

단일양자 우물구조로 된 InGaAs/InAlAs의 밴드간 공명 터널링 다이오드에 관한 연구

김성진*, 박영석, 이철진*, 성영경**
경남대 전자공학과, 군산대 전기공학과*, 고려대 전기공학과**

InGaAs/InAlAs resonant interband tunneling diodes(RITDs) with single quantum well structure

S. J. Kim, Y. S. Park, C. J. Lee*, and Y. K. Sung**
Kyungnam Univ., Kunsan Nat. Univ.*, and Korea Univ.**

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 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 $In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As$ heterojunction on the InP substrate, is suggested to improve the PVCr and J_p through the narrowed tunnel barriers. As the result, the measured I-V curves showed the PVCr over 60.

I. 서론

N형의 부정저항(negative differential resistance) 특성을 갖는 공명 터널링(resonant tunneling) 소자는 캐리어의 전도가 터널링에 의해 이루어지고 또한 접합 커패시턴스(junction capacitance)가 작기 때문에 초고속의 디지털 회로⁽¹⁾에 매우 적합한 것으로 알려져 왔다. 그러나 터널링 소자의 우수한 초고속의 스위칭 기능에도 불구하고, 소자의 출력 특성에서 명확한 On/ Off 상태를 실현하기가 어려워 소자의 활용 범위가 상대적으로 제한되어 왔다. 이와 같이 불명확한 스위칭 기능은 근본적으로 공명 터널링 다이오드의 전류-전압에 대한 특성 곡선상에서 나타난 피크 대 밸리 전류비(peak-to-valley current ratio: PVCr)가 작은 것에 기인한다. 따라서 안정된 스위칭 기능을 얻기위해서 높은 PVCr은 필연적인 것으로, 이는 터널링 소자의 성능을 평가할 때 중요한 기준으로 삼고있다. 초기의 공명 터널링 다이오드^(2,3)에

서 PVCr은 상온에서 10이하에 불과하여 거의 실용 가치가 적었다. 그러나 새로운 이종결합의 안정적인 제작과 소자 구조의 변환을 통한 꾸준한 연구의 결과로서, 현재의 공명 터널링 다이오드^(4,5)에서 PVCr은 100 정도에 이르렀다.

현재 PVCr이 가장 높은 소자는 이중 양자 우물 구조로 된 밴드간 공명 터널링 다이오드이다. 그러나 이중 양자 우물 구조는 구조적으로 터널링 장벽의 폭이 크다. 이는 부가율을 떨어뜨리는 요인이 될 수 있으므로, 본 연구에서는 더욱 개선된 PVCr을 추구하기 위하여 단일 양자 우물 구조로 된 밴드간 공명 터널링 다이오드를 제안하고자 한다.

아직은 양자우물 구조로 된 공명 터널링의 소자에 관한 연구가 소자의 안정된 전기적 특성을 추구하는 데 주력하고 있지만, 상온에서 개선된 전기적 특성과 함께 집적 회로로 제작이 용이해진다면 기능성 소자(functional devices)인 공명 터널링 다이오드는 가까운 장래에 그 응용은 논리회로 및 연산회로^(6,7) 분야로 대폭 확대될 것이다.

II. 소자 구조 및 동작 원리

본 연구에서 제안된 단일양자 우물구조로 된 밴드간 공명 터널링 다이오드의 구조는 그림1과 같이 InP 기판상에 MBE를 이용하여 $In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As$ 를 이종결합시킨 형태를 갖는다. 이 구조는 기존의 이중 양자 우물(double quantum well) 구조^(4,5)와 달리 하나의 양자 우물 구조를 갖게 됨으로서 유효 터널링 장벽의 폭을 줄일 수 있는 잇점이 있다. 따라서 밸리 전류는 본래대로 유지하면서 피크 터널링 전류의 증대를 통한 PVCr을 향상시킬 수 있다. 그림2는 에너지 밴드 그림에서 두 구조의 전하 전도 현상을 비교한 것이다. 공명 터널링의 확률과 직접적인 관계가 있는 피크 터널링 전

류는 포텐셜 장벽의 높이, 두께 및 양자우물의 폭에 의존하며, 장벽의 두께와 높이에는 반비례 관계가 있다. 반면에 열전자 방출 전류와 관련이 있는 벨리 전류는 포텐셜 장벽의 높이에 반비례 관계가 있지만, 장벽의 두께와는 거의 무관하다. 따라서 장벽의 두께를 가능한 좁게 조절할 수 있다면 벨리 전류는 일정하게 유지시키면서 피크 전류의 증대를 통한 PVC를 향상시킬 수 있는 방법이 될 것이다. 그러나 이 방법은 기존의 이중 양자우물 구조에서는 적용할 수 없다. 왜냐하면 큰 밴드갭 물질의 두께에 의해 결정되는 포텐셜 장벽의 유효 폭은 거의 변화가 없기 때문이다. 반면에 열평형의 상태에서 단일 양자우물 구조의 포텐셜 장벽은 작은 밴드갭을 갖는 물질에 의해 경사형(grade-type)으로 형성되기 때문에 유효 터널링 장벽의 두께는 실제의 길이에 비해 훨씬 줄어들게 되어 더 높은 PVC의 구현이 가능하다.

III. 소자 제작 및 실험 결과

시료는 먼저 (100) 방향의 n형 InP 기판상에 MBE 장비를 이용하여 $In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As$ 의 이종접합을 갖는 단일 양자우물 구조를 성장시켰다. 세부적으로는 InP 기판상에 Si로 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 만큼 도핑된 n형 InAlAs의 장벽층을 4000Å 성장한 후에 5Å의 스페이서층을 두고, 그위에 도핑되지 않은 InGaAs의 우물층을 80Å로 성장시켰다. 그리고 나서 5Å의 스페이서층과 Be로 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 정도로 도핑된 InAlAs의 p형 장벽층을 4000Å로 성장한 후에 50Å의 InGaAs로 된 capping layer를 두었다. 금속전극 물질로는 n형 전극에 AuGeNi을, p형 전극에는 AuZn을 이용하여 증착시켰다. 표1은 소자 제작을 위한 MBE 공정조건을 나타내고 있다. 이와 같이 제작된 시료는 그림 3과 같이 마스크 패턴을 이용하여 매사형 다이오드의 구조로 제작되었다. 여기에서 매사 전극의 크기는 30 - 90 μm 이며 제작된 다이오드는 HP-4145를 이용하여 전류-전압 특성 곡선을 측정하였다. 그림 4는 매사 전극의 크기가 가장 큰 90 μm 의 시료에서 측정된 I-V 곡선으로 약 60 정도의 PVC가 관측되었다.

IV. 결론

본 연구에서는 공명 터널링 다이오드에서 개선된 부성저항 특성을 얻기 위해 기존의 이중 양자우물 구조를 대신한 단일 양자우물 구조로 된 밴드갭 공명 터널링 다이오드를 제안하였다. 이 구조에서는 유효 터널링 장벽의 폭을 줄임으로서 피크 터널링 전류의 증가를 통한 PVC의 증대를 꾀하였다. 측정된 결과는 상온에서

약 60 정도의 PVC가 관측되었다. 또한 단순화된 소자의 구조로 인한 필요한 공정을 줄이게 되어 막의 신뢰성을 높이는 효과가 기대된다.

참고문헌

1. T. C. L. G. Sollner et. al., Appl. Phys. Lett., vol. 50, p.332(1987)
2. R. Tsu and L. Esaki, Appl. Phys. Lett., vol. 22, p.562(1973)
3. T. Inata et. al., Jpn. J. Appl. Phys., vol. 25, p. L983(1986)
4. D. J. Day et. al., J. Appl. Phys., vol. 73, p. 1542(1993)
5. H. H. Tsai et. al., IEEE-ED Lett., vol. 15, p.357 (1994)
6. K. J. Chen, et. al., IEEE-ED Lett., vol. 16, p.70 (1995)
7. J. Shen et. al., IEEE-ED Lett., vol. 16, p.178 (1995)

(the upper side)

AuZn (metalization)
p ⁻ InGaAs (capping layer)
p ⁻ InAlAs (barrier & ohmic contact)
undoped InAlAs (spacer layer)
undoped InGaAs (well)
undoped InAlAs (spacer layer)
n ⁻ InAlAs (barrier & ohmic contact)
(100)-oriented n ⁺ InP substrate
AuGeNi (metalization)

Fig. 1. The cross-section diagram of RITD with single quantum well structure

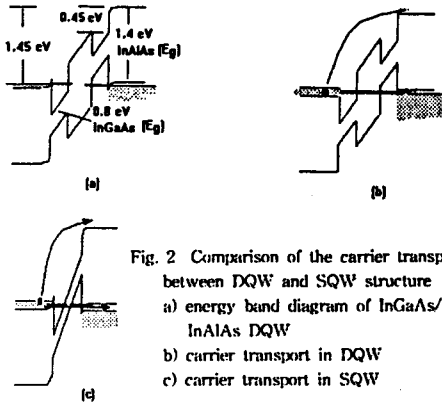


Fig. 2 Comparison of the carrier transport between DQW and SQW structure
 a) energy band diagram of InGaAs/InAlAs DQW
 b) carrier transport in DQW
 c) carrier transport in SQW

growing order of layers	use	material	doping density (cm ⁻³)	thickness (Å)	remark (dopant)
upper side					
6	capping layer	p ⁻ - InGaAs	heavily doped 1x10 ¹⁹	50	Be
5	barrier & ohmic contact	p ⁻ - InAlAs	heavily doped 1x10 ¹⁹	4000	Be
4	spacer layer	InAlAs	undoped	5	
3	well	InGaAs	undoped	80	
2	spacer layer	InAlAs	undoped	5	
1	barrier & ohmic contact	n ⁻ - InAlAs	heavily doped 3x10 ¹⁸	4000	Si
0	substrate	(100)-oriented n ⁻ -InP wafer	size of sample : 1x1 (cm ²)		
Process Information 1. MBE equipment: ISA RIDER 2400P 2. Process condition Pressure: 3x10 ⁻⁴ torr Temperature: 480 °C Growth rate of InGaAs & InAlAs: 0.66 μm/hour Source material: solid					

Table 1. Information of The Process Conditions and the Layers Grown by MBE

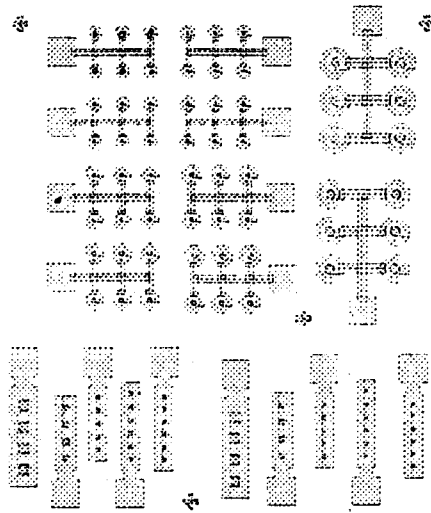


Fig. 3. The layout of the designed mask pattern of RITDs

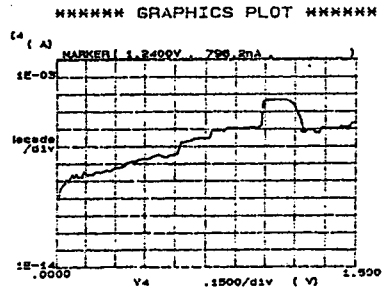


Fig. 4. The I-V curve measured in the sample with 90 μm diameter