

Si(110)/SiGe 다중 양자 우물에서 수직 입사광에 의한 적외선 흡수

이찬호

숭실대학교 정보통신전자공학부

(1999년 2월 19일 받음, 1999년 7월 28일 수정본 받음)

Sb가 δ 도핑된 Si(110)/SiGe 다중 양자 우물 구조에서 에너지 준위간 전자 천이에 의한 적외선 흡수 현상을 관찰하였다. Si(110)/SiGe 다중 양자 우물 구조에서는 Si(001)이나 GaAs에서는 불가능한, 수직 입사광에 의한 전자 천이가 가능하다. SiGe 층의 Ge 구성비가 증가하면 적외선 흡수 강도는 감소하고 천이 에너지는 증가하는 현상을 보여 Ge 구성비가 흡수 스펙트럼에 큰 영향을 미침을 확인하고 그 원인을 분석하였다. 또한 수직 입사광과 수평 입사광은 서로 다른 과정을 통해 흡수 되는데 편광각과 입사각을 변화시킨 실험값과 계산값의 비교를 통해 이를 확인할 수 있었다.

I. 서 론

양자 우물 구조에서 에너지 준위간 흡수(intersubband absorption)는 적외선 탐지기에의 응용 가능성 때문에 큰 관심을 모아왔다. 위성간 통신이나 군사용 특수 목적의 통신에는 5~20 μm 의 파장을 원적외선이 이용되는데 현재는 HgCdTe가 광탐지기로 주로 이용된다. 그러나 HgCdTe는 그 특성이 균일하지 않고 안정성에 문제가 있으며 전기적 회로와 함께 on-chip화 할 수 없다는 단점을 갖고 있다.

에너지 준위간 흡수는 GaAs/AlGaAs 다중 양자 우물 구조에서 처음으로 관측되었다.^[1] 최근 Si 분자선 성장 기법 즉 MBE(Molecular Beam Epitaxy) 기술의 발달로 Si(100)/SiGe 다중 양자 우물에서 전자와 정공의 에너지 준위간 흡수를 관찰할 수 있었다.^[2,3] Si에서는 GaAs/AlGaAs 이중 접합 구조에 비해서 100배 정도 높은 도핑 농도가 가능하므로 광학적 흡수력이 그에 상응하는 만큼 크다.^[1]

그러나 Si(100)이나 GaAs 다중 양자 우물은 양자역학적 선택 규칙에 의해서 양자우물에 수직으로 입사하는 빛은 흡수할 수 없는 단점이 있다. 즉 입사광의 광학적 전기장 성분중 양자우물에 수직인 방향의 성분(수평 입사광)만 양자우물에서 전자의 에너지 준위간 천이를 일으킬 수 있다. 따라서 입사광은 표면에 대해 일정한 각도를 갖고 입사하거나 외부에 그레이팅(grating)이 있어야 수평 입사광이 존재하여 에너지 준위간 흡수를 유도해 적외선 탐지에 이용할 수 있다.

그 동안 수직 입사광 탐지기를 제작하기 위한 많은 노력이 있었다. 그중 하나는 자유 전자의 광흡수를 이용한 이중접합 내부 광방출 (Heterojunction Internal Photo emission: HIP) 현상이다. HIP에 의한 수직 입사광 적외선 탐지기는 SiGe/Si 이중 접합 구조와^[4] SiGe/Si 다중 양자 우물 구조로 구현된 바 있다.^[5] 1950년대 초에는 Ge에서 가전자대(valence band) 간의 천이에 의한 수직 입사 흡수가 관찰되었다.^[6]

한편, MOS 구조의 역전층(inversion layer)에서의 적외선 스펙트럼 연구에서 기울어진 에너지 등곡면(ellipsoid) 때문에

Si(110) 양자 우물에서 수직 입사광이 에너지 준위간 천이를 일으킬 수 있다는 사실이 이미 알려져 있었다.^[7] 즉 Si의 6개의 에너지 등곡면 가운데 4개(X4)가 주축으로부터 45° 기울어져 있어 역 유효 질량 텐서의 대각선상에 있지 않은 성분이 유한한 값을 갖게되어 수직 입사광에 대해 반응하게 된다. 또한 Si(110) MOS 구조의 역전층에서 수직 입사광에 의한 에너지 준위간 흡수가 관찰되었다.^[8] 그러나 MOS 구조의 역전층을 이용한 적외선 탐지는 양자 우물층이 하나만 존재해서 흡수 계수가 너무 작고 전도대 전자의 유효 질량이 커서 탐지 영역(흡수 파장)이 제한된다.

반면에 Si(110) 다중 양자 우물을 이용한 적외선 흡수에서는 양자 우물의 수와 도핑 농도에 따라 흡수 계수를 크게 할 수 있고 도핑 농도와 Ge 구성비에 따라 탐지 영역을 자유로이 조절할 수 있다. 수직 입사광에 의한 적외선 흡수 현상은 실험적으로 보고된 바 있다.^[9] 그러나 흡수 스펙트럼만을 관찰했을 뿐 Ge 구성비에 따른 특성 변화나 편광각에 따른 흡수강도의 변화가 계산과 차이가 나는 것에 대해서는 설명하지 못하였다.

본 연구에서는 Si(110) 기판위에 Si_{1-x}Ge_x/Si 이중 접합 구조와 δ 도핑을 통해 다중 양자 우물을 전도대에 형성시켜 수직 입사광에 대해서 Ge 구성비에 따른 흡수 계수와 천이 에너지의 변화를 처음으로 관찰하고 이론적인 계산값과 비교하였다. 또한 도파관 구조 실험과 이론과의 비교를 통해 입사각과 편광각이 흡수 강도에 큰 영향을 미친다는 것을 보이고 수직 입사광과 수평 입사광이 서로 다른 과정을 통해 흡수됨을 확인하였다.

II. 실험

본 연구에 이용된 시료는 Si MBE를 이용하여 제작되었고 n-type δ 도핑은 기판 온도 변조 기법을 이용하여 비교적 저온에서 Sb를 열승화시켜 얻었다.^[10] 시료의 구조는 그림 1에 나타난 바와 같다. 여기서 이완된 Si_{1-x}Ge_x 버퍼층 위에 스트레

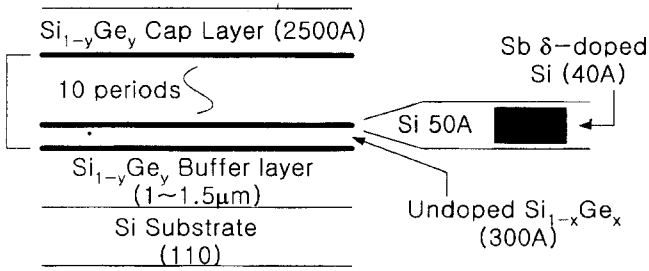


그림 1. δ 도핑된 Si(110)/SiGe 다중 양자 우물 구조.

인이 가해지는 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 양자 우물 구조를 형성시켜 전도대에 커다란 밴드 에너지 차이를 유도할 수 있다. 버퍼층의 Ge의 구성비 y 는 버퍼층에 의해 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 층에 가해지는 수축 스트레인에 의해 저장되는 탄성 에너지가 Si층에 가해지는 팽창 스트레인에 의해 상쇄되도록 정해진다. d_b 와 d_w 를 각각 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 층과 Si 층의 두께라고 할 때 y 는 다음의 관계식에 의해 정해진다.

$$y = \frac{d_b x}{d_b + d_w} \quad (1)$$

이때 SiGe/Si 양자 우물의 두께는 한계 두께에 의해 제한받지 않는다. 또한 이 구조는 전도대에 큰 밴드 에너지 차이를 유도하고 X4 밴드를 X2 밴드보다 낮게 만들어 수직 입사광에 의한 흡수를 잘 일어나도록 해준다.^[9] 또한 Si 층의 중앙 40Å은 Sb로 $1.3 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 까지 도핑되었다.

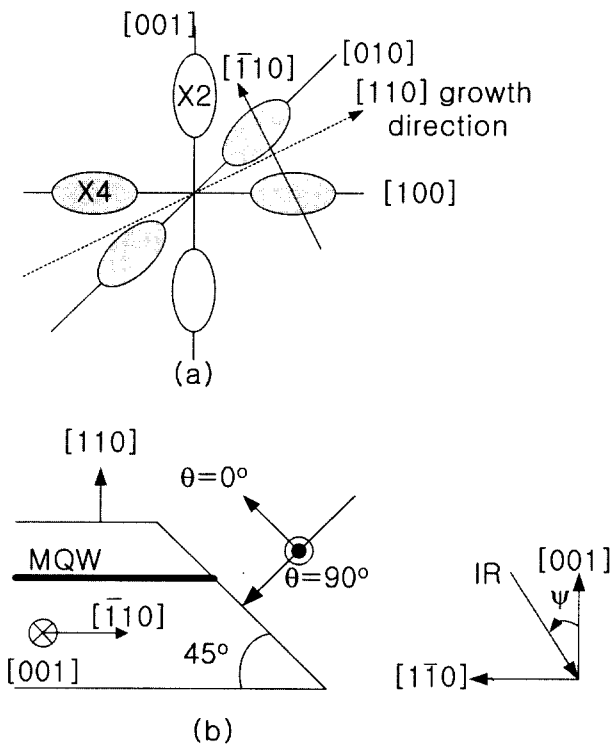


그림 2. (a) Si 결정의 에너지 곡면(ellipsoids)과 주축(principal axes)을 기준으로 한 적외선 입사 방향 (b) 적외선 흡수 스펙트럼 측정을 위한 도파관 구조.

Ge 구성비에 따른 영향을 살펴보기 위해 양자 우물 층의 도핑 농도는 같고 에너지 장벽층의 Ge 구성비가 15%(A), 30%(B), 그리고 50%(C)인 세 가지 시료에 대해 실험을 진행하였다. 도핑 농도에 따른 영향은 이미 보고된 바 있다.^[11]

한편 각 시료의 적외선 흡수 스펙트럼은 상온에서 FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrometer)에 의해 측정되었고 흡수 강도를 키우고 광학적 간섭을 없애기 위해 도파관 구조를 이용하였다. 이때 빛이 입사하는 축이 [001] 방향에 평행할 때 수직 입사광에 의한 흡수가 나타나고 [110] 방향에 평행하면 나타나지 않으므로 그림 2에 나타난 것처럼 두 방향에 대해 도파관 구조를 준비했다. 자세한 시료 제작 및 측정 방법은 참고 문헌에 나타나 있다.^[12]

III. 결과 및 검토

Si(110) 양자 우물의 경우, 입사면이 [110]에 평행한 도파관 구조에서 편광각, $\theta = 90^\circ$ 에서 에너지 준위간 흡수에 의한 스펙트럼을 관찰할 수 있는데 이는 수직 입사하는 빛을 흡수하는 것과 같다. 그림 3에 $\text{Si}/\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ 다중 양자 우물을 갖는 시료의 흡수 스펙트럼이 나타나 있다. Si(001)이나 GaAs 양자 우물과는 달리 $\theta = 90^\circ$ 일 때도 분명한 흡수 스펙트럼을 볼 수 있다. 즉 수직 입사광에 대해서도 빛을 흡수한다. 또한 편광각이 증가할수록 흡수 강도(absorption strength)와 천이 에너지(transition energy)가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 임의의 입사광은 수직 성분과 수평 성분으로 분리되고, 그들은 흡수 과정이 서로 다르기 때문이다.

그림 4에 Ge 구성비에 따른 흡수 강도와 천이 에너지가 나타나 있다. 특히 기존 논문^[9]에서는 보여주지 못한 수직 입사광($\theta = 90^\circ$)에 대한 실험 결과가 포함되어 있다. 흡수 강도는 흡수 스펙트럼을 입사광에 대한 흡수광의 세기 밀도(intensity)의 비로 나타내어 적분한 값으로 단위는 meV 이고 입사광을 얼마나 잘 흡수하는지를 나타낸다. 이중 접합에 의한 양자 우물이 형성되지 않는 순수한 Si 양자 우물의 경우 (SiGe 층의

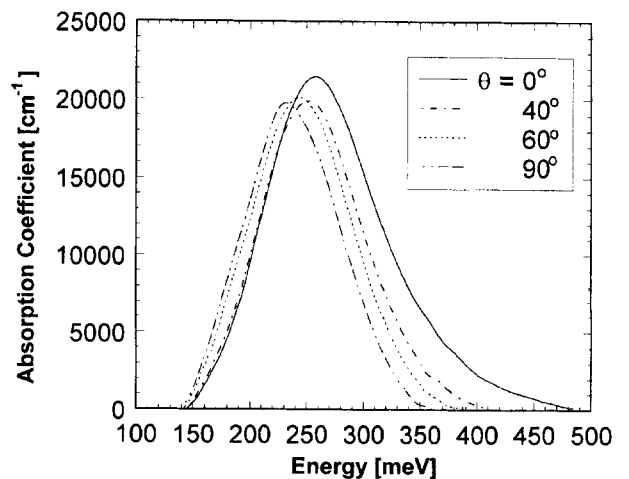


그림 3. Si(110)/Si_{0.5}Ge_{0.5} 다중 양자 우물을 갖는 시료 C의 흡수 스펙트럼.

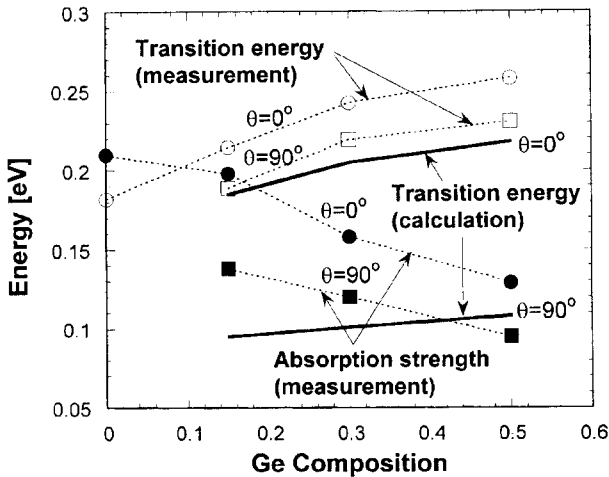


그림 4. Ge 구성비에 따른 흡수 강도와 천이 에너지.

Ge 구성비가 0), 스트레인이 가해지지 않아 X2와 X4 밴드가 나누어지지 않으므로 X2 밴드에도 전자가 존재하여 X4 밴드에 존재하는 전자의 수가 감소한다. X2 밴드의 전자는 수직 입사광에 대해 반응하지 않으므로 $\theta=90^\circ$ 일 때의 흡수 계수는 크게 감소한다. 이때 자유 전자 흡수의 영향은 감소하지 않으므로 측정이 어려워 그림 4에서 Ge 구성비가 0일 때 수직 입사광에 대한 흡수 강도가 나타나 있지 않다.

한편 Si 양자 우물에 대한 스트레인이 증가할수록(즉, Ge 구성비가 증가할수록) 흡수 강도는 감소하고 천이 에너지는 증가하는 경향을 보이고 있다. 각 시료에 대해 도핑 농도를 같게 하였으므로 이는 Ge 구성비가 미치는 영향이다. Ge 구성비의 변화가 흡수 스펙트럼에 미치는 영향은 두 가지이다. 첫째, Ge 구성비가 커질수록 스트레인이 증가하므로 이중 접합에 의한 양자 우물의 깊이가 깊어진다. 따라서 양자 우물내의 에너지 부준위간 차이가 커지므로 천이 에너지를 증가시킨다. 그림 4의 Ge 구성비에 따른 천이 에너지의 증가는 이러한 양자 우물 전위의 변화에 의한 것이다. 둘째, 동일한 양의 Sb 플럭스(flux)가 공급될 때 실제 도핑되는 양은 Si의 경우가 SiGe보다 더 많다. 즉 박막 성장 과정에서 동일한 도핑 농도를 목표로 도핑을 해도 실제 도핑 농도는 Si에서의 값이 SiGe에서의 값보다 크고 Ge 구성비가 커질수록 그 차이는 더욱 커진다. 따라서 Ge 구성비가 클수록 SiGe 분리층에서의 도핑 농도는 작아진다. 한편 Si층에서의 도핑 농도는 SiGe 분리층에서의 도핑 농도에서 시작하여 일정한 기울기를 갖고 증가하므로, 시작하는 도핑 농도가 작으면 최대값도 작아진다. 그러므로 SiGe 분리층의 Ge 구성비가 클수록 Si층에서의 도핑 농도는 작아지고 이에 비례하는 흡수 강도도 작아진다. 그림 4의 흡수 강도의 감소는 이러한 도핑 농도, 즉 전자 농도의 감소에 의한 것이다.

Ge 구성비에 따른 천이 에너지의 차이는 Ge 구성비를 변경하여 흡수 에너지 즉 흡수 파장을 조절할 수 있음을 의미한다. 특히 수직 입사광을 흡수하기 위해서는 $\theta=90^\circ$ 인 경우에 Ge 구성비에 따른 흡수 특성을 알 필요가 있다. 이러한 특성을 이용하면 Ge 구성비를 조금씩 변화시켜 가며 여러 시료를

준비하여 배열하면 넓은 대역의 파장을 흡수하는 광탐지기를 제작할 수 있다. 흡수 계수의 변화는 양자 우물의 수로 조절 가능하다.

한편 그림 4에는 천이 에너지에 대한 계산 결과도 나타나 있다. 기존의 계산 방법은 Hartree-Fock 포텐셜과 다체 효과만을 고려하였고 기저 상태에서 첫 번째 여기 상태로의 천이만 고려되었으나,^[2] 본 논문에서는 두 번째와 세 번째 여기 상태로의 천이와 스펙트럼의 선폭 즉, 선폭에 의한 영향을^[13] 고려하여 실험값에 조금 더 근접한 결과를 얻었다. 실험값은 자유 전자 흡수에 의한 영향을 완전히 배제하지 못하였고 도핑 프로파일 역시 정확하지 않으므로, 실제 천이 에너지와 약간의 차이를 가질 것이다. 이러한 오차를 고려한다면 $\theta=0^\circ$ 일 때의 계산값은 실험값에 매우 가깝다고 할 수 있다. $\theta=90^\circ$ 일 때는 여전히 큰 차이를 보이고 있는 데 이는 계속 연구해야 할 과제이다.

Si(110) 양자 우물을 그림 2와 같은 도파관 구조로 만들어 편광기를 통과시킨 적외선을 입사시키면 편광된 적외선은 수직 성분과 수평 성분을 갖게 된다. 이들은 서로 다른 흡수 과정을 가지므로 어느 성분이 더 큰가에 따라 흡수 스펙트럼의

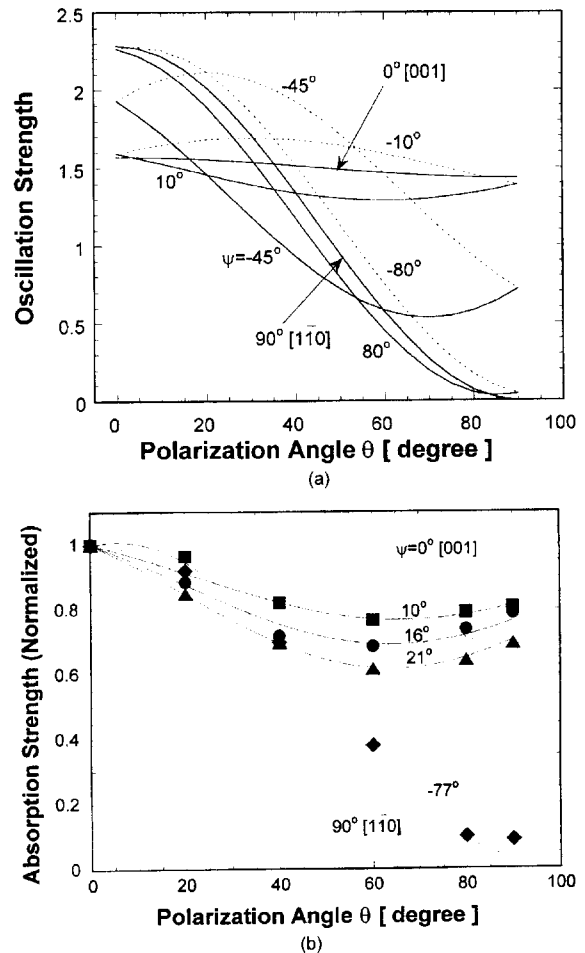


그림 5. 입사각과 편광각에 따른 흡수 강도의 변화 (a) 다양한 ψ 에 대한 진동 강도 (b) 정규화된 흡수강도의 측정값과 진동강도의 계산값과의 비교

형태가 변하게 되고 따라서 흡수 강도도 달라진다. 입사광의 편광각을 바꾸어 주면 수직 성분과 수평 성분의 비가 달라지므로 흡수 강도의 변화를 관찰할 수 있다.¹²⁾ 이때 흡수 강도의 절대값은 계산 과정에서의 여러 가지 간략화로 인해 실제 구조를 정확히 반영하기 어려워 계산값과 실험값을 일치시키기 어렵지만 정규화된 상대값은 비교가 가능하다. 즉 흡수 스펙트럼이 양자 우물의 에너지 부준위간 천이에 의한 것이라면 두 값은 거의 일치해야 한다. 이론적인 계산에 의하면¹¹⁾ 그림 5에 나타난 $\psi=0^\circ$ [001]에 해당하는 점선을 따라 실험값이 위치해야 하나 측정 결과는 좀처럼 이론적인 계산값을 맞추기 어려웠고 거의 모든 시료가 조금씩 다른 결과를 보여 주었다. 적외선 흡수 과정이 Si(001) 양자 우물과 동일한 $\psi=90^\circ$ [110]인 경우도 이론값과는 다른 결과를 보여주었다. 기존 논문에서는⁹⁾ 그 현상을 설명하지 못했으나 본 논문에서 그 원인을 규명하였다.

Si(001)의 경우 성장 방향이 [001]이므로 역질량텐서의 off-diagonal 항들이 0이다. 따라서 어느 방향에서 빛이 입사하든지 상관없이 $\cos^2\theta$ 에 비례하는 관계를 갖는다. 그러나 Si(110)의 경우에는 성장 방향이 [110]이므로 역질량텐서에 off-diagonal 항들이 존재하고, 빛은 [001]축과 $[\bar{1}10]$ 축이 이루는 평면 위에서 원점을 향해 입사한다. 이때 이 각도에 따라 흡수 특성은 큰 차이를 보이게 된다. 여기서 극단적인 두 가지 경우는 그림 2(a)에서 빛이 [001]방향과 $[\bar{1}10]$ 방향에서 입사하는 경우이다. [001]방향에서 입사하는 경우는 전기장이 [110] 방향을 향하므로 수직 입사광에 의한 흡수가 발생하고, $[\bar{1}10]$ 방향에서 입사하는 경우는 전기장이 [001] 방향을 향하므로 수직 입사광은 흡수되지 않는다. 따라서 많은 경우에 두 경우만을 고려하였고 입사각이 그 사이에 있을 경우는 고려되지 않았다. 그러나 Si(110) 기판의 절단면은 기판의 기준면(primary flat)과 평행하거나 수직하지 않아 도파관 구조를 만들 때 [001]이나 $[\bar{1}10]$ 방향으로 입사면을 위치시키기가 어렵다. 따라서 시료들이 [001]과 $[\bar{1}10]$ 방향에 대해 조금씩 서로 다른 값을 가지면서 어긋나므로 이론과는 다른 결과를 보여주게 된다. 이러한 사실을 보이기 위해, 그림 2(b)에 나타난 것처럼 입사광을 [001]축과 $[\bar{1}10]$ 축이 이루는 평면에 투영시켰을 때 $[\bar{1}10]$ 축과 이루는 각을 ψ 라하고 ψ 와 편광각 θ 에 대한 진동강도(oscillation strength)를 계산하였다. ψ 가 0° 인 경우는 이미 보고된 바와 같이¹²⁾

$$f_{(110)}^i = m_o \left[\frac{w_{zz}}{2} \cos^2 \theta + \frac{2w_{zz}^2}{w_{zz}} \sin^2 \theta \right] \quad (2)$$

으로 표현되는 반면에, ψ 가 0° 가 아닌 경우는

$$f_{(110)}^i = m_o \left[\frac{w_{zz}}{2} \cos^2 \theta + \frac{2w_{zz}^2}{w_{zz}} \left(\frac{\cos \theta \sin \psi}{\sqrt{2}} - \sin \theta \cos \psi \right)^2 \right] \quad (3)$$

으로 표현된다. ψ 를 -90° 에서 90° 까지 변화시켰을 때 편광각에 대한 진동강도가 그림 5(a)에 나타나 있다. $\psi=0^\circ$ [001]로 표시된 실선이 [001] 방향에서 빛이 입사하여 수직과 수평 성분이 모두 흡수되는 경우이고 $\psi=90^\circ$ [$\bar{1}10$]로 표시된 실선은

빛이 $[\bar{1}10]$ 방향으로 입사하여 수평 입사 성분만 흡수되는 경우이다. 다른 실선은 ψ 가 0° 에서 90° 까지 변하는 경우이고 점선은 0° 에서 -90° 까지 변하는 경우이다. 여기서 특이한 사항은 ψ 가 양수일 때와 음수일 때 서로 다른 특성을 보인다는 것이다. 이것은 식(3)에서 괄호 안의 항들을 살펴보면 알 수 있다.

그림 5(b)에는 ψ 값이 달라지도록 준비한 여러 시료에 대해 편광각에 따른 흡수 강도를 측정하여 정규화시킨 뒤 역시 정규화된 진동강도와 비교한 결과이다. 실험값과 이론값이 잘 맞음을 알 수 있다. 특히 ψ 값의 변화에 대한 흡수강도의 변화는 수직 입사광을 흡수하는 체계에 의한 영향이므로 수직 입사광과 수직 입사광이 서로 다른 과정을 통해 흡수된다는 사실을 입증하고 있다.

그림 5에 나타난 결과를 보면 ψ 가 0° 일 때와 90° 일 때 흡수 특성은 매우 큰 차이를 보이고 있다. 즉 $\psi=0^\circ$ 일 때는 편광각에 거의 무관하게 입사광을 흡수하는 반면에 $\psi=90^\circ$ 일 때는 $\theta=0^\circ$ 인 입사광은 흡수하고 $\theta=90^\circ$ 인 입사광은 거의 흡수하지 않고 통과시킨다. 따라서 하나의 시료에 서로 직각이 되도록 두개의 입사면을 만들면 입사 방향에 따라 빛을 통과시키지 않거나 편광된 빛을 통과시키는 작용을 하게 된다.

IV. 결 론

Si(110) 기판 위에 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 이중 접합 구조와 δ 도핑을 통해 다중 양자 우물을 전도대에 형성시켜 수직 입사광에 대해 Ge 구성비에 따른 흡수 강도와 천이 에너지의 변화를 처음으로 관찰하였다. Ge 구성비의 증가에 따라 흡수 강도는 감소하고 천이 에너지는 증가하였다. 따라서 Ge 구성비를 바꾸어 주면 흡수 파장을 조절할 수 있다. 또한 도파관 구조 실험을 통해 수직 입사광과 수평 입사광이 서로 다른 과정을 통해 흡수됨을 확인하였고 실험값과 이론값이 다른 이유는 입사광이 반도체 결정의 주축과 어긋나게 입사하여 나타난 현상임을 밝혔다. 이때 주축과 어긋난 각도에 따른 진동 강도를 계산하여 실험값과 일치함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 반도체공동연구소 교육부 반도체분야 학술연구조성비(과제번호 : ISRC 97-E-4022)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] L. C. West and S. J. Eglash, Appl. Phys. Lett., **46**, 1156-1158 (1985).
- [2] J. S. Park, R. P. G. Karunasiri, Y. J. Mii, and K. L. Wang, Appl. Phys. Lett., **58**, 1083-1085 (1991).
- [3] H. Hertle, G. Schuberth, E. Gornik and G. Abstreiter, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **220**, 379 (1991).
- [4] T. L. Lin and J. Maserjian, Appl. Phys. Lett. **57**, 1422-1424 (1990).

- [5] J. S. Park, R. P. G. Karunasiri and K. L. Wang, Appl. Phys. Lett., **60**, 103-105 (1992).
- [6] W. Kaiser, R. J. Collins and H. Y. Fan, Phys. Rev. vol.91 pp.1380 (1953).
- [7] T. Ando, Z. Phys. B, **26** 263 (1977).
- [8] S. M. Nee, U. Claessen and F. Koch, Phys. Rev. B **29**, 3449-2455 (1984).
- [9] C. Lee and K. L. Wang, Appl. Phys. Lett. **60**, 2264-2266 (1992).
- [10] 이찬호, "저온 변조 성장 기법을 이용하여 Sb가 δ 도핑된 다층 구조의 Si 분자선 박막 성장과 특성 분석", 전자공학회 논문지A, **32**(12), 142-148 (1995).
- [11] C. Lee and K. L. Wang, J. of Vac. Sci. and Technol. B, **10**(2), 992-994 (1992).
- [12] C. Lee, Journal of Electrical engineering and information science, **3**(1), 80-85 (1998).
- [13] 김경엽, 이병호, 이찬호, 전자공학회 논문지D, **35**(8), 대한 전자공학회, 44-52, (1998).

Intersubband absorption in strained Si(110)/SiGe multiple quantum wells

Chanho Lee

Soongsil University, School of Electronic Engineering, Seoul 156-743, Korea

(Received February 19, 1999, Revised manuscript received July 28, 1999)

Electron intersubband absorption in Sb δ -doped Si(110)/SiGe multiple quantum well structures is observed. Normally incident light can excite electrons in Si(110) quantum wells, which is not possible for Si(001) or GaAs quantum wells. The influence of Ge composition in SiGe barriers is investigated. As the Ge composition in SiGe barriers increases, the absorption strength is decreased and the transition energy is increased. It is verified by comparing the calculated and experimental results obtained at various incident and polarization angles that normally incident light and parallel incident light are absorbed in different processes.