

광수신소자 연구 현황 및 전망



윤 일 구
(연세대 전기전자공학과 조교수)



이 봉 응
(연세대 기계전자공학부)

1. 서 론

최근 들어 정보의 양이 급격히 증가하면서 전송속도 및 용량의 증대가 절실히 요구되고 있다. 광통신 시스템의 등장으로 전송 속도의 증대에 관한 광소자 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서 전송속도가 Gbps(Gigabit per second)급 이상이 되면 수신단에서 속도 뿐만 아니라 수신 감도가 매우 중요한 요소로 작용하게 되고 이러한 수신 감도의 향상을 위해 내부 이득을 갖는 APD(Avalanche Photodiode)를 광수신소자로 사용하고자 하는 연구가 진행되어 왔다. APD는 기존의 광섬유증폭기(EDFA)를 사용한 PIN-PD 보다 수신감도 면에서 우수하며 경제적인 면에서도 장점을 갖는다. 본 글에서는 광통신용 광수신소자의 구조, 동작 특성 및 최근 연구동향을 소개하고자 한다.

2. 광수신소자 특성

광 수신기는 광통신 시스템의 성능을 결정하는 중요한 모듈의 하나로 광섬유를 통하여 전송된 광신호로부터 전기신호를 검출하는 기능을 가지고 있다. 즉, 광신호는 광수신소자를 통하여 광전류로 변환되고 증폭기회로를 포함하는 수신회로와 연결되어 원하는 신호를 복원한다. 광통신의 전송용

량을 증가시키기 위해 전송속도를 증가시킬 경우 증폭기의 입력 잡음이 급격히 증가하여 수신감도가 급격히 떨어지게 된다[1]. 이로 인하여 신호 변별력이 떨어져 오차가 발생할 확률이 높아지게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 수신감도의 증가가 필요하고 이를 위해서 광증폭기를 사용하거나 내부이득이 있는 광수신소자를 사용하여야 한다.

광수신기 모듈에서 신호대 잡음비(SNR)는 내부이득 M 을 얻는 과정에서 발생하는 잉여 잡음 계수(Excess Noise Factor: $F(M)$)를 갖는 수신소자의 경우 다음과 같이 주어진다[2].

$$(S/N)_{power} = \frac{\frac{1}{2} \left[\frac{q\eta P_o}{h\nu} \right]^2}{2q(I_p + I_B + I_{DB})F(M)B + \frac{2qI_{DB}B}{M^2} + \frac{4kTB}{R_{eq}M^2}}$$

여기서 P_o 는 입사광 전력(incident optical power), η 는 양자 효율(quantum efficiency), ν 는 입사광 진동수(photon frequency), I_p 는 신호 광전류(signal current), I_B 는 배경복사에 의한 광전류(background radiation current), I_{DB} 는 증폭이 일어나는 암전류(multiplied dark current)이며 B 는 대역폭(bandwidth), $F(M)$ 은 증

폭에 따른 잉여 잡음 계수이다. I_{DB} 는 표면 누설 전류 또는 증폭이 일어나지 않은 암전류이며 R_{eq} 는 부하저항, T는 절대온도이다.

위의 식에서 분자는 신호 전력(signal power)에 해당하고 분모는 각각의 잡음항에 해당한다. 분모의 첫번째 항은 광전류 및 암전류 증폭에 의한 잡음이고 둘째 항은 증폭되지 않은 암전류에 의한 잡음이며 셋째 항은 부하저항에 의한 열잡음에 기인한다. 부하저항을 증가시키면 열잡음을 줄일 수 있으나 이 경우 RC 시정수(time constant)에 의한 대역폭의 문제가 발생하기 때문에 저항 R을 크게 할 수 없다. 만일 내부 이득 M 을 갖는 수신소자를 사용할 경우 이득 M 에 따라 신호대 잡음비를 크게 증가시킬 수 있다. 이러한 이유로 앰블랜치 포토다이오드(Avalanche Photodiode: APD)의 개발에 대한 연구가 진행되어 왔다.

따라서 내부 이득을 갖는 APD는 동일한 조건에서 PIN-PD 보다 큰 신호대 잡음비를 갖게된다. 그러나 식 (1)에서 볼 수 있듯이 신호대 잡음비의 증가를 통한 시스템의 수신감도 향상을 위해서는 이득 M값이 클수록 유리하지만 잉여 잡음 계수 F(M)도 증가하므로 이득 M의 최적화가 요구된다. 다시 말하면 잉여 잡음 계수는 소자를 구성하는 물질, 구조, 및 도핑에 의하여 크게 영향을 받으므로 물질 및 구조 설계를 통하여 내부 이득을 크게 함과 동시에 잉여 잡음 계수를 크게 증가시키지 않는 소자 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 다음 장에서 이러한 광수신소자의 동작원리에 대하여 간단히 살펴보고자 한다.

3. 광수신소자 동작원리

반도체 p-n 접합 내에(그림 1)과 같은 증폭 영역에 큰 전기장이 인가되어 전자(또는 정공)를 충분히 가속시킬 수 있고, 충분한 가속에너지를 얻은 전자나 정공이 가전대의 전자와 충돌하는 것에 의하여 새로운 전자-정공 쌍(Electron-Hole Pair: EHP)을 생성할 수 있다고 가정하고 편의상 전

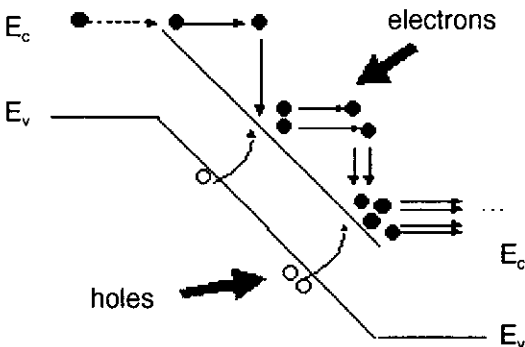


그림 1. Avalanche Process 에 의한 EHP 생성 원리.

자의 주입만을 생각하기로 한다. 이러한 현상을 사태 항복(Avalanche Process)라고 한다.

이 경우 전자는 주입되어 전기장의 반대방향으로 가속된다. 전가장이 충분히 크지 않은 경우에는 전자는 천천히 가속되어 격자 산란에 의하여 에너지를 조금씩 잃어버리므로 가전자대의 전자를 이온화 시키기 어려우나 전기장이 충분히 크면 (10^5 V/cm 이상) 이온화 임계 에너지에 도달하여 가전자대의 전자와 충돌하여 이온화시킬 수 있게 된다. 이렇게 이온화된 전자와 정공을 2차 전자 및 2차 정공으로 부르며 이들은 서로 반대 방향으로 가속화되어 다른 가전자대의 전자와 충돌하여 또 다른 2차 전자 및 정공을 생성한다. 만약 전기장을 계속 증가시키면 캐리어의 생성은 증가하여 결국 무한대의 전류가 흐르게 되는데 이를 사태 항복(avalanche breakdown)이라 부르며 이 때의 전압을 항복 전압(breakdown voltage)이라 부른다.

또한 전자나 정공이 단위 길이를 이동할 경우 이온화 충돌할 평균 횟수를 이온화 계수라 부르며 α , β 로 각각 표기한다. 이온화 계수 α 와 β 는 전기장의 함수로서 같은 전기장에 대해 서로 다른 값을 가지며 물질의 구조에 의하여 영향을 받는다. 예를 들어 InP는 β 가 α 보다 2~3 배 정도 크고[3], Si 인 경우 α 가 β 보다 50배 가량 크다[4]. 여기서 α 와 β 는 잉여 잡음 계수에 직접적인 영향을 미치는 변수로 어느 한쪽이 다른 한쪽보다 클수록 APD 특성에 유리하다. 따라서 이러한 점을 고려할 때 Si 은 APD 재료로서 이상적인 물질이라 할 수 있으나 Si은 광통신에서 사용되는 1.3~1.55 mm의 파장영역에서는 사용할 수 없는 단점을 가지고 있다. 따라서 광통신에 사용할 APD 소자 개발은 InP 와 InGaAs 를 기반으로 연구 개발되고 있다.

광수신소자에 있어서 이득과 더불어 중요한 특성중의 하나는 대역폭이다. 광수신소자의 대역폭을 결정하는 요인은 전이 시간(transit time), 항복 소요 시간(avalanche build-up time), RC 시정수(time constant)와 접합 계면에서 trapping 된 전자나 정공이 나오는데 걸리는 시간이다. 고속 광수신소자의 경우 이득이 작은 경우 RC 시정수가 대역폭에 가장 큰 영향을 미치고 이득이 큰 경우에는 항복 소요 시간이 광수신소자의 대역폭을 결정하는 요인으로 작용하여 이득이 증가함에 따라 대역폭이 감소하게 되어 이득-대역폭 곱이 일정하게 된다. 따라서 광수신소자가 큰 대역폭을 갖기 위해서는 흡수층의 두께를 얇게 하여 전자 및 정공이 흡수층을 지나는데 걸리는 시간을 작게 해야 하고 증폭층의 두께를 얇게 하여 항복 소요 시간을 줄여야 한다. 이를 위해서는 터널링이 일어나지않는 범위에서 증폭층의 두께 및 도핑을 결정해야 한다. 또한 증폭층을 제작하기 위해 p-n 접합을 확산공정에 의하여 제작할 경우 확산 깊이의 미세한 조절이 필요하다[5]. 위에서 살펴본 바와 같이 고속 광수신소자를 개발하

기 위해서는 소자 구조의 최적화 뿐만 아니라 실제 제작 공정에 있어서 중요 단위 공정의 최적화도 동시에 이루어져야 함을 알 수 있다.

4. 광수신소자의 최근 연구동향

본 장에서는 고속 광통신 시스템용 수신기 모듈에 사용할 광수신소자의 최근 연구 동향을 대표적인 사례에 대하여 살펴 보도록 하겠다.

미국의 JDS Uniphase 에서 DWDM(Dense Wavelength Division Multiplexing) 구조에 적합한 2.5 Gbps 급 과 10 Gbps 급에 적용가능한 APD 의 연구 개발을 진행하여 왔다.

Itzler 등은 InGaAs 를 기반으로 한 평판형 Bulk-InP APD 를 개발하였고 그 구조는 아래의 그림 2와 같다(6). 위의 구조는 이중 확산 공정에 의하여 형성되었으며 그로 인하여 확산 분포와 가드링을 결정하였다. 또한 Zinc 확산 깊이를 잘 조절함으로써 에피 성장에서의 작은 변위에 의해 결정된 non-uniformity를 해결할 수 있었다. 이러한 APD 소

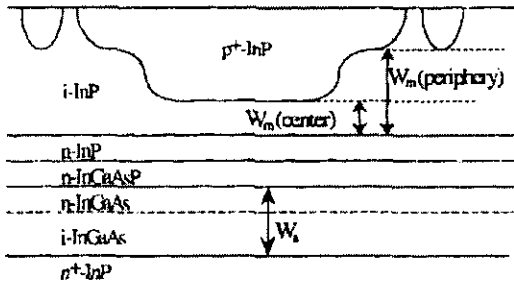


그림 2. Epitaxial 평판형 InGaAs/InP APD 구조도.

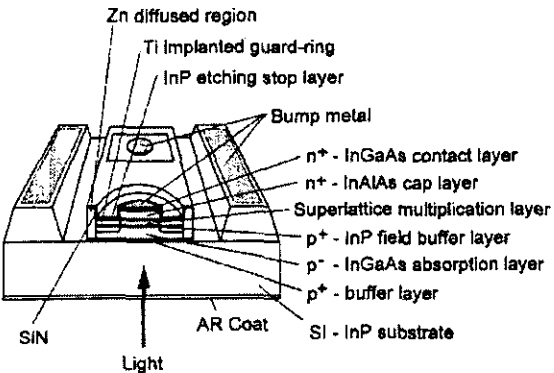


그림 3. NEC 평판형 InAlGaAs/InAlAs APD (with Ti implanted guard ring) 구조도.

자의 항복 전압은 약 55 V 이고 매우 작은 암전류를 갖고 이득에 따른 3-dB 대역폭은 약 30-35 GHz 를 나타내었다.

한편 일본의 NEC 에서는 10 Gbps 광 수신기 모듈에 응용할 고속 평판형 초격자 APD 를 개발하였고 그 구조는 아래의 그림 3과 같다. Watanabe 등은 고감도 광 수신기 모듈을 위한 초격자 APD 를 개발하였다(7). 이 APD 는 신개념의 평판형 InAlGaAs/InAlAs 초격자 APD 에 Ti 의 가드링을 주입함으로써 높은 신뢰성을 나타내었다. 이 소자의 항복전압은 약 25.9 V 이고 이득이 10인 경우의 암전류는 0.36 μ A 를 나타내었다. 또한 이득-대역폭 곱은 110 GHz 를 나타내었고 소자 전체의 캐패시턴스는 0.21 pF 을 나타내었다. 위의 특성으로 살펴볼 때 10 Gbps 수신기 모듈에 사용이 가능함을 알 수 있었다.

5. 결론

지금까지 광통신용 수신기 모듈에 사용될 광수신소자의 구조, 동작특성 및 발전 동향에 대하여 알아보았다. 광수신소자의 제작기술은 그동안 눈부시게 성장한 에피 성장기술과 III-V 화합물반도체 광소자 제작기술의 발전에 크게 힘입어 급속히 발전하였다.

앞에서 이야기한 바와 같이 광수신소자의 현재 연구 방향은 기존의 평판형 InGaAs/InP APD와 InAlGaAs/InGaAs 초격자 APD의 구조를 최적화하는 방향과 차세대 수신기 모듈을 겨냥한 Traveling-wave 광수신소자를 개발하는 방향으로 진행되고 있다. 현재 국내 광통신기술은 2.5 Gbps 광수신소자의 양산을 목전에 두고 있으며 10 Gbps 급 광수신소자를 개발하여 현재 상용화 가능성을 검증하고 있다. 또한 2003년까지 40 Gbps 급 광 검출기 개발을 목표로 하고 있다.

APD의 제작기술이 더욱 발전하여 광통신 시스템에서 요구되는 성능을 만족할 경우 수신단 구성의 간편성과 경제성을 고려할 경우 광섬유증폭기를 사용한 PIN-PD를 APD 가 대체할 가능성을 배제할 수 없다. 따라서 APD에 대한 연구 개발 및 상용화는 국가 경쟁력 차원에서 볼 때 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] W. T. Tsang (editor), Semiconductor and Semimetals, vol. 22-D, Academic Press: New York, 1985.
- [2] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices (2nd ed.), John Wiley & Sons, 1981.
- [3] L. W. Cook, G. E. Bulman, and G. E. Still-

man, Appl. Phys. Lett., vol. 40, 1982.

- [4] C. A. Lee, R. A. Logan, R. L. Bat-dorf, J. J. Kleimack, and W. Wieg-mann, Phys. Rev., vol.134, no. 3A, 1964.
- [5] S. R. Forrest, R. G. Smith and O. K. Kim, IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-18, 1982.
- [6] M. A. Itzler, C. S. Wang, S. McCoy, N. Codd, and N. Komaba, ECOC'98, 1998.
- [7] I. Watanabe, T. Nakata, M. Tsuji, K. Makita, T. Torikai, and K. Taguchi, J. Lightwave Tech., vol.18, no.12, 2000.

저 자 약 령

성명 : 윤 일 구

❖학력

1990년 연세대 전기공학과 (학사)
1995년 6월 미국 조지아 공대 (석사)
1997년 12월 미국 조지아 공대 (공학박사)

❖경력

1998년-1999년 미국 Microelectronics Research Center (Atlanta, GA) Research Fellow
1999년-2000년 한국 전자통신연구원 원천기술연구본부 광송수신소자팀 선임 연구원
2000년-현재 연세대 전기전자공학과 조교수

성명 : 이 봉 용

❖약력

현재 연세대 기계전자공학부 재학중.
현재 한국전기전자재료학회 회원