

InAs/GaSb 제2형 응력 초격자 nBn 장적외선 검출소자 설계, 제작 및 특성평가

김하솔^{a*} · 이 훈^a · Brianna Klein^b · Nutan Gautam^b · Elena A. Plis^b
Stephen Myers^b · Sanjay Krishna^b

^a전남대학교 물리학과, 광주 500-757

^bCenter for High Technology Materials, University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico 87106, USA

(2013년 10월 16일 받음, 2013년 11월 2일 수정, 2013년 11월 6일 확정)

InAs/GaSb 제2형 응력 초격자(strained layer type II superlattice, T2SL)을 이용한 nBn 구조 장적외선 검출소자의 설계 및 제작을 하였다. InAs와 GaSb 두께에 따른 T2SL 구조의 장적외선 밴드갭 에너지를 Kronig-Penney 모델을 이용하여 계산하였다. 소자의 압전류 밀도를 줄이기 위해서, nBn 구조에서 장벽층인 Al_{0.2}Ga_{0.8}Sb 성장 중에 Te 보상도핑(compensated doping)을 하였다. 온도(T) 80 K 및 인가전압(V_b) -1.5 V에서, 반응스펙트럼 측정을 통한 소자의 차단파장은 ~10.2 μm (~0.122 eV)로 나타났다. 또한 온도 변화에 따른 압전류 측정으로부터 도출된 활성화 에너지는 0.128 eV로 계산되었다. T=80 K 및 V_b=-1.5 V에서 압전류는 1.0×10⁻² A/cm²으로 측정되었다. 흑체복사 적외선 광원을 이용한 반응도(Responsivity)는 소자 온도 80 K 및 인가전압 -1.5 V의 조건에서 0.58 A/W로 측정되었다.

주제어 : 장적외선 검출소자, 응력 초격자, 인듐비소/갈륨안티모니, Kronig-Penney 모델, 반응도(R)

I. 서 론

적외선 검출소자(infrared photodetector)는 산업 현장에서 공정진단, 전자 제품의 발열 특성 평가, 신체의 체열 분포 및 국방용 열영상 센서 등으로 이용되고 있다. 적외선 검출 목적의 상업용 반도체 물질로는 낮은 밴드갭 에너지를 가진 pn 접합 구조의 InSb 및 HgCdTe (MCT)를 주로 이용하고 있다 [1]. 중적외선 탐지를 위하여 사용되는 InSb 소자는 고정된 밴드갭(band gap)을 가지고 있다. 따라서 제3세대 적외선 검출소자에서 요구되는 다파장 검출기(multi-color detector)로서의 사용이 불가능하다는 것이 하나의 단점이다. 장적외선 검출소자로 주로 사용되는 MCT 소자 경우, 균일한 성분의 화합물을 대면적으로 성장하기 위하여 많은 비용이 소요되는 단점이 지적되어 오고 있다. 이러한 단점을 극복할 수 있는 적외선 검출기로서, 양자우물 적외선 검출기(quantum well infrared photodetector, QWIP) 및 양자점 적외선 검출기(quantum dot infrared photodetector)에 대한 연구가 과거에 활발하게 진행되었다. 그러나 QWIP 및 QDIP 적외선 검출기는 낮은

양자효율(<10%)로 인하여 실용적 열영상 소자가 요구하는 고온 동작이 불가능 하다 [2].

G.A. Sai-Halaz, R. Tu 그리고 L. Esaki 등에 의하여 제안된 InAs/GaSb 초격자 기반의 적외선 검출소자는 현재 상용화 하여 사용 중인 적외선 검출소자를 대체할 수 있는 유력한 물질 구조로 여겨지고 있다 [3-5]. InAs/GaSb 초격자 구조의 밴드 에너지 정렬은 InAs 전도대(conduction band)가 GaSb 가전자대(valence band) 보다 0.15 eV 아래로 배열된 깨어진 갭(broken gap)을 갖는 T2SL 구조를 형성한다. 이러한 InAs/GaSb T2SL은 동일 파장대역을 감지할 수 있는 MCT와 비교하여 큰 전자 유효질량(large electron effective mass, ~0.04 m₀)을 보이고 있어 투과 전류(tunneling current)를 줄일 수 있다 [6]. 또한 InAs/GaSb T2SL 구조에서 전자(electron)는 InAs 영역에 분포하며, 정공(hole)은 GaSb 영역에 분포하여 오제 재결합률(Auger recombination rate)을 효과적으로 줄일 수 있어 소자의 동작 온도를 크게 증가시킬 수 있다 [6]. 최근에는 GaSb 기판 제조 기술의 발전으로 인하여 고순도 GaSb 기판을 사용하여 직경 2~3 인치 크기의 균일한 InAs/GaSb

* [전자우편] hydenkim@jnu.ac.kr

초격자 박막을 성장시킬 수 있는 분자선 에피택시(molecular beam epitaxy, MBE) 기술이 발전하였다 [7]. 더불어 InAs/GaSb T2SL 구조는 고정된 형태의 밴드갭을 갖지 않고 InAs와 GaSb 두께의 변화에 의하여 밴드갭을 조절할 수 있다. 이러한 밴드갭 엔지니어링(band gap engineering) 기술에 의하여 중파장 적외선(mid wavelength infrared, MWIR, 3~5 μm) 및 장파장 적외선(long wavelength infrared, LWIR, 8~12 μm) 대역을 검출할 수 있는 구조로의 개발이 가능하다 [8].

대부분의 InAs/GaSb T2SL 적외선 검출기는 p-i-n 구조를 가지고 있다. 이러한 구조에서 소자 성능은 암전류에 의존하게 된다. 암전류의 주요 요인은 확산 전류(diffusion current), 표면 전류(surface leakage current), 생성 및 재결합 전류(generation-recombination current), 밴드갭 내에 존재하는 트랩에 기인하는 전류(trap assisted tunneling current) 성분 등으로 분류될 수 있다. p-i-n 구조를 갖는 소자의 성능을 개선하는 방법으로, M 구조를 가진 InAs/GaSb T2SL 구조가 제안되었다 [9]. 이는 통상적인 InAs/GaSb 초격자 구조에서 GaSb 층의 성장 과정에 큰 밴드갭을 갖는 AlSb를 얇게 성장함으로써 GaSb 층에 이중 양자우물(double quantum well) 구조를 생성하여 정공 구속(hole confinement) 효과를 높이게 된다. 또한 활성층에 π 도핑을 하여, p- π -M-n 구조를 갖는 적외선 소자는 p-i-n 구조와 비교하여 암전류가 약 10% 감소하여 소자의 전기적 특성이 크게 개선됨을 보였다 [10]. 이상준 등은 응력 초격자에 기초한 p-i-n 구조의 열영상 모듈 제작 연구에서 초격자 성장 과정 중 응력 보정을 위하여 InSb (~0.7 ML)와 AlSb (~3.0 ML) 삽입하였다. 그 결과 적외선 반응 스펙트럼 위치가 단파장 쪽으로 이동하는 청색편이 효과를 보였다. 또한 이 소자는 3.8 μm 차단 파장 특성을 갖으며 열상소자로서 180 K까지 동작함을 보고하였다 [5].

최근 Maimon은 n형 InAs의 반도체 박막 사이에 큰 밴드갭을 갖는 물질(AlAsSb)을 성장시켜 소자의 암전류를 크게 줄일 수 있는 nBn 구조를 가진 적외선 소자 특성을 보고 하였다 [11]. 이형구조(heterostructure) nBn 구조 적외선 검출소자는 전극 형성을 위하여 상부와 하부에 두 개의 n 전극층, 큰 밴드갭을 갖는 장벽층(barrier layer), 2~5 μm 두께를 갖는 활성층(active layer) 등으로 구성되어 있다. nBn 구조에는 p-i-n 구조에 존재하는 공핍층

(depletion region)이 없으므로 생성-재결합에 관련된 암전류와 확산 전류를 구조적으로 제거할 수 있다. 또한 다수 캐리어인 전자는 장벽층에 의하여 움직임(movement)이 제한되는 것에 반하여 소수 캐리어(정공)은 전극 사이에서 장벽층의 영향을 받지 않으며 자유롭게 움직일 수 있다.

T2SL 구조에 기반한 최초의 InAs/GaSb T2SL nBn 적외선 검출소자는 50 nm 두께의 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{Sb}$ 장벽층과 InAs/GaSb T2SL를 적층한 구조로 만들어졌다 [12]. 이 소자는 동일한 파장대역의 p-i-n 구조의 소자와 유사한 적외선 검출 성능을 보였다. 이후 Kim 등은 암전류를 줄이고, 정공의 흐름을 원활하게 유지하기 위하여 장벽층 두께를 100 nm로 조정하고, 장벽층인 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ 박막의 Al 조성을 $x=0.2$ 로 낮춘 InAs/GaSb T2SL 구조에 대한 연구 보고를 발표하였다 [13]. 이 소자는 중적외선 초점면 배열(focal plane array) 소자로서 NETD (noise equivalent temperature difference)는 23 mK으로 측정되었으며, 암전류 밀도는 77 K에서 $\sim 10^{-7}$ A/cm² ($V_b=0.7$ V)를 보였다. Khoshakhlagh 등은 InAs/Ga(In)Sb T2SL nBn 구조를 이용하여 100 mV의 바이어스(bias) 변화에 따른 중적외선 및 장적외선을 선택적으로 측정할 수 있는 nBn 소자에 대한 발표를 하였다 [14]. 또한 Myers 등은 InAs/GaSb T2SL nBn 적외선 검출소자의 활성층 도핑 농도에 따른 성능변화에 대한 연구를 수행하여, 도핑을 실시하지 않은(non-intentionally doping) 소자가 가장 작은 암전류 밀도를 보인다는 것을 발표하였다 [15].

본 연구는 장적외선 InAs/GaSb T2SL nBn 구조에 기초한 장적외선 검출소자의 활성층 설계와 단일 소자 제작을 통한 적외선 검출 소자의 전기적, 광학적 특성 연구 및 장벽층의 도핑 효과에 관한 것이다. 이는 이상준 [5] 등에 의하여 연구되었던 p-i-n 구조와 활성층은 유사하나 p 전극층을 n 전극층으로 전환하였으며, n 전극층과 활성층 사이에 AlGaSb 장벽층을 성장한 구조이다. InAs와 GaSb 두께에 따른 활성층 밴드갭의 이론적 계산은 EFA (modified envelope function approximation), K·P, SEPM (super-lattice empirical pseudopotential method) 등을 이용하여 계산하였다 [16-18]. 그러나 이러한 방법은 이론적 접근이 어렵고 많은 전산 모사를 통한 계산을 수반한다. 본 연구에서는 간단한 Kronig-Penney 모델에 기초하여 InAs/GaSb T2SL nBn 구조에서 활성층의 InAs와 GaSb 두께에 따른 밴드갭 에너지를 계산하였다. 성장된 nBn 구조의

AlGaSb 장벽층은 소자의 성장 중, 자연적 도핑(intrinsic back ground doping) 낮은 농도의 p형을 나타낸다. 따라서 이를 보상하기 위해서 AlGaSb 성장 동안 의도적으로 (intentionally) n 도펀트를 주입시켰다. 성장된 물질의 구조는 X선회절(x-ray diffraction, XRD)을 이용하여 분석하였으며, 단일 소자 공정을 통하여 만들어진 소자의 파장대역별 감도(spectral response)는 푸리에 변환 적외선 분광기(fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)를 이용하여 측정하였다. 또한 소자의 온도에 따른 암전류 특성을 측정하였으며, 특정 인가 전압에서의 암전류를 온도에 따른 함수 관계로 분석하여 활성화 에너지(activation energy)를 구하였다. 흑체복사 적외선 광원(black body radiation infrared source)을 이용하여 제작된 소자의 인가전압에 따른 광 반응도(responsivity, R)를 측정하였다.

II. 실험방법

본 연구에서는 InAs/GaSb T2SL 구조에서 형성되는 전자와 정공의 미니밴드(miniband) 구조 계산을 위해 Kronig-Penney 모델을 이용하였다. Fig. 1은 물질 성장에 방향에 따른 InAs/GaSb T2SL 구조의 밴드 배열(band alignment)을 나타내었다. z축은 성장방향을 나타내며, 전자와 정공은 공간적으로 분리되어 InAs 영역과 GaSb 영역에 각각 분포 한다는 가정을 하였다. 격자상수 부정합에서 발생하는 변형력(strain)은 고려하지 않았다. InAs/GaSb 초격자 구조를 Kronig-Penney model에 적용하면, 한 주기에서의 파동함수는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\Psi_n(z) = \begin{cases} Ae^{ik_a z} + Be^{-ik_a z}, & -w_a \leq z \leq 0 \\ Ce^{ik_b z} + De^{-ik_b z}, & 0 \leq z \leq w_b \end{cases} \quad (1)$$

여기서 파수(wave number) k_a 와 k_b 는 $\sqrt{2m_a E/\hbar^2}$ 와 $\sqrt{2m_b(E - V_0)/\hbar^2}$ 로 정의된다. w_a 와 w_b 는 InAs와 GaSb 두 계를 나타내므로, 초격자의 한 주기는 Fig. 1의 $L (=w_a+w_b)$ 로 주어진다. 또한 m_a 와 m_b 는 InAs와 GaSb의 전자와 정공의 유효질량(effective mass)을 각각 나타낸다. Kronig-Penney 모델을 InAs/GaSb 초격자 구조에 적용하여, 파동함수 및 파동함수의 1차 미분에 대한 연속조건($z=0$)을 이

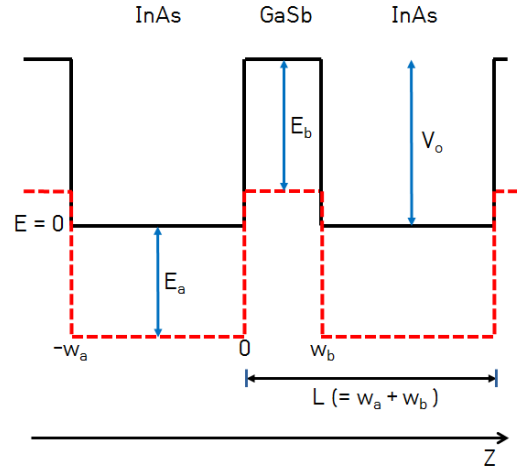


Figure 1. The band alignment of the InAs/GaSb T2SL is shown along the growth direction (z axis). E_a and E_b are, respectively, the band gap of the InAs and GaSb layers. w_a and w_b represent the thickness of the InAs and GaSb layers respectively. The bottom of the conduction of the InAs layer is set as the energy base-line ($E=0$). V_0 is the energy well depth for the electrons. L is defined as the length of one period or the sum of w_a and w_b .

용하여 행렬식으로 풀면, 식(2)로 표현되는 전자에 대한 고유방정식을 구할 수 있다. $E < V_0$ 인 경우 전자는 InAs 내에 구속되어 있으며, k_b 는 허수 값을 갖게 된다. 따라서 식 (2)는 $-1 \leq f(E) \leq 1$ 인 범위 내에서 유효한 고유값이 존재하며, InAs/GaSb T2SL 구조의 InAs 영역에 구속(confinement)된 전자의 미니밴드를 구할 수 있었다. 같은 방법을 사용하여 GaSb층 내에 구속된 정공의 미니밴드 역시 구할 수 있다.

$$f(E) = \begin{cases} \cos k_a w_a \cosh \beta_b w_b + \\ \frac{1}{2} \left(\eta - \frac{1}{\eta} \right) \sin k_a w_a \sinh \beta_b w_b \end{cases} \quad (2)$$

여기서 파라메타 β_b 와 η 는 $\sqrt{2m_b(V_0 - E)/\hbar^2}$ 와 $m_a \beta_b / m_b k_a$ 로 각각 정의된다.

Fig. 2는 InAs층에 존재하는 전자의 전도대 바닥 에너지와 GaSb층 가전자대 최대 에너지의 차를 Kronig-Penney 모델을 이용하여 계산한 값으로서 InAs/GaSb T2SL의 밴드갭 에너지이다. Fig. 2(a)는 GaSb층을 7 ML로 고정하고 InAs 층을 12 ML에서 16 ML까지 변화 시킬 때 밴드갭 에너지 변화를 나타낸다. Fig. 2(b)는 InAs층을 14 ML로 고

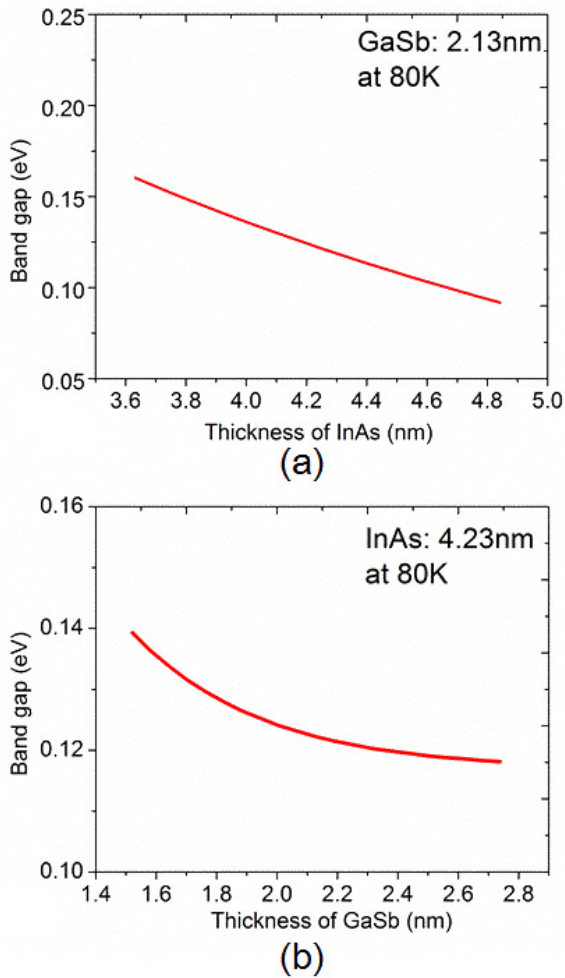


Figure 2. The calculated band gap energies from the top of the hole miniband in the GaSb layer to the bottom of the electron miniband in the InAs layer at 80 K. The GaSb layer (7 ML) is fixed but the InAs layer is varied from 12 ML to 16 ML in figure (a). The InAs layer (14 ML) is fixed but the GaSb layer is varied from 5 ML to 9 ML in figure (b).

정을 하고 GaSb 층을 5ML에서 9ML까지 변화 시킬 때 밴드갭 에너지 변화를 나타낸다. 소재의 온도는 80 K으로 가정하고 각각 계산을 하였다. 두 그림에서 알 수 있듯이, InAs와 GaSb의 두께 조절에 의하여 적외선 탐지 파장을 적절하게 조정할 수 있음을 알 수 있다.

InAs/GaSb T2SL nBn 구조는 Te 도핑된 GaSb 기판(2") 웨이퍼를 사용하여 분자선 에피택시(molecular beam epitaxy, VG-80 MBE system)를 이용하여 성장하였다. Fig. 3(a)는 성장 에피 박막 구조를 나타낸다. 에피 소재는 GaSb 기판에 식각 정지층(etch stop layer, ESL)으로 사

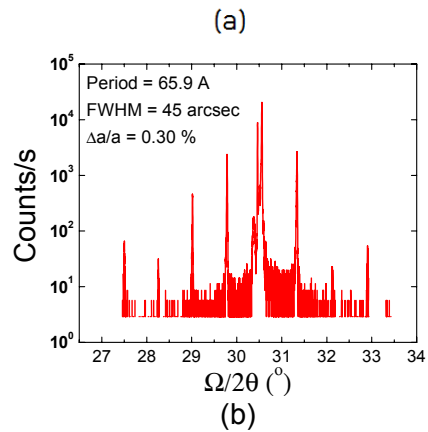
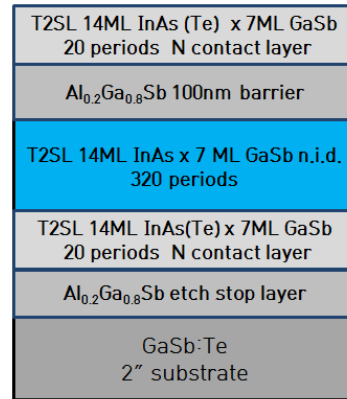


Figure 3. Schematic of the grown InAs/GaSb T2SL nBn structures in figure (a). X-ray diffraction (XRD) spectrum of the grown InAs/GaSb T2SL nBn detector in figure (b).

용되는 200 nm의 $Al_{0.2}Ga_{0.8}Sb$ 를 성장하고 하부 전극층으로 한 주기가 4.2 nm InAs (Te 도핑, $n=4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)/2.1 nm GaSb로 구성되는 T2SL 구조를 90주기 성장하였다. 활성층 영역은 분자선 에피택시 내부로부터 자연적인 도핑 (non-intentional doped)이 되도록 유지하면서, 한 주기가 InAs (4.2 nm)/GaSb (2.1 nm)로 구성되는 T2SL 구조를 320 주기 성장하였다. 전자의 움직임을 제한하는 장벽층은 100 nm의 $Al_{0.2}Ga_{0.8}Sb$ (Te, $n=1.8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)를 성장하였다. 마지막 상부 전극층은 하부 전극층과 동일한 구조로 20 주기를 성장하였다. 초격자층 성장 동안에 소재의 격자상수 부정합 보정을 위하여 InSb 층이 삽입 되었다. Fig. 3(b)는 X-선 회절 분석법을 이용한 초격자 박막의 구조 분석을 통하여 InAs/GaSb 한 주기가 65.9 Å으로 구성되어 있으며, 첫 번째 SSP (satellite superlattice peak)의 반치폭(full width at half maximum) 45 arcsec가 됨을 보여주고 있다.

성장 시료의 전기 및 광학적 특성을 평가하기 위한 단위 소자의 크기는 $410 \times 410 \mu\text{m}$ 이며, 직경 25에서 $300 \mu\text{m}$ 크기의 원형 개구면(open circle aperture)을 갖도록 마스크 제작을 하였다. 양각 광묘화(positive photo-lithography)를 실시하여 시험 소자의 크기에 해당되는 면에는 AZ4330 photo resist 가 남아 있도록 한 후, BCl_3 가스를 사용하는 유도방전 플라즈마(inductively coupled plasma) 건식 식각법을 이용하여 상부 전극층을 제외한 부분은 식각 하였다. 이후 동일한 식각법을 이용하여 하부 전극층의 중간 영역까지 식각을 실시하였다. 소자의 전기적 특성 측정을 위하여, 상부 전극층 및 하부 전극층 오믹 컨택

(ohmic contact) 금속은 Ti/Pt/Au ($500 \text{ \AA} / 500 \text{ \AA} / 3000 \text{ \AA}$)를 사용하였다. 완성된 소자는 세라믹 패키지에 옮겨 Au 금속선으로 본딩하여 전기적 및 광학적 특성 평가할 수 있도록 하였다. Fig. 4(a)는 완성된 소자의 단면도이다. p-i-n 구조의 포토다이오드에서는 하부 전극층 까지 소자의 식각을 행하나, 본 연구에서 소자의 크기는 단지 상부 전극의 크기에 의하여 결정 된다. 이는 장벽 및 활성층끼리의 소자는 물리적으로 연결이 되어 있으나, 소자에 바이어스를 가하면 소자의 측면 확산거리(diffusion length)에 의하여 전기적으로 분리됨을 의미한다. 따라서 단일 소자의 측면이 공기에 노출되지 않으므로 표면 산화막 방지를 위한 표면 보호층이 필요하지 않는 장점이 있다.

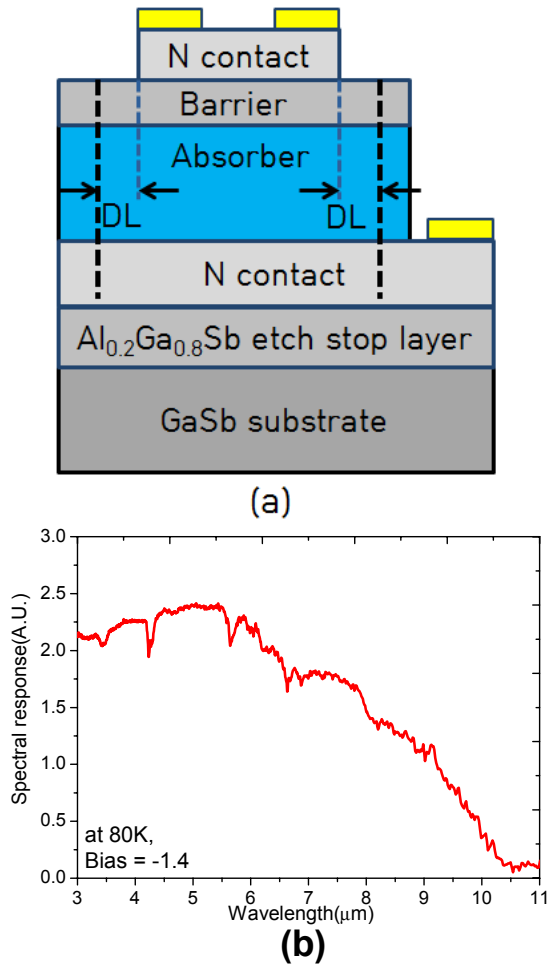


Figure 4. (a) Schematic of a fabricated device using a shallow etching scheme in which the pixel is defined by the minority carrier diffusion length (DL). (b) Relative spectral response versus wavelength at 80K under an applied bias of -1.4 V .

III. 실험결과 및 논의

Fig. 4(b)는 FTIR (Fourier transform infrared spectroscopy)를 이용하여 측정된 단일 소자의 파장별 반응을 나타낸 값이다. 100% 차단 파장(zero-response cutoff wavelength, $\lambda_{100\%}$)은 $V_b = -1.4 \text{ V}$, $T = 80 \text{ K}$ 에서 $\sim 10.2 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 또한 인가전압 -1.4 V 에서 -2.2 V 사이에서 최상의 스펙트럼을 관측 할 수 있었다. nBn 소자는 외부에서 가해주는 인가전압에 의하여 생성된 전자와 정공이 각각 반대 방향으로 움직이면서 소자의 전도도가 변화하게 된다. 특히 AlGaSb가 성장중에 p형 물질로 성장이 됨으로 이를 보정하기 위한, n형 도핑(Te)을 실시하여 보상 도핑(compensated doping)을 하였다. 그러나 이러한 도핑은 장벽의 페르미 레벨(fermi level) 변화를 유도하여, AlGaSb 층이 정공 움직임에 대한 낮은 장벽으로 작용한 것으로 사료된다. 따라서 높은 바이어스 인가 조건에서 소자의 광반응(photo-response)이 일어나는 것으로 판단된다.

암전류 측정은 반도체 파라미터 분석장치(semiconductor parameter analyzer, HP 4145B), closed shield를 가진 순환형 냉각기(closed cycle cryostat, Janis)와 온도 조절기(temperature controller, Lakeshore, 325)를 이용하여, $50 \sim 280 \text{ K}$ 까지 온도 변화를 주면서 측정 하였다. Fig. 5(a)와 같이 암전류 밀도는 주어진 인가전압에 대해서 비대칭적인 분포를 보이고 있다. 이는 상부 전극층과 활성층 사이에 위치한 AlGaSb층 성장에 따른 것이다. 측정온도 80 K 및 인가전압 -1.4 V 에 대한 암전류 밀도($\sim 2.7 \times 10^{-3}$

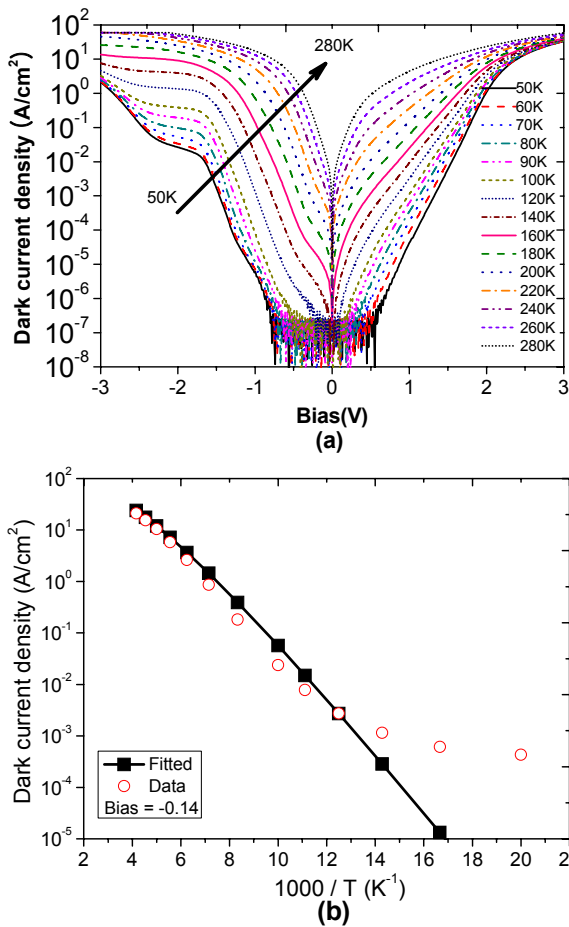


Figure 5. Dark current density as a function of applied bias ranging from 50 K to 280 K in figure (a). Arrhenius plot of the current density of a fabricated device under an applied bias of -1.4 V in figure (b).

A/cm²)는 인가전압 +1.4 V의 암전류 밀도($\sim 1.1 \times 10^{-2}$ A/cm²)와 비교하여 약 25%의 값을 보이고 있다. 이는 AlGaSb 전자 장벽이 효과적으로 다수전하(majority carrier)의 이동을 막고 있기 때문이다.

Fig. 5(b)는 인가전압 -1.4 V에서 측정된 암전류 밀도를 온도 함수로서 표현한 아레니우스 그래프(Arrhenius fitting)를 나타내고 있다. 그래프에 대한 curve fitting을 통하여, 활성화에너지(activation energy)가 약 0.128 eV로 표현될 수 있음을 알 수 있다. 이는 FTIR에 의하여 측정된 100% 차단 파장($\sim 10.2 \mu\text{m}$, $\sim 0.12 \text{ eV}$)과 아주 근접한 값을 나타냈다. 80 K 이하의 낮은 온도에서 암전류 밀도가 더 이상 줄지 않는, 포화상태 암전류(saturated dark current) 밀도를 보였다. 이는 트랩 어시스트 터널(trap-as-

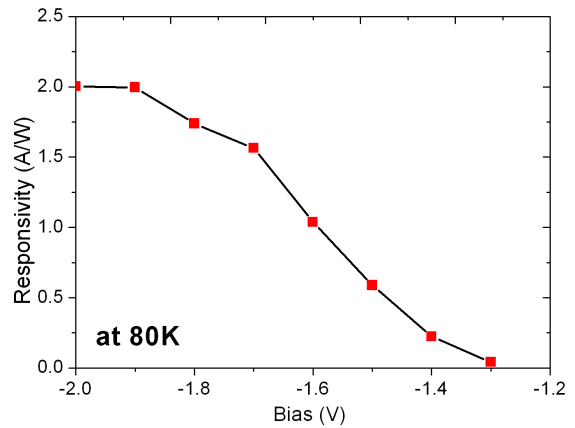


Figure 6. Responsivity versus bias at 80 K. The responsivity was equal to 0.58 A/W for the wavelength 7.5 μm and an applied bias of -1.5 V.

sisted tunneling) 과정에 의한 암전류 분포로 분석된다.

검교정이 완료된 800°C의 흑체복사 광원(Mikron, M306)과 2π FOV (field of view)를 가진 광학계를 이용하여 반응도(responsivity, R)를 측정하였다. Fig. 6은 80 K에서 인가 전압에 따른 직경 200 μm 를 가진 소자의 반응도를 나타내고 있다. $V_b = -1.5 \text{ V}$ 에서 7.5 μm 의 입사 적외선에 대한 소자의 반응도 0.58 A/W로 측정 되었다. 낮은 반응도는 활성층 두께가 통상적인 장적외선 검출소자 두께($\sim 5 \mu\text{m}$)의 약 40%인 $\sim 2.0 \mu\text{m}$ 로 소재성장을 하였기 때문에 상대적으로 적외선 흡수율(absorption rate) 낮았을 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구는 InAs/GaSb T2SL nBn 구조에 기초한 장적외선 검출소자의 구조 설계, 소자 제작을 통한 전류 및 광학적 특성 연구에 관한 것이다. Kronig-Penney 모델을 통하여 InAs와 GaSb의 소자의 두께를 각각 14 ML와 7 ML를 갖는 초격자 구조 성장에 의하여 $\sim 10 \mu\text{m}$ ($\sim 0.124 \text{ eV}$) 차단 파장(cutoff wavelength)의 소자를 구현하였다. 분자선 에피택시 성장법을 이용하여 InAs/GaSb T2SL nBn 구조를 성장 하였다. 특히 암전류를 줄이기 위하여 장벽 물질로는 100 nm 두께의 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{Sb}$ 를 사용하였으며, Te 도핑을 실시하였다. 적외선 FTIR, 냉각기 및 흑체복사 적외선

광원 등을 이용하여 소자의 스펙트럼, 암전류 밀도, 입사 적외선에 대한 반응도 등을 조사 하였다. 광반응 스펙트럼 분석결과 80 K에서 차단파장은 $\sim 10.2 \mu\text{m}$ ($E_g \sim 0.12 \text{ eV}$)으로 측정 되었으며, 광반응에 개입하는 활성에너지 0.128 eV로 계산 되었다. 두 측정값 모두 Kronig-Penney 모델을 통하여 계산된 0.122 eV와 매우 근사한 값을 보였다. 또한 소자의 암전류 밀도는 -1.5 V 인가전압 및 소자의 온도 80 K에서 $1.0 \times 10^{-2} \text{ A/cm}^2$ 로 측정 되었다. 소자 온도 80 K 및 바이어스 -1.5 V 조건에서 $7.5 \mu\text{m}$ 파장에 대한 소자의 반응도는 0.58 A/W로 측정 되었다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 시료의 제작 및 측정은 University of New Mexico (USA)의 CHTM (center for high technology materials)에 설치된 장비를 이용하여 수행하였음을 밝힙니다.

References

- [1] A. Rogalski, *Infrared Physics & Technology* **43**, 187 (2002).
- [2] A. Barve, J. Shao, Y. D. Sharma, T. E. Vandervelde, K. Sankalp, S. J. Lee, S. K. Noh, and S. Krishna, *Ieee Journal of Quantum Electronics* **46**, 1105 (2010).
- [3] G. A. Sai-Halaz, R. Tu, and L. Esaki, *Appl. Phys. Lett.* **30**, 651 (1977).
- [4] J. O. Kim, H. W. Shin, J. W. CHoe, S. J. Lee, C. S. Kim, and S. K. Noh, *J. Korean Vac. Soc.* **18**, 245 (2009).
- [5] S. J. Lee, S. K. Noh, S. H. Bae, and H. Jung, *J. Korean Vac. Soc.* **20**, 22 (2011).
- [6] E. R. Youngblade, J. R. Meyer, C. A. Hoffman, F. J. Bartoli, C. H. Grein, P.M. Young, H. Ehrenreich, R. H. Miles, and D. H. Chow, *Appl. Phys. Lett.* **64**, 3160 (1994).
- [7] B. M. Nguyen, G. Chen, M. A. Hoang, and M. Razeghi, *IEEE Journal of Quantum Electronics* **47**, 686 (2011).
- [8] N. Gautam, M. Naydenkov, S. Myers, A. V. Barve, E. Plis, T. Rotter, L. R. Dawson, and S. Krishna, *Appl. Phys. Lett.* **98**, 121106 (2011).
- [9] P. Y. Delaunay, B. M. Nguyen, D. Hoffman, E. K. Huang, and M. Razeghi, *IEEE Journal of Quantum Electronics* **45**, (2009).
- [10] B. M. Nguyen¹, D. Hoffman¹, P. Y. Delaunay¹, E. K. W. Huang¹, M. Razeghi¹, and J. Pellegrino, *Appl. Phys. Lett.* **93**, 163502 (2008).
- [11] S. Maimon and G. W. Wicks, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 151109 (2006).
- [12] J. B. Rodriguez, E. Plis, G. Bishop, Y. D. Sharma, H. Kim, L. R. Dawson, and S. Krishna, *Appl. Phys. Lett.* **91**, 043514 (2007).
- [13] 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).
- [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] S. Myers, E. Plis, A. Khoshakhlagh, H. S. Kim, Y. Sharma, R. Dawson, S. Krishna, and A. Gin, *Appl. Phys. Lett.* **95**, 121110 (2009).
- [16] H. C. H. Grein, M. E. Flatte, H. Ehrenreich, and R. H. Mile, *J. Appl. Phys.* **77**, 4156 (1995).
- [17] B. H. Hong, S. I. Rybchenko, I. E. Itskevich, and S. K. Haywood, *Physical Review B* **79**, 165323 (2009).
- [18] R. Rehm, J. Schmitz, L. Kirste, and M. Walther, *Infrared Physics & Technology* **61**, 129 (2013).

nBn Based InAs/GaSb Type II Superlattice Detectors with an N-type Barrier Doping for the Long Wave Infrared Detection

Ha Sul Kim^{a*}, Hun Lee^a, Brianna Klein^b, Nutan Gautam^b,
 Elena A. Plis^b, Stephen Myers^b, and Sanjay Krishna^b

^a*Department of Physics, Chonnam National University, Gwangju 500-757*

^b*Center for High Technology Materials, University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico 87106, USA*

(Received October 16, 2013, Revised November 2, 2013, Accepted November 6, 2013)

Long-wave infrared detectors using the type-II InAs/GaSb strained superlattice (T2SL) material system with the nBn structure were designed and fabricated. The band gap energy of the T2SL material was calculated as a function of the thickness of the InAs and GaSb layers by the Kronig-Penney model. Growth of the barrier material (Al_{0.2}Ga_{0.8}Sb) incorporated Te doping to reduce the dark current. The full width at half maximum (FWHM) of the 1st satellite superlattice peak from the X-ray diffraction was around 45 arcsec. The cutoff wavelength of the fabricated device was $\sim 10.2 \mu\text{m}$ (0.12 eV) at 80 K while under an applied bias of -1.4 V . The measured activation energy of the device was $\sim 0.128 \text{ eV}$. The dark current density was shown to be $1.0 \times 10^{-2} \text{ A/cm}^2$ at 80 K and with a bias -1.5 V . The responsivity was 0.58 A/W at $7.5 \mu\text{m}$ at 80 K and with a bias of -1.5 V .

Keywords : Long wave infrared detector, Strained layer superlattice (SLS), InAs/GaSb, Kronig-Penney model, Responsivity (R)

* [E-mail] hydenkim@jnu.ac.kr