

수광영역의 식각을 통한 단일확산 공정의 고속 평판형 InP/InGaAs 10Gb/s 광 검출기의 신뢰성

High-Speed, High-Reliability Planar-Structure InP/InGaAs Avalanche Photodiodes for 10Gb/s Optical Receivers with Recess Etching

정지훈, 권용환*, 현경숙**, 윤일규.

(Jihoun Jung, Yong Hwan Kwon*, Kyung Sook Hyun**, Ilgu Yun)

Abstract

This paper presents the reliability of planar InP/InGaAs avalanche photodiodes (APD's) with recess etching, which is very crucial for the commercial 10-Gb/s optical receiver application. A versatile design for the planar InP/InGaAs APD's and bias-temperature tests to evaluate long-term reliability at temperature from 200 to 250°C. The reliability is examined by accelerated life tests by monitoring dark current and breakdown voltage. The lifetime of the APD's is estimated by a degradation activation energy. Based on the test results, it is concluded that the planar InP/InGaAs APD's with recess etching shows the sufficient reliability for practical 10-Gb/s optical receivers.

Key Words : avalanche photodiode; optical communication; reliability testing

1. 서론

최근에 정보의 양이 급격히 증가되고 전송속도 및 용량의 증대가 절실히 요구되면서 광통신 시스템에 평판형 InP/InGaAs APD(avalanche photodiode)가 광범위하게 10Gbps 광수신 소자로 개발되어 지고 있다[1]. 평판형 APD는 일반적으로 메사구조 APD 보다 높은 신뢰성을 가진다[2][3]. 그러나 평판형 APD는 접합곡률 계면에서 높은 전계가 걸리므로 접합곡률 계면의 항복전압을 억제하여야 한다. 이런 현상은 광범위하게 광통신 수신소자로 응용 가능한

APD의 신뢰성에 상당한 영향을 주는 요소 중의 하나이다.

따라서 경계항복 문제를 최소화하기 위하여 수광영역의 식각을 통한 단일확산공정을 시도하여 InP/InGaAs APD로 개발되어진 광수신소자의 구조 및 공정이 상용화 가능척도를 알아보기 위하여 신뢰성실험을 수행하였고 암전류와 항복전압이 소자의 수명에 미치는 영향을 보기 위하여 측정을 하였다. 또한 이 측정값으로 활성화에너지의 변화량을 구하여 소자의 평균수명을 예측하였다. 평판형 InP/InGaAs APD가 고감도 10-Gb/s 광수신소자로 상용화 가능함을 실험 결과로 보여줄 것이다.

연세대학교 전기전자공학과
(서울시 서대문구 신촌동 134,
Fax: 02-362-6444
E-mail : stop_h@yonsei.ac.kr)
* : 한국 전자통신연구원
**: 세종대학교 광공학과

2. 평판형 InP/InGaAs APD 의 구조

InP/InGaAs APD의 수광영역의 식각을 그림1에서

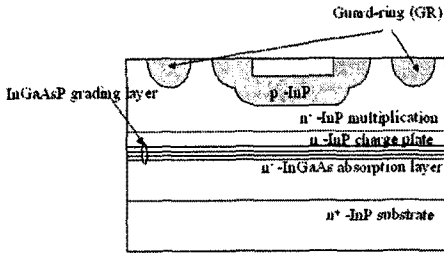


그림 1. APD 소자의 대략적인 구조.
Fig. 1. Schematic of APD device structure.

2차원으로 나타내었다. 에피 성장 구조는 MOCVD

(metal organic chemical vapor deposition) 시스템을 이용하여 제작되었으며 소자는 SAGCM(separation absorption, grading, charge, and multiplication) 구조를 사용하였다. 확산공정을 이용한 P층 성장은 SAGCM구조의 APD에서 특성을 결정짓는 가장 중요한 공정중의 하나로 세심한 주의가 필요하다. 특히 흡수 층의 두께를 0.8 μm 로 하여 전송시간을 줄였고 증폭층 영역에서 대부분의 전계가 일어나게 하기 위하여 charge plate의 밀도를 $3.5 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ 로 하였다. 추가적으로, 0.05 μm 의 두께로 3개의 InGaAsP grading 층을 삽입하였고 P형의 금속접합을 위하여 Ti/Pt/Au 합금을 사용하였다.

APD를 제작할 때 이상적인 p-n을 생성하기 위하여 완전히 밀봉된 유리관을 사용하여 확산공정을 하였다. 수광영역 중심의 표면을 수천 A식각을 하여 Zn 확산공정을 증폭층의 두께를 조절하였다. 수광영역 주변에는 보호링을 이용하여 접합곡률에서 생기는 전계를 억제하도록 설계하였다. 증폭층의 두께와 항복전압의 관계는 이미 증명되었다[4]. 증폭층의 두께가 작을수록 어벤틀치가 일어나는 시간을 줄일 수가 있기 때문에 높은 이득을 제공할 수가 있다.

3. 신뢰성 실험

평판형 InP/InGaAs APD의 수명을 예측하기 위한 방법으로 여러 개의 소자를 역방향 전류로(10 μA) 일정하게 인가하여 두개의 서로 다른 온도에서(200 and 250 $^{\circ}\text{C}$) 실험을 하였다. 소자에 가해진 전류 스트레스와 측정은 Keithley 236 소스를 이용하였다. 활성화 에너지를 통하여 소자의 고장을 분석할 수 있기 때문에 평균수명을 예측할 수 있고 Arrhenius

법칙으로 설명될 수 있다. 온도에 의존적인 소자 고장율(R)은 다음의 Arrhenius 법칙을 따른다[5]:

$$R = R_0 * \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (1)$$

R_0 는 온도에 독립적인 pre-exponential 고장 가속요소, E_a 는 활성화에너지, T 는 절대온도이고 k 는 Boltzmanns 상수이다. 실험을 수행하는 동안에 암전류와 항복전압은 고온에서 스트레스를 가한 후 상온에서 측정하였다(300 $^{\circ}\text{K}$). 소자의 항복전압은 상온에서 27-31V로 측정되었다. 소자가 고장난 시간은 상온에서 항복전압의 90% 일 때 암전류가 1 μA 를 넘어서는 순간이다.

3. 신뢰성 실험 결과 및 고찰

역방향 바이어스를 인가했을 때 암전류와 광전류의 특성을 그림2에 나타내었다.

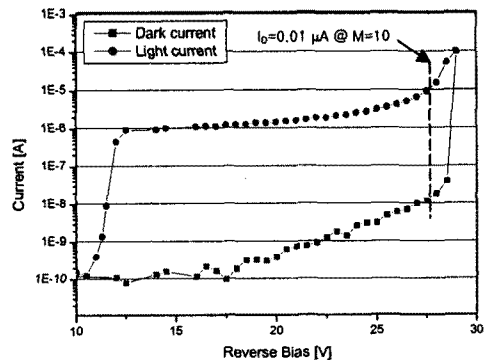


그림 2. 암전류와 광전류의 역방향 바이어스 특성
Fig. 2. Typical dark current and photo current as a function of reverse bias.

광전류 측정에서 입력 광 파장은 1.55- μm 이었다. 암전류 0.01 μA 일 때 이득은 10 얻을 수 있고 편치 쓰루 전압이 일어난 이후에 커패시턴스값은 0.13 pF로 나타나므로 10-Gb/s 광 검출기를 광 통신 시스템의 모듈에 응용하기 충분한 특성을 보인다.

ALT(Accelerated Life Testing) 수행하였을 때 나타나는 각각의 변수로 작용된 온도와 바이어스가 소자에 미치는 영향을 알아보기 위하여 우선 상온, 100 $^{\circ}\text{C}$,

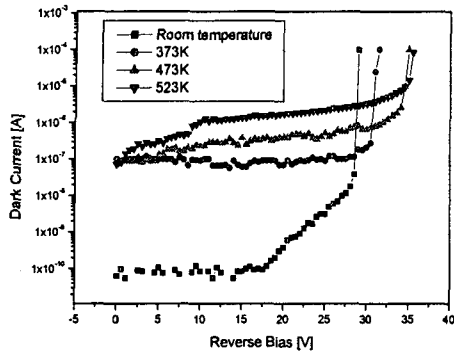


그림 3. 온도에 의존적인 암전류 특성
 Fig. 3. Temperature dependent of the dark current characteristics

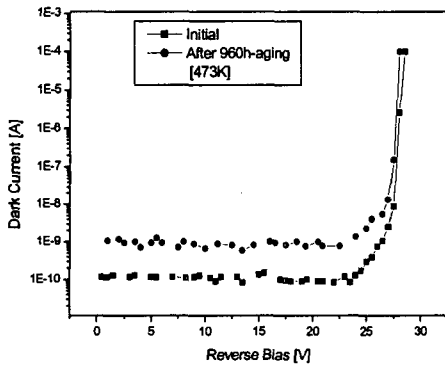


그림 4. 200oC에서 에이징 실험을 한 후에 암전류 변화
 Fig. 4. Dark current variations after aging test at 200oC

200°C 그리고 250°C에서 측정을 하였다(그림 3). 그림 3 과 같이 온도의 증가에 따라 항복전압의 상승이 완만해 짐을 볼 수 있는데 온도가 상승하면 이온화 에너지가 증가하기 때문이다. 이는 온도가 증가함에 따라 포논의 에너지가 증가하게 되어 캐리어가 포논과의 충돌로 인해 에너지를 잃을 확률이 커지게 되고 따라서 캐리어가 이온화 에너지에 도달할 만큼의 전기장에 의한 가속에너지를 얻을 확률이 감소하게 됨을 뜻한다. 따라서 항복전압에 도달하려면 온

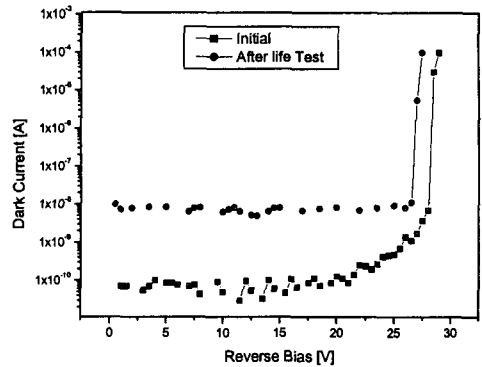


그림 5. 200oC에서 소자의 수명실험을 한 이후에 암전류 변화
 Fig. 5. Dark current variations after life test at 200oC

도의 증가에 따라 더 큰 전기장을 가하여 포논과의 충돌로 잃는 에너지만큼을 보충해 주어야 한다. 그림4와 같이 온도를 높일 경우 이미 온도가 상대적으로 낮은 영역에서 보다 큰 전기장이 가해진 상태이므로 온도가 낮은 영역보다는 포논의 역할이 감소하게 되는 것이다. 그렇다면 온도변수가 소자에 미치는 영향을 알아보기 위해서 그림 4와 같이 온도 stress 만을 가하는 High temperature storage test 를 약 960시간 수행하여 전류-전압 특성을 측정하였다.

그리고 또 하나의 변수로 작용한 Bias stress의 영향을 알아보기 위하여 temperature and Bias stress 를 동시에 가하는 Accelerated Life testing을 수행하였다. 그 결과로 그림 5를 얻을 수 있었다. 즉, 소자에 미치는 영향이 온도만을 stress로 가하였을 때에는 아주 미미하지만 Bias를 동시에 가하였을 때에는 뚜렷한 변화를 볼 수가 있다. 따라서 Accelerated Life Test data 분석을 통하여 소자의 특성을 분석하며 신뢰성을 알아보았다[6].

Accelerated Life Test(ALT)를 수행하면서 나타난 문제점을 살펴보면 다음과 같다. Dark current 는 avalanche 증폭을 생각하지 않을 때 공핍층(증폭층+흡수층) 내부의 열 적 생성-재결합에 의한 전류(R-G)와 표면 누설전류, p 및 n층의 neutral 영역에서의 소수캐리어의 공핍층으로 확산에 의한 확산 전류가 있으며 전기장이 높을 경우 발생하는 터널링에 의한 전류가 있다. 증폭층 내부에서 생성되는 생성-재결합(R-G) 전류는 증폭층의 밴드갭이 크고 부피

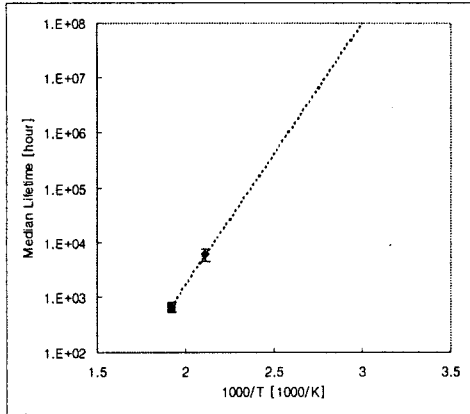


그림6. Arrhenius plot을 이용하여 APD 온도와의 상호작용을 통한 평균수명을 계산

Fig. 6. Arrhenius plot of median APD lifetime as a function of reciprocal aging temperature.

가 작기 때문에 무시할 만큼 작다. 그리고 표면 누설전류는 증폭이 되지 않으며 일정한 양으로 암전류에 기여하나 여기서는 무시할 만큼 작다. 따라서 InGaAs APD의 초기 누설 전류는 밴드갭이 작은 InGaAs 흡수층에서 발생하는 생성-재결합 전류가 대부분이다.

신뢰성 실험결과를 바탕으로 Arrhenius plot을 이용하여 평균수명을 계산한 것을 그림 6에 나타내었다. Plot으로부터 온도에 의한 활성화에너지는 0.95 eV 계산하였다. 활성화 에너지의 변화량으로 APD 평균수명을 상온에서 유용한 사용자 조건인 3.9×10^9 시간을 계산할 수 있었고 표준편차는 651 시간이었다.

4. 결론

이 논문의 관점은 경제항목 문제를 최소화하기 위하여 수광영역의 식각을 통한 단일확산공침을 시도한 평판형 InP/InGaAs APD를 오랜 시간을 두고 신뢰성을 평가하였다. 실험한 결과 활성화에너지의 표준편차를 소자의 수명 메커니즘으로 하여 평균수명을 계산하였고 실용적인 사용자 조건을 만족하는 평균수명인 10^9 시간을 상위 하는 값을 얻었다. 결과적으로 이러한 구조로 제작되어진 평판형 InP/InGaAs APD가 고감도 10-Gb/s 광 수신소자로서 신뢰성이

충분하여 상용화 가능성을 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 한국전자통신연구원의 위탁과제로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Mark A.Ltzler, c.s. Wang., Suzanne McCoy1., Nick Codd, N. Komaba, "Planar Bulk-InP Avalanche Photodiode Design for 2.5 and 10 Gb/s Applications.", Proc. ECOC'98, 1998, 20-24.
- [2] I. Watanabe, T. Nakata, M. Tsuji, K. Makita, T. Torikai, K. Taguchi, "High-speed, high-reliability planar-structure superlattice avalanche photodiodes for 10-Gb/s optical receivers.", J. Lightwave Tech 2000,18(12). 2200-2207.
- [3] I. Watanabe, T. Nakata, M. Tsuji, K. Makita, T. Torikai, and K. Taguchi, "High-speed, high-reliability planar-structure superlattice avalanche photodiodes for 10-Gb/s optical receivers", J. Lightwave Tech., vol. 18, no. 12, pp.2200-2207, Dec. 2000.
- [4] K. S. Hyun, C. Y. Park, "Breakdown characteristics in InP/InGaAs avalanche photodiode with p-i-n multiplication layer structure", J. Appl. Phys., vol. 81, pp. 974-984, 1997.
- [5] W. Joyce, K. Liou, F. Nash, P. Bossard, and R. Hartman, "Methodology of accelerated aging", AT&T Tech. J., vol. 64, no. 3, Mar. 1985.
- [6] H. Sudo, and M. Suzuki, "Surface degradation mechanism of InP/InGaAs APDs", J. Lightwave. Tech., vol. 6, no. 10, pp.1496-1501, Oct. 1988.