

RSB를 利用한 As 이온 注入된 실리콘 試料分析

李瑞煥 · 權五準 · 李杭炯

〈要 約〉

반도체 소자에서 N^+ 접합에 이용되는 As 이온주입된 시편을 RBS(Rutherford backscattering spectrometry)법으로 분석하였다. Random 스펙트럼으로부터 R_p , ΔR_p , As의 최대농도를 구하고 channeled 스펙트럼으로부터 이온 주입에 의한 결정 손상층의 두께와 열처리 후 interstitial site에서 substitutional site로 치환된 As의 비를 구하였다.

I. 서 론

RBS(Rutherford Backscattering Spectrometry)는 고체 표면부위($\sim 2\mu m$)의 정량분석에 이용되는 표면분석기술의 하나로써 표준시료나 다른 분석 데이터에 의존하지 않고서도 독자적으로 정량화가 가능하며, sputtering 없이도 질

이에 따른 농도 분포를 얻을 수 있는 특징을 가지고 있다. 그리고 분석 대상이 실리콘 웨이퍼와 같은 단결정 재료일 때에는 이온 비임의 channeling 효과를 이용하여 ion implantation이나 reactive ion etching에 의한 결정손상에 대한 정량적 정보 및 불순물 원자의 격자 위치에 대한 정보도 제공해 줄 수 있다. 그러나 RBS의 한 가지 단점은 모재보다 질량이 작은 원소에 대해서는 분석능력이 많이 떨어진다는 점이다. RBS의 이러한 분석능력은 반도체 소자 제조 공정중에서 금속배선이나 heavy ion implantation 공정의 분석에 특히 유용하게 이용될 수 있다.

비소(As) 이온 주입은 MOS 및 bipolar 공정에서 N 혹은 N^+ 접합 형성에 이용되고 있다. 특히 MOS 소자들의 집적도가 증가함에 따라 MOS 트랜지스터의 채널 길이는 $1.0\mu m$ 이하로 감소되고, 이러한 채널길이의 감소는 또한 N^+ 및 P^+ 층의 접합 깊이의 감소도 요구하게 되어

N⁺ 접합의 길이는 약 0.2μm 이하가 되고 있다. 이와 같은 설계조건을 만족시킬 수 있는 이온 주입공정 및 열처리공정을 개발하기 위해서는 200~300nm 깊이에서의 dopant의 농도 변화와 이온 주입시 발생하는 결정손상에 대한 정밀한 분석이 요구된다.

본 고에서는 초고집적 반도체 소자용의 N⁺ shallow junction 형성에 이용되는 high dose, 저 에너지의 As 이온 주입 공정결과를 RBS로서 분석한 결과를 제시하고 이온 주입에 대한 이론적인 계산결과와 비교하였다.

II. 실험

본 연구에서 사용된 시편은 비저항이 15Ω-cm 인 p-type(100) Si에 250Å의 산화막을 형성시키고 40Kev, 5E15 atoms/cm²의 dose로 As를 상온에서 이온 주입하였다. 이온 주입후 열처리 는 900°C, N₂ 분위기로 30분간 furnace annealing 하였다.

III. 분석결과

RBS 분석에는 직경이 2mm인 2MeV의 He⁺ 이온 비임이 사용되었다. 이때 검출각은 170° 이고 MCA(Multichannel analyzer)시스템의 채널당 에너지폭 E_{ch}=3.582KeV/channel이었다. RBS 스펙트럼은 비정렬(random)방향과 <100> 방향(channeling 방향) 두가지로 얻어졌다.

<表 1> Pre-annealed 스펙트럼의 해석에 사용된 Data 및 Parameter

Data	Parameter ⁽¹⁾
H _{Si,0} * = 17 counts	(ε ₀) _{Si} = 92.6 × 10 ⁻¹⁵
H _{As,0} * = 2.5 counts	(ε ₀) _{As} = 95.3 × 10 ⁻¹⁵
A _{As} * = 13.5 counts	(ε ₀) ₀ = 213 × 10 ⁻¹⁵
ΔE _{As} = 12.3 KeV	σ _{As} (E ₀) = 1.425 × 10 ⁻²⁴
FWHM _{As} = 25 KeV	σ _{Si} (E ₀) = 0.248 × 10 ⁻²⁴
	K _{As} = 0.809
	K _{Si} = 0.566

주1) *, Normalized counts=counts/mstr/uC/KeV

1. As-implanted 시편

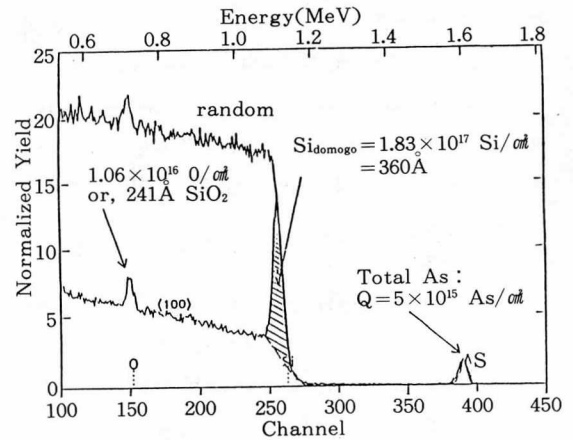
가. Random 스펙트럼

스펙트럼의 해석에 필요한 변수와 data는 <表 1>과 같다. <그림 1>은 As-implant 된 시편의 random 및 channeled 스펙트럼이다. 이온 주입된 As이 거의 모두 표면 근처 수백 Å 이내에 존재할 때 scattering cross section 및 stopping cross section은 표면 에너지 근사법에 의해 계산될 수 있다.^[1] 이 근사법에 의해서 실리콘 내에서의 As의 dose, range, 그리고 range의 분포는 다음과 같이 계산된다.

Random 스펙트럼에서 실리콘 피크의 높이와 As의 총 counts 수로부터 이온 주입된 As의 dose는 다음과 같이 결정되며 이 값은 시편에 주입된 이온의 dose량과 정확히 일치하고 있다.

$$(Nt)_{As} = \frac{A_{As}\sigma_{Si}(E_0)E_{ch}}{H_{Si}\sigma_{As}(E_0)(\epsilon_0)_{Si}} \dots\dots\dots (1)$$

$$= 5.0 \times 10^{15} \text{ atoms/cm}^2$$



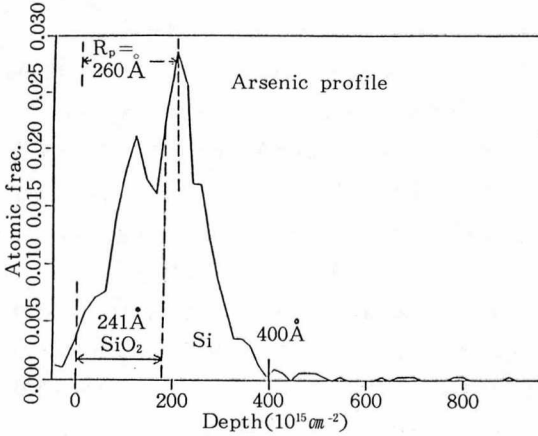
<그림 1> As 이온 주입된 Pre-anneal Si의 random 및 channeled RBS 스펙트럼, E₀=2MeV, θ=170°.

스펙트럼의 표면에서 Si(Silcon) 신호와 As 신호의 피크 높이를 비교하면, 알고 있는 Si의 bulk 농도로부터 As의 최대 농도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{N_{As}}{N_{Si}} = \frac{H_{As}\sigma_{Si}(E_0)(\epsilon_0)_{As}}{H_{Si}\sigma_{As}(E_0)(\epsilon_0)_{Si}} \dots\dots\dots (2)$$

≈ 0.026
 $= 2.6 \text{ atomic \%}$

그리고 위식에서 N_{Si} , 즉 Si의 체적농도 $4.98 \times 10^{22} \text{ atoms/cm}^3$ 을 식(2)에 대입하면 As의 체적농도 N_{As} 는 $1.3 \times 10^{21} \text{ atoms/cm}^3$ 이다.



<그림 2> Pre-annealed As의 RBS Depth Profile, 여기서 깊이의 단위는 Nt 이다.

불순물의 농도분포가 Gaussian일 때, 주입된 불순물의 profile을 특징 지우는 변수는 이온의 projected range R_p 와 R_p 의 표준편차를 나타내는 ΔR_p 이다. RBS 스펙트럼에서 projected range는 As 신호의 고에너지 가장자리로부터 정점까지의 에너지 이동에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$R_p = \Delta E_{As} / [\epsilon_0]_{As} N_{Si} \dots\dots\dots(3)$$

$\approx 260 \text{ \AA}$

Projected range의 표준편차 ΔR_p 는 이온 비임의 straggling 효과에 의해 발생하며, Gaussian 분포의 FWHM(Full width half maximum)과 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$FWHM = 2(2\ln)^{1/2} \times (\text{standard deviation}) \dots(4)$$

$$= 2.355 \times (\text{standard deviation})$$

RBS 스펙트럼에서 As 신호의 FWHM은 As의 깊이 분포와 함께 분석 시스템의 에너지 분해능과 헬륨이온의 에너지 straggling을 같이 포함하고 있다. 그러므로 실제 As의 분포에 의한 FWHM은 분석 시스템의 에너지 분해능과 헬륨 이온의 straggling 성분을 빼어야 한다.

<그림 1>의 Random 스펙트럼에서 Si신호의 12%에서 88% 높이 사이의 에너지폭으로부터 계산된 backscattering 시스템의 에너지 분해능은 약 $21 \text{ KeV}^{[1]}$ 이므로 수정된 FWHM_c는 다음과 같이 계산된다.

$$FWHM_c = [FWHM^2 - \delta E_r^2 - \delta E_s^2]^{1/2} \dots\dots(5)$$

$$= [(25)^2 - (21)^2 - (7.5)^2]^{1/2}$$

$$= 11.3 \text{ KeV}$$

그리고 수정된 FWHM_c는 식 (3)에 의해 다음과 같이 깊이 단위로 변환된다.

$$\Delta R_p = FWHM_c / 2.355 N_{Si} [\epsilon_0]_{As} \dots\dots\dots(6)$$

$$\approx 100 \text{ \AA}$$

<그림 2>는 random 스펙트럼의 As 신호를 simulation하여 얻어진 As의 depth profile이다. 여기서 As는 표면으로부터 깊이 약 640 Å에서 As의 검출한계($\sim 10^{19} \text{ As/cm}^3$) 이하로 되었다.

<표 2> 이론적인 계산값과 RBS 분석결과와의 비교

	Theoretical ⁽²⁾	R B S
$N_{As \text{ max}}(\text{As/cm}^3)$	2×10^{21}	1.3×10^{21}
$R_p(\text{\AA})^*$	255	260
$\Delta R_p(\text{\AA})^*$	98	100
$X_j(\text{\AA})$	800	$> 640^{**}$
$t_{\text{Damage}}(\text{\AA})$?	360

주1) *, SiO₂층 내에서의 R_p 및 ΔR_p
 주2) **, RBS의 detection limit($\sim 1 \times 10^{19}$)까지의 두께

나. Channeled 스펙트럼

이온 주입된 Si의 표면영역은 심한 결정손상을 입게 된다. RBS 분석에서 channeling 효과를 이용하면 결정격자의 손상정도를 깊이에 따라 정량적으로 분석할 수 있다. MeV의 헬륨이온을 Si의 주결정 방향으로 입사시키면 대부분의 헬륨 이온은 Si 격자와 충돌하지 않고 결정 깊숙히 침투하게 된다. 그러므로 Si의 주결정 방향에 대한 후방산란 수율(backscattering yield)은 비 채널링 방향의 수율에 비해 <그림 1>

의 channeled 스펙트럼과 같이 훨씬 줄어든 수율을 갖는다. <그림 1>의 channeled 스펙트럼에서 손상된 원자의 수는 그림의 빗금친 부분의 면적에 비례한다. 그러나 이 경우 Si 표면에 존재하는 SiO₂층에 의한 damage 성분을 뺀 것이 실제 이온 주입에 의한 Si의 damage 양이 된다. Channeled 스펙트럼의 damage 피크로부터 simulation 된 표면 비정질층의 양은 2.3×10^{17} atoms/cm²이었다. 여기서 채널번호 140~150 사이에 있는 산소(O) 피크로부터 계산된 SiO₂층의 두께(240Å)를 빼면 순수한 Si damage의 두께는 1.83×10^{17} atoms/cm²이다. 이것은 360Å 두께의 amorphous Si에 해당된다. Channeled 스펙트럼에서 As 피크의 크기와 형태는 random 피크와 큰 차이가 없는데, 이것은 대부분의 As 원자가 interstitial site에 존재하고 있음을 의미한다.

이상으로부터 구해진 N_{As}, R_p, ΔR_p 및 Si damage 층의 두께를 이론적인 계산결과와 비교하여 <표 2>에 나타내었다.

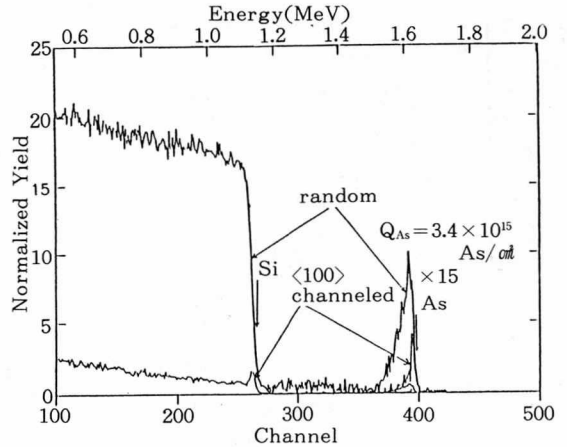
2. 900°C 열처리된 시편

가. Random 스펙트럼

Annealing에 의한 Si 결정의 회복을 관찰하기 위해 표면의 SiO₂ 층을 제거하고 RBS 분석하였다. 이 경우 R_p 및 ΔR_p는 거의 Si 표면에 위치하게 되므로 일반적인 RBS의 depth resolution(~300Å)에 의해 측정이 어렵다. 따라서 R_p 및 ΔR_p에 대한 분석자료는 얻을 수 없었다. <그림 3>은 900°C, 30분간 anneal된 시편의 random 및 channeled 스펙트럼이다. Random 스펙트럼에서 Si 표면신호의 높이 H_{Si}=16.2이고, As 신호의 최대 높이 H_{As}=0.7이다. 그리고 As의 총 count 수는 8.2이다.

Random 스펙트럼에서 As 신호의 count 수와 Si 신호의 높이로부터 구해진 As의 dose는 식 (1)에 의하여

$$(Nt)_{As} = 3.4 \times 10^{15} \text{ As/cm}^2 \dots\dots\dots(7)$$



<그림 3> 900°C anneal random 및 channeled 스펙트라

이 된다. 그리고 식 (2)에 의해 As와 Si의 농도 비는

$$\begin{aligned} N_{As}/N_{Si} &= 0.007 \dots\dots\dots(8) \\ &= 0.7 \text{ atomic \%} \end{aligned}$$

로 계산되며, 이미 알고 있는 Si의 bulk 농도로부터 As의 농도를 구하면 N_{As}는 3.5×10^{20} 이다. <그림 4>는 random 스펙트럼의 As신호를 simulation 하여 얻은 depth profile이다. 여기서 As는 약 2,000Å 깊이에서 RBS의 검출한계 이하로 되었다. 이상의 결과를 간단히 SUPREM III 결과와 비교하여 <표 3>에 나타내었다.

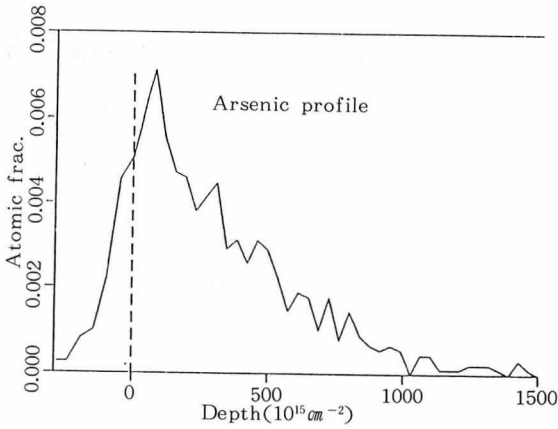
<표 3> SUPREM III 결과와 RBS 분석결과의 비교

	SUPREM III ⁽³⁾	R B S
N _{As max} (As/cm ³)	5×10^{20}	3.5×10^{20}
X _j (Å)	1,500	>2,000*

주1) *, Detection limit까지의 두께

나. Channeled 스펙트럼

900°C에서 30분간의 열처리는 이온 주입된 As를 거의 완전히 activation 시키며 손상된 결정도 회복된다고 보고 있다. 실제로 이 조건으로 열처리한 시편의 스펙트럼 <그림 3>에서 preannealed 스펙트럼에서 보였던 표면 damage 피크는 더 이상 보이지 않는다. <그림 3>에서 channel 번



〈그림 4〉 900°C 30분간 Anneal된 As의 RBS Depth Profile

호 260 근처에 나타나는 작은 피크는 정렬된 결정의 표면 원자에 의한 surface 피크이다.

RBS의 channeling 기술이 제공해 주는 중요한 정보의 하나는 interstitial 위치에서 substitutional 위치로 치환된 원자의 비이다. 〈그림 3〉에서 anneal된 시편의 As의 channeling 피크는 random 스펙트럼에 비해 크기가 훨씬 줄어들었다. 이것은 interstitial 위치에 있던 As가 Si의 재결정화에 따라 substitutional 위치로 이동하여 입사헬륨비임에 대한 충돌 확률이 정렬된 Si 원자에 가려서 감소되었기 때문이다. 이러한 효과에 의해서 random과 channeled As 신호의 총 count 수를 비교하면 interstitial에서 substitutional로 치환된 비를 구할 수 있다. 본 실험의 결과에서 얻어진 치환비는 약 80%이었다.

IV. 결 론

RBS는 표준시편에 의한 교정없이도 독자적으

로 정량화가 가능한 정량분석장비이며 sputtering에 의한 layer의 제거없이도 depth profiling이 가능하다. 특히 channeling 효과를 이용하면 단결정 재료의 결정결함 정도 및 격자 site의 결정에도 이용될 수 있다.

본 고에서는 4M DRAM 등 초고집적 반도체 소자에서 N⁺ shallow junction 형성에 사용되는 As implantation 공정을 RBS로 분석한 사례를 소개하였다. RBS 분석결과들은 이론적인 결과들과 최대 30%의 오차 이내에서 잘 일치하였다. 특히 이온주입에 의한 Si 기판의 결정결함 분석과 As 원자의 substitutional 비의 측정 등은 다른 분석기에서 얻을 수 없는 RBS의 독특한 기능이다. 다만 Si내에서 As의 검출 한계가 약 $\sim 10^{19}$ atoms/cm³로서 기판의 불순물농도인 $\sim 10^{15}$ atoms/cm³보다 높기 때문에 junction depth까지의 전체 profile을 얻을 수 없는 결점이 있다. 결론적으로 RBS에 의한 As ion implantation 공정의 분석은 SIMS 분석과 같이 implantation 공정의 개발 및 소자의 성능개선에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 여겨진다.

〈參考文獻〉

1. Wei-Kan Chu, James W. Mayer and Marc-A Nicolet, "Backscattering Spectrometry", Academic Press, Inc., 1978, p. 138.
2. "Semiconductor Technology HandBook", Technology Associates, 1982.
3. SUPREM III, "One Dimensional Process Analysis Program", Version 3-2, Tech. Modeling Associates Inc. Sep., 1984.