

레이저 검출용 고감도 실리콘 포토다이오드 제조 및 특성 분석에 관한 연구

이준명* · 강은영* · 박건준* · 김용갑**

A Study on the Characteristics Analysis and Design of High Sensitivity
Silicon Photodiode for Laser Detector

Jun-Myung Lee* · Eun-Young Kang* · Keon-Jun Park* · Yong-Kab Kim**

요약

본 논문에서 850nm~1000nm 파장대역에서 레이저를 검출하기 위한 고감도 실리콘 포토다이오드를 제조하고 전기적 및 광학적 특성을 분석하였다. 소자의 크기는 $5000\mu\text{m} \times 2000\mu\text{m}$ 이며 두께는 $280\mu\text{m}$ 로 제조하여 TO-5 형태로 패키징 하였다. 전기적 특성으로 암전류는 5V 역 전압 일 때 0.1nA의 값을 나타내었으며 정전용량은 0V일 때 1kHz 주파수 대역에서 32.5pF와 200kHz 주파수 대역에서 32.4pF로 적은 정전용량의 값을 나타내었다. 또한 출력신호의 상승시간은 10V의 전압일 때 20.92ns로 고속 응답특성을 확인하였다. 광학적 특성으로는 890nm에서 최대 0.57A/W의 분광감응도를 나타내었고 1000nm에서는 0.37A/W로 감소한 분광감응도를 나타내고 있지만 870nm~920nm 파장대역에서는 비교적 우수한 분광감응도를 나타내었다.

ABSTRACT

In order to improve spectrum sensitivity of photodiode for detection of the laser wavelength at 850 nm ~ 1000 nm of near-infrared band, this study has produced silicon-based photodiode whose area is $5,000\mu\text{m} \times 2,000\mu\text{m}$, and the thickness is $280\mu\text{m}$. It was packed by the TO-5 type. The electrical properties of the dark currents have valued of approximately 0.1 nA for 5 V reverse bias, while the capacitance showed 32.5 pF at frequency range of 1 kHz and about 32.4 pF at the range of 200 kHz for 0 V. In addition, the rising time of output signal was as fast response as 20.92 ns for 10V. For the optical properties, the best spectrum sensitivity was 0.57 A/W for 890 nm, while it was relatively excellent value of 0.37 A/W for 1,000 nm. Over all, there were good spectrum sensitivity for this diode over the range of 870 ~ 920 nm.

키워드

Photodiode, Photodetector, Silicon(Si), Spectral Responsivity
포토 다이오드, 광검출기, 실리콘, 분광 감응도

1. 서론

포토다이오드(Photodiode)는 광 통신, 컴퓨터, 군사

및 전자 시스템 등을 위한 적외선 센서등으로 널리 사용되고 있다. PIN 포토다이오드는 동작 파장대역과 높은 응답 속도, 낮은 노이즈를 갖기 때문에 광 애플

* 원광대학교 정보통신공학과(junmyung87@nate.com)

** 교신저자(corresponding author) 원광대학교 정보통신공학과(ykim@wonkwang.ac.kr)

접수일자 : 2014. 03. 10

심사(수정)일자 : 2014. 04. 21

게재확정일자 : 2014. 05. 15

리케이션에 가장 많이 사용되는 검출기이다[1]. 이는 공핍영역(진성층)에서 양자효율 및 과도응답, 주파수 응답을 최적화하기에 적절하기 때문이다[2].

대표적인 반도체 소재는 단결정 실리콘(Si), 게르마늄(Ge)뿐 아니라 갈륨비소(GaAs), 탄화실리콘(SiC) 등의 혼합물과 유기물이 사용된다. 특히 재료적인 측면을 고려할 때, 저비용 대량생산측면에서 유기물재료에 대한 관심이 집중되고 있는 시점이지만 전기적 특성을 고려하면 혼합물에 비하여 전기적특성이 저하되는 단점이 있다[3]. 파장대역 800nm~900nm에서는 반도체의 특성상 실리콘이 가장 좋으므로 실리콘 PIN 포토다이오드가 많이 이용된다. 실리콘 소재로 사용하는 반도체 소자는 기관과 실리콘 산화막과의 계면에 대한 특성 규명 등을 비롯한 실리콘 공정기술 및 소자와 이에 사용되는 화학증착기법(CVD) 기술이 발전되고 있으며, 다양한 용도의 검출기들이 실리콘 기관 성장기술의 발전과 보다 저렴한 비용으로 제작되고 있다. 실리콘은 가시광이나 자외선에 대해 광흡수계수가 크기 때문에 얇은 웨이퍼로도 충분한 검출이 가능하지만, 근적외선에 대해서는 흡수계수가 작아지고 투과하는 비율이 증가하여 검출감도가 저하된다. 따라서 두꺼운 실리콘 웨이퍼를 이용하여 활성층을 두껍게 하는 방법을 적용하고 있으나 높은 인가전압과 암전류가 커지며 응답속도가 떨어지는 단점이 있다[4].

광검출기인 포토다이오드는 빛의 신호를 전기신호로 변환하는 소자로서 입사 광량에 의해 출력되는 전류를 의미하는 분광감응도(Spectral Responsivity, A/W)는 중요한 요소이다. 분광감응도는 검출기의 입력량에 대한 신호 출력량의 비율을 의미한다. 빛의 복사출력(W)을 측정하는 검출기라면 감응도의 단위는 reading/W가 되고 검출기의 reading이 전류 단위인 광다이오드라면 A/W가 된다[5-7]. 따라서 적외선 파장대역에서 분광감응도를 향상시키기 위해 국내에서는 ETRI와 일부 정부 출연기관에서 연구개발을 수행하는 단계로 아직 완성도면에는 국외 기술력과 비교하여 많이 뒤쳐진 상태이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 국내뿐만 아닌 국외 연구기관 및 대학에서도 분광감응도 등 성능 향상을 위한 연구가 진행되고 있다[8].

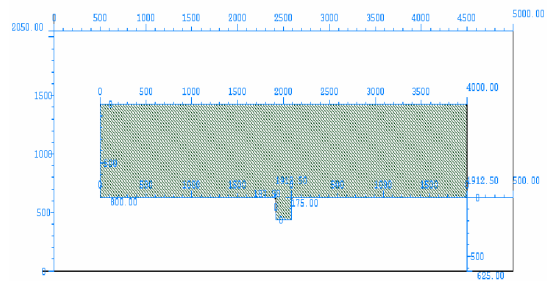
본 논문에서는 근적외선 파장대역에서 분광감응도를 향상시키고자 실리콘 PIN포토다이오드를 제조하여

전기적 특성인 암전류, 정전용량, 상승시간을 전압의 변화에 따라 측정하였고 광학적 특성인 분광감응도는 850nm~1000nm 파장대역에서 측정하여 특성을 분석하였다. 이를 통해 향후 항공, 의료, 방산 등의 분야에서 레이저 검출용으로 응용될 수 있다.

II. 실리콘 PIN 포토다이오드 제작

2.1. 실리콘 다이오드 소자 제조 및 제작

그림 1은 실리콘 PIN 다이오드 소자 공정 순서와 공정에 사용된 마스크이다. 제작된 PIN 다이오드 소자는 TO-5 패키지의 크기에 맞춰 제작되었으며 공정 순서는 비저항 2600 Ωcm 인 5" n-type(100) Si 웨이퍼를 기관으로 사용하여 n-층을 형성시켰다. 실리콘 기관에 800°C 이상에서 산소를 실리콘 기관 표면과 화학반응을 시켜, n+ 영역과 p+ 영역의 절연을 위해 실리콘 산화막을 형성하였다. 활성층에 이온주입 시 표면 손상을 감소시키기 위하여 얇은 산화막을 증착한 후 다이오드의 양극이 형성될 활성층과 누설전류를 방지하기 위한 가드링 영역에 붕소이온을 주입하여 그림 (a) Mask1을 이용해 p+ 층을 형성하고 고온에서 열처리를 진행하였다. p+ 층의 산화막을 식각처리하고 그림 (b) Mask2를 이용하여 n+ 층을 형성하였다. 이에 사용된 Mask1과 Mask2는 각각 4000Å, 4400Å의 두께로 증착하였고 그림 (c) Mask3를 이용하여 155 μm × 155 μm 인 Contact hole을 형성하고 그림 (d) Mask4를 이용하여 Al을 증착하였다.



(a) p+ Mask1

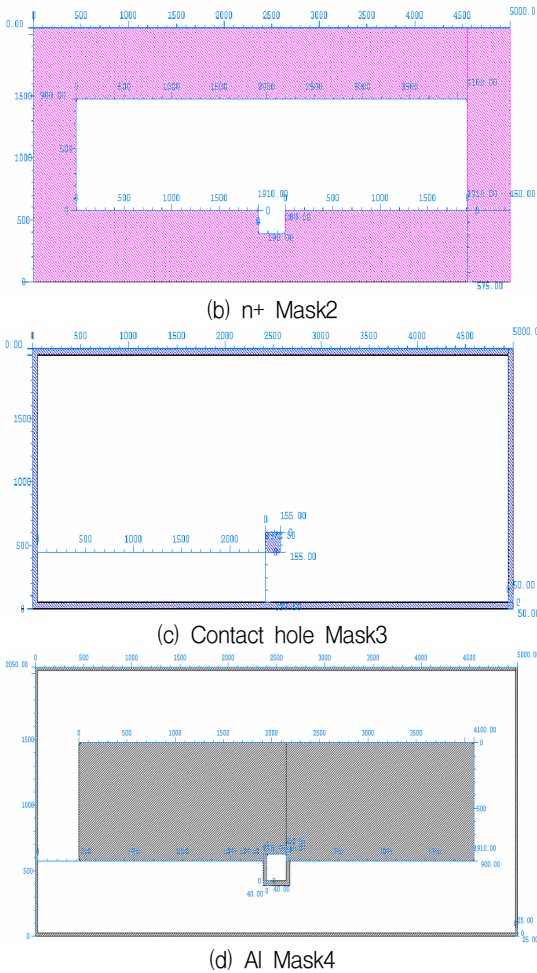


그림 1. 반도체 소자의 마스크
Fig. 1 Masks of Semiconductor Device

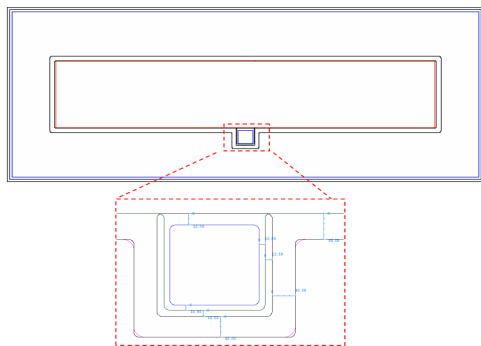
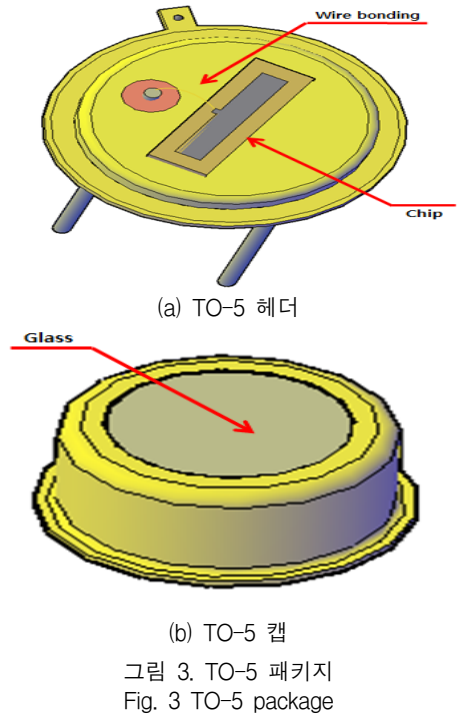


그림 2. 완성된 칩의 패턴
Fig. 2 Chip pattern

그림 2는 Mask1~Mask4의 네 개의 마스크를 증착 시킨 칩의 패턴이며 제작된 칩은 $5000\mu\text{m} \times 2000\mu\text{m}$ 크기로 설계되어졌으며 총 두께는 $280\mu\text{m}$ 이다.

2.2. TO 패키지 제작



TO 패키지는 헤더와 캡으로 구성되어있다. 헤더는 반도체 및 광학부품의 조립을 위한 기계적 기반을 제공하며 캡은 광학 신호의 전송을 담당한다. 따라서 본 논문에서는 광학적 및 전기적 기반을 담당하는 TO-5 형태의 패키지를 설계하고 제작하였다.

그림 3은 Auto-Cad를 이용하여 설계된 (a)TO-5 헤더와 (b)TO-5 캡을 보여준다. TO 헤더에서 전기적 기반을 제공해주는 핀은 양극(+)의 Anode와 음극(-)의 Cathode로 구성되어있으며 Anode와 칩의 전극을 연결해주는 와이어 본딩은 Au로 압착시켜 사용하였다. 광학적 기반을 제공하는 TO 캡은 Glass를 이용하여 금속 프레임에 접합되었다. 그림 4는 칩이 실장된 TO-5 패키지를 현미경으로 관찰한 그림을 보여준다.

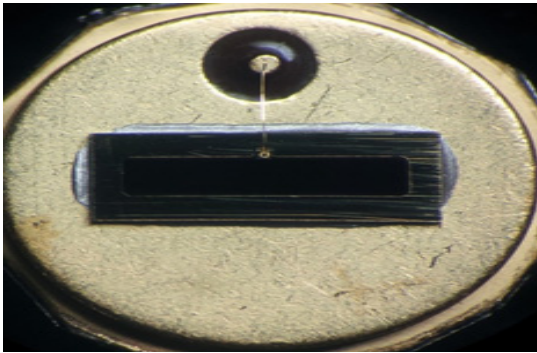


그림 4. 제작된 TO-5 패키지에 실장 된 chip
Fig. 4 Manufactured chip on the TO-Package

III. 결과 및 고찰

제작된 실리콘 PIN 포토다이오드의 전기적 및 광학적 특성을 분석하였다. 전기적 특성 분석은 정전용량, 암전류, 상승시간을 측정하였으며 광학적 특성 분석은 분광감응도를 측정하였다. 그림 5는 제작된 PIN 포토다이오드의 I-V특성을 보여준다. 암전류는 5V의 역 전압 상태에서 측정되며 암전류를 측정하기 위해 0V~10V의 역 전압을 인가하여 측정하였다. 5V의 역 전압일 때 0.1nA로 낮은 암전류를 나타내는 우수한 전기적 특성을 얻을 수 있었다.

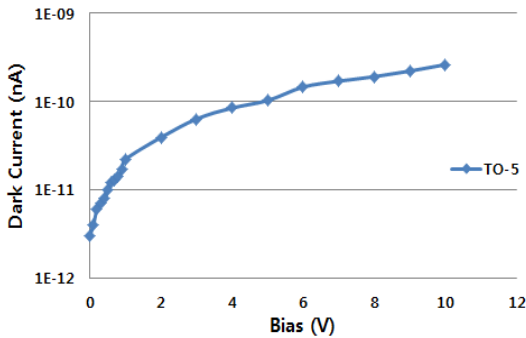


그림 5. 역 전압변화에 따른 암전류
Fig. 5 Dark Current with respect to reverse voltage

그림 6은 전압에 따른 정전용량 측정값을 보여준다. 일정한 범위의 전압을 0V~30V로 인가한 후 특정한 주파수대역에서 정전용량의 변화를 측정하였다.

0V일 때 1kHz 주파수대역에서는 32.5pF이고 200kHz 주파수대역에서는 32.4pF의 정전용량의 값을 나타내고 있다. C-V곡선 형태는 전압 변화에 따라 정전용량이 감소하고 있으며 1kHz와 200kHz의 각각 다른 주파수대역에서 정전용량은 변화 없는 우수한 결과를 보여준다.

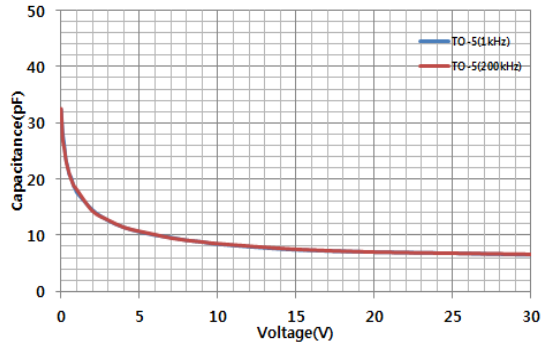
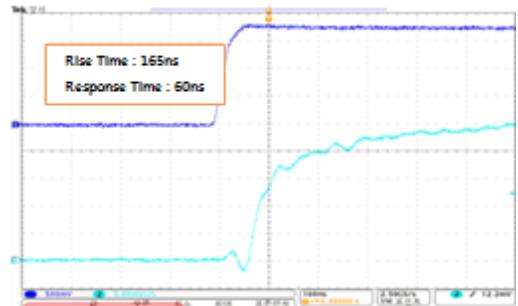
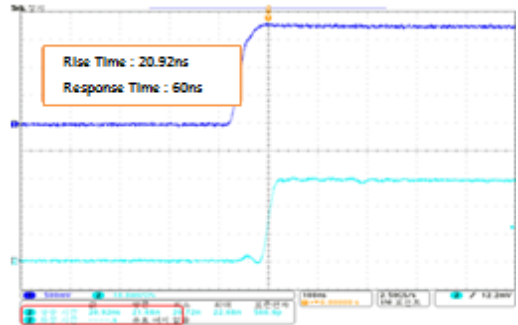


그림 6. 전압변화 따른 정전용량
Fig. 6 Capacitance as voltage change



(a) 0V



(b) 10V

그림 7. 전압변화에 따른 상승시간
Fig. 7 Rising time vs. voltage change

그림 7은 전압에 따른 상승시간을 보여준다. 상승 시간을 측정하기 위해 870nm 파장대역의 LD광원과 부하저항 50Ω 조건에서 측정하였으며 0V에서는 상승 시간이 165ns이고 10V에서는 상승시간이 20.92ns로 레이저 검출용에 대한 고속 응답특성을 확인할 수 있었다.

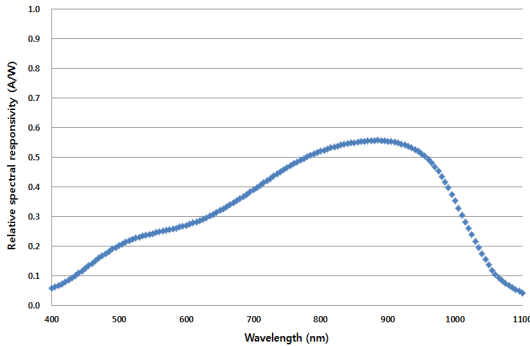


그림 8. 파장별 분광감응도
Fig. 8 Spectral responsivity vs. wave length

그림 8은 400nm~1,100nm 파장대역에서 분광감응도를 보여주고 있다. 적외선 검출하기 위해서 850nm ~ 1000nm 대역에서 분광감응도를 살펴보면, 파장대역 870nm~920nm 영역에서 분광감응도는 최대 0.57A/W 이었고 1000nm에서 0.37A/W, 그리고 1000nm~1100nm 파장대역에서는 분광감응도가 급격히 감소한다.

IV. 결 론

본 논문은 850nm~1000nm 파장대역에서 적외선 레이저 광을 검출하기 위해 실리콘 기반 PIN 포토다이오드를 제작하고 TO-5형태로 패키징하여 전기적 특성 및 광학적 특성을 분석하였다. 전기적 특성으로 암전류는 5V 역 전압에서 0.1nA로 낮은 암전류를 나타내고 정전용량은 0V 일 때 특정주파수 1kHz와 200kHz에서 각각 32.5pF와 32.5pF를 보여, 정전용량이 주파수에 무관한 우수한 전기적 특성임을 보였으며, 상승시간은 10V 전압에서 20.92ns로 고속응답특성을 확인하였다. 광학적 특성은 870nm~920nm 파장대역에서 0.57A/W의 분광감응도를 나타내었으며, 920nm 파장대역 이후부터는 서서히 감소하면서 1000nm 파장대역에서

0.37A/W의 분광감응도를 보였다. 이것은 실리콘 재료의 특성상 근적외선 파장대역에서 분광감응도가 급격히 감소하나 880nm 파장대역에서 0.6A/W에 근접하는 0.57A/W의 분광감응도를 나타냈기 때문에 레이저 검출용으로 비교적 우수한 특성임을 확인하였다. 향후 1000nm 이후 파장대역에서 분광감응도를 향상시키기 위한 도핑프로파일 최적화 및 Anti Reflection에 대한 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2012학년도 원광대학교의 교비지원에 의해 수행됨.

References

- [1] P. S. Menon, S. K. Tasirin, I. Ahmad, and S. F. Abdullah, "Optimization of Process Parameters for Si Lateral PIN Photodiode," *J. of World Applied Sciences*, vol. 8, no. 1, 2013, pp. 98-103.
- [2] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*. New Jersey : Wiley, 2007.
- [3] B.-J. Lee, "Polymer thin film organic transistor characteristics with plasma treatment of interlayers," *J. of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 8, no. 6, 2013, pp. 797-804.
- [4] B.-J. Lee and H.-Y. Shin, "Water Vapor Permeability of SiO₂ Oxidative Thin Film by CVD," *J. of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 5, no. 1, 2010, pp. 81-87.
- [5] C. Z. Zhou and W. K. Warburton, "Noise analysis of low noise, high count rate, PIN diode X-ray detectors," *IEEE Trans. Nuclear Science*, vol. 43, no. 3, June 1996, pp. 1385-1390.
- [6] C. R. Tull, J. S. Iwanczyk, B. E. Patt, G. Vilkelis, V. Eremin, E. Verbitskaya, N. Strokan, I. Il'yashenko, A. Ivanov, A. Sidorov, N. Egorov, S. Golubkov, and K. Kon'kov, "New High Sensitivity Silicon Photodetectors for Medical Imaging Application," *IEEE Trans. Nuclear Science*, vol. 50, no. 4, Aug. 2003, pp.

1225-1228.

- [7] G. F. D. Betta, G. U. Pignatelli, G. Verzellese, and M. Boscardin, "Si-PIN X-ray detector technology," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, vol. 395, no. 3, Aug. 1997, pp. 344-348.
- [8] E.-S. Kim, "Small Particle Detection System by Optical Scattering Effect," *J. of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no. 3, 2012, pp. 579-583.

저자 소개



이준명(Jun-Myung Lee)

2012년 원광대학교 정보통신공학과 졸업(공학사)
2012년 원광대학교 대학원 정보통신공학과 석사과정(공학석사)

※ 관심분야 : 반도체소자, 광센서, 가시광통신



강은영(Eun-Young Kang)

2013년 원광대학교 정보통신공학과 졸업(공학사)
2013년 원광대학교 대학원 정보통신공학과 석사과정(공학석사)

※ 관심분야 : LED조명제어, 가시광통신



박건준(Keon-Jun Park)

2003년 원광대학교 전기전자공학부 졸업(공학사)
2005년 원광대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(공학석사)

2010년 수원대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)
2010년~2012년 원광대학교 공과대학 POST-BK21 Post-Doc

2012년~현재 원광대학교 리서치펠로우 연구교수
※ 관심분야 : 컴퓨터 및 인공지능, 유전자 알고리즘 및 최적화이론, 지능시스템 및 제어



김용갑(Yong-Kab Kim)

1988년 아주대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1993년 앨라바마 주립대학교 (공학석사)

2000년 노스캐롤라이나 주립대학교 (공학박사)

2003년~현재 원광대학교 정보통신공학과 교수

2006년~2012년 공과대학 POST-BK21 사업단장

2012년~현재 LED 인력양성사업단장(전북)

2012년~현재 원광대학교 ITBT창업보육센터장

※ 관심분야 : 가시광통신시스템, 전력선통신