

# [InAs/GaSb] 응력 초격자에 기초한 [320×256]-FPA 적외선 열영상 모듈 제작

이상준<sup>a</sup> · 노삼규<sup>a\*</sup> · 배수호<sup>b</sup> · 정 한<sup>b</sup>

<sup>a</sup>한국표준과학연구원 나노소재평가센터 양자검출소자기술 글로벌연구실, 대전 305-340

<sup>b</sup>아이쓰리시스템(주), 대전 305-343

(2010년 9월 30일 받음, 2010년 11월 30일 수정, 2010년 12월 13일 확정)

InAs/GaSb 제2형 응력초격자(SLS)를 활성층에 탑재한 [320×256] 초점면 배열(FPA) 적외선 열영상 모듈을 제작하고 열영상을 구현하였다. p-i-n형으로 설계된 소자의 활성층(i) 구조는 300 주기의 [13/7]-ML [InAs/GaSb]-SLS로 구성되어 있고, p와 n 전극층에는 각각 60주기의 [InAs:Be/GaSb]-SLS와 115 주기의 [InAs:Si/GaSb]-SLS 구조를 채용하였다. 시험소자의 광반응(PR) 스펙트럼으로부터 피크 파장( $\lambda_p$ )과 차단 파장( $\lambda_{co}$ )은 각각  $\sim 3.1/2.7 \mu\text{m}$ 과  $\sim 3.8 \mu\text{m}$ 이고 180 K 온도까지 동작을 확인하였다. 단위 화소의 간격/메사는 30/24  $\mu\text{m}$  규격으로 설계되었으며, [320×256]-FPA는 표준 광묘화법으로 제작하였다. 18/10  $\mu\text{m}$ 의 In-bump/UBM 공정과 flip-chip 결합 기술을 적용하여 FPA-ROIC 열영상 모듈을 완성하였으며, 중적외선용 영상구동 회로 및 S/W를 활용하여 열영상을 시연하였다.

주제어 : 적외선검출소자, 인듐비소/갈륨안티모니(InAs/GaSb), 응력초격자, [320×256] 초점면배열(FPA), 광반응(PR) 스펙트럼, 열영상

## I. 서 론

양자점(quantum dot, QD), 초격자(superlattice) 등 나노크기 양자구조를 이용한 고검출률-고온동작의 적외선 검출소자(infrared photodetector)의 실현을 위한 연구개발이 지난 십 수 년간 지속되어 왔으며, 최근 고분해능 적외선검출소자에 관한 보고가 급속하게 증가하고 있다 [1-5]. 밴드간(interband) 천이(bulk InSb, HgCdTe 등)나 밴드내(intraband) 천이(QD 등)를 이용하는 반도체 구조와는 달리, [InAs/GaSb] 응력 초격자(strained-layer superlattice, SLS) 구조는 부밴드간(intersubband) 천이에 기초한 것으로서, 근적외선(near-infrared, NIR)에서 원적외선(far-infrared, FIR)에 이르는 넓은 파장영역에서 근상온( $\sim 250$  K) 동작 가능성이 가장 높은 반도체 양자구조로 알려져 있다 [6,7]. 전도대(conduction band, CB)와 가전대(valence band, VB)가 0.15 eV 겹쳐 있는 전형적인 제2형 밴드정렬을 가지는 [InAs/GaSb]는 SLS의 대표적인 구조로서, 격자부정합은  $-0.6\%$ 이고, CB와 VB의 밴드단차(band offset)는 각각 0.95 eV와 0.55 eV로 알려져 있다

[8]. 이 구조는 InAs의 CB는 전자우물(well for electron)이고 GaSb의 VB는 정공우물(well for hole)로서, 이를 활성층으로 이용하는 초격자 적외선검출소자(SLIP)는 GaSb-VB에서 InAs-CB로의 간접천이에 의한 광반응(photo-response, PR)에 기초하고 있다.

[InAs/GaSb]-SLS 구조는 큰 유효질량에 기인한 투과전류의 감소와 변형-응력(strain-stress)에 의하여 발생한 중/경정공(heavy/light-hole, HH/LH) 부준위 간격의 증대뿐 아니라, 간접천이에 의한 열전류의 감소 등 상온 동작에서 요구되는 여러 가지 특성을 모두 지니고 있다 [9]. 최근에는 다수전하(majority carrier)에 의한 암전류(dark current)를 근원적으로 제거할 수 있는 AlGaSb 장벽(barrier)을 삽입한 n-Barrier-n 구조 [10]가 제안되어, MIR (mid-infrared)-FIR 대역에서 이중파장(dual wavelength) 검출도 가능함을 입증해 보인 바 있다 [11]. 특히, 최근에는 높은 온도에서 동작이 가능한 SLIP 및 MIR/FIR 열영상 소자에 관한 관심이 고조됨에 따라 [InAs/GaSb]-SLS의 고유 특성에 관한 연구 [12-22]도 활발하게 진행되고 있다.

본 연구에서는, 앞서 보고한 [8/8]-ML (monolayer)

\* [전자우편] sknoh@kriss.re.kr

[InAs/GaSb]-SLS (50 주기) 활성층의 특성 연구 [23]와 [InAs/GaSb]-SLIP (150 주기) 개별소자 제작 [24]에 이어서, 300 주기의 [13/7]-ML [InAs/GaSb]-SLS를 활성층에 탑재한 [320×256]-FPA (focal-plane array) 및 열영상 모듈을 제작하여 열영상을 시연하였다. 활성층과 p/n 전극층에 모두 [InAs/GaSb]-SLS를 도입한 p-i-n 구조의 FPA를 제작하여 ROIC (read-out integrated circuit)와 결합시켜 열영상 모듈을 완성하였다. [320×256]-FPA 광마스크(photomask) 도면과 FPA-ROIC 모듈의 핵심기술인 In-bump/UBM (under-bump metallization) 공정 및 완성된 FPA-SLIP 모듈 사진을 소개하고, 이를 이용하여 얻은 상온(300 K) 피사체의 열영상을 제시할 것이다.

## II. 실험방법

Fig. 1은 본 연구에서 시도한 [InAs/GaSb]-SLIP 소자의 층구조 개략도이다. SLIP 웨이퍼는 n<sup>+</sup>-GaSb:Te (n ~ 3×10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>) 기판 위에 MBE (molecular beam epitaxy) 방법으로 성장하였으며, 100 nm Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>Sb의 식각멈춤층(etch stop layer)이 n-전극층과 기판 사이에 삽입되어 있다. 활성층 구조는 [InAs/GaSb]-SLS ([13/7]-ML, 300 주기)이며, 상부와 하부 전극층은 각각 [13/7]-ML의 (10+50) 주기의 [InAs:Be/GaSb]-SLS와 (10+105) 주기의 [InAs:Si/GaSb]-SLS 구조로 구성되어 있다. 13-ML의 GaSb에는 0.7-ML InSb와 3.0-ML의 AlSb가 포함되어

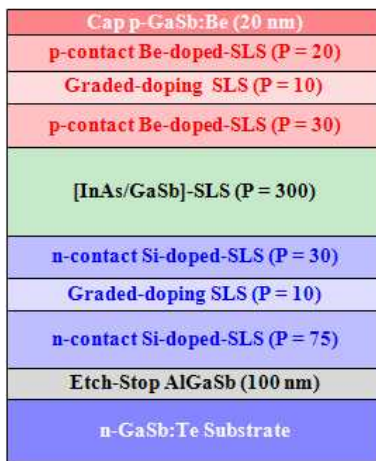


Figure 1. Schematic layer structure of [InAs/GaSb]-SLIP used in this study.

있는데, 이것은 300 주기의 SLS를 적층하는 동안 발생할 수 있는 응력의 완화(relaxation)를 최소화시키기 위하여 도입하였다. 여기서, p/n 전극층 내의 10 주기 SLS는 InAs/GaSb 층에 Be/Si의 밀도를 점점 증가/감소시키면서 도핑한 초격자(graded doping SLS)로서, 열처리 없는 오믹접촉(ohmic contact)을 형성시키기 위하여 도입한 구조이다. 본 연구에서 사용한 SLIP 기판의 성장 조건과 방법은 앞서 발표한 논문 [22-25]에서 기술한 바와 기본적으로 같다.

[320×256]-FPA 제작에는 전형적인 광묘화법(photo-lithography)과 인산(phosphoric acid)을 사용한 습식식각(wet etch) 및 BCl<sub>3</sub>-ICP (Inductively Coupled Plasma)에 의한 건식식각(dry etch) 공정이 적용되었으며, In-bump/UBM 공정에는 열증발/전자빔 증착법이 활용되었다. FPA와 함께 제작된 시험소자를 배경복사(background radiation)이 차단된 폐쇄회로 액체질소 저온장치(77 ~ 300 K)에 장착하여 FTIR (Fourier transform infrared, 2 ~ 20 μm) 분광기와 저잡음 전류/lock-in 증폭기를 사용하여 광반응(PR) 스펙트럼을 얻었다. 완성된 FPA-ROIC 모듈을 영상처리 회로 및 S/W로 구동되는 중적외선(MIR) 열영상 카메라(i3system)에 장착하여 열영상을 시연하였다.

## III. 결과 및 논의

SLIP 공정은 일반적인 개별소자 공정과 마찬가지로, 광마스크 설계/제작, 광묘화에 의한 메사 식각, 전극증착 및 오믹접촉, 표면보호막(surface passivation layer) 형성, 전극선 연결 등으로 크게 나눌 수 있다. FPA 모듈 제작에는 CMOS 기반의 상용 ROIC와의 전기적 기계적 연결을 위한 In-bump/UBM 제작 공정과 flip-chip 결합 공정이 추가되는데, 열영상 FPA 모듈의 성과와 화소 생존율은 이 2가지 후공정에서 거의 결정되기 때문에 상당히 숙련된 기술이 요구된다.

Fig. 2는 열영상 시스템의 전 공정을 개략적으로 표현한 그림이다. 먼저, 광묘화법으로 Fig. 1과 같은 층구조의 SLIP 웨이퍼 위에 [320×256] 화소(pixel)가 배열된 메사 모형(mesa pattern)을 제작하고, 표면보호막과 오믹접촉을 형성하면 FPA-SLIP 칩이 만들어진다. 이어서, FPA 화소 위에 In-bump를 형성한 후 ROIC와 flip-chip 결합하

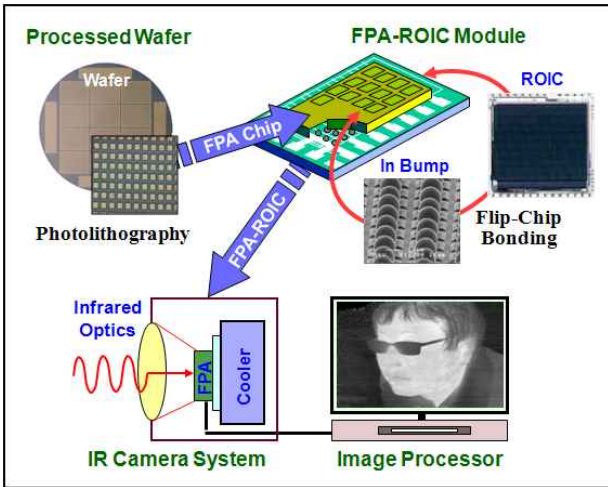


Figure 2. Anatomical chart schematically showing unit processes and corresponding modules/systems of thermographic system.

면 열영상용 FPA-ROIC 모듈이 완성되는데, 이 때 GaSb 기판에서의 광흡수를 줄이기 위한 기판 제거 공정이 추가된다. Fig. 2의 아래 그림이 보여 주고 있는 바와 같이, 완성된 FPA-ROIC 모듈을 내장된 적외선 카메라 시스템에 장착한 후 영상처리기(image processor)를 이용하여 열영상을 시연하게 된다.

### 1. [320×256] FPA (focal-plane array) 광마스크 설계 및 제작

[320×256]-FPA 광마스크 설계에서 가장 중요한 규격은 소자 성능의 극대화를 위한 단위 화소의 크기와 간격인데, 상용 ROIC를 사용하기 때문에 선택한 ROIC의 규격에 맞추어 설계되어야 한다. 본 연구에서는 선정된 ROIC의 규격에 맞추어 FPA-SLIP 광마스크(v.2008)를 설계, 제작하였으며, 이 때 단위 화소와 메사의 크기는 각각  $[30 \times 30] \mu\text{m}^2$ 와  $[24 \times 24] \mu\text{m}^2$ 로서 점유율(fill factor)은 64%이다. 개별소자 공정과 마찬가지로, 기본적으로 메사모형, 전극/표면보호막 등을 위한 2종의 광마스크를 필요로 하며, FPA 공정에는 In-bump/UBM 제작에 요구되는 2종의 광마스크가 추가된다.

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 [320×256]-FPA 단일 화소의 설계 규격과 광마스크의 배치를 보여주는 광학 사진이다. 단위 화소의 간격(pitch)/메사와 In-bump/UBM은 각각 30/24  $\mu\text{m}$  및 18/10  $\mu\text{m}$  규격으로 설계되었으며,

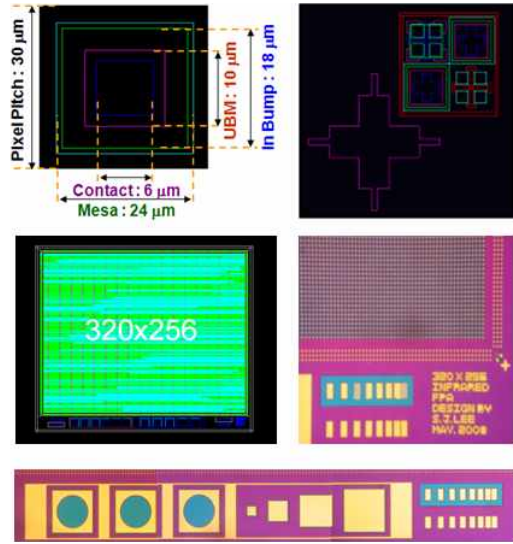


Figure 3. Drawing of single pixel (topmost) and photomasks of photomask showing layout of [320×256]-FPA pixels (middle) and test pattern (lowest).

광마스크 아래에는 개별소자 특성평가를 위한 대면적(100/200/300/400  $\mu\text{m}\phi$ ) 시험소자가 포함되어 있다. 또한 광마스크에는 FPA 화소와 함께 동일한 규격의 시험 화소를 제작하여 단위공정 및 FPA 화소의 특성을 비교 점검할 수 있도록 설계하였다.

### 2. 단위 공정 기술

#### 2.1. 메사모형 제작 공정

첫 공정한 메사모형은 contact aligner (4", Karl Suss)를 사용하는 전형적인 광묘화법으로 제작하였다. 이 때, PR (photoresist)은 AZ4330이 사용되었으며, 메사 식각에는 인산계열( $[\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}]$ ) 용액과  $\text{BCl}_3$ -ICP의 2종의 시약을 이용하였다.  $[\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}] = 1:2:20$ 의 혼합액을 사용한 습식의 식각률(etch rate)은 약 260 nm/min이었으며, 깊게 식각할 경우에는 약간의 비등방 식각(anisotropic undercut)이 일어남을 볼 수 있었다. GaSb 박막에 대한  $\text{BCl}_3$ -ICP (35 sccm)의 식각률은 80 nm/min이었으며, 깊은 식각의 경우에는 침전물(precipitates)에 의하여 표면이 다소 거칠어짐을 관측할 수 있었다. 본 연구에서는 먼저  $\text{BCl}_3$ -ICP로 얇게 건식식각한 후  $[\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}]$ 로 습식식각하는 2단계 식각법을 도입함으로써 깨끗한 표면과 균일한 식각면을 가지는 메사모형을 형성할 수 있었다.

### 2.2. 전극 및 오믹 접촉 공정

GaAs계 반도체와는 대조적으로, 대부분 전극 물질은 p-GaSb에 대해서는 급속 열처리(RTA)와 같은 후공정 없이도 오믹 특성을 나타내지만, n-GaSb에 대해서는 Schottky 장벽을 형성하는 것이 보통이다. n-i-p형 [InAs/GaSb]-SLIP 소자의 n<sup>+</sup>-InAs 상부 전극층과 p<sup>+</sup>-GaSb 하부 전극층은 각각 Ti/Au와 Ti/Pt/Au로써 오믹 접촉이 가능한 것으로 알려져 있지만, n<sup>+</sup>-GaSb가 상부 전극층인 p-i-n 형의 경우에는 n-전극층과 접촉 포텐셜이 낮은 물질계의 선택과 공정 최적화가 해결되어야 할 문제로 남아있는 상태이다. 현재까지 보고된 바에 의하면, Pt계 물질이 n<sup>+</sup>-GaSb와의 접합에서 비교적 낮은 접촉저항을 가지고 있는 것으로 알려져 있는데, 350°C에서 40초 RTA 처리한 [Pd/Ge/Au/Pt/Au]/n-GaSb는 비교적 양호한 오믹 특성을 보임이 실험적으로 확인한 바 있다. 그러나, 본 연구에서는 비교적 구조가 간단하고 n형과 p형 GaSb에 모두 적용 가능한 것으로 알려져 있는 Au/Pt/Ti (250/30/50 nm) 적층구조를 오믹 급속으로 채택하였다.

[InAs/GaSb]-SLIP에서는 급격한 초격자 계면의 유지가 매우 중요하다. 오믹 접촉을 위한 열처리는 소자의 열화의 원인이 될 수 있는 상호확산을 유발할 수가 있기 때문에, 본 연구에서는 Fig. 1에서와 같이 열처리가 필요없는 SLS 전극층을 도입하였다. 즉, 점진적으로 도핑을 증가/감소시킨 10 주기의 [InAs:(Si/Be)/GaSb]-SLS 층을 p/n 상부/하부 전극층 가운데에 삽입하여 50/105 주기의 [InAs:(Be/Si)/GaSb]-SLS 전극층과 접합하도록 설계함으로써, 급속/전극층 접합에서의 전하 수송이 전도대 또는 가전대가 아닌 SLS가 형성한 미니밴드(miniband)를 통하여 일어나도록 하였다.

### 2.3. In-bump 공정 및 [320×256]-FPA/ROIC 모듈 제작

열영상 모듈은 입사광을 감지하는 [320×256] 배열의 FPA와 감지된 신호를 영상으로 처리하는 ROIC의 2개 칩을 In-bump를 통하여 전기적으로 결합시킴으로서 완성된다. FPA-ROIC 모듈 사이에 삽입된 In-bump는 열적 기계적 응력(thermomechanical stress)을 받게 되는데, 이 때 발생하는 응력은 GaSb (FPA)와 Si (ROIC)와의 열팽창계수의 차이에서 기인하는 미끄럼 변형(shear strain)에 비례한다. 2개 칩 사이의 결합력을 높이기 위해서는 In-bump의 높이를 증가시킴과 동시에 In-bump 형성을 방해

하는 표면 산화막을 제거하는 열처리 과정이 포함되어야 하며, FPA/ROIC 모듈의 신뢰성 향상을 위해서는 기판과 In-bump 사이의 접착력을 높여 주는 UBM의 도입이 필수적이다. 본 연구에서는 고상 물질이 용해한 후 응고될 때 표면장력이 가장 커지는 효과를 이용하여, In의 용점(157°C) 이상에서 In-bump를 녹인 후 재형성시키는 reflow 공정으로 매끄러운 표면을 가지는 높은 In-bump를 형성시킬 수 있었다. UBM 공정에는 Ti/Ni/Au 적층구조를 도입하였는데, 실험적으로 도출한 Ti 접착층(adhesive layer), Ni 확산장벽(diffusion barrier), Au 젖음층(wetting layer)의 최적 두께는 각각 30, 150, 50 nm이었다.

Fig. 4는 In-bump/UBM의 층구조 개략도(a)와 증착된 UBM 및 In reflow 전후의 In-bump의 모습을 보여주는 SEM 사진(b)이다. 증착한 직후의 In (3 μm) 표면은 거칠고 불균일한 모양을 가지지만, reflow 공정을 거치면 약 10 μm 높이의 균일한 In-bump가 형성됨을 SEM 사진은 잘 보여

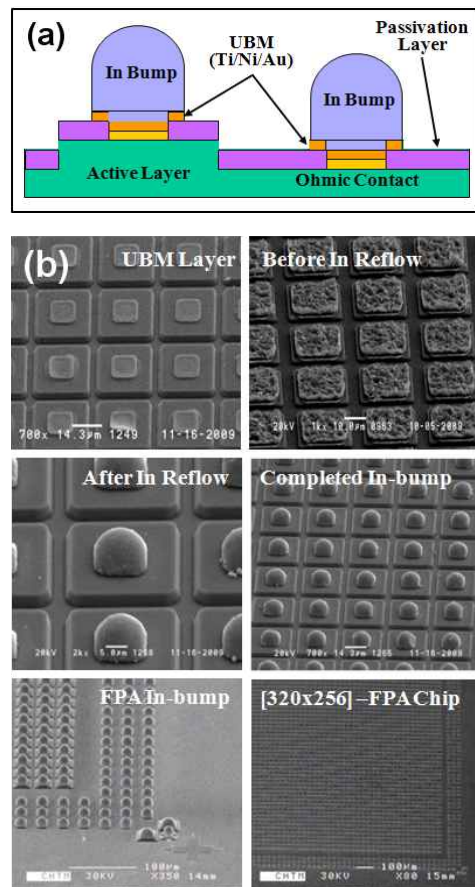


Figure 4. (a) Schematic layer structure of In-bump/UBM, and (b) SEM images of [320×256]-FPA In-bumps before and after In reflow process.

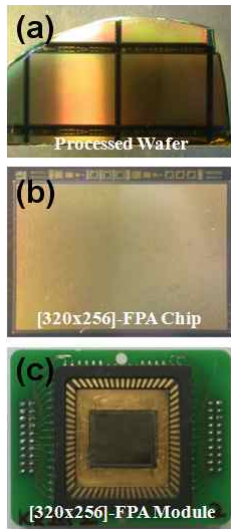


Figure 5. Photographs of (a) process-completed wafer and (b) single [320×256]-FPA chip of p-i-n [InAs/GaSb]-SLIP, and (c) FPA/ROIC module mounted in thermographic system.

주고 있다. 마지막 사진은 최종 단계인 ROIC와의 flip-chip 결합 직전의 [320×256]-FPA In-bump의 모습을 보여 주고 있다. 8x10 mm<sup>2</sup> 크기의 FPA 칩이 시험 제작되었으며, 상용 ROIC와 flip-chip 결합하여 [320×256]-FPA/ROIC SLIP 모듈을 완성하였다. Fig. 5는 본 연구에서 제작한 [320×256]-FPA p-i-n SLIP 웨이퍼(a), [320×256]-FPA 칩(b), 그리고 열영상 시스템에 장착한 FPA/ROIC-SLIP 모듈 사진이다.

### 3. p-i-n SLIP 시험소자 특성

열영상 시연에 앞서, 단위소자의 저항 및 광반응(PR) 특성을 조사하였다. Fig. 6(a)는 [320×256]-FPA 칩과 동시에 제작된 p-i-n SLIP 시험소자의 동적저항 특성(dV/dI-V) 곡선이다. 저온(<100 K)에서 약 10<sup>4</sup> Ω의 저항이 온도가 증가하면 10<sup>2</sup> Ω (180 K)으로 급격하게 감소함을 보여 주고 있는데, 이것은 온도 상승에 따라 암전류가 증가한 다이오드의 I<sub>D</sub>-V 특성(삽입 그림)의 결과이다. 시험소자의 면적(300 μm<sup>2</sup>)이 [320×256]-FPA의 단위 화소(30×30 μm<sup>2</sup>) 보다 100배 정도 크기 때문에 발생하는 잡음전류의 증가를 고려할 때, 본 연구의 FPA-SLIP은 약 200 K까지 동작이 가능한 것으로 예측된다. Fig. 6(b)는 동일한 시험소자에서 FTIR 분광기로 얻은 PR 스펙트럼이다. 본 연구

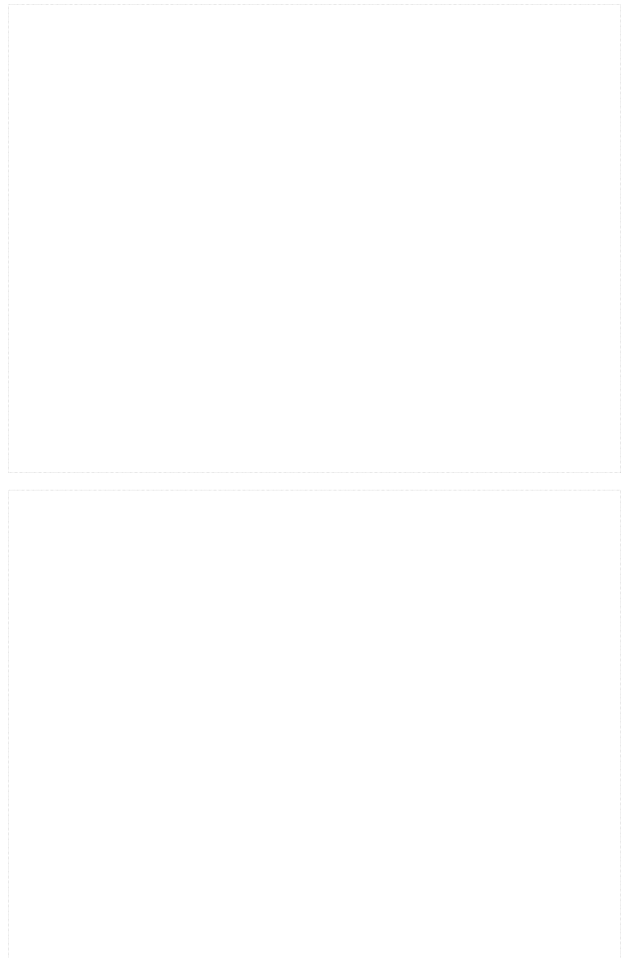


Figure 6. (a) Dynamic resistance curve (dV/dI-V) and (b) FTIR PR spectra taken from a p-i-n SLIP test device. The dark current characteristic curves (I<sub>D</sub>-V) are plotted in figure (a).

에서 제작한 [8/8]-ML [InAs/GaSb]-SLIP는 약 2.5~3.5 μm 영역의 중적외선에서 반응을 나타내었으며, 180 K까지 강한 PR 신호를 보이고 있다. 77-180 K 영역에서 차단 파장(λ<sub>CO</sub>)은 약 3.8 μm이었으며, 약 2.7 μm와 3.1 μm에서 피크를 가지고 있었다. PR 스펙트럼이 보여 준 λ<sub>P</sub>~3.1/2.7 μm (~400/460 meV)는 HH/LH 기저상태에서 전도대로의 천이(HH1/LH1-CB) 에너지에 의한 것으로 분석된다. n-Barrier-n MIR-FIR 이중파장 [InAs/GaSb]-SLIP의 FIR ([13/7]-ML)에 대하여 보고된 HH1/LH1-CB 천이 에너지 ~120/170 meV (~10/7.3 μm) [11] 보다 본 연구의 PR 스펙트럼이 ~300 meV 정도 청색편이가 일어난 것은 InSb (0.7-ML)와 AlSb (3.0-ML) 삽입층에 의하여 SLS의 응력이 변화되었기 때문으로 해석된다.



Figure 7. Thermographic still image of room-temperature (300 K) object taken by [320×256]-FPA thermographic module (77 K) of p-i-n SLIP.

#### 4. [320×256]-SLIP 모듈에 의한 열영상 시연

Fig. 5(c)의 FPA-SLIP 열영상 모듈을 중적외선용 적외선 카메라(i<sup>3</sup>system)에 장착하여 열영상을 시연하였다. Fig. 7의 사진은 77 K의 [320×256]-FPA 모듈로서 촬영한 상온(300 K) 피사체의 열영상 정지화면이다. 얼굴(36~37°C)의 미세한 온도 차이가 열영상으로 분명하게 재현되고 있고, 실온(~20°C)에 노출되어 있는 안경과 머리카락의 모습이 구별되어 표현되고 있다. 화면에 보이는 흰색 또는 검은색 결함들은 죽은 화소(dead pixel)에 의한 허상으로, 본 모듈의 화소 생존율은 95% 이상인 것으로 분석되었다. 본 연구에서 제시한 정지화면은 2점 불균일 보정(2-point correction)과 죽은 화소 대체(dead pixel replacement)를 수행한 후 얻은 열영상으로, 화면의 상대적 비교를 통하여 분석한 열영상 모듈(77 K)의 검출률(D\*)과 잡음등가미분온도(NEdT)는 각각  $10^{10}$  cm.Hz<sup>1/2</sup>/W과 100 mK 정도로 추정된다.

### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 [InAs/GaSb]-SLS (13/7-ML, 300 주)를 활성층에 탑재한 p-i-n 구조의 [320×256]-FPA 초격자 적외선검출소자(SLIP)를 제작하여 열영상을 시연하였다. 단위 화소의 간격/메사 크기는 30/24 μm로 설계하였으며, 최적화한 In-bump/UBM 공정과 flip-chip 결합 기술을 적용하여 FPA/ROIC 열영상 모듈을 완성하였다. SLIP 소자의 활성층 상부/하부 p/n 전극층에는 60/115 주기의 [InAs:(Be/Si)/GaSb]-SLS 구조를 적층하여, 오믹접

촉 특성을 최적화하였다. 시험소자로부터 분석한 PR 스펙트럼의 피크 파장( $\lambda_p$ )과 차단 파장( $\lambda_{co}$ )은 각각 ~3.1/2.7 μm와 ~3.8 μm이었으며, 약 200 K까지 동작이 가능함을 보여 주었다. FPA/ROIC 모듈을 중적외선용 적외선카메라에 장착하여 상온(300 K) 피사체의 열영상을 시연하였으며, 완성된 열영상 모듈의 화소 생존율은 95% 이상으로 분석되었다. 본 연구에서 제작한 열영상 모듈의 검출률(D\*)과 잡음등가미분온도(NEdT)는 각각  $10^{10}$  cm.Hz<sup>1/2</sup>/W 및 100 mK 정도로 추정되었다.

### 감사의 글

본 연구는 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받은 글로벌연구실(GRL) 국제공동연구 과제(No. 2007-00011)로 수행되었으며, FPA 설계 기술 등을 제공해 준 GRL 국외연구실(Univ. of New Mexico, USA) 책임자인 S. Krishna 교수에게 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] A. V. Barve, S. J. Lee, S. K. Noh, and S. Krishna, *Laser & Photonics Rev.* **3**, 1 (2009).
- [2] 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).
- [3] B. Movaghar, S. Tsao, S. Tsao, S. A. Pour, T. Yamanaka, and M. Razeghi, *Phys. Rev. B* **78**, 115320 (2008).
- [4] E. -T. Kim, Z. Chen, and A. Madhukar, *J. Korean Phys. Soc.* **49**, 837 (2006).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] S. Mou, A. Petschke, Q. Liu, S. L. Chuang, J. V. Li, and C. J. Hill, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 153505 (2008).
- [8] D. L. Smith and C. Mailhot, *J. Appl. Phys.* **62**, 2545 (1987).
- [9] H. Mohseni, V. I. Litvinov, and M. Razeghi, *Phys. Rev. B* **58**, 15378 (1998).
- [10] S. Maimon and G. W. Wicks, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 151109 (2006).
- [11] S. J. Lee, S. K. Noh, E. Plis, S. Krishna, and K.-S. Lee, *Appl. Phys. Lett.* **95**, 102106 (2009).
- [12] H. S. Kim, E. Plis, A. Khoshkhalagh, S. Myers, N. Gautam, Y. D. Sharma, L. R. Dawson, S. Krishna, S. J. Lee, and S. K. Noh, *Appl. Phys. Lett.* **96**, 033502 (2010).
- [13] R. Magri and A. Zunger, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **21**, 1896 (2003).
- [14] C. Petchsingh, R. J. Nicholas, K. Takashina, and N. J. Mason, *Semicond. Sci. Technol.* **22**, 194 (2007).
- [15] B.-M. Nguyen, D. Hoffman, P.-Y. Delaunay, and M. Razeghi, *Appl. Phys. Lett.* **91**, 163511 (2007).
- [16] 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).
- [17] A. Khoshkhalagh, 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).
- [18] R. Intartaglia, G. Raino, V. Tasco, F. D. Sala, R. Cingolani, A. N. Baranov, N. Deguffro, E. Tournie, B. Satpati, A. Trampert, and M. De Giorgi, *J. Appl. Phys.* **103**, 114516 (2008).
- [19] S. Mou, A. Petschke, Q. Liu, S. L. Chuang, J. V. Li, and C. J. Hill, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 153505 (2008).
- [20] 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).
- [21] A. Khoshkhalagh, H. S. Kim, S. Myers, N. Gautam, S. J. Lee, E. Plis, S. K. Noh, L. R. Dawson, and S. Krishna, *Proc. of SPIE* **7298**, 72981P-1 (2009).
- [22] S. J. Lee, S. K. Noh, L. R. Dawson, and S. Krishna, *J. Korean Phys. Soc.* **54**, 280 (2009).
- [23] 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).
- [24] J. O. Kim, H. W. Shin, J. W. Choe, S. J. Lee, C. S. Kim, and S. K. Noh, *J. Korean Vac. Soc.* **18**, 108 (2009).
- [25] H.W. Shin, J.W. Choe, J.O. Kim, S.J. Lee, C.S. Kim, and S.K. Noh, *J Korean Vac. Soc.* **20**, In print (2011).

# Fabrication of [320×256]-FPA Infrared Thermographic Module Based on [InAs/GaSb] Strained-Layer Superlattice

S. J. Lee<sup>a</sup>, S. K. Noh<sup>a\*</sup>, S. H. Bae<sup>b</sup>, and H. Jung<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Global Research Laboratory on Quantum Detector Technology, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340

<sup>b</sup>i3system Inc., Daejeon 305-343

(Received September 30, 2010, Revised November 30, 2010, Accepted December 13, 2010)

An infrared thermographic imaging module of [320×256] focal-plane array (FPA) based on [InAs/GaSb] strained-layer superlattice (SLS) was fabricated, and its images were demonstrated. The p-i-n device consisted of an active layer (i) of 300-period [13/7]-ML [InAs/GaSb]-SLS and a pair of p/n-electrodes of (60/115)-period [InAs:(Be/Si)/GaSb]-SLS. FTIR photoresponse spectra taken from a test device revealed that the peak wavelength ( $\lambda_p$ ) and the cutoff wavelength ( $\lambda_{co}$ ) were approximately 3.1/2.7  $\mu\text{m}$  and 3.8  $\mu\text{m}$ , respectively, and it was confirmed that the device was operated up to a temperature of 180 K. The 30/24- $\mu\text{m}$  design rule was applied to single pixel pitch/mesa, and a standard photolithography was introduced for [320×256]-FPA fabrication. An FPA-ROIC thermographic module was accomplished by using a 18/10- $\mu\text{m}$  In-bump/UBM process and a flip-chip bonding technique, and the thermographic image was demonstrated by utilizing a mid-infrared camera and an image processor.

Keywords : Infrared photodetector, Indium arsenide/gallium antimonide (InAs/GaSb), Strained-layer superlattice (SLS), [320×256] Focal-plane array (FPA), Photoresponse (PR) spectrum, Thermographic image

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