

직접천이 띠간격을 갖는 $Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y(001)$ 의 전기적 특성 연구

Study of the electrical property for $Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y(001)$ with a direct band gap

박일수*, 전상국**
(il-soo Park*, Sang Kook Chun**)

Abstract

$Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y$ is a very promising material for the high-speed device due to the fact that electron and hole mobilities for the strained $Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y$ are greatly enhanced. Because $Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y$ has a direct band gap for the proper combination of x and y, it can be applied to the optoelectronic device. Therefore, the study of the electrical property for $Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y(001)$ with a direct energy gap is needed. $Ge_{1-x}Sn_x$ layer can not be grown thickly due to the large difference of lattice constants. This fact prefers the structure of the device where electrons and holes move in the plane direction. The transverse mobilities of electron and hole for $Ge_{0.8}Sn_{0.2}/Ge(001)$ are 2~3 times larger than those for $Ge/Ge_{0.8}Sn_{0.2}(001)$. Therefore, $Ge_{0.8}Sn_{0.2}/Ge(001)$ is expected to be better than $Ge/Ge_{0.8}Sn_{0.2}(001)$ for the development of the high-speed device.

Key Words : GeSn, strain, direct energy gap, optoelectronic device, mobility

1. 서론

현재까지 반도체소자의 개발은 산화막을 쉽게 만들 수 있는 장점 때문에 Si를 중심으로 이루어져 왔다. 하지만, Si는 물리적 특성이 좋은 편이 아니다. Si의 전자 이동도는 III-V 화합물 반도체의 그것에 비해 매우 낮으므로 높은 주파수 대역에서 동작할 수 있는 고속 소자에 응용하기가 어렵다. 한편, 정공 이동도는 전자 이동도보다 3배정도 작은 형편이다. 또한, Si는 간접천이 구조를 가지므로 광소자로도 적당치 않다.

이와 같은 단점을 극복하기 위하여 혼합물 형태의 소재를 쓸 수 있다. 여러 원소들을 조합하여 만

든 혼합물 형태의 반도체는 band gap engineering 을 통하여 다양한 소자제작을 가능케 한다. 특히, SiGe[1,2], SiC[3,4] 또는 GeSn[5-7]과 같이 IV족 원소들을 조합하여 만든 혼합물 형태의 박막을 이용한 소자 구조는 기존의 Si 기술을 이용할 수 있을 뿐만 아니라 새로운 전기적 특성을 가지는 미래 소자에 응용할 수 있는 가능성 때문에 상당한 관심이 집중되고 있다.

SiGe은 IV족 원소들을 조합하여 만들 수 있는 대표적인 혼합물이다. Si와 Ge은 4.2%의 격자 불일치(lattice mismatch)때문에 $Si_{1-y}Ge_y$ 위에 성장시킨 $Si_{1-x}Ge_x$ 은 응력변형을 겪게 된다. 응력변형으로 인해 전도띠와 원자가띠들은 축퇴되어 전자와 정공의 이동도가 향상된다[1]. 전자와 정공의 이동도가 증가되면 전기적 특성이 좋은 Heterojunction Bipolar Transistor(HBT)와 Complimentary MOSFETs(CMOS) 소자의 제작도 가능하다. 하지만, $Si_{1-x}Ge_x$ 은 Ge의 함량이나 성장방향에 관계없이 간접천이 띠간격을 갖는 단점을 여전히 갖고 있다.

* : 인하대학교 전자전기컴퓨터 공학부 통합과정

** : 인하대학교 전자전기컴퓨터 공학부 부교수

(인천광역시 남구 용현동 253,

Fax : 032-875-5882 E-mail : ilsoo@orgio.net)

2000년 9월 15일 접수, 2000년 11월 13일 심사완료

GeSn은 간접천이 띠간격을 갖는 SiGe의 단점을 보완할 수 있는 물질이다. α -Sn의 원자가띠와 전도띠는 Γ 지점에서 겹치기 때문에 띠간격은 실제적으로 없으므로 GeSn은 직접천이 띠간격을 가질 수 있다[5-7]. 따라서, GeSn은 벌크 상태에서도 직접천이 띠간격을 가질 수 있으므로 III-V 또는 II-VI 반도체에서나 가능했던 광소자를 IV족 혼합물에서도 실현할 수 있다. 또한, Si에 비해 α -Sn에서 정공 이동도는 3배정도 크다는 점과 응력변형에 의한 정공의 띠사이 산란(interband scattering) 및 띠내 산란(intraband scattering)이 크게 줄어드는 것을 감안하면 GeSn에서 정공 이동도는 매우 증가될 것으로 기대된다.

일반적으로, Si에서 전자와 정공의 속도가 느려 고속소자의 개발에 방해가 되고 있는 것을 감안하면 GeSn의 이용은 초 고속소자 개발의 가능성을 보여준다. 더구나, 직접천이 구조의 장점을 이용하면 단일 칩에 고 성능의 광전자(optoelectronic) 소자를 실현시킬 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 GeSn의 전기적 성질을 연구하여 멀티미디어 부품기술의 핵심이 되는 초 고속소자 및 광소자를 실현키 위한 기반 기술을 얻고자한다. 이를 위해 Ge과 α -Sn을 기반으로 $Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y$ 의 에너지 구조를 취한 후, 전자와 정공 이동도를 볼츠만 수송 방정식과 완화시간 어림셈(relaxation time approximation)을 이용하여 계산하였다. 특히, 직접천이 띠간격을 갖는 $Ge/Ge_{0.8}Sn_{0.2}(001)$ 과 $Ge_{0.8}Sn_{0.2}/Ge(001)$ 구조의 전기적 성질에 관심을 집중하였다.

2. 본론

GeSn 혼합물에서 전자 및 정공 이동도를 계산하기 위해선 우선 그 에너지 구조를 알아야 한다. Ge과 α -Sn은 약 15%의 격자 불일치가 있으므로 $Ge/Ge_{1-y}Sn_y(001)$ 과 $Ge_{1-x}Sn_x/Ge(001)$ 구조는 평면 방향으로 팽창 또는 압축 응력변형을 겪게된다. 그 결과, 전도띠와 원자가띠가 매우 근접하게 되며 전도띠와 원자가띠 사이의 상호작용은 매우 커진다[8]. 전도띠와 원자가띠가 매우 근접할 경우, 전도띠와 원자가띠 사이의 상호작용을 단순히 섭동 이론으로 다루기에는 오차가 너무 크게 된다. 따라서, $k \cdot p$ 방법을 이용하여 에너지 구조를 얻기 위해선 전도띠와 heavy hole(HH), light hole(LH), spin

orbit(SO) 띠를 $k \cdot p$ 해밀토니안의 기저 함수(basis function)로 선택하여야 한다. 따라서, 본 논문에서는 8×8 $k \cdot p$ 및 응력변형 해밀토니안[9]을 이용하여 에너지 구조를 계산하였다.

이동도를 계산할 때 필요한 불순물의 이온화되는 정도나 페르미 에너지준위를 계산하기 위해서는 상태밀도를 정확히 알고 있어야 한다. 전도띠와 원자가띠의 상태밀도는 8×8 $k \cdot p$ 및 응력변형 해밀토니안을 이용하여 계산한 에너지 구조로부터 얻을 수 있다. 상태밀도는 불순물의 농도가 높아짐에 따라 증가될 수 있다. 불순물의 농도가 낮을 경우, 모든 불순물 에너지 준위에 존재하는 상태밀도는 그리 중요하지 않다. 하지만, 불순물 농도가 증가함에 따라 불순물 에너지 준위는 넓게 퍼져 일종의 띠 역할을 하게 된다. 따라서, 본 논문에서는 불순물 에너지띠의 상태밀도를 지칭하는 넓어지기 효과[10]를 고려하였다.

주어진 온도에서 전자(정공)의 농도는 불순물의 이온화되는 정도에 크게 영향을 받는다. 불순물로부터 탈출한 전자(정공)는 이온화된 불순물과 전자(정공)사이의 쿨롱 힘을 약화시키게 되며 불순물 에너지 준위를 감소시키는 역할을 한다. 이를 가리기 효과[11-13]라 지칭한다. 한편, 불순물 에너지 준위의 감소는 이온화되는 정도를 증가시키게 되며 쿨롱 힘을 더욱 약화시킨다. 이와 같이, 반복되는 과정을 통해 이온화되는 정도와 불순물 에너지 준위와 페르미 에너지의 수렴된 값을 구할 수 있다. 가리기 효과는 불순물의 농도가 높아짐에 따라 무시할 수 없을 정도로 중요해진다.

페르미 에너지에 따라 전자(정공)의 분포는 결정된다. 이 때, 에너지 구조로부터 얻을 수 있는 전자(정공)의 속도는 제각기 다르다. 볼츠만 수송 방정식을 통해 얻은 표류 이동도(drift mobility)는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\mu_{Dj}^{\alpha} = \frac{-e \int \tau_T \frac{\partial f}{\partial E} v_j^{\alpha} v_j^{\alpha} g_j(E) dE}{\int f g_j(E) dE} \quad (1)$$

j 는 띠의 종류를 나타내고, α 는 운반자가 움직이는 방향을 의미한다. τ_T 는 여러 가지 산란현상에 의한 총 완화 시간이며, f 는 페르미-디랙 분포함수이다. v_j^{α} 는 j 띠의 일정 에너지 표면(constant energy surface) 위에 있는 운반자가 α 방향으로 움직이는 속도이다.

위의 총 완화시간은 여러 가지 산란 현상에 의해 결정된다. 주요한 산란 현상으로는 acoustic phonon(AP), optical phonon(OP), ionized impurity(IO), 그리고 alloy(AL) 산란이 있다. 띠 안의 운반자의 흐름은 각 산란 현상에 대해 독립적이

므로 총 완화 시간을 Mattiessen 방식에 의해 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{\tau_T} = \frac{1}{\tau_{ap}} + \frac{1}{\tau_{op}} + \frac{1}{\tau_{io}} + \frac{1}{\tau_{al}} \quad (2)$$

표 1 이동도 계산에 사용되는 완화시간
Table 1 Relaxation time for mobility calculation

완화시간	
$\frac{1}{\tau_{ap}(E)} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_j \frac{k_B T \bar{\epsilon}_{eff}^2}{2\rho u_l^2} g_j(E)$ $\frac{1}{\tau_{op}(E)} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_j \frac{\hbar (D_l K)^2}{2\rho \omega_o} \times \left[(N_q + 1) \frac{1}{2} g_j(E - \hbar \omega_o) + N_q \frac{1}{2} g_j(E + \hbar \omega_o) \right]$ $(D_l K) = \sqrt{\frac{(1-x)M_{Ge} + xM_{Sn}}{M_{Ge}^{1-x} M_{Sn}^x} \frac{\sqrt{3}d_o}{a_o}}$	$\frac{1}{\tau_{io}(E)} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_j N_i \frac{e^4}{\epsilon^2} \frac{1}{2B^2} \times \left[\ln\left(\frac{A+B}{A-B}\right) - \frac{2B}{A+B} \right] g_j(E)$ $A = 2k_f^2 + R^{-2}$ $B = 2k_f^2$ $\frac{1}{\tau_{al}(E)} = \frac{\pi}{\hbar} \sum_v \frac{1}{N_o} x(1-x)(\Delta E)^2 g_j(E)$

표 2 Ge과 α -Sn의 이동도 계산에 사용되는 매개변수
Table 2 Material Parameter of Ge and α -Sn used this work

	매개변수	Ge	Ref.	α -Sn	Ref.	Unit
변형 포텐셜	a	-8.6	[20]	10.4	[20]	eV
	b	-3.2	[20]	-2.4	[20]	eV
	d	-3.61	[20]	-3.12	[20]	eV
	$\bar{\epsilon}_{eff}$	11.02	*	11.73	*	eV
	d_o	29.8	[20]	22.6	[20]	eV
혼합물 산란 포텐셜	ΔE	0.6	*	0.6	*	a.u.
격자 상수	a_o	5.658	[21]	6.4892	[21]	Å
무게 밀도	ρ	5.3234	[22]	7.285	[22]	g/cm ³
소리 속도	u_l	5.3996	[21]	3.357	*	10 ⁵ cm/sec
광학 포논 에너지	$\hbar \omega_o$	0.037	[23]	0.033	*	eV
유전 상수	ϵ	16.0	[23]	24.0	[21]	a.u.
원자 개수	N_o	4.417×10^{22}	*	2.928×10^{22}	*	cm ⁻³

τ_{ap} 는 AP에 의한 완화 시간[14], τ_{op} 는 OP에 의한 완화시간[14,15], τ_{io} 는 IO에 의한 완화시간[16], 그리고 τ_{al} 은 AL에 의한 완화시간[17]을 나타낸다. 각 완화시간에 대한 표현식은 표 1에 있으며 표 1의 각 완화시간 계산에 사용되는 매개변수들은 표 2에 정리하였다.

표 2에서, AL 산란에 사용되는 혼합물 산란 포텐셜(ΔE)의 값은 알려져 있지 않다. ΔE 는 두 물질의 띠갈의 차라고도 하며[18], 두 물질의 에너지 간격 차로 해석되기도 한다[19]. 본 논문에서는 Ge과 α -Sn의 에너지 간격 차이인 약 0.6 eV를 ΔE 로 삼았다.

3. 결과 및 고찰

Ge/Ge_{1-y}Sn_y 구조는 (001) 성장방향에서만 직접천이 띠간격을 가질 수 있다[7]. 반면, Ge_{1-x}Sn_x/Ge 구조에서는 특정 x 함량에 대해 (001), (110), 그리고 (111)의 세 성장방향에서 모두 직접천이 띠간격을 가진다[7]. 하지만, (001) 성장방향으로 길러진 구조에서 결합 및 표면에 의한 산란이 가장 적다. 따라서, 본 논문에서는 (001) 방향으로 성장시키고 직접천이 특성을 갖는 Ge/Ge_{0.8}Sn_{0.2}(001)과 Ge_{0.8}Sn_{0.2}/Ge(001) 구조에서의 이동도를 비교하였다.

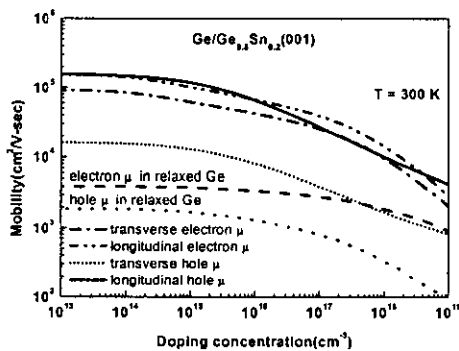


그림 1 온도가 300 K일 때, Ge/Ge_{0.8}Sn_{0.2}(001) 구조에서 도핑 농도에 따른 전자와 정공 이동도

Fig. 1 Electron and hole mobility as a function of the doping concentration in Ge/Ge_{0.8}Sn_{0.2}(001) at 300 K

위 구조의 전도띠 중, X 지점과 L 지점이 Γ 지점에 비해 높은 에너지 준위에 위치하므로[7] 대부분의 전자는 Γ 지점에 위치한다고 볼 수 있다. 이때, X와 Γ 지점 사이 또는 L과 Γ 지점 사이의 띠사이 산란은 무시할 수 있으므로 본 논문에서는 배제하였다.

그림 1은 온도가 300 K일 때, Ge_{0.8}Sn_{0.2}(001) 위에 성장시킨 Ge에서 받개(acceptor)는 boron, 주개(donor)는 phosphorous로 각각 도핑 했을 경우의 도핑 농도에 따른 전자와 정공 이동도를 보여준다. 비교를 위하여 완화된 Ge의 전자와 정공 이동도를 포함시켰다[23]. 일반적으로, 도핑농도가 10¹⁹/cm³ 이상에서는 이동도가 불순물띠를 통한 갭충뒤키 과정(hopping process)에 의해 결정되지만 갭충뒤키 과정에 의한 이동도는 아직 명확히 이론화 되어있지 않으므로 10¹⁹/cm³ 이상의 지역은 배제했다.

다른 반도체의 경우와 마찬가지로, 농도에 따라 주된 산란현상이 달라지는 것을 볼 수 있다. 불순물 농도가 10¹⁴/cm³ 보다 낮을 경우, 전자와 정공 이동도는 주로 AP 산란과 OP 산란의 영향을 받는다. 하지만, 불순물 농도가 10¹⁴/cm³ 이상인 지역에서는 전자와 정공 이동도의 단조로운 감소가 보여지며 IO 산란이 주된 산란현상이다.

응력변형에 따른 전자 이동도 변화는 에너지 구조의 변화로서 설명할 수 있다. Ge/Ge_{0.8}Sn_{0.2}(001) 구조에서 응력변형은 Γ 지점에서 전도띠와 원자가띠의 상호작용을 증가시켜 전자의 상태밀도 유효질량(m_d^*)과 전도도 유효질량(m_c^*)의 크기를 감소시킨다⁸⁾. 이는 완화된 Ge의 전자 이동도보다 팽창 응력변형을 겪는 Ge의 그것이 크게 증가되는 원인이 된다. 한편, 완화된 Ge과는 달리 응력변형이 포함된 Ge에서는 전도띠의 입방 대칭(cubic symmetry)이 파괴되며 방향에 따라 띠간의 상호작용이 달라진다. 전도띠와 원자가띠의 상호작용은 성장방향으로 크게 작용하여 성장방향의 질량(m_L^*)이 평면방향의 질량(m_T^*)보다 작게 되는 원인이 된다. 예를 들면, 전도띠 끝에서 10 meV 높은 곳에 위치한 지점에서 m_L^* 은 0.015 m_0 이며 m_T^* 는 0.03 m_0 이다[8]. 이와 같은 사실은 팽창 응력변형을 받은 Ge에서 성장방향의 이동도(μ_L)가 평면방향의 이동도(μ_T)보다 약 1.5 배 가량 커지는 원인이 된다.

팽창 응력변형을 겪는 Ge에서는 HH 띠와 LH 띠가 분리될뿐만 아니라 질량의 감소가 현저해진다. 그 결과, 띠사이 산란과 띠내 산란의 감소로 인해

응력변형이 포함된 Ge에서 정공 이동도는 완화된 Ge의 그것에 비해 증가된다. 앞서 설명했듯이, 전도띠와 원자가띠의 상호작용은 성장방향으로 크게 작용하여 m_L^* 이 m_T^* 보다 작아는 원인이 되며, 원자가띠의 큰 비등방성(anisotropic) 성질로 인한 두 질량차이는 전자의 경우보다 크다. 예를 들면, 원자가띠 끝에서 10 meV 낮은 곳에서 정공의 m_L^* 은 $0.018 m_0$ 이며 m_T^* 는 $0.206 m_0$ 의 크기를 갖는다 [8]. 이는 정공의 μ_L 이 μ_T 보다 약 8 배 커지는 원인이 된다.

그림 2는 온도가 300 K일 때, Ge(001) 위에 성장시킨 $Ge_{0.8}Sn_{0.2}$ 에서 받개는 boron, 주개는 phosphorous로 각각 도핑 했을 경우의 도핑 농도에 따른 전자와 정공 이동도를 보여준다. 비교를 위하여 완화된 $Ge_{0.8}Sn_{0.2}$ 의 전자와 정공 이동도를 포함시켰다. 그림 1의 경우와 같은 이유로 도핑농도가 $10^{19}/cm^3$ 이상 일 때의 이동도는 포함하지 않았다. 불순물 농도가 $10^{15}/cm^3$ 보다 낮을 경우, 전자와 정공 이동도는 주로 AP 및 OP 산란의 영향을 받는다고 볼 수 있다. 반면, 불순물 농도가 $10^{15}/cm^3$ 이상인 지역에서 주된 산란은 IO 산란이다.

Bowing 효과를 고려한 가상 결정 어림법(virtual crystal approximation)으로 계산된 완화된 $Ge_{0.8}Sn_{0.2}$ 의 띠허격은 0.188 eV이고 $Ge_{0.8}Sn_{0.2}/Ge(001)$ 구조에서의 그것은 0.243 eV이다.

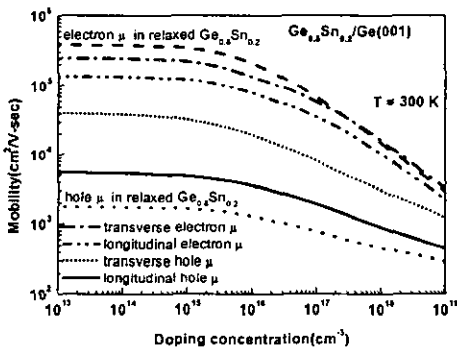


그림 2 온도가 300 K일 때, $Ge_{0.8}Sn_{0.2}/Ge(001)$ 구조에서 도핑 농도에 따른 전자와 정공 이동도

Fig. 2 Electron and hole mobility as a function of the doping concentration in $Ge_{0.8}Sn_{0.2}/Ge(001)$ at 300 K

띠간격이 작을수록 전도띠와 원자가띠의 상호작용이 강해져 작은 m_d^* 를 갖게 되므로 압축 응력변형을 겪는 $Ge_{0.8}Sn_{0.2}$ 의 전자 이동도가 완화된 $Ge_{0.8}Sn_{0.2}$ 의 그것보다 작아지게 된다. 또한, $Ge_{0.8}Sn_{0.2}$ 에서는 압축 응력변형으로 인하여 전도띠의 임방 대칭이 파괴되어 전도띠와 원자가띠의 상호작용이 평면방향으로 크게 작용한다. 그 결과, m_T^* 가 m_L^* 보다 작아진다. 전도띠 끝에서 10 meV 높은 곳에 위치한 지점에서 m_T^* 는 $\sim 0.014 m_0$ 이며 m_L^* 는 $\sim 0.029 m_0$ 의 크기를 갖는다[8]. 이와 같은 사실은 압축 응력변형을 받은 GeSn에서 μ_T 가 μ_L 보다 약 1.7 배 커지는 원인이 된다.

압축 응력변형을 겪는 $Ge_{0.8}Sn_{0.2}$ 은 Γ 지점에서 원자가띠의 축퇴가 파괴되면서 정공의 m_d^* 와 m_c^* 는 완화된 $Ge_{0.8}Sn_{0.2}$ 의 그것보다 작아진다. 이 같은 사실은 응력변형이 포함된 $Ge_{0.8}Sn_{0.2}$ 에서 정공 이동도가 커지는 원인이 된다. 또한, 압축 응력변형에 의해 전도띠와 원자가띠의 상호작용은 평면방향으로 크게 작용하여 m_T^* 가 m_L^* 보다 작아지므로 평면방향의 이동도가 성장방향의 이동도보다 크게 된다.

4. 결론

8×8 $k \cdot p$ 및 응력변형 해밀토니안, 볼츠만 수송 방정식, 그리고 완화시간 어림법을 이용하여 $Ge/Ge_{0.8}Sn_{0.2}(001)$ 과 $Ge_{0.8}Sn_{0.2}/Ge(001)$ 구조에서 전자와 정공의 μ_T 와 μ_L 를 계산하였다. 두 구조에서 전자와 정공의 μ_L 과 μ_T 는 완화된 Ge의 이동도보다 커진다.

$Ge/Ge_{0.8}Sn_{0.2}(001)$ 구조에서 전자와 정공의 μ_L 는 μ_T 보다 크므로 이에 대한 활용을 생각해 볼 수 있다. 앞서 밝혔듯이, Ge과 α -Sn은 약 15 %의 큰 격자불일치로 인하여 misfit dislocation이 많이 발생하여 임계 두께(critical thickness)는 크게 제한된다 [24]. 따라서, $Ge/Ge_{0.8}Sn_{0.2}(001)$ 구조는 성장방향으로 전자(정공)가 움직이는 HBT 소자 제작에는 적합하지 않을 것으로 사료된다. 한편, $Ge/Ge_{0.8}Sn_{0.2}(001)$ 구조를 이용한 MOS 소자는 임계 두께의 영향이 적도록 제작할 수 있다.

$Ge_{0.8}Sn_{0.2}/Ge(001)$ 구조에서, $Ge/Ge_{0.8}Sn_{0.2}(001)$

구조와는 반대로, 전자와 정공의 μ_T 는 μ_L 보다 크다. 더구나, $Ge_{0.8}Sn_{0.2}/Ge(001)$ 구조에서 전자와 정공의 μ_T 는 $Ge/Ge_{0.8}Sn_{0.2}(001)$ 구조에서의 그것보다 약 2~3 배 큰 값을 갖는다. 따라서, $Ge_{0.8}Sn_{0.2}/Ge(001)$ 구조가 MOS 소자 제작에 더욱 유리하다.

한편, $Ge/Ge_{0.8}Sn_{0.2}(001)$ 과 $Ge_{0.8}Sn_{0.2}/Ge(001)$ 구조뿐만 아니라 $Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y$ 구조는 특정 x 또는 y 함량과 성장방향에 따라 직접천이 띠간격을 가진다. 따라서 III-V 또는 II-VI 반도체에서나 가능했던 광소자를 IV족 혼합물에서도 실현할 수 있으며 전자와 정공 이동도의 향상 효과를 결합하면 단일 칩에 고 성능의 광전자 소자를 실현시킬 수 있다.

감사의 글

본 결과는 정보통신부 정보통신 우수시범학교(대학원) 지원사업에 의하여 1999년 인하대학교 교내 연구비 지원으로 수행하였습니다.

참고문헌

[1] 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.

[2] T. Manku, J. M. McGregor, A. Nathan, D. J. Reoulston, 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. 10, pp. 1393-1395, 1993.

[3] Alexander A. Demkov and Otto F. Sankey, "Theoretical investigation of random Si-C alloys", Phys. Rev. B, Vol. 48, No. 4, pp. 2207-2214.

[4] H. J. Osten, E. Bugiel, and P. Zaumseil, "Self-organization during $Si_{1-y}C_y$ alloy later growth on Si(001) using homogeneous coevaporation", J. Appl. Phys. Vol. 82, No. 1, pp. 231-235, 1997.

[5] Gang He and Harry A. Atwater, "Interband Transitions in Sn_xGe_{1-x} Alloys" Phys. Rev.

Let., vol. 79, no. 10, pp. 1937-1940, 1997.

[6] O. Gurdal et al., "Low-temperature Growth and Critical Epitaxial Thicknesses of Fully Strained Metastable $Ge_{1-x}Sn_x$ ($x \leq 0.26$) Alloys on $Ge(001)2 \times 1"$. J. Appl. Phys., vol. 83, no. 1, pp. 162-170, 1998.

[7] 박일수, 전상국, " $Ge_{1-y}Sn_y$ 위에 성장시킨 $Ge_{1-x}Sn_x$ 또는 Ge 층에서 성장방향과 응력변형 조건에 따른 다이렉트 에너지 간격 특성 연구", 한국전기전자재료학회지, Vol. 12, No. 10, pp. 835-842, 1999.

[8] 박일수, 전상국, "완화된 또는 응력변형을 겪는 Ge과 $Ge_{0.8}Sn_{0.2}$ 에서 전자와 정공의 상태밀도 유효질량과 전도도 유효질량", 한국전기전자재료학회지, Vol. 13, No. 8, pp. 643-650, 2000.

[9] 박일수, 전상국, "팽창 응력변형을 겪는 Ge에서 가전자대의 에너지구조 해석", 한국전기전자재료학회지, Vol. 12, No. 12, pp. 1102-1110, 1999.

[10] 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.

[11] R. B. Dingle, "Scattering of Electrons and Holes by Charged Donors and Acceptors in Semiconductors", Philos. Mag., Vol. 46, pp. 831-840, 1955.

[12] R. Mansfield, "Impurity Scattering in Semiconductors", Proc. Phys. Soc. B, Vol. 69, pp. 76-82, 1956.

[13] 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.

[14] H. Nakagawa and S. Zukotynski, "The valence band structure and the hole mobility in silicon", Can. J. Phys., Vol. 55, pp. 1485-1491, 1977.

[15] 나두현, 전상국, "혼합물에서 non-polar optical phonon 에 의한 변형 포텐셜", 한국전기전자재료학회지, Vol. 12, No. 11, pp. 994-998, 1999.

[16] B. K. Ridley, Quantum processes in semiconductors, Clarendon, Oxford, 1993.

[17] K. Takeda, A. Taguchi and M. Skata, "Valence-band parameters and hole mobility of Ge-Si alloys - theory", J. Phys. C: Solid State Phys. Vol. 16, pp. 2237-2249, 1983.

[18] H. Brooks and W. Paul, Bull. Am. Phys. Soc.

- SerII, "Interband scattering in semiconductors", Vol. 1, pp. 48-49, 1956.
- [19] 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.
- [20] A. Blacha, H. Presting, and M. Cardona, "Deformation Potentials of $k=0$ States of Tetrahedral Semiconductors", Phys. Stat. Sol.(b), Vol. 126, pp. 11-36, 1984.
- [21] Landolt-Börnstein, Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, O. Madelung, Ed. New York: Springer-Verlag, 1982.
- [22] O. Madelung, "Semiconductors-Basic Data", O. Madelung, Ed. New York: Springer-Verlag, 1996.
- [23] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices 2nd Ed., J. Wiley & Sons, 1981.
- [24] R. People and J. C. Bean, "Calculation of critical layer thickness versus lattice mismatch for $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ strained-layer heterostructures", Appl. Phys. Lett. Vol. 47, No. 2, pp. 322-324, 1985.