

Aluminium-doped Zinc Oxide 투명전도막을 적용한 Photodiode의 수광효율 향상

The Increase of Photodiode Efficiency by using Transparent Conductive Aluminium-doped Zinc Oxide Thin Film

정윤환¹, 김호걸¹, 박춘배^{1,a}
(Yun-Hwan Jeong¹, Hu-Jie Jin¹, and Choon-Bae Park^{1,a})

Abstract

In this paper, to increase the light current efficiency of photodiode, we fabricated aluminum-doped zinc oxide(AZO) thin films by RF magnetron sputtering. AZO thin films were deposited at low temperature of 100 °C and different RF powers of 50, 100, 150 and 200 W due to selective etching process technology. Then the AZO thin films were annealed at 400 °C for 1 hr in vacuum ambient to increase crystalline. The lowest resistivity of $1.35 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ and a high transmittance over 90 % were obtained under the conditions of 3 mTorr, 100 °C and 150 W. The optimized AZO thin films were deposited as anti-reflection coating on PN junction of silicon photodiode. It was confirmed by the result of V_r-I_{ph} curve that the efficiency of photodiode with AZO thin film was enhanced 17 % more than commercial photodiode.

Key Words : AZO, Anti-reflection coating, Photodiode, RF magnetron sputtering

1. 서 론

최근 근거리 적외선 통신은 TV, DVD, 에어컨, Navigation, High-pass 단말기, 핸드폰 등 전자정보통신기기에 널리 응용되고 있다. 여기에 적용되고 있는 IR Receiver Module의 송신기는 940 nm 파장대의 적외선 LED 광원을 사용하고 있으며, 변조 반송파는 37.9 KHz의 주파수를 사용하고 있다. IR Receiver Module의 성능에 있어서 가장 중요한 특성은 지향각과 거리 특성이며, 송신 신호에 대하여 오동작을 일으키게 하지 않는 것이 기본 조건이다. 그러나 최근 IR Receiver module은 신광원의 출현으로 오동작을 자주 일으키고, 수신감도가 떨어지며, 동작거리의 감소현상을 초래하고 있다.

이에 따라, 고도의 신뢰성이 요구되고 있는 통신시스템의 오동작을 줄이기 위한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다.

오동작의 주된 원인은 형광등이 기존 자기식점등방식에서 전자식점등방식으로 교체되면서 고전압과 고효율을 위해 20 ~ 50 KHz 대역의 높은 주파수를 사용하고 있다. 이 주파수는 리모콘의 반송파주파수(37.9 KHz)와 인접 주파수 대역으로써 상호간섭으로 인한 동작거리 감소 현상이 나타나고 있다. 또 다른 원인은 형광등의 스펙트럼 분포도를 보면 가시광영역 이외에 적외선 영역에서 수은선(1014 nm)에 의한 상당량의 방사에너지가 방출되는데, 이 방사에너지에 의한 수신감도 저하로 동작거리가 감소하는 현상이 나타난다. 이러한 IR Receiver Module의 동작거리 감소를 증가시키기 위한 방법에는 몇 가지 방안이 고려되고 있으나 본 연구에서는 Photodiode에 AZO 투명전도막을 적용하여 수광효율을 향상시킴으로써 동작거리를 증가시키고자 한다.

1. 원광대학교 전기전자및정보공학부, WRISS
(전북 익산시 신용동 344-2)
a. Corresponding Author : cbpark@wonkwang.ac.kr
접수일자 : 2008. 7. 25
1차 심사 : 2008. 8. 19
심사완료 : 2008. 8. 22

현재 투명전도막 재료에는 ITO(Indium Tin Oxide)가 널리 사용되고 있으나, Indium은 희유금속으로 약 10년 밖에 남지 않은 가체매장량을 가지고 있으며, Texture 구조화의 어려움, H₂ 플라즈마 노출 시 금속으로 환원 그리고 높은 가격 등의 문제점을 해결하기 위한 신소재로 AZO (ZnO:Al)가 주목받고 있다. AZO는 Zn의 풍부한 가체매장량으로 인한 저가격, 표면 texture 구조화 그리고 저온성막이 용이하는 등 ITO를 대체할 수 있는 차세대 투명전도막으로 그 적용 가능성이 매우 높게 평가되고 있다[1-3].

본 연구에서는 photodiode의 반사방지막 재료로 사용되고 있는 SiN₄를 대체한 AZO 투명전도막을 증착하기 위해 RF magnetron sputtering법을 이용한다. AZO 박막을 실리콘 Photodiode pn 접합 상부에 적용하기 위한 저온증착공정조건으로 고효율, 후열처리 공정조건을 적용하고, AZO 박막의 전기적·광학적 특성 그리고 구조적 특성을 비교 분석하며, 제조된 photodiode의 V_r-I_{ph} 특성을 검토한다.

2. 실험

2.1 실험방법

Si photodiode pn 접합 상부에 textured AZO 투명전도막을 적용하기 위한 최적의 저온증착공정조건을 확립하기 위해서 RF Magnetron sputtering법을 이용하여 Si 및 유리 기판위에 AZO 박막을 증착하는 선행실험을 실시하였다. 사용된 타겟은 Al₂O₃가 2 wt% 첨가된 ZnO 세라믹 타겟을 사용하였다. 초기 진공도는 8×10⁻⁶ Torr, 작업진공도는 3 mTorr로 하였다. 기판온도는 Si Photodiode pn 접합 상부에 AZO 투명전도막을 증착하기 위해서는 선택 식각공정기술을 적용하는데, 이 경우 100℃이하의 저온에서 증착해야하는 문제점을 가지고 있으므로 기판온도를 100℃로 설정하였고, RF power를 50, 100, 150, 200 W로 변화를 주었다. 또한 저온에서 증착된 박막의 결정성 향상을 위해 진공 분위기, 400℃에서 1시간 동안 후열처리를 하였다. 이러한 AZO 박막의 증착 조건을 표 1에 정리하였다.

Si photodiode pn 접합 상부에 AZO 투명전도막의 증착을 위해 먼저 lift-off를 위한 포토 공정을 진행한 후 HF:Di water(1:100) 용액에 30초간 전처리공정을 실시하였다. 그 다음 RF magnetron sputtering법으로 pn접합 상부에 117 nm 와 352 nm 두께로 AZO 박막을 증착한 후 Al 전극을 증착하

표 1. AZO 박막 저온 증착을 위한 RF 마그네트론 스퍼터링 조건.

Table 1. Conditions of RF magnetron sputtering to deposit AZO thin films at low temperature.

파라미터	공정조건
타겟	ZnO:Al(Al ₂ O ₃ 2 wt%)
기판	Si, Glass(corning 1737)
초기압력(Torr)	8 × 10 ⁻⁶
작업압력(mTorr)	3, Ar
RF power(W)	50, 100, 150, 200
기판온도(℃)	100
pre-스퍼터링	10
시간(min)	
후열	분위기
처리	온도(℃)
	시간(hr)

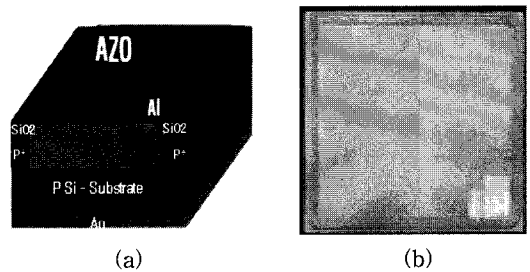


그림 1. AZO 투명전도막을 적용한 Photodiode의 (a) 구조 및 (b) 표면 이미지.

Fig. 1. (a) Structural drawing and (b) surface image of Photodiode with AZO thin film.

였다. Al 전극과 실리콘 사이의 오믹접촉을 위해 진공분위기에서 후열처리 공정을 실시하였다. 마지막으로 Back metal 전극인 금(Au)을 증착한 후 dicing 공정을 통해 칩을 분리하였다. 이렇게 제작된 소자의 구조는 1.6 mm × 1.6 mm 크기에 두께는 400 μm로 이루어졌으며, 소자 표면의 본딩 전극의 크기는 지름을 300 μm로 하였다. 그림 1은 본 연구에서 제작된 photodiode의 구조 및 표면 이미지를 나타낸다.

2.2 특성분석

RF Power를 파라메타로하여 증착된 AZO 박막의 단면 이미지 분석은 FE-SEM 장비를 사용하

여 분석하였으며, 증착된 AZO 박막의 빛 투과율을 알아보기 위해 Spectrophotometer를 이용하여 300 ~ 1100 nm 파장에 걸쳐 투과도를 측정하였다. 또한 전기적 특성은 홀 효과 측정 장비(HMS-3000)이용하여 AZO 박막의 비저항, 홀이동도, 캐리어농도를 측정하였다. 제작된 AZO 투명전도막을 적용한 Photodiode의 V_r - I_{ph} 특성을 확인하기 위해서 Semiconductor Parameter Analyser (HP 4155A)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 구조적 특성 분석

Si Photodiode의 표면에서 입사광의 반사에 대해서는 Si 결정의 굴절율이 3.5 이기 때문에 수직으로 입사하는 광에 대해서는 반사율이 30 %, 투과율이 70 % 이다. 이 30 %의 반사율을 줄이고 photodiode의 수광효율을 높이기 위해서는 반사방지막(anti-reflection coating)이 필수적이며, 반사방지막은 사용되는 파장대와 재료의 굴절율에 따라 두께가 선정되며, 다음 식에 의해 구할 수 있다[4,5].

$$Thickness = (\lambda/4n_r) \times (2a-1) \quad (1)$$

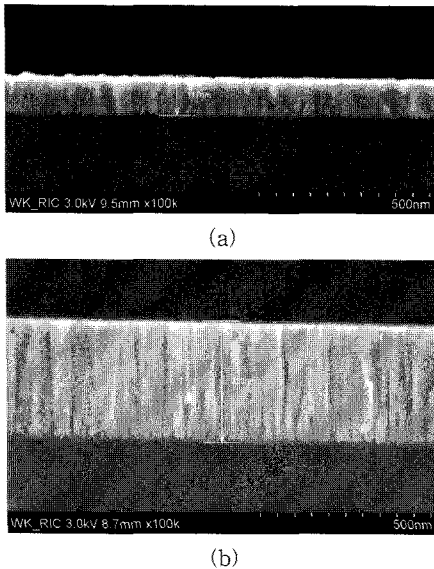


그림 2. AZO 박막의 FE-SEM 단면 사진. (a) 117 nm, (b) 353 nm
Fig. 2. FE-SEM cross-section image of AZO thin films. (a) 117 nm, (b) 353 nm

여기서, a 는 상수이며, n_r 은 반사방지막의 굴절율이다. 사용되는 파장대는 940 nm를 사용하고 AZO의 굴절율은 2.0 이므로, 반사방지막의 두께는 a 가 1일 때, 117 nm 이며, a 가 2일 때는 353 nm 로 결정할 수 있다. 그림 2는 RF magnetron sputtering으로 증착된 AZO 박막의 단면사진이다. 사진에서 AZO 박막의 구조가 매우 치밀함을 확인할 수 있으며, 또한 반사방지막 식에 의해 계산된 두께와 잘 일치함을 알 수 있다.

3.2 전기적 특성 분석

RF Power를 변화시키기에 따라 제조된 AZO 박막의 전기적 특성을 분석하기 위해서 Hall 효과 측정을 하였다. 그림 3은 AZO 박막의 RF power에 따른 증착률과 비저항의 관계를 보여주고 있으며, 그림 4는 RF power에 따른 캐리어농도와 이동도를 보여주고 있다. RF power가 50에서 150 W로 증가함에 따라 증착률이 4.7 nm/min에서 11.7 nm/min로 증가하였으며, 비저항은 $2.06 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ 에서 $1.35 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ 로 감소하였다. RF power가 증가함에 따라 증착률이 증가하는 이유는 RF power가 증가함에 따라 기판에 도달하는 스퍼터된 원자들의 에너지가 증가하기 때문으로 판단된다 [6,7]. 또한, RF power가 증가함에 따라 저항률이 감소하는 것은 RF power가 증가함에 따라 증착률이 증가하였고, 증착률이 증가함으로써 Zn/O 비율이 높아진다[8]. 따라서, interstitial Zn의 농도도 증가하며, 이로 인해 캐리어농도가 증가하여 비저항이

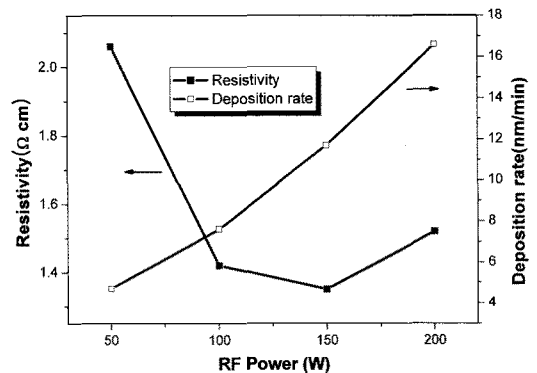


그림 3. RF power에 따른 AZO 박막의 증착률과 비저항.
Fig. 3. Deposition rate and resistivity of AZO films with different RF power.

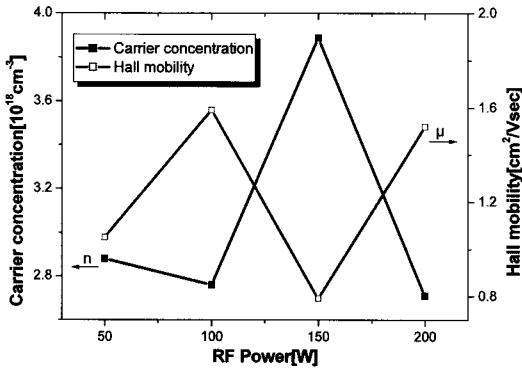


그림 4. RF power에 따른 AZO 박막의 캐리어농도와 이동도.

Fig. 4. Carrier concentration and Hall mobility of AZO films with different RF power.

감소한 것으로 판단된다. 그러나 그 이상의 전력에서 저항이 증가하는 이유는 과도한 증착물로 인한 Zn/O 비율이 감소된다[8]. 따라서, interstitial Zn의 농도가 감소하며, 이로 인해 캐리어 농도가 감소하여 비저항이 증가한 것이다. 150 W에서 비저항이 $1.35 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ 로 가장 낮았으며, 이때의 기체 압력과 기판온도는 각각 3 mTorr, 100 °C 이었다.

3.3 광학적 특성 분석

투명전극으로 AZO 박막을 응용하기 위해서는 광학적 특성이 전기적 특성과 함께 중요하게 다루어지고 있다. 특히 사용되어지는 파장대의 광투과율 특성이 매우 중요하다. 그림 5는 RF Power에 따라 제조된 AZO 박막의 투과율을 spectrophotometer로 분석한 것이다. AZO 박막은 RF power에 관계없이 약 360 nm에서 모든 시편들의 흡수단이 관찰되었으며, 가시광영역과 근거리적외선 영역에서 평균 90 % 이상의 높은 투과율을 보였다. 이는 그림 2의 단면 이미지에서 보는 바와 같이 박막의 구조가 치밀함으로 인해서 투과율이 높은 것으로 판단된다. 사용되는 파장대의 투과율은 그림 5에 나타낸 바와 같이 117 nm 두께의 AZO 박막은 약 300 nm 파장에서 흡수단이 관찰되었으며, 이는 AZO 박막의 결정이 형성되지 않은 것으로 판단된다. 그러나 XRD 분석결과, Si 기판에서는 AZO 결정이 형성되었음을 확인하였으며, 352 nm 두께에서는 940 nm 파장대의 영역에서 투과율이 더욱 증가된 것을 확인하였다. 따라서 AZO 박막의 광투과율은 두께에 의존하며 다른 증착조건에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 판단된다[9,10].

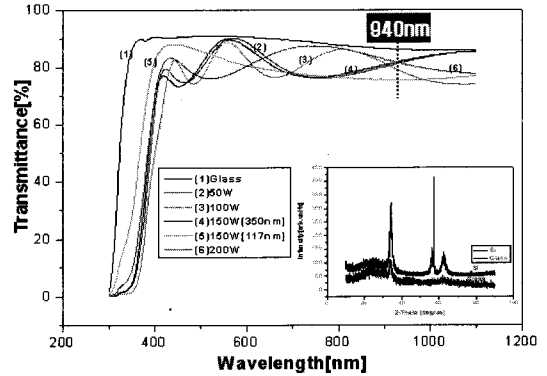


그림 5. RF power에 따른 AZO 박막의 투과율과 그리고 Si 기판 위에 증착한 AZO 박막의 XRD 패턴.

Fig. 5. Transmittance of AZO films with different RF power and XRD patterns of AZO films on Si and glass.

3.4 Photodiode에 적용 평가

AZO 박막의 최적화 저온증착공정조건은 압력 3 mTorr, 온도 100 °C, RF power 150 W 에서 전기적 광학적 특성이 가장 우수한 것을 확인하였으므로, 동일 공정조건으로 photodiode에 AZO 투명전도막을 증착하였다. 그림 6은 AZO 투명전도막이 적용된 photodiode의 V_R - I_{ph} 특성을 나타낸 것이다. 35 V reverse bias 전압에서 측정된 광전류는 기존의 SiN_4 의 photodiode에서는 16.43 μA 이었으나, AZO 투명전극이 적용된 photodiode는 19.22 μA 로 약 17 %의 광전류가 증가하였다. AZO 투명전도막이

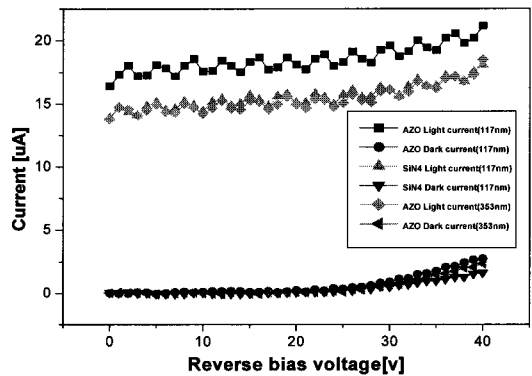


그림 6. Photodiode의 V_R - I_{ph} 특성 비교.

Fig. 6. V_R - I_{ph} characteristic of photodiode.

적용된 photodiode도 352 nm 의 두께에서보다 117 nm의 두께에서의 광전류가 약 3 μ A 높았으며, 이는 Photodiode에 AZO 투명전도막 적용 시에 117 nm의 두께가 최적임을 알 수 있다. 그러나 압전류 특성이 기존 photodiode보다 약간 높았으며, 이는 순방향전압강하인 VF가 AZO 투명전도막을 적용한 photodiode가 높기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 photodiode의 수광효율 향상을 위해서 기존의 반사방지막 재료인 SiN₄를 대체하여 RF magnetron sputtering법으로 AZO 투명전도막을 적용하였고, 그 결과 약 17 %의 수광효율이 향상되었다. 이때의 AZO 투명전도막의 sputtering 조건은 공정압력 3 mTorr, 기판 온도 100 °C, RF power가 150 W 이였고, 1.35×10^{-3} Ω cm의 낮은 비저항과, 90 % 이상의 높은 투과율을 나타내었다. Photodiode의 17 % 수광효율 향상은 IR Receiver Module의 동작거리를 증가시킬 것이다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 산학연협력 기업부설연구소설치지원사업의 연구결과로 수행되었음.

참고 문헌

[1] W. Lin, R. Ma, W. Shao, and B. Liu, "Structural, electrical and optical properties of Gd doped and undoped ZnO:Al(ZAO) thin films prepared by RF magnetron sputtering", Applied surface science, Vol. 253, p. 5179, 2007.

[2] 진은미, 신은철, 김태완, 박춘배, "AZO Anode 전극을 적용한 OLED 소자의 제작과 전기적·광학적 특성 분석", 전기전자재료학회논

문지, 20권, 4호, p. 357, 2007.

- [3] 김정민, 진은미, 박춘배, "LED 효율 향상을 위한 Texture구조 AZO 박막의 제조와 광학적 특성분석", 전기전자재료학회논문지, 19권, 10호, p. 901, 2006.
- [4] M. Barrera, J. Pla, C. Bocchi, and A. Migliori, "Antireflecting-passivating dielectric films on crystalline silicon solar cells for space applications", Solar energy materials & solar cells, Vol. 92, p. 1115, 2008.
- [5] E. O. Zayim, "Optical and electrochromic properties of sol-gel made anti-reflective WO₃-TiO₂ films", Solar energy materials & solar cells, Vol. 87, p. 695, 2005.
- [6] D. Song, "Effects of rf power on surface-morphological, structural and electrical properties of aluminium-doped zinc oxide films by magnetron sputtering", applied surface science, Vol. 254, No. 1, p. 4171, 2008.
- [7] D. J. Kwak, M. W. Park, and Y. M. Sung, "Discharge power dependence of structural and electrical properties of Al-doped ZnO conducting film by magnetron sputtering(for PDP)", to be published in Vacuum, p. 1, 2008.
- [8] S. S. Lin, J. L. Huang, and D. F. Lii, "The effects of r.f. power and substrate temperature on the properties of ZnO films", Surface and Coatings Technology, Vol. 176, p. 173, 2004.
- [9] 이세중, 윤현우, 김병섭, 이성욱, 박민우, 광동주, "DC 마그네트론 스퍼터법으로 제조한 ZnO:Al투명전도막의 특성", 대한금속재료학회지, 42권, 9호, p. 745, 2004.
- [10] T. David, S. Goldsmith, and R. L. Boxman, "Electro-optical and structural properties of thin ZnO films, prepared by filtered vacuum arc deposition", Thin solid films, Vol. 447-448, p. 61, 2004.