

論文97-34D-4-4

단일 양자 우물 구조로 된 밴드간 공명 터널링 다이오드의 전류-전압 특성

(I-V characteristics of resonant interband tunneling diodes with single quantum well structure)

金成振*, 朴榮碩*

(Seong Jeon Kim and Young Seak Park)

요 약

부성 저항의 특성을 갖는 양자 우물 구조로 된 공명 터널링 다이오드 소자가 고속 스위칭 소자로서 활용되기 위해서는 소자의 전류-전압 특성에서 피크 전류와 함께 피크 대 밸리 전류비가 커야 한다. 본 연구에서는 피크 전류 및 피크 대 밸리 전류비를 개선하기 위해 InP기판상에 InGaAs/InAlAs의 이중 접합의 단일 양자 우물 구조로 된 밴드간 공명 터널링 다이오드를 제작하여, 소자의 전기적 특성과 양자 우물 폭의 변화에 대한 전류-전압 특성의 의존성을 고찰하였다.

Abstract

In resonant tunneling diodes with the quantum well structure showing the negative differential resistance (NDR), it is essential to increase both the peak-to-valley current ratio (PVCR) and the peak current density (J_p) for the accurate digital switching operation and the high output of the device. In this work, a resonant interband tunneling diode (RITD) with single quantum well structure, which is composed of $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ heterojunction on the InP substrate, is fabricated to improve PVCR and J_p , and then the dependence of I-V characteristics on the width of the quantum well was investigated.

I. 서 론

MBE 장비의 점차적인 보급으로 이중 접합으로 된 화합물 반도체의 소자에 관한 연구가 활성화되면서, 직접적인 계기가 된 양자 우물 구조를 이용한 공명 터널링 다이오드의 개발은 기존의 터널링 다이오드 (일명 에사키 다이오드)를 대신할 수 있을 것으로 상당한 기

대를 모았다. 우선적으로 공명 터널링 다이오드의 작은 접합 캐퍼시턴스는 초고속 스위칭 동작 특성의 향상과 아울러 에사키 다이오드에 비해 트랜지스터의 구조로 변환이 가능하고 동작 특성의 재현성과 집적화^[1-2)]의 가능성등의 많은 장점들이 발견되었다. 그러나 터널링 소자의 우수한 초고속의 스위칭 기능에도 불구하고, 소자의 출력 특성에서 낮은 피크 대 밸리 전류비 (peak-to-valley current ratio: PVCR)는 명확한 On/ Off 상태를 실현하기가 어려워 소자의 활용 범위가 상대적으로 제한되어 왔다. 따라서 이 문제를 개선하기 위한 연구가 여러 방면에서 지속적으로 이루어져 왔다. 그 결과의 하나로서 기존의 에사키 다이오드와 양자우물 구조로 된 공명 터널링 다이오드를 결합시켜 만든 이중 양자 우물 구조로 된 밴드간 공명 터널링 다이오드

* 正會員, 慶南大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Engr., Kyungnam University)

※ 본 연구는 서울대학교 반도체공동연구소의 교육부 반도체분야 학술연구조성비(과제번호:ISRC 95-E-3017)에 의해 수행되었습니다.

接受日:1996년9월3일, 수정완료일:1997년3월24일

(resonant interband tunneling diode: RITD)의 개발은 상온에서도 100 이상의 높은 피크 대 밸리 전류비를⁽³⁾ 얻을 수 있게 되었다.

현재 양자 우물 구조로 된 공명 터널링의 소자에 관한 연구는 개별 소자로서 기능적인 면과 응용 분야로도 넓혀 가고 있다. 최근에는 어느 정도 안정된 동작 특성과 함께 트랜지스터의 구조를 갖는 집적 회로로 제작이 용이해지면서, 100 GHz 대에서 동작이 가능한 디지털 회로⁽⁴⁾ 및 초고주파 회로와 기능성 소자⁽⁵⁾(functional devices)로서 논리회로 및 대수 연산회로, 그리고 밴드간 공명 터널링 다이오드를 이용한 SRAM의 제조⁽⁶⁾ 등으로 영역을 넓혀 가고 있다. 이것은 집적용의 증가에 따른 설계의 scaling-down을 쫓아갈 프로세스 기술의 발전에 한계를 가정하여, 전형적인 기억소자의 크기가 0.1 μm 이하 시대로 넘어간다면, 기능성 소자인 공명 터널링 소자에 기초를 둔 기억소자의 개발이 절실히 필요하게 될 것이다.

II. 터널링 기구

부성저항 (negative differential resistance: NDR) 특성을 갖는 터널링 다이오드에는 그림 1(a)에서 나타낸 것처럼 에사키 다이오드가 있으며, 에사키 다이오드에서 캐리어의 전도는 전도대와 가전자대를 통한 밴드간 (interband) 터널링이 일어난다. 그림 1(b)는 다른 형태의 터널링 소자인 양자 우물 구조로 된 공명 터널링 다이오드를 나타낸 것으로 에사키 다이오드와는 달리 동일 밴드(intraband)상에서의 터널링을 이용한다. 즉 에사키 다이오드에서 터널링 효과는 n형의 전도대와 p형의 가전자대를 통한 캐리어의 전도에 의해 이루어지며, 열전자 방출 전류를 제한하는 터널링 장벽의 높이는 밴드갭 에너지와 유사하여 실리콘의 경우 1.1 eV 정도의 크기를 갖는다. 반면에 공명 터널링 다이오드는 단지 전도대 혹은 가전자대 내에서 이중접합으로 형성된 포텐셜 장벽을 통한 공명 터널링이 일어나며, 여기에서 터널링 장벽의 높이는 밴드 불연속 에너지 (band discontinuity energy)의 차이로 결정되므로 보통 0.5 eV에 불과하다. 따라서 열전자 방출효과에 의한 밸리 전류가 커지기 때문에 피크 대 밸리 전류비는 상당히 작은 10 이하의 값을 갖는다. 한편 그림 1(c)는 이중 양자 우물 구조로 된 밴드간 공명 터널링 다이오드의 에너지 밴드 구조를 나타낸 것이다. 밴드간 공명 터널링 다이오드에서 캐리어 전도는 앞서 두 소자의 전도 기구를 조합한 것으로, 양단의 전도대와 가전자대에 존재하는 다수 캐리어들이 중앙에 위치한 도핑되지 않은 양자 우물 구조를 경유하여 공명터널링으로 전도가 진행된다. 이 전도 기구에서는 비공명 터널링이 일어날 때 에사키 다이오드에서처럼 터널링 장벽의 높이가 밴드갭 에너지에 의해 결정되므로 낮은 밸리 전류를 보이는 반면에, 피크 전류는 공명 터널링 현상에 의해 증가되어 높은 피크 대 밸리 전류비를 보이게 된다. 그러나 이중 양자 우물 구조는 도핑되지 않은 중앙 장벽을 갖게 되므로 피크 전류를 감소시키게 되어 소자의 출력을 감소시키며, 이것은 또한 피크 대 밸리 전류비에도 영향을 끼치게 될 것이다. 그림 1(d)는 본 논문에서 제안한 단일 양자 우물 구조로 된 밴드간 공명 터널링 다이오드의 에너지 밴드 구조와 캐리어 전도 과정을 나타낸 것이다. 단일 양자 우물 구조에서 포텐셜 장벽은 열평형 상태에서 밴드 구부림 효과에 의해 형성되므로, 밸리 전류는 이중 양자 우물 구조와

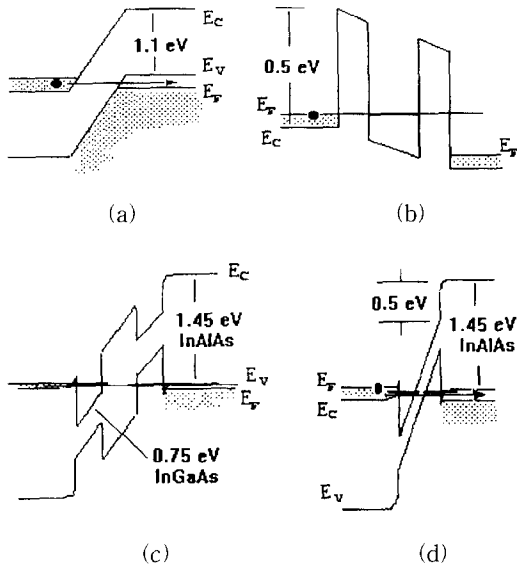


그림 1. 다양한 터널링 다이오드의 에너지 밴드 구조: (a) 에사키 다이오드, (b) 공명 터널링 다이오드, (c) 이중양자 우물구조와 (d) 단일양자 우물구조의 밴드간 공명 터널링 다이오드

Fig. 1. Energy band diagrams of different tunnelin diodes: (a) Esaki diode, (b) resonant tunneling diode, (c) and resonant interband tunneling diodes of double quantum well, (d) and single quantum well

거의 변화가 없지만, 피크 전류는 줄어든 터널링 장벽의 두께로 인해 증가할 것이다.

본 연구에서는 기존의 이중 양자 우물 구조⁽⁷⁻⁸⁾ 대신에 구조적으로 단순화시킨 단일 양자 우물 구조에서의 전기적 특성을 고찰하고, 아울러 단일 양자 우물의 폭을 변화시켰을 때 밴드간 공명 터널링 다이오드의 피크 전류와 피크 대 벨리 전류비에 끼치는 효과를 연구하였다.

(the upper side)

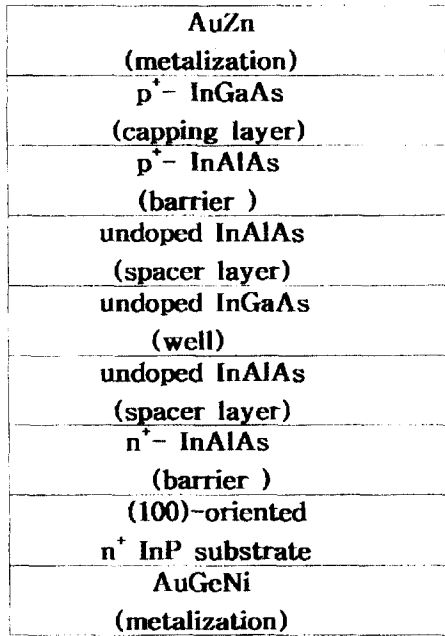


그림 2. 단일 양자 우물 구조로 된 밴드간 공명 터널링 다이오드의 단면도

Fig. 2. Schematic diagram of the resonant inter-band tunneling diode with single quantum well structure.

III. 소자의 제작

밴드간 공명 터널링 다이오드의 양자 우물 구조를 성장하기 위해 ISA RIBER사(모델명 2400P)의 MBE 장비를 이용하였다. 시료는 정전류-전압 특성곡선의 측정이 용이하도록 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 이상이 도핑된 n형 InP의 전도 기판을 사용하였으며, 여기에 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 의 이중 접합을 갖는 단일 양자 우물 구조를 성장시켰다. 그림 2는 단일 양자 우물 구조로 된 밴드간 공명 터널링 다이오드의 단면도를 나타낸

것이다. 도핑시키지않은 InGaAs의 양자 우물의 양편에 p 와 n형으로 도핑된 InAlAs의 장벽 층을 성장시키고, 장벽 층과 우물 층사이에는 도핑시키지 않은 InAlAs의 스페이서층을 삽입시켰다. 이때 스페이서 층은 성장 동안에 도판트가 장벽으로 확산되는 것을 막아주며, 계면에서 밴드 구부림을 증대할 수 있어 장벽 층에서 전하의 구속 효과를 높일 수 있고, 또한 이온화된 불순물의 스캐터링을 줄일 수 있으므로 피크 대 벨리 전류비를 증가시키는 기능을 갖는다. 그러나 스페이서 층이 너무 두꺼우면 터널링 효과가 줄어들게 되어 적당한 두께가 요망된다.

세부적인 공정 조건은 다음과 같다. 성장하는 동안에 MBE의 내부 압력은 3×10^{-8} Torr, 온도는 480 °C, 그리고 InGaAs/InAlAs의 성장 속도는 시간당 0.66 μm 로 유지하였다. 이러한 조건하에서 Si로 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 만큼 도핑된 n형 InAlAs의 장벽층을 InP 기판상에 4000 Å 정도 성장한 후에 두께가 5 Å의 스페이서층을 두고, 그위에 두께가 각각 40, 60, 80, 및 100 Å의 도핑되지 않은 InGaAs의 양자 우물 층을 성장시켰다. 그리고나서 5 Å의 도핑되지 않은 스페이서 층과 Be로 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 정도로 도핑된 InAlAs의 p형 장벽층을 4000 Å으로 성장시키고 그 위에 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 정도로 도핑된 50 Å의 InGaAs capping layer를 두었다. 밴드간 공명 터널링 다이오드의 전극 크기는 측정의 용이함과 과전류로 인한 소자의 손상을 고려하여 반경이 30 μm 인 시료를 제작하였으며, 마스크 패턴은 메사 식각과 저항성 접촉 형성을 할 수 있도록 e-beam 장비를 이용하여 두 장의 마스크를 제작하였다. 그리고 n형 오믹 콘택 층에 저항성 접촉을 형성하기 위한 금속으로는 AuGeNi를 사용하였으며, p형 오믹 콘택 층에 저항성 접촉을 형성하기 위해서는 AuZn을 사용하였다. 금속 증착 과정은 열증착기(thermal evaporator)를 이용하여 연속증착하였으며, lift-off 후에 안정화를 위해 열처리 공정을 행하였다. 열처리 공정은 터널링 장벽속으로 불순물 확산이 일어나는 것을 방지하기 위해서 430 °C에서 30초간 RTA 방법으로 처리하였다. 제작된 밴드간 공명 터널링 다이오드의 전류-전압 특성은 HP4145를 이용하여 측정하였다.

IV. 결과 및 분석

밴드간 공명 터널링 다이오드의 정 전류-전압 특성

에 관한 중요 파라미터에는 피크 및 밸리 전류와 피크 대 밸리 전류비등이 있으며, 이 들에게 영향을 끼치는 인자로는 소자의 구조, 중앙 장벽의 두께, 양자 우물의 폭 및 스페이서 층의 두께등이 있다. 본 연구에서는 단일 양자 우물 구조의 밴드간 공명 터널링 다이오드에서 양자 우물의 폭에 대한 전류 전압 특성의 변화에 대해 연구하였으며, 그림 3은 양자 우물의 폭이 80Å인 시료에 대해 상온에서 측정된 것으로 피크 전류는 0.5 mA, 밸리 전류는 8 μA, 그리고 피크 대 밸리 전류비는 65 정도를 보인 결과를 나타낸 것이다.

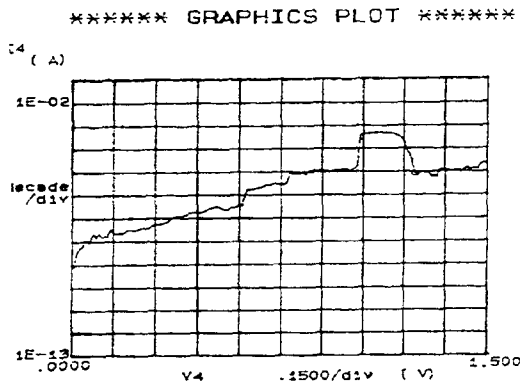


그림 3. 밴드간 공명 터널링 다이오드에서 측정된 전류-전압 특성 곡선

Fig. 3. Current-voltage curve measured from the RITD with single quantum well structure.

그림 4는 양자 우물의 폭에 대한 피크 및 밸리 전류 밀도의 변화에 관한 결과로서 양자 우물의 폭이 40 과 60Å인 시료에서 피크 전류 밀도는 약 1 A/cm² 정도에서 유사한 특성을 보였으며, 80Å인 시료에서는 18 A/cm²의 높은 피크 전류 밀도를 보였고, 100Å인 시료에서는 상당히 감소된 피크 전류 밀도를 보였다. 이와 같이 피크 전류의 큰 변화는 양자 우물 속에 생성된 구속 에너지 준위와 그 구속 준위의 위치와 관련이 있는 것으로 생각된다.

양자 우물 속의 구속 준위의 위치는 단순한 반 무한대 구형 포텐셜 우물 모델을 이용하여 근사적으로 계산할 수 있다. 실제 양자 우물은 바다수 수평을 이루지 않고 경사진 형태이며 유한한 포텐셜 장벽을 갖는 양자 우물 구조이므로 준 구속 에너지 준위는 약간 상승하게 된다. 일반적으로 단순한 구형의 유한 포텐셜 모델에서 기저 준위가 형성될 조건은

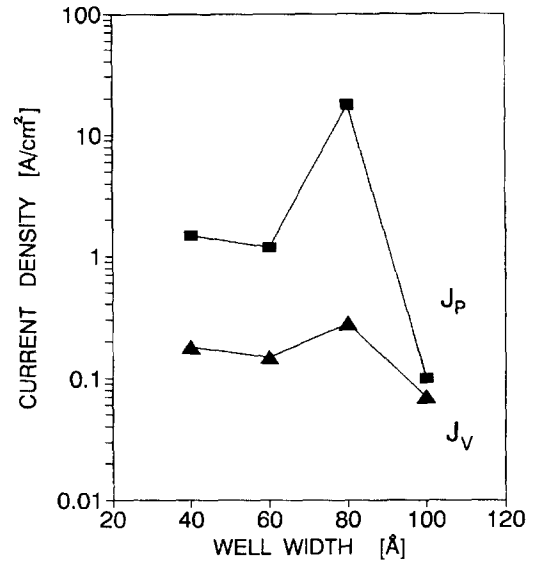


그림 4. 양자 우물의 폭 변화에 대한 피크 및 밸리 전류 밀도

Fig. 4. Dependence of peak and valley current densities for different well widths.

$$U \geq \frac{\pi^2 \hbar^2}{2 m_e^* d^2} \quad (1)$$

으로 주어진다. 여기에서 U는 포텐셜 우물의 높이로서 밴드 불연속 에너지인 0.5 eV가 되며, InGaAs층에서 전자의 유효질량 m_e^* 을 0.04 m_e 로 놓게 되면, 삼각 양자 우물 구조의 형태에서 위 식을 만족하기위한 양자 우물의 폭(d)은 대략적으로 60Å 보다 커야 할 것이다. 이와 같은 기저 준위의 형성 조건에 의해 양자 우물의 폭이 40 과 60Å인 시료에서는 양자 우물 속에 구속 준위를 생성하지 못하기 때문에 공명 터널링이 아닌 일반 터널링 현상에 의한 전도로 해석할 수 있다. 그리고 양자 우물의 폭이 증가할 수록 중앙에 있는 장벽의 기울기가 완만해지므로 40 보다 60Å인 시료에서 피크 전류가 좀더 낮아지게 된다. 한편 양자 우물의 폭이 80Å인 시료의 경우에는 그림 1(d)와 같이 외부 장벽에서 페르미 준위와 거의 일치하는 양자 우물내에서 기저 에너지 준위가 포텐셜 장벽의 상단에 형성되므로 양자 우물내에서 구속 준위를 통한 공명 터널링 전도가 가능하므로 높은 피크 전류 밀도를 낳게 된다. 그러나 100Å인 시료에서는 양자 우물내에 형성된 기저 에너지 준위가 양자 우물의 바다쪽에 생성되므로 이 준위를 통한 공명 터널링 현상이 일어날 수 없게 된다. 이와 같이 피크 전류는 우물폭에 민감한 영향을 받지

만, 반면에 밸리 전류에 영향을 끼치는 인자인 포텐셜 장벽의 높이는 큰 변화가 없으므로 변화 폭은 심하지 않게 된다. 그림 5는 우물폭의 변화에 대한 피크 대 밸리 전류비의 의존성을 나타낸 것이다. 그림 4에서 제시한 결과로부터 환산한 피크 대 밸리 전류비는 두께 80 Å인 시료에서 가장 큰 65정도가 관측되었고, 다른 시료에서는 일반 터널링에 의한 것으로 10 이하의 낮은 피크 대 밸리 전류비가 관측되었다.

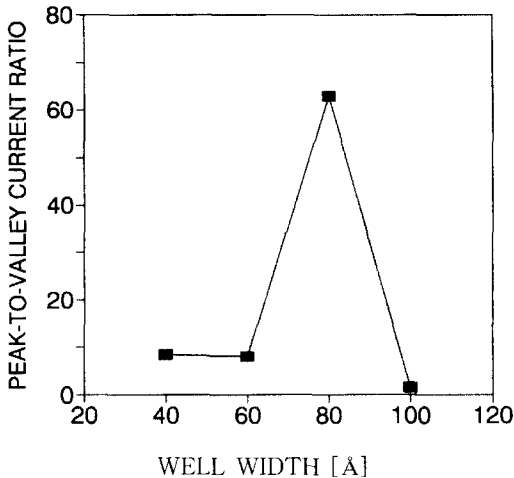


그림 5. 양자 우물의 폭 변화에 대한 피크 대 밸리 전류비

Fig. 5. Dependence of peak-to-valley current ratio for different well widths.

결과적으로 65 정도의 피크 대 밸리 전류비는 공명 터널링 전도에 기인한 것으로 에사키 다이오드나 일반 공명 터널링 다이오드에 비해 상당히 크지만, 이중 양자 우물 구조에서 발표된 100 이상의 결과보다는 작았다. 이와 같은 결과는 시료 제작의 여건에서 요인을 찾을 수 있겠지만, 그 보다 중요한 요인으로 단일 양자 우물 속에 형성된 기저 준위의 구속력이 이중 양자 우물 구조에 비해 상대적으로 약해 공명 터널링 효과가 저감된 것으로 생각된다. 한편 피크 전류 밀도는 공명 터널링 확률의 감소로 영향을 받지만, 근본적으로는 1 차수가 낮은 불순물 주입 농도로 제작된 시료이기 때문에 낮게 관측되었다. 그러나 구조적으로 중앙 장벽 층을 둘 필요가 없는 단일 양자 우물 구조는 터널 장벽의 두께에 따라 지수적으로 큰 감소를 보이는 터널링 전도의 특성으로 볼 때 이중 양자 우물 구조에 비해 피크 전류 밀도는 증가할 것이다.

V. 결 론

본 연구에서는 기존의 이중 양자 우물(double quantum well) 구조 대신에 단일 양자 우물(single quantum well) 구조를 이용한 밴드간 공명 터널링 다이오드의 전류-전압 특성에 대해 고찰하였다. 줄어든 포텐셜 장벽의 두께를 통한 터널링 효과의 증대로 피크 전류의 증가가 기대된다. 그러나 피크 대 밸리 전류비는 양자 우물 내에서 구속된 에너지 상태의 이완으로 공명 터널링 효과가 저감되어 이중 양자 우물 구조에 비해 낮았다. 양자 우물의 폭에 대한 전류-전압 특성의 의존성에 관한 실험에서는 양자 우물의 폭이 80 Å인 시료에서 공명 터널링에 의한 65 정도의 피크 대 밸리 전류비가 상온에서 관측되었다. 구조적으로 미소 변화에 대해 전기적 특성에 큰 변화를 일으키는 밴드간 공명 터널링 소자는 앞으로도 지속적인 실험과 이론적 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

- [1] C. H. Yang and H. D. Shih, "Integration of resonant tunneling diodes: an N-terminal device", Proceedings of the Fifteenth International Symposium, Gallium Arsenide and Related Compounds 1988, pp. 611-616 (1989).
- [2] Y. Watanabe et al., "Monolithic integration of resonant tunneling diode and HEMT for low-voltage, low-power digital circuits", IEICE Transactions on Electronics, vol. E78-C, pp. 368-73 (1995).
- [3] H. H. Tsai et al., "P-N double quantum well resonant interband tunneling diode with peak-to-valley current ratio of 144 at room temperature", IEEE-ED Lett., vol. 15, pp. 357-359 (1994).
- [4] D. H. Chow et al., "Investigations of $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{AlAs}$ resonant tunneling diodes for high speed switching", Appl. Phys. Lett., vol. 61, pp. 1685-1687 (1992).
- [5] C. H. Mikkelsen et al., "Coupled-quantum-well field-effect resonant tunneling transistor for multi-valued logic/memory applications", IEEE-ED, vol. 41, pp.

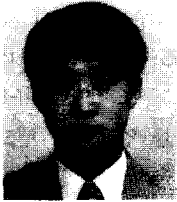
132-137 (1994).

- [6] J. Shen et al., "Static random access memories based on resonant interband tunneling diodes in the InAs/GaSb/AlSb material system", IEEE-EDL, vol. 16, pp. 178-180 (1995).
- [7] M. Sweeny and J. M. Xu, "Resonant in-

terband tunneling diodes", Appl. Phys. Lett, vol. 54, pp. 546-548 (1989).

- [8] D. J. Day et al., "Experimental demonstration of resonant interband tunneling diode with room temperature peak-to-valley current ratio over 100", J. Appl. Phys., vol. 73, pp. 1542-1544 (1993).

저 자 소 개



金成振(正會員)

1961년1월16일생. 1983년2월 고려대 전기공학과 졸업. 1985년2월 동 대학원 졸업(석사). 1993년8월 동 대학원 박사학위 취득. 1988년 ~ 1990년 Michigan대 전기공학과 박사과정 수

학. 1994년 ~ 현재 경남대 전자공학과 조교수. 관심분야는 공명 터널링 다이오드 및 마이크로 센서의 개발.



朴榮碩(正會員)

1979년 영남대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1981년 한양대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1985년 한양대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1990년 9월 ~ 1991년 8

월 일본 우정성 통신종합연구소(선단연구소) 초빙해외과학자. 1985년 9월 ~ 현재 경남대학교 공과대학 전자공학과 교수. 관심분야는 software engineering, artificial intelligence, multimedia processing, neural and fuzzy system, pattern recognition 등임.