

Ion Beam Mixing에 의한 Ni/Si계의 상 형성 및 전이에 관한 연구

최정동* · 광준섭 · 백홍구 · 황정남** · 한정인***

연세대학교 공과대학 금속공학과

*(주)LG반도체연구소 선행공정실

**연세대학교 이과대학 물리학과

***전자부품종합기술연구소 광전부품연구실

A Study on the Phase Formation and Sequence in Ni/Si System during Ion Beam Mixing

Jeong-Dong Choi*, Joon-Seop Kwak, Hong-Koo Baik,

Chung-Nam Whang** and Jeong-In Han***

Department of Metallurgical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

***Department of Physics, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea*

****Opto-Electronic Laboratory, Korea Electronics Technology Institute, 455-6 Masan-Ri*

JinWi-Myon, PyungTaek-Gun, KyungGi-Do, Korea

초 록 금속/실리콘계에 대한 이온선 혼합시의 비정질상 및 결정상 형성여부를 예측할 수 있는 모델(ADF Model)과 초기 결정상 예측 모델(PDF Model)의 적용을 실험적으로 조사하기 위하여 Ni/Si계에 대한 이온선 혼합을 온도와 이온선량을 변수로 하여 행하였으며 상형성과정을 해석하였다. 이온선 혼합은 80keV가속기를 이용하여 상온~200°C의 온도 범위에서 $1.0 \times 10^{15} \text{Ar}^+/\text{cm}^2 \sim 2.0 \times 10^{16} \text{Ar}^+/\text{cm}^2$ 의 이온선량을 변화시키면서 실험하였고, 상분석은 TEM과 GXR드를 이용하였다. Ni/Si계에 대한 ADF값은 0.804로 양의 값을 가지므로 이온선 혼합시 비정질상이 형성되고, Ni₂Si상이 다른 화합물상보다 훨씬 큰 음의 PDF값을 갖으므로 초기 결정상이 Ni₂Si가 될 것을 예측하였다. 이러한 예측은 실험결과와 매우 잘 일치하였다. 이상의 연구결과로부터 ADF 및 PDF모델을 이용하여 박막에서 형성되는 상을 보다 정확히 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

Abstract To investigate the application of amorphization determining factor(ADF) and phase determining factor(PDF) model to metal/silicon systems, ion beam mixing was carried out at various temperature with different doses in Ni/Si system. Ion beam mixing was performed in R.T.~200°C range using 80keV accelerator with $1.0 \times 10^{15} \text{Ar}^+/\text{cm}^2 \sim 2.0 \times 10^{16} \text{Ar}^+/\text{cm}^2$ and the phases were characterized by TEM and GXR드. ADF value of Ni/Si system is 0.804 and PDF value of Ni₂Si is the largest negative among other compound phases. According to ADF and PDF models, we could predict the formation of amorphous phase and also predict Ni₂Si as the first crystalline. These predictions fairly well corresponded to experimental results. In conclusion, ADF and PDF models can be well applied to the prediction of the amorphization reaction and first phase formation in binary thin films.

1. 서 론

이온선 혼합법(Ion Beam Mixing)은 A와 B 두 물질의 박막층을 여러 층으로 진공증착시킨 다음, 질량이 큰 불활성 기체(Ar⁺, Xe⁺)를 증착된 박막층에 주입시켜 두 층의 경계면에서 화합물 또는 비정질상태의 박막을 생성시키는 방법이다. 다층박막 구조를 이용하면 이

온선 혼합법으로 원자조성비나 원자의 종류에 관계없이 여러 종류의 화합물을 만들 수 있다¹⁾. 종래의 열처리 방법에 비해 급냉 속도가 훨씬 빠르고 원자의 확산 메카니즘도 다르기 때문에 여러가지 준 안정상태나 비정질상태가 형성되며 야금학적으로 얻을 수 없는 새로운 상도 얻을 수 있으며²⁾, 또한 ULSI에서 ultra shallow junction을 위한 silicide제조에 이온선

혼합법이 이용될 수 있다. 이러한 중요성에도 불구하고 금속/금속 계에 비하여 금속/실리콘 계에서의 이온선 혼합시 상형성 및 전이에 대한 열역학적 및 속도론적 연구가 매우 부족한 상태이다.

이온선이 조사된 후, 계면에서의 원자수송 현상에 대해서 여러가지 이론적인 모델과, 이러한 모델을 바탕으로 이온선 혼합시의 상의 안정성 및 상형성을 예측하는 경험적인 모델들이 제시되고 있다. 첫 번째, 비정질상 형성의 경우, Takayama³⁾를 비롯하여 Liu⁴⁾, Alonson⁵⁾, Rauschenbach⁶⁾, Johnson⁷⁾ 등의 연구자들에 의해 여러가지 모델들이 제시되었음에도 불구하고 각각의 예측모델들은 많은 금속/금속 및 금속/실리콘계 중에서 특정한 몇가지 계에만 적용될 뿐이었다. 두 번째, 상형성 및 상전이의 경우, 열처리에 의한 상형성 및 전이에 관해서는 Bené⁸⁾를 비롯하여 Gosele⁹⁾, Walser¹⁰⁾ 등 여러 연구자들에 의해서 연구되어 왔으며 특히, 근래에 Pretorius¹¹⁾의 유효생성열 개념은 대부분의 금속/금속 및 금속/실리콘계의 상전이에 대해서 비교적 적절한 해석으로 받아들여지고 있다. 그러나, 이온선 혼합시의 상형성 및 전이에 관해서는 적절한 모델이 없는 실정이며 특히, 이온선 혼합에 의한 상형성에 대한 열역학적 및 속도론적 접목은 거의 연구가 이루어지지 않고 있다. 이온선 혼합과정에서 중요한 역할을 하는 것은 이체층들에 의한 캐스케이드 혼합(cascade mixing), RED(Radiation Enhanced Diffusion) 및 핵자 형성 등과 같은 동역학적인 작용과 열확산, 평형상태도 등과 같은 열역학적 작용이다. 열역학적인 관점에서 보면, 가장 큰 음의 값의 생성열을 가진 상이 가장 큰 열역학적 구동력을 가지게 되고, 따라서 상형성시 제일 먼저 형성된다. 그러나, 많은 경우에 그러한 열역학적인 관점에 의한 예측은 실험결과와 일치하지 않고 있으며, 이러한 경우에는 보통 처음과 그 다음의 상형성을 결정하는데 있어서 열역학적 구동력의 역할이 원자의 공급과 같은 동역학적인 인자보다 영향력이 떨어지는 경우이다.

따라서, 이온선 혼합시 A/B 계면에서의 혼합영역에서 상이 형성될 경우, 생성열(ΔH_i) 대신 유효생성열($\Delta H_i'$)을 적용해야 한다. 유효

생성열이란, 반응 중에 방출된 총열량은 그램원자당 생성열과 반응에 관계한 원자개수와 의 곱과 같다는 것이다. 어떤 반응 중에 소비된 원자의 개수는 단일 상에서의 그램원자당 생성열만큼이나 중요한 요인이 된다. 결국, 유효생성열은 혼합에 기여하는 원자의 개수는 상형성시 원자의 이동도와 원자의 공급량에 의존한다고 볼 수 있다. 이온선 혼합시 상형성 과정은 이러한 유효생성열 개념을 이용하여 설명되어질 수 있다.

이에, 본 연구에서는 이온선 혼합시의 비정질상 및 결정상형성 예측모델(ADF Model: Amorphization Determining Factor Model)¹²⁾과 초기 결정상 예측모델(PDF Model: Phase Determining Factor Model)¹³⁾을 Ni/Si계에 대한 이온선 혼합실험결과에 적용함으로써 모든 금속/실리콘계에 대한 이온선 혼합시의 비정질상 및 결정상 형성 여부를 예측하고자 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2-1. 실험장치

이온선혼합을 수행하기 위한 장치를 Fig. 1에 나타내었다. 이온을 생성시키는 이온원은 기체이온을 얻기 쉽고 제작이 간편한 RF형을 이용했는데, 본 실험에서 사용한 RF Power는 주파수가 80MHz, 출력은 20watt이다. 추출된 이온의 에너지를 바꾸지 않고 집속할 수 있는 정전집속렌즈로서 Einzel lens를 사용하였다. 본 실험에서 사용한 자기질량 분석기의 각도는 15°이고 곡률반경은 101.6cm이다. 최대자기장의 세기는 5680gauss이다. 한편, 균일한 이온의 전류밀도를 얻기 위하여 길이 9cm인 편향판에 60Hz, 2keV의 교류를 걸어서 이온선을 좌우로 sweep하도록 하였다. 표적함에는 이온선 혼합시 hydro-carbon 및 유효산 펌프의 역류에 의한 오염을 막기 위해서 LN₂ shroud를 설치하였고, 시료 교체시 진공을 파괴하지 않고 교체가능하도록 load-lock system을 설치하였다. 표적함의 진공도는 1×10^{-6} Torr이고, 이온선 혼합시 진공도는 4×10^{-6} Torr이었다.

2-2. 실험방법

시편구조는 단층박막, 이중박막 및 다층박막구조로 제작하였다. TRIM CODE¹⁴⁾에 의한

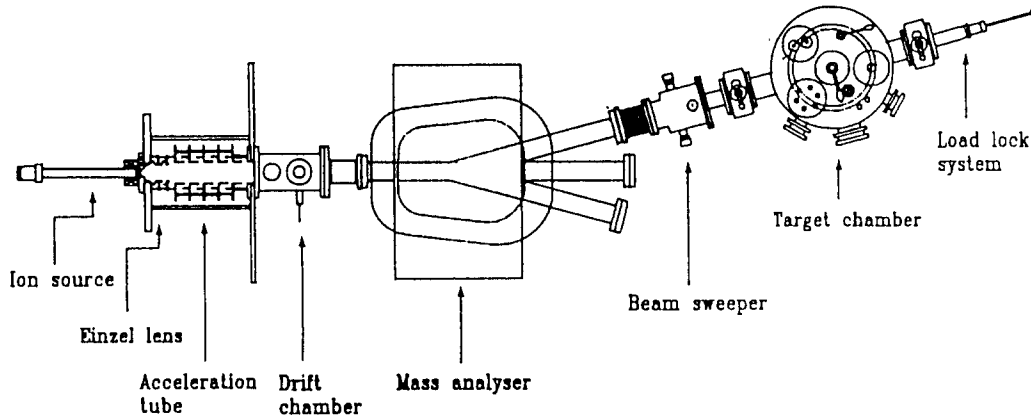


Fig. 1 Schematic diagram of 80keV accelerator used in this experiments.

simulation 결과, R_p (projected mean range) 값은 300 Å이었다. 이에 따라 단층박막의 경우, Si(100) 단결정기판위에 Ni층을 300 Å 증착시켰다. 시료제작과정을 보면, 먼저 Si(100) 단결정기판을 아세톤, 탈이온 증류수로 초음파 세척한 후 전자선 증착장치(Leybold사)에 장착한다. 이중박막의 경우, 기판위에 먼저 Si를 600 Å 증착한 후 Ni를 300 Å 증착하여 Ni(300 Å)/Si(600 Å)/Si-Substrate인 상태의 시료를 제작하였다. 증착시 두께의 균일성을 갖도록 분당 30회 정도 회전시키면서 증착하였다. 같은 방법으로 Si기판위에 Si와 Ni를 각각 90 Å과 50 Å씩 반복 증착시켜 4주기의 다층박막구조 시편을 제작하였다. TEM분석을 위한 시편은 NaCl단결정 기판을 사용하였다.

가속기로부터 Ar^+ 이온은 80keV로 가속시켜 이온선 혼합을 수행하였으며 온도는 상온(20°C)과 200°C로 변화시켰고 이온선 혼합시 형성되는 화합물 및 비정질 합금 형성과정을 연구하기 위하여 Ar^+ 이온을 각각의 온도에 대해서 $1.0 \times 10^{15} Ar^+ / cm^2 \sim 2.0 \times 10^{16} Ar^+ / cm^2$ 로 변화시켰다.

이온선 혼합시킨 각 시편을 200°C에서 30초 동안 RTA처리를 하여 열처리시 상평형에 대한 이온선 혼합의 영향을 알아보기 하였다. 열처리중의 진공도는 4.0×10^{-6} Torr이하로 유지하였다. 이온선혼합 및 열처리 후에 생성된 결정상을 확인하기 위하여 TEM과 GXR(D) (Glancing-incidence X-Ray Diffraction) 분석을 병행하였고, GXR(D)에서는 tube voltage 50keV, tube ampere 100mA, scan speed 5°/

min, 입사각 3°를 각각 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 비정질화반응 및 결정상 형성과 삼전이

Ni/Si 계의 경우에는 제작된 시편의 양상에 따라 세 가지로 나누어 실험을 행하였다. Si층이 단결정일 때와 비정질일 경우에 Ni층과의 혼합영역 및 상형성 과정의 차이점을 알아보기 위해서 Si단결정 기판위에 Ni층을 바로 증착시킨 경우와 Si을 증착시킨 후 Ni를 증착시킨 bilayer 및 Si층과 Ni층을 교대로 증착시켜 제작한 multilayer의 경우 세 가지로 구별하였다.

먼저, Ni/c-Si(substrate) 시편을 상온에서 각기 다른 이온선량으로 혼합한 후 XRD분석한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 알 수 있듯이 이온선량이 $5.0 \times 10^{15} Ar^+ / cm^2$ 에 도달할 때까지는 아직 Ni상 외에는 다른 상이 관찰되지 않았다. Si기판으로부터 떨어져 나온 Si 원자 및 혼합영역에 존재하는 Si원자는 아직까지 화합물상을 형성하지 못하고 치환형 또는 비정질상으로 존재하고 있음을 알 수 있다. 계속적인 이온선량의 증가에 따라 $1.0 \times 10^{16} Ar^+ / cm^2$ 의 이온선량에서는 Ni_3Si_2 가 먼저 형성이 되고 Ni_3Si_2 상의 peak도 관찰되었다. 이온선량이 증가함에 따라 Ni peak은 감소하였으며, 이로부터 다결정 Ni층 내의 Ni원자가 이온선 혼합에 의해서 혼합영역인 Si층과의 계면쪽으로 이동을 하게 되고 과잉의 Ni원자와 잔류하는 Si원자가 Ni_3Si_2 상을 형성하는 것을 알 수 있다. Ni층과 Si층 계면에서 Ni_3Si_2 상

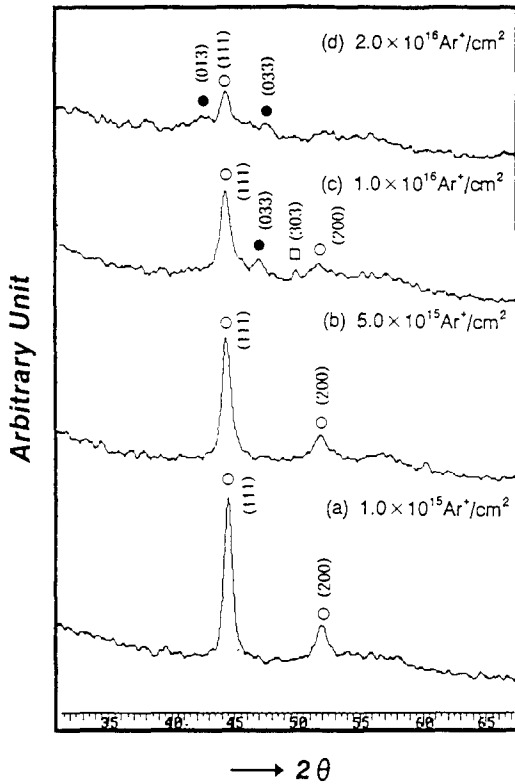


Fig. 2. XRD patterns for Ni/c-Si(substrate) thin films after ion beam mixing at room temperature. (○ : Ni, ● : Ni₂Si, □ : Ni₅Si₂)

이 형성된 직후 Ni₂Si층과 Ni층계면에서 과잉의 Ni원자 공급에 의해 Ni₅Si₂가 연속적으로 형성되고 있으며 Ni층의 감소와 더불어 Ni₂Si상은 계속적으로 성장하고 있었다. 이온선량이 2.0×10¹⁶Ar⁺/cm²인 경우에는 Ni층이 거의 소비가 되고 Ni₂Si층의 성장이 두드러짐을 알 수 있다.

Fig. 3는 Ni/a-Si/Si(substrate)에 대한 상온에서의 이온선 혼합실험 결과를 나타내주고 있다. Ni층이 Si단결정기관과 직접 계면을 형성하고 있을 때와 마찬가지로 초기에는 Ni peak만이 관찰되었다. 이것은 결국 Ni층은 다결정상으로 존재하고 있으며 증착시킨 Si층은 비정질상으로 존재하고 있음을 의미한다. 비교적 적은 양의 이온선량(5.0×10¹⁵Ar⁺/cm²)에 대해서 Ni층내의 Ni원자가 비정질상인 Si층과의 혼합영역에서 거의 완전한 비정질 화합물을 형성하고 있으며 계속적인 이온선량의 증가에 의해서 Ni₂Si상이 형성됨을 알 수 있었

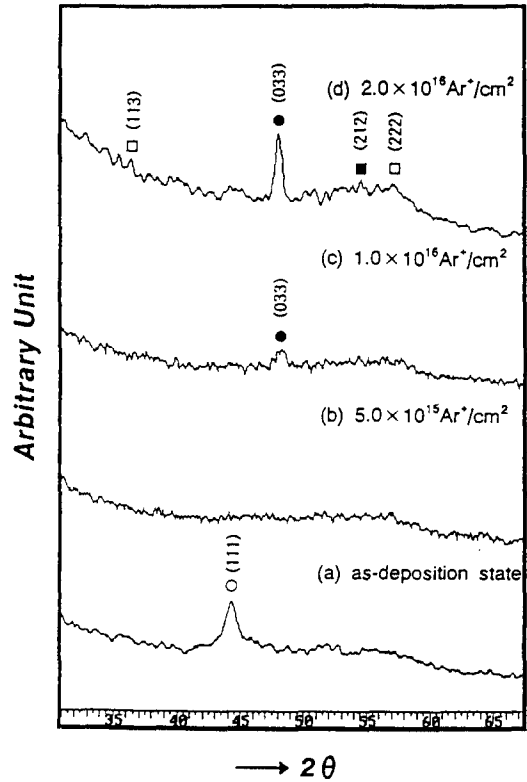


Fig. 3. XRD patterns for Ni/a-Si bilayer thin films before and after ion beam mixing at room temperature. (○ : Ni, ● : Ni₂Si, □ : Ni₅Si₂)

다. Fig. 2에서와는 달리 1.0×10¹⁶Ar⁺/cm²의 이온선량에서는 Ni₂Si상만이 관찰되었으며 2.0×10¹⁶Ar⁺/cm²의 이온선량에서는 Ni₅Si₂상과 NiSi상이 Ni₂Si상과 함께 관찰되었다. Ni₂Si상은 이 범위의 이온선량에서는 계속적인 성장을 나타내고 있으며 혼합영역내에서 형성된 Ni₂Si층과 비정질화 된 과잉의 Ni층 사이의 계면에서 Ni₅Si₂가 형성이 되고, Ni₂Si층과 Si층 사이의 계면에서는 NiSi가 형성되었다. 이 때, 계면은 Si층쪽으로 계속해서 이동하고 있는 것으로 판단된다. NiSi상은 단결정 Si일 때 보다는 다결정 혹은 비정질상의 Si일 경우에 훨씬 쉽게 형성이 되며 이것은 비정질상의 Si일 경우, 이온선에 의한 혼합이 쉬우며 Si원자의 확산이 더욱 쉽게 일어나고 확산해 온 Si원자는 NiSi상의 형성에 필요한 Si원자의 공급에 소비된 것이다.

같은 시편에 대해서 이온선 혼합실험을 200°C에서 행한 경우 XRD분석결과를 Fig. 4

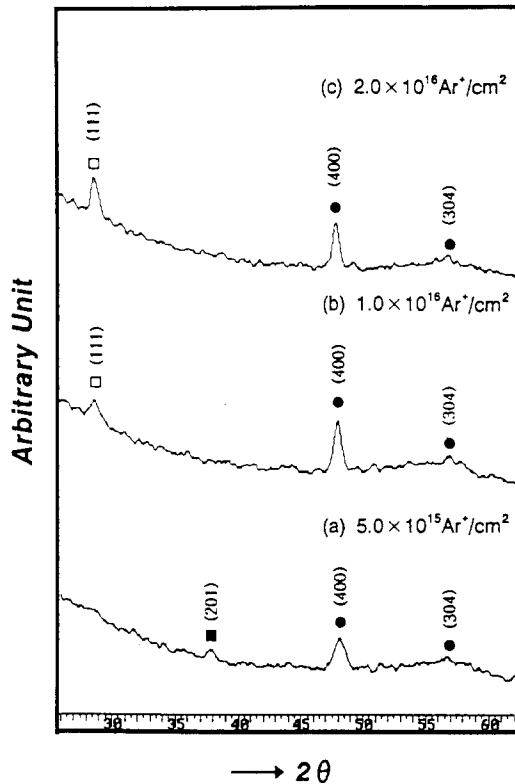


Fig. 4. XRD patterns for Ni/a-Si bilayer thin films after ion beam mixing at 200°C. (○ : Ni, ● : Ni₃Si, □ : Ni₅Si₂)

에 나타내었다. 앞에서와는 달리, 작은 이온선량($5.0 \times 10^{15} \text{Ar}^+/\text{cm}^2$)에서도 Ni₃Si가 쉽게 형성되었으며 Si과의 계면에서 Ni₃Si상도 관찰되었다. 계속적인 이온선량의 증가에 따라 Ni₅Si₂상의 형성 및 성장을 볼 수 있으며 Ni₃Si상은 안정한 상으로 존재하고 있었다. 이것은 이온선 혼합에 의한 각 원소들의 확산구동력 증가와 동시에 열적인 구동력이 첨가됨으로써 화합물상이 형성하기 쉬운 조건을 제공해주었음을 의미하며, 200°C의 비교적 낮은 온도 증가임에도 불구하고 이온선 혼합시 확산에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 따라서, 이온선 혼합과 동시에 적절한 열처리를 조합함으로써 실리사이드 형성을 쉽게 조절할 수 있을 것이다.

각 시편에 대한 TEM 분석결과를 Photo. 1에 나타내었다. TEM 분석 결과는 XRD 분석결과와 마찬가지로 비정질상 → Ni₂Si → Ni₃Si₂

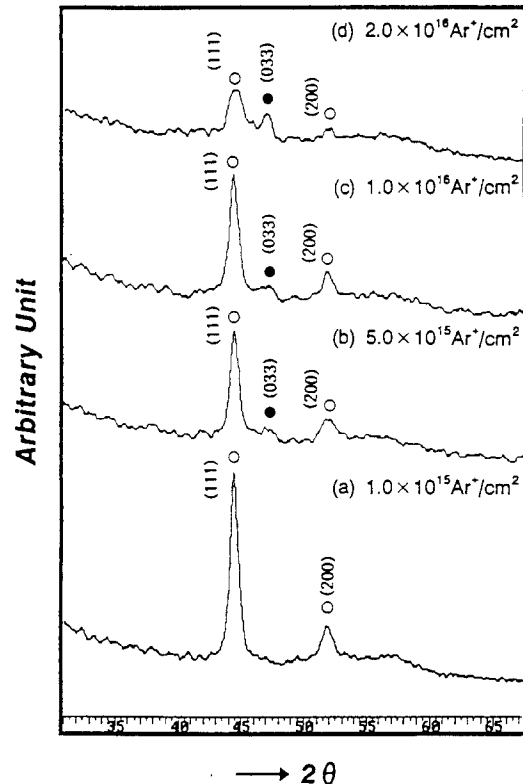


Fig. 5. XRD patterns for Ni/c-Si(substrate) thin films after RTA for 30sec at 200°C and pre-ion beam mixing at room temperature. (○ : Ni, ● : Ni₃Si).

및 Ni₂Si → Ni₃Si → Ni₃Si₂ 상으로의 전이과정을 볼 수 있었다. Ni₃Si상은 Ni₂Si상이 Ni₃Si₂상으로 상전이하는 과정에서 Ni₃Si상과 동시에 계면에서 공존하고 있음을 알 수 있다.

Ni/c-Si(substrate) 시편에 대한 이온선 혼합 후, 200°C에서 30초 동안 RTA 처리한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. $5.0 \times 10^{15} \text{Ar}^+/\text{cm}^2$ 의 이온선량 주입만으로는 Ni₃Si상이 형성되었다. K. N. Tu 및 다른 연구자¹⁵⁾들에 의하면 Ni/Si계 박막에서 Ni₂Si상이 형성된 것은 열처리 전 이온선 혼합에 의해서 Ni원자의 확산이 Si층 내로 일어났기 때문으로 생각한다. 이것으로부터 화합물 형성온도를 이온선 혼합에 의해서 통상의 열처리 온도 이하 또는 상온으로 낮출 수 있음을 알 수 있으며, 이는 이온선 혼합의 장점으로서 향후 이온선 혼합 공정의 응용에 매우 유용한 장점이 될 수 있을 것이다.

Ni/Si 다층박막의 경우, 이온선 혼합 후 XRD 분석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 이중

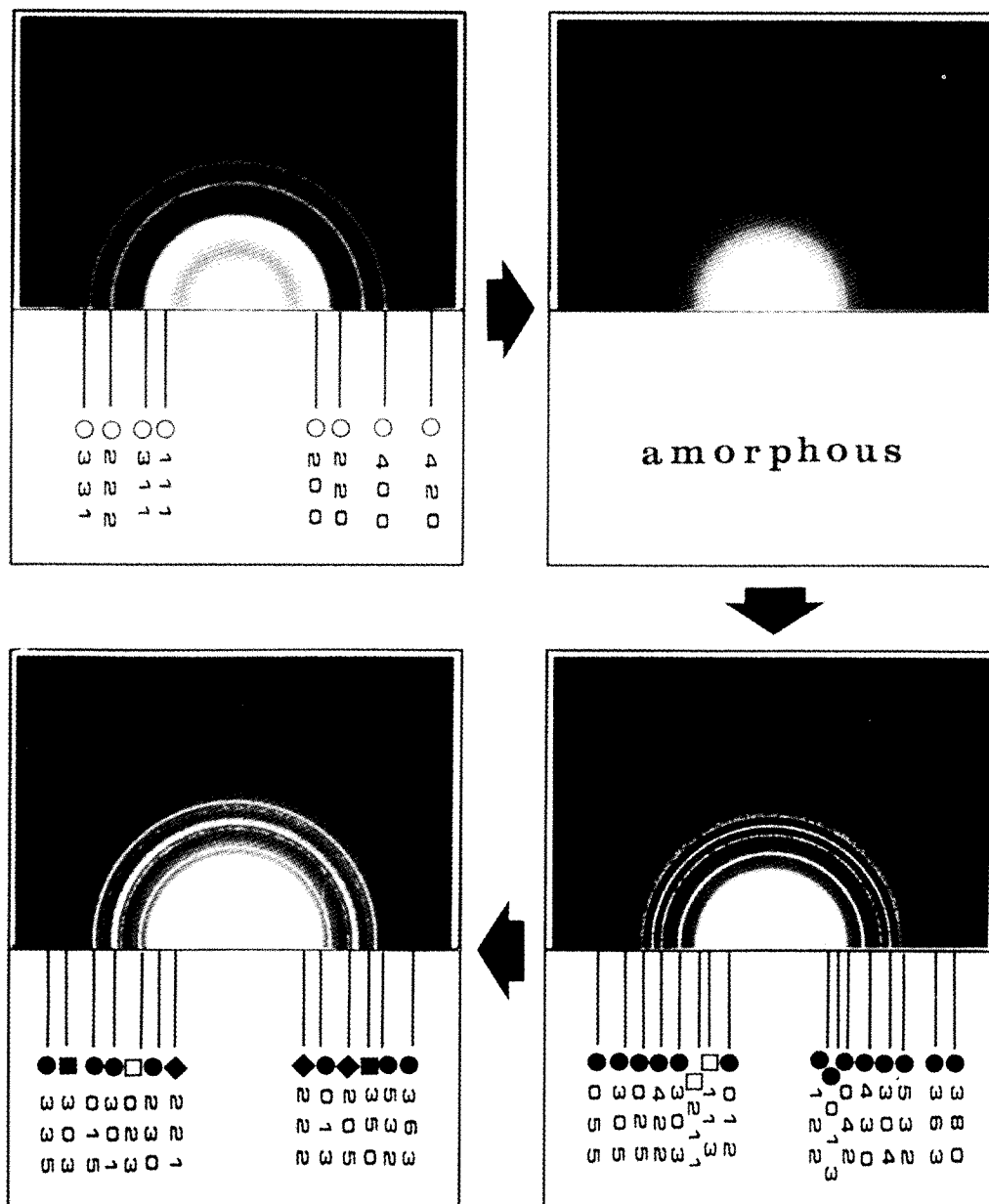


Photo 1. TEM diffraction patterns and sequence during ion beam mixing in Ni/Si bilayer thin films. (○ : Ni, ● : Ni₂Si, □ : Ni₃Si₂, ■ : NiSi, ◆ : Ni₅Si₂)

박막에 비해서 각각의 화합물 상이 쉽게 형성됨을 알 수 있다. 이 경우에는 Ni₂Si 상이 Ni 층의 감소와 함께 성장하고 있으며 이온선량의 증가에 따라 NiSi 상 및 Ni₃Si₂ 상이 형성되고 Ni₅Si₂ 상도 함께 관찰되었다. 2.0×10^{16} Ar⁺/cm²의 이온선량 주입후에는 NiSi₂ 상도 관찰된 것으로 보아 NiSi₂ 상은 NiSi 상과 Si 계면에서 형

성되었을 것으로 판단된다.

다층박막에 대한 TEM 분석결과를 Photo. 2에 나타내었으며 XRD 분석 결과와 마찬가지로 비정질상 → Ni₂Si → Ni₃Si₂ → Ni₅Si₂ 및 Ni₂Si → Ni₃Si₂ → NiSi의 상전이 결과를 나타내었다. Ni 층은 이온선혼합에 의한 각 화합물상의 형성에 완전히 소비되었다. 따라서 지속적인 이온

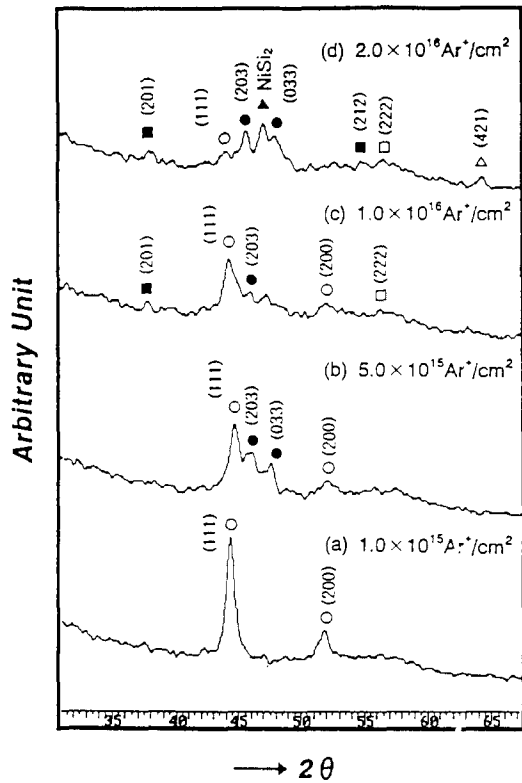


Fig. 6. XRD patterns for Ni/a-Si multilayer thin films after ion beam mixing at room temperature. (○ : Ni, ● : Ni₂Si₂, □ : Ni₃Si₂, ■ : NiSi, ▲ : NiSi₂, △ : Ni₂Si)

선 주입을 하게되면 Si-rich의 화합물상이 형성될 것으로 예측된다.

3-2. 예측모델의 적용 및 고찰

Ni/Si계에 대한 ADF값은 0.804^[21]이며 이 값은 양의 값을 나타내므로 Ni/Si계 박막에서 이온선 혼합시 비정질상이 형성됨을 알 수 있다. 계속적인 이온선량의 증가에 따른 상형성 및 상전이 과정은 PDF모델의 예측 결과와 일치하고 있다. Table 1에 나타난 Ni/Si계의 PDF값으로부터 알 수 있듯이 Ni₂Si상이 다른 화합물상 보다 훨씬 큰 음의 PDF값(-9.410kJ·cell/mol·atom)을 갖는다. 생성엔탈피값만을 비교하면 Ni₂Si(-46.9kJ/mol·atom)과 Ni₃Si₂(-45.2kJ/mol·atom)이 비슷한 값을 갖기 때문에 초기상을 예측하기 힘들지만 PDF값은 두 상이 큰 차이를 나타내 주고 있다. 초기에 유효농도에서 Ni₂Si상이 형성시 Ni이 제한원소가 되며, NiSi상이 형성시 Si이 제한원소가 된다. 반응계면에서의 생성열을 나타내는 열역학적 가능성(P_n)은 Ni₃Si₂(-40.30kJ/mol·atom)와 NiSi(-39.43kJ/mol·atom)이 Ni₂Si(-37.64kJ/mol·atom)보다 더 큰 음의 생성열 값을 가지지만 구조적인 가능성(P_{st})까지 고려한 PDF값은 Ni₂Si가 초기 형성상으로 예측되며 이는 본 실험결과와 일치하고 있다. 이상과 같은 실험 및 예측모델의 결과로부터 ADF와 PDF모델이 금속/실리콘 계의 박막에서 형성되는 상을 보다 정확히 예측할 수 있음을 알 수 있다.

연속적인 상전이 과정에서는 등조성 및 비등조성 용융화합물의 제한요소가 없어지며 Ni-rich쪽으로는 Ni₂Si→Ni₃Si₂→NiSi, Si-rich 쪽으로는 Ni₂Si→Ni₃Si₂→NiSi→NiSi₂가 형성됨

Table 1. Summary of parameter and PDF vlue for Ni/Si system.

SYSTEM	PHASE	CON-GRUENCY	LIMITING ELEMENT	C _{1, s} ¹⁾	C _{1, l} ¹⁾	N _s	N _l	N _v	ΔH ²⁾	P _{th} ³⁾	P _{st} ³⁾	PDF ⁴⁾	FIRST PHASE
Ni/Si	Ni ₂ Si	NC ⁵⁾	Ni	0.535	0.750	4	3	1	-37.2	-26.54	0.250	-6.635	Ni ₂ Si
	Ni ₃ Si ₂	C ⁶⁾	Ni	0.535	0.714	43	31	12	-42.3	-31.68	0.279	-8.842	
	Ni ₂ Si	C	Ni	0.535	0.667	6	4	2	-46.9	-37.64	0.250	-9.410	
	Ni ₃ Si ₂	NC	Ni	0.535	0.600	80	48	32	-45.2	-40.30	0.057	-2.303	
	NiSi	C	Si	0.465	0.500	8	4	4	-42.4	-39.43	0.200	-7.886	
	NiSi ₂	NC	Si	0.465	0.667	12	8	4	-29.3	-20.44	0.167	-3.407	

- 1) This value has the dimension of atomic %.
- 2) This value has the dimension of kJ/mol·atom.
- 3) This value has the dimension of cell.
- 4) This value has the dimension of kJ·cell/mol·atom.
- 5, 6) NC represents the non-congruently melting compound and C, the congruently melting compound.

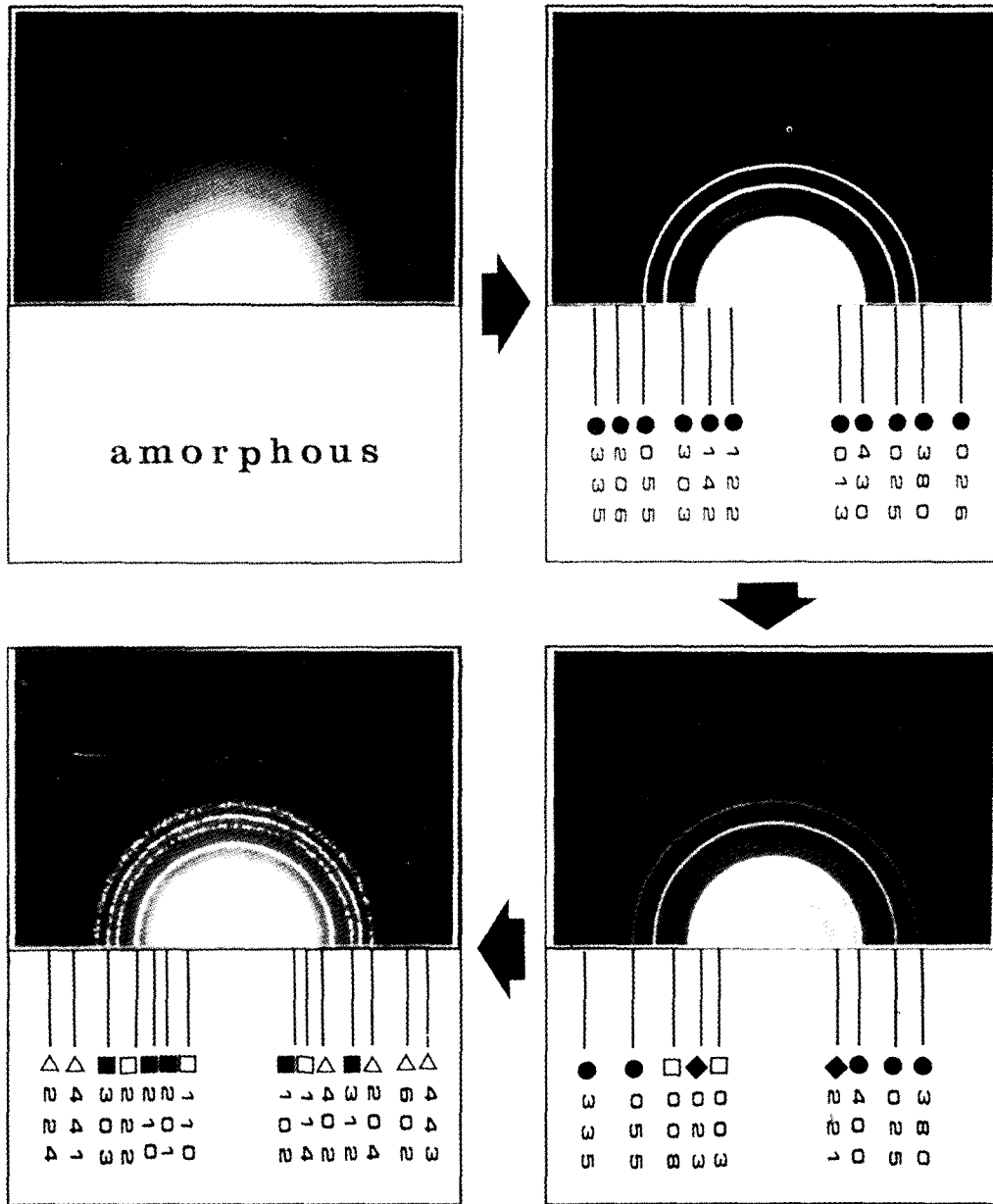


Photo 2. TEM diffraction patterns and phase sequence during ion beam mixing in Ni/Si multilayer thin films. (● : Ni₃Si, □ : Ni₃Si₂, ■ : NiSi, ◆ : Ni₃Si₂, △ : Ni₃Si)

을 알 수 있고, 이를 Ni/Si계에 대한 상태도¹⁰⁾와 비교해 보면 계면에서의 조성변화에 따라 위와 같이 상전이가 순서적으로 일어나고 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

이온선 혼합시 비정질화 반응 및 결정상 형성과 상전이 예측모델을 Ni/Si계에 대한 이온선

혼합실험에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 박막에서 이온선 혼합시 비정질상 형성 가능성에 대한 ADF모델에서 Ni/Si계에 대한 ADF값이 0.804로 양의 값이므로 이온선혼합시 비정질상이 형성될 것을 예측할 수 있었는데, 이것은 이온선혼합 실험결과와 일치하였다.
- 2) 박막에서 이온선 혼합시 계면에서 형성

되는 첫번째 결정상에 대한 예측 모델인 PDF모델에서 Ni_2Si 상이 다른 화합물상보다 훨씬 큰 음의 PDF값을 갖으므로 초기결정상이 Ni_2Si 가 될 것을 예측할 수 있었는데, 이것은 이온선 Ni/Si계에 대한 이온선혼합 실험결과와 일치하였다.

3) Ni/Si계에서 이온선 혼합에 의해 형성되는 초기상은 Ni_2Si 이였으며 계속적으로 $Ni_2Si \rightarrow (Ni_3Si_2) \rightarrow NiSi \rightarrow NiSi_2$ 및 $Ni_2Si \rightarrow Ni_3Si_2 \rightarrow Ni_3Si$ 로 상전이하였다.

참 고 문 헌

1. U. Peak and R.S. Averback, *Nucl. Instr. and Meth.*, B7/8, 561 (1985).
2. L.S. Hung, M. Nastasi, J. Gyulai and J.W. Mayer, *Appl. Phys. Lett.*, 42, 672 (1983).
3. S.S. Takayama, *J. Mater. Sci.*, 11(1976), p. 164.
4. B.X. Liu, E.Ma, J. Li, and L.J. Huang, *Nucl. Instr. and Meth.*, B19/20 (1987), p. 682.
5. J.A. Alonson and S. Simozar, *Sol. State Comm.*, 48(1983), p. 765.
6. B. Rauschenbach and K. Hohmuth, *Phys. Status solidi*, 72(1982), p. 667.
7. W.L. Johnson et al, *Nucl. Instr. and Meth.*, B7/8(1985), p. 657.
8. R.W. Bene, *Appl. Phys. Lett.*, 41(1982), p. 529.
9. U. Gosele and K.N. Tu, *J. Appl. Phys.*, 66 (1989), p. 2619.
10. R.M. Walser and R.W. Bene, *Appl. Phys. Lett.*, 28(1976), p. 624.
11. R. Pretorius, A.M. Vredenberg, and F. Saris, *J. Appl. Phys.*, 70(1991), p. 3636.
12. 최정동, 광준섭, 박상욱, 백홍구, 황정남, 한국진공학회지, 2(1), 1993, p. 41.
13. 최정동, 채근화, 정성문, 백홍구, 황정남, 대한금속학회, 1993년도 춘계학술 강연 및 발표대회.
14. *Ion Implantation and Beam Processing*, edited by J.S. Williams, J.M. Poate(Academic Press, Australia, 1984), p. 196.
15. K.N. Tu et al, *J. Appl. Phys.*, 54(1983), p. 758.
16. K.N. Tu, J.W. Mayer and L.C. Feldman in *Electronic Thin Film Science for electrical engineers and materials scientists*, edited by D. Johstone (Macmillan Publishing Company, New York, 1992), p. 306.