

광학적 투명성을 가진 ITO를 에미터 전극으로 사용한 InP/InGaAs HPT's의 DC 특성 분석

강민수, 한 교용

영남대학교 전자공학과

전화 : 053-810-1524 / PCS : 016-815-9063

DC Characteristics of InP/InGaAs HPT's with an Optically Transparent ITO Emitter electrode

Min-Su Kang, Kyo-Yong Han

Dept. of Electronics Yeungnam University

E-mail : kangms1973@hanmail.net

Abstract

InP/InGaAs Heterojunction phototransistors(HPT's) with an optically transparent ITO emitter electrode were fabricated and characterized. At the same time, heterojunction transistors(HBT's) having the same device layout were fabricated. By comparison with InP/InGaAs HBT's, the dc characteristics of InP/InGaAs HPT's showed the similar electrical characteristics of HBT's. the model parameters of the device were extracted and compared.

n⁺-type InGaAs위에 ITO를 이용한 투명전극 에미터 HPT's가 제안되었다.[3]

본 논문에서는 n⁺-type InP 에미터 위에 ITO 투명전극을 갖는 InP/InGaAs HPT's를 제작하여, 그 특성을 분석하였다. HBT's와의 집적화를 위해 동일한 에피층구조를 가진 InP/InGaAs HBT's를 동시에 제작하여 각각의 전기적 특성을 측정하고 비교하였다. 전기적 특성을 비교 분석하기 위해 측정된 순방향 활성모드에서 Gummel plot과 역방향 모드에서 Gummel plot으로부터 모델 파라미터를 추출하여 HBT's와 HPT's를 비교 분석하였다.

I. 서론

InP/InGaAs Heterojunction Bipolar Transistor (HBT)는 높은 이동도, 낮은 turn on 전압, 그리고 뛰어난 cut off 주파수 특성 때문에 마이크로파 회로 분야에서 많이 연구되어 왔다.[1] Heterojunction photo transistor(HPT)는 InP와 lattice match 되는 InGaAs(Eg=0.75) 베이스의 낮은 밴드갭의 특성 때문에 장파장(1.3um-1.55um)의 광 수신 소자로 이용이 가능하고, 단일 InP 기판 위에 증폭기로 사용되는 HBT's와 광 수신소자로 사용되는 HPT's를 집적화할 수가 있다. 광 수신소자 HPT's의 성능은 광 신호와 광섬유와의 패키징에 의존한다. HPT's의 경우 광 신호는 후방입사 또는 광 도파관을 통한 측면 입사가 이루어져 왔다.[2] 그러나 광 신호와 소자 활성 영역과의 정렬에 많은 문제점들이 발생하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해 전방입사를 가능하게 하는

II. 실험 및 분석

2.1 디바이스 제작

실험에 사용되어진 InP/InGaAs HPT's 에피택셜 층 웨이퍼는 영국 ICS사에 의해 제작되었다. Fig 1.은 InP/InGaAs HPT's의 에피택셜층 구조를 보여준다. HPT's 제작은 먼저 ITO와 n⁺type InP 에미터 층의 옴 접촉 형성을 위하여 Indium을 evaporator 로 n⁺-type InP 표면에 100Å 진공 증착 하였고, RF 스퍼터를 사용하여 n⁺type InP 에미터 위에 ITO 투명전극을 형성 하였다. 에미터, 베이스, 그리고 컬렉트 영역을 형성하기 위해, 에미터의 InP는 InGaAs와 선택적 에칭 용액인 HCL:H₃PO₄(1:1)를 사용하여 메사에칭을 하였다. 베이스와 컬렉트 영역의 InGaAs는 H₂SO₄

n-type InP, 1x e19, 2000Å Cap
n-type InP, 5x e17, 1000Å Emitter
Undoped In _{0.53} Ga _{0.47} As, 50Å Spacer
p-type In _{0.53} Ga _{0.47} As, 1x e19, 1000Å Base
n-type In _{0.53} Ga _{0.47} As, 5x e16 4000Å Collector
n-type In _{0.53} Ga _{0.47} As, 1x e19 5000Å Sub-collector
Undoped In _{0.53} Ga _{0.47} As 100Å Buffer
S-I InP Substrate

Fig 1. InP/InGaAs HBT/HPT 의 에피택셜층 구조

H₂O₂:H₂O(1:8:100) 용액을 사용하여 습식 메사 에칭이 이루어진다. 메사 에칭이 모두 끝나면, 에미터, 베이스 그리고 콜렉터의 전극형성을 위해 에미터와 콜렉터는 Au를 베이스에는 AuZn를 증착하였다. HBT's 제작은 HPT's의 Indium 진공증착과 ITO sputtering 공정을 제외한 모든 공정이 HPT's와 동일하게 이루어졌다. 제작된 HBT's 와 HPT's의 전기적 특성을 비교 분석하기 위해 HP-4155A 파라미터 분석기를 사용하였다.

2.2 DC 특성 분석

Fig.2는 InP/InGaAs HBT's와 ITO를 에미터 투명 전극으로 갖는 InP/InGaAs HPT's의 DC 공통 에미터-콜렉터 전류-전압특성(I_c-V_{ce}) 특성을 비교하여 보여주었다. 주입되는 베이스전류는 0μA에서 40μA까지 10μA의 단계별로 입력되어진다. Fig 2.에서 HBT's와 HPT's의 옴셋 전압이 0.04V, 전류이득이 0.6V에서 71 로 동일한 전류-전압 특성을 보여 주었다. HBT's 와 ITO를 에미터를 투명전극으로 갖는 HPT's 의 구체적인 DC특성 분석에 대한 기술은 2.3 절에서 설명하였다.

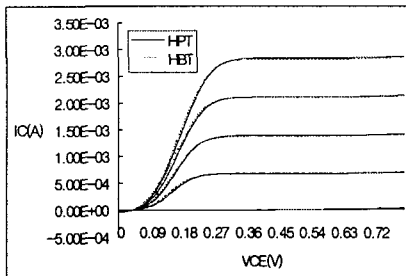


Fig.2 HBT's(점선) HPT's(실선) 의 공통 에미터 콜렉터 전류-전압 (I_c-V_{ce}) 특성

2.3 파라미터 추출

InP/InGaAs HPT's의 공통 에미터 DC 콜렉터 전류-전압 특성을 구체적으로 기술하기 위해, 본 연구에서는 확장된 Ebers-Moll 방정식을 적용하여 HBT's 와 HPT's의 전류 특성을 비교 분석하였다. 순방향 활성모드 Gummel-plots 측정에서는 베이스와 콜렉터 접합이 단락된 상태(V_{BC}=0)에서 베이스와 에미터 전압(V_{BE})의 함수로써 콜렉트 전류 IC와 베이스 전류 IB를 측정한다. 베이스 전류에 기여하는 전류성분은 에미터로부터 주입된 전자들이 에미터와 베이스의 이종접합을 통과할 때, 에미터와 베이스 접합의 공간전하영역에서와 접합의 가장자리에서 겪는 재결합의 요소와 베이스 중성영역과 베이스 표면에서 겪게되는 재결합 요소의 두가지로 정의되어 지며 식 (1)로 표현한다.

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

재결합을 겪지 않은 전자들은 콜렉터 전류(IC)로써 베이스-콜렉터 접합에 모이게 된다. 콜렉트 전류(IC)는 식 (2)로 표현된다.

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

위의 전류 방정식과 관련된 N_F, N_E는 낮은 전압영역에서 log IC, IB -V_{BE} plot의 기울기로부터 추출한다. I_{SE}와 I_S는 log (IC), (IB) 측과 V_{BE}=0 인 값에 외삽된 선에 의해 결정한다.

Fig 3.의 (a)는 InP/InGaAs HBT's 와 ITO를 투명전극으로 사용한 InP/InGaAs HPT's의 순방향 활성모드에서 측정된 Gummel plot이다.

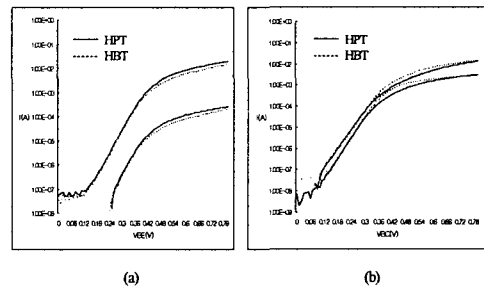


Fig 3. InP/InGaAs HBT's(점선) / HPT's(실선) 의 순방향 활성 모드에서 측정된 Gummel plot (a) 과 역방향 모드에서 측정된 Gummel plot(b)

광학적 투명성을 가진 ITO를 에미터 전극으로 사용한 InP/InGaAs HPT's의 DC 특성 분석

Fig 3.(a)에서 N_F , N_E 파라미터가 추출되어 지는 낮은 전압 영역에서의 HBT/HPT의 콜렉트 전류(IC), 베이스 전류(IB)의 기울기가 유사한 경향을 띄고 있다. 또한 에미터 저항(RE)을 결정짓는 높은 전압영역에서 전류의 흐름이 거의 동일하였다.

역방향 모드에서 Gummel plot 측정에서는 베이스와 에미터 접합이 단락된 상태($V_{BE}=0$)에서 베이스와 콜렉터 전압(V_{BC}) 함수로써 에미터 전류(IE)와 베이스 전류(IB)를 측정한다. 베이스-콜렉트 접합의 순바이어스된 전류는 주로 고농도로 도핑된 베이스에서 콜렉트로 주입되는 정공에 의한 것이다. 콜렉트에서 베이스로 주입되는 전자가 베이스-콜렉트 접합의 순바이어스 전류에 기여하는 바는 극히 작다. 콜렉트에서 베이스로 주입되어지는 대부분의 전자는 베이스 접촉에 의해 모인다. 그로 인해 베이스 접촉에 모여지지 않거나 베이스 영역에서 재결합 하지 않은 전자들이 에미터에 모여 에미터 전류(IE)를 형성하게 된다. 베이스 콜렉트 전압의 함수로써 IE는 식(3)가 같이 표현된다.

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

베이스 전류 성분은 식(4) 표현되었다.

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

Fig 3.의 (b)는 InP/InGaAs HBT's와 ITO를 투명전극으로 사용한 InP/InGaAs HPT's의 역방향 모드에서 측정된 Gummel plot이다. Fig 3.의 (b)에서 HBT's와 HPT's 전류 특성곡선이 거의 동일한 경향을 띄고 있는 것을 알수 있다. 측정된 순방향 활성모드와 역방향 모드에서 Gummel plot에서 추출된 모델 파라미터 값은 III절에서 다루었다.

III. 결과 및 토의

2.3절에서 설명되어진 모델 파라미터 추출 과정은 InP/InGaAs HBT's와 ITO를 투명전극으로 하는 InP/InGaAs HPT's의 DC 특성을 분석하는데 사용되어진다.

Table 1.는 순방향 모드 Gummel plot 과 역방향 모드 Gummel plot에서 추출되어진 InP/InGaAs HBT's와 ITO를 투명전극으로 하는 InP/InGaAs HPT's 모델 파라미터이다. 순방향 활성모드의 측정

DC 파라미터	InP/GaAs HBT's	ITO를 투명전극으로 한 InP/InGaAs HPT's
I_S	4.38E-10	4.73E-10
N_F	1.05	1.047
N_R	1.02	1.05
I_{SE}	6.72E-11	8.52E-11
N_E	1.62	1.65
I_{SC}	1.75E-9	6.91E-9
N_C	1.65	1.66
β_F	74	74
β_R	0.55	0.461
R_E	7	6.4
R_B	5	4.6
R_C	4	4.4

Table 1. HBT's 와 ITO를 투명전극으로 하는 HPT's의 DC 파라미터

된 Gummel-plots에서 InP/InGaAs HBT's/HPT's의 베이스-에미터 접합에 관련된 모델 파라미터들 I_{SE} , I_S , N_E , N_F , 그리고 R_B 와 R_E 가 추출되었다. 역방향 활성모드에서는 베이스와 콜렉트에 관련된 모델 파라미터 I_{SR} , I_{SC} , N_R , N_C 그리고 R_C 를 추출했다.

Fig 5. 는 Table 1. 의 모델 파라미터를 적용한 계산된 결과와 측정된 결과의 HBT's/HPT's의 순방향 활성모드에서의 Gummel-plot를 비교하여 보여주고 있다. HBT's/HPT's의 N_F 값은 이상적인 값 1에 가까운 값을 가졌고 베이스 에미터 누설 방출계수 N_E 는 모두 1.6에 가까운 값을 가졌다. N_E 는 동종 접합의 경우 1의 값을 가지나, 일반적인 이종 접합 HPT's/HBT's 소자의 경우 1.4에서 2의 값을 가지게 된다.[4]

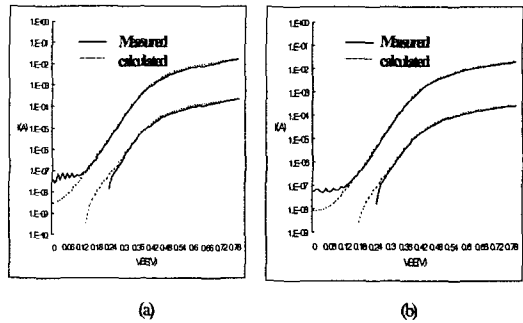


Fig 5. InP/InGaAs HBT (a) 와 HPT (b)의 순방향 활성모드에서 콜렉터 전류(IC)와 베이스 전류(IB)의 측정된 결과와 계산된 Gummel plots (단, $V_{BE}=0$)

Fig 6.는 HBT's/HPT's의 역방향 모드 Gummel plot에서 계산된 결과와 측정된 결과를 비교하여 보여 주고 있다. 역방향 모드 Gummel plot에서 추출된 NR값은 HBT/HPT 모두 이상적인 값 1에 가까운 값을 가지고 있었다. 베이스-컬렉트 누설 방출 계수, NC값은 두 소자 모두 1.6에 가까운 값을 가졌다. 이 값은 이중 접합 HPT/HBT 소자의 경우 허용된 범위안에 있는 값이다.

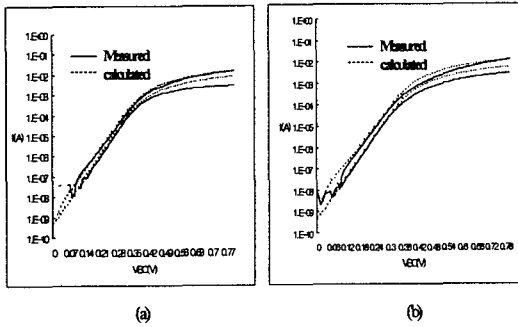


Fig 6. InP/InGaAs HBT (a) 와 HPT (b) 의 역방향 모드에서 베이스 전류(IB) 와 에미터 전류(IE) 의 측정된 결과 와 계산된 Gummel plots (단 , VBE=0)

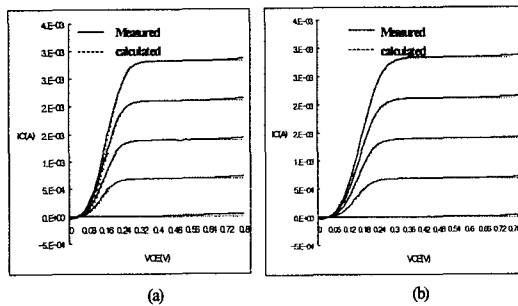


Fig 7. InP/InGaAs HBT (a) 와 HPT (b) 의 컬렉터 전류-전압 특성곡선의 측정된 결과와 계산된 결과 .

추출된 모델 파라미터를 적용하여 HBT's/HPT's 의 공통 에미터-컬렉트 전류-전압특성을 SPICE 모델 시뮬레이터를 통하여 측정된 값과 비교하였다. Fig 7. 은 HBT's/HPT's의 측정된 공통 에미터-컬렉트 전류 전압 특성과 계산된 값을 비교한 것이다. 계산된 결과와 측정된 결과가 거의 동일함을 알 수 있다. 추출된 HPT's의 모델 파라미터 값은 HBT's와 거의 동일하였다. 본 논문에서 제작된 HPT's는 HBT's와 거의 동일한 DC특성을 나타내었다. 이것은 ITO와 n+type InP 에미터와 음 접촉성이 이루어진 결과로 볼 수 있다.

IV. 결론

n+-type InP 에미터 위에 ITO 투명전극을 갖는 InP/InGaAs HPT's와 동시에 동일한 에피층 구조를 갖는 HBT's를 제작하여 두소자의 전기적 특성을 측정하고, 비교 분석하였다. 측정된 순방향 활성모드의 Gummel plot 가 역방향 모드의 Gummel plot으로부터, Ebers-Moll의 확장된 방정식을 이용하여 HBT's/HPT's의 모델 파라미터를 추출하였다. HBT's와 HPT's의 오픈 전압이 0.04V, 에미터 저항 (RE)의 값이 7Ω에 가까운 값을 가졌다. 전체적인 DC 특성이 HBT's와 HPT's 가 거의 동일한 경향을 나타내고 있는 것을 알 수 있었다. 이러한 특성을 갖는 ITO를 투명전극으로 한 HPT's는 초고속 전자소자인 HBT's와 집적화에 유리하리라 생각된다.

참고문헌

- [1] Micheal Y. Frankel et al, "Analysis of ultrafast photo carrier transport in AllInAs-GaInAs heterojunction bipolar transistor", IEEE J. Quantum Electron.,Vol. 31, no. 2, pp278-285, February(1995)
- [2] Fritz Schuermeyer, Peter J. Zampardi, and Peter M. Asbeck. "InP-Based HBTs For Optical Signal Detection", Electrochemical Society Proceedings Volume 98-2.
- [3] Shabbir A. Bashar, and Ali A. Rezazadeh , Memer, IEEE. "Optically Transparent ITO Emitter contacts in the Fabrication of InP/InGaAs HPTs", IEEE Transactions On Microwave Theory and Techniques. Vol. 43, No. 9, September (1995)
- [4] Madjid E. Hafizi, Clarence R. Crowell, and Matthew E. Grupen, "The DC Characteristics of GaAs/AlGaAs Heterojunction Bipolar Transistors with Application to Device Modeling", IEEE Transactions On electm Devices, Vol. 37, No. 10, October (1990)