

Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y(001)의 band lineup 유형

Band Lineup Types Based on Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y(001)

박일수, 전상국

(Il Soo Park and Sang Kook Chun)

Abstract

We present the band lineups of Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_yGe_y(001) heterostructures for the new devices. The energy gap of the bulk Ge_{1-x}Sn_x alloy is calculated by taking into account the Vegard's law. The change of the energy gap due to the strain is understood in terms of the deformation potential theory. The valence band offset is obtained from the average bond energy model, where the changes of the band offset due to alloy compositions and strain are included. It is found that Ge_{1-x}Sn_x/Ge(001) heterostructure has a staggered lineup type for 0 < x ≤ 0.06 and a straddling one for 0.06 < x ≤ 0.26. Meanwhile, Ge/Ge_{1-y}Sn_y(001) heterostructure has a staggered lineup type for 0 < y ≤ 0.19 and a broken-gap one for 0.19 < y ≤ 0.26. As a result, the various type of the Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_yGe_y(001) heterostructure can be applied for the useful device.

Key Words : GeSn, Herostructure, Deformation potential theory, Average bond energy, Band lineup

1. 서론

IV 족 원소들로 이루어진 이원(binary) 혼합물인 Ge_{1-x}Sn_x은 다이아몬드 입방구조를 가지면서 가변적인(tunable) 직접천이 띠간격을 가지기 때문에 광소자로서의 가능성이 매우 크다[1-5]. 또한 응력 변형을 겪는 Ge_{1-x}Sn_x 혼합물에서의 높은 이동도로 인해 고속소자로의 응용에도 크게 기대된다[6,7]. 뿐만 아니라 Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y 이종접합을 이용한 양자우물(quantum well) 또는 초살창(superlattice)은 광소자와 전자소자로의 응용이 가능하다.

이와 같이, Ge_{1-x}Sn_x 혼합물은 그 물리적 특성상 광소자 및 고속소자에 사용될 수 있는 좋은 재료이다. Ge_{1-x}Sn_x 혼합물을 광소자 및 고속소자의 재료로 사용하기 위해서는 조성비에 따른 band lineup

의 이해가 필수적이다. 하지만 Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y 이종접합에서의 valence band offset (VBO) 또는 conduction band offset(CBO)의 이론적 또는 실험적인 결과는 현재까지 발표된 바 없다.

Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y(001) 이종접합에서 band lineup을 이해하기 위해서는 각 층의 에너지 간격 (E_g)과 경계면에서의 VBO 또는 CBO를 알아야 한다. 이때, 응력변형을 겪는 합금에서는 합금 효과와 응력변형 효과를 고려하여야 정확한 결과를 얻을 수 있다.

따라서 본 연구에서는 벌크 또는 응력변형을 겪는 Ge_{1-x}Sn_x 혼합물의 E_g 은 변형 포텐셜(deformation potential) 이론으로부터 얻었다[3,8,9]. 기판과 에피층 사이의 경계면에서의 VBO를 구하기 위하여 실험적 결과와 잘 일치하는 average bond energy(ABE) 모델[10,11]을 근거로 하여 합금 효과와 응력변형 효과를 고려하였다. 결과는 Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y(001) 이종접합이 가질 수 있는 여러 가지 band lineup의 유형을 보였으며, 각 유형에서의 응용범위를 보임으로서 Ge_{1-x}Sn_x 혼

인하대학교 전자전기컴퓨터공학부
(인천광역시 남구 용현동 253)
Fax : 032-875-5882
E-mail : ilsoo@orgio.net
2002년 1월 21일 접수, 2002년 3월 11일 1차 심사완료
2002년 5월 6일 2차 심사완료, 2002년 5월 21일 최종 심사완료

합물을 이용한 광소자와 전자소자 개발에 박차를 가하는 계기를 마련하고자한다.

2. 본 론

Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y(001) 이종접합에서 band lineup을 이해하기 위해서는 Ge_{1-x}Sn_x 혼합물의 E_g을 아는 것이 선결조건이다. 응력변형을 고려하지 않는 경우, Ge_{1-x}Sn_x 혼합물의 E_g은 Ge과 α-Sn의 띠구조에 Vegard's law를 적용하고 비선형성을 고려했다[3]. 응력변형은 물정지(hydrostatic) 응력변형과 단축(uniaxial) 응력변형으로 분류되며, 이 두 가지 응력변형에 의한 E_g의 변화는 변형 포텐셜 이론을 이용했다[8,9]. E_g은 가장 작은 전도띠에서 가장 큰 원자가띠의 에너지를 뺀 값이므로 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$E_g = \min[(E_{C \text{ no strain}} + \Delta E_{C \text{ strain}})^{\Gamma, L, X}] - \max[\Delta E_{V \text{ strain}}^{HH, LH}] \quad (1)$$

E_{C no strain}은 응력변형을 겪지 않는 물질의 Γ-, L-, X-valley에 비선형성을 고려한 에너지 값을 나타내고, ΔE_{C strain}은 물정지 응력변형과 단축응력변형에 의한 각 전도띠의 에너지 변화를 나타낸다. ΔE_{V strain}^{HH, LH}은 응력변형을 겪지 않는 경우의 축퇴된 원자가띠의 극점을 0 eV로 설정했을 때, 응력변형에 의한 원자가띠의 변화를 나타낸다. 계산에 필요한 Ge과 α-Sn이 가지는 브릴루앙 영역의 대칭점에서 Γ-, L-, X-valley의 에너지 값과 변형 포텐셜은 참고문헌 [3]의 값을 인용했다.

지금까지 VBO를 이론적으로 계산하기 위한 여러 가지 방법이 알려져 있다[10-14]. 그 중에서 ABE 모델은 계산이 간단하면서도 실험적 결과와 잘 일치한다[10,11]. ABE 모델은 궤도함수 에너지(orbital energy)의 차이를 이용하여 VBO를 얻는 방식이며 그 표현식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \Delta E_v(A/B) &= [E_m(A) - E_v(A)]_s - [E_m(B) - E_v(B)]_s \\ &= E_{m,v}^s(A) - E_{m,v}^s(B) \end{aligned} \quad (2)$$

A 물질은 버퍼 또는 기판이며 B 물질은 A 물질 위에 성장시킨 에피층이다. 즉, ΔE_v(A/B)는 A 물질을 기준으로 한 B 물질의 VBO를 나타낸다. E_m은 결합성 궤도함수 에너지(bonding orbital energy)와 반결합 궤도함수 에너지(anti-bonding orbital energy)의 중간 값(ABE)이며, E_v는 원자가띠의 최대 에너지값(valence band maximum)이다. 첨자 s는 응력변형이 첨가된 것을 의미한다.

이종접합에서 식 (1)을 이용한 각 층의 E_g과 식 (2)을 이용한 VBO를 이용한다면 어떤 이종접합의 band lineup도 해석할 수 있다. Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y 이종접합의 경우, 응력변형을 겪지 않는 Ge_{1-y}Sn_y 혼합물의 E_{m,v}로부터 응력변형을 겪는 Ge_{1-x}Sn_x 혼합물의 그것을 빼주면 VBO가 계산되고, 각 층의 E_g으로부터 CBO도 계산되어 이 구조에서의 band lineup을 얻을 수 있다.

Ge과 α-Sn의 E_{m,v}값은 각각 -0.56과 -0.77 eV이다[11]. 벌크 Ge_{1-x}Sn_x 혼합물에서의 E_{m,v}는 Ge과 α-Sn의 각 E_{m,v}의 선형 내삽법을 통하여 얻을 수 있으며 아래와 같이 표현된다.

$$E_{m,v}(Ge_{1-x}Sn_x) = -0.21x - 0.56 \text{ eV} \quad (3)$$

식 (3)는 응력변형이 고려되지 않은 값이다.

응력변형은 서로 상이한 격자상수에 기인한다. Ge의 격자상수는 5.658 Å이고 α-Sn의 그것은 6.4892 Å이므로 Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y(x≠y) 이종접합에는 x, y 조성비에 따라 압축 또는 팽창 응력변형이 발생한다. 이때, E_{m,v}는 응력변형의 종류에 따라 감소하는 경향을 가진다. 압축 응력변형을 겪는 Ge에서 E_{m,v}가 감소하는 정도는 약 -1.22 [eV/Å]이며, 팽창 응력변형을 겪을 때는 약 -1.6[eV/Å]의 기울기로 감소한다[10]. 반면, 응력변형을 겪는 α-Sn의 E_{m,v}에 대한 연구는 아직 이루어지지 않았다. 한편, 응력변형을 겪는 Si, InP, 그리고 InAs의 E_{m,v} 변화는 Ge의 그것과 비슷한 경향을 가진다[10]. 따라서, 본 논문에서는 α-Sn의 E_{m,v}도 Ge의 그것과 동일하다고 가정하였다.

Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y 이종접합에서 x>y일 때, Ge_{1-x}Sn_x 혼합물은 압축 응력변형을 겪는다. 격자

상수 차이는 약 $0.83(x-y)$ 이며 $E_{m,v}$ 의 감소정도는 약 -1.22 [eV/Å]이므로 압축 응력변형에 의한 $Ge_{1-x}Sn_x$ 혼합물의 $E_{m,v}$ 변화는 $1.22 \cdot 0.83(x-y)$ 이다. 한편, $y > x$ 일 때, $Ge_{1-x}Sn_x$ 혼합물은 팽창 응력변형을 겪는다. 팽창 응력변형에 의한 $E_{m,v}$ 의 감소정도는 -1.6 [eV/Å]이므로 팽창 응력변형에 의한 $Ge_{1-x}Sn_x$ 혼합물의 $E_{m,v}$ 변화는 $1.6 \cdot 0.83(y-x)$ 이다. 따라서 식 (3)에서 구한 응력변형이 없는 경우의 $E_{m,v}$ 와 응력변형의 종류에 따른 $E_{m,v}$ 의 변화를 첨가하여 계산된 $Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y$ 이종접합에서의 VBO는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \Delta E_v (Ge_{1-y}Sn_y / Ge_{1-x}Sn_x)_{(x > y)} \\ = 0.21(x-y) + 1.22 \cdot 0.83(x-y) \quad (4-a) \\ \approx 1.22(x-y) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta E_v (Ge_{1-y}Sn_y / Ge_{1-x}Sn_x)_{(x < y)} \\ = -0.21(y-x) + 1.6 \cdot 0.83(y-x) \quad (4-b) \\ \approx 1.12(y-x) \end{aligned}$$

3. 결과 및 고찰

II-VI, III-V, 또는 IV 족의 원소들을 이용한 혼합물 또는 화합물에서의 band lineup에는 straddling, staggered, 그리고 broken-gap lineup의 세 가지 유형이 있다. 압축 또는 팽창 응력변형이 포함된 $Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y(001)$ 이종접합에서의 band lineup은 이 세 가지 유형이 모두 나타났다.

3.1 $Ge_{1-x}Sn_x/Ge(001)$

그림 1은 Ge(001) 위에 성장시킨 $Ge_{1-x}Sn_x$ 혼합물에서 α -Sn의 함량을 변화시켰을 때 이종접합에서의 각 층의 E_g 과 에피층의 VBO와 CBO를 보여준다. $Ge_{1-x}Sn_x$ 혼합물의 격자상수가 Ge의 그것보다 크기 때문에 $Ge_{1-x}Sn_x$ 에피층은 압축 응력변형을 겪는다. 식 (4-a)에서 보였듯이, $y=0$ 일 때, $Ge_{1-x}Sn_x$ 혼합물에서 α -Sn의 구성비가 늘어남에 따라 VBO는 점점 증가됐지만, 압축 응력변형을 겪는 $Ge_{1-x}Sn_x$ 에피층의 E_g 은 크게 감소되므로 오히려 증가되는 CBO가 보여졌다. α -Sn의 구성비

가 6% 이하일 때는 CBO와 VBO의 부호가 같은 경우로 staggered lineup이 나타났고, $0.06 < x \leq 0.26$ 에서는 CBO와 VBO의 부호가 반대인 경우로 straddling lineup을 나타냈다. 한편, $Ge_{1-x}Sn_x$ 혼합물은 α -Sn 구성비가 26%를 초과할 때 E_g 이 0보다 작아 도체특성이 보여졌다. 한편, staggered lineup을 가질 때의 이 구조는 VBO와 CBO가 모두 작은 값이어서 캐리어 가둠 특성이 좋지 않으므로 소자 응용에 부적당하다.

$0.06 < x \leq 0.26$ 일 때, α -Sn 구성비가 늘어남에 따라 CBO는 음으로, VBO 양으로 증가되어 캐리어 가둠 특성이 점점 향상되는 straddling lineup을 가지기 때문에 광소자에 응용 가능할 것으로 사료된다. Straddling lineup은 이종접합에서 가장 흔한 구조이다. 이런 구조를 가지는 양자우물과 초살창은 가장 낮은 전도띠와 가장 높은 원자가띠가 같은 층에 위치하여 레이저와 같은 광전자 소자에 널리 응용되고 있다. 그 예로는 GaAs/AlGaAs, GaInAs/InP, GaInP/GaAs, 그리고 GaSb/AlGaSb 등이 있다. 한편, Ge과 α -Sn의 격자상수는 15%의 큰 격자불일치(lattice mismatch)에 의해 어긋나기(dislocation)가 생기기 쉽다. 따라서 $Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y$ 이종접합에서의 임계두께(critical thickness)에 대한 연구도 병행되어야 한다.

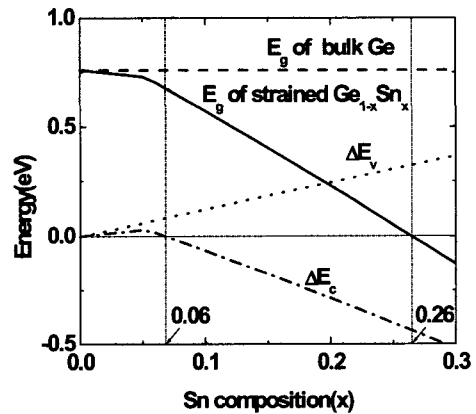


그림 1. $Ge_{1-x}Sn_x/Ge(001)$ 에서 α -Sn 함량에 따른 각 층의 E_g 과 VBO, CBO의 변화.

Fig. 1. The change of E_g in each layer and of VBO, CBO in $Ge_{1-x}Sn_x/Ge(001)$ as the variation of α -Sn composition.

3.2 Ge/Ge_{1-y}Sn_y(001)

그림 2는 Ge_{1-y}Sn_y(001) 혼합물 위에 성장시킨 Ge에서 α-Sn의 함량을 변화시켰을 때 각 층의 E_g과 에피층의 VBO와 CBO를 보여준다. Ge_{1-y}Sn_y(y>0) 혼합물의 격자상수가 Ge의 그것보다 크기 때문에 Ge 층은 팽창 응력변형을 겪는다. 식 (4-b)에서 보였듯이, x=0일 때, Ge_{1-y}Sn_y 혼합물에서 α-Sn의 구성비가 늘어남에 따라 VBO는 점점 증가되고 Ge의 최대 전도띠(conduction band maximum) 값이 Ge_{1-y}Sn_y 혼합물의 최대 전도띠보다 점점 크게되어 양으로 증가되는 CBO가 나타났다. 즉 이 구조는 VBO와 CBO가 같은 부호를 가지는 staggered lineup이 나타났다. 이를 세분화하면 Ge_{1-y}Sn_y 혼합물의 최대 전도띠가 Ge의 최대 원자가띠보다 큰 경우를 staggered lineup(0<x≤0.19)이라 하고 그렇지 않은 경우에 대해서는 broken-gap lineup(0.19<x≤0.26)이라 한다. 즉, 그림에서 보여지듯이 에피층의 VBO가 벌크의 E_g보다 큰 지역에서 broken-gap lineup 유형을 나타냈다. 이 구조에서도 Ge_{1-y}Sn_y의 α-Sn 구성비가 26%를 초과할 때 E_g이 0보다 작아 도체특성이 보여졌다.

Staggered lineup은 기판과 에피층의 밴드 구조에서 가장 낮은 전도띠와 가장 높은 원자가띠 사이의 E_g은 각 물질의 E_g보다 작다. 그 예로는 AlAs/Al_xGa_{1-x}As 이중접합에서 x>0.3인 경우와

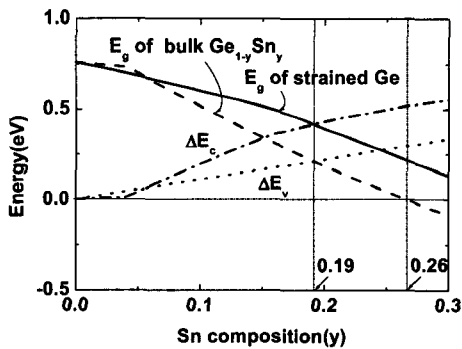


그림 2. Ge/Ge_{1-y}Sn_y(001)에서 α-Sn 함량에 따른 각 층의 E_g과 VBO, CBO의 변화.

Fig. 2. The change of E_g in each layer and of VBO, CBO in Ge/Ge_{1-y}Sn_y(001) as the variation of α-Sn composition.

AlInAs/InP 이중접합 등이 있다.

이 구조에서 전자와 정공은 각기 다른 층에 가두어져있기 때문에 공간적 간접전이 띠간격 (spatially indirect) 특성을 가진다. 하지만 각 층의 경계면에서 파동함수가 중첩되어 광자 에너지 (photon energy)를 가지는 복사 재결합(radiative recombination)이 가능하게 된다[15].

한편, staggered lineup은 CBO 또는 VBO가 크기 때문에 생긴다. 이러한 사실은 공간적 간접전이 띠간격 특성보다 더 중요한 의미를 가진다. 예를 들어, InAs/AlSb 이중접합에서는 1.35 eV의 큰 CBO 특성과 InAs 화합물의 낮은 유효질량을 이용하여 712 GHz의 공명 터널링 다이오드가 보고된 바 있다[16]. 또한 양자우물 구조를 이용한 전계효과 트랜지스터[17], 그리고 열전자(hot-electron) 트랜지스터[18]와 같은 소자에 응용될 수 있다.

Broken-gap lineup은 staggered lineup의 심한 경우이다. 즉, CBO 또는 VBO가 크게 증가되면서 생기는 lineup 유형이다. 그 예로는 InAs/GaSb 이중접합으로서 150 meV 정도의 broken-gap이 존재한다[19]. InAs/GaSb 초살창에서의 양자효과는 전도띠를 높이고 원자가띠를 낮추어서 띠의 “uncrossing”을 일으킨다. Uncrossing은 broken-gap lineup을 staggered lineup으로 바꾸는 것으로서 장파장의 적외선 검출기(detector)에 응용할 수 있다. 한편, 이 구조에서 공명 띠사이 터널링(resonant interband tunneling)을 이용하여 NDR(negative differential resistance)을 가지는 반도체 터널 구조에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다[20]. 이는 마이크로파와 빠른 디지털 소자에 응용될 수 있기 때문이다.

지금까지 Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y(001) 이중접합에서의 band lineup을 변형 포텐셜 이론을 이용한 E_g과 ABE 모델을 이용한 VBO 값으로부터 얻었다. Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y(001) 이중접합은 x, y 구성비에 따라 이중접합이 가질 수 있는 모든 band lineup을 가짐을 보았다. 또한 Ge_{1-x}Sn_x 혼합물은 가변적인 직접전이 띠간격을 가질 뿐만 아니라 높은 이동도를 가진다. 따라서 이들 특성을 이용하면 Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y(001) 이중접합은 고성능의 광소자 및 전자소자에 유용할 것이다.

4. 결론

본 논문에서는 Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y(001) 이중접합

에서의 band lineup을 계산하였다. 벌크 $Ge_{1-x}Sn_x$ 혼합물의 에너지 간격은 비선형성을 포함한 Vegard's law를 이용하였고 응력변형을 겪는 경우에는 변형 포텐셜 이론을 이용하였다. VBO는 ABE 모델을 근거로 하여 합금 효과와 응력변형 효과를 고려하였다. $0.06 < x \leq 0.26$ 일 때 $Ge_{1-x}Sn_x/Ge(001)$ 이중접합은 straddling lineup 유형이 보여졌다. 이 구조는 양자우물 또는 초살창로 제작하여 레이저와 같은 광전자 소자에 응용 가능하다. 한편, $0 < y \leq 0.19$ 일 때 $Ge/Ge_{1-y}Sn_y(001)$ 이중접합은 staggered lineup 유형이 보여졌다. 이 구조는 공명 터널링 다이오드와 양자우물 구조를 이용한 전계효과 트랜지스터, 그리고 열전자 트랜지스터와 같은 소자에 응용될 수 있다. 그리고 같은 구조에서 $0.19 < y \leq 0.26$ 일 때 broken-gap lineup 유형이 보여졌다. 이 구조는 장파장의 적외선 검출기와 공명 터널링 다이오드를 이용하여 NDR을 가지는 반도체 터널 구조에 응용 가능하다. 무엇보다도 $Ge_{1-x}Sn_x$ 혼합물은 가변적인 직접천이 띠간격을 가질 뿐만 아니라 높은 이동도를 가진다. 따라서 이들 특성을 이용하면 $Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y(001)$ 이중접합은 고성능의 광소자 및 전자소자에 유용할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 2001학년도 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었습니다.(INHA-22015)

참고문헌

- [1] G. He and H. A. Atwater, "Interband transitions in Sn_xGe_{1-x} alloys", Phys. Rev. Lett., Vol. 79, No. 10, p. 1937, 1997.
- [2] O. Gurdal, P. Desjardins, J. R. A. Carlsson, N. Taylor, H. H. Radamson, J. -E. Sundgren, and J. E. Greene, "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, p. 162, 1998.
- [3] 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", 전기전자재료학회논문지, 12권, 10호, p. 835, 1999.
- [4] 박일수, 전상국, "팽창 응력변형을 겪는 Ge에서 가전자대의 에너지구조 해석", 전기전자재료학회논문지, 12권, 12호, p. 1102, 1999.
- [5] J. Taraci, J. Tolle, J. Kouvetakis, M. R. McCartney, D. J. Smith, J. Menendez, and M. A. Santana, "Simple chemical routes to diamond-cubic germanium-tin alloys", Appl. Phys. Lett., Vol. 78, No. 23, p. 3607, 2001.
- [6] 박일수, 전상국, "완화된 또는 응력변형을 겪는 Ge과 Ge_{0.8}Sn_{0.2}에서 전자와 정공의 상대밀도 유효질량과 전도도 유효질량", 전기전자재료학회논문지, 13권, 8호, p. 643, 2000.
- [7] 박일수, 전상국, "직접천이 띠간격을 갖는 Ge_{1-x}Sn_x/Ge_{1-y}Sn_y(001)의 전기적 특성 연구", 전기전자재료학회논문지, 13권, 12호, p. 989, 2000.
- [8] W. H. Kleiner and L. M. Roth, "Deformation potential in germanium from optical absorption lines for exciton formation", Phys. Rev. Lett., Vol. 2, No. 8, p. 334, 1959.
- [9] H. Hasegawa, "Theory of cyclotron resonance in strained silicon crystals", Phys. Rev., Vol. 129, No. 3, p. 1029, 1963.
- [10] S. Ke, R. Wang, and M. Huang, "Valence-band lineups at highly strained Si-InP, Ge-InP, Ge-InAs, and Si-Ge interfaces", Solid State Communications, Vol. 93, No. 12, p. 1009, 1994.
- [11] S. Ke, R. Wang, and M. Huang, "Average-bond-energy model for valence-band offsets: its physical basis, and applications to twenty eight heterojunctions", Z. Phys. B, Vol. 102, p. 61, 1997.
- [12] C. G. Van de Walle and R. M. Martin, "Theoretical study of band offsets at semiconductor interfaces", Phys. Rev. B Vol. 35, No. 15, p. 8154, 1987.
- [13] M. Cardona and N. E. Christensen, "Acoustic deformation potentials and heterostructure band offsets in semiconductors" Phys. Rev. B Vol. 35, No. 12, p. 6182, 1987.
- [14] W. A. Harrison and J. Tersoff, "Tight-binding theory of heterojunction band lineups and interface dipoles", J. Vac. Sci. Technol. B Vol. 4, No. 4, p. 1068, 1986.

- [15] E. J. Caine, S. Subbanna, H. Kroemer, J. L. Merz, and A. Y. Cho, "Staggered-lineup heterojunctions as sources of tunable below-gap radiation: Experimental verification", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 45, No. 10, p. 1123, 1984.
- [16] E. R. Brown, J. R. Söderström, C. D. Parker, L. J. Mahoney, K. M. Molvar, and T. C. McGill, "Oscillations up to 712 GHz in InAs/AlSb resonant-tunneling diodes", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 58, No. 20, p. 2291, 1991.
- [17] C. Chang, L. L. Chang, E. E. Mendez, M. S. Christie, and L. Esaki, "Electron densities in InAs-AlSb quantum wells", *J. Vac. Sci. Technol B* Vol. 2, No. 2, p. 214, 1974.
- [18] A. F. J. Levi and T. H. Chiu, "Room-temperature operation of hot-electron transistors", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 51, No. 13, p. 984, 1987.
- [19] H. Sakaki, L. L. Chang, R. Ludeke, C. Chang, G. A. Sai-Halasz, and L. Esaki, "In_{1-x}Ga_xAs-GaSb_{1-y}As_y heterojunctions by molecular beam epitaxy", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 31, No. 3, p. 211, 1977.
- [20] J. R. Söderström, D. H. Chow, and T. C. McGill, "New negative differential resistance device based on resonant interband tunneling", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 55, No. 11, p. 1094, 1989.