
碩士學位論文

고상 에피택시 성장에 의한
초박막 에피택셜 CoSi_2 의 구조적 특성

濟州大學校 大學院



物理學科

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

姜 民 城

1996 年 12 月

고상 에피택시 성장에 의한 초박막 에피택셜 CoSi₂의 구조적 특성

指導教授 崔 致 圭

姜 民 城

이 論文을 理學 碩士學位 論文으로 提出함

1996 年 12 月

 제주대학교 중앙도서관
姜民城의 理學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長
委 員
委 員

金 斗 植
姜 民 城
崔 致 圭



濟州大學校 大學院

1996 年 12 月

**The Structural Characteristics of the Ultrathin
Epitaxial CoSi₂ films by Solid Phase Epitaxy**

Min-Sung Kang

(Supervised by professor Chi-Kyu Choi)



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF
NATURAL SCIENCE**

**DEPARTMENT OF PHYSICS
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY**

1996. 12

목 차

Abstract	1
I. 서론	2
II. 이론	5
1. Lattice mismatched system에서의 계면구조	5
2. Length matching model	7
III. 실험	16
1. 시료제작	16
2. Co 박막 성장 mode와 표면구조 분석실험	17
3. RHEED에 의한 CoSi_2 표면구조 및 격자구조 분석실험	17
4. 초박막 CoSi_2/Si 구조 형성과 반응기구 실험	17
1) XRD 측정	18
2) RBS random 분석실험	18
3). RBS에 의한 CoSi_2 의 결정성 및 조성분석실험	19
5. TEM에 의한 CoSi_2 에피택셜 성장 mode 분석실험	19
IV. 결과 및 고찰	21
1. 초박막 Co 성장 mode 와 CoSi_2 의 표면구조	21
2. Co-실리사이드의 결정상과 상전이	24
3. CoSi_2 박막의 결정성분석 및 조성비	29
4. 초박막 CoSi_2 상의 에피택셜 성장	34
V. 결론	50
VI. 참고문헌	52

Abstract

Recently, demand for the miniaturization, high integration and high speed in the VLSI device technologies requires more thin, uniform and thermally stable silicide films in the form of epi-silicide/Si heterostructure. Many works on the growth of high quality epitaxial silicide films on the Si substrate with smaller lattice mismatch were carried out. CoSi_2 , which is one of metallic silicides with a fcc-based CaF_2 structure and has only $\sim 1.2\%$ lattice mismatch with Si for bulk lattice parameters, is expected to grow epitaxially on the low index Si substrate with an atomically abrupt interface. Various attempts have been made to realize a defect-free epi- $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111)$ or epi- $\text{CoSi}_2/\text{Si}(100)$. Solid phase epitaxy(SPE) and molecular beam epitaxy(MBE) are known to be one of the most prevailing methods..

For epitaxial CoSi_2 films on Si(111) substrate, two types of orientation are possible: type-A CoSi_2 has the same orientation as the silicon substrate, while type-B CoSi_2 shares the surface normal $\langle 111 \rangle$ axis with Si, but is rotated 180° about this axis with respect to the Si. Occurrence of type-A or type-B CoSi_2 on Si(111) is known to be dependent on the initial Co thickness and annealing temperature.

In this study, the ultrathin CoSi_2 film was grown by solid phase epitaxy(SPE) on clean Si(111)- 7×7 surface under the UHV condition by *in-situ* annealing. We report on the formation of ultrathin epitaxial CoSi_2 of either type-A or B on Si(111) substrates and on the orientation relations of $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111)$. Reflection high-energy electron diffraction(RHEED) was applied to monitor the surface structure during the growth of ultrathin CoSi_2 films on the Si(111) substrate in UHV. The phases of the grown silicides were characterized by X-ray diffraction(XRD), and channeling ion backscattering was used for the characterization of the structural perfection of the sample. The microstructure of the $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111)$ interface was investigated by using high resolution transmission electron microscopy(HRTEM).

I. 서론

반도체 소자의 크기가 submicron 단위로 축소됨에 따라 그 집적도를 증가시키기 위하여 새로운 물질인 실리사이드의 개발이 점차 대두되고 있다 (Lepselter 등 1968, Lyer 등 1985, Murarka 1983, Ottaviani 1984, Poate 등 1987). 실리사이드는 VLSI(very large scale integration)에서 게이트물질이나 배선재료로서 사용되어질 수 있는 여러 특성들을 가지고 있다. 실리사이드란 금속-Si의 합금으로서 그 상은 반응에 참여하는 금속원자나 Si 원자의 조성과 온도에 의해 결정되고, 한번 결합이 일어나면 구조적으로나 열적으로 안정한 물질이다. 에피택셜 실리사이드는 기판 Si의 결정면과 방향에 대하여 정합성관계를 갖는 것으로서 Si 기판의 결정구조와 비슷하고 면(hkl)과 방향 [uvw]이 기판과 평행하면서 단결정형태로 성장된 것으로 격자 부정합이 작을 때 생성된다. 이러한 기판에 에피택셜한 단결정 실리사이드는 높은 전도도와 내식성, electro-migration에 대한 높은 저항성, 우수한 열적안정성, 그리고 낮은 비저항값을 갖는 것이 일반적인 특징이다. 다결정 실리사이드 보다 탁월한 장점은 (1) 우수한 격자 정합성에 의하여 구조적으로 안정하고 낮은 stress를 가지며, (2) 큰 grain 크기는 grain 경계 효과를 완화하며, (3) 박막에 있어서 낮은 격자 결함 밀도가 저온에서 전도도를 증가시키고, (4) 계면에서 우수한 규칙적인 원자배열이 계면 전자구조의 완벽한 제어를 유도할 수 있고, (5) epi-Si/epi-silicide/Si 의 구조를 갖는 이중 헤테로 에피택셜 성장이 가능하며, (6) channel을 통하여 에피택셜 박막에 이온을 주입할 때 불순물 주입 제어가 용이하다.

최근까지 연구보고된 에피택셜 실리사이드 형성 물질들은 NiSi_2 , CoSi_2 , TiSi_2 , Pd_2Si , PtSi , WSi_2 , FeSi_2 , ZrSi_2 , VSi_2 , HfSi_2 , NbSi_2 , TaSi_2 , CrSi_2 , MoSi_2 , IrSi_2 , RhSi_2 , RuSi , ReSi_2 , MnSi 등이 있으나 이중에서도 격자불일치가 작은 NiSi_2 , CoSi_2 , Pd_2Si , TiSi_2 , PtSi 등은 다른 실리사이드 보다 아주 우수한 계면구조와 전기적으로 균일한 성질을 가지고 있다. 특히 CoSi_2 , NiSi_2 등은 단결정으로 성장이 가능하여 초고속신소자의 응용에 있어 유력한 재료라

할 수 있다. 이와 같이 성공적인 에피택셜 실리사이드 형성결과에 따라 많은 연구자들은 고상 에피택시 (solid phase epitaxy : SPE) 방법에 의한 MBT(metal base transistor), Si-PBT(permeable base transistor)와 최근 초박막 epi-silicide/Si 구조를 갖는 SALICIDE(self aligned silicide)등과 같은 초고속 신소자 개발에 관심을 갖게 되었다. Bean 등 (1980)은 Si-PBT 소자개발에 따른 게이트 물질을 CoSi_2 와 WSi_2 를 이중 헤테로 에피택셜 성장시켰다. 또한 Saitoh 등 (1980)은 Si 기판 위에 CoSi_2 단결정 헤테로 구조를 생성시킴에 따라 CoSi_2 와 NiSi_2 를 MBT 초고속 신소자의 베이스 재료로 이용하고자 하는 시도를 하였다. 현재까지 보고된 여러가지 에피택셜 실리사이드 물질 중에서 Bulle-Lieuwma 등(1988)은 Co 이온 주입으로 Si/ CoSi_2 /Si 구조를 규명하였으나 epi- CoSi_2 층의 island 형성과 A-type과 B-type이 혼합된 층이 존재함을 보였고, Tung 등 (1989)은 Co와 Si을 Si(001) 기판에 동시 증착하여 CoSi_2 를 형성시켰으나 misorientation된 grain들이 에피택셜 성장됨을 조사하였다.

실리콘의 단위격자 구조는 Fd3m 공간 그룹의 (8a) 격자위치 즉 000, $\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$ 에 면심천이 (face centered translation) 를 갖는 것으로 격자상수는 5.431 Å 이고, Fluorite(CaF_2) 형태의 구조를 갖는 CoSi_2 의 격자상수는 5.365 Å으로 근사한 값을 갖고 있으며, CoSi_2 /Si 계면에서의 부정합율은 이론적으로 1.2 %이다. 그러므로 낮은 면지수를 갖는 Si 기판 위에 쉽게 에피택셜 성장되고 또한 원자수준에서 분명한 계면(abrupt interface)을 형성하여 그 어떤 금속-실리사이드 보다 정합성이 뛰어난 물질이다. Co-실리사이드 형성조건에 따르는 상은 Co/Si 계에서 Co-실리사이드 상은 Co_2Si , CoSi 와 CoSi_2 상으로 열처리 온도에 따라 최정상인 CoSi_2 로 전이된다. 보고된 자료에 의하면 CoSi_2 형성온도는 약 600°C에서 에피택셜 성장이 일어나며(Chen 등 1982), 기판의 표면 상태, 열처리 조건 등 형성방법에 따라 계면구조가 기판과 방위관계가 일치하는 type-A 또는 기판의 법선방향과 180° 회전되어 기판과 쌍정(twin)을 이루는 type-B의 CoSi_2 가 형성된다. 이와같은 현상은 Co의 증착율, 증착시 기판의 온도, 기판의 결정방향, 격자간격, 표면에너지, Co 박막의 성장 mode 그리고 온도 기울기 및 열처리 분위기 등 여러가지 요인에 의하여 상전이 과정이 다르

게 나타나는 것이다. 이와 같은 현상에 대하여 아직 명확한 반응기구 및 그 현상 운동학은 규명되어 있지 않은 상태이다.

본 연구에서는 먼저 초박막 에피택셜 실리사이드를 형성시키는데 있어서 가능한 모든 외적요인을 제거하기 위하여 초고진공내에서 Si(111)-7×7 기판 위에 Co를 증착하여 *in-situ* 열처리하는 고상 에피택시 방법(SPE)에 따라 Co-실리사이드를 형성 시켰다. Si 기판 표면에 증착되는 Co 성장 모드는 RHEED으로 조사하였다. 형성운동학은 RBS, XRD로 조사하였고, 계면 정합성은 HRTEM과 SAD패턴으로 정합 모드를 조사 규명하여 차세대 신소자의 게이트 전극 물질로 응용 가능성을 제시하였다.



II. 이 론

CoSi₂를 기판 Si(111) 위에 단결정상으로 에피택셜 성장시킬 때 기판 표면의 Si<111>_s 방향과 형성된 CoSi₂<111>_f 방향간의 misorientation 각 α 는 기판 Si(111)의 표면법선 방향으로부터 기판<110>방향으로 약간 기울어지게 cutting된 offset(ϕ_s) 각이 증가함에 따라 선형적으로 증가한다. 간단한 기하학적 모델로서 misorientation 각 $\alpha = \epsilon^{\perp} \times \tan \phi_s$ 를 예측할 수 있다. 여기서 ϵ^{\perp} 는 실리콘/Si계의 계면에서 기판의 수직방향으로의 응력(strain)을 나타낸다.

1. Lattice-mismatched system에서의 계면구조

격자가 어긋난 이종구조(heterostructure)는 개략적인 단면 그림2-1로 나타낼 수 있다. 기판과 증착된 박막은 입방정계구조를 가지며, 격자상수는 각각 a_s , 그리고 a_f 이다. epitaxial layer는 strained 혹은 unstrained 상태에 있으며 후자의 것을 완화(relaxed) 되었다고 한다. strained system을 설명하는 또 다른 표현으로는 pseudomorphic와 commensurate 등이 있다. 전자는 기판과 overlayer 사이에서 각각의 핵열이 일대일 대응을 하는 것을 나타내며, 후자는 생성된 overlayer의 핵의 간격이 기판의 핵간과 같음을 나타낸다. 이 두가지의 정의에서 계면에서의 실리콘의 격자상수는 기판의 격자상수와 같다. 따라서 기판 위에 박막이 에피택셜 성장될 때에 단위세포는 Poisson's ratio로 뒤틀리게 되어 입방정계구조는 정방정계구조로 왜곡된다(그림2-2 참조). 만일 실리콘의 격자상수가 기판의 격자상수보다 작다면 epi-layer의 격자는 기판의 수평방향으로 확장되어 그 높이가 감소할 것이다. 이때의 수평방향으로의 응력 ϵ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다(Tu 등 1992).

$$\epsilon = \frac{a_f - a_s}{a_s} \quad (1)$$

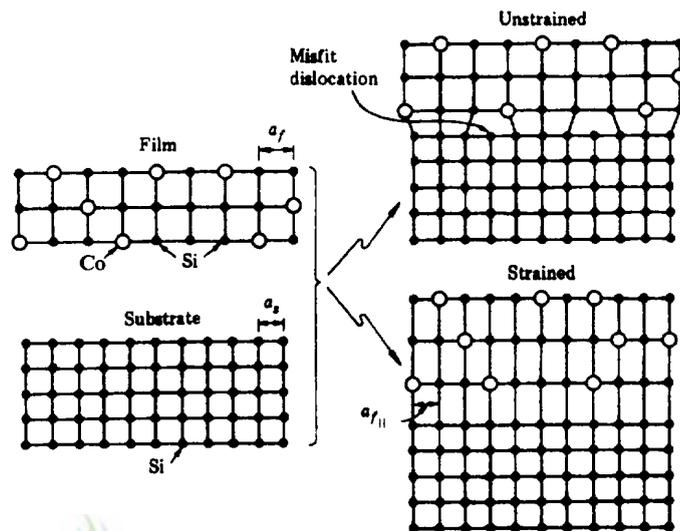


Fig. 2-1. A Co-silicide film and a Si single-crystal substrate are joined to form a lattice-mismatched heterostructure that is either strained or unstrained with misfit dislocations.

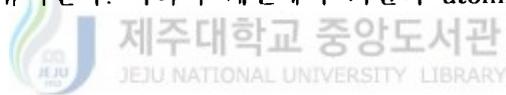
a_f 은 기판표면 혹은 계면과 수평방향으로 증착된 물질의 격자상수이고, a_f 는 bulk 혹은 unstrained 상태의 film material의 격자상수이다. pseudomorphic 물질에서 a_f 와 a_s 는 그 크기가 같고 응력은 격자불일치(lattice mismatch)와 같다. 이런 in-plane strain을 흔히 결맞는 응력(coherency strain)이라고도 한다. 계면과 수직인 방향으로의 응력 ϵ_{\perp} 도 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\epsilon_{\perp} = \frac{a_{f\perp} - a_f}{a_f} \quad (2)$$

여기서 $a_{f\perp}$ 는 기판과 수직인 overlayer의 격자상수로, 일반적으로 $a_{f\perp}$ 는 그 크기가 a_f 와 다르다. 대부분의 반도체결정은 bulk상태에서 입방정계구조를 가지고 있기 때문에 기판 위에 증착된 epitaxy strained-layer는 입방정계가 아닌 정방정계구조로 뒤틀리게 된다. 이런 정방정계 뒤틀림을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\epsilon_T = \frac{|a_{f\perp} - a_f|}{a_f} \quad (3)$$

그림 2-1은 기판과 증착된 박막의 핵열이 일대일 대응되는 strained 상태를 간단하게 나타낸 것으로, unstrained epitaxial material은 그들의 bulk 격자상수값을 그대로 유지한다. 따라서 계면에서 기판의 atomic basis와 잘 정렬될 수가 없다.



2. Length matching model

에피택셜 성장된 박막에서 에너지가 평형상태일 때 응력에너지(strain energy)가 최소화된다는 것은 잘 알려진 사실이다. 기하학적인 양인 misorientation 각 α 와 offset 각 ϕ , 사이의 정량적인 관계는 계면에서 두 개의 길이가 일치한다는 동질성을 채용함으로써 이끌어 낼 수 있다. 다시 말해 misorientation과 연관된 평형 응력에너지(equivalent strain energy)는 low tilt boundary의 응력에너지로 근사되어질 수 있다. 일반적으로 heteroepitaxial system에서 총응력에너지(total strain energy)는 일정량의

misorientation에 의해 감소한다. 결과적으로 misorientation state는 안정하다.

에피텍셜 층이 기판에 대해 비슷한 방향성과 결정구조를 가지고 계면에 대한 기판 bulk와 에피텍셜 실리사이드의 격자면이 서로 대칭성을 갖는다면 lattice misfit은 다음과 같이 나타낼 수 있다(그림 2-2 참조).

$$f = \frac{a_f - a_s}{a_s} \leq 15\% \quad (4)$$

a_s 와 a_f 는 각각 기판 Si의 격자상수 ($a_s=5.430 \text{ \AA}$)와 형성된 실리사이드의 격자상수값 ($a_f=5.364 \text{ \AA}$)이다. misfit과 평균수평응력(average parallel strain), 평균수직응력(average perpendicular strain)과의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = \left(\frac{1-\nu}{1+\nu} \right) (\epsilon^{\perp} + \frac{2\nu}{1-\nu} \epsilon^{\parallel}) \quad (5)$$

여기서 CoSi_2 와 기판 Si의 misfit는 -1.2% 이고 ν 는 CoSi_2 의 poisson'ratio로서 그 값은 0.272 이다. 그림 2-3은 에서 CoSi_2 epilayer의 회절 벡터 \hat{g}_j 는 기판 Si의 회절 벡터 \hat{g}_s 와 법선 벡터 \hat{n} 과 반드시 같은 평면에 있어야 하는 것은 아니다. 그러므로 평균수직응력 ϵ^{\perp} 와 misorientation 각 α 를 구하기 위해선 \hat{g}_j , \hat{g}_s , \hat{n} 모두를 구해야 한다. 그림에서 기판 Si의 법선 벡터 \hat{n} 은 기판의 $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ 방향으로 tilt되어 있고 $\text{CoSi}_2 \langle 111 \rangle$ 방향은 기판 Si $\langle 111 \rangle$ 방향의 벡터 \hat{g}_s 와 기판표면의 법선벡터 \hat{n} 사이에 있으며 또한 같은 평면($11\bar{2}$)에 위치해 있다. 만일 \hat{g}_s 가 입사빔 \hat{k}_i 와 \hat{n} 의 면에 놓여 있다면 두 가지의 측정만이 필요할 것이다. XRD rocking curve로 부터 평균수직응력과 misorientaion 각 α 를 구할 수 있다.

$$\epsilon^{\perp} = -k_1^{-1} \times \frac{\Delta\theta_{\perp} + \Delta\theta_{\parallel}}{2}, \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{\Delta\theta_{\perp} - \Delta\theta_{\parallel}}{2} \quad (7)$$

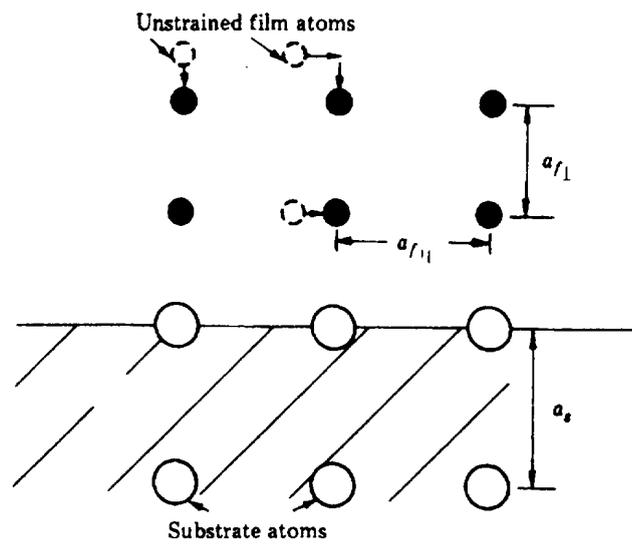
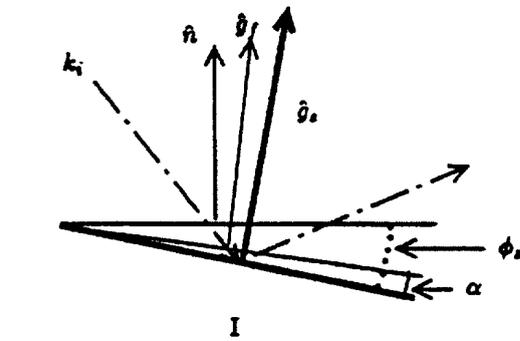


Fig. 2-2. A atom positions for a strained layer on a thick substrate, illustrating the coherency strain and the Poisson effect for a commensurately grown layer.



(112) plane

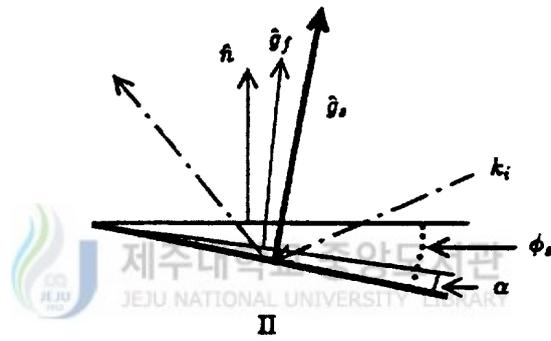


Fig. 2-3. Configuration of the two symmetrical x-ray diffraction arrangements used to measure the misorientation angle α between g_f and g_s .

여기서 $k_1 = \tan \theta_B$ 이고, θ_B 는 Bragg 각이며 $\Delta \theta_{r,h}$ 는 rocking curve의 기판 Si와 형성된 실리사이드의 회절 각의 차이이다. 일반적으로 CoSi_2 막의 평균수직응력은 형성된 epilayer의 두께($t_f=100 \text{ \AA} \sim 2000 \text{ \AA}$)가 커짐에 따라 평균값이 약 1.75%로 값의 변화가 없으나 Van der Merwe model(1963)에서는 에너지학적으로 유용한 misfit dislocation 이론을 사용하여 epilayer 두께가 100Å 이상일 경우 응력이 감소할 것이라고 예측하였다. 이런 모순은 CoSi_2/Si epilayer의 두께가 클수록 상대적으로 큰 strain state가 준안정적임을 나타낸다.

Silicide/Si(111)의 계면에는 $a/2[1\bar{1}0]$ 와 $a/6[11\bar{2}]$ 의 두 종류의 Burgers 벡터가 존재한다. 특히 Burgers 벡터 $a/6[11\bar{2}]$ 는 오직 type-B 박막에만 존재하며 적층결함(stacking fault)은 없다. type-B의 dislocation은 실리사이드와 Si(111)의 계면에 존재하는 높이 $d_{(111)}$ 의 step과 연관되어진다. 이 step은 기판 Si의 $\langle 111 \rangle_s$ 방향을 따르는 equivalent Burgers 벡터 b_e 로 대체된다. 이상적인 결맞는 성장(coherent growth)에서 기판 Si와 CoSi_2 실리사이드의 계면에 length matching model(그림2-4)을 채용한다면 다음과 같은 관계가 형성된다.

$$l_e = \frac{d_f}{\cos \phi_f} = \frac{d_s}{\cos \phi_s} = l_s, \quad l_e = \frac{d_f^+}{\sin \phi_f} = \frac{d_s^+}{\sin \phi_s} = l_s \quad (8)$$

따라서 misorientation 각과 수직응력은

$$\alpha = f \times \tan \phi_f \quad (9)$$

$$\varepsilon = f \times \tan^2 \phi_f \quad (10)$$

이며, f 는 misfit이다. 일반적으로 계면에 misfit dislocation array가 존재한다면 유사한 관계가 유도된다.

$$\alpha = \varepsilon^+ \times \tan \phi_f \quad (11)$$

$$\varepsilon = \delta + \varepsilon^+ \times \tan^2 \phi_f \quad (12)$$

여기서 δ 는 misfit dislocation으로부터의 응력완화(strain relaxation)이다. 관계식 (11)로부터 offset 각 ϕ_s 가 작을 경우 misorientation 각 α 는 ϕ_s 에 비

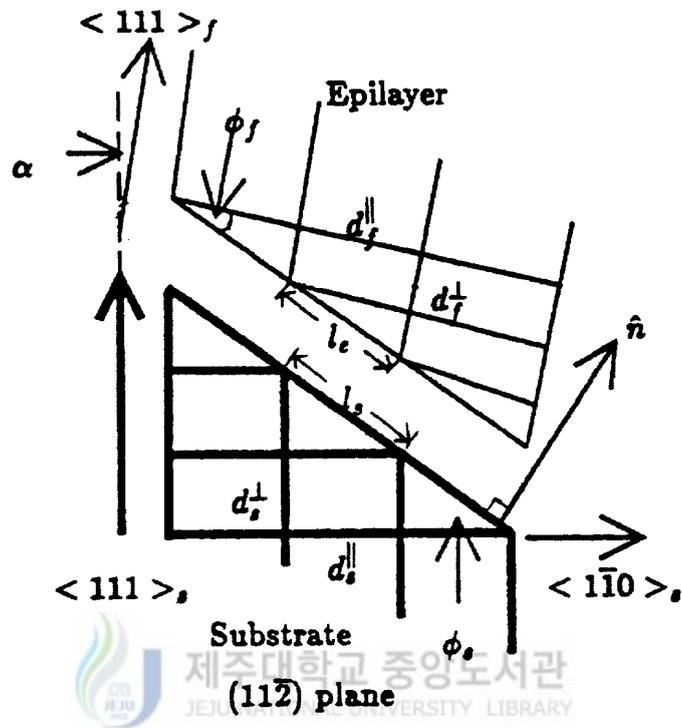


Fig. 2-4. Graphic representation of the geometrical model.
 "Length Matching" condition is : $l_e = l_s$

레함을 알 수 있다. misorientation이 발생하는 구동력을 알기위해선 epilayer의 응력에너지와 strain state의 안정성을 고려해야한다. misorientation에 기인하는 평형응력에너지를 계산하기위해서 bycrystal interface와 bulcrystal 내의 low angle grain boundary가 동등하다고 가정할 수 있다.

그림2-5에서 stress field의 step은 기판 Si(111)의 법선방향을 향하는 equivalent Burgers 벡터로써 edge dislocation으로 근사할 수 있으며

$$b_e = a_s^+ - a_f^+ \quad (13)$$

또한 step cluster들을 edge dislocation arrays로 근사할 수 있다. 따라서 misorientation 각 α 는

$$\alpha = \frac{b_e}{D} = \epsilon^\perp \times \tan \phi_s \quad (14)$$

로 표현된다. 여기서 D는 두 개의 interface step 사이의 평균공간(average spacing)이다. 따라서 단위면적당 corresponding 에너지는

$$E_m = \frac{G_b}{2\pi(1-\nu)} \times \alpha(A - \ln \alpha) \quad (15)$$

이며, parameter A는 step에서 core energy에 의존하는 값이다. 총응력에너지는 동종 응력(homogeneous strain)으로부터의 탄성에너지(elastic energy), misfit dislocation energy, 그리고 misorientation energy의 합으로써 표현되며 misfit dislocation energy와 misorientation energy 사이의 상호작용은 매우 작은 값이므로 생략되어질 수 있다.

$$E_t = E_s + E_d + E_m \quad (13)$$

동종응력과 misfit dislocation energy의 에너지 표현식은 잘 알려져 있는 대로 다음과 같다.

$$E_s = 2G\left(\frac{1+\nu}{1-\nu}\right) \times t_f \times (\epsilon - f - a \tan^2 \theta_s)^2, \quad (14)$$

$$\text{그리고 } E_d = \frac{Gb\delta}{(1-\nu)} \times \ln\left(\frac{t_f}{b}\right). \quad (15)$$

이때 misfit dislocation energy는 misorientation 각 α 에 영향을 받지 않기 때문에 E_m, E_s 의 두 에너지항만 고려하면 되며, 그 값이 0 이 아닌 misorientation

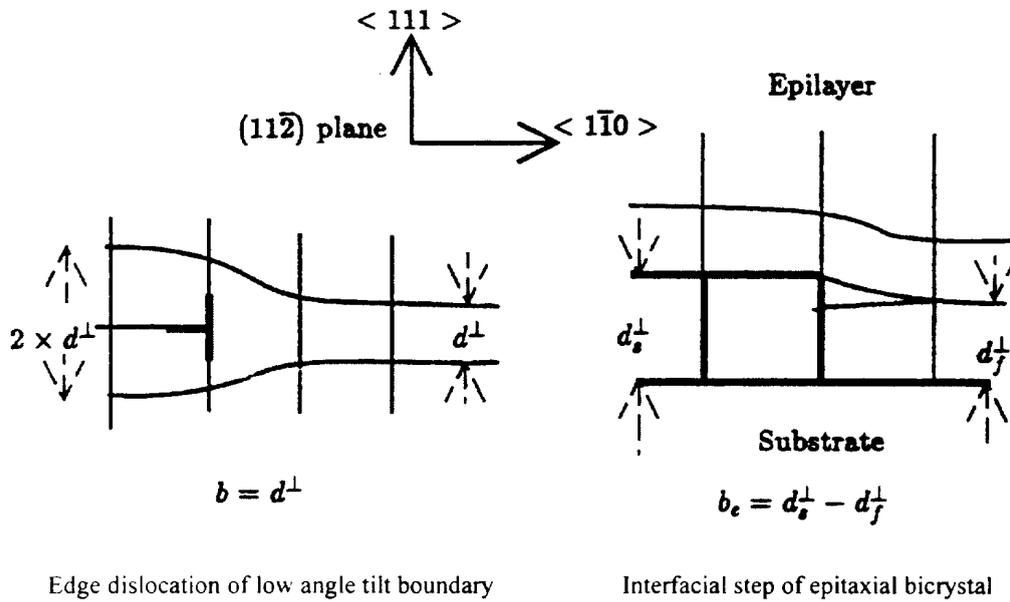


Fig.2-5. Schematic diagram demonstrating the similarity between a low angle tilt boundary and an epilayer on a stepped substrate.

각이 misorientation energy를 발생시키지만 동시에 동종 응력에너지값을 감소시킨다. 따라서 계의 평행상태에 상응하는 misorientation 각을 구하기 위해서는 총에너지가 최소가되는 α_{\min} 을 구하면 된다. 결국 misfit dislocation의 형성에 대하여 film의 stress state가 준안정적이기는 하지만 형성된 박막은 misoriented 된다.

III. 실험

1. 시료제작

본 실험에서 사용한 Si 기판은 phosphorus를 주입한 n-형의 Si 웨이퍼로서 결정면은 (111) 이며, 비저항은 2.4~4.1 Ω cm 이었다. 준비된 Si 웨이퍼를 초고진공 챔버 내에 넣고 내부의 진공도를 약 10^{10} Torr로 유지시켰다. 증착기 내부가 초고진공이 될 수 있도록 초고진공 챔버를 150 $^{\circ}$ C로 10 시간 동안 베이킹한 후 AES(Auger electron spectroscopy)로 표면 불순물인 C 및 O의 농도가 AES 검지한계(약 0.1 at %) 이하가 될 때까지 통전가열 방법으로 표면을 깨끗이 한 후에 고순도(99.99%) Co를 증착하였다.

Co-실리사이드의 초기형성 과정에 대한 정보와 Si(111)-7 \times 7 표면에서의 CoSi₂를 에피택셜 성장시키기 위하여 초고진공에서 Co을 ML(monolayer ; Si(111) 표면에 대한 1ML $\approx 7.8 \times 10^{15}$ atoms/cm²) 단위로 흡착시켰다. 먼저 Si(111)-7 \times 7 기판(5mm \times 50mm)은 1200 $^{\circ}$ C로 통전가열 시켜 표면에 있는 모든 불순물을 탈착시켜 얻었고, 이것을 RHEED 패턴으로 확인하였으며, 또한 Co 흡착두께와 가열 온도에 따른 표면구조는 RHEED 패턴의 변화로부터 조사하였다. Co의 증발원은 0.5mm 텅스텐 선을 길이 5mm의 코일형으로 감아서 만든 필라멘트형으로 하였다. 먼저 3.2×10^{10} Torr의 진공에서 30A의 전류로 2000 $^{\circ}$ C 이상 가열하여 필라멘트의 표면에 있는 산화피막이나 그 밖의 불순물을 제거시킨 다음 Co를 필라멘트에 감고 초고진공 챔버 내에서 20A의 전류로 가열한 후 다시 전류를 50A로 증가시켜 Co를 필라멘트의 표피에 고르게 퍼지도록 하였다. 이렇게 한 후 전류변화에 따라 Co를 증발시켜 Si(111)-7 \times 7 표면에 0.5ML에서 160ML까지 증착하여 초박막 Co와 CoSi₂ 표면 구조를 분석하였고, 증착된 Co 박막의 두께는 고정밀도 박막 측정계로 측정하여 그 두께는 RBS로 확인하였다. 또한 초박막 CoSi₂를 에피택셜 성장시키기 위하여 Si 기판에 Co를 20A에서 50A까지 증착시키고, *in-situ*로 400 $^{\circ}$ C에서 750 $^{\circ}$ C까지 가열하였으며, 가열시간은 1 분에서 30분까지 하였고, 열처리 전원은 정전류부

(2A, 150V) 와 정전압부(15A, 20V)로 구성된 정전압, 정전류 전원 장치로 먼저 정전류로 예열을 시켜 통전이 되면 정전압으로 자동변환하여 Si 기판에 흐르는 전류를 변화시켜 기판 온도를 제어하였다.

2. Co 박막 성장 mode와 표면구조 분석실험

금속박막 성장모드는 증착속도와 증착율 및 표면 결함 그리고 표면에너지에 관계된다. 본 실험에서 Co 박막의 성장모드 조사는 깨끗한 Si 표면에 Co 증착량을 0.1 ML에서 부터 160 ML까지 증착하면서 RHEED pattern으로 조사하였다. 여기서 기판의 온도는 실온으로 하였고, Co의 증착률은 0.01ML/sec로 하였다. 결정구조와 격자상은 XRD와 HRTEM으로 조사하였다. RHEED 패턴 측정시 전자선의 입사빔의 방향은 Si의 [112]에서만 관찰하였다.

3. RHEED에 의한 CoSi₂ 표면구조 및 격자구조 분석실험

에피택셜 CoSi₂ 박막형성은 Co 박막 성장 mode와 밀접한 관계가 있으므로 Co 박막 표면구조와 성장 mode 규명을 위하여 열처리조건에 따라 RHEED pattern을 조사하였다. 여기서 열처리 조건은 CoSi₂ 형성조건에 따라 열처리하였다. 초기 Co 박막 표면구조에서 열처리 시간변화에 따라 CoSi₂상의 표면구조를 RHEED pattern 변화로 관측하고, 열처리 시간을 계속 늘려 주어도 변화가 없을 때까지 관측하였다. 이와 같은 과정을 반복하여 RHEED pattern 관측 후 이 시료를 XRD로 결정구조 및 상을 조사하여 CoSi₂ 표면 격자구조를 조사하였다.

4. 초박막 CoSi₂/Si 구조 형성과 반응기구 실험

실온에서 Co 박막이 층상성장 혹은 poly-Co 박막형태로 증착된 Co(20 Å)/Si계에서 통전가열 방법으로 *in-situ* 열처리하여 Co-실리사이드를 형성시켰다. 기판 Si 표면에 최종상 CoSi₂ 상을 성장시키기 위하여 열처리 온도를

400℃ 에서 750℃, 열처리 시간을 1분에서 3분까지 변화시켰다. 이들 시료를 XRD로 결정구조 및 결정상을 분석하여 CoSi₂ 형성조건을 조사하고, 또한 열처리시 RHEED pattern으로 실리사이드화에 따른 상변화를 표면구조로 관측하며, 상전이 현상과 상전이 온도를 조사하였다. 또한 Co의 확산 및 격자상 모드는 HRTEM으로 조사하였다.

1) XRD 측정

Co 박막과 형성된 Co-실리사이드 상의 상전이현상 및 형성조건을 조사하기 위하여 박막 측정용 XRD(Rigaku D/MAX-RC)를 사용하였다. X-선원은 Ni 필터를 통하여 얻은 CuK α_1 으로 그 파장은 0.154nm이었고, 필라멘트 전류는 20mA, 가속전압은 45kV이었다. Full scale은 5×10^3 cps로 하였으며, 주사영역은 JCPDS(Joint Committee on Powder Diffraction Standards) 카드상에 나타나 있는 Co-실리사이드의 스펙트럼 분포를 고려하여 2θ 를 20°에서 80°의 범위로 하였다. 그리고 반치폭은(FWHM)은 약 5arcsec로 Si(111)면의 회절각 $2\theta = 28.5^\circ$ 부근에서 0.001의 step으로 rocking하여 결정하였다.

2) RBS random 분석실험

CoSi₂ 상의 형성기구를 분석하기 위하여 열처리조건(XRD 분석시료와 동일 조건)에 따라 두께 및 초기 계면 반응형태 등을 RBS(General Ionex, MODEL 4175)의 random 스펙트럼 분석으로 조사하였다. 사용된 ⁴He⁺ 이온의 에너지는 2MeV이고, 시료에 입사되는 선량은 150 μ C이다. Offset 에너지가 56.65 keV로써 channel 에너지 상수 E는 (2.82 \times channel + 56.65)keV이고, 보정인자는 1.0이다. 가속된 ⁴He⁺ 이온 비임의 전류가 30nA로 시료의 1mm² 면적에 수직으로 입사시켜 기울기가 법선에 대하여 10° (후방산란 각 ; 170°)의 각으로 후방산란된 이온을 검출토록 하였다. 검출기의 에너지 분해능 (FWHM ; full width at half maximum)은 15.0 keV이고, 스펙트럼은 전 깊이에 대하여 불규칙 스펙트럼으로 검출되도록 하였으며, 이것을 RUMP 프로그램으로

분석하였다.

3) RBS에 의한 CoSi₂의 결정성 및 조성 분석실험

에피택셜 성장된 CoSi₂ 박막의 결정성 및 조성을 분석하기 위하여 2MeV로 가속된 ⁴He¹²⁺ ion을 시편의 <111>, <110> 또는 <114> 축방향으로 입사하여 축방산란된 α 입자를 검출하여 channeling 및 dechanneling 스펙트럼을 random 스펙트럼과 비교하여 최소수율(minimum yield : χ_{\min}) 분석으로 결정성(type-A 또는 type-B)과 부정합을 조사하여 양질의 에피택셜 type-A CoSi₂ 형성 조건과 그 운동학을 규명하였다. 산란된 α 입자를 검출하기 위한 검출 각도는 보통 170°로 하며, 때로는 표면 감도를 높이기 위하여 110°로 도 수행하였다. 여기서 빔 dose는 50 μ C으로 하였고, channel 당 에너지는 4.375keV로 하였다.

5. TEM에 의한 CoSi₂ 에피택셜 성장 모드 분석실험

CoSi₂ 상과 Co 박막에서의 미시구조, 격자정합성 그리고 에피택셜 성장 등을 관찰하기 위하여 TEM을 사용하였다. Co을 기판 Si(111)-7 \times 7 위에 20Å 이하로 증착하여 실온에서 Co-Si 계면반응과 "template" 현상을 조사하였고, TEM의 명시야상으로 CoSi₂ 핵이 Si(111)면에서 형성과정과 성장방향을 조사하여 {111} facet 현상을 분석하였다. 또한 Co(<20Å)/Si(111)-7 \times 7 시료를 XRD와 RBS 결과에 따라 열처리하여 type-B CoSi₂의 형성조건, facetting 현상을 규명하였고, 양질의 초박막 type-A epi-CoSi₂를 형성하여 그 성장기구, {111}계면 이동현상과 정합성을 HRTEM으로 조사하였다.

단면 TEM 시료는 두 개의 시료를 2-ton 에폭시를 사용하여 접착시키고, 기계적 연마방법으로 약 20~50 μ m 정도까지 가능한 한 얇게 가공한 다음 이것을 금속제 Cu의 grid에 부착하여 액체 질소에 의해 냉각된 시료 지지대에서 99.99%의 Ar⁺ 이온의 가속전압이 5~10keV이고, 이온의 입사각도는 약 30°로 하였다. 평면 TEM 시료는 화학 연마와 기계적 연마과정을 거쳐 제작하였

다. 시료를 아세톤, 메틸알콜, 증류수 속에서 각각 1분씩 세척하여 말린 후 Co-실리사이드 박막 부분이 slide glass 쪽이 되게 붙인 다음 기판 부분을 기계적 연마에 의하여 수십 μm 정도로 얇게 한 후 에폭시를 사용하여 slot grid를 이 시료에 붙였다. 이 시료를 grid가 위로 가도록 teflon 위에 놓고 vanish를 grid 안쪽의 기판만 남기고 시료 위에 바른 다음 vanish가 다 굳으면 $\text{HF} : \text{HNO}_3 = 1 : 1$ 로 혼합된 용액에 몇 분 동안 담가두고 기판에 조그만 구멍이 생길 때까지 부식시켰다. 다시 HNO_3 용액만으로 Si 기판을 부식시켜 마무리 한 다음 아세톤에 담가 vanish를 녹여 내어 평면 TEM 시료를 제작하였다. 본 연구에서 사용한 TEM(JEOL, JEM 2000EX)은 필라멘트가 pointed LaB_6 이고, 200KeV에서 동작되며, 점분해능은 0.21nm이었다. 축방향 격자상은 9개의 비임을 포함하는 대물조리개를 사용해서, 빔방향을 $[\bar{1}10]$ 축방향에 정확히 정렬시켜 Scherzer's 탈초점 근처에서 수행하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 초박막 Co 성장 mode와 CoSi₂의 표면구조

반도체 중에서 Si는 다이아몬드구조로 되어 있으나 표면에서는 bulk에서의 병진 대칭성을 잃고 재배열되어서 전혀 다른 구조를 형성하게 된다. 그 중에서도 Si(111)면의 깨끗한 표면은 가장 안정된 7×7 초격자 구조를 이루고 있으며, 이 표면에 금속 및 반도체 원자를 흡착시키면 흡착표면에 다양한 초격자 구조를 이루게 된다. 이러한 Si(111) 표면의 초격자 구조를 갖는 Si(111)-7×7 기판위에 금속박막을 수 ML 증착할 경우 대부분 1×1 구조로 바뀐다. 이것은 Si의 단위 소자의 평면적 구조를 의미하며, 불안정한 Si(111) 표면원자층에 금속원자가 흡착되면 실리콘 내부의 격자구조와 같은 표면원자층을 이루게 되는 것이다. 그림 4-1 (a)는 실온에서 Co를 1.5ML/min의 증착률로 0.76ML 증착시켰을 때의 RHEED 패턴 사진이다. 7×7구조의 sub-Laue zone 회절점의 밝기가 약해지고 1×1 구조의 패턴이 나타나기 시작했으며, 3.8ML에서는 완전한 1×1 회절 패턴만 관찰되었다(그림 4-1의 b 참조). 이 결과에서 Si(111)기판 표면에서의 CoSi₂ 정합 단결정 형성은 CoSi₂와 Si의 구조 및 격자상수의 유사성($a_{Si} = 5.431 \text{ \AA}$, $a_{CoSi_2} = 5.430 \text{ \AA}$)으로 인해 확인할 수 없었다. Co를 4ML 증착했을 때부터 1×1 회절 패턴은 흐려지기 시작하였고, 10ML 정도 증착했을 때 나타난 RHEED 패턴은 환형모양의 패턴이 나타났다(그림 4-1의 c 참조). 이와 같은 패턴은 시료표면이 다결정질 형태로 증착되었음을 보여준다. 이 패턴은 70ML 까지 그대로 유지되었다. 그림 4-1의 결과에서 Co 박막은 초기 핵형성과정에서 Si(111)-7×7 표면에 흡착될 때 1×1 구조가 나타난 것은 본 실험의 TEM 분석결과와 비교하여 볼 때 Co와 Si의 원자들이 핵형성에 의하여 CoSi₂상이 형성된 것으로 보여진다. Ni/Si(111)-7×7계에서 Ino(1977)의 RHEED 분석결과에서 이와 같은 현상이 나타났다. 따라서 Co가 초기과정에서 흡착될 때에는 Co-Si 핵형성에 의하여 CoSi₂가 형성되면서 Co의 확산 속도가 감소되면서 Co 박막이 3차원 구조를 갖는 island로 형성된 것으로 생각된다.



Fig. 4-1. (a) RHEED pattern taken from Si(111) surface held at room temperature after Co deposition 0.76 ML.

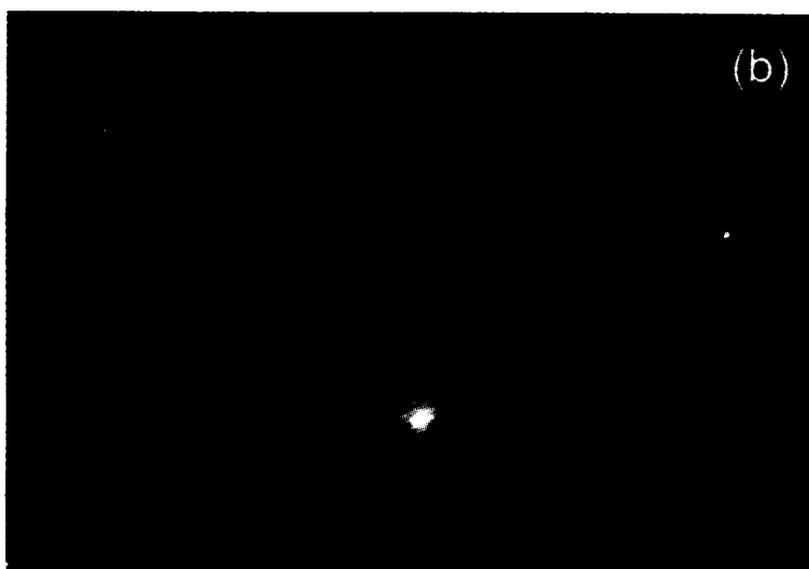


Fig. 4-1. (b) RHEED pattern taken from Si(111) surface held at room temperature after Co deposition 3.8 ML.

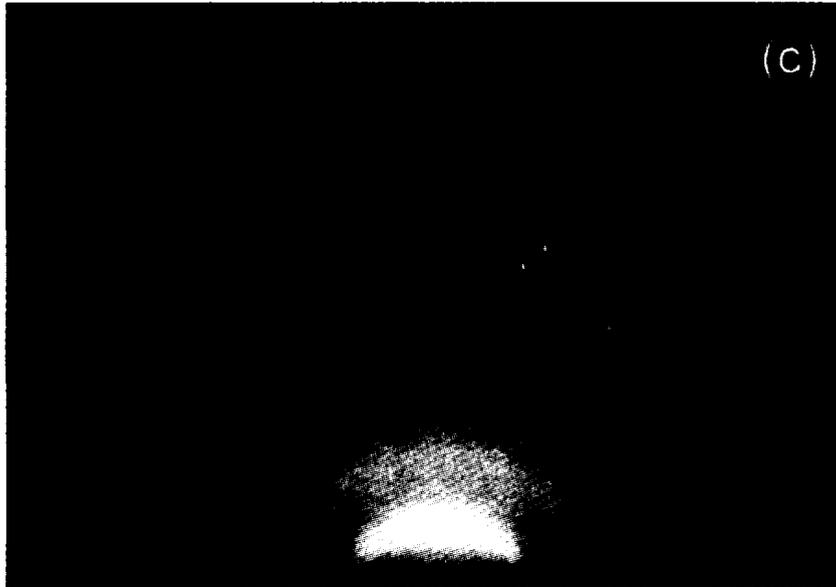


Fig. 4-1. (c) RHEED pattern taken from Si(111) surface held at room temperature after Co deposition 4 ML.

따라서 Co 박막 성장 mode는 초기단계에서 층상성장 형태를 이루다가 두께가 약 10ML 이상에서 Si(111) 표면에 3차원으로 island를 형성하는 것으로서 Co 박막의 성장 mode는 Stranski-Krastanov형으로 생각된다. 이 시료를 CoSi₂ 형성온도인 650℃로 1분간 열처리한 후의 RHEED 패턴은 L₀ 및 L₁ Laue zone에 가늘고 긴 회절 줄무늬가 나타나기 시작하였고(그림 4-2의 a 참조), 3분간 열처리 하였을 때의 회절 패턴은 α -Si(111)-7×7 구조의 패턴으로 관측되었다(그림 4-2의 b 참조). 이 결과는 Co/Si(111)-7×7 구조의 계면에서 고상반응에 의하여 CoSi₂층이 형성되었음을 알 수 있다. CoSi₂의 격자상수는 Si(111)와 거의 일치하므로 RHEED 패턴 관측에서 CoSi₂의 표면구조는 7×7으로 나타나기 때문이다. 그러나 이 패턴에서 Co-과다형 또는 Si-과다형의 CoSi₂ 상이 형성되었는지는 알 수가 없었다. Stalder 등 (1992)은 epi-CoSi₂/Si(100) 구조에서의 epi-CoSi₂ 표면층은 2×2 구조로 형성되나 계면에서 부정합을 가지면서 에피텍셜 성장될 때 Co-과다형과 Si-과다형의 $\sqrt{2} \times \sqrt{2}$ 와 $3\sqrt{2} \times \sqrt{2}$ 두가지 표면구조를 가지는 것으로 보고하였다. 이들의 결과와 비교하여 볼 때 본 실험에서 나타난 α -Si(111)-7×7 구조의 패턴은 에피텍셜 성장된 CoSi₂ 표면의 최상층이 Si의 단원자층의 재결정화에 의하여 나타난 상이라고 생각된다.

2. Co-실리사이드의 결정상과 상전이

Co-실리사이드는 Co₃Si, Co₂Si, CoSi와 CoSi₂의 상을 가지는데 열처리 조건에 따라 선택적인 상이 형성된다. Walse-Bene(1976)법칙에 따르면 초기에 형성된 상과 반응하지 않고 잔류하고 있는 물질과의 계면에서 형성되는 두 번째 상은 초기상 가까이에 있는 화합물 중에서 반응하지 않고 남아있는 물질을 많이 포함하는 상이된다. Co와 같은 금속이 Si기판 위에 증착되는 경우에는 Co/Si계에서 계면반응 초기에는 Co₂Si상이 형성된 후 CoSi상이 형성되고, 그리고난 후 CoSi₂ 상으로 전이된다. 초고진공에서 SPE에 의한 상전이 과정에서 가장 중요한 변수는 열처리 온도이다(Nicolet 등 1983). 따라서 본 실험에서는 양질의 CoSi₂ 박막을 에피텍셜 성장시키기 위하여 먼저 XRD로 그 열처

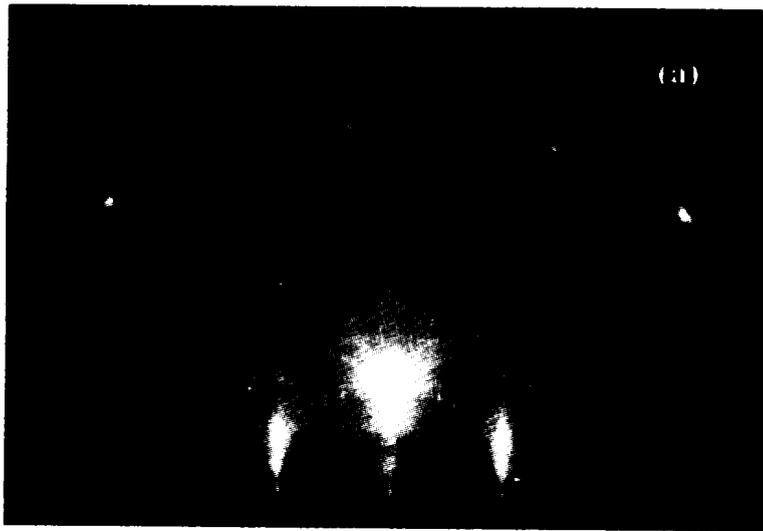


Fig. 4-2. (a) RHEED pattern of Co-silicide formed by deposition 10ML of Co at RT followed by *in-situ* annealing at 650 °C for 3 min along Si[112] beam direction.

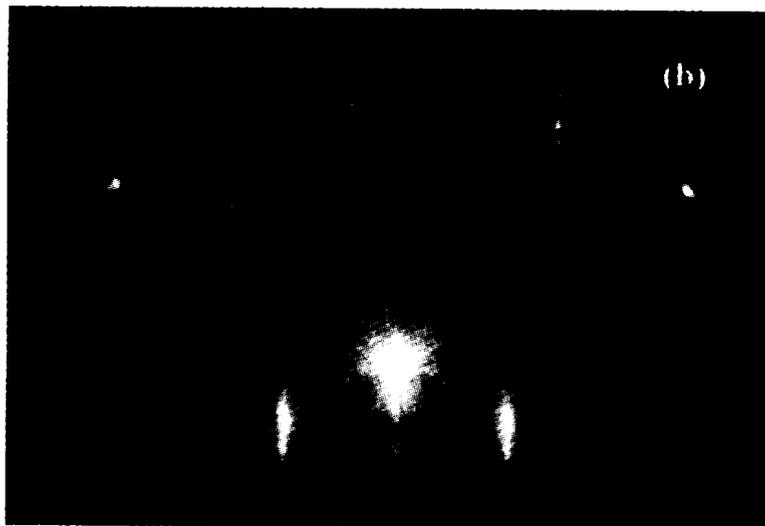


Fig. 4-2. (b) RHEED pattern of Co-silicide formed by deposition 10ML of Co at RT followed by *in-situ* annealing at 750 °C for 3min along Si[112] beam direction.

리 조건을 조사하였다.

그림 4-3은 Co(50Å)/Si(111)-7×7 시편을 초고진공하에서 온도를 500℃에서 700℃까지 30분간 *in-situ* 열처리한 X-선 회절 스펙트럼이다. 2θ 가 28.5°와 58.8°에서 나타난 피이크는 기판 Si의 (111)과 (222)면에 대한 스펙트럼이다. 여기서 (222) 면은 기판 Si의 (111) 면에 대한 이중회절 스펙트럼이다. 그림 4-3의 (a)는 500℃로 열처리한 시료의 XRD 스펙트럼이다. 회절된 Co-실리사이드 상은 2θ 가 39.3°와 42.9°에서 Co₂Si (211)과 Co₂Si(310)면의 피이크가 나타났으며 2θ 가 35°와 47.1°에서는 CoSi(111)과 CoSi(210)면의 회절 피이크가 나타났다. 또 2θ 가 35.8°와 48.6°에서는 CoSi₂의 (200)와 (220)면에 대한 피이크가 나타났다. 이 열처리온도에서는 Co-실리사이드상이 다결정 형태임을 알 수 있다. 그러나 600℃와 700℃로 열처리한 시료에서는 2θ 가 30.8°에서 CoSi₂(111)면에 대한 회절피이크가 기판 Si(111)면과 중첩되어 단일상이 형성된 것으로 나타났다. 이 결과는 CoSi₂상의 (111)면이 기판 Si(111)면에 대해 에피택셜 성장되었음을 나타낸다. 일반적으로 Co/Si계에서 SPE로 Co-실리사이드가 형성되는 온도는 약 350℃이고, 나타나는 상은 Co₂Si이며 온도가 높아지면 CoSi(약 375℃)가 형성되고 열처리 온도가 550℃ 이상에서는 최종상인 CoSi₂로 상전이 된다(Bozler 등 1980, Fischer. 등 1988). 본 실험에서 Co-실리사이드의 초기상은 Co₂Si임을 알 수 있으나 열처리온도에 따른 Co₂Si에서 CoSi, 그 다음에 CoSi₂로 상전이 된다는 Gibson 등 (1982)의 연구결과는 확인 할 수가 없었다. 그러나 Chen 등 (1982)은 깨끗한 기판을 사용하는 경우에는 중간단계부터 CoSi₂ 박막이 상전이 없이 선택적으로 에피택셜 성장됨을 보고하였다. 따라서 그림 4-3의 결과로부터 Co/Si 계에서 고상 반응에 의한 CoSi₂ 박막은 열처리 온도가 저온 영역(<500℃)에서는 Co-실리사이드 박막이 다결정 형태로 성장되며 Co(50Å)/Si(111)-7×7계에서 CoSi₂의 선택적 에피택셜 성장 온도는 600℃ 이상임을 알 수가 있었다.

그림4-4는 Si(111)-7×7 기판 위에 Co를 약 20Å 두께로 증착한 후 *in-situ*로 600℃와 700℃에서 각각 10분간 열처리한 시료에 대한 rocking curve 스펙트럼이다. 그림 4-3과 같이 열처리 온도와 상관없이 Si(111)면과 CoSi₂(111)면에 대한 두 개의 회절 피이크가 나타나 있음을 확인 할 수가 있는데 이는

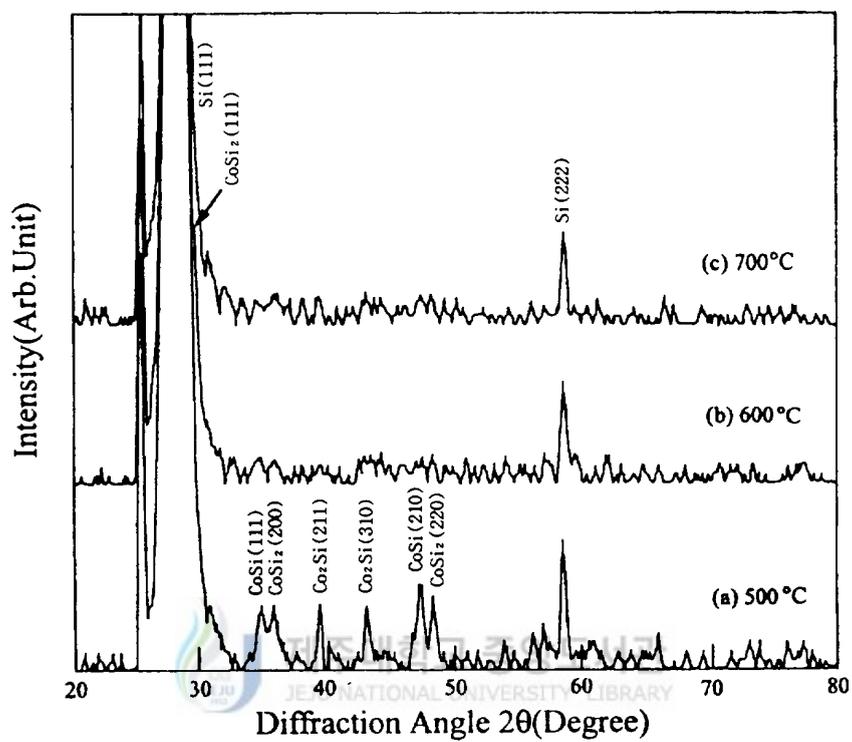


Fig. 4-3. X-ray diffraction spectra obtained from Co(50 Å)/Si(111)-7×7 sample after *in-situ* annealing at 500 °C, 600 °C and 700 °C for 30min.

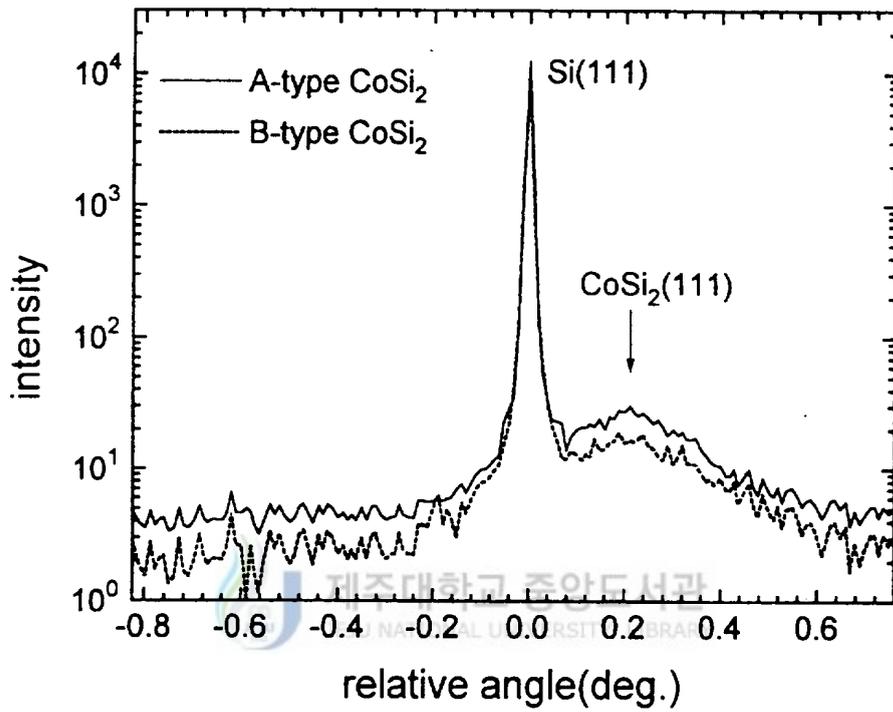


Fig. 4-4. Quadruple x-ray rocking curves of $\text{Co}(20\text{\AA})/\text{Si}(111)\text{-}7\times 7$ sample after *in-situ* annealing at $600\text{ }^\circ\text{C}$ and $700\text{ }^\circ\text{C}$ for 10min.

CoSi₂(111)면이 Si(111)면에 나란하게 에피택셜 성장한 것임을 나타낸다. CoSi₂ (111)면의 회절피크가 예리하지 않은 것은 여러 요인이 있을 수 있겠으나 우선 실리사이드 층의 두께가 얇기 때문에 실리사이드/Si계에서 strain이 충분히 이완되지 못하였기 때문이며 다양한 조건에 의하여 계면에 다소의 결함(defect)이 있을 것으로 생각된다.

CoSi₂(111)면과 Si(111)면 사이의 격자부정합(lattice mismatch)은

$$\frac{\Delta d}{d} = -\cot \theta_B \Delta \theta$$

에 의해 계산되어지는데 여기서, θ_B 는 기판인 Si(111)면에 대한 Bragg 회절각이다. 그림 4-3에서 측정되어지는 CoSi₂ (111)면에 대한 피크와 Si(111)면에 대한 회절각의 차이는 2θ 가 약 0.42° 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 Å 과 3.087 Å 으로부터 예측되는 격자부정합을 1.37%와 비교하면 측정된 값이 약 0.08% 정도 더 큰 것으로 이는 계면에서 다소 strain이 있음을 나타낸다고 생각된다.

3. CoSi₂ 박막의 결정성분석 및 조성비

그림 4-5는 Co를 기판 Si(111)-7×7위에 약 50 Å 증착하여 400°C에서 750°C까지 10분간 *in-situ* 열처리한 시료들에 대한 RBS random 스펙트럼과 Si[111]축 방향으로 channeling된 RBS 스펙트럼이다. 이때 channeling 스펙트럼은 시료로부터 후방산란되는 이온의 수율이 최소가 되는 방향(Si[111])으로 입사된 'He' ion의 후방산란 수율이며, random 스펙트럼은 시료로부터 후방산란되는 이온의 수율이 최대가 되도록 한 방향으로 입사된 후방산란 수율이다. 본 실험에서는 random 스펙트럼을 입사빔 주위에 시료를 회전시키면서 측정하지 않고, Si 표면부근에 설정한 channel 사이에서 최대수율이 되도록 시료를 고정된 후 측정하였다. RBS에서의 최소수율(χ_{min})은 최소 channeling 후방산란 수율과 random 수율의 비로써 정의하며, 이 최소수율은 다원자계에서 결정성을 나타내는데 중요한 요소이다(Bai 등 1990). 본 연구에서는 형성된

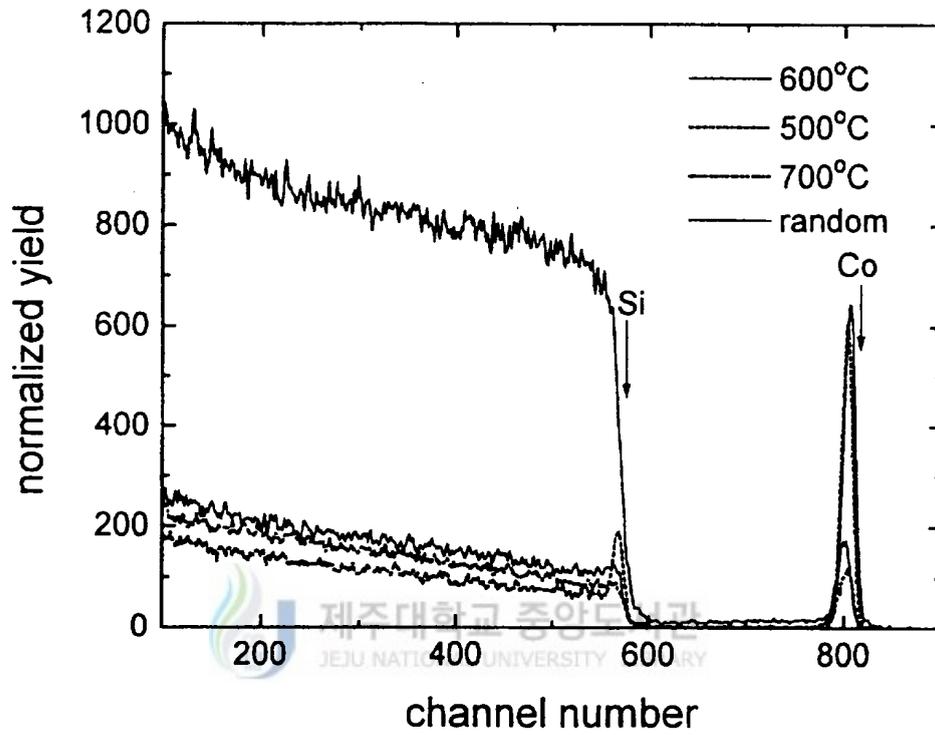


Fig. 4-5. Random and Si[111]axial channeling RBS spectra of CoSi₂/Si(111) samples prepared by *in situ* annealing the Co(50 Å)/Si(111)-7 × 7 samples after *in-situ* annealing at 500 °C, 600 °C and 700 °C for 10min.

CoSi₂ 박막의 결정성을 최소수율로 분석하였다. 그림4-5에 나타난 바와같이 Si에 대한 최소수율(χ_{Si})은 모든 시료에서 약 22%를 보였으며, 두 원소로 이루어지는 실리사이드에서는 무거운 금속에 대한 최소수율이 시료의 결정성을 평가하는 기준이 되기 때문에 그림 4-6에서 나타난 Co에 대한 최소수율(χ_{Co})로 에피택시성을 예측할 수 있다. 400℃에서는 거의 channeling이 나타나지 않았으므로 박막은 비정질이나 다결정으로 되어 있다고 보여지며, 열처리온도가 증가함에 따라 Co에 대한 최소수율(χ_{Co})이 감소하는 것으로 보아 시료의 단결정화가 진행되고 있음을 알 수 있다. 500℃에서는 약 83%로 XRD 결과에서 보여지는 바와 같이 여러 가지 실리사이드상이 다결정상태로 혼재함을 알 수 있다. 600℃와 650℃에서 열처리한 시료에서는 χ_{Co} 가 약 24%, 그리고 700℃에서는 약 16%로 나타났다. 이는 600℃에서 700℃의 온도구간에서 성장된 CoSi₂가 우수한 결정성을 가지고 에피택셜 성장한 것임을 나타낸다. 600℃에서 열처리한 시료와 700℃에서 열처리한 시료에서 χ_{Co} 차이가 나는 이유는 성장한 CoSi₂의 구조에 기인한다. 일반적으로 Si의 <111>, <110> 또는 <114>방향에 따른 channeling 측정은 에피택셜 성장된 CoSi₂(111)박막의 방향성을 결정할 수 있다(Rossi 등 1989). <110>와 <114>방향은 <111> pole에 대하여 동일한 극각(polar angle 35.3°)을 갖는다. type-A 방향성을 갖는 CoSi₂(111)의 <110>와 <114>방향은 기판 Si(111)의 <110>와 <114>방향과 잘 일치한다. 그러나 type-B CoSi₂의 <110>와 <114>방향은 기판 Si(111)의 <114>와 <110>방향으로 정렬된다. 왜냐하면 이들은 Si[111]축을 공유하지만 이 축에 대하여 180°로 회전되어 있는 방위관계를 갖고 있기 때문이다. 따라서 <110>형 축에 따른 CoSi₂(111)과 Si(111) 면의 channeling 수율은 <114>방향에 따른 것 보다 그 값이 작다. 따라서 에피택셜 성장된 CoSi₂의 type-A 또는 type-B의 분류는 이들 두 방향의 channeling 스펙트럼을 비교함으로써 얻을 수 있다(Chiu 등 1981). 이러한 관점에서 600℃ 또는 650℃로 열처리된 시료는 type-B CoSi₂이고 700℃로 열처리된 시료는 type-A CoSi₂로 형성됨을 알 수 있다.

그림4-7은 RBS 데이터로 부터 CoSi_x 형성시 열처리온도에 따른 Si원자의

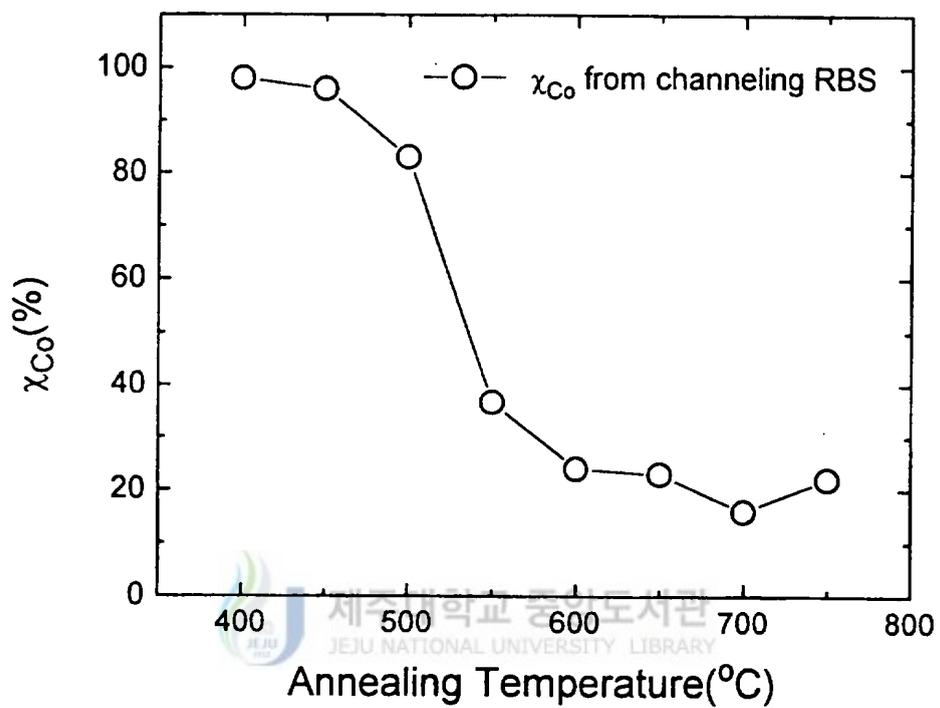


Fig. 4-6. Annealing temperature dependence of χ_{Co} for $CoSi_2/Si(111)-7 \times 7$ sample prepared SPE.

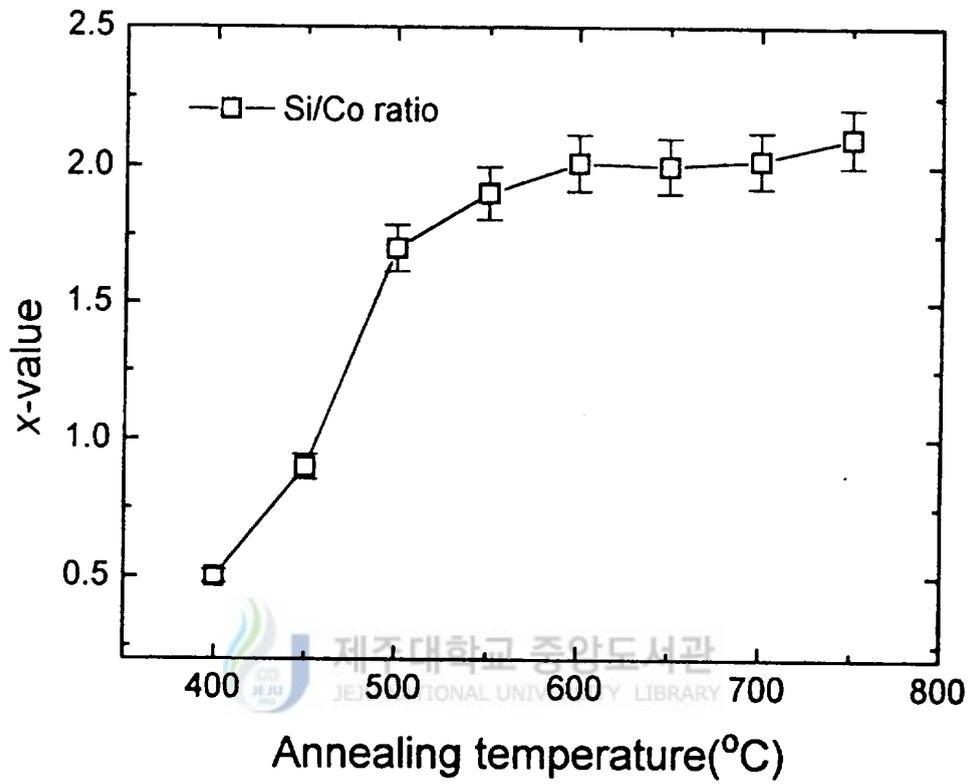


Fig. 4-7. Variation of x in the CoSi_2 films as a function of annealing Temperature obtained from 2 MeV $^{64}\text{Ni}^{++}$ ion backscattering spectrometry.

조성(x)변화를 Si와 Co의 비로서 나타낸 것이다. 400℃로 열처리한 시료에서 x는 0.5로서 Co₂Si 상이 형성되었으며, 450℃ 부근에서는 x가 약 1로서 CoSi 상이 형성되었다. 550℃와 750℃ 온도범위에서 열처리한 시료에서는 x값이 약 1.9에서 2.1로서 조성비가 거의 일정한 CoSi₂가 형성되었음을 알 수 있다. 이 결과를 XRD 분석결과와 비교하여 볼 때 저온에서 열처리한 시료는 Co-과다형 CoSi₂ 상이 형성되고, 고온에서는 Si-과다형 상이 형성됨을 알 수 있고 Bousetta 등 (1992)의 IBD(Ion Beam Deposition) 방법에 의하여 형성한 결과와도 잘 일치되었다.

4. 초박막 CoSi₂ 상의 에피택셜 성장

초박막 Co-실리사이드/Si(111) 계면에서 초박막 CoSi₂ 에피택셜 성장은 열처리 온도와 시간에 의존한다. 이 조건들에 의한 epi-CoSi₂/Si(111) 계면형성을 TEM으로 조사하였다. 그림 4-8은 실온에서 기판 Si(111)-7×7위에 Co를 100Å을 증착한 후 열처리를 하지 않은 시료에 대한 단면 명시야상이다. Co/Si(111) 계면은 대체적으로 평활하나 일부의 계면은 facet된 부분이 관측되었다. 대체적으로 Co 박막은 연속적으로 균일한 두께를 갖고 있다. 이 시료를 Si [1 $\bar{1}$ 0]방향으로 본 HRTEM 격자상은 그림 4-9와 같다. Si(111)면을 기준으로 하여 지수화한 결과 Si(111) 면 위에는 약 40 Å의 두께를 갖고 면간 거리가 약 2.691Å인 CoSi₂ (002)면이 기판 Si (111) 면에 대하여 약 53°의 기울기를 가지면서 Co/Si(111) 계면사이에 형성되어 있다. 계면층 위에는 여러형태의 격자상을 갖는 것으로 보아 미반응 Co 박막 층이 다결정형태로 형성되어 있다. 여기서 CoSi₂ (002) 면이 기판 Si (111) 면에 대하여 약 53°의 각을 이루고 있는 것으로보아 type-B CoSi₂가 에피택셜 성장된 것임을 알 수 있으며, 이것은 Co가 Si(111)-7×7 면 위에 증착될 경우 실온에서도 초기 형성과정 부터 핵형성에 의해 type-B CoSi₂ (002) 면이 에피택셜 성장됨을 보여 준다. CoSi₂/Si(111) 계면은 평활하고, 격자면들이 잘 정렬되어 있다. Tung과 Schrey 등 (1989)은 기판 Si(111)면 위에 Co를 약 3Å 두께로 증착했을때 실온에서도 Co와 Si 원자들이 핵형성에 의하여 type-B CoSi₂ 상이 에피택셜 성

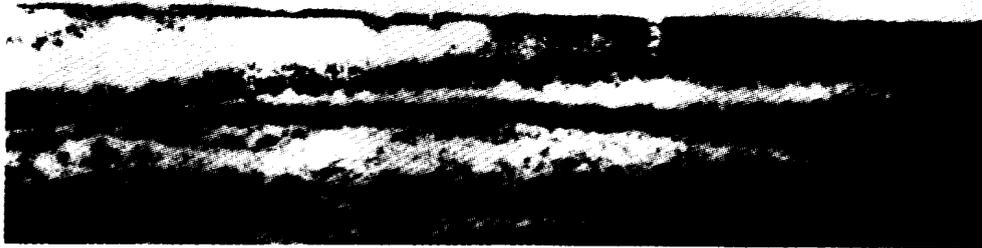


Fig. 4-8. Cross sectional TEM image of Co(100 Å) on Si(111)-7 × 7 substrate at RT.

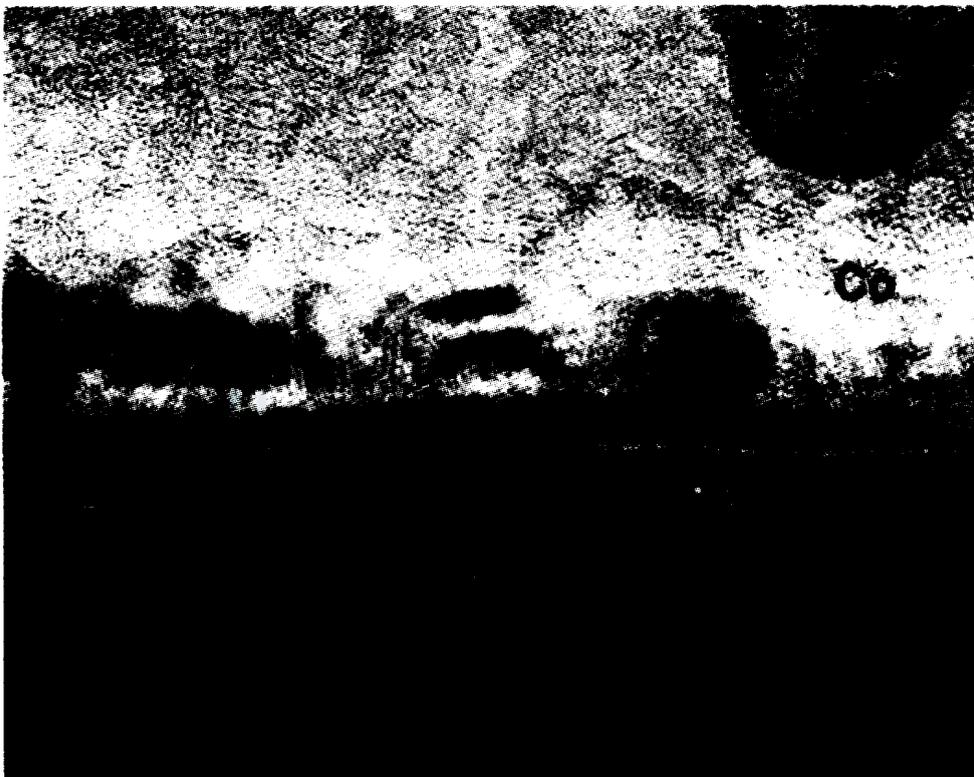


Fig. 4-9 The lattice image obtained by HRTEM along the $[1\bar{1}0]$ beam direction of the Co(100 Å) on Si(111)-7 × 7 substrate at RT.

장됨을 보고하였다. 본 실험의 결과에서도 이들의 결과와 일치하여 실온에서 Si(111)-7×7 표면에 Co가 초박막으로 증착될 때 계면에서 type-B CoSi₂ 상이 에피택셜 성장한다. Co 원자가 Si 표면에 흡착하게 되면 Co 확산에 의하여 Co 원자가 Si의 공동(hollow site)으로 들어 가면서 Si 표면의 제 1층과 제 2층 사이의 Si-Si 결합력을 약화시켜 계면에서 Si-Co-Si 결합으로 type-B CoSi₂와 유사한 형태의 Co-실리사이드 층을 형성한다. 그리고 계속된 Co 원자의 확산이 제 3층과 제 4층 사이의 Si-Si 결합을 파괴 시킴으로써 두개의 Co-실리사이드 층을 형성하는 과정을 연속적으로 되풀이 함으로써 type-B CoSi₂가 핵형성하여 성장되는 것으로 설명되어지고 있다(Tung 등 1989).

그림 4-10은 Si(111) -7×7 기판위에 Co를 20Å의 두께로 증착시킨 후 XRD와 RBS 분석결과에 따라 550℃로 1분간 *in-situ* 열처리한 시료를 Si [1 $\bar{1}$ 0]방향에서 관측한 단면 명시야상 이다. 계면은 평활하지 못하고, Si 기판 쪽으로 깊이 파고든 혹 모양을 이루고 있다. 기판 쪽으로 파고든 이러한 혹 모양의 Co-실리사이드 부분 때문에 각 위치마다 Co-실리사이드의 두께의 차이가 다소 난다. 가장 얇은 부분의 박막 두께가 약 20Å 정도이고, 가장 두꺼운 부분의 박막 두께가 200Å 정도이다. 이 시료를 3분간 열처리한 경우에는 1분으로 열처리한 것보다 둥근 혹 모양이 더 발달되었으나 두께의 차이는 거의 없었다. 이 결과는 Co-실리사이드의 성장속도는 열처리 시간에 의존되지 않음을 의미한다. 이 시료에 대한 SAD 패턴은 그림 4-11과 같다. [111] 방향으로 180° 회전된 위치(Si에 의한 회절점들의 1/3자리)에 있는 회절점들은 B-type CoSi₂에 의한 것으로 형성된 박막은 모두 B-type CoSi₂ 상임을 알 수 있다.

그림 4-10의 시료에서 혹 모양의 부분을 HRTEM으로 분석한 결과 그림 4-12 처럼 약간 다른 계면을 볼 수 있다. Si 기판과의 면간거리와 각도를 계산하여 보면 계면 윗 부분에 형성된 CoSi₂ 상의 (002)면은 면간거리가 약 2.69 Å을 가지면서 기판 Si의 (111) 면과 약 53° 를 이루고 있는 것으로 보아 type-B CoSi₂ 상이다. 중앙 부위에 기판쪽으로 불룩한 모양으로 성장해 있는 부분의 격자상은 동일한 B-type CoSi₂ 상이다. 나타난 격자상이 A-type CoSi₂ 상으로 보이지만 잘 관찰하면 일정하게 3층씩 한 쌍을 이루어 무늬를 만들고 있다. 이것은 Si나 실리사이드의 면심입방구조와 관계되는 것으로서 Si

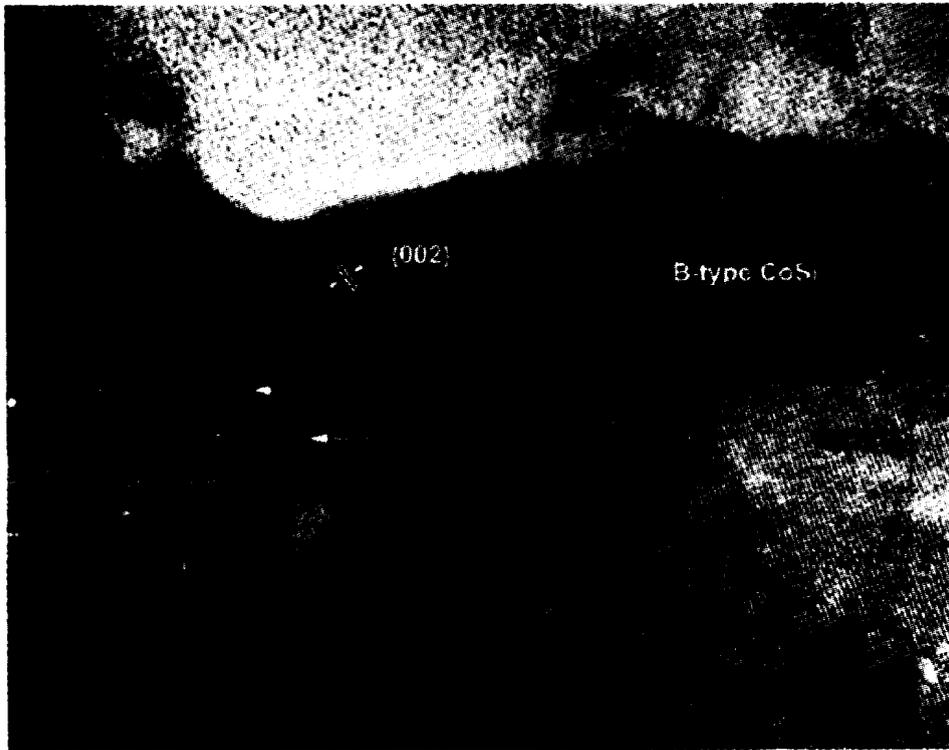


Fig .4-12. HRTEM image of Co(20 Å)/Si(111)-7×7 sample after *in-situ* annealing at 550°C for 1min.

나 CoSi_2 의 상이 아니며, Si와 CoSi_2 상의 두 구조가 몇 원자층이 겹쳐 3차원적으로 쌓정되어 3 층마다 1 줄씩 선명한 격자상이 나타난 것이다. 실리콘 기판과 접하고 있는 부분은 3층씩의 무늬가 희미해지고 실리콘의 격자구조와 거의 유사하다. 열처리 시간을 증가시켜도 불록하게 성장한 아랫부분에 Si(111)면에 나란한 계면은 그대로 유지되었다.

그림 4-10의 시료를 600°C 로 3분간 열처리한 HRTEM 사진이 그림 4-13이다. 다소 양호한 계면을 가지면서 type-B CoSi_2 상이 연속적으로 성장되어 있다. CoSi_2 박막의 두께는 약 30Å에서 80Å 정도로 분포 되어 있으며, 550°C 로 열처리한 시료 보다 더 두껍고 Co-실리사이드가 기판의 내부로 파고든 흑 모양은 보이지 않았다. 그러나 이 시료의 다른 영역에서 관측된 HRTEM 사진은 그림 4-14와 같다. 그림 4-13과는 달리 흑 모양의 계면을 관찰 할 수 있다. 그러나 흑의 가장 깊은 부분의 두께가 약 130Å 정도로서 그림 4-12의 시료 보다 기판 쪽으로 파고 들어간 깊이가 많이 작아진 대신에 실리사이드 측면으로 발달하고 있다. 즉 550°C 에서 열처리하면 Co-실리사이드가 기판 쪽으로 깊이 파고 들어가는 정도가 초기 Co 증착두께의 약 10배, 600°C 인 경우에는 6.5배 정도가 된다. 이 결과는 열처리 온도가 Co-실리사이드의 성장 깊이를 결정하는 중요한 요소로 볼 수 있다. 또한 열처리시간에 따라 실리사이드가 성장하는 과정을 예측할 수 있다. 특정온도에서 한계두께까지 실리사이드가 성장한 후에도 열처리를 계속해주면 기판 아래쪽으로 성장을 멈추고 대신에 실리사이드 양 측면으로 성장하게 된다. 이 과정을 단순화 시킨 그림이 4-15이다.

Si(111) 기판 위에 type-B CoSi_2 가 성장할 때 나타나는 벽계면으로 지금까지 알려져 있는 것은 Si {111} 면들에 나란한 것들이다. 즉 Si 기판의 표면과 나란한 (111) 계면과 여기에 70.5° 기울어져 있는 $(11\bar{1})$ 벽계면이다. 그러나 Co-실리사이드가 Si 기판 쪽으로 성장하여 들어온 형태라면 적어도 또 다른 한 가지의 계면이 있을 것이라 예상된다. Co-실리사이드 밑부분 수평면은 Si(111) 기판의 표면과 나란한 (111) 면이고, 우측 화살표가 가리키고 있는 면이 $(11\bar{1})$ 벽계면이다. 그러나 지금까지 알려진 계면만으로는 좌측 화살표부분의 벽계면을 예측할 수 없다.

그림 4-16은 650°C 로 3분간 열처리한 시료의 명시야상이다. 이 사진에서의

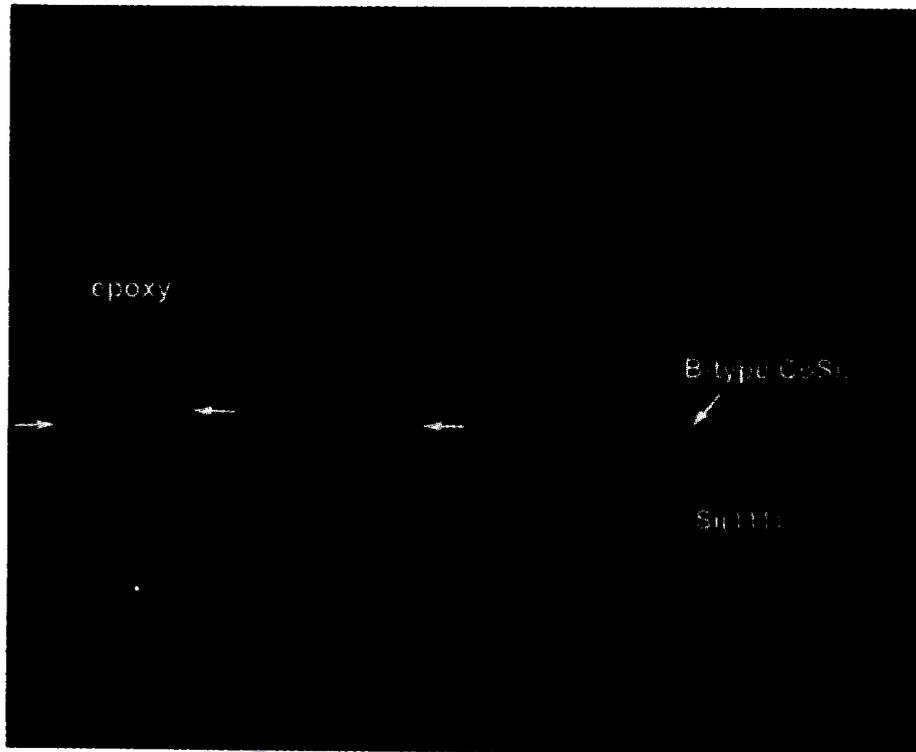


Fig. 4-13. HRTEM image of $\text{Co}(20 \text{ \AA})/\text{Si}(111)-7 \times 7$ sample after *in-situ* annealing at $600 \text{ }^\circ\text{C}$ for 3 min viewed in the $[\bar{1}\bar{1}0]$ Si direction.

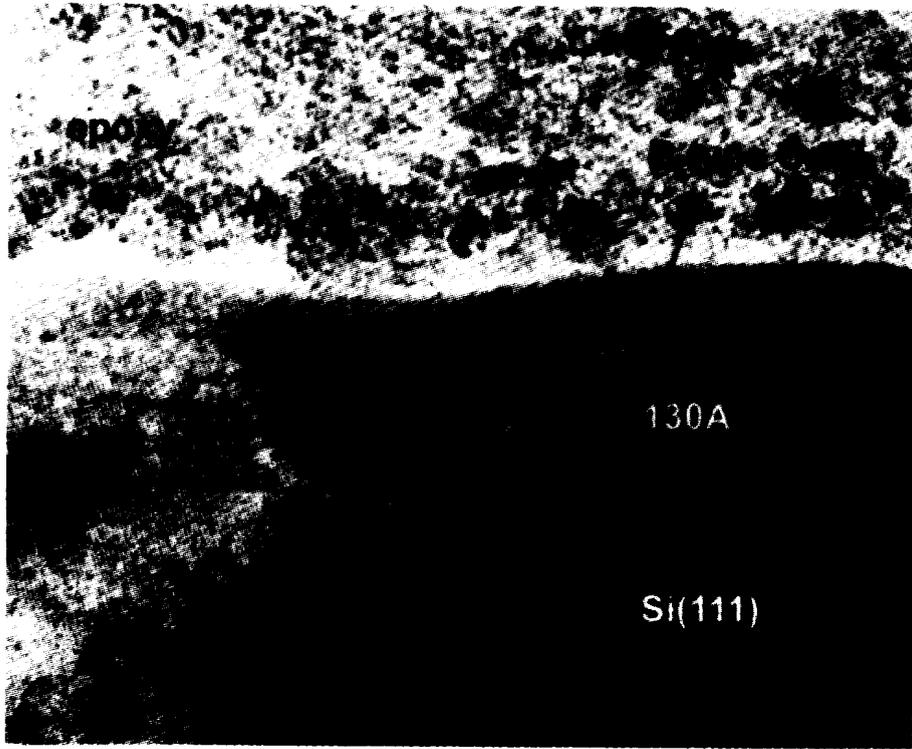


Fig. 4-14. HRTEM image of the another region in the sample as in Fig.4-13.

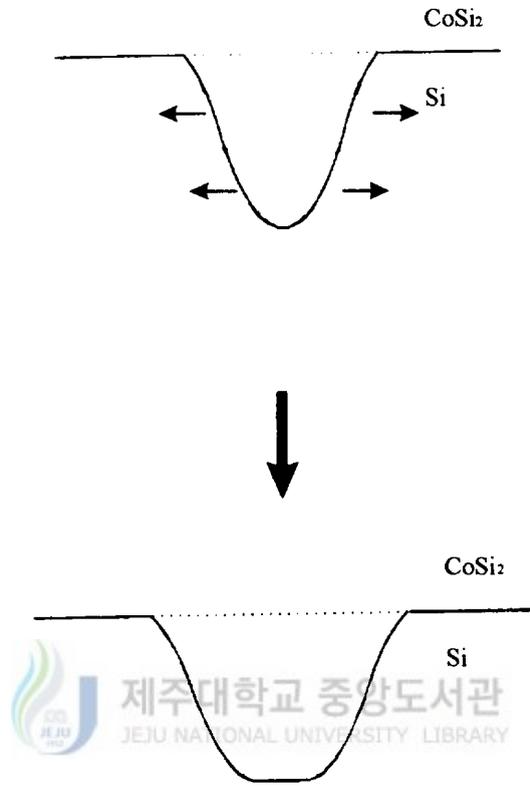


Fig. 4-15. Schematic drawing of Type-B CoSi₂/Si interface.

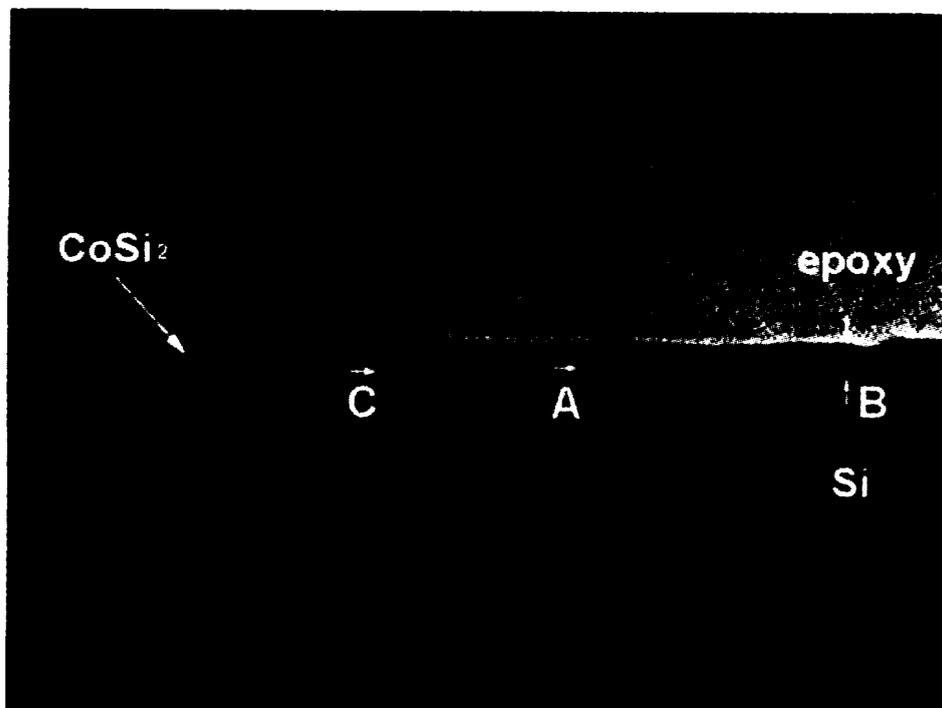


Fig. 4-16. Cross-sectional TEM image of Co(20 Å)/Si(111)-7 × 7 sample after *in-situ* annealing at 650 °C for 3min.

중앙 부분위에 형성되어 있는 Co-실리사이드가 그림 4-13의 명시야상과 차이가 있다. 기판 쪽으로 깊게 파고든 홈 모양은 거의 존재하지 않는다. 이 사진에서 Co-실리사이드/Si(111) 구조의 계면에서는 일정한 각도로 기울어진 여러 종류의 벽계면을 볼 수 있다. 그림 4-17은 그림 4-16의 시편에 대한 HRTEM 으로 사진의 중앙 부위(A-부위)에 벽계면을 보여주고 있다. 이 사진에서는 두 종류의 벽계면이 존재한다. 즉 사진의 밑면과 평행한 계면으로 기판 표면과 평행한 (111) 면과 그 면에 일정한 각도로 기울어진 벽계면이 있다. 이 벽계면은 실리콘의 (111) 면과 70.5°의 각도를 이루는 실리콘의 또 다른 {111} 면인 $(11\bar{1})$ 면이다. 이 $(11\bar{1})$ 벽계면은 B-CoSi₂의 $(\bar{1}\bar{1}5)$ 면에 해당된다. 사진의 중앙에는 이 두 가지 (111) 벽계면과 $(11\bar{1})$ 벽계면이 반복적으로 배열되어 있다. 특히 각각의 $(11\bar{1})$ 벽계면은 수직적으로 3층 내지 6층(3의 배수)의 (111) 면을 높이로 하여 형성되어 있다.

그림 4-18은 그림 4-16의 시편에 대한 B-부위를 관찰한 HRTEM 상이다. 이 사진의 중앙 부위에도 Si와 CoSi₂ 사이에 (111) 면과는 다른 방위를 갖는 계면이 형성되어 있다. 그러나 이 사진에서는 특정한 어느 면에 나란한 벽계면을 갖는다고 말하기는 힘들다. 단지 방향상으로 실리콘의 $(11\bar{1})$ 면과 나란한 벽계면을 형성하려고 하는 것처럼 보인다. (111) 면이 3층 단위로 반복적인 무늬를 이루고 있는데, 여기에서 보이는 것은 특정한 벽계면인 $(11\bar{1})$ 벽계면을 형성하기 위한 중간 과정이라 생각할 수 있다. Si의 각 원자들이 type-B CoSi₂ 구조로 계배열되고 있다. 그림 4-19도 그림 4-16 시편의 C-부위의 HRTEM 상이다. 사진의 중앙 부위에 일정한 각도로 기울어져 있는 하나의 벽계면이 존재한다. 이 벽계면이 실리콘의 (111)면과 이루는 각도는 약 54.7°이고, $(11\bar{1})$ 면과 이루는 각도도 또한 약 54.7°이다. 한편 type-B CoSi₂ 쪽에서는 (111) 면과 약 54.7°를 이루고, $(11\bar{1})$ 면과는 약 15.8°를 이루고 있다. 이는 지금까지 관찰되었던 Si의 (111) 면이나 $(11\bar{1})$ 면에 나란한 벽계면이 아니다. 또한 type-B CoSi₂의 (111)면이 $(11\bar{1})$ 면에 나란하지도 않다. 이와 같은

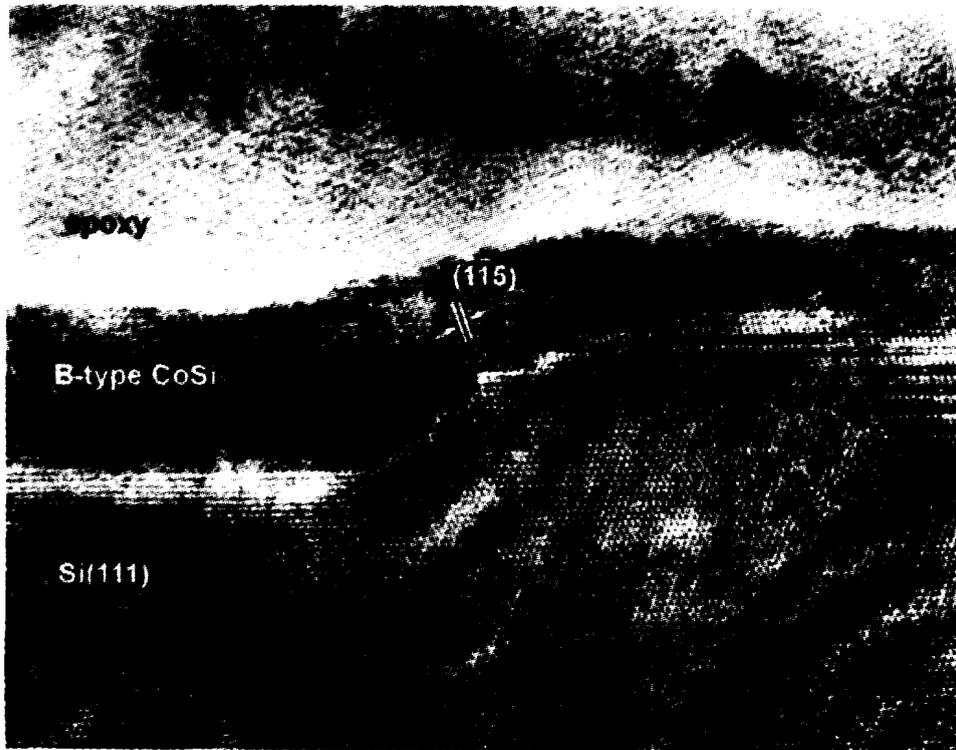


Fig. 4-17. The lattice image obtained by HRTEM along the $\text{Si}[\bar{1}\bar{1}0]$ beam direction of the same as in A-region of the fig.4-16.

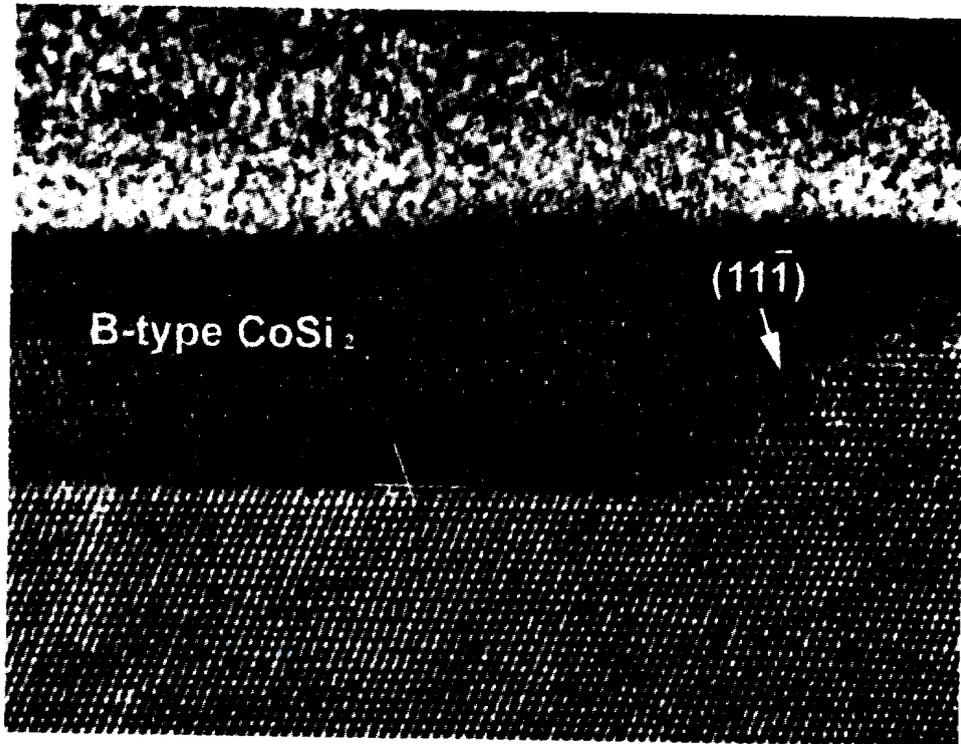


Fig.4-18. The lattice image obtained by HRTEM along the $\text{Si}[1\bar{1}0]$ beam direction of the same as in B-region of the fig.4-16.

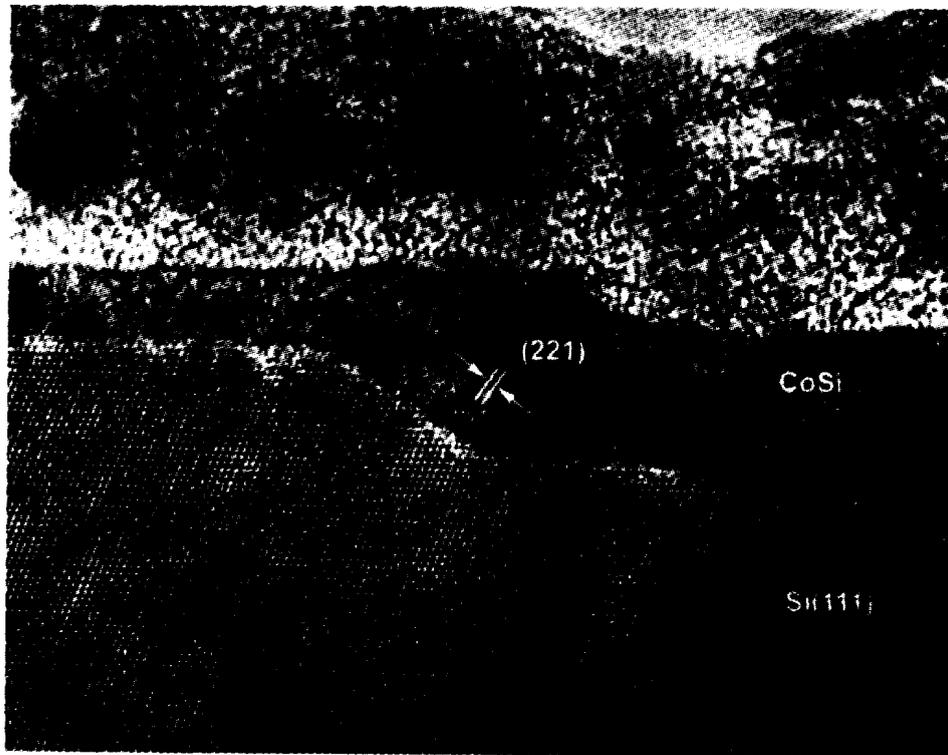


Fig.4-19. The lattice image obtained by HRTEM along the $\text{Si}[\bar{1}10]$ beam direction of the same as in C-region of the fig.4-16.

각도 관계를 만족시키는 면은 바로 Si의 (001) 면이다. 그리고 type-B CoSi₂ 쪽에서는 (22 $\bar{1}$) 면이 이러한 조건을 만족한다. 즉, 그림 4-19에서 보이는 벽계면은 Si(001)//B-CoSi₂(22 $\bar{1}$) 면을 따라 형성된 것이다.

그림 4-20은 Si(111) 기판 위에 20Å의 코발트를 증착시킨 후에 *in-situ*로 700°C에서 1분간 열처리한 시편의 HRTEM 상이다. 계면은 깨끗하고 전형적인 type-A CoSi₂(111) 면이 기판 Si(111)면 위에 에피택셜 성장되었음을 보여주고 있다. 계면 정합성은 type-A CoSi₂ [1 $\bar{1}$ 0] //Si [1 $\bar{1}$ 0], CoSi₂(111)//Si(111)의 관계를 가지며, 계면에서의 misorientation 각을 갖고 있지 않다. 기판 쪽으로 깊이 파고드는 형태의 Co-실리사이드는 전혀 찾아볼 수 없었고, 형성된 벽계면도 650°C에서 열처리한 시편에서 관찰되었던 벽계면 보다 높이가 많이 줄어들었다. 이상의 XRD, RBS, HRTEM 결과로부터 고상 에피택셜 방법에 의한 양질의 type-A CoSi₂ 에피택셜 형성 온도조건은 열처리 온도가 700°C임을 알았다. 또한 CoSi₂ 상과 구조는 열처리 온도에 의존함을 확인 할 수가 있었다.





Fig.4-20. HRTEM image taken along the Si[110] beam direction from the Co(20 Å)/Si(111) sample after *in-situ* annealing at 700 °C for 1min.

V. 결 론

약 10^{10} Torr의 초고진공에서 Si(111)-7×7 기판위에 Co를 증착시켜 초박막 Co 성장 모드를 RHEED, XRD, 와 HRTEM으로 표면 및 계면 구조 변화를 관찰함으로써 초박막 CoSi₂와 epi-CoSi₂/Si(111) 구조의 형성 조건을 살펴 보았다. 또한 형성된 CoSi₂ 상이 기판 Si(111) 면에 에피택셜 성장조건과 type-A 또는 type-B CoSi₂ 구조 형성에 따르는 형성운동학 및 계면의 미시구조 등을 XRD, RBS와 HRTEM 으로 조사하였고, 구조형성에 따른 계면반응성과 형성조건 등을 RBS-channeling, RHEED, HRTEM 등의 분석기를 이용하여 조사하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1) Si(111)-7×7 구조 위에 형성된 에피택셜 성장된 초박막 Co 상의 표면 구조의 초기 과정에는 RHEED 패턴 상의 1×1 구조로 층상 성장하였으며, Co 증착량 증가에 따라 3차원 적인 texture 구조로 형성되어 도상형태로 증착되었다. 그 성장 모드는 Stranski-Krastanov 형임을 확인 하였다. 기판의 온도가 실온에서도 초기증착 상태에서는 계면에 CoSi₂ 상이 에피택셜 성장됨을 보였으며, 임계두께는 약 4ML이었다.

2) 초박막 type-A 구조를 갖는 CoSi₂ 상의 에피택셜 성장은 열처리 온도가 700℃에서 계면이 평활한 양질의 박막이 형성되었다. 그러나 700℃ 이하의 열처리 온도에서는 type-B CoSi₂ 박막이 에피택셜 성장되었으며 계면에서 step 형태를 이루며 Si의 {111} 면에 따라 facetting 되는 현상을 보였다.

3) CoSi₂ 박막의 에피택셜 성장과정은 저온(<700℃)에서 열처리 할 경우 계면에서 흑 모양의 계면이 형성되었으며, 열처리 온도에 따라 특정한 방향의 계면이 생겼다. 열처리온도에 따라 type-B CoSi₂/Si(111) 계면에 나타난 벽계면은 Si(11 $\bar{1}$)/B-type CoSi₂($\bar{1}\bar{1}5$)이고, Si(001)/B-typeCoSi₂(22 $\bar{1}$)도 존재

합이 확인되었다. 그러나 고온 열처리한 경우에는 흑 모양의 계면은 없어지고 특정한 면에 나란한 벽계면이 형성되어 Si의 기판 표면과 나란하게 평탄화 되었다.

4) Co-실리사이드의 형성 기구는 Co 확산에 의하며, 초기단계에서 부터 핵 형성에 의해 계면에는 몇개의 층으로 CoSi_2 상이 형성되나 600°C 이하에서는 Co_2Si 상이 형성됨을 보였고, 600°C 이상에서는 단일상의 CoSi_2 박막만 형성 되었다. 따라서 Co-실리사이드 형성에 있어서 CoSi_2 박막형성의 임계온도는 600°C 임을 알았다.

5) type-A와 type-B CoSi_2 의 channeling 최소수율은 각각 약 16%와 24%로 주어졌다.

6) 650°C 에서 열처리된 B-type CoSi_2 의 정합성은 $\text{CoSi}_2[\bar{1}10]//\text{Si}[1\bar{1}0]$, $\text{CoSi}_2(111)//\text{Si}(111)$ 관계를 갖으며, 700°C 로 열처리된 type-A CoSi_2 의 정합성은 $\text{CoSi}_2[1\bar{1}0]//\text{Si}[1\bar{1}0]$, $\text{CoSi}_2(111)//\text{Si}(111)$ 의 관계를 갖는 것으로 조사되었다.



VI. 참고 문헌

- Bai, G., M-A. Nicolet, J. E. Mahan, and K. Geib, 1990, Channeling of MeV ions in polyatomic epitaxial films : ReSi_2 on Si(100), *Phys. Rev.*, B41, p.8603.
- Bean, J. C., and J. M. Poate, 1980, Sillicon/metal silicide heterostructures grown by molecular beam epitaxy, *Appl. Phys. Lett.*, 37(7), pp.643-646.
- Bousetta, A., A. H. Albayati, J. A. van den Berg, and D. G. Armour, 1992, Structural and electrical properties of Co grown on Si(111) by low energy ion beam deposition, *Appl. Surface Science.*, pp.56-58, p.480.
- Bozler, C. O., and G. D. Alley, 1980, *IEEE trans. Electron. Devices*, ED-27(6), p.1128.
- Bulle-Lieuwma, C. W. T., A. H. van Ommen and J. Hornstra, 1988, *Mat. Res. Soc. Sympo. Proc.*, 102, p.377.
- Chen, L. J., J. W. Mayer and K. N. Tu, 1982, *Thin Solid Films*, 93, p.135.
- Chiu, K. C. R., J. M. Poate, J. E. Rowe, T. T. Sheng, and A. G. Cullis, Interface and surface structure of epitaxial NiSi_2 films, 1981, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.38, p.988.
- Fischer, A. E. M. J., W. F. J. Slijkerman, K. Nakagawa, R. J. Smith and C. W. T. Bulle-Lieuwma, 1988, Growth of uniform epitaxial CoSi_2 films on Si(111), *J. Appl. Phys.*, Vol.64, p.3005.
- Gibson, J. M., J. C. Bean, J. M. Poate, and R. T. Tung, 1982, *Thin Solid Films*, 93, p.99.
- Gibson, J. M., J. L. Batstone, and R. T. Tung, 1987, *In-situ* study of the molecular beam epitaxy of CoSi_2 on Si(111) by transmission

- electron microscopy and diffraction, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.51, p.45.
- Ino, S., 1977, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.10, p.89.
- Lepselter, M. P., and L. M. Asndrews, 1968, Ohmic contacts to semiconductors 1st ed. by B. Schwartz (Electrochem. Soc. Princeton, New York), p.159.
- Lyer, S. S., Chung-Yu Ting, and Peter M. Fryer, 1985, *J. Electrochem. Soc.*, 132(9), pp.2240-2245.
- Murarka, S. P., 1983, Silicide for VLSI Applications, (Academic Press, N. Y), pp.152-176.
- Nicolet, M. A. and S. S. Lau, 1983, in VLSI Electronics : Microstructure Science, edited by Einspuch and G. Larrabee(Academic, New York), Vol.6.
- Ottaviani, G, 1984, Phade formation and kinetic Processes in Silicide, in Thin Film and Interfaces II, ed. by J. E. E. Baglin, D. R. Cambell and W. K. Chu, (North-Halland, N. Y), pp.21-31.
- Poate., J. M, K. N. Tu and J. W. Mayer, 1987, Thin Films Interdiffusion and Reation, (John Wiley and Sons, New York), pp.359-406.
- Rossi, G., X. Jin, A. Santaniello, P. Depadova and D. Chandesris, 1989, Evidence of eightfold coordination for Co atoms at the CoSi₂/Si(111) interface, *Phys. Rev. Lett.*, Vol.62, p.191.
- Saitoh, S., H. Ishiwara and S. Furukawa, 1980, Double heteroepitaxy in the Si(111)/Cosiz/Si structure, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.37, p.203.
- Stalder, R., C. Schwarz, H. Siringhaus, and H. von Kanel, 1992, Surface study of thin epitaxial CoSi₂/Si(100) layers by scanning tunnelling microscopy and reflection high-energy electron diffraction, *Surface Science*, 271, p.355.
- Tu, K. N., 1975, Selective growth of metal-rich silicide for near-noble metals, *Appl. Phys. Lett.*, 27(4), pp.221-224.

-
- Tu, K. N., W. M. James, C. F. Leonard, 1992, *Electronic Thin Film Science for Electrical Engineers and Material Scientists*, (Macmillan publishing company, New York), pp.157-193.
- Tung, R. T. and F. Schrey, 1989, Molecular beam epitaxy growth of CoSi_2 at room temperature, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.54, p.852.
- Van der Merwe, J. H., 1963, Crystal Interface, Par I, Semi-Infinite crystals, *J. Appl. Phys.*, Vol.34, p.117, p.127.
- Walser, R. M. and R. W. Bene, 1976, First phase nucleation in silicon-transition-metal planar interfaces, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.28, p.624.



감사의 글

본 논문이 완성되기까지 끊임없는 지도와 격려를 해주신 최치규 교수님께 먼저 깊은 감사를 드립니다. 부족한 논문이지만 심사를 맡아주신 홍성락 교수님, 김두철 교수님과 학위 이수 과정 동안 가르침을 아끼지 않으신 현남규 교수님, 고정대 교수님께 감사를 드립니다. 또한 항상 어려울 때마다 아낌없는 조언으로 저의 용기를 북돋우어 주신 류계연 교수님께도 깊은 감사를 전합니다.

연구를 수행하는 동안 시설과 실험기기 및 분석에 도움을 주신 경상대학교 김진호 교수님, 한국과학기술원 이정용 교수님, 선문대학교 이영백 교수님께 감사의 정을 담아 이 글을 드립니다.

기쁨과 어려움이 뒤섞여진 대학원생활을 보내고 이제 논문을 마무리하고 보니, 그간 곁에서 저를 격려해주시고 멀리서 성원해주신 모든 분들께 그 고마움을 어떻게 다 전할 수 있을지 모르겠습니다. 멀리 있지만 항상 가까이 있는 성은이 형, 승식, 후배 윤정, 경숙에게도 고마움을 전합니다. 가까이서 항상 염려해주며 아껴주신 미희 누님, 같이 수업을 받으며 견실한 우정을 베풀어 준 부선이 형님께도 감사드립니다. 일반물리학 실험실 생활을 하며 정든 여러 후배님에게도 감사하며, 그들의 앞날에 계속 좋은 일들만이 생기기를 기원합니다. 그리고 저를 진심으로 위하며 따뜻한 예정으로 지켜주고, 때론 엄한 충고로 약을 삼게 해주신 모든 분들께도 고마움을 전합니다.

마지막으로 저를 깊은 사랑으로 낳아 주시고 보살피 주신 부모님께 고개 숙여 한없는 감사를 드리고자 합니다. 그리고 동생 민건의 학업에의 정진과 건강을 기원합니다.