

김의태 교수 (충남대 나노공학부)

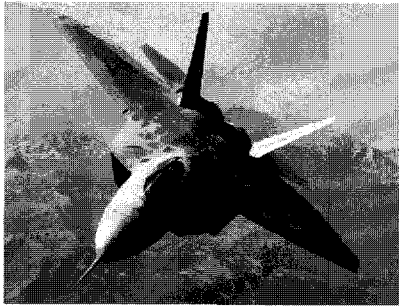
## 1. 서 론

반도체의 크기가 전자의 드브로이(de Broglie) 파장보다 작아질 때 얻게 되는 양자효과 등의 독특한 특성을 이용하게 되면 새로운 개념의 소자와 기술 창출이 가능하기 때문에 최근 나노영역에서의 반도체재료와 소자에 관한 연구가 큰 주목을 받고 있다. 특히 3차원적으로 에너지상태가 양자화 되어 있는 양자점(Quantum Dots)의 경우 에너지상태밀도가 델타함수특성을 갖는 등 양자우물(Quantum Wells)이나 양자선(Quantum Wires)과는 다른 독특한 전기적 광학적 특성을 보여 이를 활용한 전자 및 광전자소자 응용연구가 활발히 진행되고 있다 [1, 2].

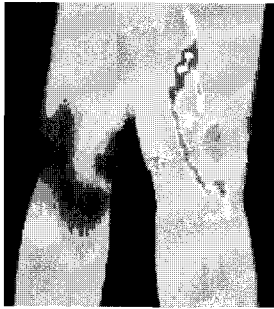
현재 Top-down 접근방식인 사진식각공정으로 ~5 - 20 nm 크기의 양자점을 제작하기에는 비용과 기술적인 한계가 있다. 최근 이러한 단점을 보완할 방법으로서 상대적으로 저비용의 기술적 용이성을 갖는 Bottom-up 접근방식인 자기조립법 (Self Assembly) 반도체 양자점 형성기술이 크게 각광을 받고 있다. 자기조립법에 의한 양자점 형성은 크게 분자선에피택시(Molecular Beam Epitaxy : MBE)나 화학증착법의 기상 에피택시 성장법과 용액 상에서 화학적으로 합성하는 콜로이드 법으로 대별할 수 있다. 기상 에피택시성장법의 경우 기존 반도체공정

및 소자기술과의 완벽한 적합성을 얻을 수 있는 장점이 있어 이를 활용한 레이저 및 적외선소자 연구가 큰 관심 속에 진행되고 있다 [1, 2]. 본 논문에서는 InAs/GaAs(001) 자기조립 양자점 (Self-assembled Quantum Dots)의 적외선소자응용에 대해 살펴보고자 한다.

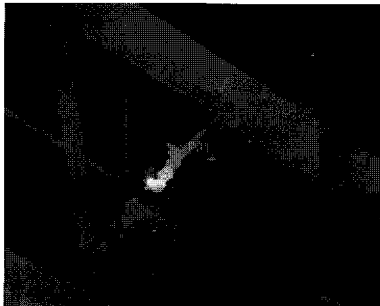
적외선소자는 특히 군사용 필요성에 의해 개발이 시작되어 가장 큰 시장이 형성되어 있으나, 이를 기반으로 산업 및 자동차, 의료시스템, 방법시스템과 우주탐사 등으로 그 시장이 크게 확대되고 있다. 그림 1은 적외선소자의 응용의 예를 보이고 있다. 현재 HgCdTe 화합물반도체 적외선소자가 가장 뛰어난 성능을 보이나, 대면적 웨이퍼성장과 고밀도의 균일한 소자제작에 어려움이 있어 제조단가가 가장 비싼 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 1980년대 초부터 미국 NASA를 중심으로 대면적 GaAs 기판에서 GaAs/AlGaAs 양자우물 적외선소자에 대한 연구가 시작되었으며 [3], 프랑스, 독일 등 선진국에서도 양자구조 적외선소자 연구가 활발히 진행되어 현재 양자우물 적외선 검출기 양산품이 선보이기 시작하고 있다. 하지만 적외선소자응용에 있어서 양자우물은 양자점에 비해 근본적인 물리적 특성 한계가 있다. 양자점은 양자우물과는 달리 전자와 정공이 3차원적으로 구속되어 있기 때문에 Wave-vector Selection Rules에 의해 구속되지 않아 수직 입사되



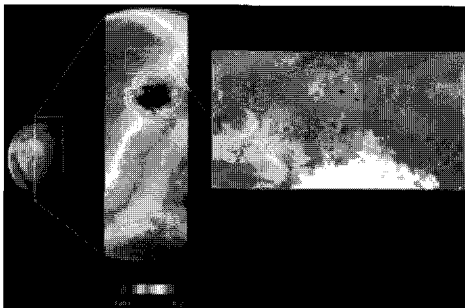
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 1. 적외선소자응용: (a) 군사용 전천후탐색기, (b) 의료진단, (c) 산업안전진단, (d) 우주탐사.

는 적외선을 흡수할 수 있어 소자표면에 Grating을 형성하는 공정을 생략할 수 있다. 더욱이 적외선흡수에 의해 여기된 전자는 Phonon-bottleneck 효과에 의해 매우 긴 수명 (Excited Carrier Lifetime)을 갖게 된다. 따라서 여기된 전자가 기저상태로 재결합되는 것을 최소화하고 광전류에 기여할 수 있는 것을 극대화할 수 있으며 큰 광전류 이득을 기대할 수 있다. 이론적 계산결과도 양자점이 양자우물보다 더 작은 암전류를 가질 수 있는 등 적외선소자로서 더 뛰어난 성능을 구현할 수 있다는 것을 보이고 있다 [4]. 또한 양자점은 양자우물에 비해 고온에서 동작할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다. 이러한 뛰어난 잠재적 가능성 때문에 1990년 중반부터 선진 각국에서는 InAs/GaAs 자기조립 양자점의 적외선소자응용에 큰 관심을 가지고 연구를 진행하여 오고 있다 [5-9]. 본 논문에서는 최근 발표된 연구결과들을 바탕으로 InAs/GaAs 양자점 적외선소자(Quantum Dot Infrared Photodetectors : QDIPs)의 특성과 성능 및 이들을 결정하는 주요 변수가 무엇이 있으며 소자특성에 어떤 영향을 미치는지에 대해 포괄적으로 논의하고자 한다.

## 2. InAs/GaAs 자기조립 양자점

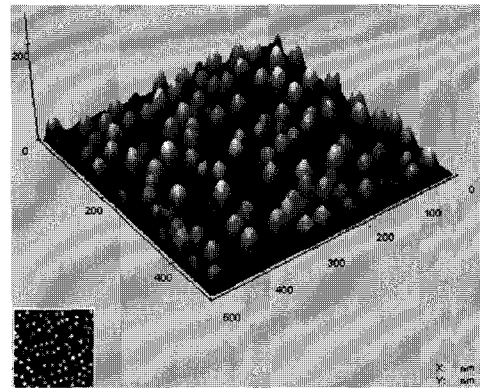
기상 에피택시 성장법에 의한 반도체 양자점 제조는 1990년에 Stranski-Krastanow 현상에 의한 GaAs 기판 위에서 InGaAs 양자점[10, 11] 및 Si 기판 위에서 Ge 양자점의[12] 자기조립 현상이 발견되면서 큰 전기를 맞이하게 되었다. 기판 위에 압축응력을 받는 적절한 물질이 임계두께 이상으로 에피택시 성장될 때 증착되는 물질은 변위에너지를 줄이기 위해 부정합 전위 (Misfit Dislocations)를 유발하는 대신에 자발적으로 수십 nm 크기의 결함이 없는 3차원 나노 구조체를 형성한다. 임계두께는 격자상수 차이와 재료특성에 따라 변하게 된다. 약 2% 이상의 격자상수 차이가 나는 많은 III-V족 및 II-VI족, IV-IV족 반도체물질의 조합에서 Stranski-Krastanow 현상

에 의한 자기조립 양자점 형성이 가능하다. GaAs(001) 기판 위에 InAs를 성장시키는 경우 ~7%의 격자상수 차이가 있고 ~1.7 Monolayers (ML) 이상의 InAs가 성장될 때 InAs 자기조립 양자점 형성이 가능하다. Si(001) 기판 위에서는 Ge과 ~4%의 격자상수 차이가 있고 ~3 ML의 Ge이 성장될 때 양자점 형성이 가능해 진다. 그림 2에서 보인 것과 같이 InAs/GaAs(001)의 경우 형성되는 양자점의 밀변은 ~20 nm 정도이고 높이는 ~3 - 10 nm 정도이다. 무엇보다 이러한 자기조립 양자점은 결함 없이 완벽하게 에피택시 성장되기 때문에 고성능의 전자 및 광학적 특성을 가질 수 있어 양자점 물리현상과 소자응용을 위해 활발히 연구되고 있다 [1,2].

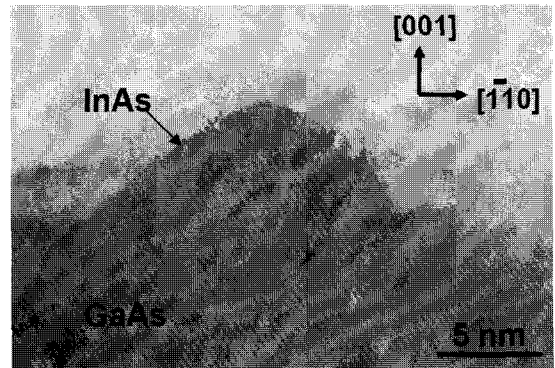
QDIPs이 검출할 수 있는 적외선파장은 InAs/GaAs 자기조립 양자점의 Interband와 Intraband 천이에너지로부터 결정되어 진다. 그림 3은 GaAs 기판 위에 성장되어 GaAs로 capping된 InAs 양자점의 밀변으로부터 수직방향을 따라 그려놓은 에너지밴드의 개략도이다. 그림 3에서 보는 것과 같이 InAs/GaAs 양자점의 경우 정공으로부터 전자에너지준위로의 Interband 천이는 ~1 μm 영역의 근적외선 영역에 이용될 수 있다. 반면에 전자-전자에너지준위 또는 정공-정공에너지준위로의 Intraband 천이는 ~3 - 20 μm 영역의 중파장 및 장파장 적외선 검출에 활용될 수 있다. 본 논문에서는 군사용 및 많은 응용체계에서 특히 관심을 가지는 중파장 (3-5 μm)과 장파장 (8-13 μm) 적외선파장에 적합한 전자-전자에너지준위로의 Intraband 천이의 응용에 초점을 맞추었다.

### 3. InAs/GaAs QDIPs 구조 및 동작원리

그림 4에 본 논문에서 논의될 n<sup>+</sup>-i(InAs/GaAs 양자점)-n<sup>+</sup> 적외선소자구조를 나타내었다. 다층의 InAs/GaAs 양자점층이 약 10<sup>17</sup>-10<sup>18</sup>/cm<sup>3</sup>의 고농도의 Si<sup>+</sup>으로 도핑된 n<sup>+</sup> GaAs에 샌드위치된 구조이다. 이러한 QDIPs 구조는 주로 MBE법에 의해 성장되며



(a)



(b)

그림 2. (a) InAs/GaAs 양자점 AFM 사진과 (b) 투과 전자현미경 사진 [9].

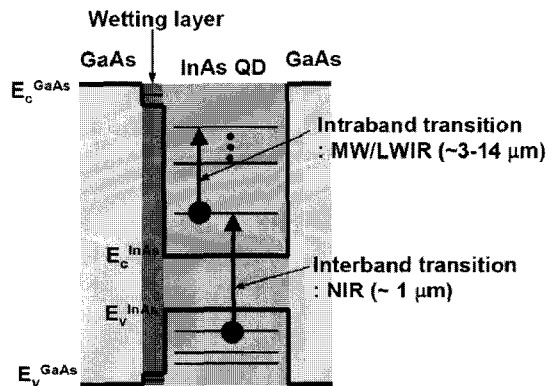


그림 3. InAs/GaAs 양자점 에너지밴드구조 개략도.

자세한 MBE 성장조건들은 참고문헌[5-9]를 참조하기 바란다.

QDIPs 구조에 입사된 적외선에 의해 전자는 Bounded 또는 Quasi-bounded, Continuum 에너지 준위로 여기되고 그림 5에서 보인 것처럼 소자 양 끝단에 가해진 바이어스에 의해 Tunneling 등을 통해 광전류로 검출되게 된다. QDIPs 구조는 광여기된 전자를 어떤 방향으로 이송시킬지에 따라 수직이송구조 (Vertical Transport Structure)와 수평이송구조 (Lateral Transport Structure)로 나눌 수 있다. 수평이송구조는 광여기된 전자가 양자점층을 가로지르는 수직구조에 비해 양자점 층 사이를 따라 움직이기 때문에 전자이송에 있어 더 효율적이고, 더 큰 광감응도 (Responsivity)를 보일 수 있다. 더욱이 양자점층을 따라 Modulation-doped Heterostructure의 High-mobility Channel을 형성시킴으로써 Interdot Tunneling과 Hopping에 의한 전자 전도를 최소화할 수 있고 암전류를 크게 낮출 수 있는 장점이 있다. 반면에 수직이송구조는 고밀도의 초점면어레이 (Focal Plane Array)소자 제작에 있어서 절대적으로 유리하다. 최근의 적외선소자응용은 이러한 고밀도 초점면어레이 적외선소자를 요구하고 있어 대부분

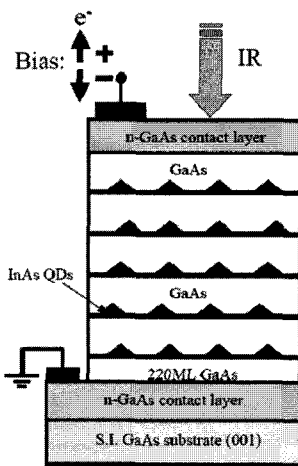


그림 4. InAs/GaAs QDIPs 개략도.

의 QDIPs 연구가 그림 4와 같은 수직이송구조에 집중되고 있다.

양자점 내의 전자의 도핑양은 QDIPs 소자의 암전류를 좌우하는 중요한 요소이다. 최근의  $n^+n$ (양자점)- $n^+$  구조를 기초로 한 Ryzhii의 이론적 계산결과는 양자점내로의 전자 도핑양이 증가함에 따라 암전류가 증가하는 것을 보이고 있다 [13]. 또한 자기조립 양자점 특성상 양자점의 위치는 무작위적이고, 도핑 원소 역시 무작위하게 분포한다. 따라서 양자점 내에 존재하는 전자의 수가 각각 다를 수 있고 기저에너지준위 뿐만 아니라 여기에너지준위에서도 전자가 존재함으로써 해서 암전류가 크게 증가할 수 있다. Ryzhii의 계산결과는 이러한 불균일한 도핑 및 양자점 내의 전자의 무작위적인 변동에 의해 암전류가 크게 증가된다는 것을 보이고 있다 [13,14]. 본 연구팀은 양자점 영역에 도핑을 하지 않은 그림 4와 같은  $n^+i$ (양자점)- $n^+$  구조에서  $n^+$  GaAs 영역에서 InAs 양자점 내로 주입된 전자에 의해 전자기저에너지준위가 채워지고 매우 강한 광전류특성을 얻을 수 있다는 것을 보였다. 또한  $n^+n$ (양자점)- $n^+$  구조에 비해 더 향상된 광전류/암전류 비율을 가진다는 실험결과를 얻었다 [9].

QDIPs 구조에 입사되는 적외선의 흡수거리를 길게 하고 양자점의 밀도(Fill Factor)를 높여 광감응도

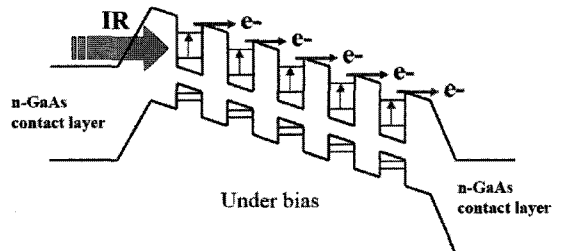


그림 5. InAs/GaAs QDIPs 동작원리 개략도.

를 극대화하기 위해 일반적으로 다층의 양자점 층을 사용한다. 더욱이 다층의 양자점 층은 QDIPs의 암전류를 최소화하는데 기여한다. Ryzhii의 이론계산 결과는 양자점의 Fill Factor가 증가할수록 n<sup>+</sup>의 GaAs층에서 주입되는 전자가 양자점을 거치지 않고 반대편의 n<sup>+</sup> GaAs층으로 그대로 전달되는 것을 방지함으로써 암전류를 크게 감소시킬 수 있다는 것을 보인다 [13]. 그러나 다층의 양자점 층은 QDIPs 내에서 변위에너지를 증가시켜 부정합 전위발생을 야기할 수 있으므로 소자구조 설계 시 이러한 결함들을 최소화하기 위한 양자점 크기와 양자점 층간거리에 대한 고려가 반드시 필요하다.

#### 4. 양자점 크기의 영향

양자점의 종류와 크기에 따라 양자점의 에너지밴드구조 및 그와 관련된 Interband와 Intraband 천이 등은 민감하게 변하게 되며 QDIPs의 광전류 및 암전류에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 InAs/GaAs 양자점 크기가 커짐에 따라 양자점 기저에너지준위의 Interband 천이에너지 및 Intraband 에너지준위 간격은 감소하게 된다. 그림 6은 상대적으로 크고 작

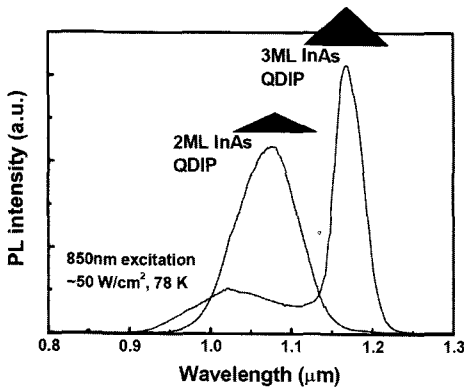
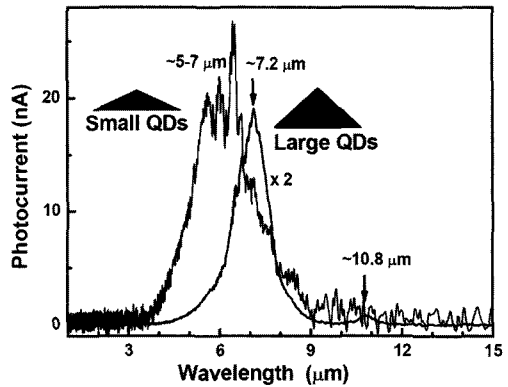
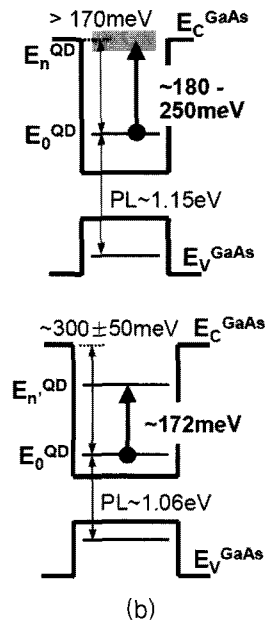


그림 6. 2.0 ML와 3.0 ML InAs/GaAs QDIPs의 PL 특성.

은 양자점을 사용하여 성장된 QDIPs의 Photoluminescence (PL) 결과를 보이고 있다. 작은 양자점의 QDIP는 ~1.07 μm에서 큰 양자점의 QDIP는 ~1.17 μm에서 PL 피크를 보이고 있다. 상대적으로 작은 양자점은 500 °C에서 0.22 ML/sec의 속도로 InAs 2.0 ML가 증착되어 형성된 것으로 양자점의 평균 밀변



(a)



(b)

그림 7. (a) 2.0 ML와 3.0 ML InAs/GaAs QDIPs의 광전류 특성과 (b) 양자점 에너지밴드구조 개략도 [7-9].

길이와 높이는 각각 ~22 nm와 ~3.5 nm이고 양자점 밀도는  $\sim 500/\mu\text{m}^2$ 이었다. 상대적으로 큰 양자점은 Punctuated Island Growth 기법으로[15] InAs 3.0 ML가 증착되어 형성된 것으로 양자점의 평균 밀면 길이와 높이는 각각 ~22 nm와 ~7.6 nm이고 양자점 밀도는  $\sim 670/\mu\text{m}^2$ 이었다.

그림 7(a)는 이러한 크고 작은 양자점 QDIPs의 파장에 따른 광전류 스펙트럼들을 보이고 있다. 작은 양자점 QDIP의 경우  $\sim 5 - 7 \mu\text{m}$  영역에서 폭넓은 스펙트럼을 보이고 있는 반면에 큰 양자점 QDIP은  $\sim 7.2 \mu\text{m}$ 의 피크를 가지는 매우 날카로운 스펙트럼을 보이고 있다. 이는 그림 7(b)에서 보인 것과 같이 서로 다른 Interband 천이들에 기인한 결과이다. 작은 양자점의 경우 전자기저에너지준위로부터 Quasi-bounded 또는 Continuum 상태로의 천이에 의해 매우 폭넓은 스펙트럼을 보이고 있는 반면에 큰 양자점의 경우는 Bounded 에너지준위로의 천이로 인해 매우 날카로운 피크를 가진다. 더욱이 이러한 천이의 차이는 광전류 및 암전류에도 지대한 영향을 미친다. 작은 양자점의 경우 Intraband 천이의 최종 에너지준위가 Quasi-bounded 또는 Continuum 상태이므로 광여기된 전자가 보다 쉽게 광전류에 기여하게 되어 큰 양자점보다 약 2배 정도

더 큰 광전류 값을 보인다. 그러나 작은 양자점의 경우 Intraband 천이가 시작되는 전자기저에너지준위에 대한 구속에너지 (Binding Energy)값이  $\sim 180 - 250 \text{ meV}$ 로서 큰 양자점의  $\sim 300 \pm 50 \text{ meV}$ 에 비해 작아 그림 8에서 보인 것과 같이 약 10배에서 1000배까지의 훨씬 더 큰 암전류 값을 가진다. 그 결과 QDIPs의 Detectivity는 큰 양자점이 보다 좋은 결과를 보였다. 큰 양자점 QDIP의 Detectivity는  $7.2 \mu\text{m}$ 에서  $1.5 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}(@77 \text{ K})$ 이었다 [16].

### 5. 양자점의 Capping층 효과 : QDIPs 성능 향상 및 감지파장의 변조

다층 양자점을 갖는 QDIPs 구조에서 양자점층간의 거리는 부정합 전위 등의 결함발생을 막기 위해 양자점에 의해 발생되어 축적되는 변위에너지를 완화시켜 줄 만큼 충분히 두꺼워야 한다. 또한 층간의 두께는 수직이송구조의 QDIPs에서는 광전류 및 암전류에 큰 영향을 미친다. 즉 층간 두께가 두꺼울수록 암전류 뿐만 아니라 광전류도 감소한다. 그러나 암전류를 더 큰 폭으로 줄일 수 있어 결과적으로 광전류/암전류 비율을 향상시킬 수 있다. 이를 극대화하기 위해 양자점 층간에  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  암전류 차단층을 넣어 QDIPs의 Detectivity를 크게 향상시킬 수 있다 [7].

그림 9는  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  층이 없는 QDIP과 Al 조성이 20%와 33%의  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 층이 3.0 ML InAs 양자점 각 층의 밑과 윗부분에 있는 QDIPs의 광전류/암전류 비율 특성을 보이고 있다. Al 조성이 증가함에 따라 광전류도 감소하지만 암전류 감소폭이 훨씬 더 커 광전류/암전류 비율이 약 100 - 1000배 정도 향상되는 것을 볼 수 있다. Al 33% 조성의 경우 광전류/암전류 비율에서 가장 큰 효과를 보였지만 QDIPs소자의 Detectivity를 측정하기에 광전류의 절대 값이 너무 작은 단점을 보였다. 반면에 Al 20%의 QDIP의 경우 그림 10에서 보인 것과 같이  $6.2 \mu\text{m}$ 에서  $9.6 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}(@77 \text{ K})$ 의 피크 Detectivity를 보여

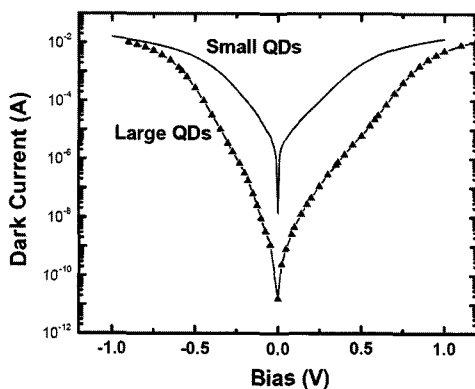


그림 8. 2.0 ML와 3.0 ML InAs/GaAs QDIPs의 암전류 특성.



$Al_{0.2}Ga_{0.8}As$  암전류 차단층이 없는 QDIPs보다 약 10 배 정도 향상된 소자성능을 보였다 [16].

지금까지 논의된 QDIPs의 감지파장 영역은  $\sim 6 - 7 \mu m$ 로서 지구 대기권 내에서 사용하기에 적합하지 않다. 대기권에서는 수분 및 각종 기체가스 등에 의해 적외선이 차단되어  $\sim 3 - 5 \mu m$ 와  $\sim 8 - 14 \mu m$ 의 적외선 대기창 (Atmospheric Window)들이 존재한다. 따라서 QDIPs의 적외선 감지파장을 이 영역으로 변조하는 것이 실제 소자응용에 있어서 매우 중요하다.

지난 십여 년 동안 양자점의 Interband 및 Intraband 천이파장을 변조하기 위해서 여러 가지 방법들이 연구되어졌다. 가장 대표적인 시도들은 양자점의 조성 및 크기 변화를 통한 변조, Thermal Annealing을 통한 변조, 양자점의 Capping층의 변화를 통한 변조가 있다. 이 중에서 양자점의 조성변화를 통한 변조는 그에 따른 양자점 형성조건이 바뀌게 되고 성장조건을 조절하여야 하는 단점이 있다. 또한 양자점의 크기를 크게 할 때 부정합 전위가 발생할 수 있는 단점이 있다. Thermal Annealing의 경우 InAs 양자점과 Capping층과의 상호확산 때문에 일반적으로 Interband와 Intraband 천이에너지들이 커지는 방향으로만 작용하며 그 역의 효과는 얻

을 수 없는 단점이 있다. 이에 반해 GaAs Capping층을 대신하여  $Al_xGa_{1-x}As$  및  $In_xGa_{1-x}As$  층으로 대체하면 InAs 양자점의 크기 및 분포에 큰 영향을 주지 않으면서도 양자점에 포텐셜 제한효과 및 변위에너지를 변화시켜 효과적으로 Interband와 Intraband 천이에너지들을 크게 또는 작게 자유로이 변화시킬 수 있는 장점이 있다 [8,9].

그림 11(a)은 2.0 ML InAs 양자점을 각각 GaAs와  $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ 로 Capping하여 제작한 QDIPs의 광전류 스펙트럼들을 보인 것이다. 이를 각각 편의상 GaAs QDIP과 InGaAs QDIP으로 명칭 하고자 한다. GaAs QDIP이  $\sim 5 - 7 \mu m$  영역에서 폭넓은 스펙트럼을 보이고 있는 반면에 InGaAs QDIP의 경우  $\sim 9 \mu m$ 에서 광전류 피크를 보여 QDIP의 적외선검출 파장이 효과적으로 장파장 적외선 영역으로 변조될 수 있다는 것을 보인다. 그림 11(b)는 GaAs와 InGaAs QDIPs에서 양자점의 에너지밴드구조 개략도를 보인 것이다. InGaAs Capping층을 가지는 양자점에서 중요한 점은 InGaAs Capping층이 그 자체의 에너지준위를 가지는 양자우물로 작용할 수 있다는 점이다. InGaAs/InAs/GaAs 에너지밴드구조와  $\sim 9 \mu m$ 의 Intraband 천이를 고려하여 보면 천이의 최종 에너지준위는 InGaAs 양자우물과 InAs 양자점의

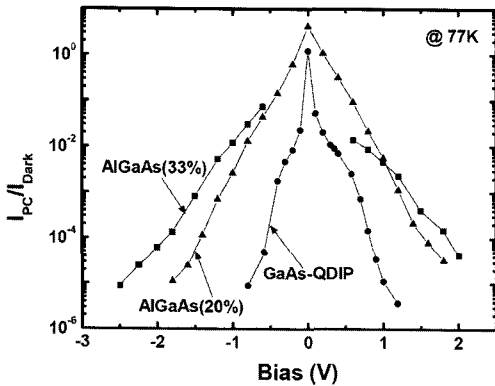


그림 9. GaAs와  $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ ,  $Al_{0.33}Ga_{0.67}As$  QDIPs의 광전류/암전류 비율 특성 [7].

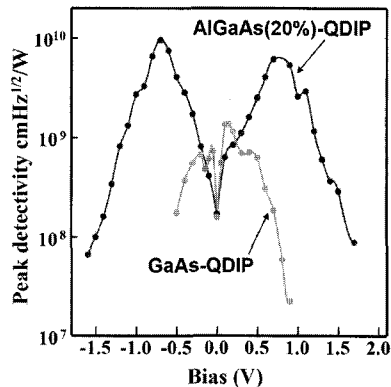
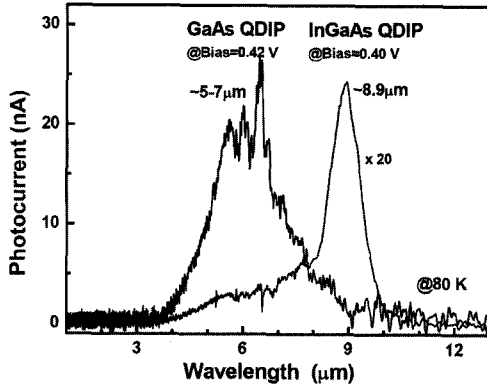
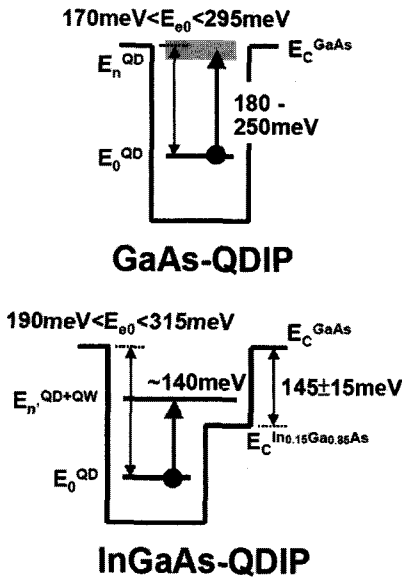


그림 10. GaAs와  $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$  QDIPs의 Detectivity 특성 [16].



(a)



(b)

그림 11. (a) GaAs와 In<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As QDIPs의 광전류 특성과 (b) 양자점 에너지밴드구조 개략도 [8].

에너지준위가 서로 혼합 또는 결부되어 있는 에너지 상태로 추정된다 [8]. 또한 InGaAs Capping층에 의해 양자점 변위에너지 및 포텐셜장벽을 낮춘 효과로 인해 전자기저에너지준위의 구속에너지가 커져 암전류가 감소하고 더 높은 Detectivity값을 보였다. InGaAs QDIP의 Detectivity는 77 K에서  $3.2 \times 10^9$  cmHz<sup>1/2</sup>/W (@8.3 μm)과 100 K에서  $1.5 \times 10^8$

cmHz<sup>1/2</sup>/W (@8.8 μm)이었다.

## 6. 이중대역 QDIPs

최근 적외선 이미지 및 탐색기 시스템에서 두가지 이상의 적외선 영역을 탐지할 수 있는 적외선소자에 대한 필요성 및 중요성이 점차 커지고 있다. GaAs를 기반으로 한 양자우물의 경우에는 최근에 이중대역 적외선 검출기 시제품 성능이 SPIE 국제학회에서 발표되고 있다. 반면에 양자점의 경우에는

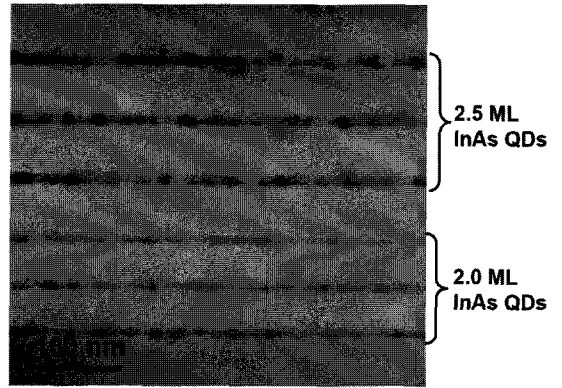


그림 12. 상대적으로 크고 작은 양자점을 갖는 QDIPs의 투과전자현미경 사진.

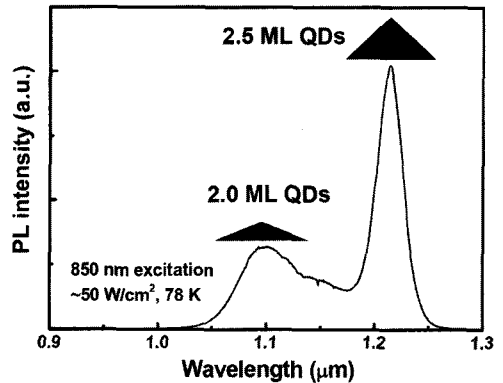


그림 13. 상대적으로 크고 작은 양자점을 갖는 QDIPs의 PL 특성.



2002년에 처음으로 두가지 서로 다른 크기의 양자점을 사용한 Voltage-tunable 이중대역 적외선소자특성이 발표되었다 [17,18]. 그림 12와 13은 각각 상대적으로 크고 작은 양자점을  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 로 Capping하여 제작된 QDIP의 투과전자현미경 사진과 PL 스펙트럼 결과를 보이고 있다. 상대적으로 작은 양자점은  $\text{InAs}$  2.0 ML를 증착시키고 큰 양자점은 2.5 ML를 증착하여 형성시킨 결과이다. 투과전자현미경 사진과 PL 스펙트럼에서 상대적으로 크고 작은 두가지 종류의 양자점이 존재한다는 것을 알 수 있다.

그림 14는 이러한 QDIP에서 측정된 인가된 바이어스에 따른 광전류 스펙트럼을 보인 것이다.  $\pm 0.6$  V 미만의 낮은 바이어스에서는  $\sim 5.5 - 6 \mu\text{m}$ 의 장파장 적외선영역에서 광전류 특성이 우세하게 되지만, 바이어스가 점점 증가함에 따라  $\sim 9 - 12 \mu\text{m}$ 의 장파장 적외선영역의 광전류가 상대적으로 증가함을 볼 수 있다. 결국  $\pm 1.2$  V 이상에서는 장파장 적외선영역에서의 광전류 특성이 우세하게 된다. 낮은 바이어스에서는 큰 양자점의 전자기저에너지준위에 전자가 상대적으로 우세하게 채워지게 되어 중파장 적외선 영역에서 광전류가 우세하게 된다. 그러나 점점 큰 바이어스가 인가됨에 따라 작은 양자점의 기

저에너지준위에도 전자가 채워지게 되고 광여기된 전자의 이득이 더 커져 장파장 적외선 영역에서 광전류가 우세하게 되는 것으로 판단되어 진다. 이러한 QDIPs에서 측정된 Detectivity는  $5.9 \mu\text{m}$ 에서  $5.8 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$  (@77 K)이었고  $10 \mu\text{m}$ 에서  $7.3 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$  (77 K)이었다.

## 7. 결론

최근 발표된 연구결과들을 바탕으로 QDIPs의 소자특성 및 성능과 이들에 영향을 미치는 주요 인자들에 대해 논의해 보았다. 양자점에 대한 전자의 도핑을 최소화하여 전자기저에너지준위에만 전자가 채워지도록 한 경우에 가장 좋은 QDIPs 성능을 보였으며,  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  암전류 차단층을 QDIPs 구조 내로 도입하여  $6.2 \mu\text{m}$ 에서  $9.6 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$  (@77 K)의 매우 큰 피크 Detectivity를 얻을 수 있었다. 또한  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 를  $\text{InAs}$  양자점의 Capping층으로 사용하여 QDIPs 적외선검출 파장을  $\sim 9 - 10 \mu\text{m}$ 의 장파장 적외선 영역으로 효과적으로 변조할 수 있었으며, 상대적 크고 작은 두가지 종류의 양자점을 사용하여 중파장 ( $\sim 5.5 - 6 \mu\text{m}$ ) 및 장파장 ( $\sim 9 - 12 \mu\text{m}$ ) 모두를 검출할 수 있는 이중대역 QDIPs를 제작할 수 있음을 보였다. QDIPs의 Detectivity는 77 K에서  $\sim 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$  정도로서 실용화되어 있는 양자우물의 경우보다 약 10배 정도 낮은 상태이다. 하지만 77 K 이상의 고온에서 동작할 수 있는 적외선소자를 제작할 수 있다는 큰 장점이 있으며, QDIPs 연구 및 기술발전 추세를 볼 때 향후 수년 이내에 QDIPs 시제품을 기대해 본다.

## 참고 문헌

- [1] D. Bimberg, M. Grundmann, and N. N. Ledentsov, "Quantum Dot Heterostructures", Wiley, Chichester, 1999, and references therein.
- [2] A. Madhukar, J. Campbell, E. T. Kim, Z. H. Chen,

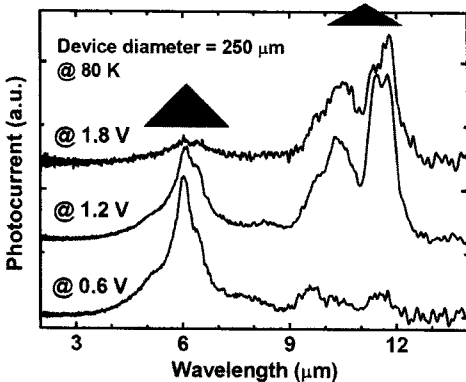


그림 14. Voltage-tunable 이중대역 광전류 특성 [9, 18, 19].

and Z. Ye, "Quantum Dot Infrared Photodetectors", Chapter in "Semiconductor Nanostructures for Optoelectronic Applications", edited by T. Steiner, Artech House, Inc., 2004.

- [3] B. F. Levine, J. Appl. Phys., Vol. 74, p. R1, 1993.
- [4] V. Ryzhii, Semicon. Sci. Technol., Vol. 11, p. 759 1996.
- [5] J. Phillips, P. Bhattacharya, S.W. Kennerly, D.W. Beekman, and M. Dutta, IEEE J. Quantum Electron., Vol. 35, p. 936, 1999, and references therein.
- [6] E. Towe and D. Pan, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., Vol. 6, p. 408, 2000, and references therein.
- [7] Z. H. Chen, O. Baklenov, E. T. Kim, I Mukhametzhanov, J. Tie, A. Madhukar, Z. Ye, and J. C. Campbell, J. Appl. Phys., Vol. 89, p. 4558, 2001.
- [8] E. T. Kim, Z. H. Chen, and A. Madhukar, Appl. Phys. Lett., Vol. 79, p. 3341, 2001.
- [9] E. T. Kim, Ph.D. Dissertation, University of Southern California, May 2003.
- [10] S. Guha, A. Madhukar, and K. C. Rajkumar, Appl. Phys. Lett., Vol. 57, p. 2110, 1990.
- [11] D. Leonard, M. Krishnamurthy, C. M. Reaves, S. P. Denbarrs, and P. M. Petroff, Appl. Phys. Lett., Vol. 63, p. 3203, 1993.
- [12] D. J. Eaglesham, and M. Cerullo, Phys. Rev. Lett., Vol. 64, p. 1943, 1990.
- [13] V. Ryzhii, I. Khmyrova, V. Pipa, V. Mitin and M Willander, Semicond. Sci. Technol., Vol. 16, p. 331, 2001.
- [14] V. Ryzhii, I Khmyrova, M. Ershov and T. Iizuka, Semicond. Sci. Technol., Vol. 10, p. 997, 1995.
- [15] I. Mukhametzhanov, Z. Wei, R. Heitz, and A. Madhukar, Appl. Phys. Lett., Vol. 75, p. 85, 1999.
- [16] Z. Ye, J. Campbell, Z. H. Chen, E. T. Kim, and A. Madhukar, J. Quantum Electron., Vol. 38, p. 1234, 2002.
- [17] E. T. Kim, Z. H. Chen, M. Ho, and A. Madhukar, J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 20, p. 1188, 2002.
- [18] Z. H. Chen, E. T. Kim, and A. Madhukar, Appl. Phys. Lett., Vol. 80, p. 2490, 2002.

## 저|자|약|력



성 명 : 김의태

◆ 학 력

- 1991년 충남대 재료공학과 공학사
- 1993년 충남대 대학원 재료공학과 공학석사
- 2003년 Univ. of Southern California, 재료공학과 공학박사

◆ 경 력

- 2005년 - 현재 충남대 나노공학부 조교수
- 2004년 - 2004년 Univ. of California, Berkeley, 전자공학과 Post Doc.
- 2003년 - 2004년 Univ. of Southern California, 재료공학과 Post Doc.
- 1993년 - 1998년 KEC(주) 선임연구원

