

고분해능 XRD 분석에 의한 InAs/GaSb 응력초격자 구조의 성장 최적화 연구

김준오^a · 신현욱^a · 최정우^a · 이상준^b · 김창수^b · 노삼규^{b*}

^a경희대학교 물리학과, 용인 449-701

^b한국표준과학연구원 나노소재측정센터 양자검출소자기술 글로벌연구소, 대전 305-600

(2009년 3월 26일 받음, 2009년 6월 26일 수정, 2009년 6월 26일 확정)

InAs/GaSb (8/8-ML) 응력초격자 (SLS)의 성장 변수를 최적화하기 위하여, 다양한 조건 및 모드에서 SLS 구조를 제작하여 고분해능 X선회절 (XRD) 특성을 분석하였다. 본 연구에서는 성장온도, V/III 분자선 비율, 성장일시정지 (growth interruption, GI) 등의 변화를 통하여 SLS 계면층의 응력 변조를 유도하였고, XRD 0차 위성피크의 변위로서 응력의 변화를 고찰하였다. XRD 분석 결과로부터, SLS의 결정성과 응력의 변화를 유발하는 주요 변수는 각각 성장온도와 V/III(Sb/Ga) 비율임을 보여 주었다. 압축변형을 가지고 있는 본 연구에서 제작한 SLS 시료는 V/III(Sb/Ga) 비율의 감소에 따라 인장변형으로 전환됨을 보여 주었으며, GI 모드 및 시간에 따라 응력이 민감하게 변함을 관측할 수 있었다. 본 연구 결과로부터, [InAs/GaSb]-SLS ([8/8]-ML)의 최적 성장온도와 V/III(Sb/Ga) 비율은 각각 350°C와 20이고, 결정성을 극대화하고 응력완화를 감소시키기 위해서는 InAs 성장 직전 약 3초 동안의 GI방법이 유효함을 보였다.

주제어 : 인듐비소/갈륨안티모니 (InAs/GaSb), 초격자, 변형, 응력, 계면층, 성장일시정지, X선회절 (XRD)

I. 서 론

양자구조의 부준위간 (intersubband) 천이에 기초한 적외선검출소자 (infrared photodetector)에 관한 연구가 지난 십 수 년 동안 지속적으로 진행되어 왔다 [1-4]. 밴드간 (interband) 천이를 이용하는 낮은 밴드갭 (bandgap) 반도체 (InSb, HgCdTe 등)와는 달리, 부준위간 천이에 의한 InAs/GaSb 제2형 응력변형 초격자 (stained-layer superlattice, SLS)는 중적외선 (mid-infrared, mid-IR)과 원적외선 (far-infrared, far-IR) 영역에서 상온 동작 적외선검출소자를 실현시킬 수 있는 유력한 구조임이 밝혀짐에 따라 그 관심이 급증하고 있다 [5,6]. 약 -0.6%의 격자부정합 ($\Delta a/a_0$)을 가지는 InAs/GaSb 계는 제2형 밴드정렬을 가지는 대표적인 SLS 계로서, InAs의 전도대 (conduction band, CB)와 GaSb 가전대 (valence band, VB)는 약 0.15 eV 중첩되어 있고, CB와 VB의 밴드 어긋남 (band offset)은 각각 약 0.95 eV와 0.55 eV로 알려져 있다 [7]. [InAs/GaSb]-SLS에서는 InAs의 CB는 전자우물 (electron well)이고 GaSb VB는 정공우물 (hole well)로서, 초격자 적외

선검출소자 (SLIP)의 광반응 (photoresponse) 신호는 GaSb-VB에서 InAs-CB로의 간접천이 (indirect transition) 방식의 흡수에 의하여 발생된다.

[InAs/GaSb]-SLS 구조는 큰 유효질량에 기인한 투과 전류의 감소와 변형-응력 (strain-stress)이 유발한 경/중정공 (light/heavy-hole) 부준위 간격의 증대뿐 아니라, 제2형 밴드정렬에서의 간접천이로 인한 열전류의 감소 등 상온 동작에 필요한 여러 가지 장점을 지니고 있다 [8]. SLS를 활성층에 탑재한 SLIP가 상온에서 ~8 μm 영역까지 우수한 특성을 보임으로서 유망한 차세대 소자로 인정 받았으며 [9-15], 최근 [320×256] FPA를 사용하여 77 K에서 ~4 μm 대역의 열영상을 구현한 바 있다 [11]. 특히, 다수전하에 의한 암전류 (dark current)를 원천적으로 제거할 수 있는 AlGaSb 장벽 (barrier)이 삽입된 n-B-n 구조 [12]가 제안되어, 중적외선-원적외선 대역에서 고성능의 이중광장 (dual band) 검출소자도 가능함을 입증해 보였다 [13]. 그러나, [InAs/GaSb]-SLS 계면에 존재하는 InSb-like 또는 GaAs-like 계면층 (interfacial layer) [16-18]은 응력을 완화시켜 천이 에너지를 변조시킬 뿐 아

* [전자우편] sknoh@kriss.re.kr

나라 계면결함을 유발하여 양자효율을 감소시키는 원인을 제공하기 때문에, SLS 계면층과 결정 내에 잔존하고 있는 진성결함의 제어는 SLIP 효율 향상을 위하여 시급히 해결 되어야할 문제이다 [19].

본 연구에서는, InAs/GaSb SLIP 소자의 활성층으로 이용할 SLS (8/8-monolayer, ML) 구조를 여러 가지 조건과 모드에서 제작하고, 고분해능 X선회절 (x-ray diffraction, XRD) 평가를 통하여 그 특성을 분석하였다. 성장온도 (growth temperature, T_G), V/III 분자선등가압력 (beam equivalent pressure, BEP) 비율, 성장일시정지 (growth interruption, GI) 등을 변화시켜 SLS 계면층의 변조를 유도하였으며, XRD의 초격자 위성피크 (superlattice satellite peak, SSP)의 0차 피크 변위각 (0th-order peak separation angle, 0-PSA)를 조사하여 SLS의 변형-응력 (strain-stress)의 변화를 고찰하였다. 성장변수에 따른 0-PSA 분석 결과로부터 결정성과 응력의 변화를 일으키는 주요 변수에 대하여 논의하고, [InAs/GaSb]-SLS의 최적 성장조건을 제시하였다. 마지막으로, 변수의 최적성을 검증하기 위하여, 최적 조건에서 주기 (period, P)가 서로 다른 6종류의 시료 ($P=50-300$)를 성장하여, 단면 transmission electron microscopy (TEM) 사진과 XRD 곡선맞춤을 통하여 SLS의 주기성과 두께 균일성을 조사하였다.

II. 실험 방법

수 nm 두께의 서로다른 물질계를 교대로 적층하는 SLS 구조 제작에는 단층 제어가 가능한 molecular beam epitaxy (MBE) 성장법이 이용되었다. Fig. 1(a)는 본 시료의 제작에 적용한 경과 시간에 따른 분자선 물질의 증착상태로써 [InAs/GaSb]-SLS의 성장순서를 나타낸 도표이며, Fig. 1(b)는 본 연구에서 시도된 4가지 GI 모드 (No-GI, GI-for-GaSb, GI-for-InAs, GI-for-Each Layer)를 시간의 함수로 나타낸 성장 모드의 개략도이다. [8/8]-ML인 1주기 InAs/GaSb 증착에는 18/10초가 소요되는데, 이때 InAs와 GaSb 증착 직전에는 각각 As과 Sb만을 기판 표면에 뿌려주는 흡착과정 (soaking process)이 삽입된다. 먼저, p-GaSb 기판 (500 μm) 위에 p-GaSb 완충층 (buffer layer)을 510°C 온도에서 1 μm 성장하고, 기판온도를 내린 후 [InAs/GaSb]-SLS를 성장시켰다. 이때, InAs/GaSb 두

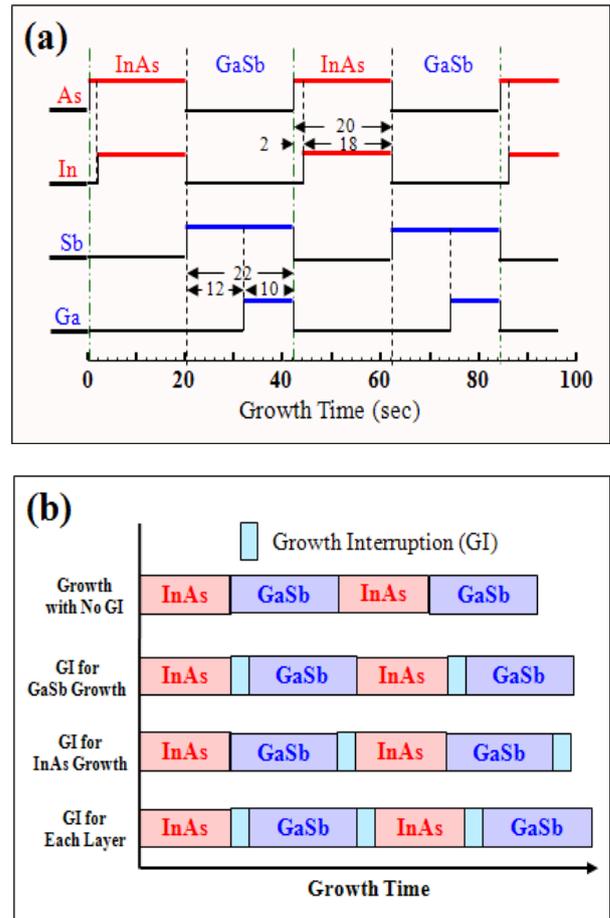


Figure 1. (a) Growth sequence chart showing ON/OFF status of molecular-beam sources and (b) schematic diagram for 4 GI modes introduced in [InAs/GaSb]-SLS growth.

께와 SLS 주기는 각각 [8/8]-ML와 $P=50$ 으로, 주기를 변화시킨 경우를 제외하고는 모든 시료가 동일한 값을 가지고 있다. SLS의 V/III(As/In) BEP 비율은 4 ($6.0/1.5 \times 10^{-7}$ Torr)로 고정시켰으며, 성장온도 (T_G (SLS))와 V/III(Sb/Ga) 비율은 각각 330-410°C와 1.0-20 ($1.5-30/1.5 \times 10^{-7}$ Torr) 범위에서 변화시켰다. InAs와 GaSb 성장 직전에 삽입된 As과 Sb의 흡착시간은 각각 2초와 12초로서, 모든 시료에 대하여 같다. 또한, 계면층 변조에 따른 응력 변화를 조사하기 위하여, Fig. 1(b)와 같이, InAs와 GaSb 증착이 교차되는 사이에 성장을 일시중지시키는 4가지 GI 모드에서 시료를 제작하여 그 변화를 조사하였다.

본 실험에서 사용한 고분해능 XRD 측정장치는 분해능이 12"인 Ge(220) 결정을 이용하는 2축 회절기 (double-axis diffractometer)로서, X선원 ($\text{CuK}\alpha_1$)의 파장은 λ

=1.540560 Å ($\lambda/\Delta\lambda \approx 10^3$)이다. XRD 진동곡선 (rocking curve)는 (004) 대칭 회절면에서 $\omega/2\theta$ -scan으로 얻었으며, 모든 측정은 상온 (300 K)에서 수행되었다. XRD 스펙트럼 모사에는 SLS의 구조와 측정된 SSP 간격으로부터 간단히 단일 주기의 평균두께를 구할 수 있는 상용 초격자 분석 프로그램 (PeakSplit, K.M. Software)이 이용되었다.

III. 결과 및 논의

Fig. 2 (a)와 (b)는 각각 서로 다른 온도 (330–410°C)에서 성장한 6종류의 [InAs/GaSb]-SLS로부터 얻은 XRD 곡선과 0차 위성피크 변위각 (0-PSA)을 T_G (SLS)의 함수로 나타낸 그래프이다. T_G (SLS)=350/370°C에서 성장한 시료는 GaSb 기판 및 InAs 덮개층 (cap layer) 피크와 함께 초격자 위성피크 (SSP)가 잘 발달되어 있고, 0-PSA과 full width half-maximum (FWHM)이 가장 작음을 명확하게 보여 주고 있다. T_G (SLS) > 370°C 또는 T_G (SLS) < 350°C에서 제작한 시료는 온도의 증감에 따라 SSP가 점점 사라지고 있음을 볼 때, SSP의 발달 정도를 함께 고려한 최적 T_G (SLS)는 350°C인 것으로 판단된다. GaSb 기판 피크를 기준으로 0차 SSP가 왼쪽 영역 (0-PSA < 0)에 나타난 것은 압축변형 (compressive strain)을 의미하는 것으로서, 이것은 SLS의 응력이 일부 완화 (relaxation) 되었음을 보여주는 결과이다. In-Ga-As-Sb의 전혀 다른 4종류의 증착원을 사용하는 [InAs/GaSb]-SLS 계에는 In↔Ga 또는 As↔Sb의 상호혼합 (intermixing)에 의하여 GaAs-like와 InSb-like의 2종류의 계면층이 형성될 수 있음이 알려져 있다 [16–18]. 계면층의 형성은 서로다른 증착원이 교차되는 SLS에서는 흔히 관측되는 일반적인 현상으로, 격자부정합에 의한 응력에너지를 최소화시키는 방향으로 전개되어 1차적으로 XRD의 0-PSA의 변위로 나타난다. GaSb ($a_0=0.60959$ nm)를 기판으로 사용할 경우에는 인장 변형 (tensile strain)을 가지는 GaAs ($a_0=0.5653$ nm) 보다는 압축변형을 가지는 InSb ($a_0=0.64794$ nm)의 형성 가능성이 높기때문에, 본 연구의 XRD가 보여주고 있는 압축 변형은 InSb-like 계면상에 의한 것으로 판단된다. XRD 스펙트럼의 모사로부터 [InAs/GaSb]-SLS에는 약 1 ML의 InSb-like 계면상이 존재함을 확인할 수 있었는데, 이것은 Steinschnider 등 [18]의 scanning tunneling microscopy

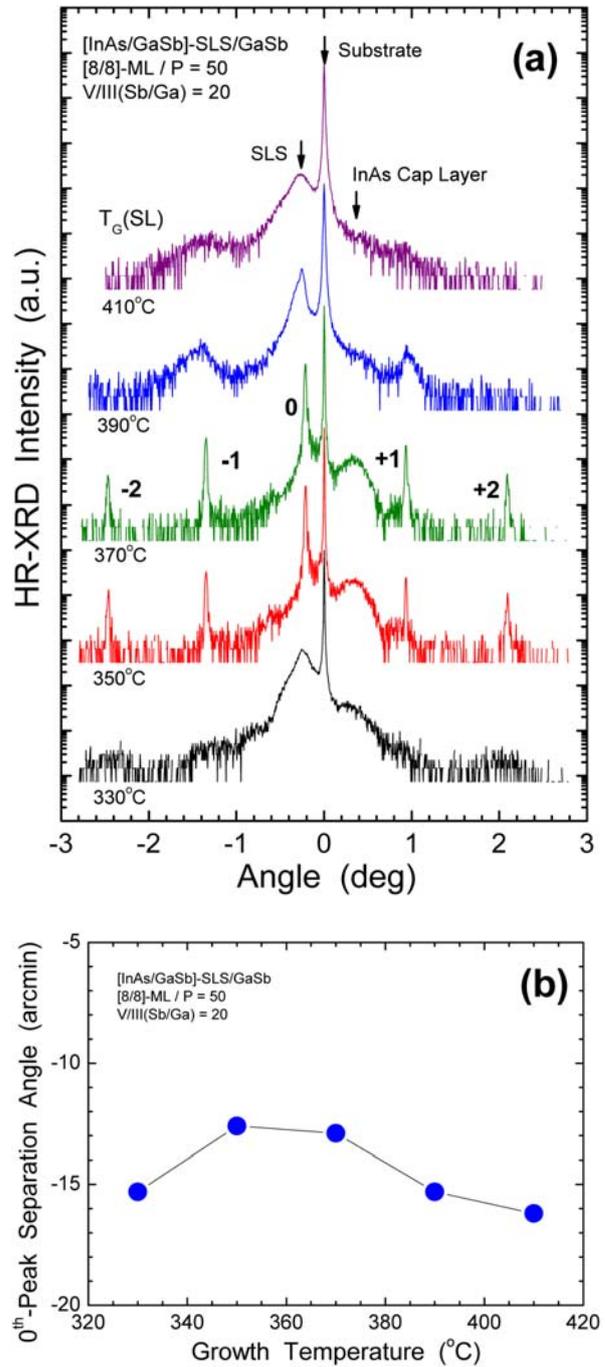


Figure 2. (a) XRD rocking curves and (b) plot of 0-PSA as a function of growth temperature for 6 [InAs/GaSb]-SLS samples.

(STM) 분석과도 일치하는 결과이다.

Fig. 3 (a)와 (b)는 각각 최적 기판온도인 350°C에서 서로다른 V/III(Sb/Ga) 비율로 성장한 6종류의 SLS 시료로부터 측정된 XRD 곡선과 0-PSA의 변화를 보여주는 그래프이다. V/III(Sb/Ga) 비율이 1.0에서 20으로 증가함에 따

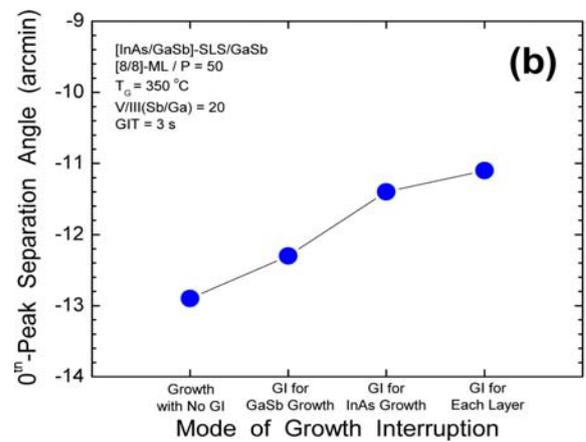
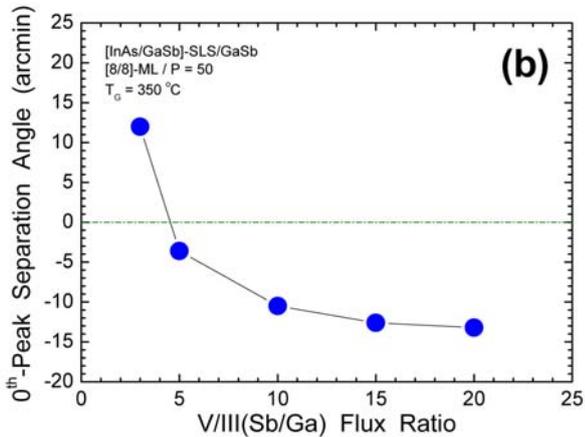
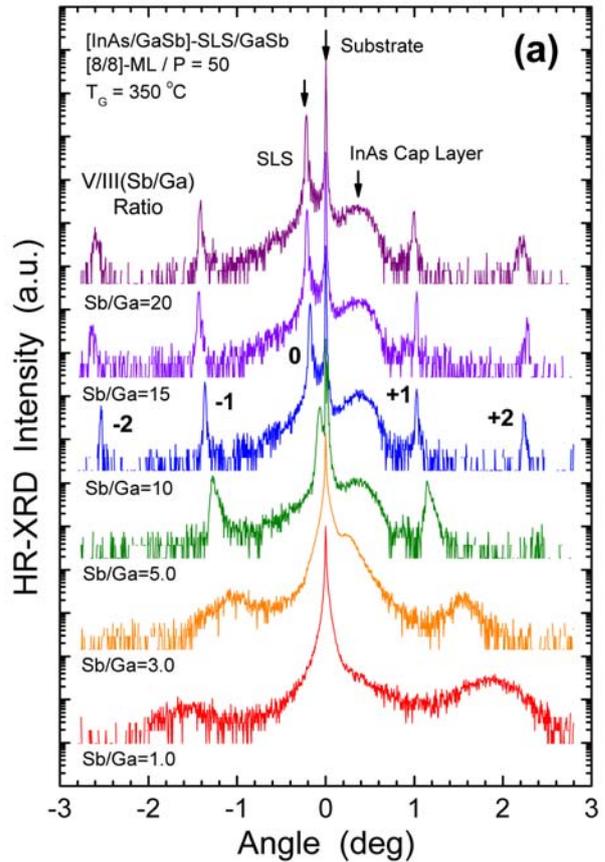
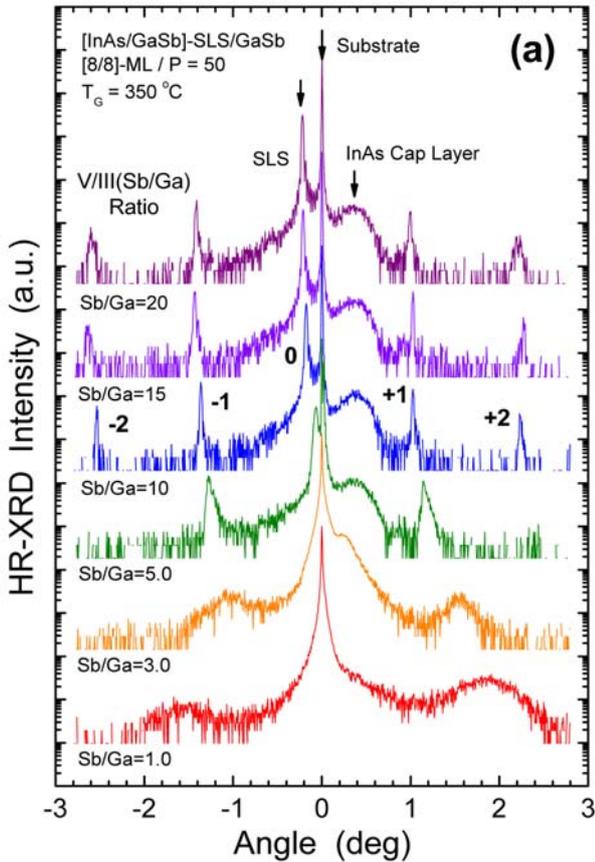


Figure 3. (a) XRD rocking curves and (b) plot of 0-PSA as a function of V/III(Sb/Ga) ratio for 6 [InAs/GaSb]-SLS samples.

Figure 4. (a) XRD rocking curves and (b) plot of 0-PSA for 4 [InAs/GaSb]-SLS samples grown at different GI modes.

라 InAs 덮개층 피크와 함께 SSP가 점점 더 발달하면서 FWHM도 급격하게 줄어들고 있고, V/III(Sb/Ga) < 5.0 에서는 더이상 SLS의 결정성이 유지되지 않음을 잘 보여 주고 있다. (Fig. 2의 최적 T_G (SLS)와 Fig. 3의 최적 V/III(Sb/Ga) 비율은 상호 의존성이 강한 변수로서 본 연구에서

제시하지 않은 다양한 조건에서 시행하여 최종적으로 결정된 결과임을 밝힌다.) Fig. 3(b)는 V/III(Sb/Ga) 비율이 낮아질수록 0-PSA가 줄어들고 V/III(Sb/Ga)=3.0의 시료에서는 기판 GaSb 피크의 오른쪽 (양각)에 SLS 피크가 출현함 보여주고 있다. 이것은 Sb BEP가 감소하면 결정성은 악

화되지만 응력을 완화시키는 계면상은 줄어듦을 보여주는 결과로서, 그 계면상은 Sb와 관련된 InSb-like인 것으로 논의한 Fig. 2의 분석과 일치하고 있다. 본 결과로부터, V/III(Sb/Ga) 비율은 SLS의 결정성과 계면층 형성과 관련된 주요 변수임을 알 수 있었으며, $T_G(\text{SLS})=350^\circ\text{C}$ 에서 최적 V/III(Sb/Ga) 비율은 20임을 확인하였다.

앞서 논의한 As↔Sb의 상호혼합에 의한 InSb-like 계면상은 물질계의 증착이 교차되는 사이에 성장일시정지(GI) 방법을 도입하면 상당 부분 제어가 가능함이 알려져 있다. Fig. 1(b)의 성장모드 개략도에서 볼 수 있는 바와 같이, MBE 성장법에서는 개폐기로써 원하는 GI 모드를 제어할 수 있는데, [InAs/GaSb]-SLS 계에서는 4가지 모드(No-GI, GI-for-GaSb, GI-for-InAs, GI-for-Each Layer)가 가능하다. Fig. 4는 4가지 가능한 GI 모드에서 성장한 SLS ($P=50$) 시료에서 취한 XRD 곡선 (a)과 GI 모드에 대한 0-PSA의 변화를 보여주는 그래프 (b)이다. 이때, $T_G(\text{SLS})$ 와 V/III(Sb/Ga)는 각각 최적조건인 350°C 와 20이며, GI 시간은 모두 3초이다. 모든 XRD 곡선은 GaSb 기판 및 InAs 덮개층 피크와 잘 발달된 SSP를 명확하게 보여주고 있으며, 겹보기로는 그 차이를 구별할 수 없을 정도로 동일한 형태를 가지고 있다. Fig. 4(b)는 각각의 0차 위성피크 위치를 상세 분석하여 GI 모드에 따른 0-PSA를 나타낸 그래프이다. [No-GI]→[GI-for-GaSb]→[GI-for-InAs]→[GI-for-Each Layer]로 모드가 변화함에 따라 0-PSA는 점점 0에 접근해 감을 보여주고 있는데, 이것은 GI 모드로서 계면층 변화가 가능함을 입증하는 결과이다. GI(InAs)→GI(Each Layer)에서 보다 GI(GaSb)→GI(InAs) 사이에서 0-PSA의 변화가 더 큰 것으로 보아, GaSb-on-InAs 보다는 InAs-on-GaSb 과정에서 상호혼합이 더 심한 것으로 해석할 수 있는데, 이것은 XRD에 나타난 압축변형 ($0\text{-SPA} < 0$)은 In과 Sb의 결합에 의한 InSb-like 계면상에 의한 것으로 논의한 지금까지의 분석과 잘 일치하고 있다. 본 연구로부터, [GI-for-InAs]의 도입은 XRD의 결정성을 유지하면서 응력완화를 감소시킬 수 있는 방법임을 확인할 수 있었다.

GI 도입에 따른 응력변조를 보다 자세하게 관찰하기 위하여, InAs-on-GaSb 상태, 즉 [GI-for-InAs] 모드에서 GI 시간 (GI time, GIT) 변화에 대한 효과를 조사하였다. Fig. 5는 최적 성장조건에서 GIT만을 0에서 12초까지 변화시키면서 제작한 동일한 구조의 [InAs/GaSb]-SLS ([8/

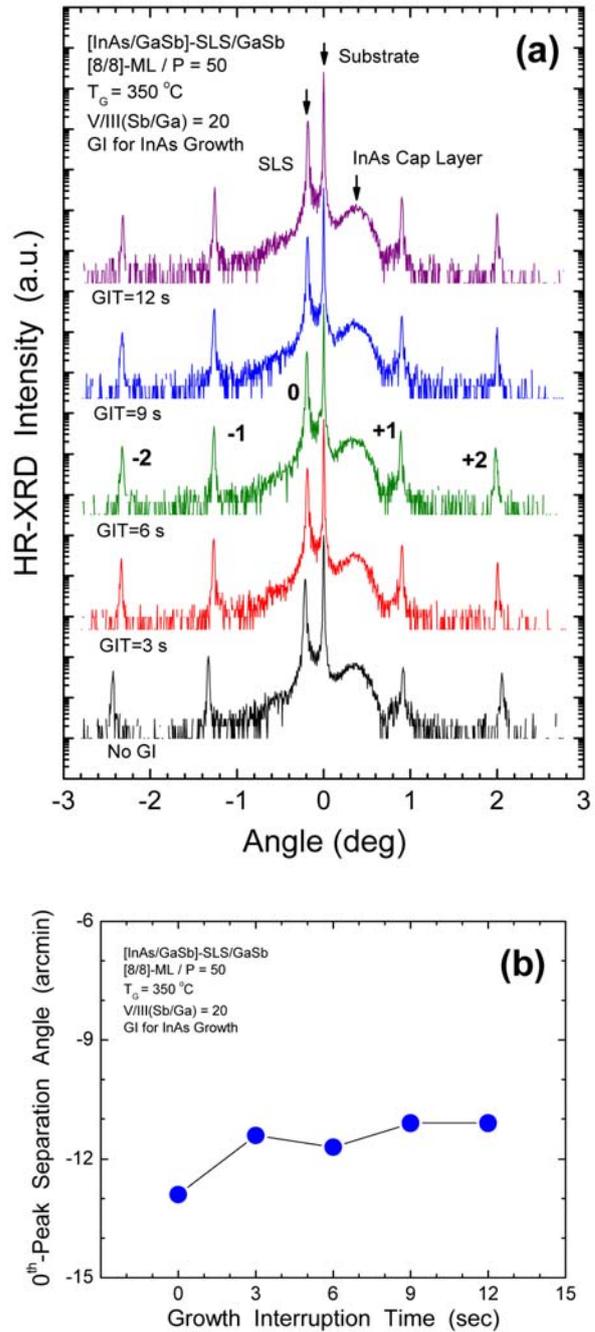


Figure 5. (a) XRD rocking curves and (b) plot of 0-PSA for 5 [InAs/GaSb]-SLS samples grown at different GI times.

8]-ML/P=50)에서 얻은 XRD 결과이다. 지금까지 제시한 SLS에서와 마찬가지로, Fig. 5(a)의 모든 XRD 곡선은 강한 GaSb 기판/InAs 덮개층 피크와 함께 잘 발달된 SSP를 보여주고 있다. XRD 스펙트럼에서는 그 변위를 구별할 수 없을 정도로 작지만, 자세한 분석을 수행하면 GIT의 증가

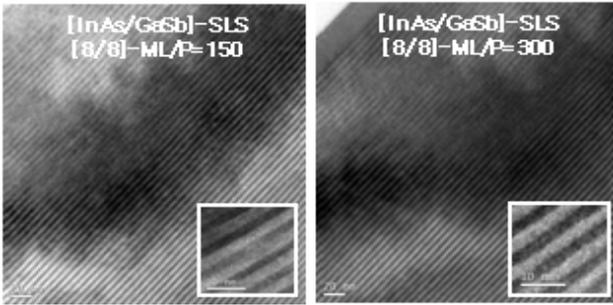


Figure 6. Cross-sectional TEM images for two representative [InAs/GaSb]-SLS samples with P=150 (left) and P=300 (right).

에 따라 Fig. 5(b)와 같은 미세한 변화가 있음을 알아 낼 수 있다. GIT=3 s를 적용한 시료의 0-PSA는 GI가 없는 경우 (GIT=0) 보다 2 arcmin 정도 다소 급격한 변화를 보이고 있으나, 더 이상 GIT 증가에 따른 변화는 크지 않음을 알 수가 있다. 본 연구를 위하여 준비된 MBE 시료는 초고진공 ($\geq 10^{-10}$ Torr)에서 성장되는데, 증착원 압력의 시간적 변화를 측정된 결과에 의하면 증착원의 압력은 3초 이내에 배정압력에 접근하는 것으로 확인하였다. 즉, GIT>3 s에서 성장한 시료에서의 0-PSA가 큰 변화를 보이지 않는 것은 증착원 분자선 공급을 중단한 후 3초가 경과하면 증착원의 상호혼합 가능성은 아주 낮기 때문이다. 적정시간 이상 GI를 도입할 경우에는 자발확산 (self-diffusion)에 의한 또다른 효과를 유발할 수가 있으므로, 3초가 최적 GIT인 것으로 판단된다.

지금까지 여러가지 성장 조건의 변화를 통하여 성장한 시료의 XRD 분석 결과로부터, [InAs/GaSb]-SLS ([8/8]-ML/P=50)의 성장변수를 최적화하였다. 마지막으로, 본 연구에서 결정한 변수 ($T_G=350^\circ\text{C}$, $V/\text{III}(\text{Sb}/\text{Ga})=20$, $\text{GI}(\text{InAs})=3\text{ s}$)의 유효성을 검증하기 위하여, 최적조건에서 주기가 다른 6종류의 SLS (P=50-300)를 성장하였다. Fig. 6는 P=150/300의 대표적 2개 [InAs/GaSb]-SLS 시료의 단면 TEM 사진이다. 명확한 주기성과 균일한 두께를 가지는 SLS가 성공적으로 성장되었음을 확인할 수 있었으며, P=300까지 전위 (dislocation) 등과 같은 특이한 결정학적 결함이나 주기 증가에 따른 두께의 불균일성은 TEM 사진에서는 전혀 발견되지 않았다. Fig. 7(a)는 서로다른 주기의 6개 SLS 시료에서 측정된 XRD 곡선이다. 모든 XRD 곡선은 전형적인 GaSb 기판 및 InAs 덮개층 피크와 ± 3 차까지 잘 발달된 SSP를 명확하게 보여주고 있으며,

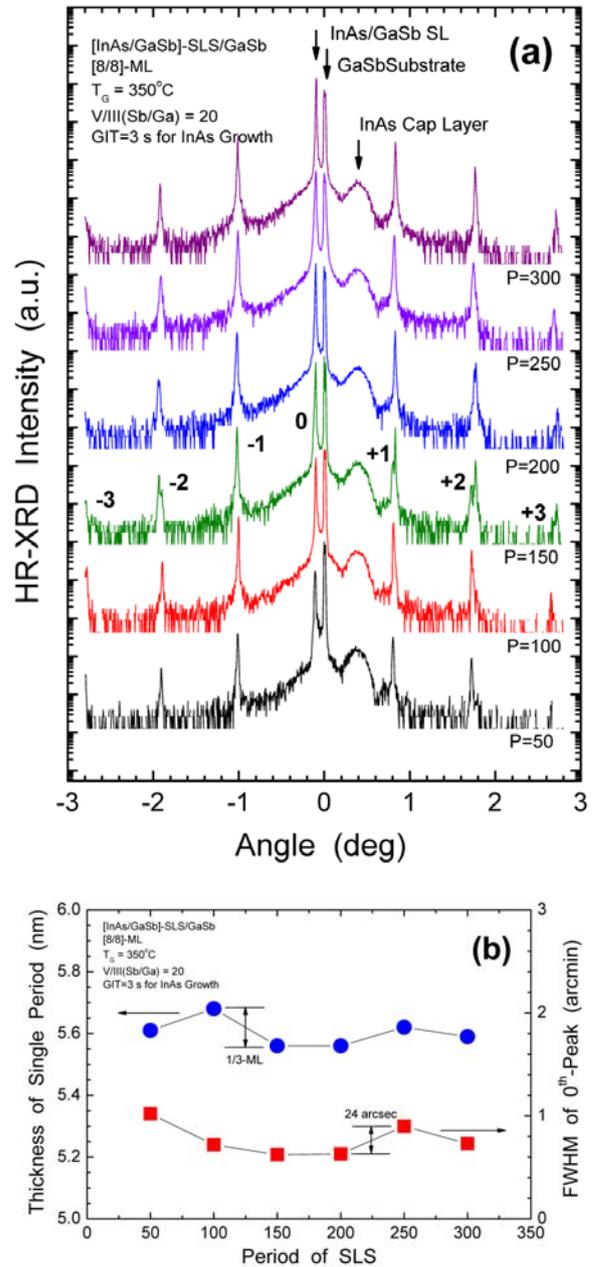


Figure 7. (a) XRD rocking curves and (b) plot of average thickness of single period and FWHM of 0th-order SSP for 6 [InAs/GaSb]-SLS samples with different periods.

0-PSA의 변화 ($\Delta\theta=\pm 0.3\text{ arcmin}$)는 무시할 수 있을 정도로 작다. P=50에서 P=300으로 주기가 늘어남에 따라 기판 GaSb 피크에 비하여 상대적으로 SSP의 세기가 점차로 강해지고 있음을 볼 수 있는데, 이것은 SLS의 전체 두께가 증가함에 따라 XRD 신호가 커지는 전형적인 현상이다. Fig. 7(b)는 주기 P의 함수로써 나타낸 단일 주기 SLS의

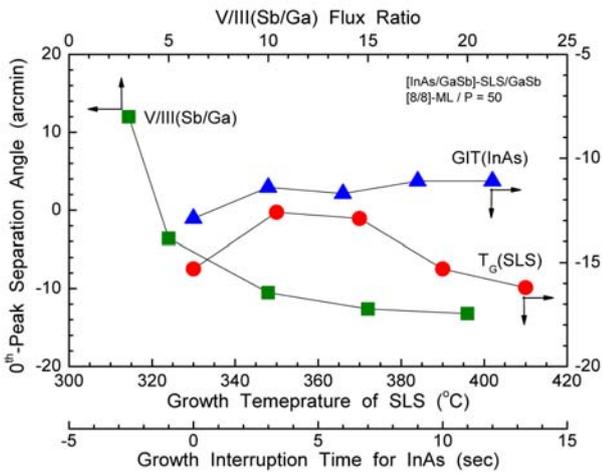


Figure 8. Summarized graph showing changes of 0-PSA as functions of 3 major parameters in [InAs/GaSb]-SLS ([8/8]-ML/P=50) growth.

두께와 0차 SSP의 FWHM에 대한 그래프이다. 여기서 단일 주기 평균 두께는 초격자 분석 프로그램을 이용하여 XRD 스펙트럼에서 실험적으로 얻은 SSP 간격으로부터 결정하였다. SLS 단일 주기의 두께는 (5.56 ± 0.06) nm로서, 그 최대 오차범위 (0.12 nm)는 InAs-GaSb ($a_0/2=0.3$ nm)의 1/3-ML에 대응하는 값이다. SLS 주기가 증가함에 따른 1/3-ML의 두께 변화는 계면요동 (interface fluctuation)에 해당하는 약 1-ML의 계면층 두께보다 아주 작은 값으로, SLS는 300주기까지 거의 동일한 두께를 유지하고 있는 것으로 판단된다. 주기의 증가에 따른 FWHM의 변화폭은 측정 오차범위에 해당되는 약 0.4 arcmin (24 arcsec)으로, 거의 일정한 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터, 본 연구에서 결정한 최적 성장변수는 300 주기까지 결정성이 우수하고 재현성 있는 SLS 성장이 가능한 조건임이 확인할 수 있었다.

IV. 요약 및 결론

Fig. 8은 본 연구를 통하여 결정한 3가지 주요 성장변수 (T_g (SLS), V/III(Sb/Ga) 비율, GIT(InAs))에 따른 0-PSA의 변화를 요약한 그래프이다. 본 연구에서 제작한 [InAs/GaSb]-SLS ([8/8]-ML/P=50) 구조는 낮은 V/III(Sb/Ga) 비율에서는 인장변형을 가지나, 대부분의 성장조건에서는 압축변형을 가지고 있음이 밝혀졌다. 압축변형은 성장온도

의 상승과 함께 증가하는 반면, V/III(Sb/Ga)의 증가와 함께 감소하였다. [GI-for-InAs] 모드 (InAs-on-GaSb)에서 계면층 변조가 가장 우수하였으며, GIT(InAs)의 증가와 함께 다소 증가하는 경향을 보였다. SLS의 응력 변화를 유발하는 가장 중요한 변수는 성장온도임을 밝혔으며, V/III(Sb/Ga) 비율은 결정성과 응력완화 정도를 동시에 고려하여 최적화해야 하는 변수임을 알았다. 단면 TEM 사진은 300 주기까지 전위가 없고 명확한 주기성과 균일한 두께를 가지는 SLS가 성장됨을 확인해 주었으며, XRD 분석 결과는 SLS의 평균 두께 및 FWHM 변화는 각각 1/3-ML (± 0.06 nm)와 24 arcsec로서 300주기까지 거의 동일한 두께를 유지함을 입증해 주었다. 결론적으로, 본 연구에서 이용한 고분해능 XRD 측정은 SLS의 변형 및 두께의 미세한 변화를 분석할 수 있는 유용한 방법임을 보여 주었으며, [InAs/GaSb]-SLS ([8/8]-ML)의 최적 성장온도와 V/III(Sb/Ga) 비율은 각각 350°C와 20이고 결정성을 극대화하고 응력완화를 감소시키기 위해서는 InAs 성장 직전에 3초 동안의 성장일시정지 (GI) 방법의 도입이 유효함을 보였다.

감사의 글

본 연구는 한국표준과학연구원 기본연구의 일환으로 반도체박막연구실에 설치되어 있는 장비를 이용하여 시료 제작 및 측정이 수행되었으며, 국방과학연구소 기초연구사업 (ADD, No. 79-09-05) 및 교육과학기술부 GRL 사업 (KICOS, No.2007-00011)의 연구비 지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- [1] S. K. Noh, S. J. Lee, Y. H. Ryu, S. M. Choe, and S. H. Park, *New Phys.* **54**, 484 (2007).
- [2] S. Krishna, D. Forman, S. Annamalai, P. Dowd, P. Varangis, T. Tumolillo, Jr., A. Gray, J. Zilko, K. Sun, M. Liu, J. Campbell, and D. Carothers, *Appl. Phys. Lett.* **86**, 193501 (2005).
- [3] S. Tsao, H. Lim, W. Zhang, and M. Razeghi, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 201109 (2007).
- [4] J. O. Kim, S. J. Lee, S. K. Noh, J. W. Choe, and

- T. W. Kang, *J. Korean Phys. Soc.* **53**, 2100 (2008).
- [5] P. S. Dutta and H. L. Bhat, *J. Appl. Phys.* **81**, 5821 (1997).
- [6] J. O. Kim, H. W. Shing, J. W. Choe, S. J. Lee, C. S. Kim, and S. K. Noh, *J. Korean Vac. Soc.* **18**, 108 (2009).
- [7] H. Kroemer, *Physica E* **20**, 196 (2004).
- [8] B.-M. Nguyen, D. Hoffman, P.-Y. Delaunay, and M. Razeghi, *Appl. Phys. Lett.* **91**, 163511 (2007).
- [9] E. Plis, J. B. Rodriguez, H. S. Kim, G. Bishop, Y. Sharma, R. Dawson, S. J. Lee, C. E. Jones, V. Gopal, and S. Krishna, *Appl. Phys. Lett.* **91**, 133512 (2007).
- [10] S. Mou, A. Petschke, Q. Liu, S. L. Chuang, J. V. Li, and C. J. Hill, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 153505 (2008).
- [11] H. S. Kim, E. Plis, J. B. Rodriguez, G. D. Bishop, Y. D. Sharma, L. R. Dawson, S. Krishna, J. Bundas, R. Cook, D. Burrows, R. Dennis, K. Patnaude, A. Reisinger, and M. Sundaram, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 183502 (2008).
- [12] S. Maison and G. W. Wicks, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 151109 (2006).
- [13] A. Khoshakhlagh, J. B. Rodriguez, E. Plis, G. D. Bishop, Y. D. Sharma, H. S. Kim, L. R. Dawson, and S. Krishna, *Appl. Phys. Lett.* **91**, 263504 (2007).
- [14] G. C. Dente and M. L. Tilton, *J. Appl. Phys.* **86**, 1420 (1999).
- [15] S. J. Lee, S. K. Noh, L. R. Dawson, and S. Krishna, *J. Korean Phys. Soc.* **54**, 280 (2009).
- [16] X. B. Zhang, J. H. Ryou, R. D. Dupuis, C. Xu, S. Mou, A. Petschke, K. C. Hsieh, and S. L. Chuang, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 131110 (2007).
- [17] D. Behr, J. Wagner, J. Schmitz, N. Herres, J. D. Ralston, P. Koidl, M. Ramsteiner, L. Schrottke, and G. Jungk, *Appl. Phys. Lett.* **65**, 2972 (1994).
- [18] J. Steinshnider, M. Weimer, R. Kaspi, and G. W. Turner, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 2953 (2000).
- [19] J. O. Kim, H. W. Shin, J. W. Choe, S. J. Lee, and S. K. Noh, *J. Korean Vac. Soc.* **18**, 127 (2009).

Study on Growth Optimization of InAs/GaSb Strained-Layer Superlattice Structures by High-Resolution XRD Analysis

J. O. Kim^a, H. W. Shin^a, J. W. Choe^a, S. J. Lee^b, C. S. Kim^b, and S. K. Noh^{b*}

^a*Department of Physics, Kyung Hee University, Yongin 449-701*

^b*Global Research Laboratory on Quantum Detector Technology, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-600*

(Received March 26, 2009, Revised June 26, 2009, Accepted June 26, 2009)

For the growth optimization of InAs/GaSb (8/8-ML) strained-layer superlattice (SLS), the structure has been grown under various conditions and modes and characterized by the high-resolution x-ray diffraction (XRD) analysis. In this study, the strain modulation is induced by changing parameters and modes, such as the growth temperature, the ratio of V/III beam-equivalent-pressure (BEP), and the growth interruption (GI), and the strain variation is analyzed by measuring the angle separation of 0th-order satellite peak in XRD patterns. The XRD results reveal that the growth temperature and the V/III(Sb/Ga) ratio are major parameters to change the crystallinity and the strain modulation in SLS structures, respectively. We have observed that the SLS samples with compressive strain prepared in this study are show a transition to tensile strain with decreasing V/III(Sb/Ga) ratio, and the GI process is a sensitive factor giving rise to strain modulation. These results obtained in this study suggest that optimized growth temperature and V/III(Sb/Ga) ratio are 350°C and 20, respectively, and the appropriate GI time is approximately 3 seconds just before InAs growth that the crystallinity is maximized and the strain relaxation is minimized.

Keywords : InAs/GaSb, Superlattice, Stain, Stress, Interfacial layer, Growth interruption, X-ray diffraction (XRD)

* [E-mail] sknoh@kriss.re.kr