

나노터널링 실리콘 접합에서 델타도핑된 N형층의 활성화에 관한 연구

이인승* · 김근주**

** 전북대학교 기계공학과

Activation of Delta-doped N-type Layers in Nanotunneling Silicon Junction

Inseung Lee* and Keunjoo Kim**

** Department of Mechanical Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, R. O. Korea

ABSTRACT

We investigated the n-type δ -doping activation of the tunneling junctions of Si nanolayers for silicon tandem cell applications. The thin film growth of pn junction with the inclusion of phosphorus monolayer was performed by plasma-enhanced chemical vapor deposition with the implement on 6-inch wafers of p-Si microtextured substrates. The rapid thermal annealing processes with various temperatures were performed to activate the δ -doped layer. The activation was confirmed by the electron spin resonance with Lande factor $g=2.006085$ for the delocalized conduction electron from the phosphorus δ -doped layer at the magnetic field of 3357.5 Gauss. The tunneling junction shows the Ohmic character at the low voltage and the Schottky character at the high voltage bias.

Key Words : N-Type Delta Doping, Si Tunneling Diode, Electron Spin Resonance, Si Tandem Solar Cell

1. 서 론

최근에 실리콘 탠덤 태양전지 연구가 실리콘 구조 뿐만 아니라 실리콘-페로브스카이트 구조로도 매우 활발하게 확대되고 있다.[1-3] 이는 두 개 이상의 접합을 직렬로 연결하는 구조의 태양전지로서, 두 접합간을 전기적으로 직렬 연결한 금속배선은 오믹특성을 갖는다. 이러한 전도층은 투명전극, 나노금속층 등 다양한 재료로 구현되고 있으며, 또한 실리콘 기반의 박막 증착(homeopitaxial thin film) 공정을 통한 터널형 전도층으로도 광전변환 임피던스를 최적화한다.[4]

실리콘 pn접합층과 실리콘 pin박막 접합층을 서로 직렬 연결하는 금속배선을 하나의 도핑공정을 활용하여 구현

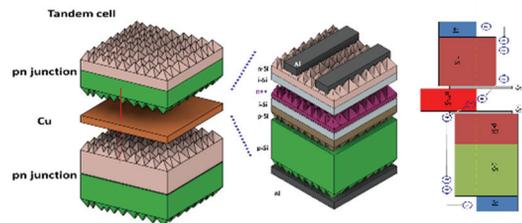


Fig. 1. Schematic diagram of the tunneling diode with N⁺⁺ delta-doped layer for Si tandem solar cells.

하는 연구가 많이 도핑공정을 활용하여 구현하는 연구가 많이 진행되고 있다.[3,4] 이러한 도핑상태의 활성화 여부를 파악하기 위하여 전자스핀 공명(electron spin resonance: ESR) 분광을 측정하게 된다.[5] 정상적인 실리콘 도핑의 경우, 불순물의 거동을 보면, 인(P) 도핑농도가 10^{17} cm^{-3} 에

*E-mail: kimk@jbnu.ac.kr

서 약한 n형의 도너(donor) 전자 스핀과 P핵 스핀 사이의 상호 작용으로 인해 발생하는 초미세 구조(hyperfine structure) 분리 자기장은 42 Gauss이다.[6] 이 경우, 도너 전자는 P에 국소화되며, 도너 사이트와 도너 준위는 전도대의 바닥에서 잘 분리된다. P 농도가 증가하면 초미세 구조는 사라지고 자유 전도전자 신호의 $g=1.998$ 이 나타난다. 또한 도너 농도가 $10^{16}\sim 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ 범위에 있을 때 신호는 Curie 법칙을 따른다.[7,8] 이러한 P 농도 범위에서, 도너 전자는 P 원자의 중첩된 파동 함수를 통해 도너 상태간에 이동한다.[8] 델타도핑에 해당하는 P 농도가 $2\times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ 보다 크면 Pauli 상자성 현상이 나타나며, ESR신호는 도너밴드와 전도밴드의 중첩 및 페르미 준위의 전도 밴드로의 침투에 의한 반도체-금속 전이로 인해 온도와 무관하게 된다.[8-10] 따라서 두 접합간을 실리콘 전도층을 형성하기 위해서는 Fig. 1에서와 같은 고농도 도핑을 통한 터널링 접합 다이오드를 형성할 필요성이 있다.[11,12]

본 연구에서는 실리콘 텐덤형 태양전지의 금속배선용 전도층을 터널 다이오드를 제작하여 구현하였다. 국소적으로 고농도 도핑하기 위해 델타도핑공정을 수행하였으며, N^{++} 델타도핑층으로 PH_3 가스의 플라즈마를 활용하였다. 또한 추가적인 열처리 및 소자공정으로 제작된 박막의 N형 도핑의 활성화 여부를 파악하였다. 상온에서 측정된 전자스핀 공명은 자기장이 3350 Gauss에서 보이며, $g=2.006384$ 로 전도전자 상태를 보였다. 또한 pn접합 터널 다이오드를 제작하였으며, 1 V이하의 낮은 바이어스에서 오믹 특성을 보이며, 그 이상의 전압을 인가하는 경우에는 전류량이 연속적으로 증가하면서 쇼트키 특성을 보임을 확인하였다.

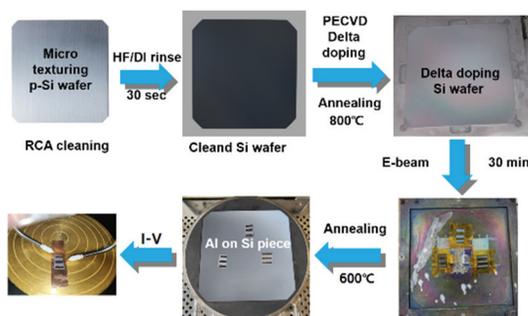


Fig. 2. Schematic diagram of the fabrication process of tunneling diode with the inclusion of N^{++} delta-doped Si nanolayer with rapid thermal annealing for 6-in. Si wafer.

2. 실험 장치 및 방법

본 실험은 플라즈마 화학기상증착(PECVD)공정을 수행하기 위해 6인치 크기의 마이크로텍처링된 p형 Si 웨이퍼를 활용하였다.[13-15] 먼저 Fig. 2에서와 같이 p형 기판을 RCA 세정과 30 sec 동안 불산/DI 린스를 통해 표면 천연 산화막을 제거하였다. PECVD 박막 증착공정에서 p형 Si 박막층을 $H_2+B_2H_6+SiH_4$ 혼합가스를 통해서 기판온도 $400^\circ C$ 에서 증착하였으며, 이어서 SiH_4 가스로 i진성층(intrinsic layer)을 형성한 후 H_2+PH_3 단일 희석가스로 N^{++} 형 델타도핑층을 형성하였다. 다시 이어서 SiH_4 가스로 i층을 형성한 후 n형 Si 박막층을 $H_2+PH_3+SiH_4$ 혼합가스를 활용하여 형성하였다. 제작된 박막 샘플을 전기적으로 활성화하기 위하여 다양한 온도에서 열처리를 수행하였다. 열처리 설정 온도는 $800^\circ C$, $900^\circ C$ 및 $950^\circ C$ 로 30 sec 동안 진행하였다. 또한 전자빔(electron beam) 증착장비를 활용하여 Al 전극층을 증착하고 $600^\circ C$ 로 30 sec의 후속 열처리를 통해 오믹 특성을 갖는 전극을 형성하였다. 제작된 박막의 구조적 특성을 CSTEM, Raman, FTIR으로 확인하였으며, 전기적 활성화를 전자스핀 공명으로 확인하였다. 또한 N^{++} 델타도핑층을 삽입하여 제작된 터널 다이오드의 전기적 특성을 전류-전압(I-V) 측정을 통해 확인하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Cs-TEM Analysis

Fig. 3(a)는 N^{++} 델타도핑층이 포함된 터널다이오드의 단면 투과현미경 사진 이미지이다. 마이크로텍처링된 p형 기판위에 p도핑층을 증착하고 i-Si층과 P 원자의 단일층을 증착한 후 다시 i-Si층과 n형 Si층을 증착한 구조이다. 델타도핑층부위에 부분적인 층 분리 부위가 형성되어 공극(void)형상이 보인다. 이는 수소결합이 분리되면서 수소가스 증기압에 의한 Si-H 비결합손(dangling bonds)의 층 분리와 표면의 수소결합 포화작용으로 인해 형성됨을 알 수 있다. Fig. 3(b)는 N^{++} 델타도핑층 부위의 확대된 결정구조를 보인다. 나노구조와 다결정구조의 혼합된 실리콘 결정질을 갖으며, 전자회절 패턴도 나노형태의 다결정구조를 보인다.

N^{++} 델타도핑층 부위의 적층 격자결합이 존재하며, P원자의 $400^\circ C$ 에서 Si 표면으로의 확산이 제한적이다. 표면의 격자차이에 의한 변형에너지(strain energy)로 인해 실리콘 원자와 P원자의 격자이완에 따른 안정화 과정에서 적층결합을 발생시킨다.[16] 고분해 TEM 이미지의 전자회절 패턴은 [110] zone의 축선상에서 나타난 것으로 나노 다결정성을 보인다. 이는 열처리에 따른 수소가스 분

압의 제어가 필요하며 적층결함을 줄이기 위하여 열처리 공정 수행에서 수소가스 분위기를 형성하는 것이 바람직하다. [17] 이러한 적층결함을 포함하는 N⁺⁺ 델타도핑층의 P 원자의 비결합손이 전기적으로 활성화 되었는지를 파악하기 위하여 전자 스핀공명 분광측정을 다음 절에서 수행하였다.

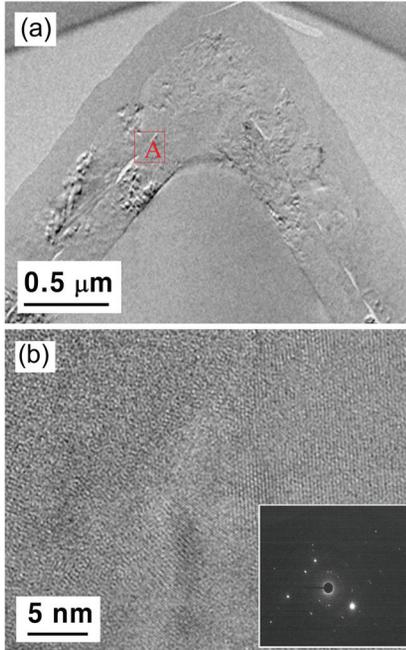


Fig. 3. CS-TEM images of N⁺⁺ delta-doped Si nanolayer prepared by PECVD process on (a) microtextured surface and (b) the magnified crystal structure of position A in (a) with the inset of the electron diffraction pattern.

3.2 ESR Analysis

Fig. 4는 N⁺⁺ 델타 도핑층을 포함하는 pn접합터널다이오드의 상온에서 측정된 전자 스핀 회전 공명 스펙트럼이다. 800°C로 열처리한 샘플에서 공명현상을 보였다. 활용된 전자 스핀 공명 분광 광도계(electron spin resonance spectrometer: Bruker:EMXplus-9.5/2.7)는 전자가 가지고 있는 스핀자기모멘트(spin magnetic moment) μ_s 또는 보어 마그네톤(Bohr magneton) β 에 자기장 B을 가하여 Zeeman에너지가 $E = \mu_s \cdot B = \pm\beta B$ 로 분리되며, 이 에너지 차이는 다음과 같다.

$$\Delta E = 2\beta B \quad (1)$$

이 에너지에 해당하는 전자기파 $\Delta E = h\nu$ 를 외부에서 입사하면 에너지 흡수현상 즉, 전자 스핀 공명 현상이 일

어난다.[18] 자유전자에서는 궤도양자수를 제외하고 스핀 양자수만 고려하여 다음 식으로 나타낸다.

$$h\nu = g_s\beta B \quad (2)$$

여기서 Lande g 계수는 $g_s = 2.0023$ 이고 보어 마그네톤은 $\beta = 5.05038 \times 10^{-31} [\frac{J}{Gauss}]$ 며, 플랑크 상수는 $h = 6.62 \times 10^{-34} J \cdot sec$ 이다. 즉, 자유전자의 경우 $\nu [MHz] = 2.8024 B[Gauss]$ 식으로 주어지며, 일반적으로는 다음 식으로 주어진다.

$$\nu [MHz] = 1.39959g_s B [Gauss] \quad (3)$$

이러한 장비로부터 얻어지는 공명주파수, 신호의 세기 및 선폭 등을 통해 상자성 이온의 상태 즉 이온의 원자나 스핀 및 궤도상태를 예측할 수 있다.

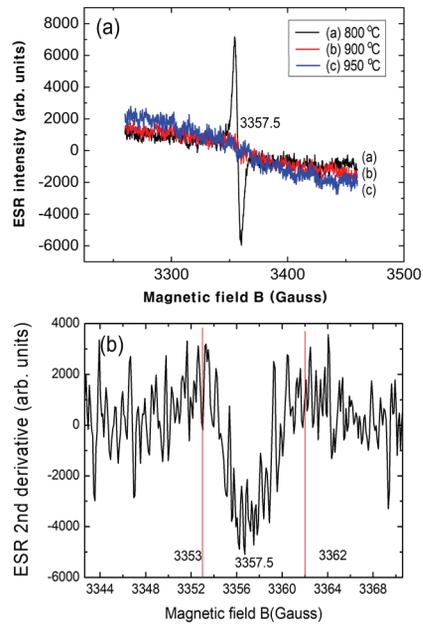


Fig. 4. ESR spectra for (a) the 1st derivative signals for various samples with RTA temperatures and (b) the 2nd derivative signal for the sample with 800°C. The sample annealed at 800°C showed the resonance peak at 3357.5 Gauss with FWHM=9 Gauss.

장비의 제한은 자기장은 9000 Gauss, 전원파워는 2.7 kW, 마이크로파 발생 출력은 200 mW, 주파수 영역은 9.3-9.9 GHz, Automatic Frequency Control (AFC) stability 10⁻⁸, 마이크로파 파워 감소는 60 dB, 신호감도는 신호/잡음비가 1200:1 이다.

자유전자의 경우 마이크로파의 주파수가 9426.846 MHz에서 인가된 자기장이 3363.847 Gauss이다. 이로부터 N^{++} 델타도핑된 샘플은 3357.5 Gauss 에서 전자스핀 공명이 일어나며, 도핑된 P원자의 실리콘 격자내의 잉여전자는 전도전자로 비국소화 되어 Lande g 계수 $g=2.006085$ 를 갖는다. 즉 P원자로 단일층을 도핑한 N^{++} 델타도핑층내의 P이온이 상자성상태의 도너로서 전기적 활성화가 된 상태임을 알 수 있다.

또한 반치폭(FWHM) $2\Delta B_{1/2} = 9$ Gauss 에 대해 스핀-스핀 이완시간 (T_{eff})은 다음 식으로 주어진다.

$$\Delta B_{1/2} = \frac{h}{g\beta T_{eff}} \quad (4)$$

이를 다시 쓰면 $\frac{1}{T_{eff}} [MHz] = 2.8024\Delta B_{1/2}$ 이고 $T_{eff} = 0.07929 \mu sec$ 이다. N^{++} 델타도핑된 단일층의 P 원자는 1~2원자퍼센트(atom%) 농도의 국소적 도핑농도를 갖으며, 깊은 결함준위로 인해 전도대와 겹치는 현상을 보인다. 이로 인해 이웃한 부근의 Si 층은 금속성을 갖으며 또한 전자스핀 공명은 온도의존성이 약해진다.[7] 다음 절에서는 델타 도핑층으로 인한 결정의 Raman shift와 FTIR을 통하여 광흡수를 확인하였다.

3.3 Raman and FTIR Analyses

Fig. 5에서는 터널다이오드가 갖는 박막 결정구조적 Raman특성을 확인하였다. 열처리하지 않은 시료와 800°C에서 수행한 시료를 비교하였다. 열처리하지 않은 시료의 Raman shift피크는 133, 287, 495, 그리고 912 cm^{-1} 가 보이며, 800°C에서 열처리한 샘플에서는 133, 301, 432, 516, 및 959 cm^{-1} 가 보인다. 즉, 476 cm^{-1} 가 줄어들면서 432 cm^{-1} 의 작은 피크가 분리 생성되고 또한 514 cm^{-1} 로 이동됨을 알 수 있다. 또한 2차항인 912 cm^{-1} 피크는 959 cm^{-1} 로 이동하였다. 514 cm^{-1} peak 이하에서는 열처리 전의 비정질의 Raman 세기가 크고, 그 이상에서는 열처리후의 결정질의 Raman 세기가 커짐을 알 수 있다. 따라서 열처리전의 비정질 특성이 열처리로 인해 감소함을 확인하였다.

비정질 실리콘의 다양한 포논(phonon) 피크는 133 cm^{-1} 은 횡음향 모드(transverse acoustic mode), 287 cm^{-1} 은 종음향 모드(longitudinal acoustic mode), 410 cm^{-1} 은 종광학 모드(longitudinal optical mode), 그리고 495 cm^{-1} 은 횡광학 모드(Transverse optical mode)를 갖는다. [19,20] 열처리된 샘플에서는 조금씩 피크의 위치가 변동됨을 알 수 있고, 라만 분광을 통해 결정질의 정도를 파악할 수 있으며, 단결정에서는 521 cm^{-1} , 나노결정으로 인해 513 cm^{-1} 이하로 줄어들며, 또한 비정질에 의해 피크이동이 480 cm^{-1} 으로 감소한다.

또한 도핑으로 인한 결정질의 국소적인 결함으로 라만의 피크이동이 여러 모드로 나타나는데, 참고로 보론(B) 도핑된 p형 Si 반도체에서는 515, 509 과 503 cm^{-1} 에서 피크가 보이고 특히 513 cm^{-1} , 피크 주변의 세기가 상대적으로 521 cm^{-1} 보다 크다. 인(P)이 도핑된 n형 Si반도체에서는 518, 514, 512 과 511 cm^{-1} 에서 피크가 보이고, 521 cm^{-1} 주변의 세기가 513 cm^{-1} 에서 보다 크게 나타난다.[21] 인(P)이 N^{++} 델타도핑된 본 샘플에서는 열처리전에는 495 cm^{-1} 로 비정질에 가깝고, 열처리후에는 432 cm^{-1} 와 516 cm^{-1} 피크로 분리되어 나타난다. 이는 TEM에서 나노 결정성과 인의 고농도 도핑에 의한 현상으로 파악된다. 고농도 도핑특성은 광흡수에도 나타나며 적외선 흡수 분광 실험을 통해 다음과 같이 확인하였다.

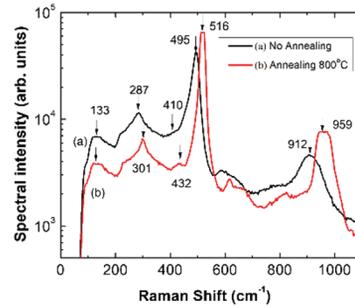


Fig. 5. Raman spectra of the N^{++} delta-doped Si nanolayer for no-annealed and annealed samples at 800°C.

Fig. 6은 터널다이오드가 갖는 적외선 투과선도(FTIR transmittance)이다. 열처리전의 샘플은 적외선 전영역에서 흡수 스펙트럼을 갖으며, 특히 1077 cm^{-1} 스펙트럼 이상의 영역에서는 2%의 작은 흡수도를 보인다. 그리고 그 이하의 영역에서는 매우 큰 비율로 흡수도를 갖는다. 열처리된 샘플은 1900 cm^{-1} 스펙트럼 이상의 영역에서는 완전 투과 현상을 보이고, 그 이하에서 흡수도가 증가하면서 1077 cm^{-1} 스펙트럼보다 작은 영역에서 열처리전의 샘플보다 더 큰 흡수도를 보인다. 1077 cm^{-1} 스펙트럼은 파장이 9.28 μm 이고, 에너지가 133 meV이며, 1900 cm^{-1} 스펙트럼은 5.26 μm 이고, 에너지가 236 meV이다. 이는 P원소의 도핑으로 인해 불순물 준위가 실리콘 밴드 갭 내의 금지대역 속에 존재하며, 전도대에 전자를 공급하는 도너 준위를 형성함으로써, 이러한 흡수 스펙트럼에 해당하는 에너지 준위를 갖게 됨을 알 수 있다. 적외선의 영역 5.26~9.28 μm 에서의 광흡수는 파장의 제곱(λ^2) 의존성을 갖으며, 자유 운반자 (free carrier)에 의한 흡수이며, 이는 N^{++} 델타 도핑층의 활성화에 따른 현상이다.[22] 다음 절에서 이러한 도핑 활성화층의 오믹특성을 전류-전압 특성을 확인하였다.

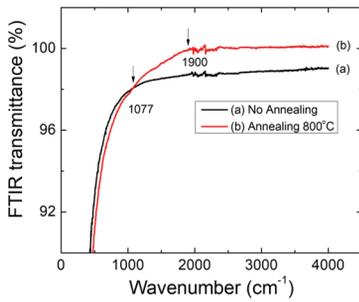


Fig. 6. FTIR transmittance of N^{++} delta-doped Si nanolayer for no-annealed and annealed samples at $800^{\circ}C$.

3.4 I-V 그래프

Fig. 7(a)은 N^{++} 델타도핑층을 삽입하여 제작한 터널다이오드를 평가하기 전에, 먼저 금속전극의 오믹특성 여부를 확인하는 경우이다. 상부전극의 Al금속전극층 두 부분이 서로 Ohmic 특성을 보였으며, 조각샘플의 저항이 550Ω 으로 직선형 전류-전압 특성을 보였다. Fig. 7(b)는 상부와 하부 전극에 전압을 인가하여 터널다이오드의 전류-전압 특성을 측정하였다. 1 V 이하의 전압 영역에서는 전류-전압이 선형의 오믹특성을 보이며, 그 이상으로 전압을 인가할 경우에는 Schottky 특성을 보임을 알 수 있다. 측정샘플의 터널 다이오드의 저항은 625Ω 이다. 이는 터널다이오드가 금속배선의 특성을 보이며 운반자 터널 포텐셜로 인해 75Ω 의 저항을 갖는다.

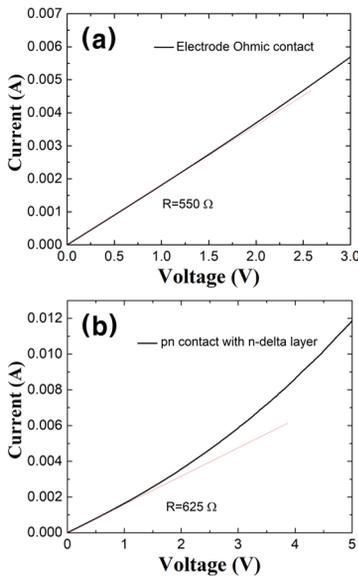


Fig. 7. I-V measurements of (a) electrode Ohmic contact and (b) the pn junction contact with the inclusion of the N^{++} delta-doped Si nanolayer.

델타도핑층에서는 불순물이 격자상수크기로 나열되어 있어서 불순물에 의한 산란이 최소화되고 높은 이동도를 제공한다.[23] 이러한 매우 좁은 영역에 도핑되어 갇힌 상태(confined state)의 운반자는 전류-전압 특성곡선에서 먼저 터널 전류에 의한 오믹특성이 나타나다가 갑자기 전류량이 감소하다가 점차로 쇼트키 특성으로 증가하게 된다. 이러한 Esaki 터널다이오드 특성은 $P^{++}N^{++}$ 접합이 모두 델타도핑된 경우에 일어나게 되고 피크-계곡 전류비가 터널다이오드 특성을 보인다. 이상적인 도핑단면(doping profile)층은 Dirac delta function 분포를 갖지만, 열처리에 의한 분산으로 인해 Gaussian profile를 갖게 된다.[24] 최근에 나노전자소자의 금속배선으로 실리콘 델타도핑 기술을 활용하게 되었으며, 가속수명 실험에서도 알루미늄이나 구리배선보다 특성이 양호함을 보였다[25]. 본 연구의 N^{++} 델타 도핑층이 단일 도핑층으로 pn접합사이에 포함된 터널다이오드 구조에서는 전류-전압곡선에서 델타도핑에 기인한 음의 미분저항(negative differential resistance)을 갖는 피크-계곡 낙하(peak-to-valley drooping) 현상은 나타나지 않았다. 이는 단일 델타도핑층의 전압인가에 따른 밴드 역전현상이 나타나지 않기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 탠덤형 실리콘 태양전지 응용을 위한 N^{++} 델타도핑층을 포함하는 터널다이오드의 특성을 파악하였다. 먼저 마이크로 텍스처링된 p-Si 기판위에 PECVD 공정을 통해 순차적으로 p-Si, i-Si, N^{++} 델타도핑, i-Si, n-Si층을 증착하여 터널다이오드를 제작하였다. 제작된 샘플을 다양한 온도에서 열처리공정을 수행하였으며, Al 전극층을 상하부에 형성하여 오믹 열처리를 수행하였다. $800^{\circ}C$ 로 열처리 한 샘플에서 N^{++} 델타 도핑층으로부터 전자스핀 공명 현상이 관측되었으며, 이로부터 델타도핑층이 활성화가 되었음을 확인하였다. 또한 탠덤형 실리콘 태양전지의 두 pn 접합을 직렬 연결하는 금속배선용 터널다이오드가 금속의 오믹특성을 보인다. 1 V이하의 낮은 전압의 바이어스 상태에서는 오믹 특성을 보이며, 그 이상의 전압에서는 pn접합의 쇼트키 특성을 보임을 확인하였다. 이러한 N^{++} 델타 도핑층을 포함하는 터널다이오드가 실리콘 동종 박막(homo-epitaxial) 구조의 임피던스 호환 특성을 보이며 실리콘 탠덤형 태양전지 구조의 소자구현 뿐만 아니라 실리콘 소자공정에서의 반도체 금속배선(interconnection) 기술의 확보를 통해 반도체 및 디스플레이 산업분야로의 기술 활용성 및 파급효과를 준다.

감사의 글

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. 2022R1F1A1062800). This work was also supported by the 2024-2025 project of Jeonbuk National University.

참고문헌

1. M. De Bastiani, A. S. Subbiah, E. Aydin, F. H. Isikgor, T. G. Allen, and S. De Wolf, Recombination junctions for efficient monolithic perovskite-based tandem solar cells: physical principles, properties, processing and prospects, *Mater. Horiz.* 7, 2791-2809 (2020).
2. Y. Lee, V. A. Dao, S. M. Ifitqar, S. Kim, and 4. J. Yi, Current transport studies of amorphous n/p junctions and its application in a-Si:H/HIT-type tandem cells, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 24, 52-58 (2016).
3. J. Yang, J. Goguen, and R. Kleiman, Silicon solar cell with integrated tunnel junction for multijunction photovoltaic applications, *IEEE Electron Dev. Lett.* 33(12), 1732-1734 (2012).
4. J. Wang, D. Wheeler, Y. Yan, J. Zhao, S. Howard, and A. Seabaugh, Silicon tunnel diodes formed by proximity rapid thermal diffusion, *IEEE Electron Dev. Lett.* 24(2) 93-95 (2003).
5. K. Sumida, K. Ninomiya, M. Fujii; K. Fujio, S. Hayashi, M. Kodama, H. Ohta, Electron spin-resonance studies of conduction electrons in phosphorus-doped silicon nanocrystals, *J. Appl. Phys. Vol.* 101(3), 033504 (2007).
6. R. C. Fletcher, W. A. Yager, G. L. Pearson, A. N. Holden, W. T. Read, and F. R. Merritt, Spin resonance of donors in silicon, *Phys. Rev.* 94, 1392 (1954).
7. S. Maekawa and N. Kinoshita, Electron spin resonance studies of interacting donor clusters in phosphorus-doped silicon, *J. Phys. Soc. Jpn.* 20, 1447, (1965).
8. A. Roy, M. Turner, and M. P. Sarachik, Susceptibility of Si:P across the metal-insulator transition. I. Diamagnetism, *Phys. Rev. B* 37, 5522, (1988).
9. J. D. Quirt and J. R. Marko, Electron-spin-resonance measurements of the spin susceptibility of heavily doped n-type silicon, *Phys. Rev. Lett.* 26, 318 (1971).
10. H. Ue and S. Maekawa, Electron-spin-resonance studies of heavily phosphorus-doped silicon, *Phys. Rev. B* 3, 4232, (1971).
11. E. F. Schubert, Delta doping of III-V compound semiconductors: Fundamentals and device applications, *J. Vacuum Sci. Technol. A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 8(3), 2980-2996 (1990).
12. Y. Sun, S. Fan, D. Jung, R. D. Hool, B. Li, M. Vaisman, and M. Lee, Delta-doping for enhanced III-V tunnel junction performance, *IEEE J. Photovoltaics*, 12(4), 976-981 (2022).
13. I. Lee and K. Kim, Sulfur Defect-induced n-type MoS₂ thin films for silicon solar cell applications, *J. Semicon. Display Technol.* 22(3), 46-51, (2023).
14. E. H. Kim, Y. H. Choi, H. J. Jeon, W. H. Jang, and G. Kim, The study on the uniformity, deposition rate of PECVD SiO₂ deposition, *J. Semicon. Display Technol.* 23(2), 87-91 (2024).
15. H.-C. Wang and H.-I. Seo, A study on various parameters of the PE-CVD chamber with wafer guide ring, *J. Semicon. Display Technol.* 23(2), 55-59 (2024).
16. D. G. Liu, J. C. Fan, C. P. Lee, C. M. Tsai, K. H. Chang, D. C. Liou, T. L. Lee and L. J. Chen, Direct observation of Si delta-doped GaAs by transmission electron microscopy, *Appl. Phys. Lett.* 60(21), 2628-2630 (1992).
17. W. I. Park, Electrical properties of delta-doped silicon-nanowire field-effect transistors, *J. Kor. Phys. Soc.* 53 (4), L1759-L1763 (2008).
18. W. Gordy, Theory and applications of electron spin resonance, (Techniques of Chemistry Vol. 15) John Wiley & Sons, Inc. New York, (1980) p. 2.
19. K. Nakazawa and K. Tanaka, Effect of substrate temperature on recrystallization of plasma chemical vapor deposition amorphous silicon films, *J. Appl. Phys.* 68 (3), 1029-1032 (1990).
20. D. Beeman, R. Tsu and M. F. Thorpe, Structural information from the Raman spectrum of amorphous silicon, *Phys. Rev. B* 32(2), 874-878 (1985).
21. A. Goyal, P. R. Soni, Doping of nano-crystalline silicon powders by mechanical alloying: the process and characterization, *J. Mater. Sci: Mater. Electron.* 28, 14720-14727 (2017).
22. D. K. Schroder, R. Noel Thomas, and J. C. Swartz, Free carrier absorption in silicon, *IEEE Trans. Electron Dev.* ED-25(2), 254-261 (1978).
23. E. F. Schubert, Doping in III-V Semiconductors (Cambridge University Press, New York, 1993), Chap. 7.
24. Y.-K. Su, R.-L. Wang, and H.-H. Tsai, Delta-doping interband tunneling diode by metal-organic chemical vapor deposition, *IEEE Trans. Electron Dev.* 40(12), 2191-2198 (1993).
25. C. Halsey, J. Depoy, D. M. Campbell, D. R. Ward, E. M. Anderson, S. W. Schmucker, J. A. Ivie, X. Gao, D. A. Scrymgeour, and S. Misra, Accelerated lifetime testing and analysis of delta-doped silicon test structures, *IEEE Trans. Dev. Mater. Reliability*, 22(2) 169-174 (2022).

접수일: 2024년 7월 23일, 심사일: 2024년 9월 5일,
 게재확정일: 2024년 9월 12일