

변형 힘을 받는 p형 Si_{1-x}Ge_x의 이동도 연구

논문
11-3-3

Study of the Mobility for Strained p-type Si_{1-x}Ge_x Alloys

전상국

(Sang Kook Chun)

Abstract

The ionization energy and degree of ionization for p-type Si_{1-x}Ge_x with boron doping are calculated taking into account the screening and broadening effects. The drift and Hall mobilities are then calculated using the relaxation time approximation and compared with the previously reported measurement data for relaxed and strained Si_{1-x}Ge_x alloys to estimate the alloy scattering potential. From a fit, the alloy scattering potential is found to be 0.5 eV. The in-plane drift mobility for p-type strained Si_{1-x}Ge_x grown on (001) Si substrate is approximately $1+10x^2$ times higher than that for bulk Si in the high doping range.

Key Words (중요용어) : Degree of ionization(이온화율), Screening effect(차단효과), Broadening effect(확장효과), Alloy scattering potential, Mobility(이동도)

1. 서론

p형 strained Si_{1-x}Ge_x alloy는 Si에 비해 전기적 특성이 우수할 뿐만 아니라 기존의 Si 기술을 이용할 수 있기에 많은 관심이 되고 있다. Molecular Beam Epitaxy(MBE) 또는 Chemical Vapor Deposition(CVD) 방식에 의해 (001) Si 기판 위에 길러진 얇은 Si_{1-x}Ge_x층은 격자 길이차 상이함 때문에 내부적으로 변형을 겪게 된다. Ge의 함량이 증가함에 따라 density-of-states(DOS)의 크기가 줄어들어 intraband 산란이 감소될 뿐만 아니라 변형에 의해 heavy hole band(HH)와 light hole band(LH)가 떨어지게 되어 interband 산란이 감소되기 때문에 strained Si_{1-x}Ge_x alloy에서 정공의 이동도는 Si에서의 그것보다 커진다.^{1,2)} 이와 같은 사실은 Si_{1-x}Ge_x을 이용하는 소자의 개발을 자극하고 있으며, 이에 따른 strained Si_{1-x}Ge_x의 전기적 특성에 대한 이해가 필요하다.

변형에 의한 Si_{1-x}Ge_x의 에너지 구조와 여러 가지 산란에 의한 정공의 이동도 변화는 Takeda 등³⁾에 의해 처음 연구 발표되었다. 그들은 Lawaetz 방식을 이용하여 Si_{1-x}Ge_x의 에너지 구조를 결정하는 momentum matrix element와 band parameter를 구하였다. 또한, Si과 Ge의 이동도 계산에 이용되었던 acoustic phonon(AP), optical phonon(OP), 그리고 ionized impurity(IO)에 의한 산란을 strained Si_{1-x}Ge_x에 적용시켰으며, Glicksman⁴⁾이 제안한 scattering probability를 이용하여 alloy(AL) 산란에 의한 relaxation time을 찾아냈다. 그러나, Maxwell-Boltzmann 분포를 사용하여 불순물 농도가 낮은 지역에서만 이동도 연구가 실행되었고 실험 값의 결여로 인하여 AL 산란의 변수인 alloy scattering potential(ΔE)에 대한 연구도 부족하였다.

ΔE 의 물리적 의미는 여러 가지로 해석되고 있다. Brooks와 Paul⁵⁾은 Si과 Ge의 band edge의 차이라고 제안했으며, Makowski와 Glicksman⁶⁾은 Si과 Ge의 파장함수를 비교하여 두 물질의 energy gap 차이라고 추정하였다. 한편, 계산 값과 실험 값을 비교하여 추출한 값 또한 다양하다. Fischetti와 Laux⁷⁾는 그

인하대학교 전자전기컴퓨터공학부
(인천시 남구 용현동 253, Fax: 032-875-5882
E-mail: sangkook@dragon.inha.ac.kr)
1997년 9월 24일 접수, 1997년 11월 5일 심사완료

들의 계산 값과 Busch와 Vogt⁸⁾가 측정된 relaxed Si_{1-x}Ge_x의 이동도 값을 비교하여 ΔE 의 값이 0.9 ± 0.1 eV라고 추정하였다. Manku⁹⁾은 strained Si_{1-x}Ge_x의 실험 값을 통하여 0.23 eV의 값을 보고하였다. 그외, Li 등¹⁰⁾은 strained Si_{1-x}Ge_x의 Hall factor가 Si(0.73)과 Ge(1.7) 값의 산술적인 평균이라고 가정하여 0.6 eV의 값을 얻었다.

최근에 Carns 등¹¹⁾은 불순물 농도가 높은 지역에서 다양한 Ge함량에 대한 strained Si_{1-x}Ge_x alloy의 이동도 값을 측정하였다. Critical thickness에 의한 제약과 depletion region이 되지 않아야 하는 조건 때문에 strained Si_{1-x}Ge_x 층은 불순물 농도가 높게 첨가되었다. 불순물 농도가 높은 곳에서는 이온화 에너지가 줄어들 뿐만 아니라 불순물 에너지 띠에 의한 DOS의 영향으로 이동도 값이 저하된다.^{12,13)} 따라서, strained Si_{1-x}Ge_x의 측정된 이동도를 이용하여 ΔE 를 추출하기 위해서는 위와 같은 현상을 고려하여야 정확한 ΔE 값을 추출할 수 있다.

이 논문에서는 불순물의 농도에 따라 변하는 이온화 에너지와 불순물의 농도가 높아지면서 생기는 불순물 에너지 띠에 의한 DOS를 고려하여 이온화율을 계산하였다. 전계 하에서 정공의 이동도를 계산하기 위하여 Boltzmann transport equation과 relaxation time approximation을 이용하였다. 기존의 보고된 실험 값 중, 가능한 낮은 불순물 농도에서 측정된 strained Si_{1-x}Ge_x의 이동도 값과 계산 값을 비교하여 ΔE 를 추출하였으며 이 값을 이용하여 (001) Si 기판 위에 길러진 strained Si_{1-x}Ge_x의 이동도를 계산하였다.

2. 이동도 계산

p형 Si_{1-x}Ge_x의 이동도를 계산할 때, 고려해야 할 대표적인 산란은 AP, OP, IO, 그리고 AL에 의한 산란 등이 있다. AP 및 OP 산란에 의한 relaxation time은 Si와 Ge에 적용된 것을 이용할 수 있다.³⁾ 이 때, Si와 Ge에 적용된 AP 및 OP 산란에 의한 relaxation time을 Si_{1-x}Ge_x의 경우에 적용하기 위해서는 AP의 deformation potential은 linear interpolation하고 OP의 deformation potential은 Si와 Ge의 무게를 조합하여 구한다.²⁾ IO 산란에 의한 relaxation time은 Brooks-Herring 방식에 의하여 얻어질 수 있지만,¹⁴⁾ valence band의 anisotropic하고 nonparabolic한 특성을 고려하여야 이동도 계산의 정확도를 향상시킬 수 있다. 이와 같은 특성을 고려한

IO 산란에 의한 relaxation time¹⁵⁾은 Si_{1-x}Ge_x의 경우에 적용할 수 있다. 한편, Si_{1-x}Ge_x alloy 내부에서 각기 다른 지역적 포텐셜을 갖고 있는 Si와 Ge 원자는 band edge를 불규칙적으로 만들어 정공의 흐름을 방해한다.⁵⁾ 이와 같은 현상을 alloy(AL) 산란이라고 지칭하며 AL에 의한 relaxation time은 아래와 같다.³⁾

$$\frac{1}{\tau_{al}(E)} = -\frac{\pi}{\hbar} \sum_j \frac{1}{N_o} x(1-x) (\Delta E)^2 g_j(E) \quad (1)$$

N_o 는 원자의 개수이고, x 는 Ge 함량이며, ΔE 는 alloy scattering potential이며, g_j 는 j band의 DOS이다.

Valence band 안에서 정공의 흐름은 각 산란현상에 대해 독립적이므로 총 relaxation time(τ_T)은 Mattiessen 방식에 의해 얻어질 수 있으며, 총 relaxation time을 이용하여 Boltzmann transport equation을 풀어 drift 이동도를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\mu_{Dr}^{\alpha} = \frac{-e \int \tau_T \frac{\partial f}{\partial E} v_j^{\alpha} v_j^{\alpha} g_j(E) dE}{\int f g_j(E) dE} \quad (2)$$

j 는 band의 종류를 나타내며, α 는 정공이 움직이는 방향을 의미하며, f 는 Fermi-Dirac 분포함수이다. v_j^{α} 는 j band의 일정 표면 에너지 상에 있는 정공이 α 방향으로 움직이는 속도이다. Band가 isotropic하고 parabolic하면, 속도는 band의 어느 곳에서나 일정하게 되어 위의 식은 일반적으로 알려진 이동도의 표현식인 $e\tau/m$ 로 된다. 또한, Hall 이동도는 자체의 크기가 작을 경우에 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\mu_{Hl}^{\alpha\beta} = \frac{e \int \tau_T^2 \frac{\partial f}{\partial E} (v_j^{\alpha} v_j^{\alpha} \omega^{\beta\beta} - v_j^{\alpha} v_j^{\beta} \omega^{\alpha\beta}) g_j(E) dE}{\int \tau_T \frac{\partial f}{\partial E} v_j^{\beta} v_j^{\beta} g_j(E) dE} \quad (3)$$

α 방향과 β 방향은 서로 수직이며 자체의 방향은 앞서 두 방향과 수직한다. $\omega^{\alpha\beta}$ 는 α (β) 방향으로 가해진 전계에 의해 β (α) 방향으로 정공이 움직일 때의 무게의 역수이다. Conduction band와 같이 isotropic한 성질이 있는 경우에는 $\omega^{\alpha\beta}$ 는 0이 된다.

즉, 정공은 전계와 수직방향으로 무한대의 무게를 갖게 되어 전계의 수직방향으로는 움직일 수 없다. 그러나, valence band는 anisotropic 하기 때문에

ω^{ab} 는 더 이상 0이 아니며, 정공은 전계와 수직방향으로 힘을 전달받을 수 있다.

식 (2)과 (3)에서 얻은 drift 및 Hall 이동도를 이용하여 총 drift 이동도 (μ_D^a)와 Hall 이동도 (μ_H^a)를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\mu_D^a = \frac{\dot{p}_h \mu_{Dh}^a + \dot{p}_l \mu_{Dl}^a + \dot{p}_s \mu_{Ds}^a + \dot{p}_{im} \mu_{Dim}^a}{\dot{p}_h + \dot{p}_l + \dot{p}_s + \dot{p}_{im}} \quad (4)$$

$$= \frac{\dot{p}_{vb} \mu_{Dvb}^a + \dot{p}_{im} \mu_{Dim}^a}{\dot{p}_{vb} + \dot{p}_{im}}$$

$$\mu_H^a = \frac{\dot{p}_h \mu_{Dh}^a \mu_{Hh}^a + \dot{p}_l \mu_{Dl}^a \mu_{Hl}^a + \dot{p}_s \mu_{Ds}^a \mu_{Hs}^a + \dot{p}_{im} \mu_{Dim}^a \mu_{Him}^a}{\dot{p}_h \mu_{Dh}^a + \dot{p}_l \mu_{Dl}^a + \dot{p}_s \mu_{Ds}^a + \dot{p}_{im} \mu_{Dim}^a} \quad (5)$$

\dot{p}_{im} 은 불순물 에너지 띠를 통하여 움직일 수 있는 정공의 농도이며 μ_{Dim}^a 은 그 정공들에 의한 이동도이다.

식 (4)와 (5)를 보면, 이동도는 자유롭게 이동할 수 있는 정공에 의해 결정된다. p형 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 에서 대부분의 정공은 불순물로부터 이온화된 것이므로 이온화 율에 따라 이동도의 값이 달라질 수 있다. 불순물 농도에 따라 이온화 율을 변경시킬 수 있는 요소 중 하나는 이온화 에너지이다. 불순물 농도가 증감함에 따라 이온화 에너지 준위가 변하는 것은 실험적으로 알려져 있다.¹⁶⁾ 각 불순물로부터 이온화된 정공은 불순물의 원자핵이 정공을 구속하는데 필요한 Coulomb 힘을 차단시켜 이온화 에너지를 감소시킨다. 그 결과, 이온화 율은 증가한다. 위와 같은 현상을 고려하여 계산한 이온화 에너지(또는 불순물 에너지 준위)와 밴드 반경은 아래와 같다.¹²⁾

$$E_{im} = E_i \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \exp\left(\frac{-2r}{R} \right) \quad (6)$$

$$r = r_1 \frac{R}{r+R} \exp\left(\frac{r}{R} \right) \quad (7)$$

E_i 와 r_1 는 Bohr 모델을 이용하여 얻어진 이온화 에너지와 밴드 반경이며, R 은 Dingle¹⁷⁾에 의해서 정의된 screening distance이다. 이와 같이, screening 현상에 의해 이온화 에너지와 밴드 반경이 변하여 이동도에 영향을 주는 것을 'screening 현상'이라고 한다.

이온화 율을 변경시키는 다른 요소는 불순물 에너지 띠의 DOS이다. 주기적으로 나열돼있는 host 원자들에 의해 valence band가 형성된다면 불순물 원자들에 의해 불순물 에너지 준위를 중심으로 새로운 band가 만들어진다. 불순물 농도가 증가하게 되면 불순물 사이의 평균거리가 줄어들어 불순물함수의

중첩에 의한 에너지 띠가 형성된다. 불순물 에너지 띠를 통하여 움직이는 정공은 valence band의 정공처럼 이온화된 상태로 볼 수 있으므로 불순물 띠는 DOS의 역할을 하는 셈이며, 아래와 같이 구할 수 있다.¹³⁾

$$g_{im}(E) = \frac{2N_A}{\sqrt{\pi} \sigma_A} \exp\left(-\frac{(E-E_A)^2}{\sigma_A^2} \right) \quad (8)$$

N_A 는 이온화된 불순물 농도이며, E_A 는 정공의 이온화 에너지이다. σ_A 는 불순물 농도에 따른 에너지 띠의 폭을 결정하는 요소이다. 불순물 에너지 띠의 DOS에 의해 이온화 율은 증가하게 되고 이동도의 변화를 유발시킨다. 이를 'broadening 현상'이라고 지칭한다.

Screening 및 broadening 현상을 고려하여 이동도를 계산할 때, 불순물 에너지 띠의 정확한 에너지 구조를 모르므로 μ_{Dim}^a 을 고려하기가 어렵다. 불순물 농도가 매우 높은 경우를 제외하면 μ_{Dim}^a 은 valence band를 통하여 움직이는 정공에 의한 이동도(μ_{Dvb}^a)보다 작다. 이 경우, μ_{Dvb}^a 는 식 (4)의 μ_D^a 보다는 항상 크게 됨을 쉽게 증명할 수 있다. 또한, 불순물 에너지 띠의 영향이 작을수록 μ_{Dvb}^a 는 μ_D^a 에 접근한다.

3. 결 과

그림 1은 상온에서 Ge 함량에 따른 relaxed $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 의 Hall 이동도를 보여준다. 실험값은 Levitas¹⁸⁾가 poly-crystal형인 relaxed $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 의 저항도 및 Hall 측정을 이용하여 얻은 값이다. 불순물은 인위적으로 첨가되지 않아 정확한 불순물 농도는 알 수 없지만, AP 및 OP 산란에 비해 IO 산란은 무시할 정도로 작다. 따라서, 불순물의 농도가 10^{13} cm^{-3} 로 가정하여 Hall 이동도를 계산하여 실험 값과 비교하여도 무방하다. 계산된 Hall 이동도는 ΔE 가 1.0 eV 일 때 실험 값과 가장 잘 일치한다.

하지만, 실험에 사용된 relaxed $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 은 poly-crystal이기 때문에 grain boundary에 의한 산란이 포함되어 있다. 계산된 Hall 이동도는 single-crystal이라고 가정하여 얻은 것이므로 실제 ΔE 는 1.0 eV 보다 작을 것이다.

그림 2는 상온에서 relaxed $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 의 drift 이동도를 보여준다. 실험 값은 Busch 및 Vogt⁸⁾가 측정 한 Hall 이동도를 이용하여 drift 이동도로 환산한

것이다. 그들이 이용한 relaxed Si_{1-x}Ge_x은 n형 및 p형 불순물이 모두 들어 있으며 그 차이는 10^{15} cm^{-3} 이다. ΔE 를 변화시켜 계산한 drift 이

동도를 보면 ΔE 값의 최적치는 1.0 eV이며, 그림 1에서 얻은 값과 일치한다. 그러나, Busch 및 Vogt⁸⁾가 이용한 relaxed Si_{1-x}Ge_x은 single-crystal이므로 grain boundary에 의한 산란은 포함되어 있지 않다. 따라서, ΔE 는 1.0 eV 보다 작아야 타당하다. 이와 같은 결과는 Busch 및 Vogt가 drift 이동도를 계산할 때 범한 몇 가지 오류로써 설명된다. n형과 p형 불순물 농도의 차이가 10^{15} cm^{-3} 일 때, Hall 상수는 정공에 의해서만 결정되지 않고 전자의 영향을 심하게 받는다. 전자는 Hall 상수를 감소시키므로 측정된 Hall 상수는 p형 불순물만 들어 있을 경우의 그것보다 작다. 따라서, 전도도와 Hall 상수의 곱으로 표현되는 Hall 이동도는 작게 측정된다. 또한, Hall 이동도와 drift 이동도의 비인 Hall factor를 $3\pi/8$ 라고 가정하였다. 이 값은 일정한 에너지 표면이 구 형태를 가질 경우에 사용할 수 있지만 relaxed Si_{1-x}Ge_x의 경우에는 적절하지 않다.

그림 3은 상온에서 (001) Si 기판 위에 길러진 strained p-type Si_{1-x}Ge_x의 Ge 함량에 따른 평면방향 drift 이동도를 보여준다. 첨가한 실험 값은 Carns 등¹³⁾의 결과 중에서 불순물 농도가 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 일 때 측정된 이동도이다. 접선은 ΔE 의 크기가 0.

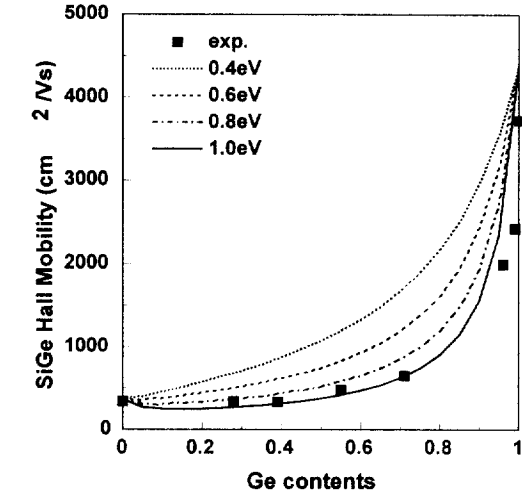


그림 1. 상온에서 Ge 함량에 따른 relaxed Si_{1-x}Ge_x의 Hall 이동도 변화.

Fig. 1. Dependence of the Hall mobility for relaxed Si_{1-x}Ge_x on Ge contents at 300 K.

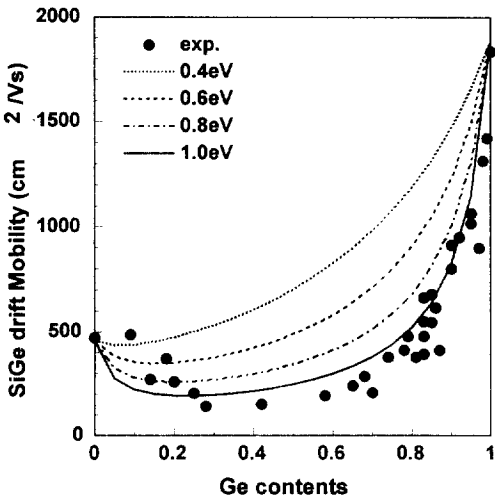


그림 2. 상온에서 Ge 함량에 따른 relaxed Si_{1-x}Ge_x의 drift 이동도 변화.

Fig. 2. Dependence of the drift mobility for relaxed Si_{1-x}Ge_x on Ge contents at 300 K.

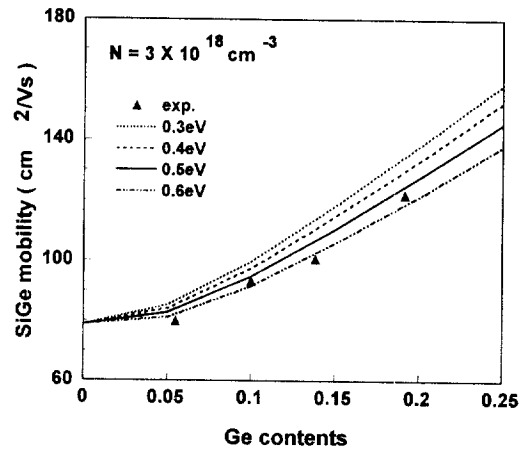


그림 3. 불순물 농도가 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 일 때, strained Si_{1-x}Ge_x의 평면방향 이동도 변화를 이용한 alloy scattering potential 결정.

Fig. 3. Determination of the alloy scattering potential using in-plane drift mobility for strained Si_{1-x}Ge_x with doping concentration of $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

3 eV라고 가정하여 Ge의 함량을 5% 씩 증가시키면서 계산한 이동도이다. 긴 점선, 실선, 그리고 이중점선은 ΔE 의 크기가 각각 0.4, 0.5, 그리고 0.6 eV 일 경우이다. 불순물 에너지 띠를 통한 정공의 이동도(μ_{Dim}^a)가 valence band의 정공에 의한 이동도(μ_{Dvb}^a)보다 크다면 불순물 농도의 증가에 따라 strained $Si_{1-x}Ge_x$ 의 이동도는 거의 변하지 않을 것이다.

그러나, Carns 등¹³⁾의 결과를 볼 때(그림 5 참조), strained $Si_{1-x}Ge_x$ 의 이동도는 불순물 농도가 증가함에 따라 급격히 감소하므로 불순물 에너지 띠의 영향은 매우 작은 것으로 판단된다. 그러므로, 불순물 농도가 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 에서 μ_{Dvb}^a 는 실험 값보다 작지 않으면서 근접할 것이다. 이러한 조건을 만족시키는 경우는 ΔE 가 0.5 eV 일 때이다. 이 값은 Man ku 등⁹⁾이 coherently strained alloy의 실험 값을 통하여 추출한 0.23 eV의 값보다 매우 크다. 그들의 값이 작은 이유는 Boltzmann 분포의 사용으로 인해 IO 산란이 과대평가 되었기 때문인 듯하다.

그림 3에서 추출한 ΔE 값을 검증하기 위하여 여러 가지 불순물 농도에서 측정된 strained $Si_{1-x}Ge_x$ 의 평면방향 이동도 값¹¹⁾을 모아 계산 값과 비교할 필요가 있다. 그림 4는 상온에서 평면방향 drift 이동도를 Ge 함량의 함수로써 보여주며 첨가한 실험 값의 불순물 농도는 3×10^{18} , 6×10^{18} , 3×10^{19} , 그리고 $9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 이다. Ge 함량이 커짐에 따라 계산한 이동도 값들이 증가하는 것으로 보아 AL 산란은 IO 산란에 비해 무시할 정도로 작음을 알 수 있다. 또한, 불순물 농도가 낮을수록 strain에 의해 떨어진 HH와 LH사이에 존재하는 정공의 비율이 높아지기 때문에(또는 큰 mass를 갖는 높은 에너지 지역에 존재하는 정공의 비율은 줄어들기 때문에) interband 및 intraband 산란은 더욱 크게 감소된다. 그러므로, 불순물 농도가 낮을수록 증가율은 가파르다. 한편, 그림 5는 상온에서 평면방향 drift 이동도를 boron 농도의 함수로써 보여준다. Ge의 함량은 5, 10, 14, 그리고 19%이다. 앞서 밝혔듯이, 계산 값은 불순물 에너지 띠에 의한 DOS는 증가를 고려하였지만 불순물 에너지 띠를 통한 정공의 흐름은 고려하지 않았다. 불순물 농도가 10^{20} cm^{-3} 까지 계산 값이 실험 값을 잘 설명하는 것으로 보아 불순물 에너지 띠를 통하여 움직이는 정공의 이동도는 전체 이동도에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 보인다. 그림 4와 5에서 보듯이, ΔE 값이 0.5 eV일 때 계산 값은 실험 값과 잘 일치한다.

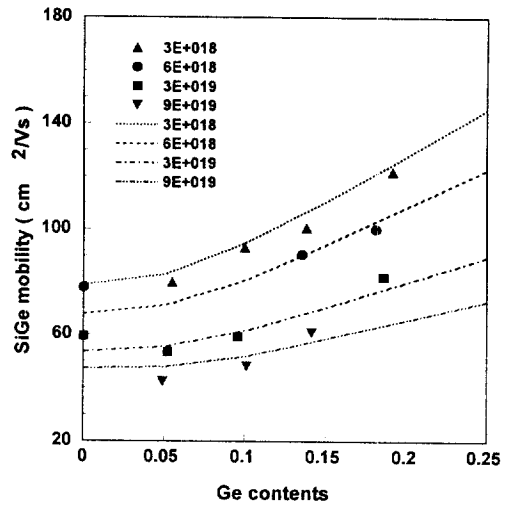


그림 4. (001) Si 기판 위에 길러진 strained p-type $Si_{1-x}Ge_x$ 의 상온에서 Ge 함량에 따른 평면방향 drift 이동도 변화.

Fig. 4. In-plane drift mobility as a function of Ge contents at 300 K for strained p-type $Si_{1-x}Ge_x$ grown on (001) Si substrate.

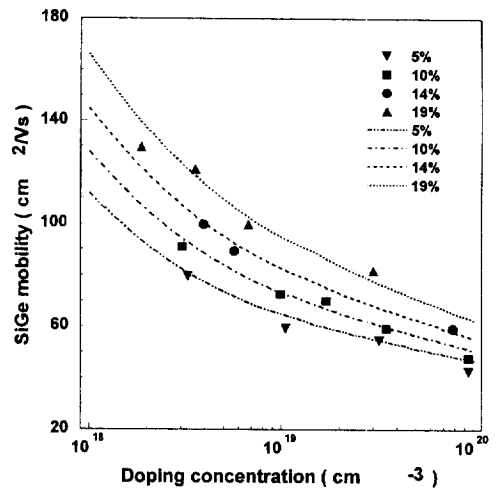


그림 5. (001) Si 기판 위에 길러진 strained p-type $Si_{1-x}Ge_x$ 의 상온에서 불순물 농도에 따른 평면방향 drift 이동도 변화.

Fig. 5. In-plane drift mobility as a function of doping concentration at 300 K for strained p-type $Si_{1-x}Ge_x$ grown on (001) Si substrate.

그림 6은 상온에서 boron 농도에 따른 Si와 Ge의 이동도와 (001) Si 기판 위에 길러진 strained Si_{1-x}Ge_x의 평면방향 이동도를 보여준다. Ge 함량이 증가함에 따라 이동도는 증가함을 볼 수 있다. 불순물 농도가 낮은 곳에서는($10^{13} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$), strained Si_{0.9}Ge_{0.1}의 이동도는 Si의 이동도보다 10% 정도 크고, strained Si_{0.8}Ge_{0.2}의 이동도는 50% 정도 더 크며, strained Si_{0.7}Ge_{0.3}의 이동도는 100% 정도 더 크다. 증가율은 불순물 농도가 높아질수록 낮아진다. 불순물 농도가 높은 곳에서는($10^{18} \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$), Si_{1-x}Ge_x의 이동도는 Si의 이동도에 비해 대략 $1 + 10x^2$ 배이다.

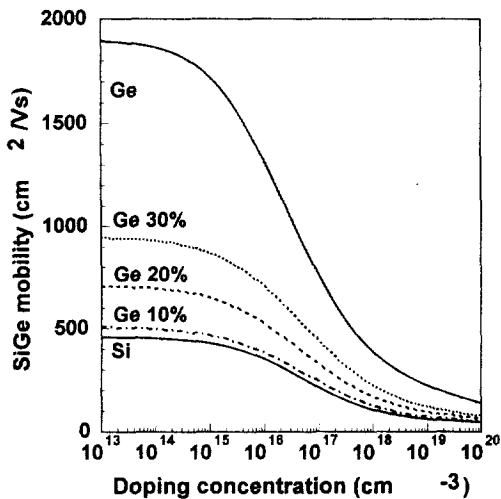


그림 6. 상온에서 불순물 농도에 따른 Si 및 Ge 이동도와 (001) Si 기판 위에 길러진 strained Si_{1-x}Ge_x의 평면방향 drift 이동도.

Fig. 6. Mobilities for bulk Si and Ge, and in-plane drift mobility for strained p-type Si_{1-x}Ge_x grown on (001) Si substrate as a function of doping concentration at 300 K.

4. 결론

Screening 및 broadening 현상을 고려하여 이온화율을 계산한 후, Si_{1-x}Ge_x의 이동도를 계산하여 실험값과 비교하였다. Relaxed Si_{1-x}Ge_x의 실험값을 계산값과 비교할 때, ΔE 의 최적치는 1.0 eV이다.

그러나, 실험값은 poly-crystal의 Hall 이동도이거나 Hall 측정 시 전자에 의한 영향을 고려하지 않았

기 때문에 ΔE 의 최적치는 1.0 eV보다 작으리라 예측된다. 반면, 불순물 농도가 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 에서 측정된 strained Si_{1-x}Ge_x의 이동도와 계산값을 비교했을 때, ΔE 의 크기는 0.5 eV라 예측된다. 이 값을 이용한 계산값은 여러 가지 Ge함량에 대해 광범위한 불순물 농도에서 측정된 실험값과 일치한다. Strained Si_{1-x}Ge_x alloy 층을 소자에 이용할 수 있을 만큼 불순물 농도가 높은 지역에서는($N > 10^{16} \text{ cm}^{-3}$), strained Si_{1-x}Ge_x의 drift 이동도는 대략 $(1 + 10x^2) \times \mu_{Si}$ 로 볼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 97년도 교육부 반도체분야 학술연구 조성비(ISRC 97-E-1309)와 97년도 인하대학교의 학술연구조성비에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. J. M. Hinckley and J. Singh, "Hole transport theory in pseudomorphic Si_{1-x}Ge_x alloys grown on Si(001) substrates", Phys. Rev. B, vol. 41, no. 5, pp. 2912-2926, 1990
2. S. K. Chun and K. L. Wang, "Effective mass and mobility of holes in strained Si_{1-x}Ge_x layers on (001) Si_{1-y}Ge_y substrate", IEEE T-ED, vol. 39, no. 9, pp. 2153-2164, 1992.
3. K. Takeda, A. Taguchi and M. Sakata, "Valence-band parameters and hole mobility of Ge-Si alloys - theory", J. Phys. C: Solid State Phys., vol. 16, pp. 2237-2249, 1983.
4. M. Glicksman, "Mobility of electrons in Ge-Si alloys", Phys. Rev., vol. 111, no. 1, pp. 125-128, 1958.
5. H. Brooks and W. Paul, Bull. Am. Phys. Soc. SerII, "Interband scattering in semiconductors", vol. 1, pp. 48-49, 1956.
6. L. Makowski and M. Glicksman, "Disorder scattering in solid solutions of III-V semiconductor compounds", J. Phys. Chem. Solids, vol. 34, pp. 487-492, 1973.
7. M. V. Fischetti and S. E. Laux, "Band structure, deformation potentials, and carrier mobility in strained Si, Ge, and SiGe alloys", J. Appl. Phys., vol. 80, no. 4, pp. 2234-2252, 1996.

8. G. Busch and O. Vogt, "Elektrische Leitfähigkeit und Hall effekt von Ge-Si-Legierungen", *Helv. Phys. Acta*, vol. 33, pp. 437-458, 1960.
9. T. Manku, J. M. McGregor, A. Nathan, D. J. Roulston, J. P. Noel, and D. C. Houghton, "Drift hole mobility in strained and unstrained doped Si_{1-x}Ge_x alloys", *IEEE T-ED*, vol. 40, no. 11, pp. 1990-1996, 1993.
10. S. H. Li, J. M. Hinckley, J. Singh, and P. K. Bhattacharya, "Carrier velocity-field characteristics and alloy scattering potential in Si_{1-x}Ge_x/Si", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 63, no. 10, pp. 1393-1395, 1993.
11. T. K. Carns, S. K. Chun, M. O. Tanner, K. L. Wang, T. I. Karmins, J. E. Turner, D. Y. C. Lie, M. A. Nicolet, and R. G. Wilson, "Hole mobility measurements in heavily doped Si_{1-x}Ge_x strained layers", *IEEE T-ED*, vol. 41, no. 7, pp. 1273-1281, 1994.
12. S. K. Chun, "Screening effects on the degree of ionization and hole mobility for p-type Si and Ge", *J. Appl. Phys.* vol. 80, no. 8, pp. 4773-4775, 1996.
13. A. Schenk, "Unified bulk mobility model for low- and high-field transport in silicon", *J. Appl. Phys.*, vol. 79, no. 2, pp. 814-831, 1996.
14. B. K. Ridley, *Quantum processes in semiconductors*, Clarendon, Oxford, p. 143, 1993.
15. 전 상국, "Screening 현상 및 broadening 현상이 p형 Si과 Ge의 이동도에 미치는 효과", *전기전자재료학회지*, vol. 10, no. 6, pp. 581-588, 1997.
16. F. J. Morin and J. P. Maita, "Electrical properties of silicon containing Arsenic and Boron", *Phys. Rev.*, vol. 96, no. 1, pp. 28-35, 1954.
17. R. B. Dingle, "Scattering of electrons and holes by charged donors and acceptors in semiconductors", *Philos. Mag.* vol. 46, pp. 831-840, 1955.
18. A. Levitas, "Electrical properties of Ge-Si alloys", *Phys. Rev.*, vol. 99, no. 6, pp. 1810-1814, 1955.