

ITO 투명전극을 갖는 InP/InGaAs HPTs 모델링

장은숙, **최병건, *신주선, 성광수, 한교용

영남대학교 전자공학과 광전자 연구실 *옵토웨이, ** ETRI

전화 : 053-810-2499 / 핸드폰 : 016-526-6716

Modeling of InP/InGaAs HPT with ITO Transparent Emitter Contact

Eun Sook Jang, ** Byong Gun Choi, *Ju Sun Shin, Kyang Su Sung, Kyo Yong Han
Dept. of Electronics Yeungnam University, **ETRI, *Optoway
E-mail : iagree@netian.com

Abstract

InP/InGaAs heterojunction phototransistors (HPTs) with transparent emitter contacts were fabricated and characterized. Indium Tin Oxide was RF sputtered for the emitter contacts. By comparison with InP/InGaAs HBTs, the dc characteristics of InP/InGaAs HPTs demonstrated offset voltage due to ITO emitter contacts and similar common emitter current gain. The model parameters were extracted and a simple SPICE simulations were performed.

I. 서론

InP/InGaAs HPTs는 InGaAs의 좁은 밴드갭 (0.75eV)으로 인해 원거리 광통신 시스템의 응용이 가능해졌다. 초고속 전자소자 HBTs와 에피층 구조의 동일함으로 인해 집적화가 보다 쉽게 구현이 가능해졌다. 이종접합 포토트랜지스터(HPTs)의 경우 초고속 전자소자인 이종접합 쌍극성 트랜지스터(HBTs)와 동일한 에피층 구조를 가질 수 있으므로 집적화가 보다 쉽게 구현될 수 있다. 그러나, 광신호의 후방 입사 또는 광 도파관을 통한 측면 입사로 인해 광신호와 활성영역과의 정렬에 많은 어려움이 발생하게 된다.[1]-[4]

n-type InGaAs위에 Indium Tin Oxide(ITO)를 이용한 투명전극 에미터 HPTs가 제안되었으며. 그로 인해 광의 전방입사가 가능하게 되었다. 따라서 보다 쉽고 효율적인 패키징을 구현할 수 있다. II]-[3]

본 논문에서는 처음으로 n-type InP 에미터 위에 ITO 투명전극을 형성하여 InP/InGaAs HPTs를 제작하였다. II 부분에서는 같은 에피층구조를 가진 초고속 전자소자 InP/InGaAs HBTs를 동시에 제작하여, ITO 에미터 투명전극 InP/InGaAs HPTs 광 수신소자와 초고속 전자소자 HBTs의 공통 이미터 컬렉터 전류 - 전압 특성들을 측정하여 비교하였다. III 부분에서는 ITO 투명전극 InP/InGaAs HPTs의 전기적 특성을 측정된 Gummel-plot을 통해 소자 특성을 결정하는 모델 파라미터들을 기술하였다. HBTs를 위한 대신호 모델을 사용하여 추출된 모델 파라미터들을 SPICE 시뮬레이터에 적용하여 측정된 결과와 계산된 결과를 IV 부분에서 비교 분석하였으며, 마지막으로 V 부분에서 연구된 소자의 특성이 정의 내려졌다.

II. 디바이스 제작 및 실험적 결과

본 논문에서 제작된 InP/InGaAs HPTs 에피택셜층은 영국 ICS사에 의해 제작되었다. 그림. 1은 제작된 InP/InGaAs HPTs 에피층 구조를 보여준다. RF 스퍼

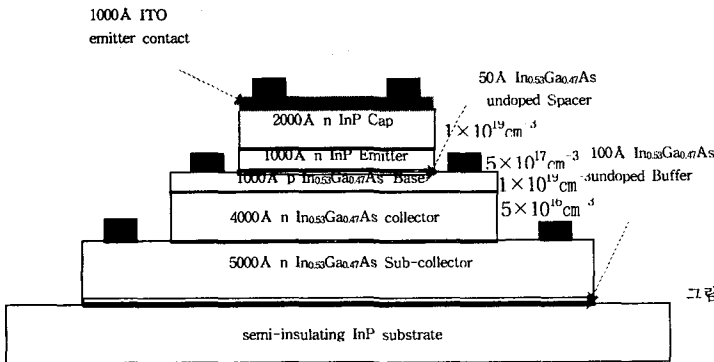


그림 1. ITO 투명전극을 갖는 InP/InGaAs HPTs의 에피택셜층 구조와 단면도

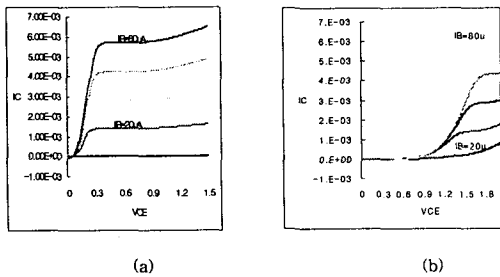


그림 2 (a), (b) InP/InGaAs HBTs와 ITO 투명전극을 갖는 InP/InGaAs HPTs의 DC 공통-이미터 콜렉터 전류-전압특성(IC-VCE) 특성 (IB= 0 μ A to 80 μ A step: 20 μ A)

트를 사용하여 InP/InGaAs HPTs n-type InP 에미터 위에 ITO 투명전극을 형성하였다. 소자특성은 HP-4155A 파라미터 분석기를 사용하여 직접적으로 측정되어졌다. 그림 2 (a) 와 (b)는 InP/InGaAs HBTs와 ITO 투명전극을 갖는 InP/InGaAs HPTs의 DC 공통-이미터 콜렉터 전류-전압특성(IC-VCE) 특성을 비교하여 보여주었다. 주입되는 베이스전류가 0 μ A에서 80 μ A까지 20 μ A의 단계별로 입력되어진다. 그림 2 (a), (b)는 IC-VCE 특성 곡선의 활성영역에서 콜렉터 출력 컨덕턴스($\Delta I_C / \Delta V_{CE}$)의 증가를 보여 주고 있으며, 콜렉터 전류가 포화되기 시작하는 콜렉터-에미터 전압(V_{CESAT})이 증가한 특성을 나타내고 있다. 그림 3 (a) 와 (b)은 n-type InP 에미터 위에 ITO 투명전극 형성 전과 후의 InP/InGaAs HPTs의 베이스-콜렉터 접합이 단락된 상태($V_{BC}=0$)에서 베이스-에미터 전압(V_{BE})의 함수로써 콜렉터 전류(I_C)와 베이스전류 (I_B)의 측정된 Gummel-plot을 보여주고 있다. 베이스-에미터 전압(V_{BE})이 증가 할수록 ITO 에미터 투명전극을 갖는 InP/InGaAs HPTs의 콜렉터 전류 (I_C)와 베이스 전류 (I_B)의 값에서 두드러진 감소 효과를 보여준다. 또한 역방향 모드에서 동작하는 트랜지스터의 Gummel-plot이 그림 4(a)와 (b)에서 보여지며,

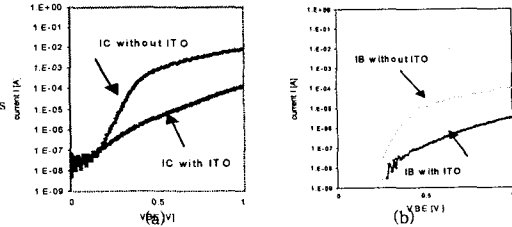


그림 3 (a), (b) n-type InP 에미터 위에 베이스-에미터 전압(V_{BE})의 함수로써 콜렉터 전류(I_C)와 베이스전류 (I_B)의 측정된 Gummel-plot (단, $V_{BC}=0$)

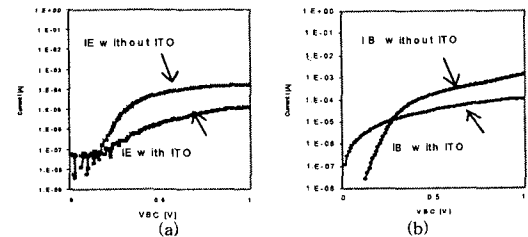


그림 4 (a), (b) n-type InP 에미터 위에 베이스-에미터 전압(V_{BC})의 함수로써 에미터 전류(I_C)와 베이스전류 (I_B)의 측정된 Gummel-plot (단, $V_{BE}=0$)

이것은 몇가지 모델 파라미터를 추출하는데 사용되어진다.

III. 모델링

InP/InGaAs HPTs 공통 이미터 DC 콜렉터 전류-전압 ($I_C - V_{CE}$) 특성을 계산하기 위한 모델을 기술한다. HPTs/HBTs의 $I_C - V_{CE}$ 특성을 위한 이론적 모델에서 나타난 파라미터들은 소자의 순방향과 역방향 활성 동작 모드에서 측정된 Gummel-plot으로부터 추출될 수 있다. 그 모델 파라미터들을 결정하기 위해 측정된 Gummel-plot이 어떻게 사용되었는지를 기술한 후, 추출된 파라미터들이 어떻게 $I_C - V_{CE}$ 특성을 계산하는데 사용되어졌는지를 보여준다. 본 연구에서는 확장된 Eber-Moll 방정식을 적용하여 HBTs와 비교하여 ITO 에미터 투명전극을 갖는 InP/InGaAs HPTs의 변화된 소자 파라미터 값을 추출하고자 한다.

A. 순방향 활성모드에서 Gummel plots

베이스와 콜렉터 접합이 단락된 상태($V_{BC}=0$) Gummel plot 측정에서 콜렉터 전류 I_C 와 베이스 전류

I_B 는 베이스와 에미터 전압(V_{BE})의 함수로써 측정되어진다. 베이스 전류(I_B)는 에미터와 베이스 접합의 가장자리와 벌크영역에서와, 베이스 중성영역의 표면과 벌크영역에서 재결합에 기여하는 전류의 두가지 성분으로 정의된다.[2] 베이스 전류(I_B)는 베이스 - 에미터 전압(V_{BE})에 의존하며, 아래와 같이 표현된다.

$$I_B = I_{SE} \exp\left(q \frac{V_{BE} - I_E R_E - I_B R_B}{N_E k T}\right) + \frac{I_S}{\beta_F} \exp\left(q \frac{V_{BE} - I_E R_E - I_B R_B}{N_E k T}\right) \quad (1)$$

재결합을 겪지 않은 전자들은 콜렉터 전류(I_C)로써 베이스 - 콜렉터 접합에 모이게 된다. 콜렉터 전류(I_C)

$$I_C = I_S \exp\left(q \frac{V_{BE} - I_E R_E - I_B R_B}{N_F k T}\right) \quad (2)$$

과 같이 표현된다.

베이스 에미터 접합의 공간 전하영역과 중성 베이스영역에서 발생하는 재결합과 관련된 상수들 I_{SE} , I_S , β_F , N_E , 그리고 N_F 는 $\log I_C, I_B - V_{BE}$ plot의 기울기로부터 추출해낸다. V_{BE} 의 값이 큰 영역에서 I_B 와 I_C 는 직렬 저항(R_E) 효과에 의해 더 이상 증가하지 못하게 된다.

B. 역방향 모드에서 Gummel plot

베이스와 에미터 접합이 단락상태에서($V_{BE}=0$) 에미터 전류(I_E)와 베이스 전류(I_B)는 베이스와 콜렉터에 순바이어스 전압(V_{BC})을 인가함으로써 측정한다. InP/InGaAs HPTs에서 베이스-콜렉터 접합의 순바이어스 전류(I_E)는 높게 도핑된 베이스로부터 콜렉터로 주입되는 정공에 의한 전류와 콜렉터에서 베이스로 주입되는 전자에 의한 전류의 성분으로 구성된다. 콜렉터에서 베이스로 주입되는 전자의 대부분은 베이스의 contact에 의해 모이게 된다. 그것은 베이스의 contact이 콜렉터의 접합과 근접해 있기 때문이다. 그로인해 베이스 영역에서 재결합 하지 않았거나 베이스 contact으로 모여지지 않은 전자들이 에미터 전류(I_E)로써 에미터에 모이게 된다. 이런 조건하에, $I_E \ll I_B$ 와 $I_B \sim I_C$ 라는 것을 가정할수 있다. V_{BC} 의 함수로써 I_E 아래와 같이 표현된다.

$$I_E = I_{SR} \exp\left(q \frac{V_{BC} - I_C R_C - I_B R_B}{N_R k T}\right) \quad (3)$$

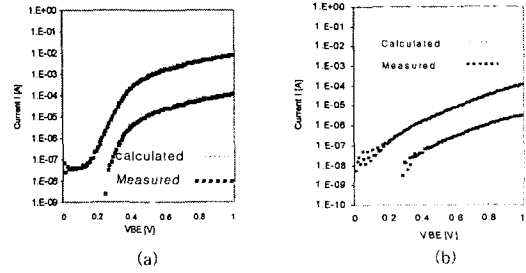


그림. 5 (a), (b) HBTs와 HPTs의 측정된 결과와 추출된 파라미터를 적용한 계산된 결과의 순방향 활성모드에서의 Gummel-plot (단, $V_{BC}=0$)

베이스 전류성분이 아래와 같이 표현되어질수 있다.

$$I_B = I_{SC} \exp\left(q \frac{V_{BC} - I_C R_C - I_B R_B}{N_C k T}\right) + \frac{I_S}{\beta_R} \exp\left(q \frac{V_{BC} - I_C R_C - I_B R_B}{N_R k T}\right) \quad (4)$$

N_R 는 낮은 V_{BC} 영역 $\log I_E - V_{BC}$ Gummel plot의 기울기와 $V_{BC}=0$ 인 지점으로부터 그 값이 결정된다. I_{SC} 와 N_C 의 값들은 $\log (I_B) - V_{BC}$ 곡선의 V_{BC} 선형적 영역에서 얻어질수 있다.

C. 콜렉터 전류- 전압 ($I_C - V_{CE}$) 특성

포화영역에서 콜렉터 전류 I_C 는

$$I_C = I_{C0} \exp\left(q \frac{V_{BE} - I_E R_E - I_B R_B}{N_F k T}\right) - I_{C1} \exp\left(q \frac{V_{BC} - I_C R_C - I_B R_B}{N_C k T}\right) - I_{C2} \exp\left(q \frac{V_{BC} - I_C R_C - I_B R_B}{N_R k T}\right) \quad (5)$$

로 표현될 수 있다. 포화영역에서 $I_C - V_{CE}$ 특성의 기울기는 N_F , N_E , N_R , 그리고 N_C 또한 R_E 와 R_C 에 의존한다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 논의

모델 파라미터는 Modeling에서 기술된 추출과정으로부터 InP/InGaAs HBTs와 n - type InP 에미터 위에 ITO 투명전극 갖는 InP/InGaAs HPTs 의 측정된 결과에서 직접적으로 추출되어졌다. 그림. 5 (a)와 (b)는 HBTs와 HPTs의 측정된 결과와 추출된 파라미터를 적용한 계산된 결과의 순방향 활성모드에서의 Gummel-plot을 비교하여 보여주고있다. 계산된 결과

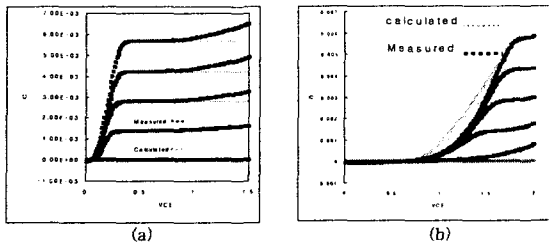


그림 6 (a), (b) InP/InGaAs HBT와 ITO 투명전극을 갖는 InP/InGaAs HPTs의 계산된 결과와 측정된 결과의 DC 공통-에미터 전류-전압특성(IC-VCE) 특성곡선 (IB= 0μA to 80μA step: 20μA)

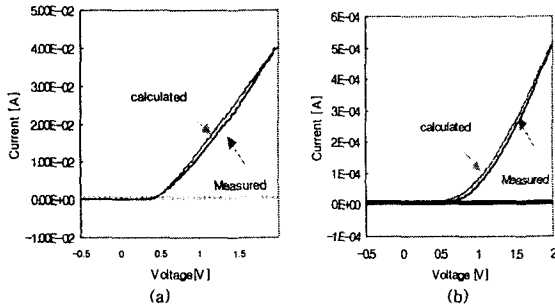


그림 7 (a), (b) InP/InGaAs HBT/HPT의 에미터-베이스 접합의 계산된 결과와 측정된 결과의 turn-on 전압과 전류 특성

와 실험적 결과가 거의 일치함을 나타낸다. 그림 6 (a), (b) 은 InP/InGaAs HBTs와 ITO 투명전극을 갖는 InP/InGaAs HPTs의 공통 에미터 콜렉터 전류 - 전압특성 측정된 결과와 계산된 결과를 비교하여 보여 주고 있다. 각각 베이스 전류가 60μA인 HBTs의 V_{CE}가 0.5V에서 전류이득은 85, HPT의 V_{CE}가 1.8V에서 전류이득 72를 나타내고 있다. 표. 1 는 ITO를 착후 소자의 NE, NC, NF 그리고 RE의 값에서 큰 변화를 보여주고있다. 이들 파라미터 값의 큰 변화의 요인으로 n형 InP 에미터위에 ITO 증착됨으로써 ITO 벌크 저항과 ITO와 에미터 계면사이에 형성된 직렬 저항의 영향으로 생각할수 있다. 이로인해 포화전압이 증가한 것을 알 수 있었으며, [3] 그림 7(a)와(b)은 에미터 베이스 접합 turn-on 전압이 증가하였음을 보여 주고 있으며, 그것은 ITO 와 n+ InP 계면에 정류성 전위 장벽이 형성됨으로써 HPTs의 오프셋 전압을 증가시키는 원인으로 작용하였다고 생각된다.

V. 결론

본 논문은 처음으로 넓은 밴드갭 n-type InP 에미터 위에 ITO 투명 전극 갖는 InP/InGaAs HPTs와 동시에 동일한 에피층 구조를 갖는 HBTs를 제작하여 두 소자의 전기적 특성을 측정하고 비교 분석하였다. ITO 증착 전과후 HBTs/HPTs의 콜렉터 전류- 전압특성을

계산하기 위해 단순화된 모델을 사용하였다. 모델 파라미터들이 순방향 모드와 역방향 모드에서 측정된 Gummel-plot으로부터 추출되었다. n-type InP 에미터 위에 ITO가 증착됨으로써 에미터와 투명전극사이에 정류성 접촉이 형성되므로 인한 HPTs 오프셋 전압 (V_{COffset})의 증가와 ITO의 저항으로 인한 콜렉터 포화 전압(V_{CEsat})의 증가를 보여주었다.

본 연구는 광전집적회로의 구현에 있어 소자 에피층 구조의 단순화와 ITO 투명전극을 이용한 InP/InGaAs HPTs를 보다 쉽게 구현할 수 있는 바탕이 되리라 생각된다.

참고문헌

[1] A. Bandyopadhyay, S. Subramanian, Member, IEEE, S. Chandrasekhar, Member, IEEE, Andrew G. Dentai, Fellow, IEEE, and Stephen M. Goodnick, Senior Member, IEEE "Degradation of DC characteristics of InGaAs/InP Single Hetrojunction Bipolar Transistors Under Electron Irradiation" IEEE Transactions on Electron Devices. Vol. 46 No. 5 May 1999

[2] Shabbir A. Bashar and Ali A. Rezadeh, Member, IEEE "Optically Transparent ITO Emitter Contacts in the Fabrication of InP/InGaAs HPT's". IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol 43, No. 9, September 1995

[3] A. Salehi "Effects of thermal treatment in ITO/GaAs contacts" Electronics Letters 20th August 1998 Vol. 34 No. 17

dc Parameters:	HBT without ITO emitter contact	IPT with ITO emitter contact
IS	1.0475E-10	1.6E-8
NF	1.05	3.7
NR	10	1.0
ISE	2.27E-9	1.6E-8
NE	21	8.2
ISC	3.1E-8	1.3E-8
NC	1.65	6.497
BF	7437	76.5
BR	0.147	0.112
REE	6	1.030K
FCC	6	6
RBB	0.121	0.021

DA (base-emitter junction diode) IS=1.83E-7 ISR=2.2E-8 Rs=30 N=2.11 NR=1.6

DB (between ITO and n+ type InP emitter contact) IS=5E-9 ISR=1E-6 RS=1.36k N=4.7 NR=4.7

표 1 . 측정된 InP/InGaAs HBTs와 ITO 에미터 투명전극을 갖는 InP/InGaAs HPTs의 모델 파라미터