

In situ 고상 에피택시 방법에 의한 $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111)$ 구조의 형성

최치규 · 강민성

제주대학교 물리학과 및 기초과학연구소, 제주 690-756

김건호 · 이정주 · 김현수 · 이종덕

경상대학교 물리학과 및 기초과학연구소, 진주 660-701

이 정 용

한국과학기술원 전자재료공학과, 대전 305-701

이 영 백

선문대학교 물리학과, 아산 337-840

이 운 환

대구교육대학교 과학교육과, 대구 705-715

(1996년 9월 12일 받음)

초고진공에서 고상에피택시(solid phase epiaxy, SPE) 방법으로 CoSi_2 를 $\text{Si}(111)$ 기판 위에 에피택시 성장시켰다. $2 \text{ MeV } ^4\text{He}^{++}$ ion 후방산란 분광기와 사중결정 x-선 회절기 및 고분해 투과전자 현미경을 이용하여 성장된 CoSi_2 의 상과 조성, 결정성, 그리고 계면의 미세구조를 조사하였다. 초고진공 상태의 실온에서 $\text{Si}(111)-7\times 7$ 기판에 Co 를 약 $20 \sim 50 \text{ \AA}$ 증착한 후 SPE에 의하여 실리사이드를 형성시키는 경우 600°C 에서는 B-형의 CoSi_2 가, 그리고 700°C 에서는 A-형의 CoSi_2 가 선택적으로 에피택시 성장하였으며, 정합성은 B- $\text{CoSi}_2[110]//\text{Si}[1\bar{1}0]$, $\text{CoSi}_2(111)//\text{Si}(111)$ 이, 그리고 700°C 에서는 A- $\text{CoSi}_2[110]//\text{Si}[1\bar{1}0]$, $\text{CoSi}_2(002)//\text{Si}(002)$ 를 나타내었다.

I. 서 론

금속-실리사이드 박막은 Schottky 장벽 또는 오옴성 접합이 우수하여 Si 소자기술에 많이 적용되어 왔다. [1,2] 그러나 최근 VLSI 소자의 미세화, 고집적화 및 초고속화에 따라 금속-박막/반도체 헤테로 구조를 구성하고 있는 실리사이드박막은 점점 더 얇아지고, 균일하며 열적으로 안정할 것이 요구되고 있다. 이러한 요구에 따라 기판 Si와 격자정합성이 우수한 양질의 금속-실리사이드를 에피택시 성장시키려는 많은 연구가 있었다. [3-5]

현재까지 보고된 여러 종류의 금속형 실리사이드 중에서 fcc-based CaF_2 구조를 갖고 있는 CoSi_2 는 bulk 격자상수를 기준으로 볼 때 $\text{Si}(111)$ 기판에 대해 격자부정합률(lattice mismatch)이 $\sim 1.2\%$ 로 아주 작아, 낮은 면지수를 갖는 Si 기판 위에 쉽게 에피택시 성장되고, 또한 원자수준에서 분명한 계면(abrupt interface)을 형성한다. 이러한 이유 때문에 다양한 방법으로 Si 기판위에 CoSi_2 를 에피택시 성장시키려는 연구가 계속되어 왔다. 그 중에서 대표적인 것은 고상 에피택시(solid phase epitaxy : SPE) [3,6,7]와 분자선 에피택시(molecular beam epitaxy : MBE) [8,9] 등을 들 수 있다.

Cheng 등 [6]은 고진공(2×10^{-6} Torr)에서 e-beam으로 $\text{Si}(111)$ 기판위에 Co 를 300 \AA 두께로 증착한 후 Ar 분위기에서 RTA(rapid thermal annealing)로 열처리하여 B-형 CoSi_2 를 성장시켰다. 이들은 열처리 온도가 $800^\circ\text{C} \sim 900^\circ\text{C}$ 에서는 다결정의 CoSi_2 가 형성되며 단지 약 10% 정도만이 부분적으로 에피택시로 성장하는 것을 보았고 1000°C 에서는 약 60% 이상, 그리고 1100°C 에서는 약 70% 이상이 부분적으로 B-형의 CoSi_2 로 에피택시 성장함을 확인하였으며, RTA 방법에서는 열처리 승온율보다는 분위기가 에피택시 성장에 더 중요하다고 보고하였다. 그러나 RTA 방법으로 CoSi_2 를 형성시킬 때는 CoSi_2/Si 계면에서의 내부 stress 문제가 있는 것으로 나타났다. [10]

MBE 방법으로 실온에서 $\text{Si}(111)$ 기판에 Co 와 Si 를 조성비 1 : 2로서 100 \AA 정도 동시 증착한 경우 계면에서는 $\sim 25 \text{ \AA}$ 두께의 B형 CoSi_2 층이, 그리고 표면에서는 비정질(amorphous)의 $\text{Co} + 2\text{Si}$ 층이 남아 있으며 이를 300°C 와 500°C 로 10분 동안 열처리할 때 중간단계의 실리사이드 상들은 나타나지 않았으나, 600°C 로 열처리한 시료에서는 고밀도 pinhole과 단결정층이 동시에 보이며 misoriented 된 B형 CoSi_2 와 중간단계의 실리사이드 상들이 나타남을 보였다. [9] Tung과 Schrey [11]는 초고진공에서 Si-beam으로

로 깨끗이 한 Si(111) 기판에 Co를 먼저 $\sim 3 \text{ \AA}$ 증착하고 이를 열처리하여 CoSi_2 template층을 형성시킨 후에 $\text{Co} : \text{Si} = 1 : 2$ 로 약 72 \AA 정도 동시증착하면 실온에서도 B-형의 CoSi_2 가 계면에서 형성됨을 보였다. 그러나 MBE에 의하여 Si(100)와 Si(111) 기판위에 형성된 실리사이드 박막에서는 고밀도 pinhole의 형성 [9]으로 인하여 계면의 결합이 큰 반면, 초고진공에서 SPE로 형성된 $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111)$ 에서는 비정질(amorphous) Si-capping layer를 증착하였을 때 pinhole이 감소하여 양질의 에피택셜 CoSi_2 박막을 얻을 수 있는 것으로 보고되고 있다. [8]

고상 에피택시 방법으로 Co-실리사이드를 형성하는 경우 증착된 Co 박막의 두께가 15 \AA 이상이 되면 저온에서 CoSi_2 와 함께 CoSi 와 Co_2Si 가 동시에 형성되고 열처리 온도가 증가하게 되면 CoSi 나 Co_2Si 가 최종상 CoSi_2 로 상전이된다. [8,12,13] 최종상은 열처리 온도가 $\sim 600^\circ\text{C}$ 이상이며 기판의 표면상태, 열처리 조건 등에 따라 A-형 혹은 B-형이 결정되며 이는 Co의 증착율, 증착시 기판의 온도, 기판의 결정방향, 열처리 분위기와 온도 기술기 등 여러 요인에 의해 상전이 과정이 다른 것을 의미한다. 이와 같은 현상에 대하여 아직도 명확한 반응기구 및 형성 운동학이 규명되어 있지 않은 상태이다.

본 연구에서는 Si(111) 기판위에 초박막 CoSi_2 를 에피택시 성장시키는데 있어서 가능한 외적 요인을 제거하기 위하여 초고진공(ultrahigh vacuum : UHV)에서 Si(111)- 7×7 기판위에 Co를 증착한 후 *in situ*로 열처리하는 SPE 방법으로 CoSi_2 박막을 에피택시 성장시켰다. 형성된 실리사이드의 상은 x-선 회절을 이용하여 조사하였고, 조성과 형성조건은 이온 후방산란 분광기(Rutherford backscattering spectrometry)로 분석하였다. Epi- CoSi_2/Si 계면의 미시구조와 격자정합성은 고분해능 투과전자 현미경(high resolution transmission electron microscopy : HRTEM)으로 조사하여 A-형 또는 B-형 CoSi_2 구조를 갖는 에피택시 성장조건을 제시하였다.

II. 실험

본 실험에 사용한 기판은 phosphorus를 도우핑한 *n*형 Si(111) 웨이퍼로 비저항은 $\sim 10 \text{ \Omega cm}$ 였으며 (111) 방향에 대하여 $\pm 0.5^\circ$ 이내로 절단되어 있었다. 표준 RCA 웨이퍼 세척공정으로 기판 표면을 깨끗이 한 다음 챔버 내에 장착한 후 초고진공($\sim 5\times 10^{-10}$ Torr)에서 웨이퍼에 직류전류를 통전시켜 $\sim 1200^\circ\text{C}$ 로 수 차례 가열하여 표면의 native oxide를 승화시킨 다음 실온에서 반사 고에너지 전자회절(reflection high energy electron diffraction : RHEED)로 Si(111)- 7×7 구조를 확인한 후 사용하였다.

기판온도를 실온으로 유지한 상태에서 텅스텐-coil에 용착된 고순도(99.99%)의 Co를 저항가열법으로 증발시켜

Si(111)- 7×7 기판 위에 $\sim 20 \text{ \AA} \sim 50 \text{ \AA}$ 정도 증착하였으며 증착시 챔버 내의 압력은 $\sim 2\times 10^{-10}$ Torr을 초과하지 않도록 하였다. 증착원과 증착 두께는 수정진동자형의 두께조절기(INFICON XTM)로 측정하였으며 이때 증착율은 $\sim 10 \text{ \AA/min}$ 였다. Co를 증착한 후 웨이퍼에 직류전류를 통전시켜 $400^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ 의 온도 범위에서 10분 동안 *in situ*로 열처리하여 CoSi_2 박막을 성장시켰다. 열처리시 온도는 $\pm 5^\circ\text{C}$ 이내로 조절하였으며 적외선 온도계(optical pyrometer)로 측정하였다. 통전가열시 Si(111) 기판에 흐르는 전류밀도(J)와 기판온도(T) 사이에는

$$\log T = 0.3849 \log J + 2.8163 \quad (1)$$

의 관계가 있는데, 여기서 J 는 A/mm^2 , 그리고 T 는 $^\circ\text{C}$ 로 표시된다. 이를 이용하여 적외선 온도계의 검온한계($\sim 550^\circ\text{C}$) 이하인 저온에서도 외삽에 의하여 $\pm 5^\circ\text{C}$ 이내로 온도를 측정할 수 있었다.

실리사이드를 형성시킨 후 시료를 챔버에서 꺼내어 구조적 특성을 측정하였다. 실리사이드의 상은 통상적인 x-선 회절기를 사용하여 조사하였으며, 특히 에피택시 성장된 시료의 격자상수와 계면의 strain을 조사하기 위하여서는 사중 결정 x-선 회절기(quadruple crystal x-ray diffractometer) [14]를 사용하였다. 이때 source는 $\text{Cu-K}\alpha_1$ 선($\lambda = 1.5405 \text{ \AA}$)이었고 그 반치폭(full width at half maximum : FWHM)은 $\sim 5 \text{ arcsec}$ 로 Si(111) 면의 회절각 $2\theta = 28.5^\circ$ 부근에서 0.001° 의 step으로 rocking하여 결정하였다. CoSi_2 막의 조성은 2 MeV의 $^4\text{He}^{++}$ 이온을 사용한 RBS로 random 스펙트럼을 측정한 후 RUMP 프로그램 [15]을 이용하여 simulation하여 결정하였다. 그리고 막의 결정성은 $^4\text{He}^{++}$ ion을 Si[111] 축 방향으로 입사시킨 다음 후방산란되어 나온 스펙트럼(Si[111] axial channeling 스펙트럼)과 random 스펙트럼의 비(minimum yielding : χ_{min})로 확인하였다. 계면의 미시구조 및 격자 정합성은 200 keV에서 작동되는 공간 분해능이 0.2 \AA 인 고분해능 투과전자현미경(Joel, JEM 2000EX)을 사용하여 측정하였으며 측정방향과 격자상은 9개의 비임을 포함하는 대물조리개를 사용하여 비임방향을 Si[$\bar{1}10$] 방향으로 정확히 정렬시켜 Scherrer의 탈축점 근방에서 수행하였다.

III. 결과 및 논의

Co-실리사이드는 Co_3Si , Co_2Si , CoSi 그리고 CoSi_2 의 상이 있는데 특히 Co/Si 계에서 계면반응에 의해 실리사이드를 형성시킬 때 Co_2Si 의 초기상이 형성된 후 최종상 CoSi_2 로 상전이한다. [1] 초고진공에서 SPE에 의한 상전이과정에서 가장 중요한 변수는 온도이므로 본 연구에서 양질의 CoSi_2 박막을 에피택시 성장시키기 위하여 먼저 XRD로 열처리 조건을 조사하였다.

그림 1은 $\text{Co}(50 \text{ \AA})/\text{Si}(111)-7\times 7$ 시료를 초고진공에서

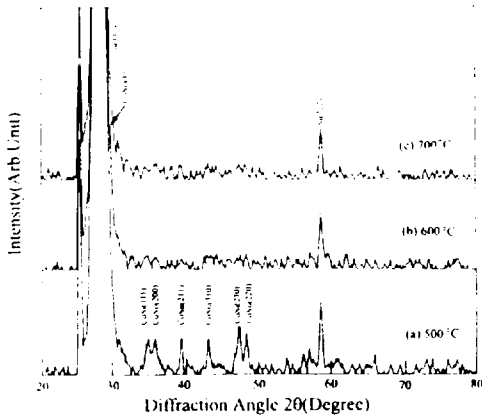


그림 1. X-ray diffraction spectra obtained from Co(100 Å)/Si(111)-7×7 samples after *in situ* annealing in UHV for 10min at (a) 500°C, (b) 600°C, and (c) 700°C.

500°C ~ 700°C의 온도에서 30분간 *in situ* 열처리한 경우에 얻은 x-선 회절 스펙트럼이다. 2θ 가 28.5°와 58.8°에서 나타난 피크는 기판 Si의 (111) 및 (222)면에 대한 회절 스펙트럼이다. 여기서 (222)면에 대한 회절은 (111)면의 이중 회절에 의하여 나타난다. 500°C에서 열처리한 시료에서는 2θ가 39.3°, 42.9°에서 Co₂Si의 (211)면, (310)면의 회절 피크와 2θ가 35°, 47.1°에서는 CoSi의 (111)면, (210)면에 대한 회절 피크가 나타났다. 또한 2θ가 35.8°와 48.6°에서는 CoSi₂의 (200)면과 (220)면에 대한 회절 피크가 나타났다. 600°C와 700°C에서 열처리한 시료에서는 2θ가 30.8°에서 CoSi₂(111)면에 대한 회절 피크가 기판 Si(111)면과 중첩되어 단일상이 형성된 것으로 나타났다. 일반적으로 Co/Si 계에서 SPE로 Co-실리사이드가 형성되는 온도는 ~350°C이고, 나타나는 상은 Co₂Si이며 온도가 높아지면 CoSi(~375°C)가 형성되고 열처리 온도가 ~550°C 이상에서는 최종상인 CoSi₂로 상전이된다. [8,12,16,17] 본 실험에서는 그림 1에서 나타난 바와 같이 최종상 CoSi₂가 600°C의 온도에서 형성되었으며, 이는 Cheng 등 [6]의 연구결과와 일치하는 것으로써 초고진공 상태에서 깨끗한 Si(111) 기판 위에 CoSi₂를 형성시키는 경우 중간단계로부터 상전이 없이 선택적으로 에피택시 성장시킬 수 있음을 나타낸다. XRD 분석의 결과 Co(50 Å)/Si(111)-7×7계에서 CoSi₂의 선택적 에피택시 성장 온도는 600°C 이상임을 확인할 수 있다.

그림 2는 Si(111)-7×7 기판위에 Co를 ~20 Å 증착한 후 *in situ*로 600°C와 700°C에서 각각 10분간 열처리한 시료에 대한 x-선 rocking 곡선을 나타낸 것이다. 그림 1에 나타난 바와 같이 열처리 온도와 상관없이 Si(111) 면과 CoSi₂(111) 면에 대한 두개의 회절 피크가 나타나 있음을 확인할 수 있고 이는 CoSi₂(111) 면이 Si(111) 면에 나란하게 에피택

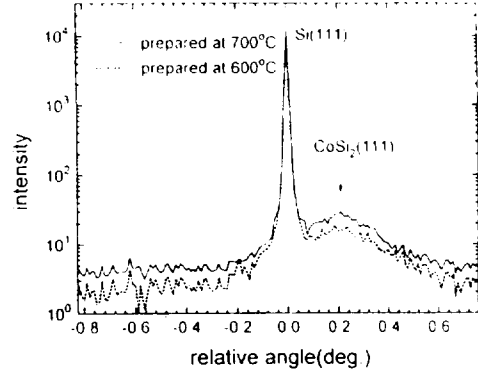


그림 2. Quadruple x-ray rocking curves of CoSi₂/Si(111) sample prepared at 600°C and 700°C by SPE.

시 성장한 것을 나타낸다. CoSi₂(111)면의 회절 피크가 sharp 하지 않은 것은 여러 가지 요인이 있을 수 있겠으나 우선 실리사이드 층의 두께가 얇기 때문에 실리사이드와 Si 계면에서 strain이 충분히 이완되지 못하였기 때문으로 추측된다. 그 이외의 요인으로는 실리사이드가 성장되는 동안에 여러 요소들, 즉 intrinsic factor와 extrinsic factor의 다양한 조건 [9,17]에 의하여 실리사이드/Si 계면에 다소의 결함(defect)이 있음을 나타내는 것으로 생각된다. CoSi₂(111) 면과 Si(111) 면 사이의 격자부정합(lattice mismatch)은

$$\frac{\Delta d}{d} = -\cot \theta_B \Delta \theta \quad (2)$$

에 의해 계산되어 지는데 여기서, θ_B 는 기판인 Si(111) 면에 대한 Bragg 회절각이다. 그림 2에서 측정되는 CoSi₂(111) 면에 대한 피크와 Si(111)면에 대한 회절각의 차이는 $2\theta \sim 0.42^\circ$ 로 이는 $\Delta \theta = 3.67 \times 10^{-3}$ rad이므로 이로부터 산출되어진 격자부정합은 1.45%로 나타났다. 이 결과와 bulk 격자상수로부터 구한 Si(111) 면 및 CoSi₂(111) 면의 면간거리(d_{111})인 3.130 Å과 3.0876 Å으로부터 예측되는 격자부정합률 1.37%와 비교하면 측정된 값이 약 0.08%정도 더 큰 것으로 이는 계면에서 다소 strain이 있음을 나타낸다고 생각된다.

그림 3은 Si(111)-7×7 기판에 Co를 50 Å 증착하여 500, 600 그리고 700°C에서 10분간 *in situ*로 열처리한 시료들에 대한 RBS random 스펙트럼과 channeling 스펙트럼을 나타낸 것이다. 이때 channeling 스펙트럼은 시료로부터 후방산란되는 ion의 수율(yield)이 최소가 되는 방향(이 실험에서는 Si[111] 축 방향으로 입사된 ⁴He⁺⁺ ion의 후방산란 수율이며, random 스펙트럼은 시료로부터 후방산란되는 ion의 수율(yield)이 최대가 되도록 방향으로 입사된 ion이 후방산란한 수율이다. random 스펙트럼은 보통 시료를

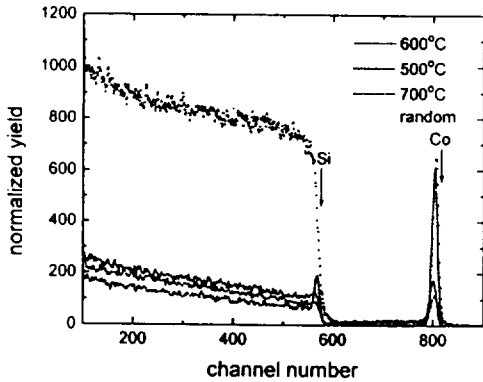


그림 3. Random and Si[111] axial channeling RBS spectra of $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111)$ samples prepared by *in situ* annealing the $\text{Co}(50 \text{ \AA})/\text{Si}(111)$ samples at different temperatures for 10 min in UHV.

입사 ion 비입 주위에 회전시키면서 측정하는데 본 실험에서는 시료를 회전시키지 않고 Si 표면 부근에 설정한 channel 사이에서 최대 수율이 되게 시료를 고정 한 후 측정하였다. 그림 4는 열처리 온도에 따른 minimum yield(χ_{min})를 나타낸 것이다. minimum yield(χ)는 channel yield($Y_{channel}$)와 random yield(Y_{random})의 비로서 주어지며, 그림 3에 나타난 바와 같이 Si에 대한 minimum yield(χ_{Si})는 모든 시료에서 ~22%를 보여준다. 두 원소로 이루어지는 실리사이드에서는 무거운 원소(금속)에 대한 χ_{min} 이 시료의 결정성을 평가하는 기준이 되기 때문에, [18] Co에 대한 minimum yield(χ_{Co})로 에피택시성을 예측할 수 있다. 400°C에서는 비정질(amorphous) 상 혹은 다결정(polycrystal) 상으로 되어 있어 거의 channeling 효과가 나타나지 않았으며 온도가 증가함으로써 χ_{Co} 가 감소하는 것으로부터 시료의 단결정(single crystal) 화가 진행되고 있음을 알 수 있다. 500°C인 경우에는 ~83%로 XRD 결과에서 나타난 바와 같이 여러 가지 상이 다결정 상태로 혼재하는 것을 나타낸다. 600°C에서 열처리한 시료와 650°C에서는 χ_{Co} 가 ~24%, 그리고 700°C에서 열처리한 시료에서는 ~16%로 나타났다. 이는 600°C ~700°C에서 성장된 CoSi_2 가 우수한 결정성을 가지고 에피택시 성장한 것을 나타낸다. 600°C에서 열처리한 시료와 700°C에서 열처리한 시료에서의 χ_{min} 이 차이가 있는 것은 성장한 CoSi_2 박막의 구조의 차이에 기인한다.

그림 5는 RBS로부터 얻은 data를 이용하여 CoSi_x 형성 시 열처리 온도에 따른 Si 원자의 조성(x) 변화를 Si와 Co의 비로서 나타낸 것이다. 400°C에서의 x는 0.5로서 Co_2Si 상이 형성되며, 450°C 부근에서는 x가 ~1로서 CoSi 상이 형성되고, 550°C ~ 750°C 온도범위에서의 x는 ~1.9 ~ 2.1로 조성비가 거의 일정한 CoSi_2 가 형성되었음을 알 수 있다. 이것은 이전의 연구 [12-14]와는 다른 결과로서 600°C 이상의

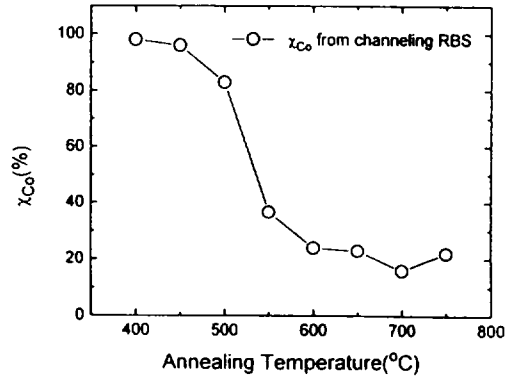


그림 4. Annealing temperature dependence of χ_{Co} for $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111)$ samples prepared by SPE.

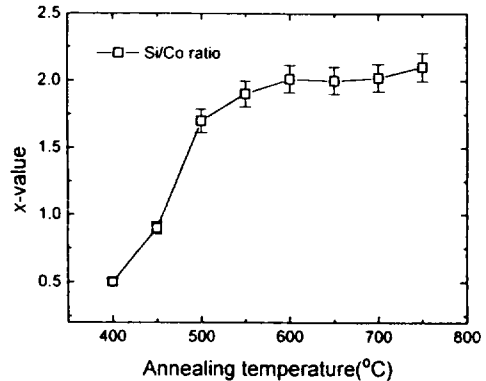


그림 5. Variation of x in the CoSi_x films as a function of annealing temperature obtained from 2 MeV $^4\text{He}^{++}$ ion backscattering spectrometry.

온도범위에서는 상전이를 거의 보이지 않으며, Co_2Si , CoSi 상과 같은 중간단계의 상전이없이 CoSi_2 상이 형성된다는 사실을 나타낸다.

그림 6은 Si(111)-7x7 기판위에 Co를 ~20 Å의 두께로 증착한 후 600°C로 10분간 *in situ* 열처리한 시료를 Si[111] 방향에서 관측한 HRTEM의 격자상이다. 기판 Si(111) 면 위에 나타난 격자상은 면간 거리 3.13 Å이고 실리사이드는 면간거리가 약 3.09 Å으로 계산되며 기판 Si(111)면에 대하여 약 72°의 각을 갖는 B-type의 CoSi_2 가 에피택시 성장되어 있음을 알 수 있다. CoSi_2/Si 계면은 facet이 없는 평활한 계면을 형성하고 있었으며, CoSi_2 박막의 두께는 약 35 Å으로 기판 전 영역에 잘 발달되어 있었다. 표면상태를 관찰한 결과 편흔의 밀도는 크지 않았다. 이것은 UHV에서 SPE 방법으로 Co-실리사이드를 형성시키는 경우 Co/Si 계면반응에서 기판으로부터 Si 원자들이 지속적으로 소모되면서 실

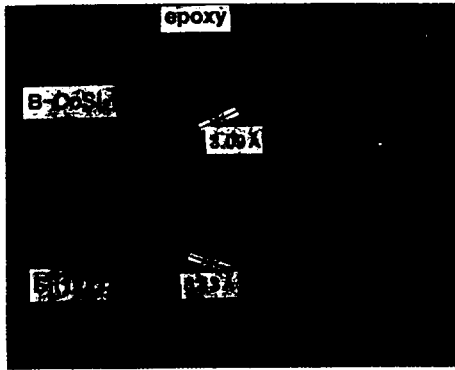


그림 6. HRTEM lattice image viewed along the $[1\bar{1}1]$ Si direction for B-type CoSi₂/Si(111) interface. The sample was prepared by 20 Å Co deposition on Si(111)-7×7 surface at room temperature followed by *in situ* annealing at 600°C for 10min.

리사이드를 형성하게 되고, 그 결과 실리사이드계의 총 에너지를 최소화하여 열적으로 안정한 평형상태에 도달하게 되기 때문이다. Si(111) 기판으로부터 Si 원자들이 실리사이드층으로 확산되면서 계의 총에너지를 낮추는 역할은 비정질-Si 층의 capping에 의한 결과 [7,21]와 유사함을 알 수 있다. 그리고 pinhole 없는 CoSi₂를 성장시킬 수 있다는 타 연구자의 연구 결과와 같음을 알 수 있었다. [22,23]

이 격자상에 대한 SAD(section area diffraction) pattern은 그림 7과 같다. 이 pattern에서 CoSi₂ 상의 (002), ($\bar{1}\bar{1}1$)과 ($\bar{2}\bar{2}0$)면의 회절점은 Si의 (220), (011)와 (002) 면의 회절점에 대하여 1/3 지점에 나타난 것으로 보아 전형적인 B-type CoSi₂의 twin 패턴을 보여준다. 따라서 B-type CoSi₂ 상이 에피택시 성장되는 온도는 600°C임을 알 수 있고 계면 정합성은 CoSi₂[$1\bar{1}0$]/Si[$1\bar{1}0$], CoSi₂(111)/Si(111)의 관계를 갖는다.

그림 8은 Si(111)-7×7 기판위에 Co를 ~ 20 Å ~ 50 Å의 두께로 증착한 후 700°C로 10분간 *in situ* 열처리한 시료를 Si[$1\bar{1}0$] 방향에서 관측한 HRTEM의 cross section image를 나타낸 것이다. Si(111) 기판과 나란한 면방향을 가진 A형 CoSi₂(111)/Si(111)이 형성되었음을 알 수 있으며, 계면에서의 misorientation 각을 가지지 않음을 알 수 있다. 그리고 Si 기판위에 거의 균일하게, 연속적으로 실리사이드 상이 성장하였음을 알 수 있다. 이 결과로부터 Si(111)-7×7 기판위에 Co를 증착한 후 A형 CoSi₂를 에피택시 성장시키는데 필요한 열처리 온도가 ~700°C 이상이 되어야 함을 알 수 있었다. 일반적으로 Si의 (111), (110) 또는 (114) 방향에 따른 channeling 측정으로 에피택시 성장된 CoSi₂(111) 막의 방향성을 결정할 수 있다. [19,20] (110)과 (114) 방향은 (111) pole에 대하여 35.3°의 동일한 극각(polar angle)을 갖는다. 그러나 방위좌표에서는 이들 방향이 180°의 각을

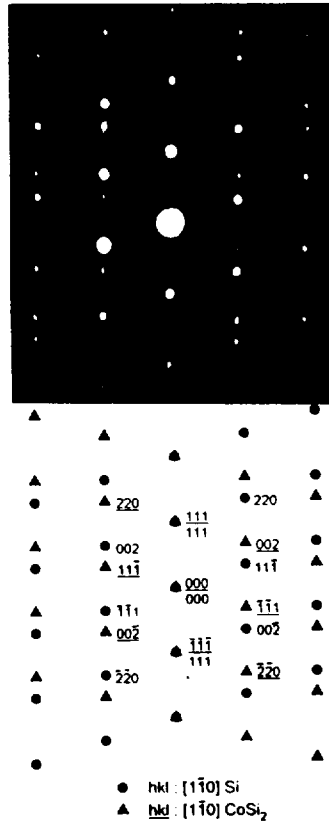


그림 7. SAD pattern for the same sample in Fig. 6

갖는다. 따라서 type-A CoSi₂(111)의 (110)와 (114) 방향은 기판 Si(111)의 (110)와 (114) 방향과 일치한다. 그러나 type-B CoSi₂(111)의 (110)와 (114) 방향은 기판 Si(111)의 (114)와 (110) 방향으로 정렬한다. 왜냐하면 이들 방향간에는 180° 회전되었기 때문이다. 따라서 (110) 축방향에 따른 CoSi₂(111)의 χ_{Co} 는 (114) 방향에 따른 것보다 더 작을 것이며 그림 4에서 나타난 바와 같이 600°C ~ 650°C에서는 χ_{min} 이 약 24%이고 700°C에서는 χ_{min} 이 약 16%로 이는 600°C ~ 650°C에서는 B-type의 CoSi₂가, 그리고 700°C에서는 A-type의 CoSi₂가 Si(111)면에 에피택시 성장된 것을 나타내며 TEM 분석결과와 잘 일치한다고 생각된다.

IV. 결 론

SPE 방법에 의하여 초고진공 상태에서 Si(111)-7×7 기판위에 Co를 ~10 Å/min의 증착율로 ~ 20 Å ~ 50 Å 정도 증착한 후 600°C ~ 700°C의 온도범위에서 *in situ* 열처

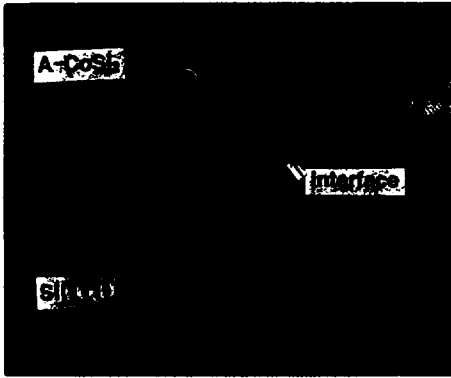


그림 8. HRTEM lattice image viewed along $[1\bar{1}1]$ Si direction for A-type $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111)$ interface. The sample was prepared by 50 Å Co deposition on $\text{Si}(111)-7\times 7$ surface at room temperature followed by *in situ* annealing at 700°C for 10min.

리하여 에피택셜 CoSi_2 박막을 성장시켰다. 이 온도범위에서 *in situ*로 열처리하는 과정에서 Co_2Si , CoSi 상들은 나타나지 않았으며, x-ray rocking curve 결과로부터 형성된 CoSi_2 는 기판 $\text{Si}(111)$ 면에 대해 약 1.45%의 lattice mismatch를 갖는 에피택셜 실리사이드로 성장되었음을 알 수 있었다. RBS 분석으로부터 χ_{Co} 가 ~16% ~ 24%로 우수한 결정성을 가진 CoSi_2 가 에피택시 성장되었음을 알 수 있었다. TEM의 분석결과 계면에서 strain에 의한 약간의 결함이 존재했지만 고밀도의 pinhole은 관측할수 없었으며, 계면 윗쪽을 조사한 결과 $\text{Si}(111)$ 기판으로부터 연속적으로 잘 성장한 에피택셜 $\text{CoSi}_2(111)$ 를 관측할수 있었다. 600°C의 온도에서는 B-형 $\text{CoSi}_2[1\bar{1}0]/\text{Si}[1\bar{1}0]$, $\text{CoSi}_2(111)/\text{Si}(111)$ 이, 그리고 700°C에서는 A-형 $\text{CoSi}_2[1\bar{1}0]/\text{Si}[1\bar{1}0]$, $\text{CoSi}_2(002)/\text{Si}(002)$ 의 정합성을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단(941-0200-021-2), 1995년도 교육부 기초과학연구소(BSRI-95-2406) 및 한국과학재단(951-0204-047-2)의 지원에 의해 수행되었기에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] M. A. Nicolet and S. S. Lau, in *VLSI Electronics: Microstructure Science*, edited by Einspruch and G. Larrabee (Academic, New York, 1983), Vol. 6.
 [2] S. P. Murarka, *Silicides for VLSI Application* (Academic, New York, 1983).
 [3] L. J. Chen and K. N. Tu, *Mater. Sci. Rep.* **6**, 53

(1991).
 [4] C. K. Choi, S. E. Boo, J. D. Koh, S. R. Hong, J. Y. Lee, S. K. Kim, S. H. Lee, K. I. Cho and K. H. Kim, *J. Korean Phys. Soc.* **27**, 528 (1994).
 [5] K. H. Kim, J. J. Lee, D. J. Seo, C. K. Choi, S. R. Hong, J. D. Koh, S. C. Kim, J. Y. Lee and M.-A. Nicolet, *J. Appl. Phys.* **71**, 3812 (1992).
 [6] H. C. Cheng, I. C. Wu and L. J. Chen, *Appl. Phys. Lett.* **50**, 174 (1987).
 [7] T. L. Lin, R. W. Fathauer, P. J. Grunthauer and C. d'Anterrosches, *Appl. Phys. Lett.* **52**, 804 (1988).
 [8] J. M. Gibson, J. L. Batstone and R. T. Tung, *Appl. Phys. Lett.* **51**, 45 (1987).
 [9] C. d'Anterrosches, H. Nejat Yakupoglu, T. L. Lin, R. W. Fathauer and P. J. Grunthauer, *Appl. Phys. Lett.* **52**, 434 (1988).
 [10] T. Itoh, H. Azuma and S. Noda, *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, 5681 (1994).
 [11] R. T. Tung and F. Schrey, *Appl. Phys. Lett.* **54**, 852 (1989).
 [12] C. d'Anterrosches, *Surf. Sci.* **168**, 751 (1986).
 [13] J. Y. Veuillen, J. Derrien, P. A. Badoz, E. Rosencher and C. d'Anterrosches, *Appl. Phys. Lett.* **51**, 1448 (1987).
 [14] QCD(quadruple crystal x-ray diffractometer)는 상용의 DCD(double crystal x-ray diffractometer)보다 입사 비임의 단색화가 개선된 것으로 본 실험에서는 미국 California Institute of Technology에 있는 장치를 사용했음.
 [15] L. Doolittle and M. Thompson, RUMP, *Computer Graphics Service* (Ithaca, N.Y. 1992).
 [16] G. Ottavianni, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **25**, 21 (1984).
 [17] F. Arnaud D'Avitaya, S. Delage, E. Rosencher and J. Derrien, *J. Vac. Sci. Technol.* **B 2**, 770 (1985).
 [18] G. Bai, M.-A. Nicolet, J. E. Mahan and K. M. Geib, *Phys. Rev. B* **41**, 8603 (1990).
 [19] G. Rossi, X. Jin, A. Santaniello, P. DePadova and D. Chandresris, *Phys. Rev. Lett.* **62**, 191 (1989).
 [20] A. E. M. J. Fischer, T. Gustafsson and J. F. van der Veen, *Phys. Rev. B* **37**, 6305 (1988).
 [21] S. Mantle and H. L. Bay, *Appl. Phys. Lett.* **61**, 267 (1992).
 [22] E. Rosencher, P. A. Badoz, J. C. Pfister, F. A. d'Avitaya, G. Vincent and S. Delage, *Appl. Phys. Lett.* **49**, 271 (1986).
 [23] J. Henz, M. Ospelt, H. von Kanel, *Solid State Commun.* **63**, 445 (1987).

Formation of CoSi₂/Si(111) by *in situ* Solid-Phase Epitaxy in UHV

Chi-Kyu CHOI and Min-Sung KANG

Department of Physics and the Basic Science Research Institute, Cheju National University, Cheju 690-702

Kun-Ho KIM, Jeoung-Ju LEE, Hyun-Soo KIM and Jong-Duck LEE

Department of Physics and the Research Institute of Natural Science,

Gyeongsang National University, Chinju 660-701

Jeong-Yong LEE

Department of Electronic Materials Science, Korean Advanced Institute of Science and Technology,

Daejeon 305-701

Young-Pak LEE

Department of Physics, Sun Moon University, Asan 337-840

Woon Hwan LEE

Department of Science Education, Taegu Education University, Taegu 705-715

(Received 12 September 1996)

Epitaxial films of CoSi₂ were grown on Si(111) substrates by *in situ* solid-phase epitaxy in a ultrahigh vacuum. The phase, the chemical composition, the crystallinity, and the microstructure of the silicide/Si interface were investigated by 2-MeV ⁴He⁺⁺ ion-backscattering spectrometry, quadruple crystal X-ray diffractometry, and high-resolution transmission electron microscopy. High-quality films of either B-type or A-type CoSi₂ could be grown selectively on Si(111) substrates by depositing ~ 20 ~ 50 Å of Co on a Si(111)-7×7 substrate followed by *in situ* annealing at 600°C or 700°C for 10 min. The matching face relationships are CoSi₂[1 $\bar{1}$ 0]/Si[110] and CoSi₂(111)/Si(111) by B-type CoSi₂ and CoSi₂[1 $\bar{1}$ 0]/Si[1 $\bar{1}$ 0]/Si[1 $\bar{1}$ 0] and CoSi₂(002)/Si(002) for A-type CoSi₂.