

Cascade로 연결된 애버런치 광다이오드의 이득 및 잡음대역 특성

강 준 길

Kang, June Gill

光云工大 부교수 (응용전자공학과)

두개의 APD(Avalanche Photodiode)를 직렬로 연결하고 광신호를 동시에 수신할 때 이득, 잡음대역 특성 및 바이어스 전압에 따른 등축회로에 관하여 고찰하였다. Breakdown bias 전압에서 APD의 電流-電壓特性은 非線型 特性을 나타냈으며, 검파 diode로 表示되는 非線型 素子를 포함한 등축회로를 제시하였다.

APD는 정상 동작 상태에서 bias 전압은 역으로 供給되며 일반적으로 절연 파괴 전압보다 낮은 쪽에서 사용한다. Breakdown 前에 發生되는 micro-plasma 상태에서 光 粒子에 의해서 버진된 hole-electron 쌍은 이온화 하고, 또 이 현상이 반복되어 電流의 증배를 가져온다. Breakdown 전압 이하에서 發生될수 있는 Carrier의 數는 有限하며, 그 이상에서 avalanche 영역에 이른다. APD의 電流 증배율 M은 bias 電壓에 따라 非直線으로 응답을 하며, 절연 파괴 전압 부근에서 최대의 값을 갖는다. 또한 이때 發生되는 잡음 電力 밀도도 최대의 값을 가지며, breakdown 點 以上の 電壓에서 (電流 제한을

가할 경우) 전류, 전압의 応答은 일반적인 diode의 順方向 特性을 나타낸다.

이제 두개의 APD와 공통의 부하를 직렬로 연결하고 각각의 光 受 信 素 子의 bias 상태를 breakdown 시켰을 때, 各素子의 증배율과 잡음 發生 電力은 최대로 되며, 또 각 APD는 다른 素子에 대하여 일반적인 검파 다이오드의 順方向 特性으로 應 答을 하게 된다. 이러한 관계를 고려한 Cascoded APD Network는 다음 그림 1 과 같은 등축회로로 表示할 수 있다.

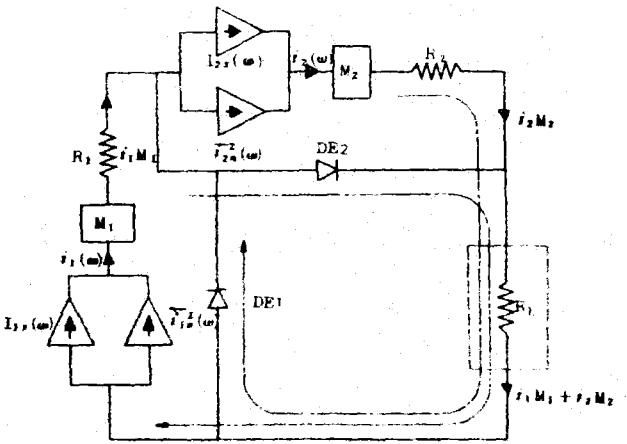


그림 1 $V \geq V_b$ 에서 직렬 APD의 ac 등가회로

여기서 M은 증배율, $S_{11}(\omega)$ 은

광생 광전압, R_L 은 공통 부하, 또 DE 는 검파 다이오드를 표시한다.

부하 저항 R_L 에 흐르는 전류는 각 APD 에서 발생되는 광전류의 습이 되며, 결국 이 습은 두 배로 증가함을 의미한다. 습 증가로 의 신호 및 잡음원은 비선형 현상을 거쳐 출력에 부하에 나타난다. 따라서 결번과 과전압의 bias 상에서 신호와 잡음 spectrum 의 변화를 고찰하면 다음과 같다.

$u(t)$ 를 신호와 잡음의 습으로 정의하고, 각 APD 의 광생 광전압은 서로 독립이며 평균치는 0 으로 가정한다.

$$u(t) = s(t) + n(t) \quad (1)$$

비선형 응답이

$$v = au^2(t) \quad (2)$$

로 주어질 때 전력 spectrum 은 Wiener - Khinchin 정리 에 의하여 이들의 상관 함수의 Fourier 변환을 구하면 된다. (1) 을 (2) 에代入 하고, $u(t+\tau)$ 와의 상관 함수 $G(\tau)$ 를 구하면

$$G(\tau) = E\{s^2(t)s^2(t+\tau)\} + E\{n^2(t)n^2(t+\tau)\} + 4G_s(\tau)G_n(\tau) + 2G_s(0)G_n(0) \quad (3)$$

여기서

$G_s(\tau)$: 입력 신호의 상관 함수

$G_n(\tau)$: 입력 잡음의 상관 함수

$G_s(0)$ 및 $G_n(0) = \sigma^2$: 각각 신호와 잡음의 평균 자승치

* 비선형 응답을 $v = u^2(t)$ 로 가정하였을 때, 잡음 spectrum 의 실험 결과는 이론치와 거의 일치하였다.

예로서 $s(t) = A \cos(2\pi Ft + \phi)$

$n(t) = \text{Gaussian noise}$

인 경우 신호의 상관 함수는

$$G_s(\tau) = \frac{1}{2} A^2 \cos 2\pi F\tau$$

이고, 자승치는

$$E\{s^2(t)s^2(t+\tau)\} = \frac{1}{4} A^4 + \frac{1}{8} A^4 \cos 4\pi F\tau$$

또 Gaussian 분포를 갖는 잡음인 경우

$$E\{n^2(t)n^2(t+\tau)\} = 2G_n^2(\tau) + G_n^2(0)$$

이 된다. 이들의 결과를 (3) 식에代入 하면

$$G(\tau) = \frac{1}{8} A^4 \cos 4\pi F\tau + 2G_n^2(\tau) + 2A^2 G_n(\tau) \cos 2\pi F\tau + \frac{1}{2} (A^2 + \sigma^2)^2 \quad (4)$$

으로 되고 이 식을 Fourier 적분하면

$$G(f) = \frac{1}{16} A^4 [S(f-2F) + S(f+2F)] + 2G_n(f) \times G_n(f) + A^2 [G_n(f-F) + G_n(f+F)] + (\frac{1}{2} A^2 + \sigma^2)^2 S(f) \quad (5)$$

이 된다. 첫째 항은 입력 신호의 제 2 고조파 광을 나타내며 두 번째 항은 잡음의 beat 주파수를, 세 번째 항은 입력 신호와 잡음 주파수의 beat 주파수 성분, 그리고 끝 항은 입력의 평균 자승치와 동일한 직류 성분이 다.

다시 발생 잡음 대역 $n(t)$ 를 좁대역 (narrow band) 로 가정할 경우 (그림 2 참조) 시간 τ 의 함수는 러수 부를 포함하여

$$G_n(\tau) = \frac{\sin a\tau}{\pi\tau} \quad (6)$$

로 표시 된다. 이 식의 상관 함수를 계산하고 Fourier 적분하

여 Spectrum 을 구하면

$$G_m(\omega) = \left(-\frac{1}{a}\omega + 1\right)u(-t)u(t+a) + \left(\frac{1}{a}\omega + 1\right)u(t)u(-t-a) \quad (7)$$

로 된다. 이 결과를 그림으로 표시하면 그림 3과 같다.

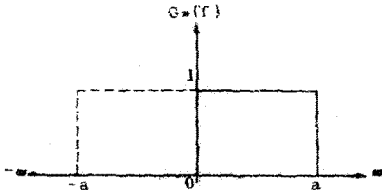


그림 2 가검출 잡음스펙트럼 밀도

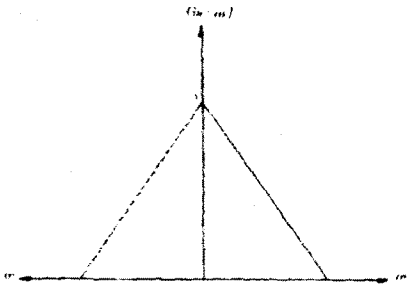


그림 3 $\frac{b \sin \frac{b\omega}{2}}{x^2 + 1}$ 의 Fourier 변환기

그림 3의 결과는 원점에서 직류 성분 ($\omega = 0$)을 표시하고 삼각형 모양의 분포는 잡음과 잡음의 Fourier 성분의 차이 (beat)를 의미한다. $A = 0$ 인 경우 $a/2$ 인 잡음 주파수 성분은 반으로 감소함을 나타내고, 만일 신호 주파수의 대역폭 b 를 잡음 대역폭 a 보다 좁게 선택하면, 여과기를 통과한 출력 응답의 신호 대 잡음 비는 $a/2b$ 만큼 향상된다.

결론적으로 두 개의 APD 동작은, 신호 검출 능력은 두 배로 향상시키며, 발생잡음 대역폭은 그림 3과 같이 적절히 좁은 대역폭을 가지는 Spectrum 을 가지며, 60 MHz 대역의 측정된 결과에 이와 거의 일치하였다. 또 절연 파괴 전압의 bias 상태에서 신호 대 잡음 비의 향상되는 영역은 발생잡음 대역폭의 반 (half) 이상인 주파수 대역에서 확인되었다.

또 이러한 bias 상태에서, 증폭된 신호를 검출할 때 증폭의 신호는 혼합 (heterodyne) 되었다고 이 것은 그림 1의 등가 회로에 표시된 검파 다이오드의 비 직선 특성의 결과로 고찰된다.