

다공성 실리콘위에 증착된 Cu 박막의 구조적 물리적 특성

홍광표, 권덕렬, 박현아, 이종무†

인하대학교 공과대학 재료공학부
(2003년 5월 30일 접수)

Structural and physical properties of thin copper films deposited on porous silicon

Kwang-Pyo Hong, Duk-Ryel Kwon, Hyun-Ah Park, and Chongmu Lee†

Department of Materials Science and Engineering, Inha University, Inchon 402-75, Korea

(Received MAY 30, 2003)

요 약

다공질 실리콘(PS)기판 위에 rf-스퍼터링법으로 10~40 nm의 두께의 반 투과성 구리박막을 증착하였다. PS는 p형 (100) 실리콘 웨이퍼를 기판으로 50mA/cm²의 전류밀도를 사용하여 전해 에칭법으로 양극 산화하여 제작하였다. PS층과 Cu박막의 미세구조를 분석하기 위하여 SEM, AFM 그리고 XRD 분석을 시행하였다. AFM 분석결과 Cu 박막의 RMS roughness 값은 약 1.47nm로 Volmer-Weber 유형의 결정립 성장을 보였으며, 결정립의 성장은 (111) 배향성을 나타냈다. PS층의 PL 스펙트럼은 blue green 영역에서 관찰되었고, Cu 박막 증착 후 0.05eV의 blue shift가 나타났으며, 약간의 강도저하를 보였다. PS/Cu 접합구조의 FTIR 스펙트럼은 주 피크변화는 없으나 전반적인 강도의 감소를 보였다. I-V 특성곡선으로 본 PS/Cu 접합구조는 ideality factor가 2.77이고 barrier의 높이가 0.678eV인 Schottky 유형의 다이오드 특성을 보였다. PS/Cu 접합구조로 만든 다이오드 제조로 EL특성을 관찰할 수 있었다.

주제어 : 구리박막, 다공성 실리콘, SEM, AFM, XRD, PL, FTIR

Abstract

Thin transparent Cu films in the thickness range of 10~40 nm are deposited by rf-magnetron sputtering on porous silicon (PS) anodized on p-type silicon in dark. Microstructural features of the Cu films are investigated using SEM, AFM and XRD techniques. The RMS roughness of the Cu films is found to be around 1.47 nm and the grain growth is columnar with a (111) preferred orientation and follows the Volmer-Weber mode. The photoluminescence studies showed that a broad luminescence peak of PS near the blue-green region gets blue shifted (~0.05 eV) with a small reduction in intensity and therefore, Cu-related PL quenching is absent. The FTIR absorption spectra on the PS/Cu structure revealed no major change of the native PS peaks but only a reduction in the relative intensity. The I-V characteristic curves further establish the Schottky nature of the diode with an ideality factor of 2.77 and a barrier height of 0.678 eV. An electroluminescence (EL) signal of small intensity could be detected for the above diode.

Key Words : Thin Cu film, Porous silicon, SEM, AFM, XRD, PL, FTIR

† E-mail : cmlee@inha.ac.kr

1. 서 론

현재 고부가가치 소자인 논리소자(마이크로프로세서, application specific IC 등) 뿐만 아니라 Giga DRAM급 이상의 차세대 메모리 반도체소자의 성능 향상을 위하여 Al 배선을 대신하여 낮은 전기저항 ($\sim 1.72 \mu\Omega\text{-cm}$)과 전하이주(electromigration)에 대한 내성이 뛰어난 Cu를 논리소자와 메모리소자에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 반면에, L.T. Canham에 의해 발견된 PL특성 때문 [2]에 나노단위의 기공(pore)으로 인해 Quantum Sponge로 알려져 있는 다공성 실리콘(PS ; Porous Silicon)이 LED나 waveguide, field emitter, 광학 memory 같은 여러 전자소자에서 중요한 위치를 차지하게 되었다. PS는 microcapacitor나 절연층 같은 마이크로 전자기학, heteroepitaxy의 완충층(buffer layer)나 SOI wafer 같은 wafer 기술 및 광전기화학적 cell 등의 분야에서 다양한 응용이 시도되고 있다 [3]. 위의 응용분야를 고려해 본다면, PS 층 위에 금속 박막을 증착하는 것은 EL 특성을 나타내는 실제 device 제조에 있어 또 다른 관심거리가 된다 [4-8].

최근 몇 년 동안 EL 특성 및 gas sensor로의 응용을 위한 다이오드 구조의 device를 개발하기 위해 PS층위에 금속을 증착하는 연구가 많이 행하여졌다. Al, Au, In, Ni, Cu 등과 같은 금속과 ITO(indium tin oxide), PVO(phenylene vinylene oligomer) 같은 전도성 전극을 증착하기 위해 주로 전착(electrodeposition) [9-11], electroless plating [12-14], evaporation [15-17] 등의 방법을 사용해 연구되어지고 있다. Jeske 등 [9]은 PS 위에 구리를 전기도금하여 효율적으로 pore를 채우고 결과적으로 정류 작용을 일으키는 이중접합에 대한 연구결과를 발표하였으나 PL이나 EL 특성은 나타나지 않았다. Yamani 등 [14]은 electroless plating에 의해 성장된 Cu 박막을 증착시킨 PS로부터 UV reflectance (3.3-3.6 eV) 같은 bilk의 회복(recovery)에 대해 연구하였다. 일반적으로 pore를 채우는 것이 효율적이기는 하지만, 전착(electrodeposition)같은 wet chemical 방법은 표면을 오염시키며 불안정한 PS 표면위에 부가적으로 damage를 일으킨다. 그러므로 진공에서 금속을 증착시키는 것이 PS 특성을 유지시키기 위해 더 효과적이다.

PS위에 금속을 증착시키는데 있어서 얇은 두께와 광학적 투명도(optical transparency)를 동시에 얻어야 하는 문제점이 있다 [7]. 따라서 이 두 가지 특성에 대한 적절한 조절이 필요하다. Cu가 확산능이 뛰어나 Si기반의 device 성능을 저하시킨다는 것이 이미 알려진 사실이지만 [18, 19], TiN 같은 효과적인 확산 방지막(diffusion barrier)을 사용함으로써 단결정 웨이퍼기판에서 뚜렷한 성능의 개선이 나타난다는 것이 최근에 밝혀졌다 [1]. 그러나 아직까지는 PS위에 구리를 증착시키는 것이 그리 만족스럽진 않은 실정이다. 박막의 기계적, 물리적, 화학적 성질은 결정립도와 같은 미시구조적 특성에 의해 영향을 받고, density와 집합조직(texture)에 손상을 줄 수도 있다. 그러므로 PS층위의 Cu를 증착하기 위해 이러한 부분에 대한 적절한 조사가 필요하다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 PS층위에 증착시킨 Cu 박막의 구조적·물리적 성질에 대해 알아보았다.

2. 실험방법

시편은 전처리 세정으로서 아세톤(98 wt%)용액에 담겨 초음파세척을 실시 하였다. PS의 제작을 위하여 p형(100) 실리콘 웨이퍼(저항 $\sim 30 \Omega\text{-cm}$, 두께 $\sim 500 \mu\text{m}$)를 사용하였고, 균일한 전기장을 걸어주기 위해 뒷면에 알루미늄을 rf-스퍼터링 방법으로 10분간 약 500nm를 증착하고, 음접촉을 위하여 430°C에서 5분간 열처리하였다. 이 시편은 불산 (48 wt%)와 에탄올(99 wt%) 용액을 1:1로 섞어서 전해에 침범으로 양극산화하여 제작하였다. 전류밀도는 $50 \text{mA}/\text{cm}^2$ 로 고정시켰으며 백금을 음극으로 사용하였고 에칭 시간은 3분으로 하였다. 양극산화 후에 PS층에 낮은 표면장력과 화학적 반응을 최소화하기 위해 펜탄과 증류수(저항 ; 18.5 M Ω)로 번갈아 여러 번 세척하였다. PS층의 cracking 현상 및 벗겨짐 현상을 막기 위하여 50°C 정도의 hot plate에서 건조시켰으며, PS층의 porosity는 $\sim 75\%$ 로 나타났다. 스퍼터용 Cu(순도 ; 99.9%) 타겟을 사용하여 불활성기체인 아르곤 가스(30sccm) 분위기에서 300W의 일정한 전압을 인가하고 0.05 torr의 공정압력에서 rf-스퍼터링법으로 Cu 박막을 증착하였다. 증착하는 동안 보다 균일한 두께를 얻기 위해 기판을 3rpm의 속도로 회전

시켰다. 공정시간은 다양한 박막 두께와 광투과도를 얻기 위하여 10~30 초로 변화시켰다. PS층과 Cu 박막의 미세구조를 살펴보기 위하여 SEM(scanning electron microscopy; Hitachi S 4200) 분석을 실시하였고, surface profile을 알아보기 위하여 AFM(atomic force microscopy; Topmetrix-Accurex II) 분석을 행하였다. Cu 박막의 두께는 주로 Dektak-3로 측정하였다. 코닝유리에 증착된 Cu에 광투과도는 spectrophotometer(Carry 500)로 측정하였다. PS의 PL(Photo-luminescence)특성을 관찰하기위해 엑손 램프를 광원(방출파장 ; ~300nm)으로 하는 PL 측정장비(Shimadzu RF-5301PC)를 이용하였다. PS층과 Cu/PS내의 결합 구조를 관찰하기 위하여 FTIR(Fourier Transform Infra Red, Nicolet : Impact 410) 흡수 스펙트라를 사용 하였다. Cu/PS 이중접합의 I-V 특성곡선은 electrometer (Kiethley 6517A)를 사용하여 측정하였고, 이 이중접합에 대한 EL 특성은 Silicon photodiode (Hamamatsu Photonocs K.K)로 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

PS는 전기 화학적 변수 와 실리콘 웨이퍼의 종류에 따라서 다양하게 제작될 수 있다 [3]. 기판의 결정성과 거칠기는 Cu 박막의 결정립 성장에 있어 중요한 역할을 한다. Fig. 1(a)에 제시한 SEM(scanning electron microscopy) 사진에서 PS 기공의 크기는 IUPAC 정의에 따라 mesoporous(2-50 nm) 및 nanoporous(<2 nm) 범위에 해당되는데, SEM 분석은 나노단위에서는 해상도(resolution)가 뛰어나지 않음을 감안할 때 정확한 기공의 크기는 알 수 없었다. SEM의 단면 촬영결과 PS층의 두께는 ~3 μm 정도였는데, PS층의 두께가 이 이상이 될 경우 저항이 매우 증가하게 되어 전기적 특성에 나쁜 영향을 미치게 된다 [20]. 본 실험에서는 Cu를 증착하기 전 PS층 두께를 중간범위 정도인 ~3 μm 로 결정하였고 Sputtering 시간을 10-30 초, Cu박막의 두께는 10-40 nm로 하였다.

Fig. 1 (b)~(c)의 SEM 평면사진에서 보면 Cu 박막은 연속되지 않은 작은 결정립들로 구성되어 있다. 초기 10초간의 증착과정에서는 결정립은 두 개의 분명한 다른 크기로 이루어져 있다. 이것은 아마도 나노단위 실리콘 cluster의 불균일한 크기분포와

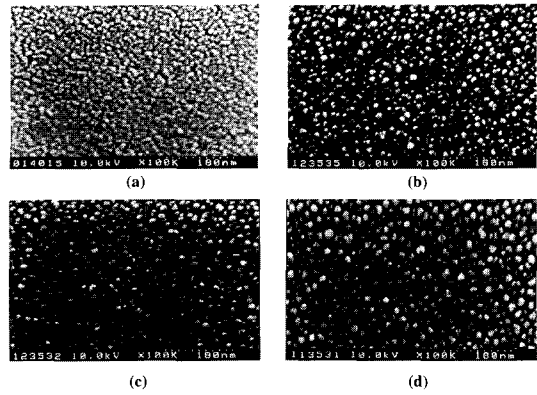


Fig. 1. Plan-view Scanning Electron Micrograph(SEM) (a) of the porous silicon(PS) substrate and of thin Cu films deposited on the PS substrate for (b) 10 sec (c)20 sec (d) 30 sec.

PS층의 나노단위의 기공들 때문일 것으로 짐작된다. 증착시간에 따라 결정립이 성장하는 것을 살펴보면, 30초 동안 증착하였을 때 Cu 박막의 결정립은 비교적 원형으로 균일하게 성장하였다. Island 결정립계의 경우는 3면 혹은 6면 대칭으로 나타났는데 이러한 구조는 이전의 단결정 실리콘 웨이퍼에 대한 초박막(ultrathin) Cu의 증착에 관한 연구들 [21-22]과도 일치하는 결과이며, 두께가 증가함에 따라 Volmer-Weber 유형의 결정립 성장을 보였다.

Fig. 2(a)의 SEM 단면사진을 보면 PS층위에 Cu가 성장하는 동안 아직 기공으로의 침투가 활발하지 않은 부드러운 계면(interface)이 있으며, 성장은 주로 기판에 수직하여 일어나고 있음을 Fig. 1(d)의 SEM 평면사진에서 살펴볼 수 있다. PS위에 증착된 Cu 박막의 AFM(Atomic Force Microscopy) 사진을 Fig. 2(b)에 나타내었다. 이 사진에서 Cu 박막의 거친 표면들이 관찰되는데, RMS roughness 값이 ~1.475 nm인 것으로 미루어 볼 때 국부적으로 거친 부분이 형성되었음을 의미하며, RMS roughness 값이 초기에는 증가하다가 차츰 감소하는 Volmer-Weber 유형의 결정립 성장 [21]을 보였다. 단결정 실리콘 웨이퍼 기판에 대한 AFM 분석결과도 비슷한 현상이 관찰되었다 [1].

PS 표면의 결정성은 Cu 박막의 배향성을 예측할 수 있는 토대가 된다. XRD(X-ray diffraction) 분석은 전자현미경보다 부정확하긴 하지만 PS의 결정성을

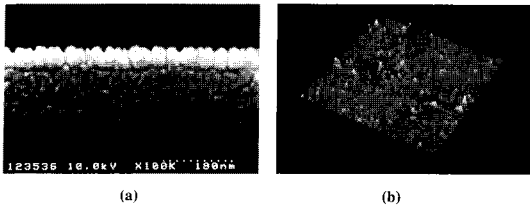


Fig. 2. (a) Cross sectional SEM of thin Cu films deposited on PS for 30 sec and (b) AFM of Cu films deposited on PS.

평가할 수 있는 편리한 방법이다. 양극산화법으로 제조된 PS 기판은 Fig. 3(a)에서 보면 55.36°의 (311) 배향을 나타내며 넓은 반치폭으로 보아 나노단위의 결정립이 형성되었음을 보여준다. 나노단위에서도 적용할 수 있을지는 의문이지만 XRD 피크 폭으로부터 결정립 미세효과를 Scherrer equation을 이용하여 추론해 본 결과, 결정립의 크기는 ~1.68 nm였다. PS층에 나노단위 기공이 상당수 존재한다면 그것은 PS의 격자 팽창을 초래하고 후에 증착되는 막의 stress를 줄일 수 있다 [23]. Fig. 3 (b)~(d)에 나타나는 Cu 박막에 대한 XRD 피크는 43.4°(2θ)에서 한 개의 약한 피크만을 보이고 있는데, 이것은 Cu 박막이 fcc 구조를 갖고 (111)방향으로 성장했음을 의미한다. Cu 박막에서 보여지는 비등방성(anisotropy) 성질의 변이(variation) 때문에 박막의 결정학적 구조가 특별한 관심대상이 된다. Cu는 인접한 12개의

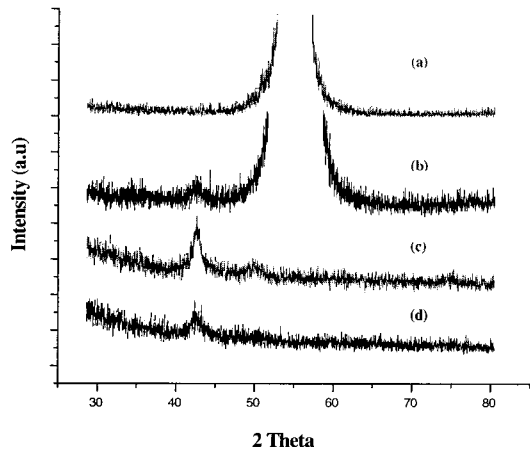


Fig. 3. XRD of (a) a PS layer, (b) Cu on PS (100), (c) Cu on the glass deposited for 30 sec and (d) Cu on the glass deposited for 60 sec

원자가 묶여있는 fcc구조인 반면에, 실리콘은 tetrahedral 형태로 인접원자에 4개의 결합이 형성된 diamond cubic 구조이다. (100) 방위에서는 각 원자는 위에 한 원자와 아래에 2개의 원자에 묶여있다. 그러나 (111)방위에서는 각 원자는 위에 한 원자와 아래에 3개의 원자가 묶여있다. PS층 위에서 Cu가 성장하는 동안 Cu/Si 계면은 Cu가 (100)이나 (111) 중 유리한 방위를 결정해주는 중요한 역할을 한다. 표면에 너지의 관점에서 보면 조밀충진된 (111) 배향의 결정립이 더 많이 발견되어야 한다. Gao 등 [21]은 (100) Si 기판에 Cu 박막을 sputtering하였을 때 (111) 배향의 결정립들을 더 많음을 확인하였으며, 단결정 (100)실리콘 웨이퍼 위에 열적으로 Cu를 evaporation시켰을 때 비슷한 현상을 발생하는 것을 Benouattas 등이 발견하였다 [25].

PS위에 증착된 금속박막의 광투과도는 LED device의 효율성 문제에 있어서 중요한 변수이다 [4]. 그러나 광투과도만을 위하여 금속층을 너무 얇게 입힌다면 높은 면저항을 일으키게 된다 [26]. 상온에서 Cu의 평균자유경로는 ~39 nm이다. 그러므로 40 nm도 안되는 Cu 박막은 높은 면저항을 일으킬 것임을 쉽게 예측할 수 있다. 저항의 크기는 결정립의 성장형태와 결정방위에 의존한다. Fig. 4에서 보면 코닝유리위에 증착된 Cu 박막은 가시광 영역에서 평균적으로 40% 보다는 높은 광투과도를 보여준다.

Fig. 5는 PS 표면에 대한 PL 스펙트럼이다. blue green 영역인 2.346 eV (526 nm)에서 넓은 폭을 갖는

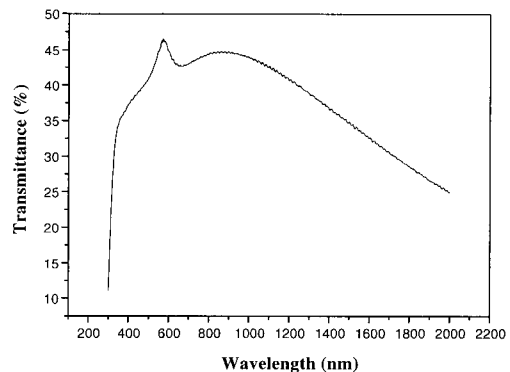


Fig. 4. A plot of transmittance vs. wavelength for the Cu film deposited on glass for 30 sec.

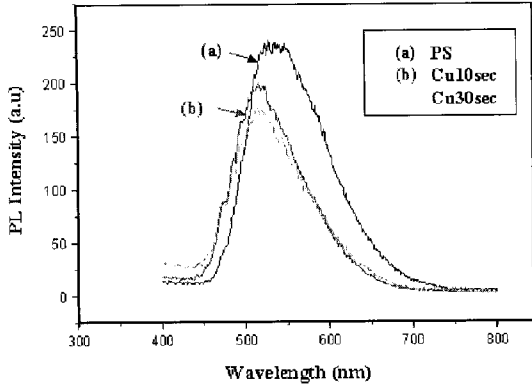


Fig. 5. PL spectra of the as-prepared PS and the PS/Cu structure with various deposition times

피크가 관찰되었다. 96nm에 이르는 큰 반치폭(FWHM)은 나노단위의 기공과 wire의 불균일한 분포와 연관되어 있으며 표면의 복합적인 성질과도 관련된다.

10초 동안 증착된 Cu 박막은 ~16% 정도의 작은 강도의 감소가 발견되었지만 피크 위치는 2.396eV (515.7nm)로 이동하였다. 이 0.05eV의 blue shift는 Cu 박막이 증착될 때 영향을 받기 쉬운 나노단위 결정성이나 PS의 불균일한 기공과 wire에 의한 것으로 여겨진다. Cu 박막의 두께가 더 증가한 경우 강도나 피크위치가 거의 변화하지 않았고 PL 스펙트럼의 반치폭(30분 동안 Cu 증착시)은 92nm로 줄어들었다. 화학조성의 확인을 위해서 PS와 구리박막이 증착된 PS의 IR스펙트럼을 조사하였다. PS의 FTIR 스펙트럼(Fig. 6)으로부터, 서로 다른 강도를 가진 5개의 피크를 관찰 할 수 있다. 강한 강도를 보이는 626.75cm⁻¹에서의 피크는 Si₃-SiH계의 SiH로 추정되며, 665cm⁻¹에서의 낮은 강도를 나타내는 피크는 SiH wagging에 의한 것으로 여겨진다. 908.59cm⁻¹에서도 강도가 작은 피크가 관찰되는데 SiH₂의 scissor mode로 생각할 수 있다. 2111.67cm⁻¹의 강도가 큰 피크는 Si₂H-SiH계의 SiH stretching mode 때문이며 반면, 2090.15cm⁻¹에서 나타난 피크는 Si₃-SiH에서 SiH stretching mode에 의한 것으로 추정된다. 수많은 나노단위 pore의 생성으로 인해 PS 층의 내부 표면적은 매우 크게 증가하는데, 이 실험에서 사용한 전류밀도를 감안할 때 어느 특정지역의 표면은 600m²/cm³[28] 만큼 높게 나타날 수도 있다. 세 개의

주요 표면 오염물중에 예상대로 수소의 존재를 확인하였고, 수소에 의한 표면상태는 강한 PL 피크를 유발할 것으로 생각된다. 불소의 존재는 측정된 FTIR의 파장범위(500~1000cm⁻¹)에서 발견할 수 없었다. Stretching(SiO과 C-SiO에서의 SiO)에 관련된 산소 피크는 1056-1160cm⁻¹ 범위에서 발견되지 않았고 따라서 본 실험의 경우에는 시효와 관련된 산소 흡착에 의한 영향은 찾아볼 수 없었다.

Fig. 6에서 보면 전반적인 강도의 감소와 주 피크 강도의 상대적 변화를 제외하고 PS에서의 vibration 형태나 결합의 상태는 큰 변화를 일으키지 않았다.

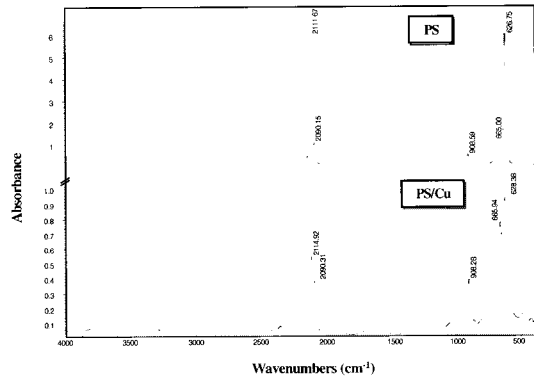
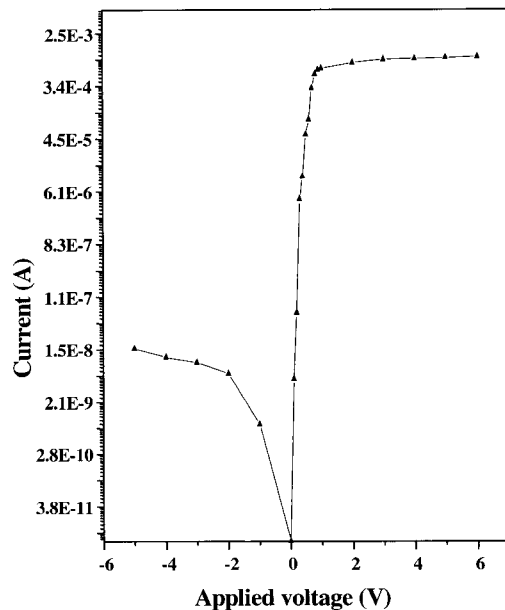


Fig. 6. FTIR absorption spectra of the PS and the PS/Cu structure.



강도의 감소는 Cu 박막의 증착에 의한 반사나 흡수의 증가 때문일 것이다. 종 피크(sarellite peak)가 주 피크(major peak)와 비교하여 더 강하게 나타났다.

Cu/PS 접합구조의 다이오드 성질은 I-V 특성곡선으로부터 고찰하였다[Fig. 7]. 금속-반도체 Schottky barrier(이 실험의 경우 산화막은 의미가 없으므로 MIS는 고려하지 않음)를 표준으로 하여 다이오드의 Ideality factor는 2.77이고 barrier 높이는 0.678 eV임을 알았다. 이 값은 Schottky형 금속/PS 접합에 대해 이미 보고된 결과들과 일치한다 [5, 9, 13].

Fig. 8에 Cu/PS 접합구조로부터 얻은 EL특성에 대한 결과를 나타내었다. Cu를 40nm 증착한 PS소자에서 EL특성이 나타났으며 광 다이오드를 이용하여 측정된 결과 5V에서 1.0×10^{-3} A 정도의 작은 전류가 흘렀다. 이처럼 EL특성이 낮게 나타나는 이유는 적은 양의 캐리어 주입에 의한 PS층에서의 큰 저항과 높은 다공성(~75%)으로 인한 낮은 양자효율, 또한 Cu 박막의 낮은 광투과율과 높은 면저항 등이 요인으로 생각되어진다 [3]. 지금까지 접합구조에 기초한 PS으로부터의 EL 특성의 원인에 대한 일관된 견해는 없었다 [4-6]. 그러므로 PS/Cu 다이오드 제조에 관한 최적 조건은 EL에 관계된 성능의 향상을 위해서 필수적이다. PS 기반 device의 메커니즘은 현재 여전히 논쟁의 대상이지만 Si 광전기 기술을 증진시키는 다이오드 구조의 실험적 가능성은 의심할 여지가 없다고 하겠다.

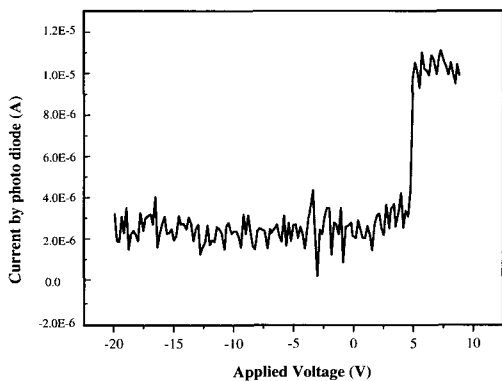


Fig. 8. EL-photodiode current vs. applied voltage on the PS/Cu diode

4. 결 론

P형 (100)실리콘 웨이퍼를 이용해 50 mA/cm²의 전류밀도로 3분 동안 양극산화시켜 PS를 제작한 후 rf-스퍼터링 방법으로 Cu 박막을 증착한 결과, 10~40 nm의 두께로 성장한 Cu 박막은 (111) 배향성을 갖고 기판과 수직방향으로 결정립이 성장하는 경향을 보였다. AFM으로 측정된 Cu 박막의 RMS roughness 값은 1.47 nm 였으며, Volmer-Weber 성장유형을 따랐다. Cu 박막은 가시광 영역(파장 ; 400~800nm)에서 40%보다 높은 광투과도를 나타내었다. Cu/PS의 PL 특성은 강도에 있어 0.05 eV의 작은 감소에 의해 본래의 넓은 blue-green peak에서 blue shift 하였다. Rf-스퍼터링법으로 증착된 Cu 박막은 PS와의 화학적 결합상태에 대해 특별한 변화를 일으키지 않는 것으로 조사되었다. Cu/PS 접합구조는 ideality factor가 2.77이고 barrier의 높이가 0.678 eV인 Schottky 유형의 다이오드특성을 보였다.

참 고 문 헌

- 1) J. R. Shi, S. P. Lau, Z. Sun, X. Shi, B. K. Tay, and H. S. Tan, Surf. And Coatings Tech. **138**, 250 (2001).
- 2) L. T. Canham, Appl. Phys. Lett. **57** 1046 (1990).
- 3) O. Bisi, S. Ossicini, and L. Pavesi, Surf. Sci. Reports **38**, 1 (2000).
- 4) M. Balucani, V. Bondarenko, L. Franchina, G. Lamedica, V.A. Yakovtseva and A. Ferrari, Appl. Phys. Lett. **74**, 1960 (1999).
- 5) S. Lazarouk, V. Bondarenko, S. La Monica, G. Maiello, G. Masini, P. Pershukovich, and A. Ferrari, Thin Solid Films **276**, 296 (1996).
- 6) K. Ueno and N. Koshida, Appl. Phys. Lett. **74**, 93 (1999).
- 7) L. Seals, J. L. Gole, L. A. Tse and P. J. Hesketh, J. Appl. Phys. **91**, 2519 (2002).
- 8) D. Stievenard and D. Deresmes, Appl. Phys. Lett. **67**, 1570 (1995).

- 9) M. Jeske, J. W. Schultze, M. Thonissen, and H. Munder, *Thin Solid Films* **255**, 63 (1995).
- 10) F. Ronkel, J. W. Schultze, and R. Arens-Fischer, *Thin Solid Films* **276**, 40 (1996).
- 11) B. Gelloz, T. Nakagawa, and N. Koshida, *Appl. Phys. Lett.* **73**, 2021 (1998).
- 12) S. Dhar and S. Chakraborty, *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 1392 (1996).
- 13) V. Jasutis, I. Simkiene, and A. Krotkus, *Appl. Phys. Lett.* **67**, 1259 (1995).
- 14) Z. Yamani, A. Alaql, J. Therrien, O. Nayfeh, and M. Nayfeh, *Appl. Phys. Lett.* **74**, 3483 (1999).
- 15) R.J. Martin-Palma, J. Perez-Rigueiro, and J.M. Martinez- Duart, *J. Appl. Phys.* **86**, 6911 (1999).
- 16) A. Diligenti, A. Namini, G. Pennelli, V. Pellegrini, F. Fusco, and M. Allegrini, *Thin Solid Films* **276**, 179 (1996).
- 17) T. P. Nguyen, P. Le Rendu, V. H. Tran, V. Parkhutik, and R. F. Esteve, *J. Porous Mater.* **7**, 393 (2000).
- 18) N. Rigakis, Z. Yamani, L. H. AbuHassan, J. Hillard, and M. H. Nayfeh, *Appl. Phys. Lett.* **69**, 2216 (1996).
- 19) Y. M. Huang, *Appl. Phys. Lett.* **69**, 2855 (1996).
- 20) J. Kocka, A. Fejfar, and I. Pelant, *Phys. Stat. Solidi B* **190**, 27 (1995).
- 21) Ikeda, Y. Kawashima, H. Itoh, and T. Ichinokawa, *Surf. Sci.* **336**, 76 (1995).
- 22) J. Zhang, K. Xu, and V. Ji, *J. Cryst. Growth* **226**, 168 (2001).
- 23) TK. Barla, G. Bomchil, R. Herino, J. C. Pfister, J. Baruchel, *J. Cryst. Growth* **68**, 721 (1984).
- 24) W. Gao, H. Gong, J. He, A. Thomas, L. Chan, and S. Li, *Materials Letters* **51**, 78 (2001).
- 25) N. Benouattas, A. Mosse, and A. Bouabellou, *Mat. Sci. And Eng. A* **288**, 253 (2000).
- 26) H. D. Liu, Y.-P. Zhao, G. Ramnath, S.P. Murarka, and G.-C. Wang, *Thin Solid Films* **384**, 151 (2001).
- 27) A. Edgar, and J. Non- Cryst. Solids **220**, 78 (1997).
- 28) A. Halimaoui, in: L. T. Canham (ed), *Properties of Porous Silicon* (IEE INSPEC, The Institution of Electrical Engineers, London, 1997), p. 12.