

InAs 양자점 형성 방법이 양자점 적외선 소자 특성에 미치는 효과

서동범¹ · 황제환² · 오보람² · 노삼규² · 김준오² · 이상준² · 김의태^{1†}
¹충남대학교 공과대학 신소재공학과, ²한국표준과학연구원 융합물성측정센터

Effect of Growth Methods of InAs Quantum Dots on Infrared Photodetector Properties

Dong-Bum Seo¹, Je-hwan Hwang², Boram Oh², Sam Kyu Noh²,
Jun Oh Kim², Sang Jun Lee² and Eui-Tae Kim^{1†}

¹Department of Materials Science & Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea

²Division of Convergence Technology, Korea Research Institute of Standard Science,
Daejeon 34113, Republic of Korea

(Received April 29, 2018 : Revised August 9, 2018 : Accepted October 16, 2018)

Abstract We report the properties of infrared photodetectors based on two kinds of quantum dots(QDs): i) 2.0 ML InAs QDs by the Stranski-Krastanov growth mode(SK QDs) and ii) sub-monolayer QDs by $4 \times [0.3 \text{ ML}/1 \text{ nm In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}]$ deposition(SML QDs). The QD infrared photodetector(QDIP) structure of $n^+ - n^- (\text{QDs}) - n^+$ is epitaxially grown on GaAs (100) wafers using molecular-beam epitaxy. Both the bottom and top contact GaAs layers are Si doped at $2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$. The QD layers are grown with Si doping of $2 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ and capped by an $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ layer at 495 °C. The photoluminescence peak(1.24 eV) of the SML QDIP is blue-shifted with respect to that (1.04 eV) of SK QDIPs, suggesting that the electron ground state of SML QDIP is higher than that of the SK QDIP. As a result, the photoresponse regime(-9-14 μm) of the SML QDIP is longer than that (-6-12 μm) of the SK QDIP. The dark current of the SML QDIP is two orders of magnitude smaller value than that of the SK QDIP because of the inserted $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$ layer.

Key words InAs, quantum dots, infrared detectors, molecular beam epitaxy.

1. 서 론

양자점 적외선 소자(quantum-dot infrared photodetectors: QDIPs)는 기존 소자들의 단점들을 극복하면서 성능을 극대화할 수 있는 차세대 열상 감지소자로서 연구되어왔다. 적외선 감지소자는 군수용 및 민수용으로도 폭넓게 응용되며 단파장, 중파장, 장파장 등의 적외선 파장범위에 따라 활용분야가 다양해지고 있다.¹⁻⁴⁾ 다양한 방식의 적외선 검출기 중 반응속도가 빠르고 검출능력이 높은 양자형 검출기로서는 대표적으로 HgCdTe나 양자우물 적외선 소자(quantum-well infrared photodetectors: QWIPs)가 주로 상용화되어 왔다, 그러나 HgCdTe의 경우 감지

파장영역이 넓고 양자효율이 뛰어나지만 대면적 기관 확보가 어렵고 기계적, 화학적 취약성이 단점으로 알려지고 있다.⁵⁾ QWIPs는 GaAs 웨이퍼에서 안정된 에피 성장기술을 기반으로 균일한 대면적 성장 및 공정이 가능하지만 수직으로 입사하는 적외선을 감지할 수 없어 소자표면에 그레이팅 공정이 추가하여야 하고 상대적으로 낮은 동작온도(< 77 K)의 단점이 있다.⁶⁾ 이에 반해, 자기조립 양자점을 이용한 QDIPs는 3차원적으로 운반자를 양자구속하여 QWIPs에 비해 낮은 암전류를 가지고, 기존의 QWIPs 소자공정을 그대로 적용 가능하면서도 수직 입사 빛의 감지가 가능하다는 큰 강점을 가지고 있다.⁷⁻¹²⁾ QDIPs의 성능은 양자점, 도핑농도, 소자구조 등의 여

[†]Corresponding author

E-Mail : etkim@cnu.ac.kr (E.-T. Kim, Chungnam Nat'l Univ.)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

러 요소에 따라 크게 영향을 받게 되는데, 이 중에서도 양자점의 크기와 모양, 성장방법은 감지 파장 및 성능에 가장 큰 영향을 미치게 된다. 양자점을 형성하는 방법으로는 GaAs 기판과 InAs의 격자상수 차이에 따른 변위 에너지에 의한 InAs 자기조립 특성을 이용한 Stranski-Krastanov(SK) 성장법이 가장 많이 연구되어 왔다.⁷⁻¹²⁾ 최근에는 SK 자기조립 양자점 외에 1개 분자층 미만(sub monolayer: SML)의 InAs를 적층하여 양자점 효과를 얻는 구조도 우수한 적외선 감지 특성을 보인다는 결과도 발표되고 있다.¹³⁻¹⁴⁾ 본 연구에서는 분자선 에피택시(molecular beam epitaxy: MBE)법을 사용하여 SK 및 SML InAs 양자점이 적용된 적외선 소자를 성장하고 소자 특성의 차이를 논하고자 한다. QDIP 소자는 GaAs 기판에 SK 및 SML InAs 양자점이 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 양자우물 구조에 둘러싸여 있는 dots-in-well(DWELL) 구조를 기반으로 한 $n^+-n^-(\text{양자점})-n^+$ 구조로 성장하였다(Fig. 1). Photoluminescence(PL) 및 광전도, 암전류 특성을 바탕으로 한 SK 및 SML 양자점의 에너지 구조 및 천이 특성 또한 논의하고자 한다.

2. 실험 방법

SK 및 SML QDIP 소자는 Fig. 1과 같이 $n^+-n^-(\text{양자점})-n^+$ 구조로 MBE를 이용하여 GaAs (100) 웨이퍼에 성장되었다. 먼저 도핑되지 않은 GaAs 버퍼층을 200 nm 두께로 성장시킨 후 고농도의 Si이 도핑된 n^+ GaAs 층을 570 °C에서 성장시켰다. 이후 양자점을 포함하는 활성층을 495 °C에서 7회 반복 적층시켰고 마지막으로 Si이 도핑된 n^+ GaAs 층을 성장시켜 소자구조를 완성하였다. 상하부 n^+ GaAs의 두께는 각각 600 nm와 200 nm이며 도핑농도는 $2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 이었다. SK 양자점은 1 nm 두께의 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 위에 2 ML의 InAs를 성장시켜 형성하였다. 이때 Si을 $2 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 농도로 도핑하였다. 이후 6 nm 두께의 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 층과 50 nm의 GaAs를 양자점의 capping 층으로 증착하였다. 이러한 양자점 층을 7번 반복하여 활성층을 형성하였다. SML 양자점은 1 nm 두께의 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 위에 0.3 ML의 InAs를 증착 후 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 1 nm를 증착하는 과정을 4번 반복하고 마지막 0.3 ML InAs 후에는 3 nm $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 층을 성장시켜 SK 양자점 구조와 같이 SML 양자점이 총 6 nm 두께의 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 층에 둘러싸이게 되는 효과를 주었다. SML 양자점 성장 시에도 Si을 $2 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 로 도핑하였다. 각 InAs 0.3ML 증착 후에는 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 성장 전에 5초의 중단시간을 줘서 In 소스 원자들이 이동할 시간을 주었다. 이러한 SML 양자점 층도 7번을 반복하여 활성층을 형성시켰다. SML QDIP 구조에서는

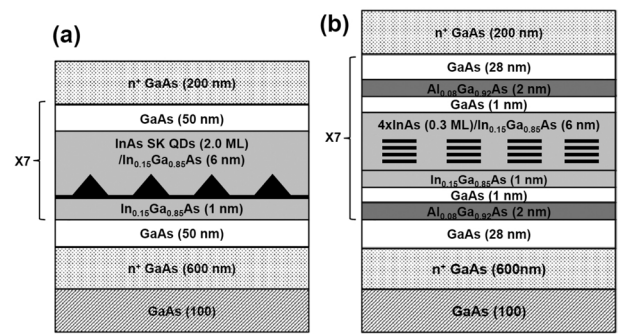


Fig. 1. Schematics of (a) SK and (b) SML QDIPs.

2 nm 두께의 $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$ 층을 삽입하여 감지소자의 암전류 감소를 꾀하였다. QDIP 소자는 자외선 사진공정과 BCl_3 를 사용하는 유도결합 플라즈마 반응성 이온 식각장치를 이용하여 $410 \times 410 \mu\text{m}^2$ 크기의 메사구조로 제작하였다. 건식 식각의 플라즈마 이온으로 인해 생기는 표면 결함층은 citric acid 수용액($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 : \text{H}_2\text{O} = 50 : 1$)으로 식각하여 제거하였다. 메사 전면에는 적외선을 수광하기 위해 300 μm 지름의 원형 윈도우를 남겨 두었다. QDIP의 상부 및 하부 접합층에는 $\text{Ge}/\text{Au}/\text{Ni}/\text{Au}(26\text{nm}/54\text{nm}/15\text{nm}/350\text{nm})$ 를 진공 증착한 후 포밍 가스 분위기에서 380 °C에서 1분간 급속 열처리(rapid thermal annealing) 공정을 통해 Ohmic 접촉을 형성하였다. 제작된 소자는 퓨리에 변환 적외선 분광기를 이용한 광전도 측정장치를 통해 적외선 감지특성이 분석되었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 상온에서 SK와 SML QDIPs의 PL 스펙트럼 결과를 보이고 있다. SK QDIP는 1.04 eV에서 피크를 가지는 강한 PL 특성을 보이고 있다. SML QDIP의 경우에는 1.24 eV에서 강한 PL 피크를 보이고 있다. 일반적으로 양자우물의 경우 상온에서는 매우 약하거나 거의 PL 특성을 관찰할 수 없는 데 이와 같이 1.04 eV 및 1.24 eV에서의 강한 PL 특성은 양자점의 특성이라고 생각할 수 있다. SML QDIP의 SK QDIP에 비해 blue-shifted된 PL 피크는 SML 양자점이 상대적으로 양자점의 크기가 더 작음을 의미한다. SML QDIP의 PL 반가폭은 약 36 meV로 SK QDIP의 반가폭(~71 meV) 보다 크게 작아 양자점 크기의 균일성은 향상된 것으로 사료된다.¹⁴⁾

Figs. 3(a)와 3(b)는 각각 SK와 SML QDIPs의 온도에 따른 광전도 스펙트럼 특성이다. SK QDIP는 8.4 μm 에서 피크를 가지고 6-12 μm 영역의 적외선 파장에 반응하는 광전도 스펙트럼을 보이고 있다. 반면 SML QDIP

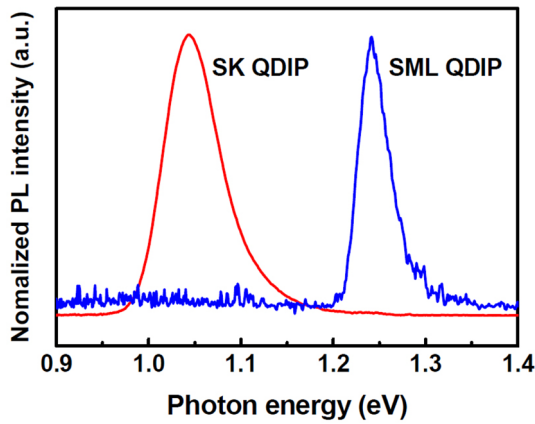


Fig. 2. PL spectra of SK and SML QDIPs at room temperature.

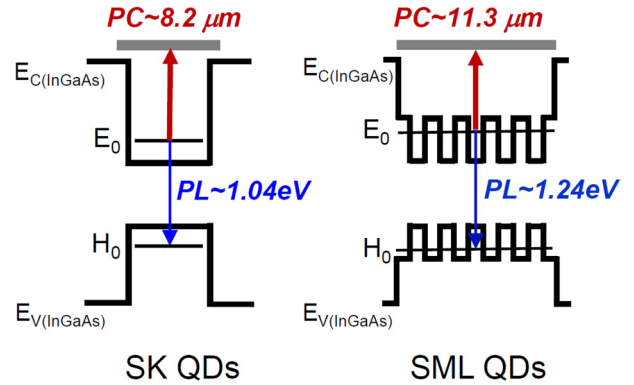


Fig. 4. Energy band diagrams and corresponding interband and intraband transitions of SK and SML QDs.

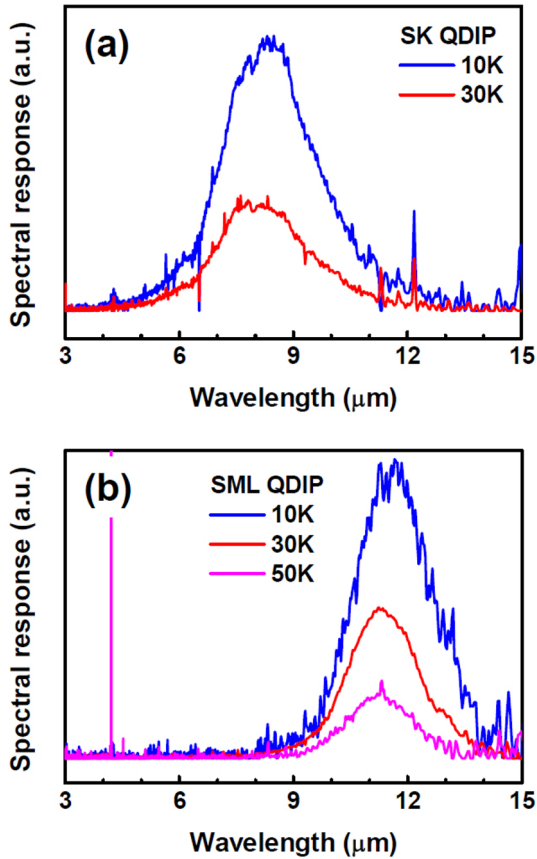


Fig. 3. Spectral photoconductive responses of (a) SK and (b) SML QDIPs at various temperatures.

는 보다 장파장인 11.7 μm 에서 피크를 보이고 있으며 9-14 μm 영역에서 광전도 특성을 나타내고 있다. 온도에 따른 광전도 특성을 비교하면, SK QDIP의 경우 10 K에서 30 K로 측정 온도가 올라감에 따라 광전류 값이 감소하였고 그 이상의 온도에서는 광전류 특성을 얻을 수 없었다. SML QDIP도 온도가 올라감에 따라 광전류

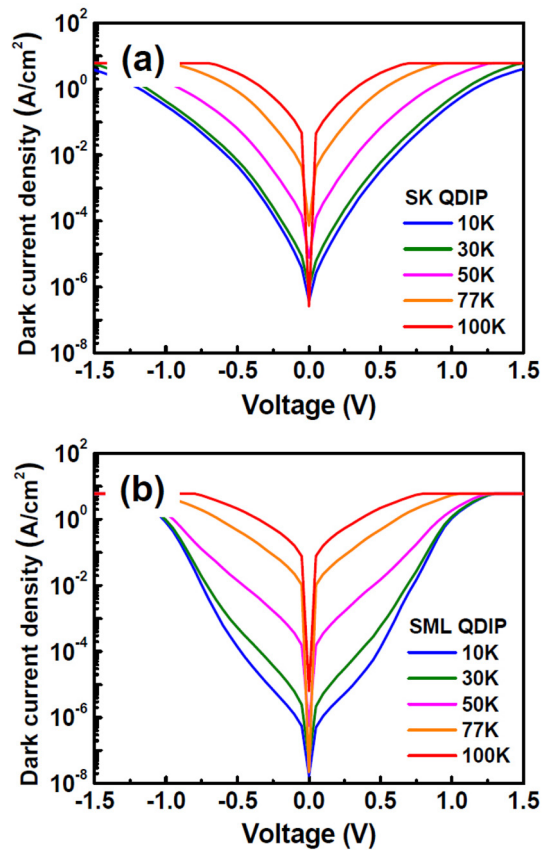


Fig. 5. Dark current characteristics of (a) SK and (b) SML QDIPs at various temperatures.

값이 감소하였으나 50 K까지는 광전도 특성을 관찰할 수 있었다. 이와 같은 이유는 이후 Figs. 4와 5의 결과에서 논의될 것처럼 온도가 올라감에 따라 암전류 특성이 우세해지기 때문으로 판단된다. 참고로 SML QDIP의 4 μm 근처의 신호는 잡음특성으로 파악된다.

이러한 PL 및 광전도 특성은 SK와 SML 양자점의 에

너지구조 및 interband와 intraband 천이 특성의 이해를 통해 해석할 수 있다. Fig. 4에 SK와 SML 양자점의 에너지구조 및 에너지 상태와 이와 관련된 천이특성을 나타내었다. Interband 천이 특성을 반영하는 PL 스펙트럼을 통해 SK 양자점의 전자 기저상태 에너지가 SML 양자점 보다 더 낮은 것을 알 수 있다. 적외선 감응은 전자 에너지준위 간의 intraband 천이 특성과 관련 있고 DWELL 구조에서는 적외선 감응 intraband 천이의 최종 준위는 InAs 양자점과 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 양자우물이 결합된 준위로 알려졌다.^{7,8)} SK 및 SML QDIPs의 DWELL 구조에서 같은 두께 및 조성의 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 양자우물이 존재하기에 적외선 감응 intraband 천이의 최종 준위의 에너지는 거의 같다고 유추할 수 있다. 따라서 SML QDIP의 경우가 적외선 감응 intraband 천이 에너지가 더 작게 되고 따라서 Fig. 3과 같이 더 장파장의 적외선을 검출하는 결과를 보인 것으로 판단된다.

Fig. 5는 SK 및 SML QDIPs의 온도에 따른 암전류 특성을 보이고 있다. SML QDIP가 SK QDIP에 비해 약 10배에서 100배 정도 암전류 값이 낮은 것을 볼 수 있다. 적외선 감응 intraband 천이의 시작 에너지준위 값이 더 낮은 SK QDIP가 보다 낮은 암전류 값을 가져야 하는 것이 일반적인 결과이지만, SML QDIP 구조 내에 2 nm 두께의 $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$ 층을 암전류 차단층으로 삽입하였기 때문에 더 낮은 암전류 값을 얻을 수 있었다고 판단된다.⁷⁾ 암전류가 크게 낮아진 결과로서 Fig. 3의 광전도 결과에서와 같이 SML QDIP의 경우 더 높은 온도에서도 적외선 감응 특성을 확보한 것으로 생각된다. 이와 같이 양자점이 존재하는 활성층에서의 도핑 농도와 $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$ 암전류 차단층의 최적화 연구가 향후 진행된다면 보다 우수한 성능의 QDIPs 소자가 구현될 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 MBE를 통해 GaAs (100) 웨이퍼 위에서 수직 입사하는 적외선에 감응하는 $n^+-n^0(\text{양자점})-n^+$ 구조의 QDIPs 소자를 성장하였다. SK 양자점 대비 SML 양자점은 blue-shifted 된 PL 스펙트럼 특성을 보인 것으로 미루어 더 작은 크기의 양자점이 형성되었고 이에 따라 전자 기저 에너지준위가 더 낮은 것으로 유추된다. 이에 따라 SK QDIP는 8.4 μm 에서 피크를 보이는 광전도 스펙트럼 특성을 보였고, SML QDIP는 보다 장파장인 11.7 μm 에서 피크를 보인 광전도 스펙트럼 특성을 나타냈다. 이는 적외선 감응 interband 천이가 시작되는 전자 에너지준위가 SML 양자점의 경우 상대적으로 더 높

기 때문인 것으로 생각된다. 암전류는 SML QDIP이 약 10-100배 정도 더 낮았고 이는 2 nm 두께의 $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$ 암전류 차단층 때문인 것으로 판단된다. 이에 따라 SML QDIP이 더 고온에서도 안정적으로 광전도 특성을 보였다. QDIPs 구조에서 양자점의 성장방법에 따라 적외선 검출 파장을 조절할 수 있었고 도핑 및 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 암전류 차단층의 최적화를 통해 QDIPs 성능을 극대화할 수 있을 것으로 사료된다.

Acknowledgement

This work was supported by Research Fund of Chungnam National University.

References

1. H. Yuan, G. Apgar, J. Kim, J. Laquindanum, V. Nalavade, P. Beer, J. Kimchi and T. Wong, Proc. SPIE, **6940**, 69403C1 (2008).
2. P. Norton, J. Campbell III, S. Horn and D. Reago, Proc. SPIE, **4130**, 226 (2000).
3. S. Horn, P. Norton, T. Cincotta, A. J. Stoltz, Jr., J. D. Benson, P. Perconti and J. Campbell III, Proc. SPIE, **5074**, 44 (2003).
4. W. A. Radford, E. A. Patten, D. F. King, G. K. Pierce, J. Vodicka, P. Goetz, G. Venzor, E. P. Smith, R. Graham, S. M. Johnson, J. Roth, B. Noshu and J. Jensen, Proc. SPIE, **5783**, 325 (2005).
5. A. Rogalski, Prog. in Quantum Electron., **27**, 59 (2003).
6. B. F. Levine, J. Appl. Phys., **74**, R1 (1993).
7. A. Madhukar, J. Campbell, E. T. Kim, Z. H. Chen and J. Ye, in Semiconductor Nanostructures for Optoelectronics, Artech House, Inc., (2004).
8. E. T. Kim, Z. H. Chen and A. Madhukar, Appl. Phys. Lett., **79**, 3341 (2001).
9. Z. Ye, J. Campbell, Z. H. Chen, E. T. Kim and A. Madhukar, IEEE J. Quantum Electron., **38**, 1234 (2002).
10. E. T. Kim, Z. H. Chen, M. Ho and A. Madhukar, J. Vac. Sci. Technol. B, **20**, 1188 (2002).
11. S. J. Lee, J. O. Kim, Y. G. Kim, S. K. Noh, Y. H. Kyu, S. M. Choi and J. W. Choe, J. Korean Phys. Soc., **46**, 1396 (2005).
12. J. O. Kim, S. J. Lee, S. K. Noh, Y. H. Ryu, S. M. Choi and J. W. Choe, J. Korean Phys. Soc., **47**, 838 (2005).
13. David Z.-Y. Ting, Sumith V. Bandara, Sarath D. Gunapala, Jason M. Mumolo, Sam A. Keo, Cory J. Hill, John K. Liu, Edward R. Blazejewski, Sir B. Rafol, and Yia-Chung Chang. Appl. Phys. Lett., **94**, 111107 (2009).
14. J. O. Kim, S. Sengupta, A. V. Barve, Y. D. Sharma, S. Adhikary, S. J. Lee, S. K. Noh, M. S. Allen, J. W. Allen, S. Chakrabarti and S. Krishna, Appl. Phys. Lett., **102**, 011131 (2013).