

Fabrication of InP/InGaAs HPT's with ITO Emitter Contacts

姜旻秀* · 韓教龍**
(Min-Su Kang · Kyo-Yong Han)

Abstract - In this paper, Heterojunction phototransistors(HPT's) with an optically transparent ITO emitter contacts were fabricated. The ITO ohmic contacts were realized by employing thin indium layer between the ITO and n⁻-InP layers. The ITO contact was annealed at 250°C. The specific contact resistance of about $6.6 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}^2$ was measured by use of the transmission line model (TLM). Heterojunction bipolar transistors (HBT's) having the same device layout were fabricated to compare with HPT's. The DC characteristics of the InP/InGaAs HPT showed the similar electrical characteristics of the HBT. Emitter contact resistance(R_E) of about 6.4Ω was extracted, which was very similar to that of the HBT. The optical characteristics of HPT's were generated by illuminating the device with light from 1.3 μm light. It showed that HPT's can be controlled optically.

Key Words : HPT, ITO, ohmic contact, TLM, HBT

1. 서 론

InP/InGaAs Heterojunction Bipolar Transistor(HBT)는 높은 이동도, 낮은 턴온(turn-on) 전압, 그리고 높은 차단주파수 특성에 의해 마이크로파 회로분야에서 많이 연구되어 왔다.[1-3] 반면에 InP/InGaAs heterojunction photo transistor (HPT)는 InP와 lattice match 되는 InGaAs($E_g=0.75$) 베이스의 낮은 밴드갭의 특성 때문에, 광통신에 유효한 파장대(1.3 μm -1.55 μm)의 광수신 소자로 이용되고, 또한 단일 InP 기판 위에 HBT와 집적화의 가능성이 매우 높기 때문에 많은 연구가 진행되어 왔다.[4][5]

HPT의 경우 광신호는 후방입사 또는 광 도파관을 통한 측면입사가 이루어져 왔다.[6][7] 그러나 후방입사는 광신호와 소자 활성영역과의 정렬이 어렵고, 측면입사의 경우 에피구조가 보다 복잡하여 지고, 결정단면 형성 및 패키징이 어렵게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 전방입사를 가능하게 하는 HPT가 요구되었고, 투명전극인 ITO를 에미터 전극으로 이용하는 HPT가 제안되었다.[8][9] 투명 ITO 에미터 전극은 n⁻-InGaAs 에미터캡층 위에 ITO를 증착시켜 제작되었고, InGaAs층은 ITO와의 음접촉을 보다 쉽게 구현하기 위해 사용되었다. 그러나 InGaAs 층은 입사되는 광신호를 흡수하고, 또한 에피구조 및 제작공정을 보다 복잡하게 하는 단점이 있다.

본 논문에서는 보다 단순한 에피구조 및 제작공정을 위해

InGaAs 에미터캡층 대신에 n⁻-InP 에미터캡층 위에 ITO 투명전극을 형성하는 공정을 개발하고, InP/InGaAs HPT를 제작, 그 특성을 분석하였다. ITO와 n⁻-InP간의 음접촉 형성을 위하여, InP 위에 인듐을 진공증착한 후, ITO를 RF 스퍼터링 공정을 이용하여 증착하였다. 열처리 후 투명전극의 비접촉 저항(specific contact resistance)은 TLM 방법으로 측정하였다. 제작된 HPT는 HP4155A 반도체 파라미터 분석기를 이용하여 전기적 특성을 측정, 분석하였고, 1.3 μm 파장의 레이저 다이오드를 이용하여 빛을 전방입사 함으로써 광학적 특성을 측정하였다. 또한 동일한 조건하에서 ITO대신 Au을 에미터 전극으로 사용하는 HBT를 제작하여, ITO 투명전극의 효과를 비교하였다.

2. 실험

2.1 ITO 증착 및 TLM 제작

ITO는 RF 스퍼터링 방법으로 증착되었고, 타겟은 순도가 99.99%인 In₂O₃(90)SnO₂(10)wt%를 사용하였으며, 챔버의 베이스 압력을 5×10^{-5} torr로 감소시킨 후, Ar/H₂ 혼합가스를 주입하여 챔버압력을 5×10^{-3} torr로 유지시켰다. 13.56 MHz의 RF-제너레이터에 24W의 파워를 인가한 후, 공정압력을 7×10^{-3} torr로 유지하면서, 상온에서 40분 동안 약 1000Å의 ITO를 증착하였다.

TLM 패턴은 n⁻-InP 표면 위에 ITO만을 증착한 것과 ITO 증착 전에 인듐을 열진공증착한 것으로 제작되었고, 사용된 웨이퍼는 반질연 기판 위에 3000Å 두께의 n-InP($N_d=1 \times 10^{17}$)층과 2000Å 두께의 n⁻-InP($N_d=1 \times 10^{19}$)층으로 에피성장한 것을 사용하였다.

* LG電子 技術院 유기EL 事業擔當 모델開發그룹 在職

** 正 會 員 : 嶺南大學校 電子情報工學部 副教授 · 工博

接受日字 : 2002年 2月 20日

最終完了 : 2002年 9月 5日

2.2 디바이스 제작

실험에 사용되어진 InP/InGaAs HPT 에피텍셀 웨이퍼는 영국 ICS(Integrated Compound Semiconductor, Ltd) 사에 의해 제작되었다. 결정방향 (100)인 S.I InP 기판 위에, 100Å의 undoped InGaAs 버퍼층, 5000Å의 $n^+(N_d=1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3})$ InGaAs 서브콜렉터층, 4000Å의 $n(N_d=5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3})$ InGaAs 콜렉터층, 1000Å의 $p(N_a=5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3})$ InGaAs 베이스층, 1000Å의 n -type($N_d=5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$) InP 에미터층, 그리고 2000Å의 $n^+(N_d=1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3})$ InP 에미터캡층이 차례대로 성장되었다. 그림 1은 InP/InGaAs HPT의 에피텍셀층 구조를 보여준다.

n-type InP, 1×10^{19} , 2000Å Cap
n-type InP, 5×10^{17} , 1000Å Emitter
Undoped $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, 50Å Spacer
p-type $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, 5×10^{19} , 1000Å Base
n-type $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, 5×10^{16} , 4000Å Collector
n-type $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, 1×10^{19} , 5000Å Sub-collector
Undoped $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 100Å Buffer
S-I InP Substrate

그림 1 InP/InGaAs HBT/HPT의 에피텍셀층 구조
Fig. 1 Epitaxial profile of an InP/InGaAs HBT/HPT

HPT 제작공정은 먼저, 웨이퍼 표면을 유기 용매(TCE, 아세톤, 메탄올)를 이용하여 세정한다. InP 표면을 $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ (1:2:1) 혼합용액에 넣어 약 100Å 정도 에칭하고, 표면의 자연 산화막을 제거하기 위해 $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}$ 를 1:15로 혼합된 용액에 10초간 담근다. ITO를 에미터에 증착하기 전에 ITO와 InP 에미터층과의 음 접촉 형성을 위하여 열진공증착기(Thermal evaporator)로 100Å 두께의 인듐을 n^+ -InP 표면에 진공증착하였다. 약 1000Å 두께의 ITO는 RF 스퍼터링 방법을 사용하여, Ar/ H_2 분위기에서 40분간 증착하였다. 포토리소그래피 공정 후, HF: H_2O (1:1000) 용액에 3분동안 에칭하여, ITO 전극 패턴을 형성하였다. 에미터, 베이스, 그리고 콜렉터 영역은 선택적 메사 에칭을 이용하여 제작되었다. InP는 HCl: H_3PO_4 (1:1) 용액에 45초간 에칭을 하였고, InGaAs는 $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (1:8:100) 용액을 사용하여 베이스와 콜렉터 각각 90초간 에칭하였다. 메사 에칭이 모두 끝나면, 에미터, 베이스 그리고 콜렉터의 전극형성을 위해 에미터와 콜렉트는 Au, 베이스에는 AuZn를 열진공증착기로 각각 1000Å 정도 증착하였다. lift-off 공정후, N_2 분위기, 250°C에서 10분간 열처리를 하였다. 이 경우 에미터의 금속전극은 에미터 전극을 프로브(probe)하기 위해 증착되어진다. 그리고 제작된 HPT의 전기적 특성을 비교하기 위해, 동일한 조건하에서 ITO 대신 Au를 에미터 전극으로 사용하는 HBT를 제

작하였다. HBT 제작은 HPT의 인듐 진공증착과 ITO 스퍼터링 공정을 제외한 모든 공정이 HPT와 동일하게 이루어졌다. 그림 2는 InP/InGaAs HPT의 제작 공정을 개략적으로 보여주고 있다. 제작된 HBT와 HPT의 전기적 특성측정은 프로브스테이션에서 HP-4155A 파라미터 분석기를 사용하여 이루어졌다.

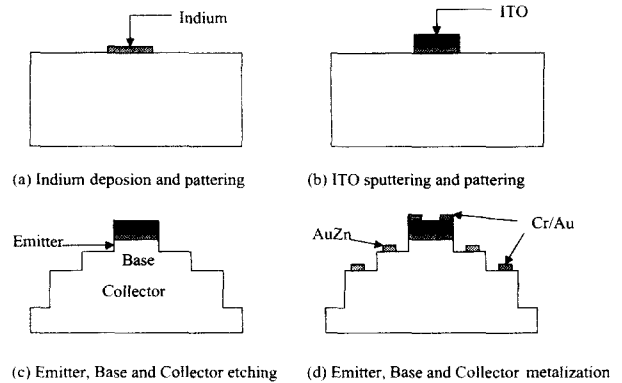


그림 2 ITO를 에미터 전극으로 사용한 HPT's 제작 공정의 개략도

Fig. 2 Schematic fabrication sequence for an InP/InGaAs HPT

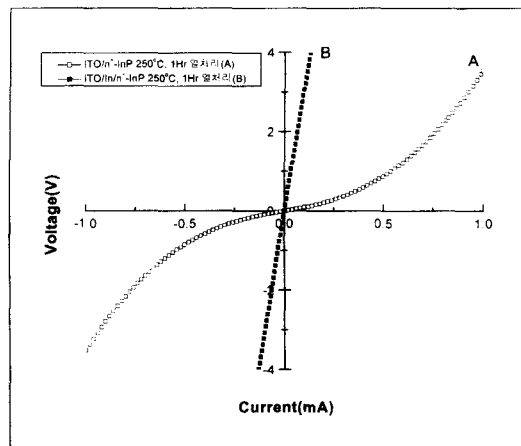


그림 3 ITO와 n^+ -InP의 전류-전압 특성 곡선
Fig. 3 I-V characteristics of the ITO contacts on n^+ -InP

3. 결과 및 토의

3.1 ITO와 n^+ -InP 계면의 음 접촉 형성

그림 3의 A곡선은 TLM 패턴에서 n^+ -InP 위에 ITO만 증착하고 열처리 했을때의 ITO와 n^+ -InP간의 전류-전압특성을 나타낸 것으로 ITO와 n^+ -InP간의 음 접촉은 열처리 공정만으로 형성시킬 수 없음을 알 수 있다. 그래서 ITO와 n^+ -InP 계면에 인듐을 100Å 증착하고 250°C에서 열처리하여 전류-전압 특성을 측정하였다. 그림 3의 B곡선은 ITO와 n^+ -InP 계면에 인듐을 증착하고 열처리했을 때의 ITO와 n^+ -InP간의

전류-전압 특성을 나타낸 것으로 선형적인 전류-전압 특성을 나타내었다. 그리고 비접촉 저항은 TLM 패턴에서 거리에 대한 전체 저항은 측정용 통해 계산한 결과 약 $6.6 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}^2$ 을 얻을 수 있었다. 그림 4는 TLM 패턴에서 거리에 대한 전체 저항을 측정된 것을 나타낸 것이다.

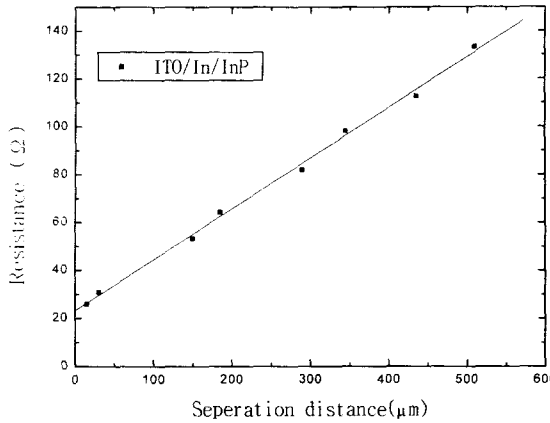


그림 4 250°C furnace 열처리 후 ITO/In/n⁺-InP 접촉에 의한 TLM 결과

Fig. 4 TLM results of an ITO/In/n⁺-InP contact after ITO thermal annealing at 250°C

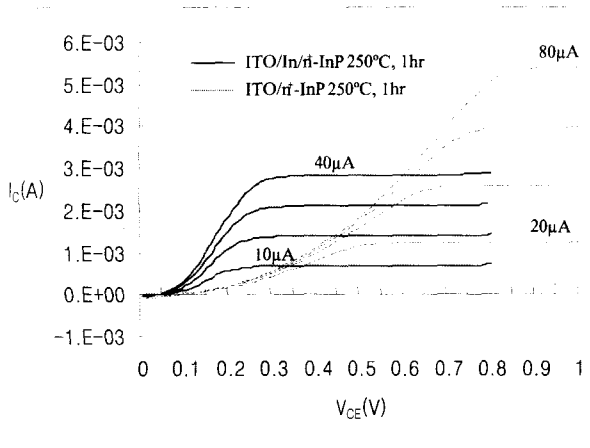


그림 5 InP/InGaAs HPT's 의 측정된 DC 공통 에미터-컬렉터 전류-전압 특성 곡선

Fig. 5 Collector I-V characteristics of an InP/InGaAs HPT

3.2 InP/InGaAs HPT 특성 분석

그림 5는 ITO를 에미터 투명전극으로 갖는 InP/InGaAs HPT의 DC 공통 에미터-컬렉터 전류-전압 특성을 나타낸다. 점선은 ITO를 증착하고 열처리하여 에미터 투명전극을 형성한 HPT의 특성곡선이며, 실선은 ITO와 n⁺-InP 사이에 인듐을 증착하고 열처리하여 제작된 HPT의 특성곡선이다. 점선의 경우 포화영역의 기울기가 매우 완만하여, ITO와 n⁺-InP 에미터 사이에 접촉저항이 상대적으로 매우 큰 Schottky 특성의 접촉이 형성되었음을 알 수 있다. 반면에 실선의 경우, 포화영역에서의 기울기가 크게 개선되었고, 활성영역이 보다

낮은 전압에서 시작되는 것을 알 수 있다. 그 이유는 부가적인 인듐증착 공정으로 인해 상대적으로 우수한 음 접촉이 형성되었기 때문이다. 인듐 증착공정이 ITO와 n⁺-InP 에미터 사이에 접촉저항 감소에 기여한 역할은 현재까지 명확하게 제시되지 못하였으나, 인듐박막이 열처리에 의해 인듐산화막으로 변화하는 과정에서 주석의 확산이 보다 효과적으로 이루어져, 보다 높은 전자농도를 갖는 ITO가 ITO/InP 계면에 생성되었기 때문이라 생각된다.

제작된 디바이스들의 에미터 직렬저항 값을 구하기 위해 그림 6과 같이 전압을 인가하고, 순방향 활성모드에서의 Gummel plots를 측정하였다. 측정된 순방향 활성모드에서의 Gummel plots은 그림 7에서 보여주고 있다. 점선은 ITO를 증착하고 열처리하여 에미터 투명전극을 형성한 HPT, 그리고 실선은 ITO와 n⁺-InP 사이에 인듐을 증착하고 열처리하여 제작된 HPT의 특성곡선이다. 에미터의 직렬저항(R_E)의 영향에 의해, 베이스 에미터 전압(V_{BE})이 증가할수록 컬렉터 전류(I_C)의 증가율이 감소함을 알 수 있다. 따라서 R_E의 값은 상대적으로 높은 V_{BE} 영역에서 추출되어진다. 인듐 증착공정을 한 HPT와 하지 않은 HPT의 에미터 직렬저항(R_E) 값을 추출하여 계산한 결과, 각각 6.4Ω과 90Ω이 나왔다. 그러므로 HPT 제작시, 인듐을 ITO와 n⁺-InP 계면에 증착 함으로써 접촉성 저항이 매우 개선되어짐을 알 수 있다.

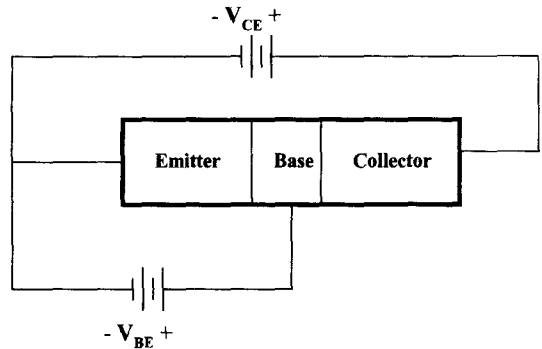


그림 6 순방향 활성모드에서 Gummel plot 측정

Fig. 6 Gummel-plots measured in the forward active mode

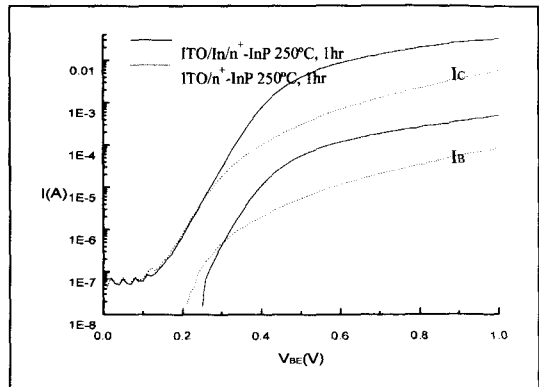


그림 7 측정된 HPT's 순방향 활성모드에서의 Gummel plots
Fig. 7 Measured Gummel plots for an InP/InGaAs HPT's in the forward active mode

그림 8은 인듐을 ITO와 n⁻InP 계면에 증착하여 제작한 HPT와 금속, 즉 Au을 에미터 전극으로 갖는 HBT를 비교하기 위하여 측정된 DC 공통 에미터-컬렉트 전류-전압 특성을 나타낸 것이다.

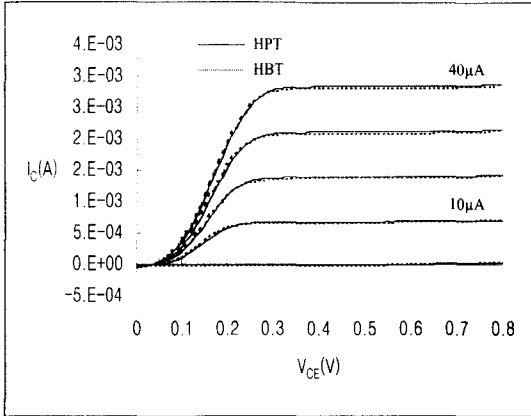


그림 8 InP/InGaAs HPT's(실선)와 HBT's(점선)의 DC 공통 에미터-컬렉트 전류-전압 특성 곡선
 Fig. 8 Collector I-V characteristics of an InP/InGaAs HPT(solid lines) and a HBT(dashed lines)

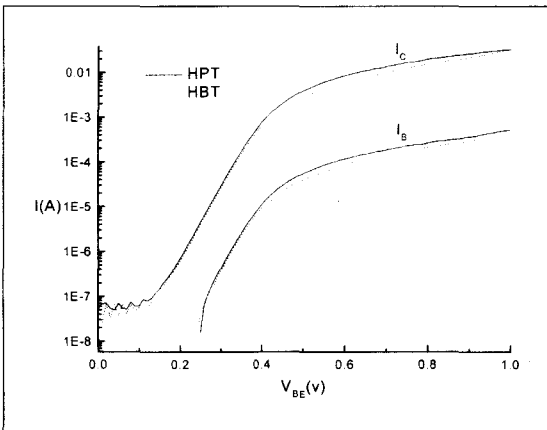


그림 9 HBT's(점선)과 HPT's(실선)의 측정된 순방향 활성모드의 Gummel plots
 Fig. 9 Measured Gummel plots for a HBT(dashed lines) and a HPT(solid lines) in the forward active mode

주입되는 베이스전류는 0μA에서 40μA까지 10μA의 단계별로 입력되어진다. 그림 8에서 HBT와 HPT의 오픈 전압이 0.04V, 전류이득이 V_{CE}=0.6V에서 71로 동일한 전류-전압 특성을 보여 주었다. 다시 HBT와 HPT의 에미터 직렬저항값 (R_E)를 구하기 위해, 순방향 활성모드 Gummel plot를 측정하여 R_E값을 계산한 결과 HBT와 HPT의 에미터 직렬저항값 (R_E)이 각각 7Ω과 6.4Ω으로 거의 동일한 값을 얻었다. 이것은 ITO를 에미터 전극으로 사용한 HPT가 Au을 에미터 전극으로 사용하는 HBT와 거의 동일한 전기적 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그림 9는 제작된 HPT와 HBT의 순방향 활성모드에서의 Gummel plot을 측정된 것이다.

제작된 HPT의 광학적 특성을 알아보기 위해, 프로브 스테이션에서, 1.3μm 파장을 가지는 레이저 다이오드를 구동하여 빛을 광섬유를 이용하여 ITO 투명전극을 통해 주입시켰다. 입사되는 빛의 세기를 증가시키기 위해, 레이저 다이오드의 전류를 증가시키며 I-V 특성을 측정하였고, 그림 10은 그 특성곡선을 나타낸다. 본 실험에서는 HPT로 입사되는 빛의 세기를 정확하게 측정하는 것이 불가능하여, 광학적 특성을 나타내는 파라미터의 값을 정확하게 계산하지 못하였다. 그러나 그림 10에서 주입되어지는 광 세기를 전기적으로 주입되는 베이스 전류 값으로 계산한 결과, 8μA에서 96μA까지 약 12 μA 단계로 주입되는 베이스 전류와 동일한 효과를 얻을 수 있었다.

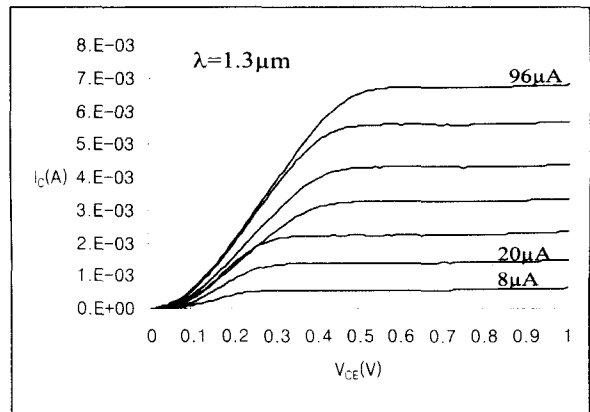


그림 10 1.3μm 빛의 세기의 변화에 대한 HBT의 공통 에미터 전류 전압 특성
 Fig. 10 Measured common-emitter characteristics of a HPT illuminated by 1.3μm light under different bias conditions

4. 결 론

n⁻InP 에미터접층 위에 ITO 투명전극을 형성하는 공정을 개발하고, InP/InGaAs HPT를 제작, 그 특성을 분석하였다. ITO와 n⁻InP간의 음접촉 형성을 위하여, InP 위에 인듐을 진공증착한 후, ITO를 RF 스퍼터링 공정을 이용하여 증착하였다. 열처리 후 음접촉 특성은 I-V 특성곡선으로 확인되었으며, 비접촉저항은 TLM 방법으로 측정된 결과 약 6.6×10⁻⁴ Ωcm을 얻을 수 있었다. n⁻InP 에미터 위에 ITO 투명전극을 갖는 InP/InGaAs HPT와 동일한 에피층 구조를 갖고, 금속 즉 Au를 에미터 전극으로 사용하는 HBT를 동시에 제작하여 두 소자의 전기적 특성을 측정하고, 비교 분석하였다. 그 결과 매우 유사한 I-V 특성곡선을 얻을 수 있었고, 인듐 박막 증착공정을 이용하여 제작된 HPT의 오픈 전압이 0.04V, 그리고 전류이득은 약 70을 얻을 수 있었다. Gummel plot를 측정하여 추출된 에미터 저항(R_E)값은 약 7Ω의 값을 가졌다. 1.3μm 파장을 가지는 빛을 에미터 투명전극을 통해 입사시켜, 빛의 세기의 변화에 따른 I-V 특성을 측정하였다. 따라서 불투명한 금속전극을 갖는 InP/InGaAs HPT와 매우 유사한 전기적 특성을 갖는 투명전극 HPT가 성공적으로 구현되었다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 반도체 공동연구소의 반도체 분야 교육부 학술연구조성비(ISRC 97-E-3025)에 의해 수행되었음.

참고 문헌

[1] Richard N. Nottenburg, Member, IEEE, Y. K. Chen, Morton B. Panish, Senior Member, IEEE, D. A. Humphrey, and R. Hamm, "Hot-Electron InGaAs/InP Heterostructure Bipolar Transistors with f_T of 110GHz" IEEE Electron Device Letters, Vol. 10, NO. 1, January(1989)

[2] Minoru Ida, Member, IEEE, Shoji Yamahata, Member, IEEE, Kenji Kurishima, Hiroshi Ito, Member, IEEE, Takashi Kobayashi, and Yutaka Matsuoka, Member, IEEE, "Enhancement of f_{max} in InP/InGaAs HBT's by Selective MOCVD Growth of Heavily-Doped Extrinsic Base Regions", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 43, NO. 11, November(1996)

[3] Mheical Y. Frankel et al, "Analysis of ultrafast photo carrier transport in AllnAs-GalnAs heterojunction bipolar transistor", IEEE J. Quantum Electron.,Vol. 31, no. 2, pp278-285, February(1995)

[4] U. Eriksson, P. Evaldsson, J. Wallin, B. Stalnacke, S. Lourduoss, and B. Willen, "Vertical integration of an InGaAs/InP HBT and a 1.55 μ m strained MQW p-substrate laser", IEE Proc.-Optoelectron., vol. 143, no 1, pp 107-109, February 1996

[5] Fritz Schuermeyer, Peter J. Zampardi, and Peter M. Asbeck. "InP-Based HBTs For Optical Signal Detection", Electrochemical Society Proceedings Volume 98-2.

[6] H. Fukano, Member, IEEE, Y. Takanashi, Member, IEEE, and M. Fujimoto, Member, IEEE, "High-Speed InP-InGaAs Heterojunction Phototransistors Employing a Nonalloyed Electrode Metal as a Reflector", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 30, No. 12, December(1994)

[7] Paul Freeman, Xiangkun Zhang, Igor Vurgaftman, Jasprit Singh, Member, IEEE, and Pallab Bhattacharya, Fellow, IEEE, "Optical Control of 14GHz MMIC Oscillators Based on InAlAs/InGaAs HBT's with Monolithically Intergrated Optical Waveguides", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 43, NO. 3, March(1996)

[8] Shabbir A. Bashar, and Ali A. Rezazadeh, Member, 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).

[9] S. A. Basher et al, "Fabrication and spectral response analysis of AlGaAs/GaAs and InP/InGaAs HPTs with transparent ITO emitter contacts", IEE proc.-Optoelectron, Vol. 143, No.

저 자 소 개



강민수 (姜旻秀)

1973년 8월 19일생. 1996년 영남대 전자공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전자공학과 석사졸업. 2002년~현재 LG전자 재직



한교용 (韓敎龍)

1959년 11월생. 1982년 2월 성균관대학교 전자공학과(학사). 1986년 5월 Univ. of Massachusetts, Amherst, Dept. of Electrical and Computer Engineering(석사). 1992년 5월 Colorado State Univ. Dept of Electrical Engineering(박사). 1992년~현재 영남대 전기전자공학부 교수