

40-Gbps급 InGaAs 도파로형 포토다이오드의 신뢰성 실험

주한성, 고영돈, 윤일구
연세대학교 전기전자공학과

Reliability testing of InGaAs Waveguide Photodiodes for 40-Gbps Optical Receiver Applications

Han Sung Joo, Young-Don Ko and Ilgu Yun
Department of Electrical and Electronic Engineering Yonsei University

Abstract

The reliability of 1.55 μm -wavelength InGaAs mesa waveguide photodiodes (WGPDs), which developed for 40-Gbps optical receiver applications, fabricated by metal organic chemical vapor deposition is investigated. Reliability is examined by both high-temperature storage tests and the accelerated life tests by monitoring dark current and breakdown voltage. The median device lifetime and the activation energy of the degradation mechanism are computed for WGPD test structures. From the accelerated life test results, the activation energy of the degradation mechanism and median lifetime of these devices in room temperature are extracted from the log-normal failure model by using average lifetime and the standard deviation of that lifetime in each test temperature. It is found that the WGPD structure yields devices with the median lifetime of much longer than 10^6 h at practical use conditions. Consequently, this WGPD structure has sufficient characteristics for practical 40-Gbps optical receiver modules.

Key Words : Reliability, Waveguide Photodiode, Optical Receiver

1. 서론

최근 정보 용량의 급격한 증가로 인해 광통신 시스템에서 고속 데이터 전송이 요구되면서, p-i-n 포토다이오드나 APD(avalanche photodiode)와 같은 여러 가지 애플리케이션(application)들이 개발되었다. 그러나 이러한 소자들은 진성 영역의 존재로 인해 저항-캐패시턴스 시간(RC time)과 캐리어 천이 시간(carrier transit time)이 제한되어서 제한된 대역폭을 가지는 구조적 단점을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 양자 효율(quantum efficiency)이 단지 도파로의 길이에 영향을 받기 때문에 대역폭에 제한을 받지 않는 도

파로(waveguide)형 포토다이오드가 폭넓게 연구되고 있다[1][2].

본 연구에서는 40-Gbps급으로 개발되어진 InGaAs 도파로형 포토다이오드의 구조 및 공정에 대한 상용화 가능척도를 알아보기 위하여 신뢰성 실험을 수행하였다. 신뢰성 실험을 위해 암전류와 항복전압이 소자의 수명에 미치는 영향을 측정하였고, 이 측정값을 통해서 활성화에너지를 구하여 소자의 평균수명을 예측하였고, 결과적으로 이 40-Gbps급 InGaAs 도파로형 포토다이오드는 충분한 신뢰성을 가지고 상용화 가능성을 보여 줄 것이다.

2. 도파로형 포토다이오드의 구조

InGaAs 도파로형 포토다이오드를 위에서 내려다 본 모습을 그림 1에 나타내었다. 초기 에피구조는 MOCVD(metal organic chemical vapor deposition) 시스템을 이용하여 성장되었다. 리지 형태(ridged-type)의 흡수층이 패턴 전의 방법으로 정의되었으며, 끝이 뾰족한 형태(tapered-type)의 결합 도파로 영역이 형성되었다. 이 부분은 인입광의 모드를 변화시키는 역할 뿐만 아니라 n-type 컨택(contact)층의 역할도 한다. 광섬유를 결합시키기 위한 광섬유 가이드 부분(fiber guide section)이 만들어졌다. 이 부분은 600 nm 두께의 InP 층과 50 nm 두께의 InGaAsP ($\lambda_g = 1.24 \mu\text{m}$)로 이루어져 있다. 마지막으로 폴리이미드와 질화규소(Si_3N_4)가 소자의 표면을 보호하기 위하여 패시베이션(passivation) 되었다. p형과 n형 전극으로는 Ti/Pt/Au 합금과 Cr/Au 합금이 각각 사용되었다. 전극 형성 공정 이후 365 °C에서 1시간동안 회복공정을 수행하였다.

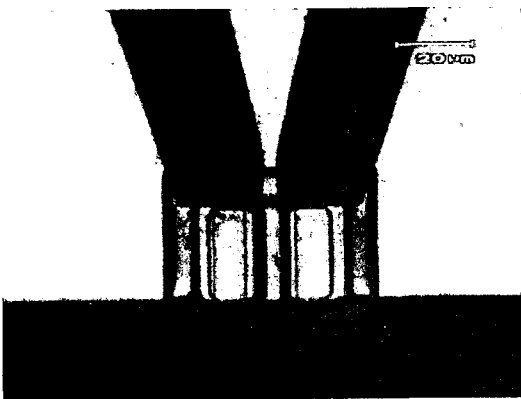


그림 1. InGaAs 도파로형 포토다이오드의 모습

3. 실험

InGaAs 도파로형 포토다이오드에 대하여 온도 스트레스만을 가하는 HTST(high temperature storage test)를 수행하였다. HTST후에 150 °C와 200 °C의 온도에서 일정한 역전압(10 V) 스트레스를 가하는 가속 수명 실험(accelerated life test)을 수행하였다. 실험 중 소자에 가해진 전압 스트레스 및 소자의 측정은 Keithley SMU 235 소스를 사용

하였다. 활성화 에너지를 통하여 소자의 고장을 분석할 수 있기 때문에 평균수명을 예측할 수 있고, Arrhenius 법칙으로 설명될 수 있다. 온도에 의존적인 소자 고장률(R)은 다음의 Arrhenius 법칙을 따른다[3]:

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

R_0 는 온도에 독립적인 pre-exponential 고장 가속 요소, E_a 는 활성화에너지, T 는 절대온도이고 k 는 Boltzmanns 상수이다. 실험을 수행하는 동안에 암전류와 항복전압은 고온에서 스트레스를 가한 후 상온(300 °K)에서 측정하였다. 소자의 고장은 상온에서 -3 V에서의 암전류가 1 μA 를 넘어서는 순간이다.

4. 실험 결과 및 고찰

도파로형 포토다이오드에 대한 신뢰성 실험을 하기에 앞서, 온도가 소자에 미치는 영향을 알아보기 위하여 우선 온도에 따른 암전류의 변화를 측정하였다(그림 2). 그림 2와 같이 온도의 증가에 따른 암전류의 증가를 통해, 온도에 의한 스트레스가 소자의 수명에 대해 중요한 영향을 미칠 수 있음을 알 수가 있다. 특히, 150 °C와 200 °C의 경우, -3 V 바이어스 전압에서의 암전류가 이미 고장 기준으로 정의한 1 μA 를 훨씬 넘어서기 때문에, 심한 스트레스로서 소자의 수명에 영향을 줄 수가 있다.

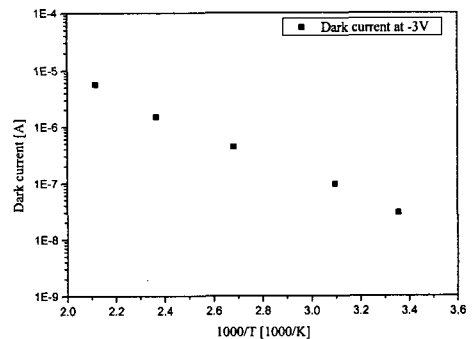


그림 2. 온도에 의존적인 암전류 특성

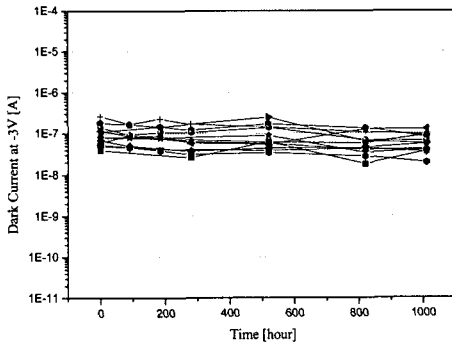
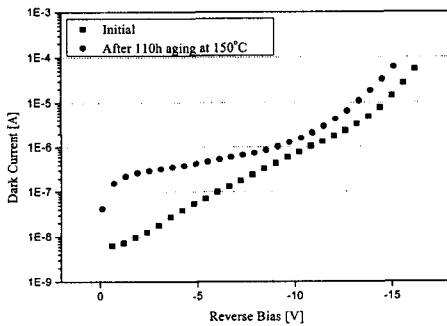
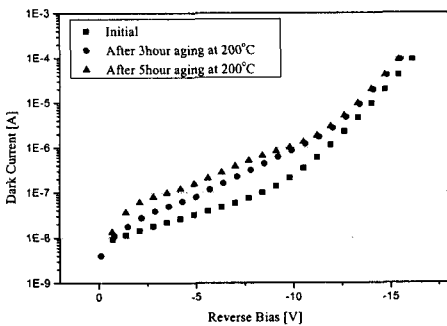


그림 3. 200°C의 온도 스트레스 실험 수행중 상온에서의 암전류의 변화



(a)



(b)

그림 4. 소자의 가속 수명 실험을 한 이후 상온에서의 암전류의 변화 : (a) 150 °C 와 (b) 200 °C

따라서, 우선 온도 스트레스만을 가하는 HTST를 수행하였다. 그림 3은 200 °C에서 1000시간동안 HTST를 수행한 결과를 보여주고 있다. 그림 2와 3에서 볼 수 있듯이, 심한 온도 스트레스를 가한 상태임에도 불구하고, 실험이 진행되는 동안 상온에서의 암전류가 거의 일정하게 유지되는 소자의 안정적인 특성을 보임을 알 수가 있다.

온도 스트레스에 대해 소자가 안정적인 특성을 보임에 따라 소자의 고장 분석 및 수명 예측을 위해 온도뿐만 아니라 바이어스 전압을 가하는 가속 실험이 수행 되었다. 그림 4는 가속 실험의 결과를 나타낸 것으로, 각 온도에 대해서 암전류의 증가가 뚜렷하게 관찰되는 것을 볼 수가 있다. 디텍터로서 동작하는 도파로형 포토다이오드의 경우, 이런 암전류의 증가 현상은 소자자체의 성능저하로 볼 수 있다. 따라서 가속 수명 실험에서 얻은 결과를 분석함으로써 소자의 특성을 분석하여 이를 바탕으로 소자의 신뢰성을 알아보았다.

비슷한 메사 구조를 갖는 포토다이오드에 대한 많은 신뢰성 연구들에서 소자의 암전류 증가에 대해서 주로 p-n 접합에서 노출된 영역에서 표면으로의 캐리어 축적에 의한 누설전류나 패시베이션 층에 있는 나트륨이온과 같은 불순물(contaminant)이 노출된 p-n 접합에 인가된 전계에 의해 재배열되면서 생긴 누설전류를 원인으로 보고한 바가 있다[1][4]. 따라서 메사형 구조를 갖는 도파로형 포토다이오드의 경우에서도 마찬가지로 가속 수명 실험에서 관찰된 암전류의 증가 원인으로 노출된 p-n 접합부분에서 생성된 표면 누설전류로 생각할 수가 있다.

신뢰성 실험 결과를 바탕으로 Arrhenius plot을 이용하여 평균수명을 계산한 것을 그림 5에 나타내었다. 그림으로부터 온도에 의한 활성화에너지는 0.84eV로 계산되었다. 활성화에너지를 바탕으로 도파로형 포토다이오드의 평균수명을 상온에서 유용한 사용자 조건에서 7.9×10^6 시간을 계산할 수 있었고 표준편차는 0.39 (log-normal 분포)이었다.

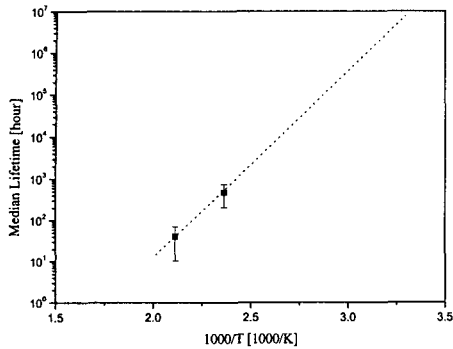


그림 5. 도파로형 포토다이오드의 온도와 의 관계를 통한 평균수명을 계산하기 위한 Arrhenius plot

5. 결론

이 논문은 40-Gbps급 광 수신소자로서 개발되어진 메시구조의 InGaAs 도파로형 포토다이오드에 대한 신뢰성 실험을 진행하였다. 실험한 결과 활성화에너지의 표준편차를 소자의 수명 메커니즘으로 하여 평균수명을 계산하였고 실용적인 사용자 조건을 만족하는 평균수명인 10⁶ 시간을 상회 하는 값을 얻었다. 결과적으로 이러한 구조로 제작되어진 메시형 InGaAs 광도파로형 포토다이오드가 고감도 40-Gbps급 광 수신소자로서 신뢰성이 충분하여 상용화 가능성을 제시하였다.

참고 문헌

- [1] H. Nakamura, M. Shishikura, S. Tanaka, Y. Matsuoka, T. Ono, and S. Tsuji, "Highly reliable operation of InGaAlAs waveguide photodiodes for optical access network systems", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 37, Part 1, No. 3B, pp. 1427-1431, March 1998.
- [2] T. Takeuchi, T. Nakata, M. Tachigori, K. Makita and K. Taguchi, "Design and Fabrication of a Waveguide Photodiode for 1.55-um-Band Access Receivers", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 38(1999) pp. 1211-1214, February 1999.
- [3] W. Joyce, K. Liou, F. Nash, P. Bossard, and R. Hartman, "Methodology of accelerated aging", AT&T Tech. J., Vol. 64, No. 3, March 1985.
- [4] I. Yun, H. M. Menkara, Y. Wang, I. H. Oguzman, J. Kolnik, K. F. Brennan, G. S. May, C. J. Summers and B. K. Wagner, "Effect of Doping on the Reliability of GaAs Multiple Quantum Well Avalanche Photodiodes", IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 44, No. 4, pp. 535-544, April 1997.