

Metal-Oxide-Semiconductor 광전소자

강길모¹, 윤주형², 박윤창³, 김준동^{1,a}

¹ 인천대학교 전기공학과

² 뉴욕주립 버팔로대학교 전기공학과

³ 나노종합기술원 특성평가실

Metal-Oxide-Semiconductor Photoelectric Devices

Kilmo Kang¹, Ju-Hyung Yun², Yun Chang Park³, and Joondong Kim^{1,a}

¹ Department of Electrical Engineering, Incheon National University, Incheon 406-772, Korea

² Department of Electrical Engineering, University at Buffalo, State University of New York, New York 14260, USA

³ Measurement and Analysis Division, National Nanofab Center (NNFC), Daejeon 305-806, Korea

(Received March 10, 2014; Revised March 20, 2014; Accepted April 8, 2014)

Abstract: A high-responsive Schottky device has been achieved by forming a thin metal deposition on a Si substrate. Two-different metals of Ni and Ag were used as a Schottky metal contact with a thickness about 10 nm. The barrier height formation between metal and Si determines the rectifying current profiles. Ag-embedding Schottky device gave an extremely high response of 17,881 at a wavelength of 900 nm. An efficient design of Schottky device may applied for photoelectric devices, including photodetectors and solar cells.

Keywords: Metal-oxide-semiconductor, Schottky junction, Silicon, Metal(Ag, Ni)

1. 서론

일반적인 p-n접합 태양전지는 실리콘 기판의 도핑 농도를 조절하여 고효율 광전소자 제작에 적합하다. 하지만 실리콘 기판에 고농도 도핑이 필요하기 때문에 고온 공정이 필요하고 제작과정이 길어 단가가 비싸며 [1], 도핑 중 유독성 물질로 알려진 PH_3 와 B_2H_6 가 사용되어 안전상에 문제가 있다.

쇼트키 접합 (Schottky junction) 광전소자는 금속

과 반도체의 접합으로 제작할 수 있으며 제작과정이 간단하고, 별도의 도핑 공정이 없기 때문에 저온 공정이 가능하여 제작 단가가 저렴하며 구성 물질의 높은 균질성은 조성 제어 (composition control)에 유리하다 [2].

효율 향상을 위해 금속 층에 InP (indium phosphide)를 채택하여 태양 스펙트럼에서의 이득과 빛 흡수 거리를 길게 하려는 시도와 [3], GaN이나 InGaN 물질을 이용하여 밴드 갭 특성으로 다양한 파장의 빛까지 포섭이 가능하고, 높은 전하 이동도를 갖으며, 구조물 형성 시 우수한 결정 구조를 [4] 이용하는 등 많은 연구가 진행되고 있다. 실험에 사용된 금속-산화물-반도체 (metal-oxide-semiconductor) 광전소자는 Schottky junction을 기반의 구조이다.

a. Corresponding author: joonkim@incheon.ac.kr

MOS (metal-oxide-semiconductor) 구조에서 산화물 층은 터널링 (tunneling) 효과를 제공하고 금속과 실리콘 접합부의 결함을 감소시켜준다고 알려져 있다 [5].

본 연구에서는 산화물 층이 터널링 효과를 제어할 수 있는 두께로 증착하여 금속과 반도체 사이에 더 높은 내부 전계를 형성할 수 있도록 디자인하였다. 쇼트키 접합 금속물질은 Ni과 Ag로 스퍼터링 (sputtering) 하였다. Ni은 낮은 가격이 장점으로 소자의 대량 생산에 유리하다 [6]. 반면 Ag는 단가가 높으나 우수한 전도성과 화학적 안정성이 특징이다 [7]. 서로 상반되는 두 물질이 MOS구조 형성 시 어떤 단면을 갖는지 알아보고, 결정 구조를 확인하였으며, 두 물질이 소자의 정류 특성과 광학적 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편 제작 과정

소자의 제작 공정 순서는 그림 1에, 완성된 소자의 모식도는 그림 2에 표시하였다.

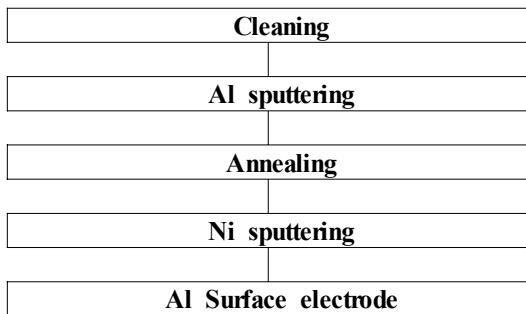


Fig. 1. Fabrication steps of MOS devices.

본 실험에 사용한 기판은 결정면 (100), p-type 실리콘(Si) 웨이퍼를 사용하였다. 실험에 앞서 실리콘(Si) 기판 세정작업은 acetone, methanol, deionized water에 5분 씩 진행한 후 N₂ blowing했다. 증착에 필요한 모든 작업은 magnetron sputter하였다. 후면전극 물질은 Al을 사용하였고 증착 조건은 진공도 3 mTorr에서 Ar 유동률 50 sccm, DC power는 300 W, 진공도 3 mTorr이고, 상온에서 15분 동안 세척된 Si 기판 위에 sputtering하였다.

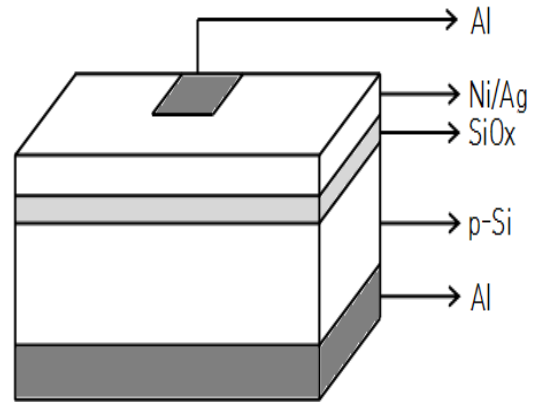


Fig. 2. Device structures.

산화막 (SiO_x) 형성은 건식 열산화법으로 실행했다. 증착조건은 진공도 1.8 mTorr에서 산소 (O₂) 유동률 50 sccm이고, 온도 600°C에서 15분 동안 sputtering하여 SiO_x 형성 두께는 3 nm로 형성하였다. SiO_x 형성 이후 증착한 금속은 Ni과 Ag로 공정 조건은 두 물질이 동일하여 진공도 5 mTorr에서 Ar 유동률 50 sccm, DC power 300 W이고, 증착시간은 Ni에서 5분, Ag에서 10초로 차이를 두어 두 물질이 Si기판 위에 동일한 두께인 10 nm로 적층되도록 하였다. 전면전극물질은 후면전극과 동일한 Al로 후면전극 증착과 동일한 조건에서 실험하였다.

2.2 측정 방법

TEM분석과 EDS 분석을 실시하여 완성된 소자의 산화물을 포함한 층 구조를 확인하고, 결정 방향을 관찰하였다. Dark I-V 측정으로 누설 전류 및 다이오드 특성을 관찰하여 소자의 정류 특성을 측정하였다. Light on/off ratio를 측정하여 광전 소자로서 동작 특성을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 EBD와 Si-Metal 계면의 작용

금속과 반도체 물질은 금속의 페르미 준위와 반도체의 전자 친화도 만큼의 장벽 높이가 있다.

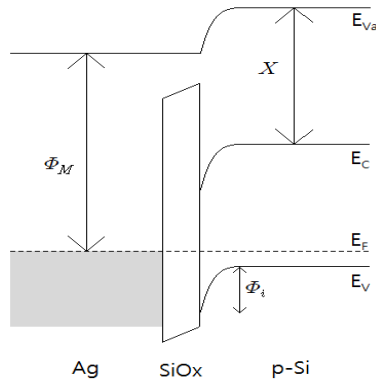


Fig. 3. Energy diagram of metal/Si interface.

반도체 물질과 Schottky 접합을 이룰 경우 금속과 반도체의 페르미 준위 (Fermi level) 차이 만큼의 내부 전계 (built-in potential)를 얻을 수 있다. p-Si 기판과 Ag와 Ni의 장벽 높이 (barrier height)와 내부 전위 (built-in potential)를 가시적으로 확인하기 위한 EBD (energy band diagram) 모식도를 그림 3에 표시하였다. 금속과 반도체 접합 장벽 높이 (barrier height)는 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다 [2].

$$\Phi_B = X - \Phi_M + \frac{E_g}{q} \quad (1)$$

Φ_B 는 장벽 높이 (barrier height), X 는 전자친화도 (electron affinity), Φ_M 는 금속 페르미 준위 (Fermi level), E_g 은 에너지 대역폭 (band gap)이다.

접합으로 인해 발생한 내부 전위 (built-in potential)는 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$\Phi_i = X - \Phi_M + \frac{E_C - E_{F,P}}{q} = \Phi_B - V_t \ln \frac{N_v}{N_a} \quad (2)$$

Φ_i 는 내부 전위 (built in potential), E_C 는 전도대 준위 (conduction band), $E_{F,P}$ 는 p-Si의 페르미 준위 (Fermi level of p-Si), E_g 는 에너지 대역폭 (energy band gap), V_t 는 열 전압 (thermal voltage)이다. 금속 물질의 장벽 높이 (Φ_B)와 내부 전위 (Φ_i)는 Ag가 0.69 eV, 0.555 eV이고, Ni가 0.67 eV, 0.53 eV로 금속과 반도체의 단순 접합은 내부 전위가 작다. 실리콘 표면에 있는 원자들은 결합 파트너 (bonding partner)를 찾지 못하고 화학적으로 불안정한 상태에 있는데 이를 dangling 결합이라고 한다. Dangling 결합은 광생성 전하와 재결합으로 라이프 타임 (life time)을 저해하는 결함 (defect)을 발생시킨다.

산화물 층은 SiOx는 실리콘의 dangling bond에 산소 (oxide)가 결합한 형태로 표면을 안정적으로 만들어준다. 산화막 층은 금속과 반도체 결합 간에 장벽 높이 (barrier height)를 형성하여 단면에서 터널링 효과 (tunneling effect)가 일어나지 않을 정도의 두께를 갖는다면, 내부 전위를 상승시키는 효과가 있다.

3.2 Metal-Oxide-Si 계면 분석

완성된 시료의 물질별 증착 상태를 TEM (transmission electron microscope) 이미지로 그림 4(a)에 나타내었다. 실리콘 기판 위에 산화물과 금속이 층 구조로 형성되었음을 확인할 수 있다. 산화물 층을 확대하여 중점적으로 관찰하기 위한 이미지를 그림 4(b)에 표시하였다. 산소에 대한 반응성이 낮은 Ag의 특성 때문에 SiOx 층은 Si 표면과 금속 층과 반도체 층 사이에서 뚜렷한 경계를 갖고 있었다.

시료의 결정 상태를 SAED (selected area electron diffraction) 이미지를 그림 4(c)에 표시하였다. 100 결정 방향의 실리콘은 격자 구조의 원자 배열을 하고 있고 원형으로 배치되어있는 Ag 결정을 확인할 수 있었다.

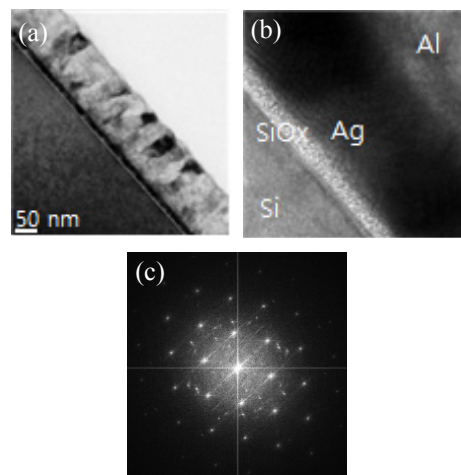


Fig. 4. (a) TEM image of sample interface, (b) enlarged TEM image, and (c) SAED image.

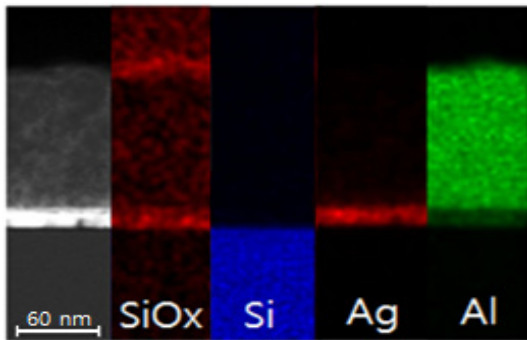


Fig. 5. EDS mappings for elements.

3.3 화학 분석

완성된 Ag-Oxide-Si 시료를 구성하는 층간 물질을 화학적인 기법으로 분석한 EDS (energy dispersive spectroscopy) mapping 이미지를 성분별 색 이미지로 그림 5에 표시하였다.

가장 좌측에는 시료의 전체적인 단면 이미지이고 우측으로 진행하면서 차례로 SiOx층, Si층, Ag층, Al층을 확인하였다. SiOx 층이 Si와의 뚜렷한 경계를 이루고 있음을 확인할 수 있었다. 원자별 peak 중복이 심한 EDS mapping의 특성상 Ag층 영역이 다른 층 영역에도 중복되어 나타나기도 했으나 TEM 분석에서 Ag층은 금속 산화물이나 Al과의 혼합물을 형성하지 않았음을 알 수 있었다.

3.4 Dark I V 특성

소자의 다이오드 특성을 알아보기 위하여 dark current-voltage 측정을 하였고 결과를 그림 6(a)와 (b)에 그래프로 정리하였다. 전압 1 V에서 생성된 전류의 크기는 Ag-SiOx-Si의 경우 0.1 A이고, Ni-SiOx-Si에서 0.01 A로 Ag가 증착된 시료에서 더 큰 순방향 전류 (forward current)가 발생하였다.

역방향 바이어스 (reverse bias)에서 발생하는 전류는 -1 V에서 Ag가 -10 mA이고, Ni은 -1 μ A로 Ni이 증착된 시료에서 누설전류가 적게 발생했다. on/off ratio를 정의하여 누설 전류와 순방향 전류의 비를 비교해 보면

$$R = \frac{|I_V|}{|I_{-V}|} \quad (3)$$

R 은 on/off ratio일 때 Ni에서 19599.95이고, Ag에서 50.3734가 산출되었다. 바이어스에 의한 발생 전류량은 Ag가 Ni보다 7.438배 이상 높으나 정류 특성 (rectifying characteristic)은 Ni이 안정적이었다.

3.5 Light on/off 응답 특성

시료의 주기별 빛에 대한 전류 응답을 알아보기 위하여 light on/off response 측정을 하였고 결과를 그림 7(a), (b)와 그림 8에 표시하였다. 그림 7(a)에서 Ni이 증착된 시료는 900 nm 파장의 빛에서 가장 큰 감응을 하였으며 0.13 μ A의 전류를 발생시켰다. 실험에서 Ni이 증착된 시료는 Ag에서 보다 빛에 대한 안정도가 높았다. Ag가 증착된 시료는 600 nm 파장에서 가장 큰 감응을 하였고 광전류량은 2.5 μ A에 달했다. Ag에서 누설전류가 큰 이유는 Ag는 빛의 반사도가 타 금속에 비해 크고 절연물질 표면과 결합 시에 lateral migration을 일으킬 가능성이 있기 때문이다 [8]. 이로 인하여, 암전류의 값을 상승시켜서 상대적으로 광전류 대비의 반응도를 저감시킨다. 그림 7(b)에서와 같이 광전류가 크더라도, 누설에 의한 암전류 (2.1 μ A) 상당히 큰 값을 가지므로 반응도의 저감을 가져온다. 다른 파장에 대해서는 감응을 구별할 수 없을 정도의 노이즈 수준 반응을 보였다. 그러나 Ni/SiO₂/p-Si 소자는 암전류의 값이 상대적으로 낮아서, 광반응 전류에 대한 반응이 매우 크게 나오는 것을 확인하였다.

그림 8에서와 같이 가시광선 영역 중에서도 적색 파장 (600 nm)과 근자외선 파장 (900 nm)에서 매우 큰 반응도를 보였다. 단파장인 400 nm에서의 반응도가 낮은 이유는 400 nm 파장의 높은 에너지 (~3 eV)와 관련이 있다. 실리콘 물질의 에너지 대역폭이 1.12 eV인 것을 고려하면, 400 nm 파장의 에너지는 상대적으로 매우 크며, 실리콘의 표면에서만 흡수되게 된다. 400 nm 파장에 대한 실리콘에서의 흡수 길이 (absorption length)는 100 nm 정도로 매우 작다. 즉, 단파장의 흡수는 실리콘의 100 nm 깊이에서 모두 흡수되어 쉽게 재결합 (recombination)으로 손실되게 된다. 또한, 장파장인 1,100 nm를 고려하면, 해당 파장의 에너지는 1.1273 eV로 대부분 실리콘 영역을 통과하게 된다. 1,100 nm 파장의 실리콘 흡수 길이는 1 mm 이상으로 상당히 크다. 실리콘 웨이퍼의 두께가 300 μ m인 것을 고려하면, 상당 부분의 포톤 에너지 (photon energy)가 흡수되지 않을 수 있다. 또한 실리

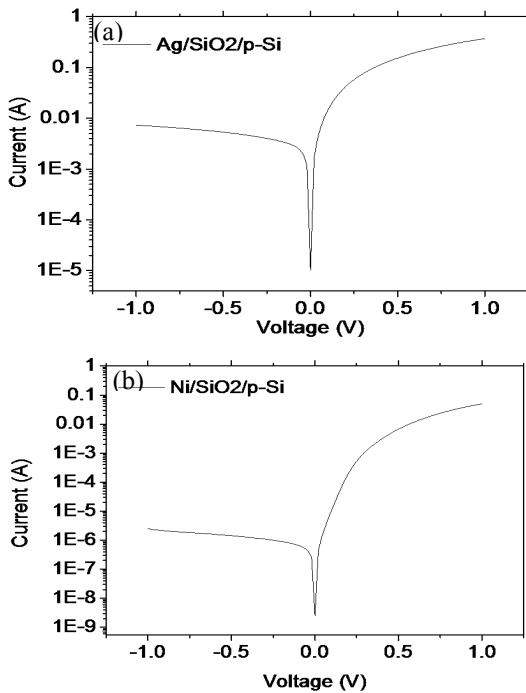


Fig. 6. (a) Dark I-V characteristics of Ag/SiO_x/Si device and (b) dark I-V characteristics of Ni/SiO_x/Si device.

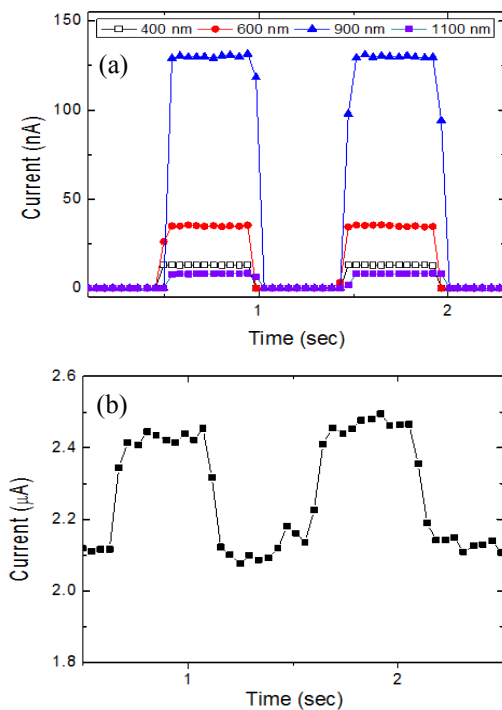


Fig. 7. (a) Light on/off response of Ni/SiO_x/Si device and (b) light on/off response of Ag/SiO_x/Si device.

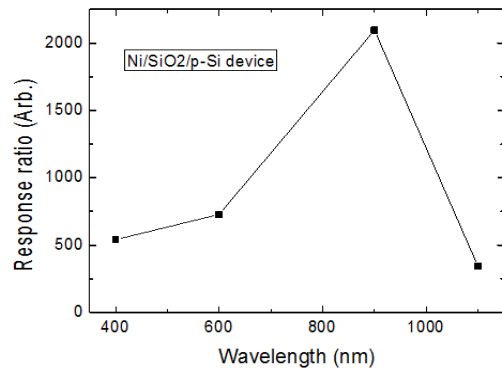


Fig. 8. Enhancement of each wavelength on the Ni/SiO_x/Si device.

큰 기관의 깊숙한 곳에서 생성된 전자의 이동 길이 또한 길어지게 되므로 재결합에 의한 손실이 크게 된다. 이에 따라, 장파장에서의 반응도가 감소하게 된다. 적색과 근적외선 파장 (600~900 nm)에 대해서는 실리콘에서의 흡수 길이가 1~10 μm 정도로 해당 파장에 대한 실리콘에서의 완전한 흡수가 이루어지며 입사한 파장에 의해 발생한 캐리어 (photo-generated carriers)의 포집도 효과적으로 이루어질 수 있다. 이에 따라 광전소자가 해당 파장에서 높은 감응도를 보이게 된다.

4. 결론

이번 연구에서는 Schottky 다이오드를 제작하여 시료의 계면을 확인하고 다이오드 특성과 광학적 특성을 확인하였다. 우선 sputtering 공법으로 나노 수준의 얇은 산화물과 금속 박막을 얻을 수 있었고 층간 구분이 확실하였음을 TEM과 EDS를 통해 확인하였다. 제작된 소자는 가시광선 파장대에서 큰 감응을 일으켰고 600 nm와 900 nm 사이의 파장에서 가장 큰 감응을 일으켰다. Ag-Schottky 소자는 Ag의 우수한 전기 전도성은 큰 광전류를 발생시키지만, 누설에 의한 암전류의 값이 또한 상승하여 상대적으로 낮은 광반응도를 보였다. 그러나 Ni-Schottky 소자는 우수한 다이오드 특성을 보이며, 매우 낮은 정도의 암전류값을 유지한다. 이에 의해 암전류 대비-광전류와의 비 (ratio)가 매우 커서 우수한 광전 반응도를 나타내는 것으로 확인되었다. 이러한 Ni-Schottky 소자는

파장대별로 다른 감응도를 나타내었는데, 이는 해당 파장에 대한 실리콘에서의 흡수 길이와 관련이 있는 것을 확인하였다.

본 연구를 통하여 금속과 실리콘의 계면관계를 분석하였으며 입사광의 파장대별 반응에 대한 상관관계를 분석하였다. 이를 통하여, 향후에는 금속의 선택과 두께를 조절하여 향상된 광전소자를 개발할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 인천대학교 2013년도 자체연구비 지원사업에 의해 연구되었음.

REFERENCES

- [1] C. Y. Liu and U. R. Kortshagen, *Nanoscale Research Letters*, **5**, 1253 (2010).
- [2] S. H. Hong, J. H. Yun, H. H. Pakr, and J. Kim, *Appl. Phys. Lett.*, **103**, 153504 (2013).
- [3] K. P. Pande, *IEEE, ED-27*, **4** (1980).
- [4] O. Janil, I. Ferguson, C. Honsberg, and S. Kurtz, *American Institute of Physics*, **91**, 132117 (2007).
- [5] Y. Uehara, J. Watanabe, S. Fujikawa, and S. Ushioda, *Phys. Rev. B*, **51**, 2229 (1995).
- [6] E. J. Lee, D. S. Kim, and S. H. Lee, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, **74**, 65 (2002).
- [7] A. Yakimov and S. R. Forrest, *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 1667 (2002).
- [8] H. Kim, J. Cho, Y. Park, and T. Y. Seong, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 092115 (2008).