

## 1×8배열, 7.8 μm 최대반응 GaAs/AlGaAs 양자우물 적외선 검출기

박은영 · 최정우

경희대학교 물리학과

노삼규

한국표준과학연구원 박막연구부

최우석 · 박승한

연세대학교 물리학과

조태희 · 홍성철

한국과학기술원 전기 및 전자공학과

오병성

충남대학교 물리학과

이승주

육군사관학교 물리학과

(1998년 11월 17일 받음, 1998년 12월 5일 수정본 받음)

장파장영역의 적외선 검출을 위해 구속-비구속 상태간 전이를 이용한 GaAs/AlGaAs 이종접합 다중양자우물구조형태 검출기를 제작하여 전기적, 광학적 특성을 살펴보았다. 시료는 MBE를 이용하여 SI-GaAs(100) 기판 위에 장벽 500 Å, 폭 40 Å의 양자우물구조를 25층 성장시켰으며, Al의 몰분율은 0.28로 하였고 우물의 중심부 20 Å은  $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 의 농도로 Si n-도핑을 하였다.  $200 \times 200 \mu\text{m}^2$  면적의 사각형 화소가 되도록 시료를 식각한 후 Au/Ge로 전극을 붙여 1×8 검출기 배열을 제작하였다. 10K의 온도에서 적외선 광원에 대한 광특성을 조사한 결과 1차원으로 배열한 8개의 단일소자 모두 7.8 μm 파장에서 최대반응을 보였으며 검출률( $D^*$ )은 최대  $4.9 \times 10^9 \text{ cm} \sqrt{\text{Hz/W}}$ 이었다.

### I. 서 론

장파장 적외선 (8~12 μm) 영역은 사람 체온 (~300K)에서의 흑체복사가 이 영역에서 최대 값을 갖는다는 점에서 야간인물식별 등에 사용되고, 또 공기에 잘 흡수되지 않아 안개나 연기가 있는 곳에서의 투시나 천체관측에 유용하게 쓰인다. 또한 10 μm 부근의 적외선은 물질의 구조를 밝히는 Raman 분광학에 많이 쓰이며 적외선 열처리등 의학분야에서의 이용 가치도 점점 증대되어가고 있다.<sup>[1,2]</sup> 그런데 이런 실질적인 응용가치와 학문적 도구로서의 중요성에도 불구하고 현재까지도 만족할 만한 적외선 검출기를 찾기는 어려운 형편인데, 이의 가장 큰 이유로서는 장파장 적외선에 해당하는 에너지가 보통 우리가 쉽게 얻을 수 있는 반도체들의 띠간격(band gap) 보다 훨씬 작기 때문이다. 예를 들어 10 μm에 해당하는 광자(photon) 에너지는 0.12 eV(120 meV)로서 일반적으로 잘 알려진 반도체의 띠간격(Si; 1.1 eV, GaAs; 1.4 eV 등)보다 훨씬 작다. 이런 작은 에너지의 적외선을 효율적으로 검출하기 위

해서는 띠간격이 작은 II-VI계 화합물인 HgCdTe가 많이 쓰이고, 이밖에는 광전압형 검출기인 InSb 검출기,<sup>[3]</sup> 또는 쇼트키 다이오드 형태의 PtSi 또는 IrSi 검출기 등이 이용된다.<sup>[4]</sup> 그러나 HgCdTe 검출기는 높은 양자효율과 검출률에 비해 안정성과 균일성이 떨어지고 InSb나 PtSi 검출기 등은 균일성과 저가성의 장점은 있으나 양자효율이 낮고 장파장영역을 충분히 다루기에는 곤란하다는 단점이 있다. 이러한 배경을 바탕으로 최근의 적외선 검출소자 연구는 고전적인 HgCdTe를 이용한 방법의 현격한 진전 이외에 GaAs/AlGaAs나 InGaAs/InAlAs 등 양자우물구조를 이용한 방법,<sup>[5,6]</sup> 또는 Si/SiGe 구조를 이용한 방법<sup>[7]</sup> 등이 선을 보여 좋은 결과를 나타내고 있다. 이 중 괄목할만한 것이 띠간격공정이라 부르는 특수한 과정을 통해 만든 양자우물구조를 사용하는 방법인데,<sup>[11,8]</sup> 이는 최근에 MBE(Molecular Beam Epitaxy) 또는 MOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 등 반도체결정 성장기술의 발달로 원자단층 범위에서의 결정성장이 가능해짐에 따라 GaAs와 AlGaAs를 층별로 번갈아 쌓음으로써 전도띠 또는

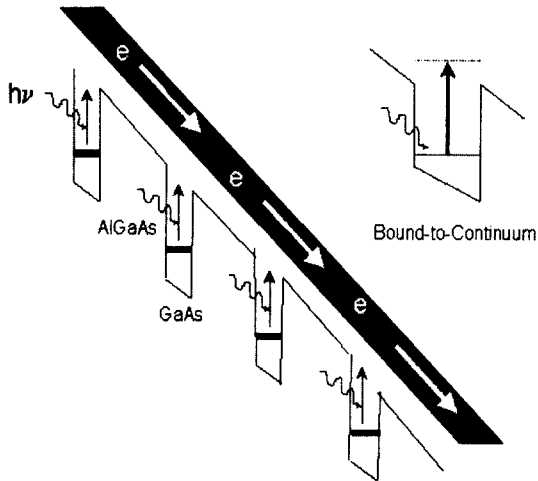


그림 1. 전기장이 걸린 양자우물구조에서 구속·비구속 상태로의 전이.

가전파 내에 원하는 부띠(subband)를 가진 인공적인 격자구조를 만들어 이 부띠 사이에서 적외선을 검출하는 방식을 일컫는다.<sup>[9-11]</sup> 이러한 적외선 검출방법은 1985년도에 L. C. West가 실험으로써 처음 그 가능성을 입증하였으며<sup>[9]</sup> 이후 미국 AT&T 연구소의 B. F. Levine 등 많은 사람들의 연구에 의해 큰 발전을 이루어 왔다.<sup>[10-12]</sup> 양자우물구조 적외선 검출기는 광전도형태와<sup>[10]</sup> 광전압형태의<sup>[13]</sup> 두 가지 형태로 연구되었는데 일반적으로 광전도형태가 더 높은 검출률을 보여주었으며, 적외선의 수직입사를 위해서는 화소 위에 회절격자(grating)를 만들어 적외선이 활성층과 반응할 수 있게 하는 연구가 많이 진행되었다.<sup>[14]</sup> 이러한 연구들을 바탕으로 B. F. Levine은 8 μm에서 최대로 반응하며 온도 77K에서 검출률이  $10^{10} \text{ cm} \sqrt{\text{Hz/W}}$  이상인 128×128 검출기 배열을 제작할 수 있었고, 최근에 미국의 제트추진연구소(JPL)에서는 GaAs/AlGaAs 열상 사진기 제작에 성공하였다.<sup>[15]</sup> 이 열상 사진기에 이용된 단일소자는 투과를 막기 위해 장벽의 두께는 아주 두껍게 하고 ( $\geq 300\text{\AA}$ ) 그 대신 광전자는 원활히 움직일 수 있도록 들뜬 상태가 장벽 위에 위치한 구조를 하고 있다. 이를 구속·비구속상태 전이 검출기라 하며(그림 1참조), 현재 GaAs/AlGaAs 단일소자 검출기로서는 이러한 구조가 가장 높은 검출률을 보여주고 있다. 본 논문에서는 이러한 구속·비구속 상태 전이를 이용하여 8 μm에서 최대 빛반응도를 갖도록 적외선 검출소자를 설계, 제작하고 광검출 특성을 측정한 후 그 결과를 분석하였다.

## II. 소자제작 및 측정

### 2.1. 소자설계

원하는 파장영역에서 동작하는 적외선 검출기를 제작하기 위하여 먼저 적당한 부띠간격을 갖는 양자우물구조를 설계할 필요가 있다. 양자우물구조 적외선 검출기는 보통 n형이 첨가된 양자우물구조에 전기장을 가함으로써 경사진 띠구조 모양을 갖는 광전도 형태(photoconductive type)로 동작하는 데, 이

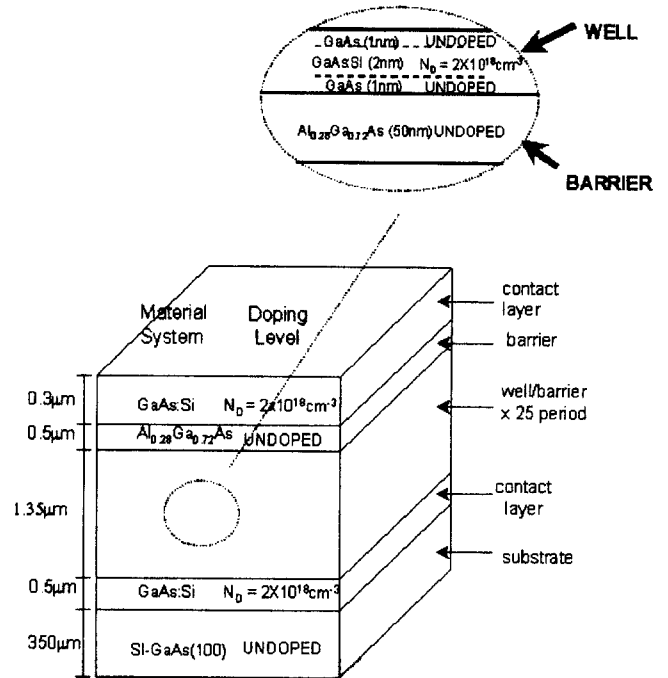


그림 2. 적외선 검출소자의 Layer 구조.

때 부띠들은 준안정상태가 되고 이들의 에너지준위를 계산하기 위해 에너지의 복소수화 방법을 이용한다. 자세한 사항은 다른 논문에서 다룬바 있다.<sup>[16,17]</sup> 이 실험에서 사용한 적외선 검출소자의 구조는 그림 2와 같은 데, 수직방향으로 350 μm의 Si-GaAs(100)기판 위에 25층의 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 다중양자우물 구조를 성장시켰다. 우물의 폭은 40 Å이고, 장벽의 Al 몰분율은 0.28이며 터널링에 의한 암전류를 줄이기 위해 장벽의 두께는 500 Å로 크게 하였다. 또한 도핑에 의해 경계면에 표면상태가 생기지 않도록 양자우물은 그 중심부 20 Å에만  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 의 Si-도핑을 하여 시료를 구성하였다. 이 뱃음변수(parameter)들을 이용하여 반응과장을 예측해 보면, 양자우물내의 바닥상태 에너지는 88 meV이고 장벽 위 들뜬상태의 에너지는 235 meV가 되어 이 차이는 147 meV인데 여기에 다체효과 등을 (~10 meV) 더하면 이 검출기는 8 μm에서 최대 반응을 갖는 구조가 된다.

### 2.2. 소자제작 및 측정

위와 같이 제작된 시료를 그림 3의 모양으로 일부를 접촉층(contact layer)까지 식각한 후 Au/Ge를 사용하여 오음 접촉을 만들었다. 그리고 부띠 사이의 전이(intersubband transition)에 대한 선택률을 만족시키기 위하여 옆면을 45°로 갈아내었다.<sup>[18,19]</sup> 옆면을 45°로 갈아낸 적외선 검출소자를 광원에 수직하게 놓을 수 있도록, 열전도도가 좋은 원통형 무산소동의 끝을 45°로 깎아 고정대를 제작하고 이를 덮개에 부착하였다. 이때 정확한 초점의 조정을 위해 빛을 받는 검출기의 위치가 표준검출기로 사용하는 HgCdTe 검출기나 초전기(Pyroelectric) 검출기가 위치할 부분과 동일하도록 조절하였으며 검출소자의 온도를 정확히 측정하기 위해 열 감지기를 열전도도가 좋은 cry-con 그리스로 고정대에 부착하고 검출소자를 은풀을

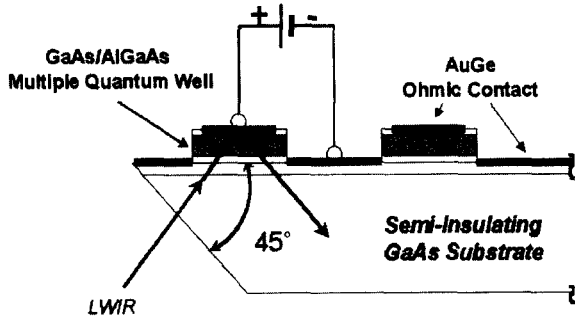


그림 3. 제작된 적외선 검출기의 구조.

사용하여 부착한 후, 직렬 부하저항을 연결한 다음 위상고정 증폭기(Lock-in Amplifier: EG & G 5209)를 부하저항에 병렬로 연결하였다. 회로연결이 끝나면 항온조 내부를 약 1 mtorr 정도의 진공상태로 만든 후 냉동조를 가동시켜 저온상태로 조절하고 소자의 특성을 측정하였다. 자세한 실험방법 및 장치 개념도는 다른 논문에서 다루바 있다.<sup>[20]</sup>

### III. 실험결과 및 논의

#### 3.1. 적외선 검출기 특성 측정장치의 파장별 광량

GaAs/AlGaAs 장파장 검출기의 파장별 검출률을 측정하기 위해선 먼저 적외선 검출기 특성 측정장치의 파장별 광량을 측정하여야 한다. 광량측정을 위해 검출률이 알려진 양자형태의 상업용 HgCdTe 검출기 (Graseby Infrared 61334, 이하 MCT 61334로 표시)와 반응범위가 1~20 μm로 넓고 반응도가 파장에 따라 거의 변하지 않는 Pyroelectric 검출기 (Spex, P 2613-08 (KRS-5)) 등 두 개의 표준검출기를 사용하였다. 먼저 MCT 61334를 이용, 검출기 자체의 반응도를 고려하여 7.8 μm에서 다음과 같이 광원의 세기를 구하였다. MCT검출기의 바이어스 전류가 30 mA이고 온도가 77K 일 때 제작회사가 제시한 7.8 μm에서의 반응도는 9.6 V/W이었고, 실험으로부터 7.8 μm에서 측정된 빛전력값은 0.27 μV이었으므로 이를 이용하여 7.8 μm에서 본 실험장치의 광원의 세기를 구하면 0.27 μV/(9.96V/W)=0.027 μW이다. 검출기의 단면적은 2.0 mm×2.0 mm=0.04 cm<sup>2</sup>이므로 빛다발밀도(flux density)는 0.68 μW/cm<sup>2</sup>가 된다. 위와 같은 방식으로 각각의 파장별 반응도를 고려하여 계산한 실험장치의 파장별 빛다발밀도를 구하였다. Pyroelectric 검출기는 열검출기이므로 반응속도가 떨어지지만 상온에서 동작하는 장점이 있고, 반응파장범위가 1~20 μm 나 되며, 또 거의 일정한 반응도를 가지고 있어 검출기의 빛반응 특성을 바로 실험장치의 파장별 빛세기로 볼 수 있다. Pyroelectric 검출기의 빛반응 곡선도 10 μm 부근에서 최대값을 갖고 MCT61334와 거의 같은 결과를 보여주었다.

#### 3.2. 검출기의 암전류-전압 특성곡선

검출소자의 파장별 적외선 검출특성을 알아보기 위해서는 먼저 최적의 바이어스 값과 동작온도를 결정해야 한다. 이를 위하여 우선 제작된 검출기의 저온(10K) 암전류-전압 특성곡선(그림 4)을 살펴보면 각 소자의 구조가 양 접촉부분을 기준

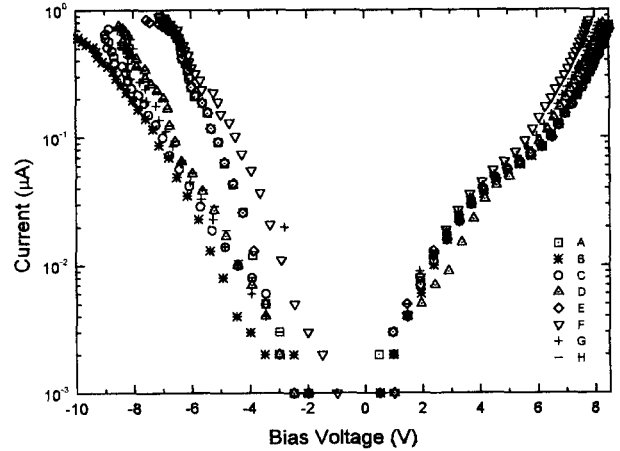


그림 4. 제작된 검출소자들의 암전류-전압 특성.

으로 대칭임에도 불구하고 암전류-전압 특성 곡선은 0V를 기준으로 완전한 대칭은 아님을 볼 수 있다. 이는 소자 제작시 기판으로부터 층을 쌓아 올라가면서 방향성이 생기기 때문이다. 곡선을 보면 8개의 검출소자 모두 거의 동일한 특성을 보여 주어 제작된 검출기가 균일한 특성을 가지고 성장되었음을 알 수 있다. 다음에 단색화장치를 특정파장(예를 들어 7.8 μm)에 고정시킨 후 단속기의 주파수와 초점을 조절하여 검출기가 가장 큰 출력 값을 얻도록 조절한 뒤, 온도를 10K로 고정하고 바이어스 전압을 4.5V~8.5V 사이에서 변화시켜 가며 검출소자의 반응을 실험하여 7.3V의 바이어스 전압에서 검출률이 최대가 됨을 확인할 수 있었다(그림 5).

#### 3.3. GaAs/AlGaAs 검출소자의 파장별 반응 특성과 검출률 (Detectivity)

각 소자의 파장별 적외선 탐지특성을 알아보기 위해 온도를 10K까지 내린 후, 단속기의 주파수를 467HZ로 조정하고 여기에 연결된 위상고정 증폭기(Lock-in)의 시간상수를 300 ms로 설정하였다. 앞서 구하였듯이 검출률이 최대가 되는 적절한 바이어스값 7.3V를 검출기에 걸어 준 다음, 적외선 초점 위치를 조정하기 위해 단색화장치의 파장을 7.8 μm에 고정하

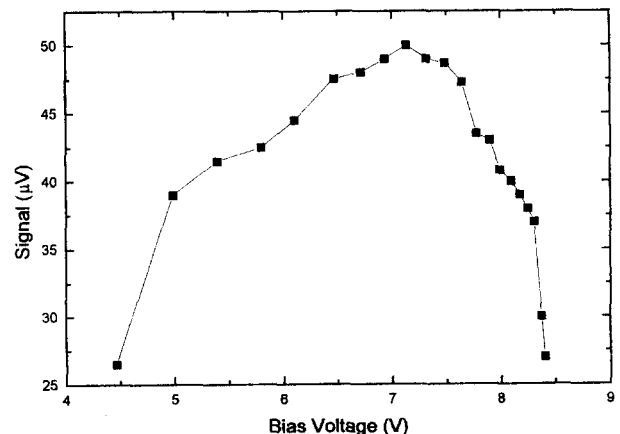


그림 5. 바이어스 전압 변화에 따른 봉우리 파장에서의 광기전력 변화.

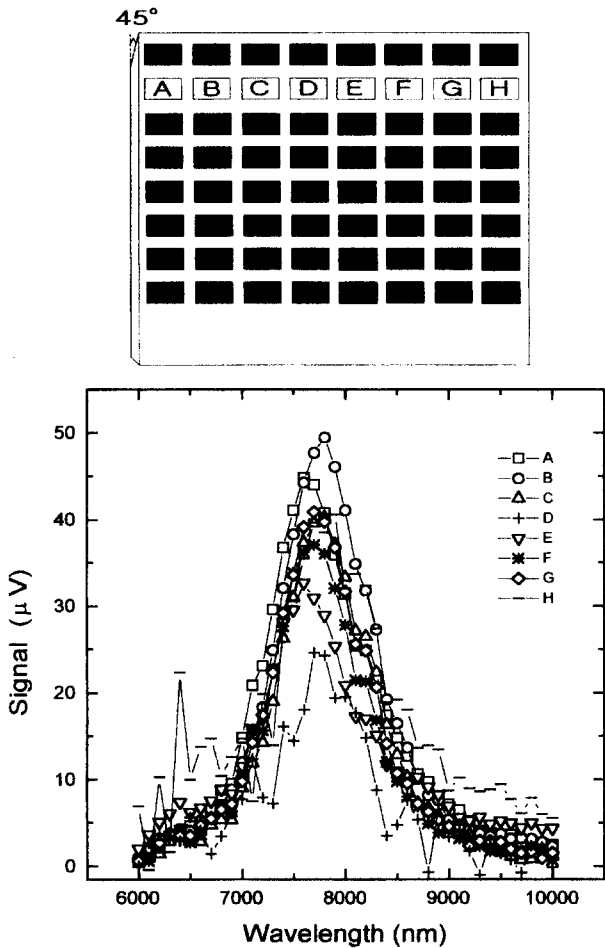


그림 6. 제작된 1×8 적외선 검출기 배열모습과 이들의 빛반응 특성.

고 거울상자와 단속기의 위치를 위상고정증폭기의 출력이 가장 크도록 조정하였다. Igor 프로그램을 이용하여 파장범위 6~10 μm에서 0.1 μm의 간격으로 위상고정 증폭기의 출력 값을 읽었으며, 이에 따라 각 적외선 탐지소자의 빛반응특성은 그림 6과 같이 균일하게 나타났다. 이 반응곡선에서 봉우리 (peak)는 7.8 μm에서 나타났으며 이는 이론적인 예상 값 8 μm와 잘 일치하였다. 화소(pixel) B를 기준으로 삼았을 때 신호의 크기는 49,429 nV이었다. 여기서 200×200 μm<sup>2</sup>인 검출기의 면적을 고려하여 앞서 얻어진 빛다발밀도로부터 광원의 빛세기를 계산하였다. 다음에 진공상자의 창을 가리고 위와 동일한 조건에서 위상고정증폭기에서 출력 값을 얻음으로써 잡음 (noise)의 크기를 알아보았으며, 그 평균값은 463 nV이었다. 이 때 검출률(D\*)은 다음과 같이 주어지는데,<sup>[21]</sup>

$$D^* = \frac{R \sqrt{A_d}}{N / \sqrt{\Delta f}} \quad (1)$$

$$= \frac{\sqrt{A_d}}{NEP} \quad (2)$$

여기서 R은 반응도이고 N은 잡음의 크기이며 A<sub>d</sub>와 Δf는 각 검출기의 면적과 띠편을 의미한다. 이로부터 본 실험에서

사용한 다중양자우물 적외선 검출기의 검출률을 구하면 7.8 μm에서 반응도(R)는 약180,260V/W이며, 이 때 잡음의 평균값은 463 nV이고, 위상고정증폭기의 시간상수를 300 ms, 기울기를 12dB/oct로 하였으므로 잡음 띠편(bandwidth)은 0.39Hz이다.<sup>[22]</sup> 따라서 잡음등가 빛세기(noise equivalent power; NEP: )는 주어진 식 (1)과 (2)의 관계에 의해 463nV/ {(0.62√Hz)} (180,260V/W)=0.0041nW/√Hz이고, 이를 검출기의 표면적을 고려하여 규격화시키면 소자의 검출률은 식 (2)로부터  $D^* = \sqrt{A_d} / NEP = 2 \times 10^{-2} \text{cm} / (0.0041 \text{nW} / \sqrt{\text{Hz}}) = 4.9 \times 10^9 \text{cm} \sqrt{\text{Hz}} / \text{W}$ 가 된다.

#### IV. 결 론

구속-비구속 상태간 전이를 이용한 1×8 배열 GaAs/AlGaAs 이중접합 다중양자우물구조형태의 검출기를 설계, 제작하여 이 검출기의 반응 파장영역과 전류-전압특성, 반응도, 잡음, NEP, D\* 등을 알아보았다. 그 결과 검출기는 이론적인 예상값 8 μm와 거의 일치하는 7.8 μm 파장에서 최대반응을 보였으며 8개의 소자들 모두 안정되고 균일한 반응특성을 나타내었고 최대 검출률은 4.9×10<sup>9</sup> cm √Hz/W이었다. 압전류-전압 곡선과 빛반응 곡선을 볼 때 8개의 소자 모두 균일한 특성을 보여주므로 이러한 소자의 배열을 확장시켜 2차원 화소 배열을 형성한다면 GaAs/AlGaAs 구조의 안정적인 성질과 더불어 우수한 특성의 열영상 장비를 제작할 수 있으리라 생각된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학기술원 전자광학특화 연구센터를 통한 국방과학연구소 연구비와 교육부 기초과학 학술연구조성비 (BSRI-97-2423) 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] B. F. Levine, J. Appl. Phys. **74**, R1 (1993).
- [2] S. D. Gunapala, K. M. S. V. Bandara, B. F. Levine, G. Sarusi, D. L. Sivco and A. Y. Cho, Appl. Phys. Lett. **64**, 2288 (1994).
- [3] R. A. Ballingal, I. D. Blenkinsop, I. Baker and J. Parsons, SPIE, **685**, 115 (1986).
- [4] T. L. Lin, J. S. Park, T. George, E. W. Jones, R. F. Fathauer and J. Maserjian, Appl. Phys. Lett, **62**, 3318 (1993).
- [5] H. Asai and Y. Kawamura, Phys. Rev. **B43**, 4748 (1991).
- [6] S. D. Gunapala, B. F. Levine, D. Ritter, R. A. Hamm and M. B. Panish, Appl. Phys. Lett, **60**, 636 (1992).
- [7] R. P. G. Karuasiri, J. S. Park and K. L. Wang, Appl. Phys. Lett, **61**, 2434 (1992).
- [8] K. M. S. V. Bandara, J.-W. Choe, A. G. U. Perera, Y. F. Lin and M. H. Francombe, Appl. Phys. Lett. **60**, 3022 (1992).

- [9] L. C. West and S. J. Eglash, *Appl. Phys. Lett.* **46**, 1156 (1985).
- [10] B. F. Levine, C. G. Bethea, G. Hasnain, J. Walker and R. J. Malik, *Appl. Phys. Lett.* **53**, 296 (1988).
- [11] B. F. Levine, G. Hasnain, C. G. Bethea and N. Chand, *Appl. Phys. Lett.* **54**, 2704 (1989).
- [12] B. F. Levine, *Appl. Phys. Lett.* **56**, 2354 (1990).
- [13] Byung-sung O, J. W. Choe, M. H. Francomb, K. M. S. V. Bandara, A. G. U. Perera, D. D. Coon, Y. F. Lin and W. J. Takei, *Appl. Phys. Lett.* **57**, 503 (1992).
- [14] K. W. Goossen, S. A. Layon, *Appl. Phys. Lett.* **47**, 1257 (1985).
- [15] C. G. Bethea, B. F. Levine, M. T. Asom, R. E. Leibenguth, J. W. Stayt, K. G. Glogovsky, R. A. Morgan, J. D. Blackwell and W. J. Parrish, *IEEE Trans. Electron. Devices* **40**, 1957 (1993).
- [16] J.-W. Choe, H.-J. Hwang, A. G. U. Perera, S. G. Matsik and M. H. Francombe, *J. Appl. Phys.* **79**, 7510 (1996).
- [17] 김진현, 황형준, 최정우, *응용물리* **9**, 809 (1996).
- [18] G. Hasnain, B. F. Levine, C. G. Bethea, R. A. Logan, J. Walker and R. J. Malik, *Appl. Phys. Lett.* **54**, 2515 (1989).
- [19] A. Kastalsky, T. Duffield, S. J. Allen and J. Harbison, *Appl. Phys. Lett.* **52**, 1320 (1988).
- [20] 이상준, 최정우, *재료과학기술론집*, **8**, 125 (1995).
- [21] D. D. Coon and K. M. S. V. Bandara, *New Quantum structure*, Academic Press, Inc., (1991).
- [22] "Model 5209 Lock-In Amplifier Instruction Manual," EG &G Instruments Corporation (1987).

### 1×8 Array of GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetector with 7.8 μm peak response

Eunyoung Park and Jeong-woo Choe

*Department of Physics, Kyung Hee University, Suwon 449-701, Korea*

Sam-Kyu Noh

*Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-600, Korea*

Woo-seok Choi and Seung-Han Park

*Department of Physics, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea*

Taehee Cho and Songcheol Hong

*Department of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-701, Korea*

Byung-sung O

*Department of Physics, Chungnam University, Taejon 305-764, Korea*

Seung-Joo Lee

*Department of Physics, Korea Military Academy, Seoul 139-799, Korea*

(Received November 17, 1998, Revised manuscript received December 5, 1998)

We fabricated 1×8 array of GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetectors for the long wavelength infrared detection which is based on the bound-to-continuum intersubband transition, and characterized its electrical and optical properties. The device was grown on SI-GaAs(100) by the molecular beam epitaxy and consisted of 25 period of 40 Å GaAs well and 500 Å Al<sub>0.28</sub>Ga<sub>0.72</sub>As barrier. To reduce the possibility of interface states only the center 20 Å of the well was doped with Si ( $N_D=2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ). We etched the sample to make square mesas of 200×200 μm<sup>2</sup> and made an ohmic contact on each pixel with Au/Ge. Current-voltage characteristics and photoresponse spectrum of each detector reveal that the array was highly uniform and stable. The spectral responsivity and the detectivity  $D^*$  were measured to be 180,260 V/W and  $4.9 \times 10^9 \text{ cm} \sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$  respectively at the peak wavelength of  $\lambda = 7.8 \text{ μm}$  and at  $T = 10 \text{ K}$ .