

# 레이저 문턱전류 전 후에서 광자계수의 통계변화

## Photo-count Statistics of laser operating above and below threshold

장현주\*, 황인자, 이용희

한국과학기술원 물리학과

e-mail: hjchang@kaist.ac.kr

**Abstract:** To study the photon statistics, the total counts probability was measured for the two different optical source : below-threshold with Bose-Einstein distribution, and above-threshold laser with Poisson distribution.

레이저 광원에서 광자를 방출할 확률 분포를 알기 위해서는 밀도 연산자 (density matrix)의 운동방정식을 세운 후, 정상상태 (steady-state)에서의 해를 구하면 된다. 특히,  $n$ 개의 광자를 방출할 확률 분포는 밀도 연산자의 대각 성분과 관련이 있는데, 이를 문턱 (threshold) 조건에 이르기 전과 문턱 조건 훨씬 위에서 해를 구해보면 각각 식 (1)과 식 (2)로 주어진다. 즉, 식 (1)은 레이저가 문턱 값 (threshold)에 못 미치는 경우 레이저 공진기 안의 빛의 방출 특성으로, 온도  $T$ 의 평형 상태의 흑체에서 방출되는 단일 모드의 빛과 같은 분포를 따른다. 반면에 문턱 조건 훨씬 위에서는 간섭 상태의 빛을 기술하는 Poisson 분포를 따라 방출되는 것을 알 수 있는데, 이는 레이저에서 빛이 무작위로 방출되기 때문이다.

$$\rho_{nn} = P_n = \frac{\langle n \rangle^n}{(1 + \langle n \rangle)^{1+n}} \quad (1)$$

$$\rho_{nn} = P_n = \frac{\langle n \rangle^n e^{-\langle n \rangle}}{n!} \quad (2)$$

여기서,  $\langle n \rangle$ 은 평균 광자수를 의미한다. 식 (1)의 분포를 따라 방출되는 광자수의 불확정도  $\Delta n$ 은 평균 광자수  $\langle n \rangle$ 와 대략 비슷한 정도의 값을 갖는 비교적 넓은 분포를 보이는 반면 식 (2)을 따르는 광자수의 불확정도  $\Delta n$ 은  $\sqrt{\langle n \rangle}$ 으로  $\langle n \rangle$ 이 큰 경우에  $\Delta n = \sqrt{\langle n \rangle} \ll \langle n \rangle$ 이므로 광자수 분포는  $\langle n \rangle$ 을 중심으로 좁은 분포를 보임을 알 수 있다. 평균 광자수가 각각 0.5, 2, 6 인 경우, 두 빛의 방출분포를 그림 1에 나타내었다.

이러한 방출 특성의 차이를 평균 광자수가 극히 적은 영역에서 살펴보기 위해서는 매우 민감한 검출기로 광자계수를 측정해야 한다. 광자계수(photo counting) 측정은 극단적으로 적은 광량을 검출하는 가장 효과적인 방법으로 결과적으로  $\eta$ 만큼의 효율을 가진 검출기를 통한 광전자 계수의 분포(photoelectron counting distribution)는 식 (3)과 같다.

$$P_m = \sum_{n=m}^{\infty} \binom{n}{m} \eta^m (1-\eta)^{n-m} \rho_{nn} \quad (3)$$

여기서  $\eta$ 는 검출기가 하나의 광자를 흡수하여 외부의 회로에 신호를 방출할 확률을 의미한다. 만약에  $n$ 개의 광자를 방출하는 광원에서 검출기가  $m$ 개의 광자만 흡수할 경우, 원래  $n$ 개의 광자 중에서 어떤 광자들이 검출기에 흡수되었는지 알 수 없기 때문에 그러한 효과를 고려해 주기 위해 조합 인자 (combinational factor)를 포함시켜야 한다. 그래서 검출기를 통해 최종 확률 분포는 식 (3)이 되는 것이다. 이를  $m$ 개의 광자는 성공적으로 검출 (counts)되고  $n-m$ 개는 검출 되지 못할 경우의 확률 분포로 Bernoulli's 분포라 한다.

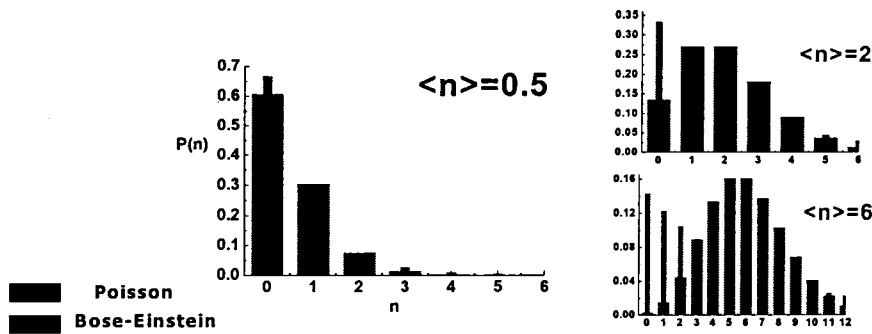


그림 1. 평균 광자수가 각각 0.5, 2, 6일 경우, n개의 광자를 방출할 확률 분포

식 (3)에서 알 수 있듯이 검출기의 효율이 이상적으로 1이 될 경우에는  $P_m = \rho_{mm}$ 으로 주어지나 실험에서 사용한 검출기의 효율이 0.1밖에 되지 못해서 검출기를 통한 확률 분포는 원래 광원에서 나오는 빛의 확률 분포와 같지 않게 된다. 뿐만 아니라 실험에서 사용한 검출기의 경우 광자수에 비례하여 신호가 나오지 않기 때문에, 즉 실험에서 상용한 검출기는 빛의 존재 유무만 판단하기 때문에 최종적인 결과는 식 (3)을 그대로 나타내지 않고 식 (4)에서처럼 빛을 검출한 모든 경우의 합만을 보여주게 된다.

$$P = \sum_n (1 - P_n(0)) \rho_{mm} \quad (4)$$

이러한 결과를 그림 3에 나타냈다. 그림 3의 실선은 검출 효율 ( $\eta$ ) 가 0.845일 때, 각각 Bose-Einstein distribution과 Poisson distribution을 나타낸 것이고 각각의 빨간 점과 파란 점은 두 빛의 실험값을 나타낸 것이다. 실험 과정은 그림 2에 나타낸 바

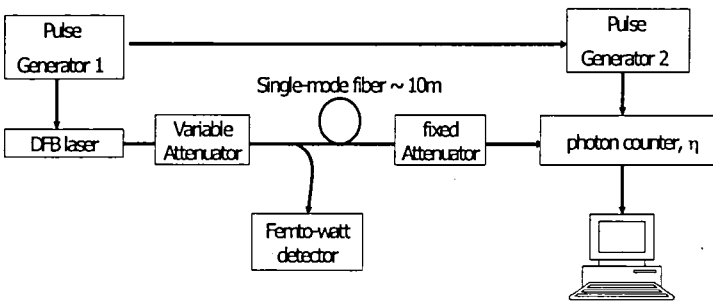


그림 2. 광원의 방출 특성을 살펴보기 위한 도식화

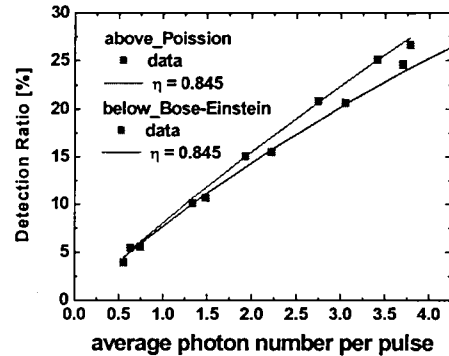


그림 3. 펄스당 평균 광자수에 따른 두 빛의 검출 확률

와 같이 감쇠 광섬유를 이용하여 극단적으로 낮은 빛을 단일 광자를 검출하는 아발란치 다이오드로 검출하였다. 광원은 1550nm에서 발진하는 DFB laser diode를 사용하여 펄스폭이 10ns, repetition rate은 100kHz로 modulation 시켰고, variable attenuator로 펄스당 평균 광자수를 변화시켰다. 검출기의 효율을 높이고 암전류로 인한 노이즈를 (dark counts)를 줄이기 위해 바이어스를 gating mode로 작동시켰다. 즉 펄스가 도착하는 순간에만 아발란치가 일어나도록 바이어스가 가해지도록 했다.

참고문헌

1. C.FREED, MEMBER, IEEE, AND H. A. HAUS, FELLOW, IEEE "Photoelectron Statistics Produced by a Laser Operating Below and Above the Threshold of Oscillation", IEEE Journal of Quantum Electronics, 1966

