58$,
- (c) 평균광자수 $\langle n \rangle' = 0.93$, (d) 평균광자수 $\langle n \rangle' = 1.78$

참고문헌

1. M. J. Fitch, *et al.*, "Photon-number resolution using time-multiplexed single-photon detectors," *Phys. Rev. A*, 68, 043814 (2003).
2. Mikio *et al.*, "Multiphoton discrimination at telecom wavelength with charge integration photon detector," *Appl. Phys. Lett.* 74, (2005).