

論文 2000-37SD-8-6

다층 InAs 양자점을 이용한 장파장 적외선 수광소자에 관한 연구

(Studies on Long-wavelength Infrared Detector using Multiple Stacked InAs Quantum Dot Layers)

金鐘旭*, 吳在應*, 洪聖喆**

(Jong-Wook Kim, Jae-Eung Oh, and Seong-Chul Hong)

요 약

분자선결정성장법을 이용하여 자기구성 양자점들을 high electron mobility transistor (HEMT) 의 채널 영역에 삽입하여, 양자점내의 inter-subband transition 을 이용한 장파장 적외선 수광소자를 제작하였다. 제작된 소자는 180 K 이상의 온도에서 InAs 양자점의 전자에 대한 강한 구속력으로 인해 낮은 암전류 특성을 보이며 7 μm 에서 11 μm 까지의 넓은 수광영역을 나타내었다. 9.4 μm 에서 peak 광전류가 검출되었으며 이때의 검출율은 1.93×10^{10} $\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 였다. 장파장 적외선 검출에 따른 광전류는 가해진 전압에 대하여 전계효과트랜지스터와 같은 전류-전압 특성을 가지며, 인가된 전압이 증가함에 따라 증가된 암전류에 의하여 광전류가 감소하는 특성을 보여주고 있다.

Abstract

Long-wavelength infrared (LWIR) detectors made of self-assembled quantum dots embedded in the channel region of high electron mobility transistor (HEMT) is demonstrated. Above 180 K, the detector shows low dark currents due to strong confinement effect of electrons in InAs quantum dots and exhibits the broad spectral response ranging from 7 μm to 11 μm . The peak detectivity (D^*) of 1.93×10^{10} $\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ is obtained at 9.4 μm . The photocurrent characteristics as a function of applied bias are similar to that of normal FETs, while the photocurrent decreases as the applied electric field exceeds 2×10^3 V/cm because of the increased dark current.

* 正會員, 漢陽大學校 電子工學科 電子材料 및 部品 研究센터

(Center for Electronic Materials and Components, Department of Electronic Engineering, Hanyang University)

** 正會員, 韓國科學技術院 電氣電子工學部

(Department of Electrical and Electronic Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology)

※ 본 연구는 1999년도 LG 종합기술원의 산학과제 연구비 지원으로 수행되었습니다.

接受日字: 2000年4月6日, 수정완료일: 2000年7月12日

I. 서론

최근들어 양자점은 3차원적으로 전하를 국한시키는 양자구조로 인한 독특한 특성으로 인하여 신개념의 기억소자, 수광소자와 레이저 다이오드와 같은 발광소자 등의 여러 소자의 응용에서 많은 관심을 모으고 있다^[1-4]. 격자 부정합을 이용하는 Stranski-Krastanov 모드는 자연적으로 양자점을 형성하는 방법으로서 이를 이용하여 결함이 없는 양질의 양자점을 소자내에 구현할 수 있게 되었으며, 이로 인해 양자점을 응용하는 연구가 가속화되었다^{[5][6]}. 특히 장파장 적외선 수광소자는 3~5 와 8~14 μm 영역에서 열추적 미사일, 야간 정찰

카메라, 의료 영상기기, 보안 및 화재진압등 많은 응용을 가지고 있다. 이러한 응용에서 기존의 장파장 적외선 수광소자에는 InSb 와 mercury cadmium telluride (MCT) 와 같은 interband transition 을 이용한 bandgap 물질을 사용하고 있다. Interband transition 의 소자경우 저온에서 특성은 매우 우수하나 공정이 쉽지 않고 2-D array 제작시 기판의 크기가 작아 넓고 많은 화소를 제작하기 어렵기 때문에 소자의 가격이 매우 높은 실정이다. 이에 반해 양자구조를 이용한 장파장 적외선 소자의 경우는 interband transition 과는 달리 conduction band 와 valence band 내에서의 양자화된 에너지 준위들의 intersubband transition 을 이용하고 있으며 공정 기술이 성숙한 GaAs 계열의 물질에서 4 inch 이상의 기판을 사용하고 InSb 와 MCT 등의 소자와 동등한 수준의 특성을 얻고 있어서 기존의 소자들을 대체할 것으로 생각된다. 양자구조 소자는 AlGaAs/GaAs 와 GaAs/InGaAs 계열의 양자우물 수광소자 (quantum well infrared photodetector (QWIP)) 와 In(Ga)As 를 사용한 양자점 수광소자 (quantum dot infrared photodetector (QDIP)) 가 연구되고 있으며 QWIP 의 경우에는 열영상 시스템으로 현재 상용화되었고 QDIP 는 많은 연구가 진행되고 있다^[7-10]. QWIP 는 열여기로 인한 높은 암전류로 인하여 bandgap 소자와 마찬가지로 77 K 영역의 온도 영역에서 동작되며 또한 선택성 (selection rule) 때문에 적외선의 수직입사에 반응할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 이에 반해 QDIP 는 양자우물을 이용하는 경우에 비해 전자-광자의 상호작용이 감소하기 때문에 하위 밴드간의 완화시간 (inter-subband relaxation time) 이 감소하고 양자점의 3차원적인 양자구조속으로 수직 입사에 반응하여 제작 공정을 QWIP 에 비해 단순화할 수 있다. 또한 d 함수와 같은 형태의 상태밀도 (density of states) 를 가지고 있으므로 thermoelectric (TE) 냉각기를 사용하여 상온근처의 높은 온도에서 동작이 가능하므로 이러한 이점들 때문에 차세대 장파장 적외선 수광소자로서 각광을 받을 것으로 생각된다. 지금까지 QDIP 에 대한 연구는 주로 QWIP 와 동일한 수직운송구조에 한하여 수행되어 왔으며 높은 암전류와 낮은 광전도이득으로부터 이론적으로 기대했던 특성에는 미치지 못하고 있다.

본 연구에서는 다층의 InAs 양자점을 이중접합 트랜지스터인 high electron mobility transistor (HEMT)

의 채널 영역에 삽입함으로써 기존의 수직운송구조와는 다른 수평운송구조의 QDIP 를 제작하였으며, long-wavelength infrared (LWIR) 영역에서 소자의 특성을 분석하였다.

II. 실험방법

QDIP 소자의 구조는 분자선 결정성장 장치를 사용하여 성장하였다. 소자에서의 양자점은 격자 부정합으로부터 발생하는 변형에너지를 최소화하기 위하여 생겨지는 Stranski-Krastanov 모드를 이용하여 자발적으로 성장되었으며, 성장조건을 최적화하여 격자부정합에 의해 생길 수 있는 결함을 최소화하였다. GaAs 와 InAs 의 성장율은 각각 $0.7 \mu\text{m/hr}$ 와 $0.1 \mu\text{m/hr}$ 이었고, 성장율의 측정은 reflection high-energy electron diffraction (RHEED) oscillation 과 scanning electron microscopy (SEM) 로 확인하였다. 성장 온도는 양자점 형성시는 480°C 이었으며 소자의 나머지 부분은 580°C 에서 성장되었다. 2차원적인 성장에서 3 차원적인 성장, 즉 양자점 형성으로의 전환과 양자점 형성이후의 결함이 없는 구조의 성장 여부는 RHEED 을 통해서 확인하였다. 양자점 성장전의 매우 streak 한 RHEED 패턴이 3 차원 양자점 성장에서 spotty 한 pattern 으로 전환된 것

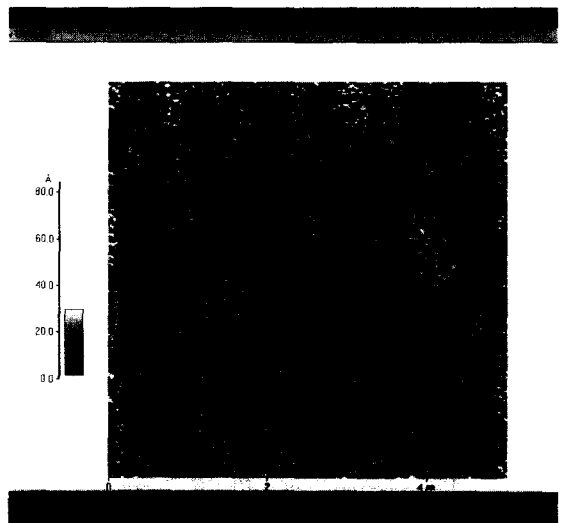


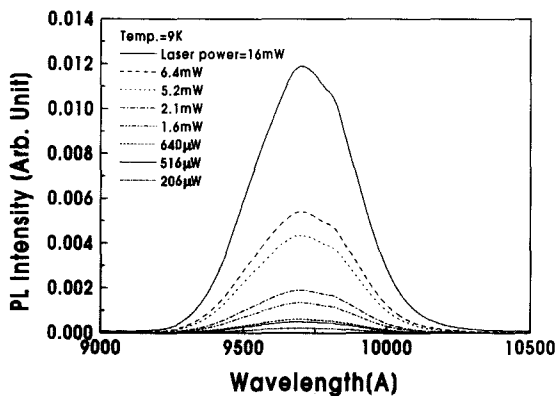
그림 1. QDIP 소자와 동일한 조건에서 GaAs 표면에 성장된 InAs 양자점의 AFM 사진

Fig. 1. AFM micrograph of InAs quantum dots formed on GaAs surface under the same condition as the QDIP device.

을 확인할 수 있다. 그림 1의 Atomic force microscopy (AFM)를 통하여 형성된 양자점이 대략 4 nm높이와 15 nm의 폭을 갖는 것을 알 수 있으며 밀도는 $\sim 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 정도이고 약 10%의 변화가 있음을 알 수 있었다. 작은 크기와 높은 밀도는 양자점의 성장시 낮은 기판온도에 기인하는 것으로 생각되어진다. 소자 제작 공정은 전형적인 화합물 반도체 트랜지스터 공정을 사용하였으며 AuGe/Ni/Au 구조의 ohmic metal을 사용하였다. 단위소자와 1×16 linear array가 제작되었다.

GaAs Si-doped layer
AlGaAs Si-doped layer
AlGaAs space layer
GaAs channel layer
5-Stacked InAs quantum dot layer
Buffer
Semi-insulating GaAs (100) substrate

(a) 양자점 장파장 적외선 수광소자의 구조



(b) PL 스펙트럼

그림 2. (a) 성장된 수평전하전송 양자점 장파장 적외선 수광소자의 구조와 (b) 10 K에서의 여기 출력에 따른 PL 스펙트럼

Fig. 2. (a) The structure of lateral transport quantum dot infrared photodetector and (b) PL spectrum at 10 K under various excitation power.

III. 결과 및 고찰

그림 2는 성장된 소자구조와 10 K에서의 photo-

luminescence (PL) 측정결과이다. Ar-ion 레이저를 사용하였으며 lock-in 방법으로 측정하였고 레이저의 여기 에너지에 따라 측정을 수행하였다. PL 스펙트럼의 최대치는 약 1.28 eV에서 관찰되고 있으며 반폭치는 대략 45 meV 정도이다. 측정결과로부터 여기에너지가 증가해도 스펙트럼의 형태가 일정한 것을 알 수 있으며 이로부터 성장된 양자점에는 여기상태 (excited states)가 존재하지 않는 것으로 여겨지며 이러한 특성으로부터 장파장 적외선 수광소자에서 bound-to-continuum 메커니즘에 의해 동작할 것으로 생각된다. 그림 3은 제안된 InAs 양자점을 이용한 이중접합구조 장파장 적외선 수광소자의 동작원리를 보여주고 있다. 이러한 소자구조에서 여기된 전자는 이중접합과 양자점 사이에 존재하는 전계에 의해 채널로 전달되어 광전류를 형성한다. 성장된 소자의 Hall 효과 측정 결과는 상온과 77 K에서 각각 4.6×10^{12} 과 $1.97 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 의 면 전하 밀도 및 4000과 $15,500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 의 이동도를 보여주고 있으며 이로부터 성장된 구조가 전형적인 HEMT의 특성을 보이는 것을 알 수 있다. 따라서, 여기된 전자는 높은 이동도와 긴 수명에 기인한 높은 광전도 이득을 가지고 채널내에서 이동할 것으로 생각된다.

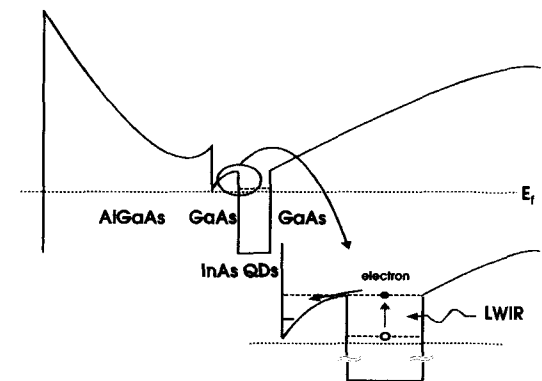


그림 3. 제안된 양자점 장파장 적외선 수광소자의 동작원리

Fig. 3. Operation principle of the proposed quantum dot infrared photodetector.

제작된 QDIP의 암전류는 semiconductor parameter analyzer HP 4145B를 사용하여 온도와 전압에 따라서 측정하였으며, 상온에서의 암전류가 참고문헌 [8]에서의 QWIP의 77 K에서 암전류와 $18 \times 18 \mu\text{m}^2$ 로 정량화되어 그림 4에 비교되어 있다. 그림에서 보듯이 상온

에서도 QDIP 는 QWIP 에 비하여 경우는 낮은 암전류 특성을 보이고 있으며, 이는 전도에 기여할 수 있는 많은 전자들이 InAs 양자점들에 구속되어 있기 때문이라고 생각된다. 따라서 QDIP 가 QWIP 나 수직구조의 QDIP 보다 더 높은 온도에서 동작될 가능성을 예측할 수 있다.

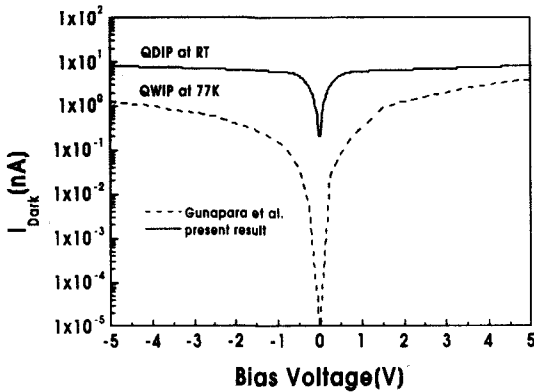


그림 4. 제작된 소자의 상온에서의 암전류
Fig. 4. Dark current of the fabricated device at room temperature.

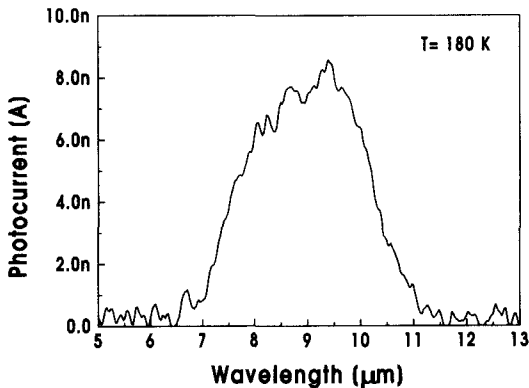


그림 5. 제작된 양자점 장파장 적외선 수광소자의 180 K 에서 파장에 따른 광전류 스펙트럼
Fig. 5. The photocurrent spectra vs. wavelength of the fabricated QDIP at 180 K.

제작된 QDIP의 광전류는 lock-in 증폭기를 사용하고 장파장 적외선을 소자의 표면에 수직입사하여 소자와 직렬로 연결된 1 MΩ 부하저항에서 전압을 측정하여 얻었다. Globar source 로부터 나온 장파장 적외선은 여러가지 주파수로 기계적으로 나누어졌으며 분광기를 통하여 소자에 조사되었다. 각 파장에서의 광량은 pyroelectric (PE) detector 로부터 측정되었다. 그림 5

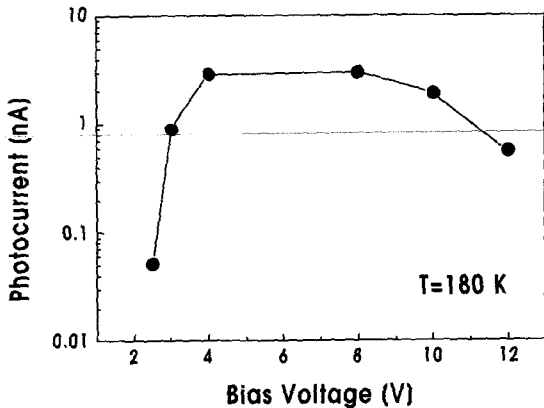
는 소자의 180 K 에서의 파장에 따라서 측정된 광전류 특성곡선이다. 7~11 μm 의 넓은 파장 영역에 대해 장파장 적외선에 감응하고 있으며, 반복폭이 3.72 μm 이며 약 9.4 μm 에서 그 최대치를 가지는 것을 알 수 있었다. 이렇게 감응 파장영역이 넓은 이유는 InAs 양자점 크기가 일정하지 않은 것이 그 원인으로 생각된다. 이러한 측정 결과를 이용하여 다음과 같은 수식을 사용하여 감응도 (R_p) 와 검출율 (D^*) 를 구하였다.

$$R_p = \frac{S}{P_s}$$

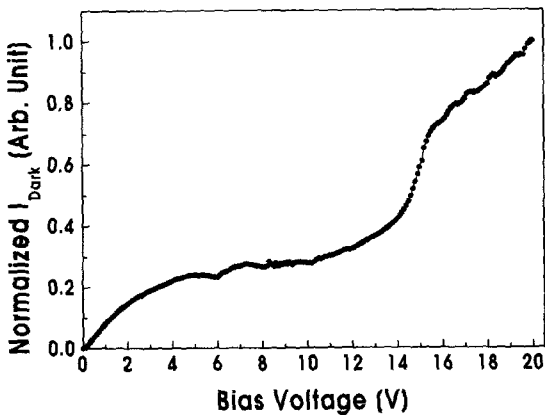
$$E^* = \frac{S}{N} \frac{1}{P_s} \sqrt{A \Delta f} = \frac{R_p}{i_n} \sqrt{A} = \frac{\pi \sqrt{g}}{2 \eta \omega} \sqrt{\frac{3A}{I_{total}}}$$

여기서 $\frac{S}{N}$ 은 신호 대 잡음의 비율, P_s 는 PE detector 로부터 측정된 광량, D^* 는 잡음 대역폭, g 는 광전도 이득, 그리고 η 는 수광소자의 양자 효율을 나타낸다. 전류 잡음 스펙트럼 밀도는 dynamic signal analyzer HP36670A를 사용하여 측정하였으며, 이로부터 9.4 μm에서 각각 30 A/W 와 1.93×10^{10} cmHz^{1/2}/W 의 감응도와 검출율을 얻을 수 있었다. 이와 같이 높은 감응도와 검출율은 광으로 여기된 전자가 이중접합 채널로 넘어와 전류를 생성할 때 HEMT 구조에서의 높은 이동도와 긴 전하수명에 의한 큰 광전도 이득에서 기인한 것으로 생각된다. 높은 광전도 이득과 더불어 낮은 암전류로 인해서 180 K 의 높은 온도에서도 장파장 적외선 수광소자로서 우수한 특성을 보이고 있다. 이러한 사실은 그림 6 (a)의 인가전압에 따른 광전류 특성이 전형적인 HEMT 소자의 전류-전압 특성과 유사하다는 점으로 다시 확인될 수 있다. 광전류는 4 V 까지 급격히 증가하고 그 이상에서는 거의 일정한 값을 가지는 것을 볼 수 있으며, 10 V (전계의 세기 : 2×10^3 V/cm) 이상에서 감소하는 특성을 나타내고 있다. 10 V 이상에서 광전류가 감소하는 이유는 전계의 세기가 커져서 이로 인해 양자점에 있는 전자가 장파장 적외선에 의해서가 아니라 전계로 인해 여기되어 채널에서 전류를 형성하기 때문이라고 생각된다. 이것은 그림 6 (b) 에 있는 180 K 에서 측정된 소자의 암전류에서도 확인할 수 있다. 전계로 인하여 양자점에 있는 전자가 채널로 이동되어 계단 형태의 전류 증가가 생기는 것을 관찰할 수 있는데, 전계에 의한 채널로의 전자의 이동에 대한 좀 더 자세한 메커니

즘에 대한 연구는 현재 진행중에 있다. 전계에 의한 전자의 채널로의 이동은 구조 성장시 채널과 양자점 사이에 GaAs 보다 더 큰 bandgap 을 가지는 물질을 얇게 성장함으로써 줄일 수 있을 것으로 기대하고 있다.



(a) 인가전압에 대한 광전류 특성



(b) 180 K 에서의 암전류

그림 6. (a) 인가전압에 따른 제작된 양자점 장파장 적외선 수광소자의 8 μm 에서의 광전류와 (b) 180 K 에서 측정된 소자의 20 V 에서의 전류값으로 표준화된 암전류 특성

Fig. 6. The characteristics of (a) photocurrent vs. voltage of the fabricated QDIP and (b) dark current normalized by 20 V dark current at 180 K.

그림 7 은 동일한 기판을 사용하여 제작된 1×16 의 linear array 에 대한 균일성을 보여주는 그림으로, 7 개의 pixel 에 대하여 10 V 의 인가전압에서 9.4 μm 에서 광전류를 측정된 결과이다. 15 % 정도 광전류가 1×16 array 내에서 변화하는 것을 볼 수 있으며, 이것은 소자의 결정 성장시에서의 문제라기보다는 그 분포가

일정한 방향성이 없는 것으로부터 제작공정에 의한 것으로 추정되며, 공정 최적화에 의하여 개선될 수 있을 것으로 생각된다.

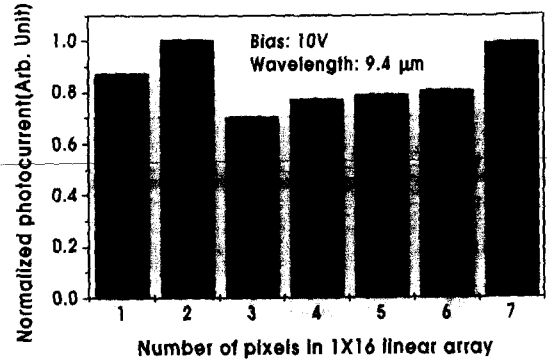


그림 7. 제작된 1×16 linear array 의 균일성을 보여주는 광전류 분포

Fig. 7. Profile of photocurrent showing the device uniformity in the fabricated 1×16 linear array.

IV. 결 론

InAs 양자점을 AlGaAs/GaAs HEMT 구조의 channel 영역에 삽입하여 장파장 적외선에 의한 intersubband transition 을 이용한 수평전하전송 구조의 QDIP 를 분자선 결정성장장치로 성장하여 제작하였다. 양자점의 전자에 대한 강한 구속력 때문에 QWIP 에 비해 낮은 암전류 특성을 보였으며, 이러한 특성과 함께 HEMT 구조에서 높은 광전도 이득으로 180 K 의 높은 온도에서 9.4 μm 에서 30 A/W 의 감응도와 $1.93 \times 10^{10} \text{ cm}^2 \text{ Hz}^{1/2} / \text{W}$ 의 검출율을 얻을 수 있었다. 이상의 결과들로부터 본 연구에서 제작한 수평 운송구조의 QDIP 는 열 영상 시스템등 장파장 적외선 영역의 많은 소자에 응용될 수 있는 우수한 특성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] J. M. Moison, F. Houzay, F. Barthe, L. Leprince, E. Andre, and O. Vatel, Appl. Phys. Lett. 64 196 (1994).
 [2] D. Leonard, K. Pond, and P. M. Petroff, Phys.

- Rev. B 50, 11 687 (1994).
- [3] M. K. Zundel, N. Y. Jin-Phillipp, K. Eberl, T. Riedl, E. Fehrenbacher, and A. Hangeiter, Appl. Phys. Lett. 73 1785 (1998).
- [4] D. L. Huffaker, G. Park, Z. Zou, O. B. Shchekin, and D. G. Deppe, Appl. Phys. Lett. 73 2564 (1998).
- [5] Chae-Deok Lee, Hwack Joo Lee, Sam Kyu Noh, Chanro Park, Chan Gyung Park, Seong-Ju Park, and Kyu-Seok Lee, J. Korea Phys. Soc. 33 S262 (1998).
- [6] S. M. Park, S. M. Yoo and S. K. Koh, J. Korean Phys. Soc. 28 S596 (1995).
- [7] B. F. Levine, J. Appl. Phys. 74 R1 (1993).
- [8] Sarath D. Gunapala, John K. Liu, Jin S. Park, Mani Sundaram, Craig A. Shott, Ted Hoelter, True-Lon Lin, S. T. Massie, Paul D. Maker, Richard E. Muller, and Gabby Sarusi, IEEE Trans. Electron Devices. 44 51 (1997).
- [9] J. Philips, K. Kamath, and P. Bhattacharya, Appl. Phys. Lett. 72 2020 (1998).
- [10] S. W. Lee, K. Hirakawa, and Y. Shimada, Appl. Phys. Lett. 75 1428 (1999).

 저 자 소 개

金 鐘 旭(正會員)

1995년 2월 : 한양대학교 전자공학과 졸업 (공학사).
 1997년 2월 : 한양대학교 대학원 석사과정 졸업 (공학 석사). 2000년 8월 : 한양대학교 대학원 박사과정 졸업 (공학박사). 2000년 8월~현재 : LG 전자기술원 RF Team 재직. 주관심 분야 : 양자구조 적외선 수광소자, GaN HFET 및 전력 증폭기

洪 聖 喆(正會員)

1982 : 서울대학교 학사. 1984 : 서울대학교 석사. 1989 : The University of Michigan Ph.D. 현재 : KAIST 부교수

吳 在 應(正會員)

1977~1981 : 한양대학교 전자공학과 학사. 1982~1984 : The University of Nebraska at Lincoln M.S.E.E. 1985~1987 : 1988 The University of Michigan Ph.D. 1987~1988 : The University of Michigan Postdoctoral Fellow. 1988~1989 : The University of Michigan Research Associate. 1989~1993 : 한양대학교 전자공학과 조교수. 1993~1998 : 한양대학교 전자공학과 부교수. 1999 - : 한양대학교 전자공학과 교수. 주관심 분야 : 초고속 소자 및 회로 연구, MMIC 공정 및 설계, 양자구조 결정성장 및 신 개념 소자 연구, Multi-giga DRAM 공정연구