2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Si 반도체의 중성자 도핑(NTD)기술개발을 위한 품질관리

Quality Control for Neutron Transmutation Doping(NTD) of Si Semiconductor

권상철, 황승렬, 연제원, 최창웅, 전병진, 홍준화
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

NTD는 Si에 열중성자를 조사시켜 donor인 P를 도핑하는 방법이다. NTD Si은 고출력 반도체 소자를 제작하기 위하여 필요하다. 이 방법은 약 25년 전에 개발된 기술로서 원자로를 사용하여야 한다. 한국원자력연구소에서는 하나로를 이용하여 2002년부터 NTD의 상업적 서비스를 위하여 기술개발을 수행하고 있다. 여기에서는 FZ-Si을 NTD 처리하기 위한 품질관리 사항을 알아보고자 하였다. 수요자가 제시하는 최종 목표 비저항을 충족시키기 위하여서는 중성자 조사량에 대한 비저항 값을 알아야 한다. 이를 위하여 중성자 조사량과 비저항을 정확하게 측정할 수 있는 기술이 확보되어야 한다. 비저항 값과 비저항의 분포에 영향을 줄 수 있는 요소들을 파악하고 그에 대한 품질관리 방안을 검토하였다.

Abstract

Neutron Transmutation doping(NTD) is a P donor doping method by the irradiation of thermal neutrons to Si. NTD Si is required for the fabrication of high power semiconductors. The process was developed 25 years ago and requires a nuclear reactor. KAERI has performed a technology development for commercial service of NTD using Hanaro research reactor in 2002. Here we will give a review of quality control for NTD of FZ-Si. To meet the target resistivity suggested by customers, the relation between neutron flux and resistivity should be set-up. For this, it is necessary that a technology should be developed for correct measurement of neutron flux and Si resistivity. We reviewed the factors that could affect the resistivity and its distribution, and suggested a plan for the quality control of them.

1 서론

1950년대 초, 시카고대학의 Lark-Horovitz[1]가 열중성자를 반도체에 조사시켜 (n,γ) 반응을 이용함으로써 원자핵변환에 의한 불순물주입법을 제안하였다. 이것을 중성자변환 주입(Neutron Transmutation Doping, NTD)법이라고 칭한다. 1960년대부터 1970년대에 걸쳐서 NTD법을 Si에 적용시켜서 고출력의 다이오드, 사이리스터 및 적외선 검출기 등에의 이용 기술을 개발하였다. 1974년 Riso National Laboratory에서 NTD Si이 상업적 목적으로 도핑하여 Topsil에서 최초로 생산하였다[2]. 현재 세계적으로 연산 100톤 규모로 생산하고 있다[3]. 국내에서는 1980년대 초에 TRIGA Mk-III를 사용하여 Si에 대한 NTD를 시도한바 있으며, 1988년부터 하나로에서 NTD를 구현하기 위한 연구가 진행되었으나 중단되고, 2001년부터 본격적으로 추진하여 2002년부터 상업적 서비스가 가능하게 되었다4].

Si을 반도체로 사용하기 위하여서는 극미량의 불순물을 주입하여야 한다. 불순물의 종류에 따라 donor인 원소가 주입된 n형과 acceptor 원소가 주입된 p형으로 구분하는데 NTD에 의하여서는 donor인 P를 주입하여 n형 반도체를 생산할 수 있다. 일반적으로는 결정성장과정에서 용융 Si에 P를 주입하는데, P의 분포가 균일하지 못하여 대전력용 반도체를 제작하는데는 부적당하다. 그 이유는 고전압이 부가되면 국부적으로 저항이 낮은 부분에서 hot spot가 발생하여 항복(breakdown)이 일어나기 때문이다. 그러나 FZ(floating zone) Si에 NTD를 적용하면 P의 분포가 균일하기 때문에 그러한 문제가 발생하지 않는다. NTD법은 고순도의 FZ(floating zone) Si ingot에 적용한다. CZ(Czochralski) Si은 산소가 불순물로 포함되어 있어서 고출력용 반도체로서는 적합하지 않다.

Si의 열중성자 조사에 의한 핵변환의 주반응은 다음과 같다.

$$^{30}Si(n,\gamma)\rightarrow ^{31}Si\rightarrow ^{31}P + \beta^{-} (T_{1/2}=2.62\text{시간}) \quad (1)$$

^{30}Si은 천연 Si에 3.1%가 포함되어 있다. 조사된 Si은 다음 2차 반응에 의한 방사능을 확인할 필요가 있다.

$$^{31}P(n,\gamma)\rightarrow ^{32}P\rightarrow ^{32}S+\beta^{-} (T_{1/2}=14.3\text{일}) \quad (2)$$

고순도의 FZ Si을 사용하기 때문에 다른 반응은 고려할 필요가 없다.

NTD에 의하여 생성된 P의 농도는 Si의 비저항과 다음과 같은 관계가 있다.

$$\rho = \frac{1}{([P_i]+[P_d])\mu\varepsilon} \quad (3)$$

여기서 ρ: 비저항(Ω · ㎝)

$[P_i]$: 조사전 P의 농도(atoms/㎤)

$[P_d]$: 조사후 생성된 P의 농도(atoms/㎤)

μ : 전자의 이동도(1350 ㎠/V-s)

ε : 전자의 전하량(1.6×10^{-19} C)

조사전의 P의 농도는 조사후 생성된 P의 농도보다 매우 작기 때문에 무시할 수 있다. μ

는 온도 및 P의 농도에 따라 차이가 있지만, (3)식을 다음과 같이 표시하기도 한다.

$$\rho = \frac{5x10^{15}}{[P]} \qquad (3\text{-}1)$$

즉, 조사량에 비례하여 P가 생성되고, 비저항은 P의 생성량에 반비례하므로, 비저항은 조사량에 반비례한다. 원하는 비저항의 Si을 도핑하기 위하여서는 중성자 조사량을 정확하게 조절할 필요가 있다. 이것은 비저항을 중성자 조사량에 대하여 보정할 필요가 있으며, 이를 위하여 NTD 공정에서 수요자가 요구하는 비저항 요건을 만족시키기 위하여 품질관리가 필요하다는 것을 의미한다. 통상적으로 P의 농도를 조사량에 대하여 보정하지 않고 비저항을 측정하여 조사량에 대하여 보정한다. 본 내용에서는 차후 품질관리 활동에 필요한 분석과, 필요한 사항을 파악하기 위하여, NTD 장치의 시험운전을 위하여 제공된 dummy ingot를 가지고 비저항, FTIR 및 X-ray 분석한 결과를 기술하였다.

2 NTD 공정에서의 품질관리

2.1 중성자 조사량과 비저항과의 관계

Si ingot의 초기 비자항을 ρ_i, 도핑 후의 비저항을 ρ_f라 하면, 중성자 조사량과 비저항과의 관계는 다음 식과 같이 표시된다.

$$\Psi t = 2.612x10^{19}K\left(\frac{1}{\rho_f} - \frac{1}{\rho_i}\right)(n/cm^2) \qquad (4)$$

여기에서 Ψt는 중성자 조사량, K는 원자로와 관련된 상수로 0.8-1.0 정도의 값을 가진다[5]. 그러나 Carbonari등[6]은 (4)식의 K를 1보다 큰 값으로 발표한 바 있다. 위 (4)식에서 2.612 x 10^{19} K는 ^{30}Si의 농도, ^{30}Si의 중성자 포획 단면적, 전자의 이동도, 전자의 전하량을 포함한 상수이다. 따라서 이들에 관한 정확한 값을 얻기 어렵고, 각기 발표된 값에는 오차를 갖고 있기 때문에 직접 실험을 통하여 K를 구하는 방법을 택하고 있다[7].

^{30}Si은 산지에 따라 천연 Si중에 대략 ±1%의 차이를 갖고 있다. 또한 Si의 밀도 역시 약간의 오차를 포함하고 있다. ^{30}Si의 중성자 포획 단면적 역시 0.115 ± 0.009(7.8%)로서 발표자에 따라 차이를 보인다. 전자의 이동도는 온도 및 불순물의 농도에 따라 변하고 측정에 따라 ±5%이상의 오차를 갖고 있다. 한편, 전자의 전하량은 오차를 무시할 수 있다. 또한 중성자의 조사량과 비저항 측정에 있어서도 오차가 따르기 때문에 K를 계산에 의하여 비저항을 예측하는 것은 무리라고 본다. 따라서 실험에 의하여 중성자 조사량과 목표 비저항과의 관계로부터 K를 구하여, 수요자가 목표 비저항을 제시하면 그에 해당하는 중성자 조사량으로 도핑처리를 하는 것이 합리적이다. 단, 위에서 기술한 바와 같이, 오차가 발생하기 때문에 이 오차를 도핑 공정에 의하여 최소화하는 방법을 수립할 필요가 있다. 개괄적으로 오차 발생 요인에 따라 구분하면 원료 ingot로부터 발생할 수 있는 오차, 원자로 운전 조건에서 발생하는 오차, 중성자 조사량 및 비저항 측정에서 발생하는 오차를 생각할 수 있다.

2.2 Si ingot 관리

수요자가 제공하는 Si ingot에 따라 ^{30}Si의 농도와 초기 비저항에 차이가 있으므로, 정확히 ingot의 heat number를 관리할 필요가 있다. 수요자가 초기비저항 값을 측정하여 ingot와 함께 제공할 것이지만, 수요자가 측정한 비저항 값의 오차를 확인 할 필요가 있다. 또한 각 수요자에 따라 NTD 결과를 별도로 기록 관리함으로써 원료로부터 발생하는 오차를 줄일 수 있다. 새로운 수요자가 NTD를 의뢰할 경우, 목표 비저항을 검토하여 이전에 보유하고 있는 data가운데 가장 근사한 비저항의 공정조건을 그대로 적용할 필요가 있다. 비저항 및 조사량 측정 방법을 같게 하여야 오차를 최소화 할 수 있기 때문이다. Ingot의 길이가 일정하더라도 직경에 따라 비저항 및 그 분포에 차이가 나기 때문에 별도 data를 관리할 필요가 있다. 하나로에서는 NTD1과 NTD2 수직공에서 조사하는 ingot의 직경이 다르므로, 각 수직공별로 관리할 수 있다.

2.3 중성자 조사량 측정

발표자료에 따르면 각 원자로에 따라 여러 가지 방식의 SPND(self-powered neutron detector)를 채택하고 있다. 브라질 IEA-R1의 경우 Ag wire를, 덴마크의 Riso에서는 직경 0.2 ㎜의 Co wire를, 미국의 MURR에서는 Co가 doping된 Al flux wire(% Co=0.116%)를, 일본 JRR-4에서는 Rh을 사용하였다. Wire외에 foil을 사용하기도 한다. SPND에서는 emitter가 중성자를 흡수한 후, β^-붕괴에 의하여 방출되는 β^-선을 collector가 모아서 전류로서 중성자량을 측정한다. Collector는 통상 스텐레스강이나 인코넬을 사용하고, emitter와 collector사이의 공간에는 산화 마그네슘이나 산화 알루미늄을 절연물로서 채운다. Emitter재료로서 Co, Mo 및 Pt가 Rh에 비하여 빠르다. 미국 NBS에서 표준시료를 공급하지만 Co함량이 상당한 오차를 갖고 있다. NBS 표준시료로 측정한 결과 integrator count당 조사량값이 1.484 n/㎠/ct.에서 ±3.2%오차를 보인다고 한다[7]. 뿐만 아니라 조사량 측정에서 발생할 수 있는 오차는 multichannel analyzer의 보정, dead time 보정, detector의 효율, emitter의 직경, 길이, 밀도 등에서 발생할 수 있다.

따라서 이러한 오차를 줄이기 위하여서는 무엇보다도 SPND를 구입할 때, 같은 제작자로부터 같은 heat의 제품을 충분히 구입하여 사용할 필요가 있다. SPND를 시료에 장착하는 문제에서도 항상 일정한 위치에 설치함으로써 재현성을 유지할 필요가 있다.

2.4 비저항

비저항 측정은 ASTM F81 및 F84에 표준화되어 있으며, 4-probe법으로 측정한다. 4개의 탐침이 일렬로 구성되어 있으며, 바깥쪽 2개 단자에 일정한 전류를 공급하고, 중앙의 2개 단자로부터 전압을 측정한다. 공급하는 전류의 양은 시료의 저항열로 인한 영향을 최소화할 수 있어야 한다. 시료의 두께, ingot의 중심에서의 거리 및 직경에 따라 차이가 있으므로 규격에서 제시하는 factor를 고려하여 비저항을 계산하여야 한다.

Ingot의 초기 비저항을 측정하기 위하여서는 ingot 표면은 가공으로 인한 결함이 존재하므로 먼저 70.5% 질산 90mL + 49% 불산 6mL의 비로 섞은 용액을 사용하여 표면으로부터 0.1 ㎜ 정도 제거한다. 표면을 최종 5 ㎛의 alumnina까지 연마한 후, 비저항 2 MΩ·cm 이상의 순수와 세척제를 사용하여 세척하고, 아세톤용액에서 초음파 세척기를 사용하여 충분히 탈지시킨다. 메탄올 용액에서 최종 행군다음 건조시킨다.

NTD공정을 거친 ingot는 고속중성자에 의한 공공 및 침입형 원자와 같은 조사결함이 존재하므로 비저항이 초기 비저항값 보다 증가하여 ~10^5 Ω·㎝ 이상 상승한다. 따라서 ingot를 불활성기체를 사용하여 800℃ 정도에서 수 시간 가열하여 조사결함을 제거함으로써 비저항을 안정화시킨 후 비저항을 측정한다. Ingot의 크기에 따라 비저항 측정횟수와 위치를 규격에서 규정하고 있다. 그러나 정확하게 크기별로 정한 것이 아니라 소구경에서는 표면의 중심에서 2회, 표면의 중심에서 수직으로 4등분하여 각 반경의 1/2 위치에서 각 1회 측정한다. 대구경에서는 표면의 중심에서 2회, 표면의 중심에서 4등분하여 원주로부터 6 ㎜ 떨어진 곳에서 각 1회 실시한다. 소구경이나 대구경 구별 않고 10회 측정하는 경우에는 중심에서 2회, 원을 4분하여 반경의 1/2되는 곳과 원주로부터 6 ㎜되는 곳에서 각 1회 실시한다. 아주 정밀하게 측정하는 경우에는 중심을 지나는 선에서 중심과 중심에서 원주사이의 2 ㎜ 간격으로 측정한다. 그러나 수요자에 다라 각기 제시하는 요건이 다를 수도 있으며, 최근 일본으로부터 제시한 요건에 다르면, 길이 30 ㎝, 직경 5"의 경우 상하 표면에서 중심과, 원을 4등분하여 원주에서 5 ㎜되는 곳에서 측정한다고 한다.

비저항의 목표치와 비저항 분포에 대한 요건으로서는 목표 비저항과의 차이에 대한 요건으로 average resistivity accuracy(A_c), 반경 방향의 비저항 분포에 대한 요건으로 radial resistivity gradient(R) 및 길이 방향으로의 비저항 분포에 대한 요건으로 axial reistivity accuracy(A)가 있다. 각각의 정의는 다음과 같다.

$$A_c = \frac{\rho_t - \bar{\rho}}{\rho_t} \times 100 \quad (5)$$

$$R = \frac{\rho^{max} - \rho^{min}}{\rho^{min}} \times 100 \quad (6)$$

$$A = \frac{\rho(U) - \rho(L)}{\rho(L)} \times 100 \quad (7)$$

여기에서 ρ_t : 목표비저항

$\bar{\rho}$: 평균비저항

ρ^{max} : 각 면에서의 최고 비저항

ρ^{min} : 각 면에서의 최소 비저항

$\rho(U)$: 윗면에서의 평균 비저항

ρ(L) : 아랫면에서의 평균 비저항이다.

남아공의 SAFARI-1 원자로에서의 각각의 비저항 분포에 대하여 발표한 요건은 표 1과 같다. Topsil에서 시판 하고 있는 NTD wafer의 R 값은 표 2와 같다. 반경 방향의 비저항 분포만을 고려할 때, Topsil이 SAFARI-1에서 발표한 값보다 약간 큼을 알 수 있다. Topsil은 wafer생산업체로서 정확한 값으로 추정되나, SAFARI-1의 값은 원자로 보유기관에서 발표한 자료로 참고용으로 의미가 있다.

(5)식의 A_c는 수요자가 제시하는 목표 비저항에 어느 정도 일치하는가를 의미한다. 목표 비저항은 wafer 수요자가 제작하고자 하는 소자의 정격과 직접적인 관계가 있다. 이에 대한 관리는 SPND로 측정하는 조사량과 비저항과의 관계를 정확히 파악하여 조사시간을 제어하는 것이다. P의 농도가 높아 비저항이 매우 낮은 도핑을 하는 경우, 목표 조사량보다 작게 여러 단계로 나누어서 도핑량을 제어하는 방법도 있다. 이 방법은 조사된 ingot의 방사능을 decay 시켜서 비저항을 측정하여야 하기 때문에 시간이 많이 소요되는 단점이 있다.

(6)식의 R는 ingot의 반경 방향에 따른 비저항의 분포를 의미한다. 이것은 반경 방향으로 P의 생성량을 균일하게 하여야 오차를 줄일 수 있다. Ingot를 적재한 조사캡슐을 회전시킴으로써 원자로내의 불균일한 중성자의 flux를 극복할 수 있다. 기술적인 사항으로 회전속도를 어떻게 제어할 것인가가 중요하다. 또한 ingot의 직경이 커지면 그만큼 반경 방향의 분포가 불균일 하여지므로 현재는 직경 6“까지 NTD를 하고 있다.

(7)식의 A는 ingot의 길이 방향 비저항의 분포도를 의미한다. 원자로의 깊이 방향으로 중성자 flux가 불균일하여 보통 중심 부분에서 flux가 높다. 따라서 중심 부분의 비저항이 낮게 나타날 가능성이 있다. 이를 위하여 캡슐을 상하 왕복운동을 하던가, 중간에 뒤집어서 장입하거나, 캡슐의 두께를 조절하거나 하여 길이 방향 반경 방향의 분포를 균일하게 한다.

이러한 기술은 수차 반복 시험을 통하여 정확한 운전 조건을 찾아내게 되면, 이후 문제를 해결할 수 있다. 비저항의 측정과정에서 기기 및 방법상의 오차도 감안 할 필요가 있다. 비저항을 측정하기 전에 고속중성자로 인하여 생긴 조사 결함을 충분히 제거하기 위한 조건을 수립하여야 한다. 조사 결함의 제거를 확인하는 방법으로는 EPR(Electron Paramagnetic Resonance Spectroscopy), PA(Positron Annihilation), minority carrier lifetime 측정, IR(Infrared) 측정, SANS(samall angle neutron scattering) 및 DLTS(Deep Level Transient Spectroscopy) 방법들이 있다. 이중에서 정확한 열처리 온도 및 시간 조건을 파악하기 위하여 쉽고, 많이 사용하는 방법은 minority carrier lifetime 측정과 DLTS이다. 4-probe 측정 방법에서 중요한 사항은 측정 단자간의 간격을 정확히 유지하고, 시편에 접촉시켰을 때, 무리하게 힘을 가하지 않도록 하여, 기계적인 손상이 없도록 하여야 한다. 또한 전류를 크게 하여 저항열이 발생하지 않도록 한다. Wafer의 두께를 정확히 측정하여야 비저항의 계산 오차를 줄일 수 있다.

비저항은 4-probe의 단자간 간격이 일정하고, 시료의 두께가 단자의 간격 보다 작다

고 하면 다음 식으로부터 구한다.

$$\rho = 2\pi sF\left(\frac{V}{I}\right) \quad (8)$$

여기에서, s : 단자간 간격

F : 시료의 모양, 끝단으로부터 거리, 두께, 직경, 온도에 따른 보정치이다.

측정기의 전류공급 부분과 전압 측정 부분의 정확도를 유지하는지 확인이 필요하다. 표준 시료를 사용하여 주기적으로 보정할 필요가 있다. Ingot의 경우, 비저항은 직경이 10s보다 크면 F=1로 하여 계산하면 된다. 비저항의 크기에 따라 측정 오차는 증가하는데 100 Ω·㎝에서 ±3% 정도의 오차 가 있다. ASTM 규격[8]에 의하면 percent error ≈ 0.1 $\rho^{0.71}$의 관계가 있다.

2.5 조사 결함의 제거

중성자 조사에 의한 결함을 열처리를 통하여 충분히 제거하지 않으면, 비저항과 minority carrier lifetime에 영향을 준다. 최종 비저항의 재현성 유지를 위하여 열처리 조건을 관리하여야 한다. 열처리 온도, 가열속도, 가열시간, 냉각속도를 일정하게 관리할 필요가 있다.

조사결함의 유무 및 열처리에 의한 제거를 측정하는 방법 중, 일반적으로 많이 사용하고 있는 DLTS는 시간과 온도에 따른 capacitance의 변화를 측정하는 방법으로 결함의 종류를 파악할 수 있다. 일반적으로 전하를 생성시키기 위하여 의도적으로 주입된 불순물을 shallow level이라고 하고, 여기에서 deep level이라고 하는 것은 band gap내에서 전하를 trap 시키는 역할을 하는 이온화 에너지가 큰 것을 의미한다.

Minority carrier lifetime 측정은 광도전 감쇠법(photoconductive decay method, PCD)과 마이크로웨이브의 반사를 이용한 광도전 감쇠법(μ-PCD)이 있다. PCD는 광펄스 신호에 의한 시간에 따른 voltage변화로서 측정한다. Voltage변화를 측정하기 위하여서는 시료에 전극을 부착하여야 한다. 그러나 마이크로웨이브의 반사를 이용한 μ-PCD법은 광도전 감쇠법과 유사하나 마이크로웨이브의 반사를 이용하여 측정하기 때문에 비접촉식으로 시료에 영향을 주지 않는다. Minority carrier lifetime은 결함이 있을 경우, minority carrier가 trap되어 소멸하기 때문에 작다. 따라서 열처리를 통하여 결함을 제거하면 lifetime이 길어진다. Topsil의 경우 시판되고 있는 minority carrier lifetime은 500 μs 이상을 유지하고 있다.

2.6 품질관리 일반

Si은 매우 취약하기 때문에 운반 및 취급에 주의를 하여야 한다. 육안으로는 관찰되지 않지만 충격으로 결함이 생기게 되면 그 부분은 불량으로 wafer의 수율이 낮게 된다. 따라서 운반과정에서 ingot간에 부딪히지 않게 충분한 간격을 유지하여야 한다. 각종 전용 운반 기구 및 충진재가 판매되고 있으므로 이용하면 된다. 캡슐에 장입하거나, NTD

처리 후에 충분히 세척할 필요가 있다. 표면에 불순물이 부착되면 doping효과가 낮아지고, doping 후 열처리 과정에서 확산 인입되면 결함으로 존재하게 된다. 기계적으로 생긴 결함은 광학현미경 및 전자현미경으로 관찰되므로, wafer의 수율이 낮아지게 되면 sample 시험을 통하여, 공정을 점검할 필요가 있다.

일반적으로 품질관리체계는 ISO 9001을 따르고 있다. 이에 따른 조직, manual 및 절차서를 수립하고 관리할 필요가 있다. 일본의 수요자는 QS-9000을 따른다고 하는데 이것은 자동차 부품생산업체에 적용되는 품질관리체계로, 아마도 주로 NTD wafer가 자동차용 소자에 적용되기 때문인 것으로 생각된다.

3. Dummy Si ingot의 분석

NTD의 시운전을 위하여 입수한 길이 50 ㎜, 직경 5″의 dummy Si ingot를 NTD를 하지 않은 상태에서 특성을 파악하기 위하여 FTIR, 비저항 및 X-ray 회절 분석을 수행하였다. FTIR(Fourier Transform Infrared Spectroscopy)분석은 ingot가 CZ인지, FZ인지를 파악하기 위해서 수행하였으며, 비저항은 초기 비저항을 확인하여야 doping결과를 파악할 수 있기 때문임과 CZ이면 비저항이 매우 낮기 때문에 FTIR 분석 결과를 보완할 수 있기 때문이다. X-ray분석은 결정의 방향을 파악하기 위해서이다. 이러한 측정을 수행함으로써 향후 NTD의 품질관리를 위하여 필요한 사항을 일부 점검하기 위한 이차적 목적도 있다.

3.1 FTIR 분석

FTIR분석으로 파악할 수 있는 것은 산소, 탄소의 함량을 알 수 있으며, 일반적으로 CZ에서는 FZ보다 산소 농도가 크기 때문에 산소의 peak(wavenumber 1105 $㎝^{-1}$)가 크게 나타나 탄소의 peak(wavenumber 607.2 $㎝^{-1}$)와 비슷하지만 FZ에서는 상대적으로 산소의 peak가 작다.

시편은 15 ㎜ x 40 ㎜ x 4 ㎜로 ingot에서 채취하여 표면을 연마, 세척한 후 상온에서 측정하였다. 측정 결과는 그림 1과 같다. 607.2 $㎝^{-1}$에서 탄소의 peak가 크게 보이는데, 1105 $㎝^{-1}$에서 산소의 peak가 작게 나타났다. 참고자료[9]와 비교한 결과 전형적인 FZ Si임을 확인할 수 있었다. 산소농도가 정확한 표준시료가 없는 관계로 정량분석을 시도할 수 없었다.

3.2 비저항 측정

10 ㎜ x 25 ㎜ x 1 ㎜의 직사각형으로 된 시료를 3개 채취, 표면을 연마, 세척 후 4-probe분석을 하였다. Geometrical factor 영향을 줄이기 위해서는 wafer상태나 ingot를 그대로 분석하는 것이 좋으나, 여건상 직사각형의 시료를 제작하여 사용하였다. 표면저항을 측정한 후 두께와 계산으로 구한 비저항 결과는 표 3과 같다. 각 시료당 3회씩 측정하

여 평균하였다. 평균 비저항이 31.9 Ω·㎝로 doping 처리된 ingot임을 알 수 있다. 현재로서는 NTD처리한 ingot 인지, 아니면 일반적인 화학적 doping처리한 것인지는 알 수 없다. spreading resistance 측정법을 사용 비저항의 분포를 파악하여야 가능하리라고 본다. NTD처리한 경우 화학적 doping법보다 반경 방향의 비저항 분포가 균일하기 때문이다.

3.3 X-ray 분석

Dummy ingot 의 결정방향을 알기 위하여 X-ray회절 분석을 수행하였다. 정확한 결정방향은 Laue pattern을 얻어야 하지만 여건상 회절방법을 사용하였다. 시편의 면은 ingot의 길이 방향에 수직하는 면이다. Si 단결정에서 ingot의 길이 방향의 수직면은 (100), (110) 및 (111) 방향중의 하나이다. 각 방향에 따라 가공 특성 및 전기적 특성이 다르기 때문에, 최종 어떤 소자를 제작할 것인가에 따라 적합한 방향의 wafer를 사용한다. X-ray는 Cu Kα를 사용하였다. 2θ=10°- 100°를 scan한 결과는 그림 2와 같다. 2θ=69°되는 위치에서 (400) peak만이 관찰되었다. 즉, 결정방향이 (100)임을 의미한다. (100), (200) 및 (300)의 peak가 나타나지 않는 것은 structure factor 때문이다. Si 단결정은 diamond structure를 하고 있다. 이를 종합하면 dummy로 제공된 ingot는 planar형의 소자를 제작하기 위하여 (100) 방향으로 성장시킨 FZ Si임을 알 수 있다.

4. 결론

NTD장치를 이용하여 FZ Si ingot에 정확한 양의 P를 도핑하기 위한 품질관리와 dummy Si ingot를 사용하여 특성분석을 수행한 내용에 대하여 검토하였다. 수요자가 제시하는 비저항과 비저항 분포를 충족시키기 위하여서는 중성자 조사량과 도핑처리한 ingot의 비저항을 정확하게 측정하여야 한다. 이를 위한 품질관리에는 정확한 중성자조사량 측정, Si ingot의 관리, 비저항 측정 및 조사결함제거 등이 필요하다. 또한 품질관리에 필요한 각종 분석 방법을 제시하였다. 향후, 상업적으로 NTD를 수행하려면 수요자가 요구할 ISO-9001 및 QS-9000의 품질관리 체계를 구축할 필요가 있다. Dummy Si ingot에 대한 FTIR, 비저항 및 X-ray회절 시험을 수행한 결과, FZ-Si이고 결정방향은 (100)임을 알 수 있었다. 이러한 실험을 통하여 NTD 품질관리를 위하여 필요한 장비로서 연구소내에 보유하고 있는 측정장비에 관한 사항을 파악할 수 있었다. NTD품질관리를 위하여 필요한 측정장비는 현재 규모에서는 전용으로 필요한 것이 아니므로, 다른 연구과제와 공용으로 활용하는 방안을 모색하여, 구비하는 것이 기술개발을 위하여 필요하다고 사료된다.

후기

본 발표내용은 원자력연구소 자체과제 중에서 중성자도핑기술확립을 위한 재료특성평가

과제의 일부로 수행되었음.

참고문헌

1. K. Lark-Horovitz, Proc. Conf. Univ. Reading. London, Butterworth, 1951, p47.
2. K. Heydorn and N. Heggard, Chemometrics and Intelligent Laboratoty Systems, 23, 1994, p191.
3. W, von Ammon, Nucl. Instr. and Meth. B63, 1992, p95.
4. 전병진, 중성자도핑, KAERI/AR-604, 2001.
5. P. E. Schmidt and J. Vedde, Electrochem. Soc. Proc., 98-13, 1998, p13
6. A. W. Carbonari, W. Pendl Jr., J. R. Sebastiao, R. N. Saxena and M. S. Dias, Nucl. Instr. and Meth. B 83, 1993, p157.
7. J. M. Meese and S. L. Gunn, Neutron Transmutation Doped Silicon, ed. by J. Guldbery, (Plenum Press, N. Y., 1981, p223.
8. ASTM Standard F84, 1916 Race St.. Philadelphia, Pansylvania 19103.
9. D. K, Schroder, Semiconductor Material and Device Characterization, John Wiley & Sons, Inc., 1998, p602.

표 1. Safari-1원자로에서의 비저항 분포

비저항 분포 종류	비저항 분포 결과
average resistivity accuracy (A_c)	3 %
radial resistivity gradient (R)	2 %
axial reistivity accuracy (A)	5 %

표 2. Topsil NTD wafer의 비저항 분포 사양

비저항 범위 / 비저항분포 Ω·㎝	5-100	100-200	200-600	600-1500	600-2000
radial resistivity gradient (R), %	3	4	5	7	10

표 3. 비저항 측정 결과

시편번호	크기 (㎜)	평균 표면저항 (Ω/square)	Geometrical Factor	비저항 (Ω・㎝)
1	0.590 x 9.82 x 24.52	641	0.368	32.7
2	0.847 x 9.82 x 24.53	458	0.498	31.6
3	1.210 x 9.81 x 24.49	353	0.641	31.4

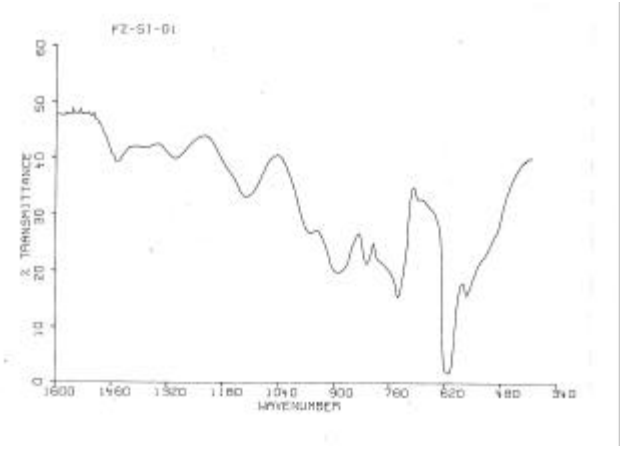

그림 1, Dummy Si ingot의 FTIR transmission spectrum

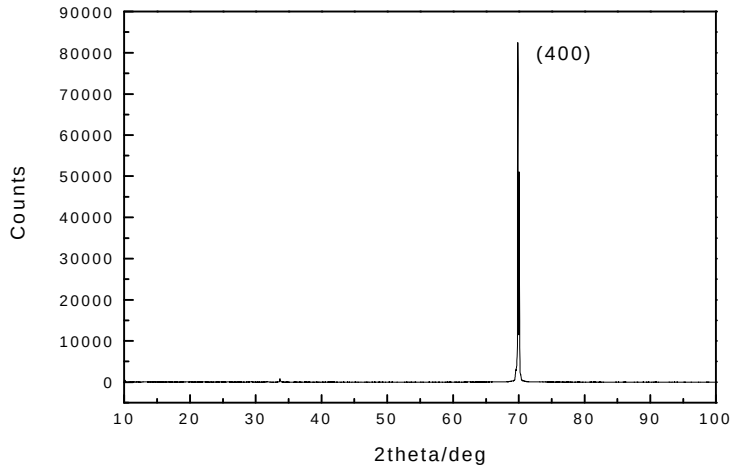

그림 2. Dummy Si ingot의 X-ray 회절 pattern