

터널 전계 효과 트랜지스터의 양자모델에 따른 특성 변화

이주찬, 안태준, 유운섭*

한경대학교 전기전자제어공학과

Ju Chan Lee, Tae Jun Ahn, Yun Seop Yu*

Dept. of Electrical, Electronic and Control Eng., Hankyong National University

E-mail : dlwncks2001@gmail.com

요 약

다양한 양자모델(Quantum model)을 적용한 터널 전계 효과 트랜지스터(tunnel field effect transistor; TFET)의 전류 및 커패시턴스(Capacitance)-전압 특성을 조사하였다. 사용된 양자 모델은 density gradient, Bohm Quantum Potential(BQP), Vandort quantum correction 모델을 슈뢰딩거-푸아송 모델과 calibration하여 사용하였다. BQP, Vandort, density gradient 모두 구동전류는 감소하였다. BQP를 단독으로 사용한 경우에 SS(subthreshold swing)와 on-set 전압(V_{onset})은 일정하지만 구동전류에서만 약 3배 전류가 감소하였으며, BQP와 Vandort 사용한 경우와 density gradient를 사용한 경우에 모두 V_{onset} 이 약 0.07 eV 이동하였으며, SS가 40 mV/dec 이상으로 증가하였다.

ABSTRACT

Current and capacitance-voltage characteristics of tunnel field effect transistor (TFET) with various quantum models were investigated. Density gradient, Bohm quantum potential (BQP), and Vandort quantum correction are used with calibrating against Schrodinger-Poisson model. Drive-currents in all models are decreased. When only BQP is used, SS and V_{onset} are fixed but drive-current is decreased 3 times more than those of no quantum model. And When BQP with Vandort and density gradient are used, SS increased more than 40 mV./dec and V_{onset} shifted as 0.07 eV.

키워드

터널 트랜지스터, 포인트 터널링, 양자화, 양자우물, 양자장벽

I. 서 론

MOSFET의 낮은 성능을 보완하기 위한 소자로 TFET에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. TFET는 양자역학적 현상인 밴드대밴드 터널링(BTBT)에 의한 전자의 생성(generation)으로 동작하며, generation rate가 MOSFET의 thermal effect보다 훨씬 높기 때문에, SS(subthreshold swing) 및 온/오프 전류비 측면에서 높은 효율이 관찰되었다[1]. 근대에 집적회로에 더 많은 소자를 집적하기 위한 소형화가 가속됨에 따라 10 nm 이하 공정이 가능해지면서 반도체의 물리적 특성은 고체역학에서 양자역학으로 변화하고 있다[2]. 이때 소자는 양자화(Quantization)와 양자장벽(Quantum potential)의 영향이 크게 받는다. 양자화란 양자우물(Quantum well)에서 전자 또는 정공이 존재할 수 있는 에너지가 양자화 되어, 특정 에너지 상태에만 존재하는 것을 말하며[2] 양자장벽이란 전자가 반전(inversion)될 때, 전자와 전자의 척력의 영향에 의해 전자 밀도가 표면(surface)에서 감소하는 경향이 나타나는 것을 말

한다[3]. 100nm 이상 채널길이를 가진 MOSFET에서는 양자역학에 의한 영향이 크지 않은 것으로 발표되었다. 하지만, TFET는 양자화 및 양자장벽의 영향이 BTBT에 큰 영향을 미치기 때문에, 문턱전압(V_{onset}) 및 구동전류(I_{on})에서 변화가 나타난다[2]. 반도체 시뮬레이션을 위해 널리 사용되는 TCAD 시뮬레이터인 Sentaurus[4] 및 Atlas[5]에서 어느 정도의 양자효과가 적용 가능하나, 양자역학에 대한 정확한 물리적분석이 부족하고, 모든 mesh에 대하여 슈뢰딩거(Schrodinger)방정식을 풀기 어렵기 때문에, Quantum correction이라는 대체 가능한 모델이 사용된다. 본 논문에서는 다양한 Quantum correction 모델과 density gradient 모델을 슈뢰딩거 모델과 Calibration한 결과를 분석하여 TCAD 환경에서 양자 효과를 소자에 적용하기 위한 틀을 제시한다.

II. TFET 구조 및 양자 효과

그림1(a)는 Planar TFET의 구조를 나타내며, 그

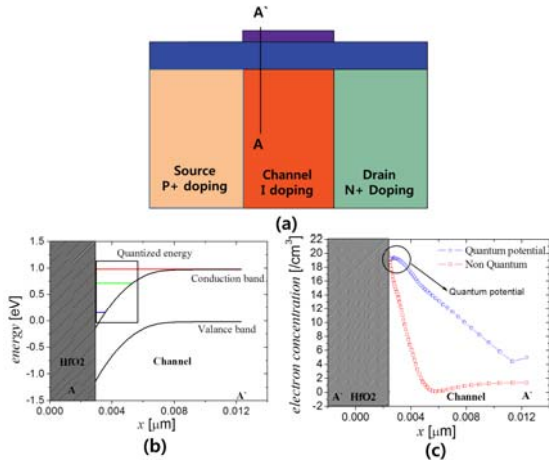


그림 1. (a) Planar TFET의 구조, (b) A-A' 단면의 에너지 밴드, (c) A-A' 단면의 전자농도

림 (b)와 (c)는 채널-게이트 산화막 접합면에서 나타나는 양자 효과를 나타낸 것이다. Planar TFET 구조에서 게이트 전계에 의해 채널의 전도대와 소스의 가전자대의 에너지가 일치하는 영역부터 BTBT가 나타나며 이때의 전압을 V_{onset} 이라 한다. 그림 1.(b)는 양자화에 의한 energy state를 나타내는데, 전자는 양자화된 energy state에 존재할 수 있기 때문에 기존의 가전자대와 가장 낮은 energy state가 만나는 지점이 V_{onset} 이 된다[2]. 그림 1.(c)는 양자 장벽에 의한 전자 밀도의 변화를 나타낸 것이다. 전자 밀도의 변화는 밴드갭에 영향을 미치며 BTBT에 영향을 준다[3].

TCAD 시뮬레이션은 ATLAS와 Sentaurus를 사용하였다. Auger, SRH recombination, lambardi mobility, Fermi, BGN을 기본 모델로 사용하였으며 Schrodinger 방정식, Vandort quantum correction과 Bohm quantum correction(BQP), density gradient 양자역학 모델 결과를 분석했다.

III. 시뮬레이션 결과

그림 2.(a)는 각각의 모델을 사용했을 때, 나타나는 커패시턴스 특성을 Schrodinger 방정식과 Calibration한 결과를 나타낸 것이며, 그림 2.(b)는 그림 2.(a)와 동일한 조건에서 계산된 드레인 전류-게이트 전압 특성 곡선을 나타낸 것이다. 양자 모델을 사용하지 않았을 때, V_{onset} 은 약 0.15 eV, SS는 30 mV/dec, I_{on} 은 약 1.8×10^{-9} A/ μm 로 관찰되었다. BQP 모델은 Quantum potential을 계산하는 모델로 단독으로 사용하였을 때, V_{onset} 과 SS에 변화가 없으며, 구동 전류만 약 3배 감소하는 것을 확인할 수 있다. 반면, Vandort와 BQP를 함께 사용하였을 때, V_{onset} 이 약 0.07 eV 이동하며, SS도 약간 증가하여 구동전류 또한 약 10배 이상 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 Calibration 과정에서 Vandort correction 모델이 밴드갭을 증가시키는 결과가 나타났음을 예상할

수 있다. Density gradient 모델을 사용하였을 때, V_{onset} 의 변화는 Vandort와 BQP를 함께 사용하였을 때와 거의 동일하지만, SS가 더 높아지기 때문에, 구동전류는 더 감소하는 것을 확인할 수 있다.

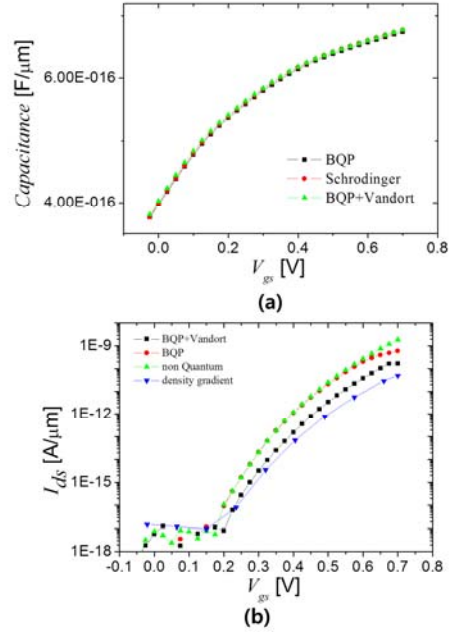


그림 2. (a) 커패시턴스-전압 특성, (b) 전류-전압 특성

IV. 결론

본 논문에서는 TCAD에서 제공하는 다양한 Quantum model을 Schrodinger와 Calibration 하여 사용한 경우와 비교하여 조사했다. BQP를 단독으로 사용했을 때, 구동전류만 약간 감소하는 특성이 나타났고, Vandort와 BQP를 함께 사용하였을 때, V_{onset} 과 SS, 구동전류에 변화가 나타났다. Density gradient 모델을 사용하였을 경우에도 Vandort와 BQP를 같이 사용한 경우와 같은 변화가 나타났으나, SS가 증가하여 구동전류가 약간 더 감소하는 특성이 나타났다.

참고문헌

[1]C. Y. Choi, B. G. Park, "Tunneling field-effect transistors (TFETs) with subthreshold swing (SS) less than 60 mV/dec," *IEEE Electron Device Letters*, Vol.28, pp.743-745, July 2007.
 [2]W. G. Vandenberghe, B. Soree, W. Magnus, "Field Induced quantum confinement in Indirect Semiconductors:Quantum mechanical and modified semiclassical model," in *proc. of IEEE SISPAD*, pp.271-274, October 2011.
 [3]G. B. Beneventi, E. Gnani, "Optimization of a

pocketed dual-metal-gate TFET by means of TCAD simulation accounting for quantization-induced band gap widening," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol.62, pp.44-51, December 2014.

[4]Sentaurus, vE-2011.09, Synopsys, 2011.

[5]ATLAS Users Manual, Silvaco Int., Santa Clara, CA, 2014.