

공진공동-근적외선 검출기의 구조 최적화

김동호^{1,2}, 노정현², 최연식², 한철구², 고중혁¹, 김태근³
¹광운대학교, ²전자부품연구원, ³고려대학교

Structure Optimization of Resonant-Cavity Near-infrared Photodetector

Dong Ho Kim^{1,2}, Cheong Hyun Roh², Yeon Shik Choi², Cheol-Koo Hahn², Jung Hyuk Koh¹, Tae Geun Kim³
¹Kwangwoon University, ²Korea Electronics Technology Institute, ³Korea University

Abstract - For the upcoming nano-bio technology(NBT), we suggested InAs self-assembled quantum dot enhanced resonant-cavity avalanche type photodetector to detect near infrared(NIR) wavelength. To confirm the feasibility of RC-APD structure, we have simulated using conventional simulator.

1. 서 론

적외선 검출기(infrared photodetector, IR-PD)는 군사용, 소방용, 산업용, 임상의학용 및 환경 모니터링 같은 많은 분야에 사용되는 광전소자로서 MCT(mercury cadmium telluride), 양자우물 검출기(quantum-well infrared photodetector, QWIP) 및 양자점 검출기(quantum-dot infrared photodetector, QDIP)로 구분지을 수 있다 [1].

최근 중적외선(mid-IR)과 원적외선(far-IR)대역의 이미징 소자로 가장 유망하게 사용되는 MCT는 10^{11} cmHz^{1/2}/W 이상의 높은 specific detectivity (D*)를 얻을 수 있다는 장점이 있지만, 물질의 독성과 연성으로 인한 제작의 어려움 및 불균일한 dopant 혼합으로 인해 소자의 조성비를 정확히 조절하기 어렵고, 적외선 검출이 열 전자 천이(thermionic transition)에 의해 이루어지므로 외부로부터 인가되는 열에 민감하여 저온(< 80 K) 동작을 위한 추가적인 냉각장치를 필요로 하는 단점이 제기되고 있으며 [2], MCT가 가지고 있는 단점을 보완하기 위해서 제안된 QWIP는 기존의 III-V족 화합물 반도체와 공정기술을 이용한 소자 제작이 가능하므로 비유적인 면에서는 MCT보다 우수하지만, 양자우물의 밴드내 천이(inter-subband transition)는 열에 매우 민감하여 열에 의해 발생하는 검출기의 detectivity 저하를 해결하기 위한 냉각장치를 필요로 뿐만 아니라, 양자우물의 polarization selection rule에 의해서 수직으로 입사되는 광에 대한 검출이 어렵다는 단점이 보고되고 있다 [3].

이러한 적외선 검출기가 가지고 있는 문제점들을 극복하면서 차세대 융합기술로 기대되는 NBT(Nano-Bio Technology)로의 응용을 위해서는 고온에서 동작이 가능하고, 인체에서 방출되는 파장인 근적외선(near-IR) 대역에서의 높은 감도, 저잡음, 높은 양자효율 및 파장의 선택적 흡수가 가능한 집적화된 수/발광 소자의 필요성이 요구된다 [4].

본 논문에서는 NBT로의 응용을 위해서 집적화된 수/발광 소자에 사용가능한 근적외선 검출기 구조를 제안하고, 적외선 검출기로서의 가능성을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 적외선 검출기의 흡수층으로 삼

입된 InAs 자발형성 양자점(self-assembled quantum dot)층을 이용하여 기존의 QWIP에서 열에 의해 발생하는 검출기의 detectivity 저하문제를 해결하고자 하였고, 근적외선 대역에 대한 높은 감도, 저잡음, 높은 양자효율 및 파장의 선택적인 흡수가 가능한 공진공동(resonant-cavity, RC) 구조를 갖는 avalanche photodetector(APD)를 제안하였다 [5]. 제안한 RC-APD의 흡수층에서 생성된 캐리어가 작은 역바이어스 하에서 많은 2차 캐리어를 재생성시킬 수 있도록 각각의 층의 두께, doping 농도, 전극 모양 및 크기를 시뮬레이션 틀을 이용하여 최적화한 후, 암전류 및 광전류 특성에 대하여 impact ionization model을 적용하여 수치적으로 분석하였다.

2. 본 론

그림 1은 본 연구를 위해 제안된 RC-APD의 구조이다.

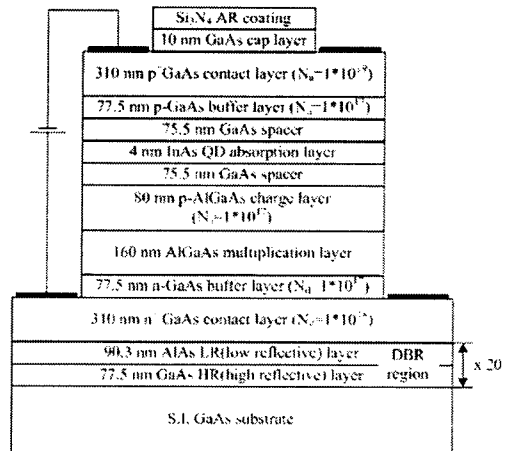


그림 1. Resonant-cavity avalanche photodetector 구조.

각각의 층은 resonant-cavity effect를 효과적으로 만족시키기 위해서 Bragg 조건을 충족시키는 $\lambda/4$ 의 정수배가 되도록 설계하였으며, 외부에서 입사되는 광을 흡수하기 위한 흡수층으로 4 nm의 두께를 갖는 InAs 자발형성 양자점층을 삽입하였다. 또한, 역바이어스 인가 시, 소자의 내부에서 발생하는 electric field가 AlGaAs 증폭층에 집중되어 작은 바이어스로도 많은 2차 캐리어를 재생성시킬 수 있도록 AlGaAs 증폭층의 두께를

AlGaAs 전하층의 2배가 되도록 설계하였다.

하부의 AlAs/GaAs distributed Bragg reflector(DBR)는 avalanche breakdown에 의해 재생성된 2차 캐리어가 GaAs 기판으로 누설되면 검출기의 양자효율이 감소하게 되므로 캐리어의 누설을 억제하기 위하여 그림 2와 같이 근적외선 대역인 1.075 μm 파장에 대해 99 % 이상의 반사율을 갖도록 설계하였고, p형 전극과 n형 전극은 원활한 ohmic 접촉을 위해서 각각 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 과 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 으로 강하게 도핑되도록 설계하였다.

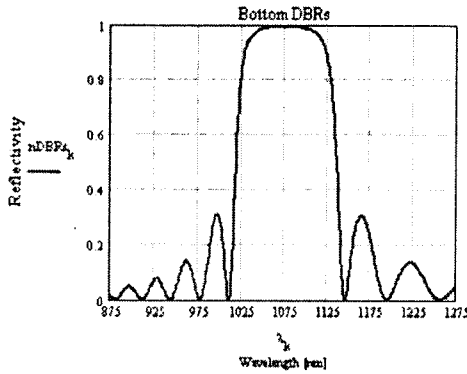


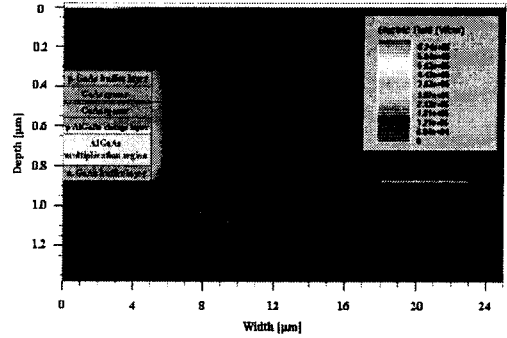
그림 2. 시뮬레이션을 이용하여 최적화된 AlAs/GaAs DBR층의 반사율.

설계된 RC-APD를 근적외선 대역의 수광소자로 적용 가능성에 대한 확인을 위하여 시뮬레이터를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

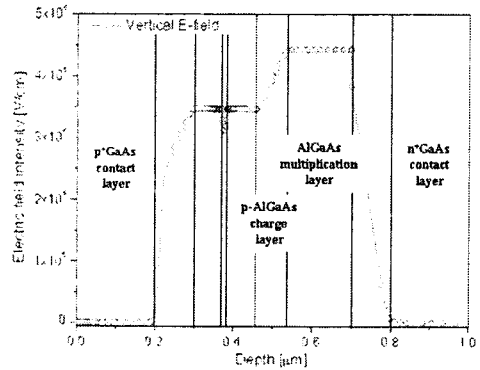
시뮬레이터를 이용하여 최적화된 RC-APD에 역바이어스 인가 시, 수광부분인 p형 전극의 모양과 크기의 변화에 따라 소자 내부에서 발생하는 electric field가 AlGaAs 증폭층 내부에서 avalanche breakdown을 일으키기 위한 적합한 세기와 uniformity를 갖는지 확인하였고, 암전류(dark current)와 광에 의해 생성되는 광전류(photo-current)를 impact ionization model을 적용하여 수치적으로 계산하였다.

그림 3은 -20 V의 역바이어스 인가 시, RC-APD 내부에 생성되는 electric field의 세기와 uniformity를 보여 준다. 광의 흡수가 발생하는 RC-APD의 active mesa 영역에 대한 시뮬레이션 결과, active mesa 영역의 수직방향으로 발생하는 electric field는 AlGaAs 물질이 갖는 avalanche breakdown 전압인 $2 \sim 4 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 이상의 세기를 갖는 것을 확인하였으며 [6], 수평방향으로 발생하는 electric field는 AlGaAs 층의 전면에 걸쳐 균일하게 분포해서 강한 역바이어스 인가에도 AlGaAs 증폭층 내부에서 부분적인 breakdown의 집중이 발생하지 않아 avalanche breakdown 동작에 적합한 구조임을 확인할 수 있었다.

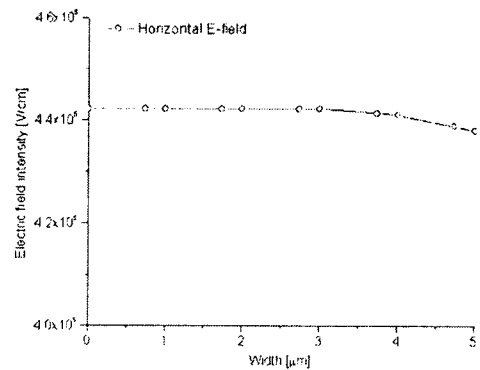
제한한 RC-APD의 암전류 및 광전류 특성을 확인하기 위하여 impact ionization model과 InAs 양자점 물질상수 근사(approximation)를 적용하여 수치적으로 계산하였다. 그림 4는 RC-APD를 동작시키기 위한 역바이어스 인가 시, p형 전극의 모양과 크기에 따른 전기적 특성에 대한 시뮬레이션 결과이다.



(a) 역바이어스(-20 V) 인가 시, RC-APD 내부에 생성되는 electric field



(b) RC-APD 내부에 생성되는 vertical electric field의 분포



(c) AlGaAs 증폭층에 생성되는 electric field의 uniformity

그림 3. 역바이어스(-20 V)인가 시, RC-APD에 발생하는 electric field(a)와 field의 수직분포(b) 및 field의 uniformity(c).

암전류는 ring형과 comb형 모양을 갖는 전극의 경우, ITO형 전극보다 작은 -18 V 근방에서 전류가 급격히 증가하는 avalanche breakdown이 발생하였고, 1 W/A의 세기를 갖는 광이 인가되는 조건으로 광전류에 대한 시뮬레이션 결과, 2 V 구간 이후부터 암전류에 비해서 10^4 A 이상의 매우 큰 세기를 갖는 광전류가 생성되어 제한한 RC-APD가 효과적인 광검출 동작이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

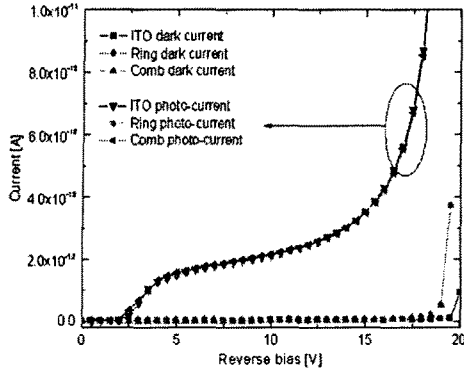


그림 4. RC-APD의 p형 전극에 따른 전기적 특성에 대한 시뮬레이션 결과.

3. 결 론

본 논문에서는 NBT로의 응용이 가능한 근적외선 수/발광 집적소자를 구현하기 위하여, 1.075 μm 대역의 근적외선 검출이 가능한 resonant-cavity 구조를 갖는 InAs 자발형성 양자점 avalanche photodetector의 구조를 제안하고 근적외선 대역의 검출기로의 적용 가능성을 확인하기 위한 시뮬레이션을 이용하여 최적화하였다.

최적화된 RC-APD의 구조적인 특성을 시뮬레이션을 이용하여 확인한 결과, 제안된 RC-APD의 구조는 높은 양자효율 및 높은 감도를 얻기 위한 적합한 구조임을 확인할 수 있었고, impact ionization model을 적용하여 암전류 및 광전류 특성을 수치적으로 계산한 결과, 제안된 RC-APD가 수광소자로서의 적용가능한 전기적 특성을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

[감사의 글]

본 연구는 경기도 차세대 성장동력 프로그램에 의하여 지원되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] A. D. Stiff, S. Krishna, P. Bhattacharya and S. W. Kennerly, "Normal-Incidence, High-Temperature, Mid-Infrared, InAs-GaAs Vertical Quantum-Dot Infrared Photodetector", IEEE J. Quantum Electron., 37, 1412, 2001.
- [2] A. Rogalski, "Assessment of HgCdTe photodiodes and quantum well infrared photoconductors for long wavelength focal plane arrays", Infrared Phys. Technol., 40, 279, 1999.
- [3] B. F. Levine, "Quantum-well infrared photodetectors", J. Appl. Phys., 74, R1, 1993.
- [4] E. Trush, O. Levi, W. Ha, G. Carey, L. J. Cook, J. Deich, S. J. Smith, W. E. Moerner and J. S. Harris, "Integrated Semiconductor Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers and PIN Photodetectors for Bio-medical Fluorescence Sensing", IEEE J. Quantum Electron., 40, 491, 2004.
- [5] H. Nie, O. Baklenov, P. Yuan, C. Lenox, B. G. Streetman and J. C. Campbell, "Quantum-Dot Resonant-Cavity Separated Absorption, Charge, and Multiplication Avalanche Photodiode Operating at 1.06 μm ", IEEE Photon. Technol. Lett., 10, 1009, 1998.
- [6] J. H. Hur, C. W. Myles, M. A. Gundersen, "Avalanche breakdown in p-n AlGaAs/GaAs heterojunctions", J. Appl. Phys. 67 (11), 1990.