

양자점 원적외선 감지소자(QDIP)

QDIP(Quantum Dot Infrared Photodetector)란 반도체 양자점을 흡수매질로 이용하는 원적외선(far-infrared) 감지기(detector)이다. 양자점이란 입자의 운동을 3차원적으로 모두 제한하는 수십 nanometer 크기의 양자구조로서 물리적으로나 응용적으로 많은 연구가 되어 왔지만, 양질(high quality)의 양자점을 만들기가 어려워서 양자점에 대한 연구가 제한적이었다. 약 10년 전에 양자점과 배리어(barrier) 물질의 격자상수 차에 의해 생기는 스트레인(strain)을 이용하여 양자점이 자연 성장되는 방법이 개발됨에 따라 양질의 양자점을 성장할 수 있게 되었다. 이에 따라 자연 성장된 양자점(self-organized QD)을 이용해서 LD(laser diode)나 QDIP등과 같은 소자(device)를 만들려는 연구가 세계적으로 진행중이다^{1,2)}. 우리의

처럼 물체의 온도가 높을수록 물체는 짧은 파장의 전자기파를 많이 방출한다. 이것을 역으로 생각하면, 어떤 물체로부터 나오는 전자기파를 파장에 따라 공간적으로 분석하면 그 물체의 온도분포를 알아낼 수 있다. 이로부터 그 물체가 무엇인지 어떤 상태에 있는지 등의 정보를 알아낼 수 있다. 물체가 어떤 전자기파를 내느냐는 그 물체가 빛에 노출되어 있느냐 없느냐와는 상관없이 그 물체의 온도에만 의존한다. 결과적으로, 물체가 내는 전자기파를 측정해서 분석하면 그 물체에 대한 정보를 얻을 수 있고, 이러한 절차는 밤과 같이 우리 눈이 무용지물이 되는 상황에서도 가능해진다.

실은 근처의 물질이 가장 강하게 내는 빛의 파장이 원적외선인 10 μm 근처이고, 원적외선 중 대기중에 흡수되거나 산란되지 않고 멀리까지 갈 수 있는 파장

특집 ■ 나노포토닉스

양자점 원적외선 감지소자(QDIP)

이욱현*, 박진성*, 이동한**, 홍성철*

눈은 거의 가시광선만을 감지한다. 가시광선보다 파장이 짧은 자외선이나 파장이 긴 적외선은 거의 감지하지 못한다. 눈이 물체가 어떠한 가시광선 분포를 하는지를 감지함으로써, 우리는 그 물체의 형태를 파악하고 그 물체가 무엇인지 어떤 상태에 있는지 등을 인지한다. 하지만, 이러한 절차는 물체가 빛에 노출되어 있을 때에만 가능하지 물체가 빛이 없는 어두운 곳에 있다면 불가능해진다.

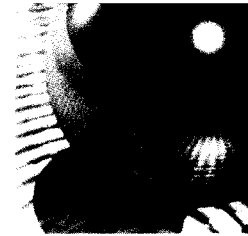
빛이 없는 상황에서 우리의 눈은 무용지물이 되는 것이다.

모든 물체는 자신의 온도에 따라 전자기파를 발산한다. 태양의 표면은 약 6천도 정도로 태양의 표면은 파장이 약 500 nm 정도의 가시광선을 내고, 사람은 약 30도 정도로 10 μm 근처의 원적외선을 방출한다. 이

대역(atmospheric window)이 8~14 μm인 것을 고려할 때, 눈에 보이지 않는 원적외선을 감지하는 기술은 군사용 의료용 산업용 등 여러 분야에 쓰일 수 있어 매우 중요하다. 예로서, 한밤중에 수 km 떨어진 곳의 사람을 인식할 수 있을 뿐만 아니라, 사람이 내는 원적외선을 신체부위에 따라 분석해서 암, 골절 등을 진단할 수 있고, 상품의 상태나 결함 등도 진단할 수 있다.

원적외선 감지기에는 여러 유형(type)이 있는데 크게 thermal detector와 photon detector로 나눌 수 있다. Thermal detector는 원적외선을 흡수해서 발생하는 열 때문에 생기는 저항(bolometer type), 길이(Golay cell type), 전압(thermocouple type) 등의 변화를 측정하고, Photon detector는 원적외선을 흡수해서 생기는 반송자(mobile carrier)에 의한 전류

* 한국과학기술원 전자전산학과
** 충남대학교 물리학과



(photo-current type)나 전압(photo voltatic type)을 측정해서 각각 동작한다³⁹⁾. 이 두 감지기에 대한 특성 비교가 표 1에 나타난다. Thermal detector는 넓은 파장대역에서 사용할 수 있고 실온에서도 동작하고 값이 싸지만, 반응속도(response speed)가 느리고 효율(quantum efficiency)이 떨어진다. 이에 비해 photon detector는 상대적으로 좁은 파장대역에서 사용되고 실온동작이 어렵고 비싸지만, 반응속도가 빠르고 효율이 매우 높다. 광전 소자(photoelectric device)에는 효율이 좋아서 아주 약한 빛에도 잘 반응하고 빠른 반응속도를 갖는 photon detector가 널리 사용된다.

Photon detector는 빛을 흡수해서 생긴 반송자가 흡수매질 밖으로 나오느냐 못나오느냐에 따라 다시 크게 external과 internal 유형으로 나눌 수 있다. 반송자를 흡수매질 밖으로 나오게 하려면 충분히 큰 에너지가 있어야 하는데 원적외선은 아주 작은 에너지를 갖기 때문에, 원적외선 감지기는 거의 모든 경우 internal type이다. Internal type의 photon detector는 대부분 반도체로 만들어지고 흡수매질의 구조에 따라 bulk IP(IR photodetector), QWIP, QDIP 3가지 형태로 나눌 수 있다.

이들에 대한 특성 비교가 표 2에 나타난다.

MCT(HgCdTe)나 InSb같은 반도체 bulk나 InGaAs/GaAs나 GaAs/AlGaAs같은 반도체 양자우물(quantum wells: QWs)을 흡수매질로 하는 감지기는

아주 오래 전부터 지금까지도 연구되고 있고, 이미 상용화 되었다. 그림 1은 2차원 배열(focal plane array: FPA) MCT로 측정한 남자 세 명의 열상(thermal image)을 보여주고, 그림 2는 2차원 배열 QWIP 사진과 이 QWIP로 측정한 열상을 보여준다.

Bulk의 경우 밴드사이의 천이(interband transition)를 이용하여 원적외선을 감지하므로 doping을 하지 않아도 되고 효율도 좋지만, InSb의 경우 측정파장을 원적외선에 맞추기 어렵고 MCT의 경우 물질자체가 단단하지 못해서 공정(processing)이 어렵다. 더욱이 QWIP의 경우는 원적외선을 감지하기 위해 같은 밴드사이의 천이(intersubband transition)를 이용하는데, 이 천이는 성장방향에 평행하게 진행하는 빛에 반응하지 않으므로 실제 응용에 많은 제약이 따른다⁴⁰⁾. 즉, 소자 표면에 수직으로 입사한 빛을 흡수하지 못하므로 2 차원 배열 등을 만들기가 어렵

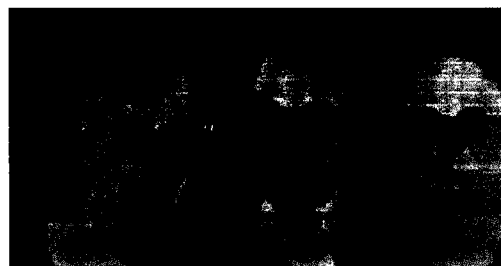


그림 1. 2차원 배열 MCT로 측정된 열상. (김병혁, 이희철, 김충기, 전자공학 회논문지 제 37권 SC편 제 3호, 223-231, 2000'를 인용함)

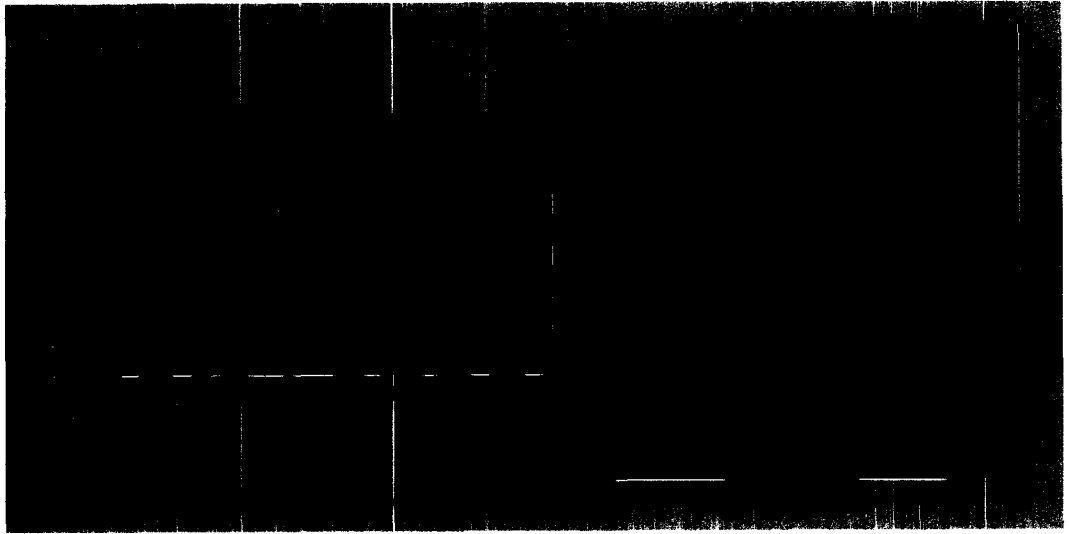
표 1. Thermal detector와 photon detector의 특성 비교.

| | Thermal detector | Photon detector |
|-----------------------|------------------|-----------------|
| Spectral response | wide | limited |
| Operating temperature | RT | cooled |
| Cost | cheap | expensive |
| Quantum efficiency | poor | high |
| Response speed | slow | fast |

표 2. Photon detector의 흡수매질 구조에 따른 특성 비교

| | Bulk IP | QWIP | QDIP |
|---------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|
| Absorption material | MCT (HgCdTe) InSb | InGaAs/GaAs GaAs/AlGaAs | InAs/GaAs SiGe/Si |
| Transition | interband | intersubband | intersublevel |
| Doping | no | required | required |
| Operating temperature | < 77 K | < 77 K | near RT |
| Normal incidence geometry | available | no | available |
| Quantum Efficiency | high | low | ? |
| Mature III-V technology | no | available | available |

양자점 원적외선 감지소자(QDIP)



다. 무엇보다도, bulk IP나 QWIP에서 가장 문제가 되는 점은 77 K이하에서만 동작한다는 것이다. 77 K 이상의 온도에서는 열적으로 생긴 반송자(mobile carrier)들에 의해 생기는 잡음(noise)때문에 사용이 제한된다^[5]. 따라서 bulk나 QWs를 이용한 감지기에 는 반드시 값비싼 냉각장치를 두어야만 한다.

이에 비해 QDIP의 가장 큰 장점은 상온동작의 가능성이다. 양자점은 입자의 운동을 3차원적으로 모두 제한하므로 DOS(density of states)가 완전히 불연속적이 된다. 이로 인해 양자점 내의 전자나 홀(hole)들이 상온에서도 열적으로 반송자(mobile carrier)가 되기 어려워지기 때문에 QDIP가 상온동작 할 가능성이 커진다^[6]. 또한, 양자점을 흡수매질로 하면 QWIP와는 다르게 성장방향에 평행하게 진행하는 빛에 반응하므로^[6], 2차원 배열로 만들어서 열상을 측정하기에 용이하다. 따라서, QDIP의 상온동작이 실현된다면 그 파급효과는 매우 클 것이다.

전자의 sublevel 사이의 천이(intersublevel transition)를 이용하여 동작하는 QDIP의 동작원리가 그림 3에 나타난다. 양자점 내의 전자가 원적외선을 흡수하여 양자점 밖으로 여기 되고, 이때 외부 전압에 의해 광전류(photo-current: PC)를 만들어 낸다. 흡수되는 원적외선의 파장은 sublevel 사이의 에너지 차이에 관계되므로, 원하는 파장의 원적외선을 흡수하기 위해서는 양자점과 배리어 물질을 선택하고 양자점의 크기를 조절하면 된다. 그리고, 원적외선을

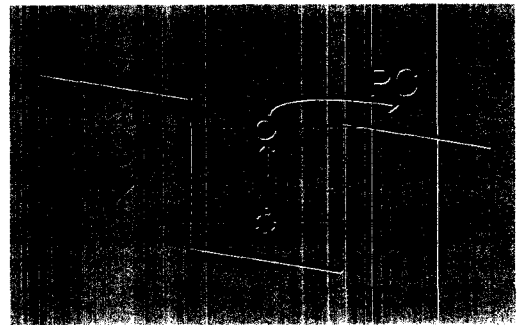


그림 3. QDIP의 동작원리

흡수하기 위해서는 양자점 내에 전자가 있어야 하므로, 시료를 만들 때 양자점 근처나 양자점 내에 doping을 해야 한다.

그림 4는 실제 실험에 사용한 QDIP의 단면 개략도이다. 흡수매질은 5 주기의 InAs/GaAs 양자점이고, n doping은 양자점 층 바로 위에 modulation doping을 하였다. 그림 5는 온도에 따라 측정 한 intersublevel 광전류 스펙트럼들(PC spectra)이다. 흡수 peak은 대략 10 μ m이고 온도에 따라 거의 바뀌지 않는다. PC 신호는 110 K까지는 거의 유지되고, 130 K부터 온도에 따라 지수 함수적으로(exponentially) 감소하여 210 K까지 측정되었다. 이것으로, QDIP가 QWIP나 MCT detector에 비해 높은 온도에서 동작할 수 있음을 알 수 있고 QDIP의 실온 동작 가능성을 보였다. QDIP의 실온동작을 위해서는 양자점의 quality, QDIP의 구조, doping 정도

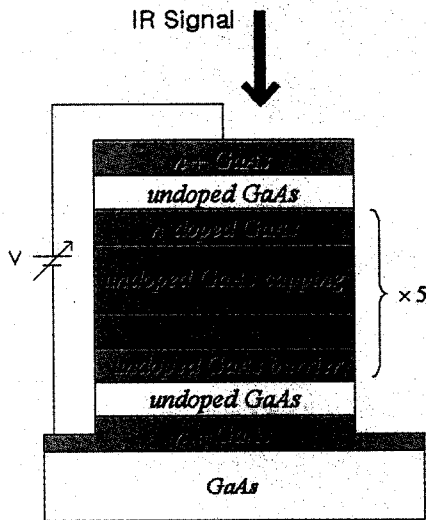
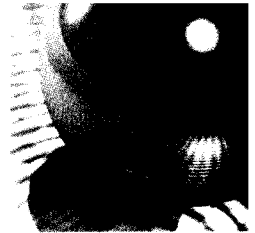


그림 4. QDIP의 단면 개략도

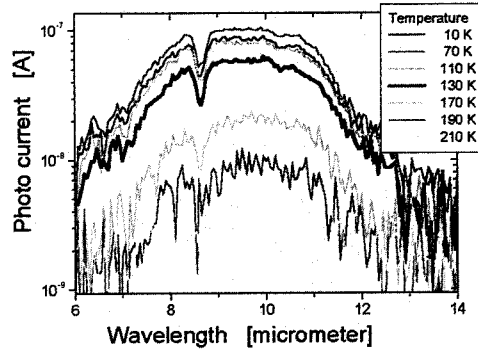


그림 5. QDIP로부터 측정된 온도에 따른 intersublevel 광전류 스펙트럼들

(concentration) 등등을 최적화해야 할 것이다.

Acknowledgement: IMT2000 출연금 나노연구 지원사업의 QSIP 과제에 참여 하신 KIST 이정일, KRISS 노삼규 박사님의 도움이 있었습니다. 그림 5의 물질성장은 KRISS에서 이루어졌습니다.

- (4) H. C. Liu, M. Buchanan, and Z. R. Wasilewski, Appl. Phys. Lett. 72, 1682 (1998).
- (5) Shiang-Feng Tang, Shih-Yen Lin, and Si-Chen Lee, Appl. Phys. Lett. 78, 2428 (2001).
- (6) E. Finkman et al, Phys. Rev. B 63, 45323 (2001).

약 력

참고문헌

- (1) D. Bimberg, M. Grundmann, and N. N. Ledentsov, Quantum Dot Heterostructures (Wiley, London, 1999).
- (2) Eui-Tae Kim, Zhonghui Chen, and Anupam Madhukar, Appl. Phys. Lett. 79, 3341 (2001).
- (3) John David Vincent, Fundamentals of Infrared Detector Operation and Testing (Wiley, 1989).



홍성철

59년에 태어났으며, 82년과, 84년에 서울대학교 전자공학과 및 동 대학원을 졸업했으며, 미시간대학에서 89년에 양자우물 광 스핀칭 소자와 모듈레이터로 박사학위를 받았음. 그 후 한국과학기술원에서 교수로 재직하고 있으며, 97년 스탠포드 대학에 방문, 삼성 마이크로웨이브 반도체 회사에서 객원연구원으로 활동하였다. 현재 관심분야는 양

자우물과 양자점을 이용하는 신소자 기반의 신시스템과, 마이크로파 전력증폭기 및 주파수 합성기 및 그의 응용시스템을 연구하고 있다.

E-mail: schong@ee.kaist.ac.kr