

# 1.55 $\mu$ m 파장의 저광량 검출을 위한 APD의 자이거 모드 특성

## Geiger-mode characteristics of avalanche photodiodes for low-light-level detection at 1.55 $\mu$ m

장현주\*, 황인각, 최용석, 이용희

한국과학기술원 물리학과

e-mail: hjchang@kaist.ac.kr

**Abstract:** The performance of the InGaAs/InP avalanche photodiodes operated in Geiger-mode was investigated for 1550nm wavelengths at room temperature. We find the optimal operating points where the high quantum detection efficiency and low dark current are achieved. For the optical pulse detection, the gated-mode is used to reduce the dark current.

낮은 광량 검출에 대한 연구는 최근에 크게 관심을 끌고 있는 분야중의 하나이다. 특히 단일 광자 검출은 양자암호학에 있어서 필수불가결한 요소로서 많은 연구가 활발히 진행되고 있다. 일반적인 PIN 구조의 광다이오드로는 전기적인 회로에서 발생하는 잡음을 구별할 만큼 큰 전기적인 신호를 얻을 수 없다. 이를 극복하기 위해서는 내부의 이득 메커니즘을 가진 구조가 필요하다. 이러한 대표적인 광검출기로는 단일광자 아발란치 광다이오드로 불리는 반도체 광검출기(SAPD)와 음극과 양극사이에 증폭판을 넣어서 작동시키는 광증폭관(PMT)검출기가 있다.

실험에서 특히 관심 있는 파장 영역은 1550nm인데 이는 향후 광섬유를 이용한 양자암호학에 큰 응용성이 있기 때문이다. 본 연구에서는 이러한 영역의 파장을 검출하기 위해서 0.73eV의 밴드갭을 갖는 InGaAs물질을 이용한 상업적으로 판매되고 있는 InGaAs/InP 아발란치 광다이오드를 사용하였다. 작동원리는 광다이오드에 역바이어스를 걸어 pn접합부근에 높은 전기장을 형성하여 전자-홀 쌍이 연속적인 이온화 과정을 거쳐 검출 가능한 전기적인 신호로 증폭되어 나오도록 한 것인데, 그러한 전류-전압 특성 그래프를 구한 그림을 그림 1에 나타내었다. 외부에서 인가한 역바이어스가 51.5V를 넘어서면 전류가 급격히 증가하는데 이러한 영역을 자이거 모드라 한다. 즉 항복전압이상의 역바이어스를 인가하면 높은 증폭률을 보이기 때문에 저광량을 검출하기 위해서는 주로 자이거 모드에서 동작시킨다. 실험에서 사용한 아발란치 광다이오드에서는 입사된 빛에 대한 광전류의 비를 나타내는 감응도  $[A/W]$ 를 일반적인 광다이오드와는 달리 증폭요인  $[M]$ 을 고려하여 나타낸다. 즉, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{M * \eta * \lambda}{1.24} [A/W] \quad (1)$$

여기서,  $\eta$ 는 양자 검출효율을  $M$ 은 증폭률을 각각 의미한다.  $\lambda$ 의 단위는  $\mu$ m이다. 자이거 모드에서는 증폭률이 무한대로 커지기 때문에 실험적으로는 이 두 양을 직접적으로 각각 구할 수 없다. 식(1)에서 의미하는 검출효율을 외부에서 인가한 바이어스에 따라 어떠한 경향성을 나타내는지 확인한 결과를 그래프 2에 나타내었다. 그래프 2를 보면 알수 있듯이 항복전압이상에서는 입사된 빛에 의한 신호뿐만 아니라 암전류의 증가 폭도 같이 커지기 때문에 저광량의 빛을 검출하기 위해서는 적절한 동작점을 찾는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다. 따라서 저광량 영역에서 효율적인 광검출기의 특성을 판단하는 기준은 높은 양자검출효율과 낮은 암전류 발생확률이다. 암전류의 발생요인을 살펴보면 크게 세 가지로 나눌 수 있는데 첫째는, 열적여기에 의한 전자-쌍 생성, 둘째는 공핍영역에서 터널효과로 인한 전류발생, 셋째는 이전에 들어온 빛에 의해 갇혀있던 전하가 다음 번 역바이어스에 의해 아발란치 되어지는 현상으로 볼 수 있다. 마지막 현상을 afterpulsing 효과라 한다. 저광량 빛을 검출하는 것뿐만 아니라 향후 양자암호학에서와 같이 빛에 정보를 보내기 위해서

는 연속적으로 방출된 빛이 아니라 펄스로 변조된 빛을 검출해야 한다. 그러한 목적에서 행해진 실험 과정을 그림 3-1에 나타내었다. 일단 중심파장이 1550nm인 빛을 감쇠기를 이용하여 상온에서 검출 가능한 수준까지 충분히 감소시킨 다음 단일모드 광섬유를 통해 검출기로 들어가게 한다. 이때 레이저 다이오드에서 나온 빛을 그림 3-2에서와 같이 변조시킨다. 그리고 역바이어스를 그림 3-2의 (b)와 같이 게이트 모드로 인가시키는데, 이때 인가시켜준 시간영역 안에서 빛이 검출될 확률을 높이기 위해서 변조된 레이저 다이오드보다 넓게 동작시킨다. 그러면 항복전압 이상에서 인가된 바이어스 영역에서는 그림 3-2의(C)와 같은 결과를 예상할 수 있고 점선과 같이 암전류와 빛에 의해 증폭된 전류를 구별 지어주면 최종적으로 실제 빛에 의해 증폭된 신호만 얻을 수 있게된다. 앞에서 언급했던 암전류 발생요인들은 온도에 민감하게 영향을 받는다. 따라서 저온조건하에서는 충분히 높은 검출효율을 보이리라 예상되기 때문에 단일광자검출도 가능하리라 기대된다.

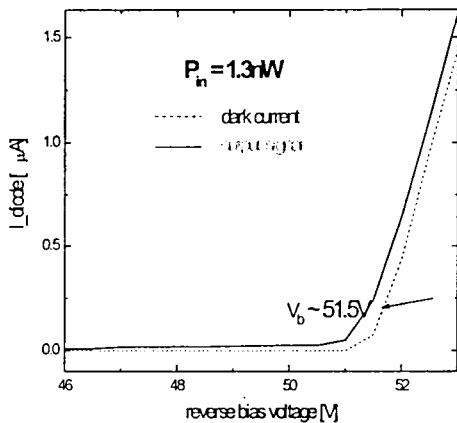


그림 1. 광다이오드의 전류-전압 특성 그래프

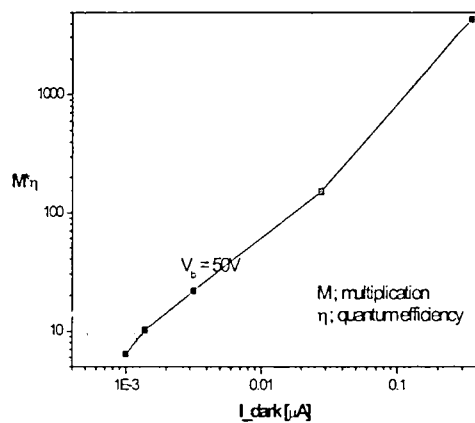


그림 2. 인가한 역바이어스 전압에 따른 암전류와 양자검출 효율의 상관관계 그래프

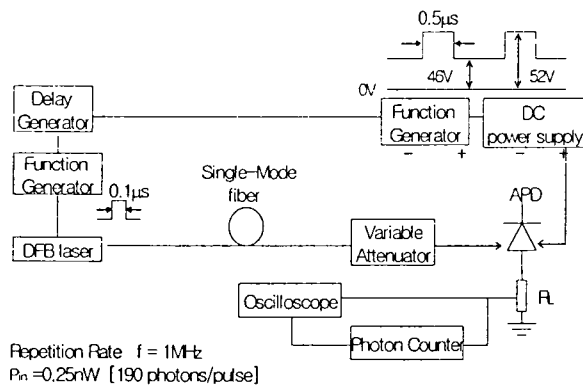


그림 3-1. 게이트 모드에서 작동하는 광검출기의 도식화  
참고문헌

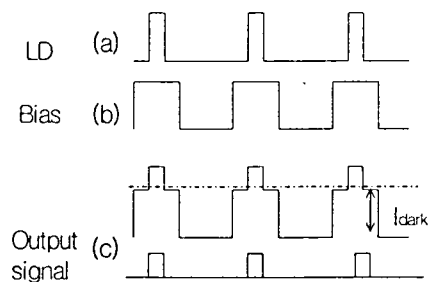


그림 3-2. 예상되는 검출 신호

1. Data sheet on single-photon detector module, ID quantique, Geneve, Switzerland
2. N.Namekata, Y. Makino, and S. Inoue, "Single-photon detector for long-distance fiber-optic quantum key distribution", Opt. Lett. vol.27, 954-956 (2002).
3. Y. Kang, H. X. Lu, and Y. -H. Lo, "Dark count probability and quantum efficiency of avalanche photodiodes for single-photon detection," App. Phys. Lett. 83, 2955-2957 (2003).

