

PN 접합형 Photodiode 제작에 관한 연구

(A Study on Fabrication of PN Junction Type Si Photodiode)

曹 豪 成*, 吳 宗 煥**, 洪 彰 禧*

(Ho Sung Cho, Jong Hwan Oh, and Tchang Hee Hong)

要 約

본 연구에서는 PN접합형 Si-PD를 저농도 도핑된 P형($N_a=7 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$) 기판 및 N형($N_d=4 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$) 기판을 사용하여 제작하였다. 제작된 PD의 특성으로부터 N형 기판이 P형 기판보다 암전류특성이 현격하게 양호하다는 것을 알 수 있었다. 제작된 Si-PD의 성능 중 좋은 것은 역 바이어스 전압 10V에서 암전류가 5nA미만, 항복전압이 250V이상 이었고, 양자효율은 86% (0.44A/W , $\lambda = 6328 \text{\AA}$) 이상의 비교적 좋은 광전특성을 얻을 수가 있었다.

Abstract

In this research, the PN junction type Si photodiodes have been fabricated on the low doped P type ($N_a=7 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$) and N type ($N_d=4 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$) (100) silicon substrates. We could find out that the dark current was lower in the N type substrate than in the P type substrate. Some well designed photodiodes showed relatively good optical and electronic characteristics that the dark current is lower than 5 nA at 10 V of reverse bias condition, that the breakdown voltage is higher than 250 V, and that the quantum efficiency is larger than 86% at the wavelength of 6328 Å.

I. 서 론

Si-PD(PhotoDiode)는 가시광 영역의 광을 검출할 수 있는 소자이므로 이에 관한 연구는 일찍부터 이루어졌으며, 특히 1970년 AlGaAs/GaAs 반도체레이의 상온연속동작이 가능하게 되므로 인하여¹⁾ 광섬유통신의 실용화에 관한 연구가 진행되었고 특히, 이 파장대역의 광을 검출할 수 있는 Si-PD에 관한 실용화연구도 활발하게 진행되었다.²⁾ 오늘날 선진국에서는 이미 Si-PD의 대량생산 단계에 들어 있으며 OEIC를 겨냥한 연구들은 현재 진행단계에 있다.

한편, 이 소자는 광전자산업의 핵심소자임에도 불구하고 현재 우리나라에서는 거의 외국으로부터의 수입에 의존하고 있는 실정에 있다. 그러나, 장차 광전자 산업시대에 있어서 우리나라도 부품개발에 다양한 아이디어를 창출해내기 위해서는 재료 및 장치의 개발은 물론, 뒤늦은 감은 있으나 단위 소자들을 제작해 나갈 수 있는 기초공정기술들도 확보하여야 하며 한편, 이들을 수행해 나갈 수 있는 고급인력도 양성해야 할 것이다. 이러한 상황에서 본연구는 OEIC의 기초기술을 확립하는 데에 목적을 두고 행해졌으며, Si-PD의 제작은 서울대학교 반도체 공동연구소와 한국전자통신연구소의 협력을 얻어 수행되었다.

Si-PD중 현재 널리 사용되고 있기도하며 또 장차 OEIC용으로는 Si-PiN구조가³⁾ 유리하기는 하나 이 구조의 연구에 필요한 Si기판을 구하기가 힘들기 때문에 본연구에서는 우선 손쉽게 구할 수 있는 저농도($N_a=3 \sim 5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$, $N_a=7 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$)의 Si 기판을

*正會員, 韓國海洋大學 電子通信工學科
(Dept. of Elec. Com., Korea Maritime Univ.)
**正會員, 韓國海技研修院 機關學科
(Korea Marine Training and Research Institute)
接受日字: 1989年 6月 30日

가지고 보통의 PN접합형 Si-PD를 제작해 봄으로써 마스크제작공정, 절연막형성공정, 식각공정, 이온주입공정, 무반사막 제조공정 등 PD의 설계 및 제작에 가장 기본이 되는 기술들을 습득하였다.

본 연구에서는 Si-PD의 제작에는 N형 기판 및 P형 기판을 이용했으며 무반사막의 종류와 PD의 접합면적의 크기 변수로하여 전기적 광학적 특성들을 조사하였다. 제작된 PD의 특성으로부터 N형 기판이 P형 기판보다 암전류특성이 현격하게 양호하다는 것을 알았으며, 무반사막의 두께가 광전효율을 높이는 데에 중요한 변수라는 사실을 실험으로 확인 가능하였다.

제작된 Si-PD의 성능 중 좋은 것은 역 바이어스 전압 10V에서 암전류가 5nA, 양자효율 86% (0.44A/W, $\lambda=6328\text{\AA}$)인 것도 얻을 수가 있었다.

본 논문의 2장에는 PD의 동작원리 및 구조에 대하여 기술하였고 3장에는 PD제작을 위해 수행된 공정에 관하여 논의하였다. 4장은 제작된 PD의 전기적 특성 및 광전특성결과를 나타내었으며 그리고 결론순으로 기술하였다.

II. PD의 동작원리 및 구조

1. PD의 동작원리

그림1에 나타난 바와 같이 광이 입사되면 캐리어가 발생하여 인가된 역 바이어스에 의해 전자 정공이 재결합되지않고 빠른속도로 이동하게 된다. 또한 역바이어스에 의해 공핍영역이 증가하여 CR시정수가 감소되고 응답속도가 빨라지게 된다. 이때 입사광의 에너지 $h\nu$ 는 에너지폭 E_g 이상이어야 한다.

$$h\nu \geq E_g$$

$$\lambda(\text{um}) \leq 1.24/E_g [\text{eV}] \quad (1)$$

단위길이당 입사하는 광자의 수와 이에 의해 발생하는 전자-정공쌍의 수와의 비 η 를 양자효율(quantum efficiency)이라 한다.

$$\eta = (I_p/e) / (P_{in}/h\nu) \quad (2)$$

P_{in} ; 입사광 전력

I_p ; 광에 의해 흐르는 전류

수광소자로서 갖추어야하는 요건으로는 양자효율이 커야하고, 암전류가 작아야하며 응답속도가 빨라야한다.

2. Si-PD의 구조

그림2의 (a)는 실제 제작된 PD를 광학현미경의 배율 X50으로 촬영한 것이고, (b)는 (a)의 단면구조를 나타낸 것이다. 그리고 광이 입사되는 면은 굴절율이 약2인 Si_3N_4 를 무반사막으로 사용하여 반사광을

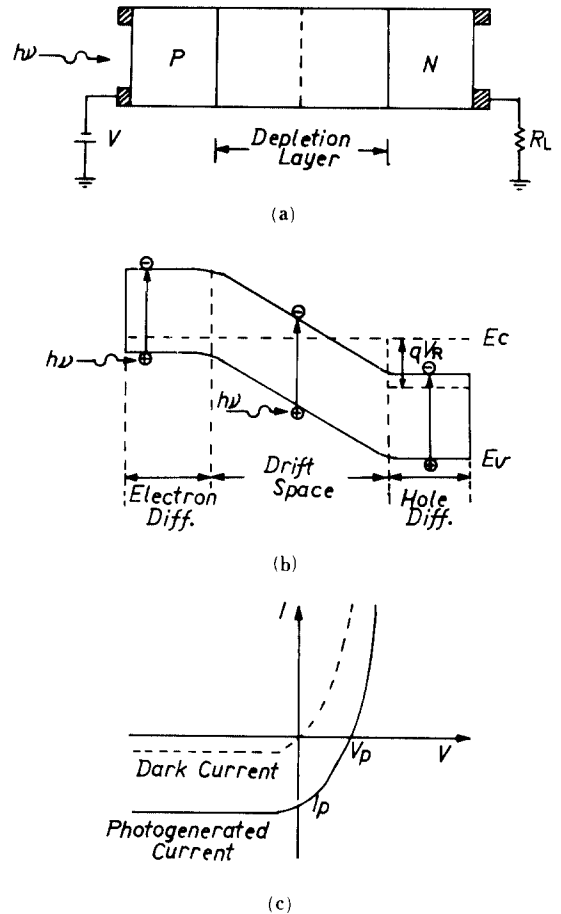


그림 1. PN접합형 PD의 동작원리
(a) PD의 구조
(b) 밴드구조
(c) I - V 특성

Fig. 1. Operation principle of a PN junction-PD.
(a)structure of a PD.
(b)band structure.
(c) I - V characteristic.

줄일 수 있도록 하였다. 사용된 기판은 비교적 농도가 낮은 기판($3\sim 8 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$)으로 하였고, Al을 기판의 전후면에 증착시켜 전극을 형성하였으며 광입사면은 원형으로 제작하였다.

III. PD 제작공정

PN접합형 Si-PD제작을 위하여 CAD DRACULA로 디자인하고 크롬 경질마스크를 ETRI에서 제작하여 그림3에 나타난 공정을 행하였다. 여기에 사용된 기판의 농도는 $3\sim 8 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 정도였다. 공정과 관련

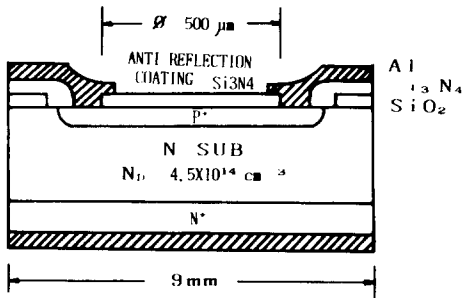
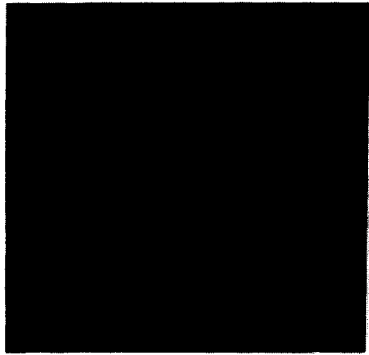


그림 2. PN접합형 Si-PD의 구조
Fig. 2. Structure of the PN junction type Si-PD.

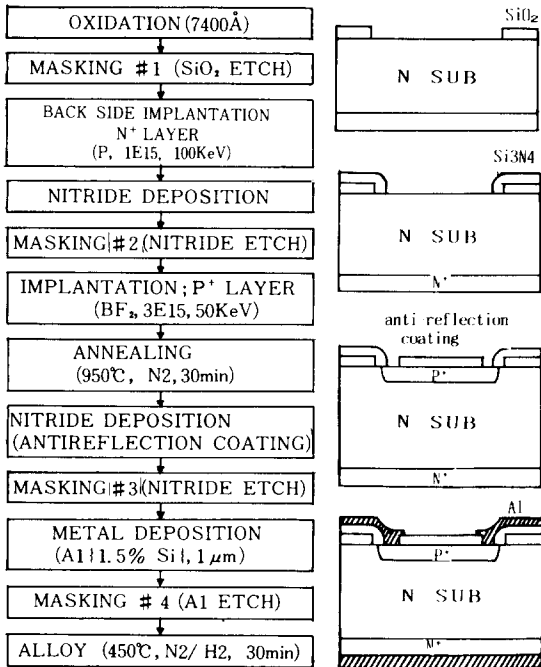


그림 3. Si-PD 제작을 위한 공정 순서도
Fig. 3. Flow chart for Si-PD fabrication.

된 제반조건은 문헌(5)에 나타난 것을 기준으로 하였다.

IV. 제작결과

1. 제작된 PD의 전기적특성

제작된 PD의 I - V 특성을 조사하기 위하여 HP-4145 parameter analyzer를 이용하여 광을 차폐시켜 놓고 측정을 행하였다. 그림4는 순방향 전압에 대한 I - V 특성을 조사하여 series resistance 및 ideality factor를 구하기 위하여 순방향 전압을 1.5V 인가 하였다. 그림으로부터 ideality factor가 1.06이고 이러한 사실로부터 다이오드로서의 동작이 정상적임을 알 수가 있다. 또한 series resistance는 수Ω으로 예상치와 거의 일치함을 알 수 있었다.

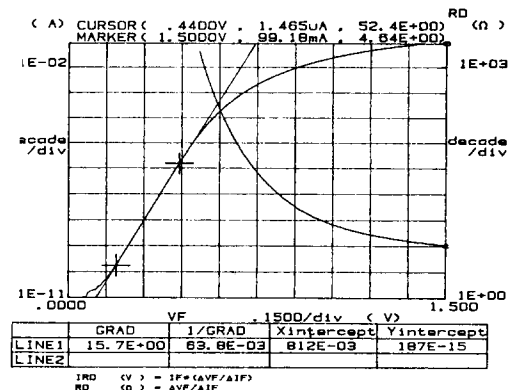


그림 4. 제작된 PD의 순방향 I - V 특성
Fig. 4. Forward biased I - V characteristic of the fabricated PD.

그림5는 앞서 측정안것과 마찬가지로 역방향 I - V 특성을 조사한 예가 나타나 있다. 그림으로부터 역바이어스 30V 인가시 dark current가 16.39 nA정도로 다소 높게 나타나고 있는데 향후 이부분에 대해서는 구조개선 및 passivation 기술이 도입되어야 할것으로 생각된다.

그림6에는 40V 역전압인가시 고주파(1MHz) C-V 특성의 예가 나타나 있다. 수천 pF정도의 capacitance가 나타나는 것은 전면전극의 형성으로인해 기생용량이 부과되어진 것으로 보이며, 전극의 면적을 줄여준다면 상당히 줄어들 것으로 생각된다. 아울러 passivation기법 및 planar구조로의 개선이 이루어진다면 상당히 줄어들것으로 생각되어진다.

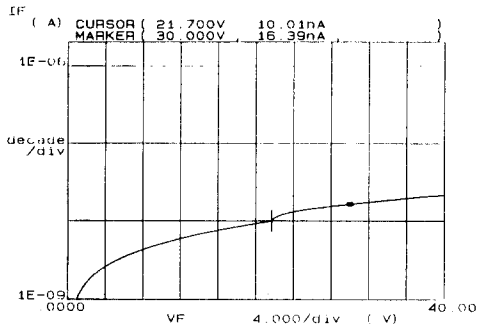


그림 5. 제작된 PD의 역방향 I - V 특성
 Fig. 5. Reverse biased I - V characteristic of the fabricated PD.

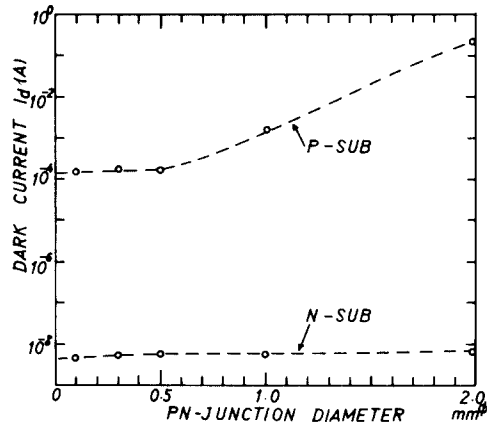


그림 7. PD의 수광면 지름에 따른 암전류
 Fig. 7. Dark current with diameter of the fabricated PD.

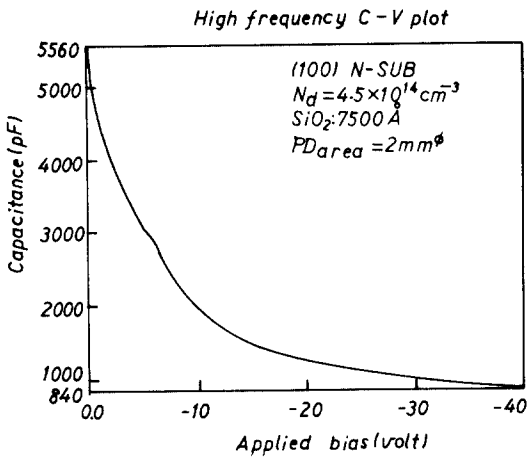


그림 6. 제작된 PD의 C - V 특성
 Fig. 6. C - V characteristic of the fabricated PD.

그림7은 수광면(window)의 지름에 따른 암전류 특성의 예가 나타나 있다. 그림으로부터 수광면의 지름에 따른 변화 즉 PN접합면의 면적에 따른 변화는 거의 관찰되지 않음으로 해서 접합면 주변에서 일어나는 현상으로 규정짓기는 모호하다. 제작된 PD의 구조상 접합면 주변에는 상당히 넓은 MIS구조가 형성되어 있어서 암전류의 주요 원인이 될 수가 있을 것으로 생각된다.⁴⁾ 과다한 암전류는 전극을 최소한 줄임으로 해서 줄어들 수 있을것이고 또한 원인을 알아내기가 용이해질것으로 생각되어진다. 그리고 P형 기관이 N형기관에 비해 암전류가 현저히 흐른다는 것을 확인할 수 있었다.

그림8에는 수광면의 지름에 따른 직렬저항의 관계를 나타내고 있다. 그림을 통해 알 수 있듯이 수광면이 커지면 커질수록 직렬저항이 줄어드는데 이러한 사실로부터 전극의 면적이 커질수록 저항이 줄어든다는 것을 알 수 있다.

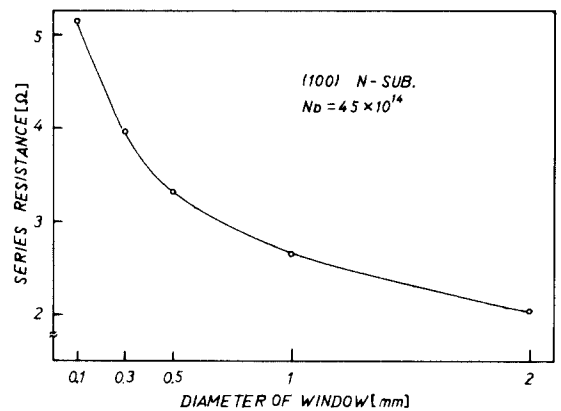


그림 8. 수광면의 지름과 직렬저항의 관계
 Fig. 8. Relation between diameter of window and series resistance.

2. 광전특성

그림9는 제작된 PD 광전특성을 조사한것으로 양자효율 및 I - V 특성을 나타낸 것이다. 광전특성을 조사하기 위하여 광원은 0.5mW He-Ne laser를사용하였다. PN접합에 인가전압이 없고 광을 입사시키지 않으면 전류는 흐르지 않는다. 순방향으로 바이

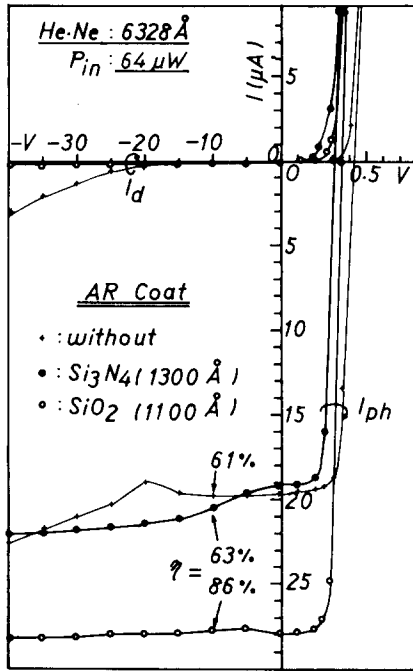


그림 9. 제작된 PD의 광전특성
 I_d : 암전류, I_{ph} : 광전류,
 η : 양자효율

Fig. 9. Optoelectronic characteristics of the fabricated PD.
 I_d : dark current
 I_{ph} : photogenerated current
 η : quantum efficiency

어스를 걸어주면 바이어스전압에 비례하는 큰 순방향전류가 흐른다. 역방향으로 전압을 걸면 일정한 누설전류(leakage current)인 암전류(dark current)가 흐른다. PN접합에 빛을 입사시키면 광량에 비례하는 역방향전류가 흐른다. 그림으로부터 양자효율 η 를 추정할 수 있는데 그림에 나타난 양자효율은 -10V 역방향 전압에서 구해진 값이다. 그림에 나타나있는 바와같이 무반사막이 없는 경우의 양자효율이 61%인 반면 SiO_2 무반사막이 86%로 상당히 좋은 양자효율을 보여주고 있다. 한편 이론계산에 의하면 Si-PD의 경우 Si_3N_4 가 SiO_2 에 비해 무반사막으로서는 더 좋은 특성을 가진다. 그러나 본 실험의 경우 Si_3N_4 의 무반사막의 두께가 800Å정도일때 He-Ne laser광의 반사를 최소로 할수 있으나, 실제로는 이보다 500Å이나 두꺼워서 반사를 막는데 효율적이지 못하기 때문에 Si_3N_4 무반사막의 양자효율 63%에 비해 SiO_2 반사막을 한경우의 양자효율이 높은것으로 생각된다. 이러

한 사실로부터 무반사막 코팅시에는 두께에 대한 세심한 주의가 필요한것으로 생각된다.

표1은 제작된 Si PD의 특성을 정리하여 나타내었고 그 개선방안을 제시하였다.

표 1. PN접합형 Si PD의 제작결과
 Table 1. Fabrication result of the PN junction type Si-PD.

	기대값	결과치	개 선 방 안
DARK CURRENT (I_d)	lnA미만	5nA 이상	PASSIVATION TECH.
SERIES RESISTANCE(R_s)	수 Ω	수 Ω	
BREAKDOWN VOLTAGE (I_b)	300V이상	250V미만	PASSIVATION TECH. 구조개선
CAPACITANCE(C)	1000pF 미만	2000pF 이상	PASSIVATION TECH. PLANAR 구조 PLA
QUANTUM EFFICIENCY (η)	80% 이상	50% 미만	무반사막 두께조정 P-i-N 구조

V. 결 론

본 연구에서는 저농도 N형 및 P형 기판위에PN접합형 Si PD를 제작하고 전기적 및 광학적인 특성을 조사하여 보았다. 비교적 잘 제작된 PD인 경우는 직렬저항이 수Ω미만, 항복전압은 250V정도, 암전류는 5nA미만 그리고 정전용량은 2000pF이상 이었다. 암전류 및 항복전압특성은 N형 기판을 이용한 경우가 P형기판을 이용하는 것보다 상당히 양호하다는 것을 알았다. 직렬저항의 특성은 비교적 양호한 편이나 암전류, 항복전압, 정전용량은 이론적인 기대값에 미치지 못한다. 이 원인은 주로 소자의 전면전극에 기인하는 것으로 판단되기 때문에 향후 이문제는 ring 형태의 전극을 형성시켜 주므로써 해결가능 하리라 생각된다. 아울러 IC공정상 기판 뒷면에 이루어지는 공정은 여러가지 오염문제와 진공 chuck에 의한 전면의 소자를 파괴시킬 수 있음으로써 planar 구조로의 설계가 이루어져야 할것으로 생각되어진다.

광전특성은 0.5mW He-Ne laser를 이용하여 양자효율을 산출하였는데 무반사막이 SiO_2 인 경우가 86%로 가장 좋았고 Si_3N_4 의 경우가 63%였으며 무반사코팅을 하지않을 경우는 61%로 조사되었다. 이론에 의하면 Si_3N_4 가 가장 좋아야하는데 두께가 너무두꺼

워서 무반사막으로서의 역할을 제대로 하지 못하는 것으로 추정되며 차후의 공정에서는 이러한 영향에 대해 주의를 기울여야할 것으로 생각된다.

앞서의 문제에 대한 개선책과 아울러 PD구조에 대한 연구조사가 이루어 진다면 본 연구의 결과는 향후 OEIC용 단면 수광소자 및 PiN-PD-FET 집적회로에 적용시킬 수 있으리라 생각된다.

감사의 글

본 연구를 수행하는 과정에서 많은 도움을 주신 서울대학교 반도체공동연구소의 여러분들과 마스크 제작에 도움을 주신 전자통신연구소 마스크실 및 광전자연구실의 여러 연구원들께 감사드립니다.

参 考 文 献

- [1] M.B. Panish et al, "Double-heterostructure injection lasers with room temperature threshold as low as 2300A/cm²," Appl. Phys, Lett. 16, pp. 326, 1970.
- [2] H. Melchion, "Detector for lightwave communication," Phys. Today, p. 32, 1977.
- [3] M.V. Schneider, "Schottky barrier photodiodes with anti-reflection coating," Bell Syst. Tech. J. 45, p. 1611, 1966.
- [4] J. Muller, Photodiodes for Optical Communication, Academic Press, Inc, 1981.
- [5] 이종덕, 집적회로 공정기술, 방한출판사, 1986.
- [6] S.M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, John wiley & Sons, Inc, pp. 362-430, 1981.

著 者 紹 介



曹 豪 成 (正會員)
 1960年 1月 19日生. 1986年 2月 동아대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
 1988年 2月 동아대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학석사). 관심분야는 광전자공학 및 반도체공학



洪 彰 禧 (正會員)
 1945年 8月 22日生. 1969年 2月 한국해양대학 항해학과 졸업 (이학사). 1974年 2月 부산대학교 물리학과 졸업 (이학사). 1977年 3月 일본 동경공업대학 대학원 전자공학과 졸업 (공학석사). 1981年 12月 일본 동경공업대학 대학원 전자공학과 (공학박사). 1972年 10月 한국해양대학 전임강사. 1988年 11月~현재 한국해양대학 교수. 1982年 3月~1983年 2月 서울대학교 자연과학대학 물리학과 객원교수. 1974年 4月~현재 반도체 레이저 및 수광소자의 제작과 특성해석에 관한 연구. 1978年 10月~현재 한국전자통신연구소 광전기술 연구부 위탁연구원. 관심분야는 광전자공학, 반도체공학.



吳 宗 煥 (正會員)
 1958年 4月 3日生. 1980年 2月 한국해양대학 기관학과 졸업 (공학사). 1989年 2月 한국해양대학 대학원 항해학과 졸업 (공학석사). 1983年 10月~현재 한국해기연수원 조교수 관심분야는 광전자공학, 반도체 공학.