JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지(J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng.) Vol. 18, No. 6 : 1407~1412 Jun. 2014

Silicon기반 고감도 PIN Photodiode의 전기적 및 광학적 특성 분석

이준명[1] · 강은영[1] · 박건준[1] · 김용갑[1] · 황근창[2*]

Analysis of Electrical and Optical Characteristics of Silicon Based High Sensitivity PIN Photodiode

Jun-Myung Lee[1] · Eun-Young Kang[1] · Keon-Jun Park[1] · Yong-Kab Kim[1] · Geun-Chang Hoang[2*]

[1]Department of Information and Communication Engineering, Wonkwang University, Iksan 570-794, Korea
[2*]Department of Microelectronics and Display Technology, Wonkwang University, Iksan 570-794, Korea

요 약

근적외선 파장대역 850 nm ~ 1000 nm에서 레이저를 검출하기 위해 포토다이오드의 분광감응도를 향상시키고자 본 논문에서 실리콘 기반 고감도 PIN 포토 다이오드를 제작하고 전기적 및 광학적 특성을 분석하였다. 제작된 소자는 TO-18형으로 패키징 하였고 포토다이오드의 전기적 특성으로 역 바이어스 전압이 5V일 때 암전류는 Anode 1과 Anode 2는 약 0.055 nA 의 값을 나타내었으며 정전용약은 0V 일 때 1 kHz 주파수 대역에서 약 19.5 pF, 200 kHz 주파수 대역에서 약 19.8 pF의 적은 정전용약을 나타내었다. 또한 출력신호의 상승시간은 10 V의 전압일 때 약 30 ns의 고속 응답특성을 확인하였다. 광학적 특성 분석으로는 880 nm에서 최대 0.66 A/W의 분광감응도 값을 나타내었고 1000 nm에서는 0.45 A/W로 비교적 우수한 분광감응도를 나타내었다.

ABSTRACT

In order to improve spectrum sensitivity of photodiode for detection of the laser at 850 nm ~ 1000 nm of near-infrared wavelength band, this study has produced silicon-based fast film PIN photodiode and analyzed electrical and optical properties. The manufactured device is packaged in TO-18 type. The electrical properties of the dark currents both Anode 1 and Anode 2 have valued of approximately 0.055 nA for 5 V reverse bias, while the capacitance showed 19.5 pF at frequency range of 1 kHz and about 19.8 pF at the range of 200 kHz for 0 V. In addition, the rising time of output signal was verified to have fast response time of about 30 ns for 10 V. For the optical properties, the best spectrum sensitivity was 0.66 A/W for 880 nm, while it was relatively excellent value of 0.45 A/W for 1,000 nm.

키워드 : 핀 포토다이오드, 광검출기, 실리콘, 분광감응도, TO 패키지

Key word : PIN Photodiode, Photodetector, Silicon(Si), Spectral responsivity, TO package

접수일자 : 2014. 04. 14 심사완료일자 : 2014. 05. 22 게재확정일자 : 2014. 06. 09

* **Corresponding Author** Geun-Chang Hoang(gchoang@wonkwang.ac.kr, Tel:+82-63-850-6249)
Department of Microelectronics and Display Technology, Wonkwang University, Iksan 570-749, Korea

Open Access http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2014.18.6.1407 print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

ⓒThis is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/li-censes/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright Ⓒ The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

Ⅰ. 서 론

실리콘 반도체 소자는 실리콘 기판과 실리콘 산화막과의 계면에 대한 특성 규명 등을 비롯한 실리콘 공정 기술 및 소자기술이 꾸준히 발전되고 있으며, 다양한 용도의 검출기들이 실리콘 기판 성장기술의 발전에 따라 보다 저렴한 비용으로 제작되고 있다. 실리콘 포토다이오드는 주로 광 검출기와 방사선 검출기 분야에 응용되고 있다. 실리콘 포토다이오드는 활성영역이 넓은 대면적 검출기에서부터 작지만 정밀한 규격이 요구되는 CMOS 등 회로와 결합되어 응용범위를 점차 넓혀가고 있다.

포토다이오드는 빛을 전기신호로 변환하는 소자로써, 입사 광량에 의해 출력되는 전류를 의미하는 분광감응도 (Responsivity, A/W)는 중요한 요소이다. 수광효율은 적용되는 빛의 파장에 따라 달라지는 흡수계수와 밀접한 관계가 있으며, 수광효율을 고려하여 자외선, 가시광선, 근적외선 등에 적합한 다양한 소자 들이 연구되고 있다[1-3].

대표적인 반도체 소재는 단결정 실리콘(Si)과 게르마늄(Ge)뿐 아니라 갈륨비소(GaAs), 탄화실리콘(SiC) 등의 혼합물과 유기물 등이 사용되기도 한다[4]. 특히 재료적인 측면을 고려할 때, 저비용 대량생산측면에서 유기물재료에 대한 관심이 집중되고 있는 시점이지만 전기적 특성을 고려하면 혼합물에 비하여 전기적특성이 저하되는 단점이 있다. 파장대역 800nm~900nm에서는 반도체의 특성상 실리콘이 가장 좋으므로 실리콘 PIN(Positive-Intrinsic-Negative) 포토다이오드가 많이 이용된다[5]. 근적외광 영역의 고감도를 실현하기 위해서는 두꺼운 실리콘 웨이퍼를 이용하여 광흡수층을 두껍게 하는 방법이 적용되고 있으나, 높은 인가전압이 필요하고, 암전류가 커지며 응답속도가 떨어지는 단점이 있어 실용적이지 못하다. 이러한 이유 때문에 적외선 영역의 광검출에는 보통 화합물반도체 검출기가 이용되어 왔다. 그러나 화합물반도체는 재료 자체가 고가이며 공정상 실리콘에 비해 비용이 더 드는 등의 문제점이 있다. 또한 1000 nm 부근의 근적외선보다 더 긴 파장까지 감도를 가지는 것이 일반적이기 때문에 암전류를 감소시키기 위해서는 냉각이 필요한 경우가 발생하는 등, 사용방법이 번거롭다는 측면도 지적되고 있다[6].

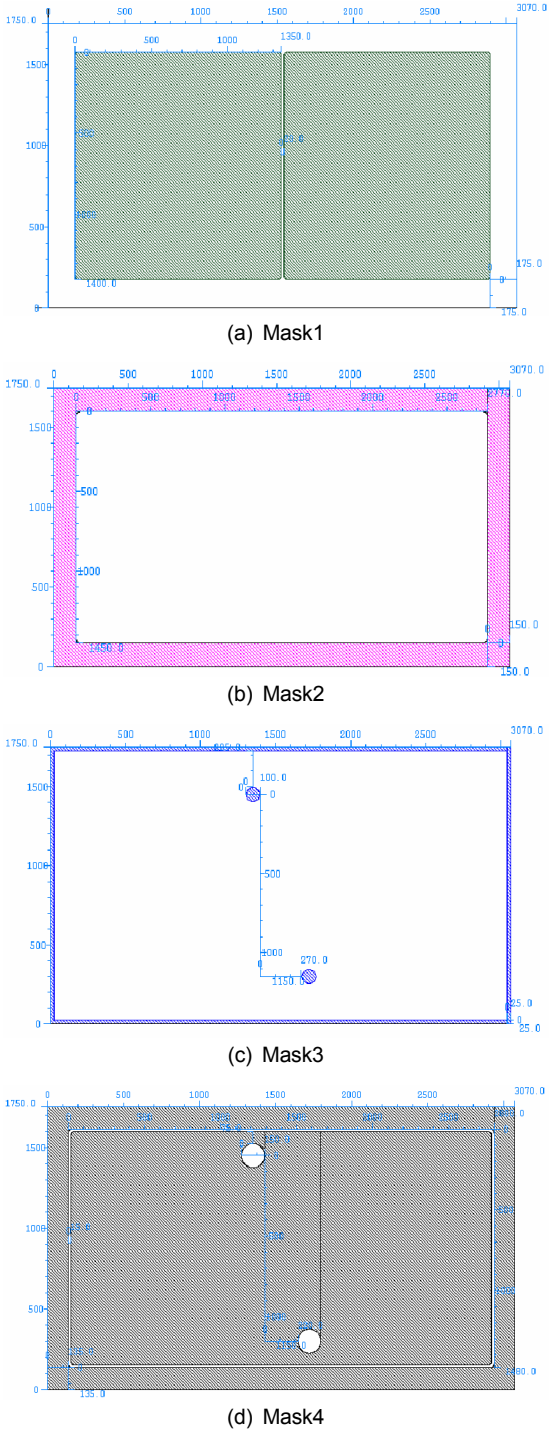
고감도 포토다이오드는 실리콘 포토다이오드의 분광특성상 근적외선에 해당되는 850 nm ~ 1000 nm 파장대역에서 분광감응도를 향상시키는 기술로써 YAG 레이저(Yttrium Aluminum Garnet, YAG laser) 를 검출하는 용도로 사용되고 있으며, Laser Detection 및 Guidance, High Speed Photometry, Near-IR Pulsed Light Sensor 등 다양한 분야에 응용되고 있다. 특히 항공/의료/방산 등의 분야에서 Laser Tracker으로 사용되고 있다[7].

본 논문에서는 850 nm ~ 1000 nm 파장대역에서 실리콘 기반 고감도 PIN 포토다이오드를 제작하여 TO-18(Transistor Outline-18)형으로 패키징 한 후 전기적 및 광학적 특성을 분석하여 응용가능성을 확인하였다.

Ⅱ. Photodiode

2.1. 소자 설계 및 제작

그림 1은 실리콘 PIN 다이오드 소자 공정 순서와 공정에 사용된 마스크이다. 제작된 PIN 다이오드 소자는 TO-18 PKG 크기에 맞춰 제작되었으며 공정 순서는 비저항 2600 Ω cm인 5″ n-type(100) Si 웨이퍼를 기판으로 사용하여 n- 층을 형성시켰다. 실리콘 기판에 800 ℃ 이상에서 산소를 실리콘 기판 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 그림1(a) Mask1을 이용해 p+ 층을 형성하고 고온에서 열처리를 진행하였다. p+ 층의 산화막을 식각처리하고 그림1(b) Mask2를 이용하여 n+ 층을 형성하였다. 이에 사용된 Mask1과 Mask2는 각각 4000 Å, 4400 Å의 두께로 증착하였다. 이후 그림1(c) Mask3를 이용하여 100 ㎛ × 100 ㎛인 Contact hole을 형성하고 그림1(d) Mask4를 이용하여 Al을 증착하였다. 제작된 반도체 소자는 2960 ㎛ × 1740 ㎛ 크기로 설계되어졌으며 총 두께는 280 ㎛이다.



(a) Mask1

(b) Mask2

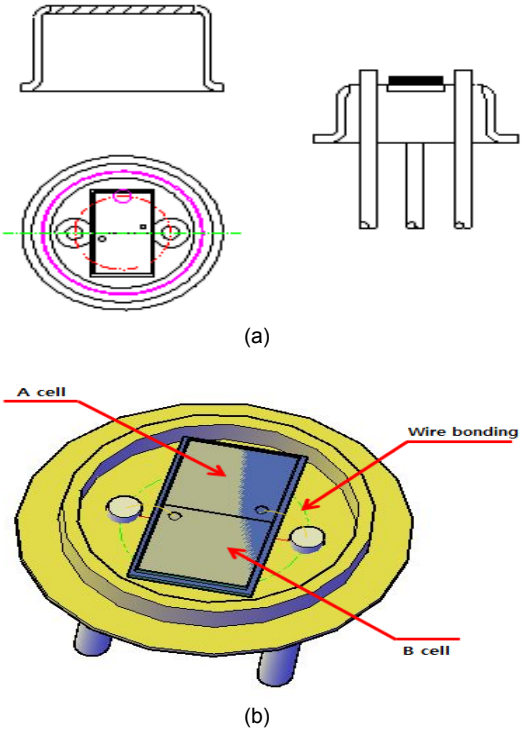
(c) Mask3

(d) Mask4

그림 1. 실리콘 PIN photodiode의 공정순서 및 사용된 마스크
Fig. 1 Process and used the mask of silicon pin photodiode

2.2. TO PKG 설계 및 제작

TO 패키지는 헤더와 캡으로 구성된다. 캡은 송신 및 수신 애플리케이션의 광학 부품을 안정적이고 영구적으로 보호하고 입사한 광학 신호의 전송을 담당한다. 캡에 설치된 창과 렌즈의 광학적 물성은 극히 까다로운 조건을 충족시켜야 한다. 동시에 핀을 통해 캡슐 속 부품들에게 전원을 공급한다. 포토다이오드는 습기 등에 의하여 쉽게 손상될 수 있기 때문에 제작된 포토다이오도를 보호하기 위하여 다음과 같이 TO-18 패키지를 설계하였다.



(a)

(b)

그림 2. TO 패키지의 (a) 2D설계도면과 (b) 3D 형상도
Fig. 2 (a) 2D drawings and (b) 3D shape of TO PKG

그림 2(a)는 Auto-Cad를 이용하여 도면 작업을 거친 후 설계된 TO-18 PKG를 그림 (b)와 같이 3D형상으로 나타내었다. 전원을 공급해주는 핀은 3단자로써 하나의 Cathode와 두 개의 Anode로 구성되었으며, 광학적 기반을 제공하는 캡은 Glass를 이용해 금속 프레임과 접합시켰다. PIN 다이오드의 수광면은 A cell 과 B cell 로 나누어 설계하였으며, 각각의 cell과 Anode 1과

Anode 2에 전극을 연결해주는 와이어 본딩은 Au을 압착시켜 사용하였다. 그림 3은 칩이 실장 된 OLYMPUS CK40M 현미경의 40배 배율로 칩이 실장 된 TO-18 PKG를 관찰한 사진이다.

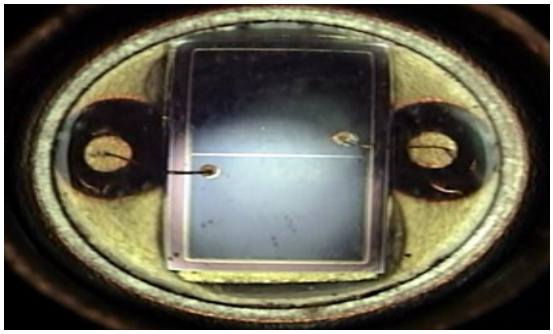


그림 3. Chip 실장 된 TO-18 PKG
Fig. 3 Chip mounter on TO-18 PKG

Ⅲ. 결과 및 고찰

제작된 TO-18형 실리콘 PIN 포토다이오드의 전기적 및 광학적 특성을 분석하였다. 전기적 특성을 분석하기 위하여 암전류, 정전용약, 상승시간을 측정하였으며, 광학적 특성 분석을 위하여 분광감응도를 측정하였다.

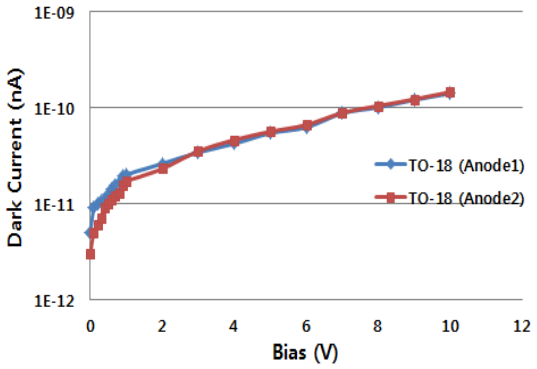


그림 4. 역바이어스에 따른 암전류
Fig. 4 Dark current v.s. reverse bias voltage

그림 4는 역 바이어스에 따른 암전류 값을 보여준다. 일반적으로 암전류는 5 V의 역 바이어스 (PIN PD)상태에서 측정되고 암전류를 측정하기 위해 0V~10V의 역 바이어스를 인가하여 측정하였으며 5V 역 바이어스 일 때 포토다이오드 Anode 1의 암전류는 0.054 nA, Anode 2의 암전류는 0.056 nA 의 값을 나타내며 전체적으로 낮은 암전류 값을 나타낸다. 본 연구에서 제안된 제품이 기존 타사 제품의 암전류 0.5 nA 보다 동일 전압 에서 더 우수한 전기적 특성을 보여준다.

그림 5는 전압에 따른 정전용약의 측정값을 보여준다. 일정 범위의 전압 0 V ~ 30 V를 인가한 후 특정한 주파수대역에서 정전용약의 변화 유무를 확인하기 위해 1 kHz, 200 kHz 에서 포토다이오드의 정전용약을 측정하였다.

인가전압이 0 V일 때 1 kHz 주파수대역에서 Anode1과 Anode2는 각각 정전용약이 19.5 pF와 19.6 pF이고 200 kHz 주파수대역에서 Anode 1과 Anode 2은 19.78 pF와 19.8 pF의 값으로 적은 정전용약의 값을 나타내고 있다. 또한 C-V곡선은 전압이 증가함에 따라 정전용약 값이 감소하고 있으며 주파수대역 1 kHz와 200 kHz에서 Anode1과 Anode2의 정전용약은 변하지 않는 좋은 결과를 보여준다.

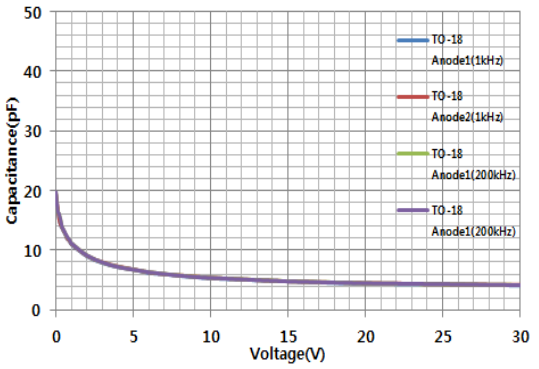


그림 5. 전압에 따른 정전용약
Fig. 5 Capacitance by voltage

그림 6은 펄스파가 최소값에서 최대값으로 증가되는 시간동안 10 %에서 90 %로 증가 되는 상승시간을 보여주며 상승시간을 측정하기 위해서 LD(870nm) 광원을 이용하여 부하저항 50 Ω 조건에서 측정하였다. 측정결과 역 전압 0 V에서는 상승시간이 149.9 ns이고 10 V에서는 상승시간이 27.56 ns 이었다. 따라서 전압이 증가함에 따라 상승시간이 빨리지는 것을 확인 할 수 있었고, 이 값은 기존 제품은 역전압 10 V에서 50 ns의 상승

시간보다 약 20 ns 빠르게 레이저광을 검출할 수 있는 고속 응답특성을 가진다는 것을 알 수 있다.

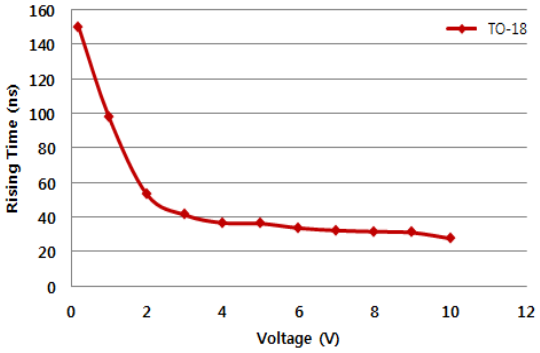


그림 6. 전압에 따른 상승시간
Fig. 6 Rise time by voltage

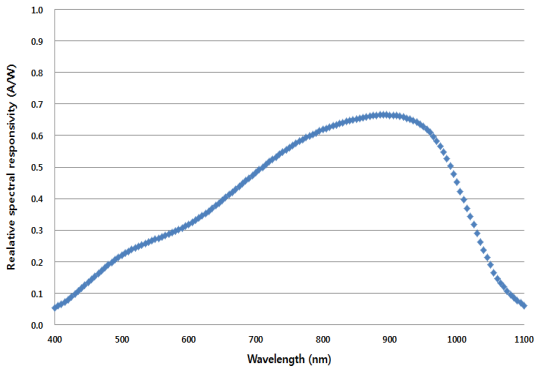


그림 7. 분광감응도 측정값
Fig. 7 Spectral responsivity measurement value

제작된 PIN 포토다이오드의 분광감응도는 근적외선 영역 (850 ~ 1000 nm)에서 레이저 광을 검출하기 위해서 수광되어야 할 해당 파장 영역을 그림 7의 그래프 상에서 보면, 870 nm ~ 920 nm 영역에서 최대 0.66 A/W를 보여주고 1000 nm 일 때 0.47 A/W이며, 1000 nm 이상의 파장대역에서 분광감응도가 급격히 감소하는 것을 보여준다. 기존 제품의 분광감응도는 0.6 A/W 이하로 본 연구에서 제안된 PIN 포토다이오드가 좀 더 우수한 성능을 보이며, 이는 수신감도에 크게 기여하는 정전용량이 낮기 때문에 높은 분광감응도를 얻을 수 있었다.

Ⅳ. 결 론

본 논문은 850 nm ~ 1000 nm 파장대역에서 분광감응도 향상을 위해 실리콘 기반 PIN 다이오드 소자를 제작하여 TO-18 형으로 패키징 한 후 전기적 및 광학적 특성을 분석하였다. 제작된 PIN 다이오드 소자의 암전류는 5 V의 역 바이어스에서 Anode 1은 0.054 nA이고 Anode 2은 0.056 nA의 값을 나타내었다. 정전용량은 1 kHz와 200 kHz의 두 주파수 대역에서 모두 약 19 pF 의 우수한 특성을 보였다. 응답 특성은 10 V에서 상승 시간이 약 30 ns 이하로 고속 응답특성을 가진다. 이것들은 타사 기존제품의 전기적 특성보다는 매우 우수한 전기적 특성이다. 본 소자의 광학적 특성은 870 nm ~ 920 nm 파장대역에서 분광감응도는 최대 0.66 A/W 이었으며, 1000 nm에서는 0.45 A/W 이었고, 1000 nm ~ 1100 nm 파장대역에서 분광감응도가 급격하게 감소하는 특성을 보였으나 레이저 광 검출에 유효한 870 nm ~ 920 nm 대역에서 비교적 높은 분광감응도를 보이는 등 매우 우수한 광학적 특성을 나타내었으며, 0.6 A/W의 고감도를 갖는 광 검출기임을 확인하였다. 이러한 결과들로부터, 제작된 실리콘 기반 PIN 다이오드는 레이저 검출 및 방산제품에 활용될 수 있음을 확인 하였다.

감사의 글

이 논문은 2014학년도 원광대학교의 교비지원에 의해 수행됨.

REFERENCES

[1] C. Z. Zhou, and W. K. Warburton, "Noise analysis of low noise, high count rate, PIN diode X-ray detectors," *IEEE Transactions on Nuclear Science,* vol. 43, no. 3, pp. 1385-1390, Jun. 1996.

[2] C. R. Tull, J. S. Iwanczyk, B. E. Patt, G. Vilkelis, V. Eremin, E. Verbitskaya, N. Strokan, I. I1'yashenko, A. Ivanov, A. Sidorov, N. Egorov, S. Golubkov, and K. Kon'kov, "New High Sensitivity Silicon Photodetectors for Medical Imaging

Application," *IEEE Transactions on Nuclear Science,* vol. 50, no. 4, pp. 1225-1228, Aug. 2003.

[3] G. F. Dalla Betta, G. U. Pignatel, G. Verzellesi, and M. Boscardin, "Si-PIN X-ray detector technology," *Nuclear Instruments and Methods,* vol. 395, no. 3, pp. 344-348, Aug. 1997.

[4] S. Y. Oh, "Semiconductor Technology and Industrial Trend," Seoul National University Advanced Institute of Convergence Technology, Apr. 2011.

[5] 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, pp. 797-804, 2013.

[6] KISTI MIRIAN. Available: http://mirian.kisti.re.kr/.

[7] J. M. Park, "The optical characteristics of silicon photo-detectors and the leakage current of silicon radiation detectors," Doctor's Thesis, Chon-Buk National University, 2010.

이준명(Jun-Myung Lee)

2012년 원광대학교 정보통신공학과 공학사
2012년 ~ 현재 원광대학교 대학원 정보통신공학과 공학석사과정
※관심분야 : 반도체소자, 광센서, 가시광통신

강은영(Eun-Young Kang)

2013년 원광대학교 정보통신공학과 공학사
2013년 ~ 현재 원광대학교 대학원 정보통신공학과 공학석사과정
※관심분야 : 반도체소자, LED조명제어, 가시광통신

박건준(Keon-Jun Park)

2005년 원광대학교 제어계측광학과 공학석사
2010년 수원대학교 전기공학과 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)

1993년 앨라바마 주립대 공학석사
2000년 노스케롤라이나 주립대 전기 · 컴퓨터공학과 공학박사
2003년 ~ 현재 원광대학교 정보통신공학과 교수
2012년 ~ 현재 전라북도 LED 인력양성사업단장
2014년 ~ 현재 원광대학교 창업지원단장
※관심분야 : 가시광통신 시스템, 전력선 통신

황근창(Geun-chang Hoang)

1985년 오하이오 주립대 물리학과 이학석사
1989년 텍사스 크리스찬대학교 물리학과 이학박사
1992년 원광대학교 물리학과 교수
1995년 ~ 현재 한국 정신과학 학회 상임이사
2005년 ~ 현재 원광대학교 반도체 디스플레이학과 교수
※관심분야 : Sol-Gel Processing, Raman Spectroscopy, 응용물리학, 반도체소자, 정신과학