

InAs/GaSb 응력초격자를 이용한 적외선검출소자의 제작 및 특성 연구

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

^a경희대학교 물리학과, 용인 449-701

^b한국표준과학연구원 나노소재측정센터 양자검출소자기술 글로벌연구실, 대전 305-600

(2009년 3월 11일 받음, 2009년 3월 23일 확정)

150 주기의 InAs/GaSb (8/8-ML) 제2형 응력초격자 (SLS)를 활성층에 탑재한 초격자 적외선검출소자 (SLIP) 구조를 MBE 방법으로 성장하고, 직경 200 μ m의 개구면을 가지는 SLIP 개별소자를 시험 제작하였다. 고분해능 투과전자현미경 (TEM) 이미지의 휘도분포와 X선회절 (XRD) 곡선의 위성피크의 분석 결과는 SLS 활성층은 균일한 층두께와 주기적 응력변형을 유지하는 급격한 계면의 초격자임을 입증하였다. 흑체복사 적외선 광원을 이용하여 측정한 입사파장 및 인가전압에 따른 반응도 (R)와 검출률 (D*)로부터, 차단파장은 $\sim 5 \mu$ m이고 최대 R과 D* ($\lambda = 3.25 \mu$ m)는 각각 $\sim 10^3$ mA/W (-0.6 V/13 K)와 $\sim 10^9$ cm.Hz^{1/2}/W (0 V/13 K)임을 보였다. 반응도의 온도 의존성으로부터 분석한 활성화에너지 275 meV는 광반응 과정에 개입되어 있는 가전대 및 전도대 부준위 사이의 에너지 간격 (HH1-C)과 잘 일치하였다.

주제어 : 적외선검출소자, 인듐비소/갈륨안티모니 (InAs/GaSb), 응력초격자, 투과전자현미경 (TEM), X선회절 (XRD), 반응도 (R), 검출률 (D*)

I. 서 론

밴드간 (interband) 천이에 기초한 낮은 밴드갭 (bandgap) 반도체 (InSb, HgCdTe 등)의 적외선검출소자 (infrared photodetector) [1]의 한계를 극복하기 위하여, 부준위간 (intersubband) 천이를 이용한 양자구조 소자에 관한 연구가 지난 십 수 년 동안 이루어져 왔다 [2]. 특히, 양자점 (quantum dot, QD)에 기초한 적외선검출소자 (QDIP)는 기존 소자가 근본적으로 지니고 있는 온도 한계를 극복할 수 있는 새로운 개념의 소자로서 각광을 받으면서, 상온 동작을 실현시키기 위한 노력은 현재도 계속되고 있다 [3-7]. QDIP는 최근 벌크 소자의 성능에 필적하는 $\sim 10^{11}$ cm.Hz^{1/2}/W (77 K)의 높은 검출률 (detectivity, D*)의 초점면 배열 (focal-plane array, FPA)을 제작하여 고분해능의 열영상을 얻는데 성공하였으며, 활성층에 양자점우물 (dot-in-well, DWELL)을 도입한 구조를 이용하여 이중 파장 ($\lambda_p \sim 4/7 \mu$ m) QDIP를 실현한 바 있다 [4]. 250 K까지 반응하는 고성능 소자의 실현에도 불구하고, QDIP는 상온 동작 실용 열영상 소자가 요구하는 특성에 도달하는 데

에는 다소의 시간이 필요한 것으로 판단된다.

아주 최근, 부준위간 (intersubband) 천이에 기초한 InAs/GaSb 제2형 응력변형 초격자 (stained-layer superlattice, SLS)가 중파장 (mid-wavelength, MW)과 장파장 (long-wavelength, LW) 영역에서 상온 동작 적외선검출소자를 실현시킬 수 있는 대체 구조임이 밝혀짐에 따라 그 관심이 급증하고 있다 [8]. [InAs/GaSb]-SLS 구조는 큰 유효질량에 기인한 투과전류의 감소와 변형-응력 (strain-stress)이 유발한 경/중정공 (light/heavy-hole, LH/HH) 부준위 (subband) 간격의 증대뿐 아니라, 제2형 밴드 정렬에서의 간접천이 (indirect transition)로 인한 열전류의 감소 등 상온 동작에 필요한 여러 가지 장점을 지니고 있다 [9]. SLS를 활성층에 탑재한 초격자 적외선검출소자 (SLIP)가 상온에서 $\sim 8 \mu$ m의 LW 영역까지 우수한 특성을 보임으로서 유망한 차세대 소자로 인정받았으며 [9-14], 최근 [320 \times 256] FPA를 사용하여 77 K에서 $\sim 4 \mu$ m 대역의 MW 열영상을 구현한 바 있다 [12]. 특히, 다수전하 (majority carrier)에 의한 암전류 (dark current)를 원천적으로 제거할 수 있는 AlGaSb 장벽 (barrier)이 삽입된 n-B-n 구조 [13]가 제안되어, MW- LW

* [전자우편] sknoh@kriss.re.kr

대역에서 고성능의 이중파장 (dual band) 검출소자도 가능함을 입증해 보였다 [14]. 그러나, [InAs/GaSb]-SLS 계면에 존재하는 InSb-like 또는 GaAs-like 계면층 (interfacial layer) [15]은 응력을 완화시켜 천이 에너지를 변조시킬 뿐 아니라 계면결함을 유발하여 양자효율 (quantum efficiency) 을 감소시키는 원인을 제공하기 때문에, 완전한 계면 제어는 여전히 앞으로 해결해야 할 숙제로 남아 있는 상태이다.

본 연구에서는, 150 주기 (period, P)의 InAs/GaSb (8/8-ML) SLS를 활성층에 탑재한 SLIP 개별소자 (discrete device)를 시험 제작하여 그 특성을 조사하였다. 활성층 SLS의 특성평가에는 고분해능 투과전자현미경 (transmission electron microscope, TEM)과 X선회절 (x-ray diffraction, XRD) 분석법이 활용되었으며, 흑체복사 적외선 광원 (blackbody radiation infrared source)을 이용하여 반응도 (responsivity, R)와 검출률 (detectivity, D^*)을 도출하였다. 마지막으로, SLS 부준위 천이 에너지를 규명하기 위하여, 반응도의 온도의존성으로부터 활성화 에너지를 결정하였다.

II. 실험 방법

Fig. 1은 본 연구에서 시도한 InAs-GaSb 계에 대한 (a) 격자상수 (lattice constant, a_0) 변화에 따른 밴드갭 에너지와 (b) 초격자 밴드의 개략도를 제시하고 있다. Fig. 1(b)가 보여주고 있듯이, InAs/GaSb 계는 제2형 밴드정렬 (band alignment)을 가지는 대표적인 SLS 계로서, 격자부정합 (lattice mismatch, $\Delta a/a_0$)은 약 -0.6%이다. InAs의 전도대 (conduction band, CB)와 GaSb 가전대 (valence band, VB)는 약 0.15 eV 중첩되어 있으며, CB와 VB의 밴드 어긋남 (band offset)은 각각 약 0.95 eV와 0.55 eV로 알려져 있다 [8]. [InAs/GaSb]-SLS에서는 InAs의 CB는 전자우물 (electron well)이고 GaSb VB는 정공우물 (hole well)로서, 광반응 신호는 GaSb-VB에서 InAs-CB로의 간접천이 방식의 흡수에 의하여 발생된다. 수 nm 두께의 서로다른 물질계가 교대로 적층된 SLS 구조의 성장에는 분자층 (monolayer)을 정밀하게 제어할 수 있는 MBE (molecular beam epitaxy) 기법이 많이 이용되고 있다.

Fig. 2(a)는 본 시료 제작에 도입한 MBE 성장법에 관한 개략도로서, [InAs/GaSb]-SLS 활성층의 성장순서 (growth sequence)를 나타낸 도표이다. 1주기 InAs/GaSb [8/8]-

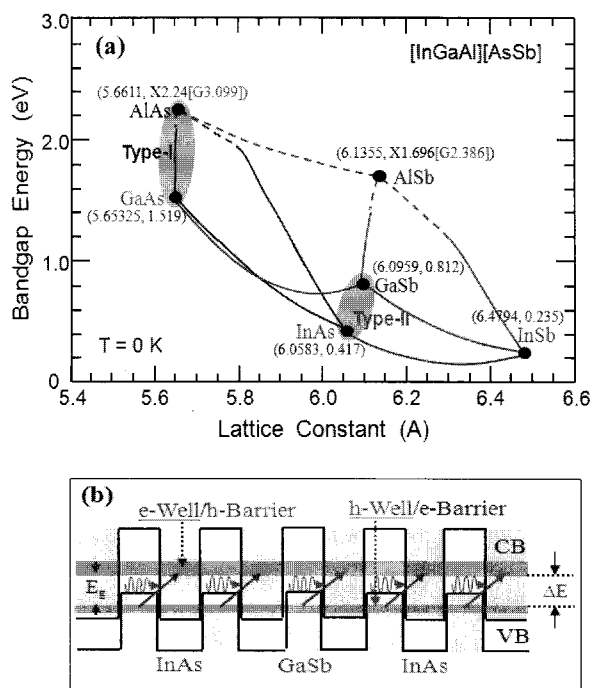


Figure 1. (a) Bandgap energy diagram as a function of lattice constant and (b) schematic band structure for InAs/GaSb type-II strained-layer superlattice system.

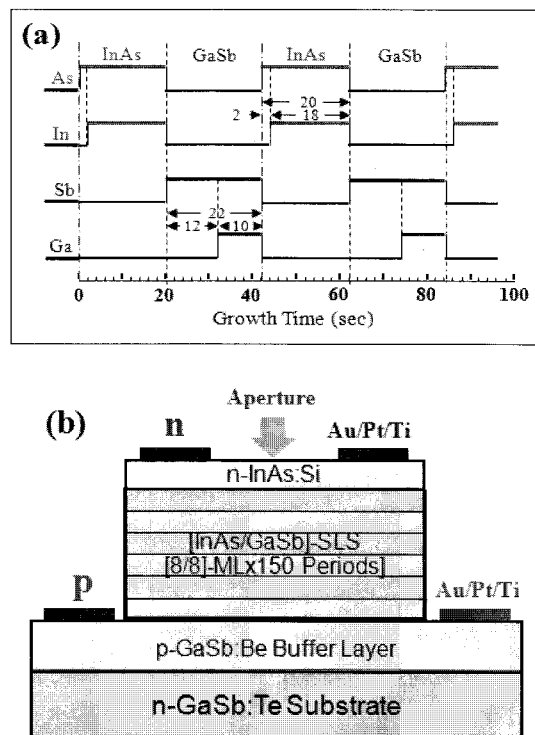


Figure 2. (a) Growth sequence and (b) device layer structure for InAs/GaSb strained-layer superlattice (P=150) sample used in this study.

ML 증착에는 18/10초가 소요되는데, 이때 InAs와 GaSb 증착 직전에는 각각 2초와 12초 동안 As과 Sb만을 기판 표면에 뿌려주는 흡착과정 (soaking process)이 삽입된다. 또한, 급격한 계면을 유지시키기 위하여, InAs와 GaSb 성장이 교차되는 사이에는 3초 동안 성장을 중지 (growth interruption)시켜 계면층의 형성을 최소화하였다. Fig. 2(b)는 본 연구에서 사용한 SLIP 시료의 층구조를 보여주는 단면도이다. 먼저 n^+ -GaSb 기판 위에 하부 전극층 (contact layer)으로 사용할 Be을 도핑한 p-GaSb:Be 완충층 (buffer layer)을 1 μm 성장한다. 이어서 기판온도를 150°C 내린 후, [8/8]-ML의 [InAs/GaSb]-SLS 150 주기를 연속하여 성장시키고, 마지막으로 n-InAs:Si (20 nm) 상부 전극층을 쌓아 소자구조를 완성한다. 이때, 하부 전극층과 SLS-상부 전극층의 성장 온도는 각각 510°C와 350°C이며, SLS의 As/In과 Sb/Ga의 V/III 분자선동기압력 (beam equivalent pressure, BEP) 비는 각각 4 (6.0/1.5 $\times 10^{-7}$ Torr)와 10 (15/1.5 $\times 10^{-7}$ Torr)이다.

Fig. 3 (a)와 (b)는 각각 시험소자 제작에 적용한 광묘화 (photolithography) 공정을 위한 개별소자용 광마스크 (photomask)의 도면과 광학 사진이며, 직경이 다른 6종류의 원형 개구면 (opening aperture)을 가지는 시험소자를 제작할 수 있도록 설계되어 있다. 상부 및 하부 전극층의 크기는 각각 (410 \times 410) μm^2 와 (690 \times 690) μm^2 이며, 단위 소자 (pixel) 사이의 간격은 750 μm 로 설정하였다. Fig. 3(b)에서 볼 수 있듯이, 광마스크에는 크기가 다른 단위 소자가 [6 \times 6] 배열로 구성되어 있는데, 본 연구에서 사용한 시료의 개구면 직경은 200 μm 이다. Mesa 형성에는 [(C₆H₈O₇+H₂O):H₂O₂=50:1] 용액에 의한 습식식각과 BCl₃의 ICP (Inductively Coupled Plasma)에 의한 건식식각을 이용하는데, 식각률 (etch rate)은 각각 1.56 $\mu\text{m}/\text{min}$ 와

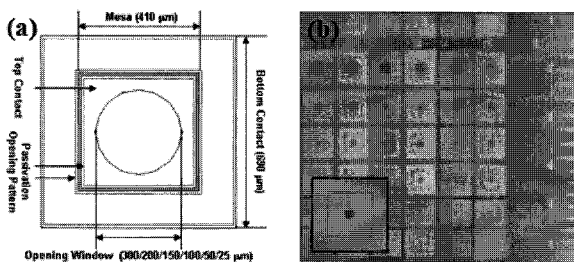


Figure 3. (a) Design of a single pixel and (b) layout of the array pixel of a test pattern for infrared photodetector.

80 nm/min (35 sccm)이다. p-GaSb는 모든 금속에 대하여 옴접촉 (ohmic contact) 특성을 나타내지만 n-GaSb에서는 옴접촉의 형성이 상당히 어려운 것으로 알려져 있는데, 본 시료의 n형 및 p형 전극에는 모두 Au/Pt/Ti (250/30/50 nm)의 다층 금속체를 채용하였다.

결정구조 분석을 위한 TEM 및 XRD 측정에는 시험소자의 활성층과 같은 조건에서 성장한 동일한 구조의 SLS (P=150) 시료가 추가로 마련되었다. 시험소자의 반응도 (R) 측정에는 파장별 복사출력 (spectral radiant power)을 제공하는 흑체복사 광원 ($\lambda \approx 3 - 20 \mu\text{m}$, Mikron M360)과 냉각형 HgCdTe (MCT) 검출기로 구성된 광반응 (photoresponse) 평가장비를 이용하였으며, FTIR (Fourier Transform Infrared) 분광기로 투과파장 대역과 투과율을 교정한 8개 대역투과 (band pass) 필터 ($\Delta\lambda = (0.14 \pm 0.05) \mu\text{m}$)가 광반응 스펙트럼을 얻는데 사용되었다. 인가전압 (bias voltage)과 입사파장 (입사에너지)은 각각 0-1.0 V와 3-6 μm (400-200 meV) 범위에서 변화시켰으며, 배경복사 (background radiation)를 차단한 폐쇄회로 He 저온장치 (closed-cycle He cryostat, 10 K)를 이용하여 13-200 K 온도 범위에서 측정을 수행하였다. 광반응 신호는 저잡음 전류증폭기 (low-noise current amplifier, SRS)와 lock-in 증폭기 (Perkin-Elmer 7265 DSP)를 사용하여 얻었으며, 검출률 (D*) 산출에는 2 kHz 대역의 잡음전류밀도 (noise current density)를 적용하였다.

III. 결과 및 논의

Fig. 4 (a)와 (b)는 각각 SLIP 활성층 구조와 동일한 [8/8]-ML [InAs/GaSb]-SLS (P=150) 시료에서 얻은 고분해능 TEM 이미지와 XRD 곡선이다. Fig. 4(a)의 TEM 사진 (위)은 초격자의 주기적 적층을 잘 보여주고 있으며, 성장방향 ([001])으로 휘도분포 (contrast profile)를 그린 아래 그래프는 각 주기의 초격자는 일정한 두께를 가지고 있음을 증명해 주고 있다. Fig. 4(b)의 XRD 스펙트럼이 InAs 덮개층 (cap layer)에 의한 명확한 신호와 ± 3 차까지 발달된 SLS 위성피크 (satellite peak)을 잘 보여주고 있음을 볼 때, 본 시료의 SLS는 급격한 계면과 균일한 층두께의 주기적 결정성을 유지하고 있음을 알 수 있다. GaSb 기판 피크에 비하여 SLS 0차 피크가 왼쪽 영역에 출현한 것

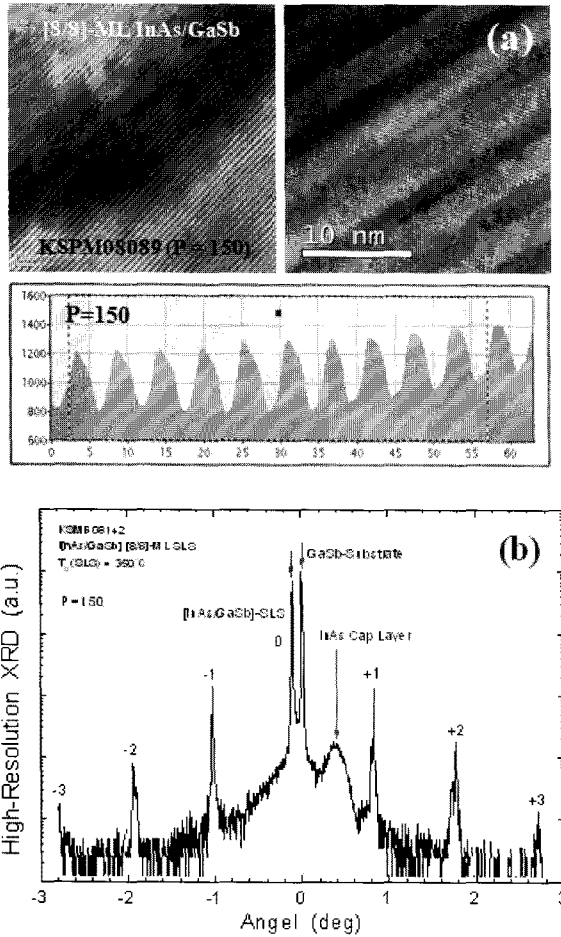


Figure 4. (a) High-resolution TEM image (upper) and the image contrast drawn along the [001] growth direction (lower) and (b) high-resolution XRD pattern obtained from InAs/GaSb (P=150) superlattice equivalent to the SLS active layer of sample used in this study.

은 압축응력 (compressive stress)을 의미하는 것으로서, XRD 모사 (simulation)을 통하여 이것은 약 1 ML의 InSb-like 계면상이 존재하기 때문에 밝혀졌다. 일반적으로, 전혀 다른 4종의 원소로 구성되어 있는 [InAs/GaSb]-SLS 계에는 GaAs-like와 InSb-like의 2종류의 유사 계면상이 형성될 수 있음이 알려져 있는데, InAs와 GaSb 보다 격자상수가 작은 GaAs-like는 인장변형 (tensile strain)을 받는 반면 격자상수가 큰 InSb-like는 압축변형을 받게 된다. 본 시료에서 관측한 XRD 결과는 InSb-like 계면상의 존재를 입증한 Steinshnider 등 [15]의 STM (scanning tunneling microscopy) 분석 결과와 잘 일치하고 있다.

Fig. 5는 3.25 μm /13 K에서 측정된 SLIP 시험소자의

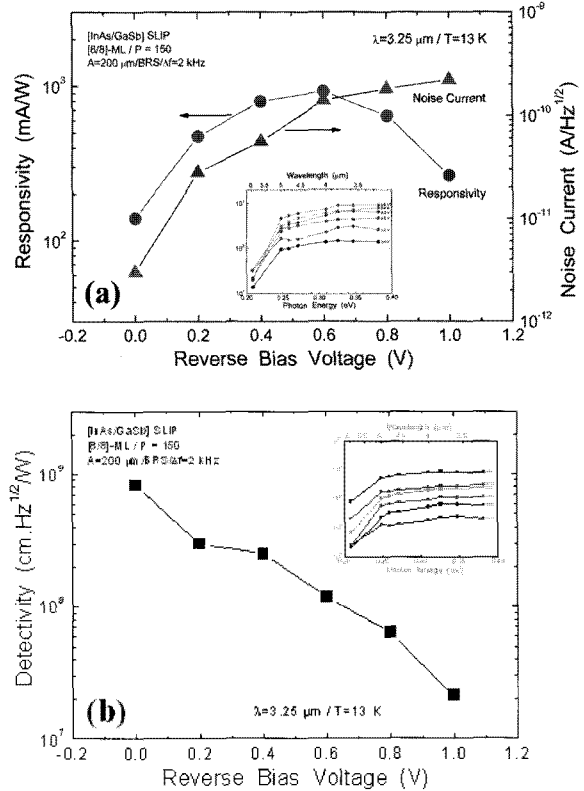


Figure 5. (a) Responsivity/noise current (2 kHz) and (b) detectivity (3.25 μm /13 K) plotted as a function of reverse bias voltage taken from InAs/GaSb SLIP sample used in this study. The insets of Figs. of (a) and (b) show (a) responsivity and (b) detectivity plotted as a function of photon energy at various bias voltages.

역전압 (0–1.0 V) 함수에 대한 (a) 반응도 (R) 및 대응 잡음전류 (2 kHz)와 (b) 이 값을 이용하여 산출한 검출률 (D^*)에 대한 곡선이다. (Fig. 5 (a)와 (b)에 삽입된 각각의 그래프는 각 역전압에서 얻은 입사파장 (3–6 μm /0.4–0.2 eV)에 대한 반응도 및 검출률 스펙트럼으로, $\sim 5 \mu\text{m}$ ($\sim 0.25 \text{ eV}$)에서 광반응이 차단 (cutoff)됨을 보여 준다.) 검출률은 계산에는 다음의 관계식,

$$D^* = \sqrt{(A) [R/J_N]} \quad (1)$$

을 사용하였다. 여기서, A는 소자의 개구면 면적 ($3.14 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$)이며, J_N 은 특정 파장대역 (Δf)에서의 잡음전류 밀도 ($I_N/\sqrt{(\Delta f)}$)이다. 인가전압의 증가에 따라 R은 -0.6 V 에서 $\sim 10^3 \text{ mA/W}$ (13 K)의 최대값을 가지고 있으나, 잡음전류는 지속적으로 커지고 있다. Fig. 5(b)의 D^* 가 0 V

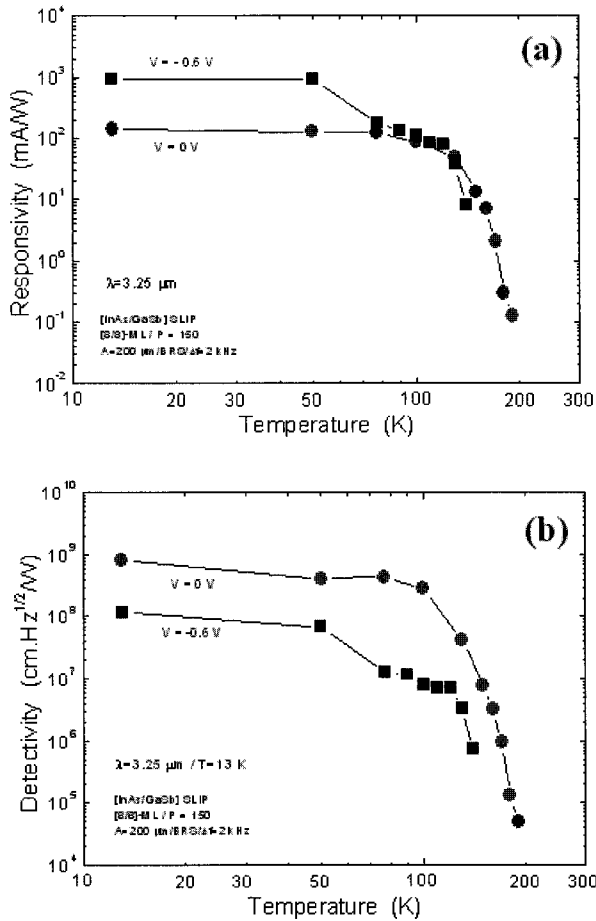


Figure 6. Temperature dependent curves of (a) responsivity and (b) detectivity (3.25 μm) taken from InAs/GaSb SLIP sample used in this study for a couple of bias voltages.

에서 최대값 $\sim 10^9$ cm·Hz^{1/2}/W (13 K)을 보이는 것은 잡음전류가 가장 작기 때문으로, 본 시료는 강한 광전압 (photovoltaic) 특성을 보임을 알 수 있다. 일반적으로, D*는 최적 역전압 하에서 최대값을 가지는 것으로 알려져 있는데, 본 시험소자가 0 V에서 최저 잡음과 최대 D*를 나타낸 것은 전압 인가에 따른 표면누설전류 (surface leakage current)의 발생이 주요 원인인 것으로 판단하고 있다.

R과 D*가 최대를 보인 인가전압 (-0.6 V/0 V)에서 얻은 각각의 온도의존 특성이 Fig. 6 (a)와 (b)에 제시되어 있다. 온도가 증가함에 따라 0 V에서 얻은 R과 D*는 모두 약 200 K까지 단순 감소하는 광반응을 나타내고 있으나, -0.6 V에 대한 값은 50 K부터 급격히 감소하여 150 K 근처에서는 소멸 (quench-out)됨을 보여주고 있다. Fig. 5의 논의에서와 같이, 이것은 온도의 상승에 따라 암전류와 함께 표면누설전류가 급격히 증가하기 때문으로 해석되는

데, 이 결과는 실용소자 제작에는 층구조의 최적화와 함께 표면보호층 (surface passivation layer)의 형성이 필수적임을 암시하고 있다. 보고된 연구결과에 의하면, GaSb 물질계에는 Ga/Sb 위치반전 (anti-site) ([Ga_{Sb}], [Sb_{Ga}]), Ga 빈자리 (Ga-vacancy, [V_{Ga}]), 또는 그 복합체 (complex) 등과 같은 진성결함 (intrinsic defect)이 약 10¹⁷ cm⁻³ 밀도로 잔존하고 있고, 특히 소자 표면에 형성된 산화물 (Ga-Sb-In-As-O_x)이 표면전류의 채널 (channel)로 작용하여 검출률을 급격히 저하시키는 것으로 알려져 있다 [8,16,17]. 본 연구에서 제작한 SLIP가 표면처리하지 않은 시험소자임을 감안할 때, SiO₂ 등과 같은 표면보호층을 증착시키면 수 10배 이상의 특성 향상을 기대할 수 있으며, 현재 소자구조 최적화와 함께 표면처리 공정에 관한 실험을 진행하고 있다.

검출률 D*는 소자의 크기와 잡음전류에 크게 의존하는 반면, 반응도 R은 활성층 SLS의 내부효율과 관련된 계의 고유 특성값으로 다음과 같이 정의된다. 즉,

$$R = (e/hc)\lambda n G_{\lambda} \sim G_{\lambda} \tag{2}$$

여기서, (e/hc)는 전자의 전하 (e), Planck 상수 (h), 광속 (c)으로 구성된 상수이고, λ와 n은 각각 입사광의 파장과 계의 양자효율이다. 식(2)의 G_λ는 광반응 과정에 개입된 에너지와 관련된 파장 λ에서의 SLS 활성층의 광전도이득 (photoconductive gain)으로, 온도 변화에 대하여

$$R \sim G_{\lambda}(\Delta E) \sim \exp[-\Delta E/k_B T] \tag{3}$$

와 같이 표현할 수가 있다. 여기서 (k_BT)는 열에너지이며, ΔE는 온도변화에 대한 활성화 에너지 (activation energy)인 파라미터이다. Fig. 6(a)의 반응도를 역온도 함수 (R-1000/T)로 재구성한 그래프가 Fig. 7에 제시되어 있는데, 선형적 증가를 명확하게 나타내고 있는 0 V 그래프에 대한 활성화 에너지는 ΔE = 275 meV (150-200 K)임을 알았다. 이것은 [8/8]-ML의 [InAs/GaSb]-SLS의 VB의 제1 중정공 부준위 (HH1)와 CB의 전자 부준위 (C) 사이의 에너지 차이에 해당하는 값과 잘 일치하고 있다. Ongstad 등 [18]과 Kaspi 등 [19]은 InAs/GaSb [8/8]-ML SLS 계에서 측정된 [HH1-C] 천이 에너지는 각각 283 (55 K)와 286 meV (77 K)임을 보고하였으며, Ongstad 등 [18]과

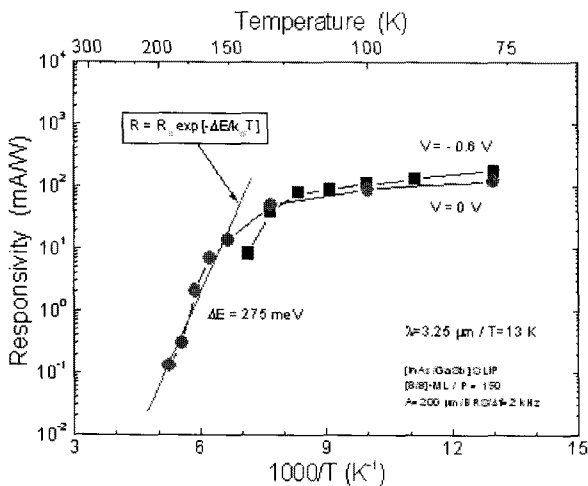


Figure 7. Responsivity (3.25 μm) plotted as a function of inverse temperature ($1000/T$) showing an activation energy of photoconductive gain taken from InAs/GaSb SLIP sample used in this study for a couple of bias voltages.

Dante와 Tilton [20]은 EPM (empirical pseudopotential model) 방법으로 계산한 결과는 각각 290 meV (55 K)와 275 meV (77 K)임을 발표한 바가 있다. 또한, n-B-n 구조 [13]를 삽입한 MW-LW 이중밴드 InAs/GaSb SLIP 구조에서 본 연구진 [21]이 얻은 MW 밴드 ([8/8]-ML)에 대한 온도의존 흡수단 에너지는 30-300 K에서 272-218 meV임을 보고한 바 있다. 지금까지 보고된 결과들과 비교해 볼 때 본 연구에서 얻은 활성화 에너지 (275 meV)는 [HH1-C] 천이 에너지임이 분명하며, 이것은 R의 온도의존성을 이용하면 SLS의 부준위 에너지를 결정할 수 있음을 보여준 중요한 결과인 것으로 사료된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 MBE 방법으로 성장한 InAs/GaSb (8/8-ML \times 150) SLIP 개별소자 (직경 200 μm)의 시험 제작과 광반응 특성을 보고하였다. 고분해능 TEM와 XRD로 SLS의 결정성을 분석하였으며, 흑체복사 적외선 광원을 이용하여 입사파장 및 인가전압에 대한 반응도 (R)와 검출률 (D^*)의 변화를 조사하였다. TEM 이미지의 휘도분포와 XRD 곡선의 위성피크는 SLIP 활성층은 균일한 두께와 주기적 응력변형을 유지하고 있는 급격한 계면의 SLS임을 입증해 주었으며, 광반응 스펙트럼 분석 결과는 차단파장은

$\sim 5 \mu\text{m}$ 이고, 3.25 μm 파장에서 R과 D^* 의 최대값은 각각 $\sim 10^3 \text{ mA/W}$ ($-0.6 \text{ V}/13 \text{ K}$)와 $\sim 10^9 \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ ($0 \text{ V}/13 \text{ K}$)임을 보여 주었다. 또한, R의 온도의존성으로부터 분석한 275 meV 활성화 에너지는 광반응 과정에 개입된 [HH1-C] 천이 에너지임을 밝혔다. 전압을 인가할 경우, R/ D^* 가 50 K 근처에서 급격히 감소하여 150 K에서 소멸되는 현상은 표면결함에 의한 누설전류가 주요 원인인 것으로 논의되었으며, 소자의 특성 향상을 위해서는 소자구조의 최적화와 함께 표면보호층의 형성이 필수적임을 언급하였다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구원 (ADD)의 연구비 (No. 79-09-05) 지원으로 수행되었으며, 시료 제작 및 측정은 한국 표준과학연구원 기본연구의 일환으로 반도체박막연구실에 설치되어 있는 장비를 이용하여 수행하였음을 밝힙니다.

참고문헌

- [1] S. G. Choi, A. S. Reddy, B.-G. Yu, H. Ryu, and H.-H. Park, *J. Korean Vacuum Soc.* **17**, 130 (2008).
- [2] B. Movaghar, S. Tsao, S. Tsao, S. A. Pour, T. Yamanaka, and M. Razeghi, *Phys. Rev. B* **78**, 115320 (2008).
- [3] W. Q. Ma, X. J. Yang, M. Chong, T. Yang, L. H. Chen, J. Shao, X. Lu, W. Lu, C. Y. Song, and H. C. Lin, *Appl. Phys. Lett.* **93**, 013502 (2008).
- [4] 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).
- [5] S. Tsao, H. Lim, W. Zhang, and M. Razeghi, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 201109 (2007).
- [6] E.-T. Kim, Z. Chen, and A. Madhukar, *J. Korean Phys. Soc.* **49**, 837 (2006).
- [7] J. O. Kim, S. J. Lee, S. K. Noh, J. W. Choe, and T. W. Kang, *J. Korean Phys. Soc.* **53**, 2100 (2008).

- [8] P. S. Dutta and H. L. Bhat, *J. Appl. Phys.* **81**, 5821 (1997).
- [9] B.-M. Nguyen, D. Hoffman, P.-Y. Delaunay, and M. Razeghi, *Appl. Phys. Lett.* **91**, 163511 (2007).
- [10] 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).
- [11] S. Mou, A. Petschke, Q. Liu, S. L. Chuang, J. V. Li, and C. J. Hill, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 153505 (2008).
- [12] 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).
- [13] S. Maison and G. W. Wicks, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 151109 (2006).
- [14] 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).
- [15] J. Steinshnider, M. Weimer, R. Kaspi, and G. W. Turner, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 2953 (2000).
- [16] J. O. Kim, H. W. Shin, J. W. Choe, S. J. Lee, and S. K. Noh, *J. Korean Vacuum Soc.*, Submitted (2009).
- [17] M. Herrera, M. Chi, M. Bonds, N. D. Browing, J. N. Woolman, R. E. Kvaas, S. F. Harris, D. R. Rhiger, and C. J. Hill, *Appl. Phys. Lett.* **93**, 093106 (2008).
- [18] A. P. Ongstad, R. Kaspi, C. E. Moeller, M. L. Tilton, D. M. Gianardi, J. R. Chavez, and G. C. Dente, *J. Appl. Phys.* **89**, 2185 (2001).
- [19] R. Kaspi, C. Moeller, A. Ongstad, M. L. Tilton, D. Gianardi, G. Dente, and P. Gopaladasu, *Appl. Phys. Lett.* **76**, 409 (2000).
- [20] G. C. Dente and M. L. Tilton, *J. Appl. Phys.* **86**, 1420 (1999).
- [21] S. J. Lee, S. K. Noh, L. R. Dawson, and S. Krishna, *J. Korean Phys. Soc.* **54**, 280 (2009).

Fabrication and Device Characteristics of Infrared Photodetector Based on InAs/GaSb Strained-Layer Superlattice

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 11, 2009, Accepted March 23, 2009)

The superlattice infrared photodetector (SLIP) with an active layer of 8/8-ML InAs/GaSb type-II strained-layer superlattice (SLS) of 150 periods was grown by MBE technique, and the proto-type discrete device was defined with an aperture of 200- μm diameter. The contrast profile of the transmission electron microscope (TEM) image and the satellite peak in the x-ray diffraction (XRD) rocking curve show that the SLS active layer keeps abrupt interfaces with a uniform thickness and a periodic strain. The wavelength and the bias-voltage dependences of responsivity (R) and detectivity (D^*) measured by a blackbody radiation source give that the cutoff wavelength is $\sim 5 \mu\text{m}$, and the maximum R and D^* ($\lambda=3.25 \mu\text{m}$) are $\sim 10^3 \text{ mA/W}$ ($-0.6 \text{ V}/13 \text{ K}$) and $\sim 10^9 \text{ cm.Hz}^{1/2}/\text{W}$ ($0 \text{ V}/13 \text{ K}$), respectively. The activation energy of 275 meV analyzed from the temperature dependent responsivity is in good agreement with the energy difference between two SLS sublevels of conduction and valence bands (HH1-C) involving in the photoresponse process.

Keywords : Infrared photodetector, InAs/GaSb, Strained-layer superlattice, Transmission electron microscopy (TEM), X-ray diffraction (XRD), Responsivity (R), Detectivity (D^*)

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