

15-5-12

### III-V 광소자 제작을 위한 ITO/n<sup>+</sup>-InP 옴 접촉 특성연구

## Formation of ITO Ohmic Contact to n<sup>+</sup>-InP for III-V Optoelectronic Devices

황용한\*, 한교용\*\*

(Yong-Han Hwang\* and Kyo-Yong Han\*\*)

#### Abstract

The use of a thin film of indium between the ITO and the n<sup>+</sup>-InP contact layers for InP/InGaAs HPTs was studied without degrading its excellent optical transmittance properties. ITO/n<sup>+</sup>-InP ohmic contact was successfully achieved by the deposition of indium and thermal annealing. The specific contact resistance of about  $6.6 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}^2$  was measured by use of the transmission line method (TLM). However, as the thermal annealing was just performed to ITO/n<sup>+</sup>-InP contact without the deposition of indium between ITO and n<sup>+</sup>-InP, it exhibited Schottky characteristics. In the applications, the DC characteristics of InP/InGaAs HPTs with ITO emitter contacts was compared with those of InP/InGaAs HBTs with the opaque emitter contacts.

**Key Words** : Indium thin oxide(ITO), Transmission line model(TLM), Heterojunction phototransistor(HPT), Heterojunction bipolar transistor(HBT), Ohmic contact, Schottky contact

#### 1. 서론

전기적으로 낮은 비저항과 광학적으로 높은 투과성을 가지는 indium tin oxide(ITO) 전극은 LCD 디스플레이, 실리콘 이미지 센서등에 널리 사용되어 왔고, 최근에는 III-V 표면 발광 레이저 다이오드(VCSEL), 전계효과 트랜지스터(FET), 그리고 이중접합 포토트랜지스터(HPT)에 투명전극으로 응용하기 위한 연구가 지속되어 왔다[1-6].

이중접합 포토트랜지스터의 경우 광신호는 HPT의 기판을 통한 후방, 광 도파관을 이용한 측방, 또는 ITO 에미터 투명전극을 통한 전방으로 입사될 수 있다. 그러나 기판을 통한 후방입사는 광신호와 HPT 활성영역의 정렬이 어렵고, 수광효율(responsivity)을 높이기 위해 기판 뒷면의 경면연

마(polishing)가 요구된다[7]. 광 도파관을 이용한 측방입사의 경우, 에피구조가 보다 복잡하여 지고, 결정단면 형성 및 패키징이 보다 어렵게 된다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 S. A. Bashar 과 A. A. Rezazadeh는 ITO을 에미터 투명전극으로 사용하는 HPT를 제안하였다.[3,8] AlGaAs/GaAs HPT의 경우, n<sup>+</sup> GaAs 위에 ITO를 증착하였고, InP/InGaAs HPT 경우는 n<sup>+</sup> InGaAs층 위에 ITO을 증착하여 옴 접촉을 형성하였다. 이러한 HPT는 광신호의 전방입사를 가능하게 하여 보다 간단한 제작 공정 및 패키징을 가능하게 한다.

본 논문에서는 InP/InGaAs HPT의 에피층의 두께를 감소시키고, 또한 제작 공정을 단순화하기 위해 n<sup>+</sup>-InP층 위에 ITO를 증착하여 옴접촉을 형성하고 그 특성을 분석하였다. ITO 증착후의 열처리 조건에 따른 접촉저항의 변화를 전류-전압의 특성 측정 및 Transmission Line Model(TLM) 측정을 수행하여 분석하였다. 그리고 접촉저항을 감소시키기 위해 ITO와 n<sup>+</sup> InP층 사이에 다양한 박막을 증착하여 다양한 조건에서 열처리한 후 그

\* : LG Phillips LCD

(Fax : 053-813-8230

E-mail : kyhan@yumail.ac.kr)

\*\* : 영남대학교 전자정보공학부

2002년 2월 17일 접수, 2002년 4월 11일 1차 심사완료

2002년 4월 24일 최종 심사 완료

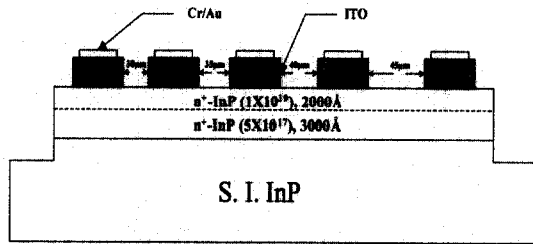
특성변화를 분석하였다. 열처리 온도는 HPT 제작 공정과 양립할수 있는 온도를 선택하였고, ITO 에미터 투명전극을 갖는 HPT를 제작하여, 그 특성을 분석하였다.

## 2. 실험

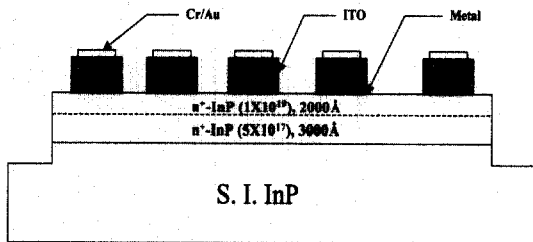
### 2.1 TLM 패턴 제작

ITO는 RF 스퍼터링 시스템을 이용하여 증착하였고,  $\text{In}_2\text{O}_3$ (90wt%)와  $\text{SnO}_2$ (10wt%)로 이루어진 타겟을  $\text{Ar}/\text{H}_2$  환경에서 Corning 유리기판 위에 25 Å/sec로 증착속도를 갖도록 스퍼터링 하였다. 증착된 ITO는 다양한 조건에서 열처리를 수행하였고, ITO의 전기적 그리고 광학적 특성은 four-point probe와 spectrometer을 이용하여 측정하여 공정조건을 결정하였다.

ITO/ $n^+$ -InP TLM 패턴은 2000 Å 두께의  $10^{19}/\text{cm}^3$ 으로 도핑된  $n^+$ -InP 에피층을 갖는 반절연



(a) ITO/ $n^+$ -InP contacts



(b) ITO/Metal/ $n^+$ -InP contacts

그림 1. 접촉저항 특성분석을 위하여 사용된 TLM 패턴과 에피층 구조.

Fig. 1. Schematics of pattern and epitaxial layers for measurement of contact resistance.

InP 기판위에 형성하였다. 표면 세정후에 ITO를 증착한 후, ITO 패드 형성 및 전류고립(current isolation)을 위해 ITO는  $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$  (1:1000) 혼합용액에 150초, InP는  $\text{HCl}:\text{H}_3\text{PO}_4$  (1:1) 혼합용액에 20 초 동안 각각 에칭을 하고, ITO를 열처리를 하였다. 마지막으로 접촉저항 측정을 위한 접촉패드로서 Cr/Au를 증착하여 TLM 패턴이 제작되었다. 또한 접촉저항을 감소시키기 위해 ITO를 증착하기 전에 다양한 박막을 진공증착과 리프트오프 공정을 이용하여 100Å 두께로 형성하였다. 사용된 박막은 인듐(In), 주석(Sn), 게르마늄(Ge), 그리고 안티몬(Sb)이다. 제작된 TLM 샘플들은 대기중의 전기로(furnace)에서 1시간 동안 각각 다른 온도에서 열처리를 수행한 후 프로브 스테이션을 이용하여 I-V 특성곡선 및 접촉저항을 측정했다.그림 1은 ITO와  $n^+$ -InP간의 접촉저항 특성분석을 위하여 사용된 웨이퍼 에피층 구조와 TLM (Transmission Line Model)패턴의 모양을 간략히 나타낸 것이다.

### 2.2 InP/InGaAs HBT/HPT 제작

InP/InGaAs HPT 소자는 리소그래피와 선택적 에칭을 통해 제작되었다. 소자 제작에 사용된 웨이퍼는 영국 ICS사에서 에피 성장되었고, 그 구조는 표 1과 같다.

에미터 투명전극 형성은 TLM 패턴의 제작 공정과 동일하다. InP 에미터는  $\text{HCl}:\text{H}_3\text{PO}_4$ (1:1) 용액에 의해 에칭되었고, 베이스와 컬렉터를 형성하고 있는 InGaAs 층은 InP에 대해 선택적 에칭이 가능한  $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (1:8:100) 용액에 의해 에칭되었다. 베이스 및 컬렉터의 음접촉은 각각 AuZn와 Au/Cr를 진공증착하고, lift-off공정을 통해 형성시켰다. 전기적 특성비교를 위해 제작된 InP/InGaAs HBT의 경우 에미터 전극으로 ITO를 증착하는

표 1. InP/InGaAs HBT의 에피택셜 구조.

Table 1. InP/InGaAs HBT's epitaxial profile.

Layer	InP/InGaAs HBT	
Cap	2000 · n+-InP	( $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ )
Emitter	1000 · n-InP	( $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ )
Spacer	50 · undoped InGaAs	-
Base	1000 · p-InGaAs	( $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ )
Collector	4000 · n-InGaAs	( $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ )
Sub-collector	5000 · n-InGaAs	( $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ )
Buffer	100 · undoped InGaAs	-
Substrate	S.I.InP	

대신 Au/Cr 음접촉을 형성하였다. 제작된 HP와 HBT는 프로브 스테이션에서 HP4155A 반도체 파라미터 분석기를 사용하여 DC 특성을 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

그림 2는 전기로에서 열처리 온도에 따른 ITO의 전기적 특성인 면저항 변화를 보여준다. ITO 열처리 온도가 증가할수록 면저항이 감소하지만, 300°C 이상의 온도에서 면저항이 다시증가하는 것을 볼 수 있다. 열처리에 의한 면저항의 감소는 열처리에 의해 ITO의 비정질 구조가 결정질의 구조로 바뀌면서 전자 이동도가 높아지고, 도펀트인 Sn의 도우너(donor)로서의 활성화가 증대되어 전도대의 전자농도가 증가하기 때문이다. 그러나 300°C이상의 열처리 온도에서는 공기중의 산소가 박막의 내부로 확산을 일으켜 산소공공의 수를 감소시키고, 그로 인해 전자농도가 줄어서 면저항이 증가한 것으로 보인다[9-12].

본 실험에서 얻어진 면저항(sheet resistance)은 203Ω/□로 S. A. Bashar 과 A. A. Rezazadeh의 참고문헌에서 보고된 약 20Ω/□ 보다 상대적으로 높은 값을 가지고 있으나, 본 논문에서는 ITO 자체의 특성 향상을 통한 접촉저항의 감소를 연구하기 보다는 ITO와 InP 사이의 박막증착 및 열처리에 따른 접촉저항의 감소를 연구하는데 주력하였다.

먼저 제작된 ITO/n<sup>+</sup>-InP 샘플의 접촉저항의 특성 비교를 위해 Au 금속 음접촉을 갖는 TLM 샘플을 제작하여 측정하였다. Au와 n<sup>+</sup>-InP의 접촉특성을

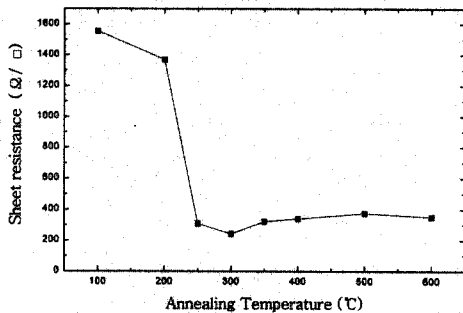


그림 2. ITO 열처리 온도에 따른 면저항 변화.

Fig. 2. The variation of sheet resistance of ITO thin film versus annealing temperature.

나타내는 비접촉저항(specific contact resistance)은 TLM 패턴에서 거리에 대한 전체저항 측정을 통해 계산되었고, 그림 3에서 볼 수 있듯이 계산된 비접촉저항은  $1.7 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}^2$  이다[9].

그림 4는 2.1절에서 설명한 TLM 패턴에서 n<sup>+</sup>-InP위에 ITO만 증착하고 열처리한 경우를 나타낸 것으로, 그림에서 볼 수 있듯이 300°C이상의 ITO 열처리 온도에서 ITO와 n<sup>+</sup>-InP간의 접촉저항 특성이 더 나빠지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 고온 열처리에서 생길 수 있는 phosphorus outdiffusion에 의한 표면 결함 생성, 전기로내 열처리로 생길 수 있는 산소확산에 의한 ITO와

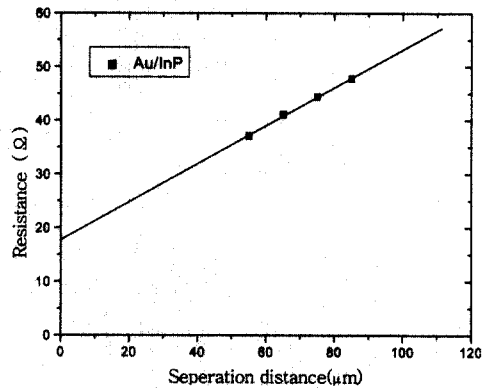


그림 3. Au와 n<sup>+</sup>-InP접촉에 대한 TLM 결과.

Fig. 3. TLM results of Au contact on n<sup>+</sup>-InP.

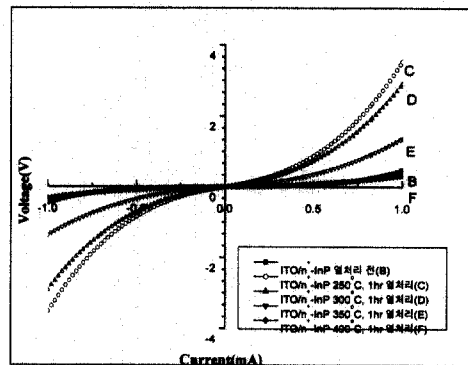


그림 4. 열처리 온도에 따른 ITO/n<sup>+</sup>-InP 접촉의 전류-전압 특성 곡선.

Fig. 4 I-V characteristics of the ITO contact on n<sup>+</sup>-InP with various annealing temperature.

n<sup>+</sup>-InP 사이에서의 계면반응 등의 복합적인 이유로 계면에 더 높은 장벽이 생겼기 때문으로 생각된다. 또한 그림 3에서 열처리 공정만으로는 ITO와 n<sup>+</sup>-InP간의 음접촉 형성을 시킬 수 없음을 알 수 있다.

음 접촉저항을 감소시키기 위해서 스퍼터링 과정에서 발생할 수 있는 표면 결합의 생성을 방지하고, ITO 또는 InP의 도핑농도를 증가시키기 위해 ITO 증착전에 InP 표면에 박막을 진공 증착하였다. 그림 5는 ITO와 n<sup>+</sup>-InP계면에 다양한 박막물질(In, Sn, Ge, Sb)을 증착하고 열처리했을 때의 ITO와 n<sup>+</sup>-InP간의 전류-전압 특성을 나타낸 것이다. 안티몬(Sb) 박막을 InP 표면에 존재하는 native 산화막을 제거하기 위해 증착하였고, n<sup>+</sup>-InP의 도핑농도를 증가시키기 위해 게르마늄(Ge)을 사용하였다. 주석(Sn)은 ITO의 전자의 농도를 증가시키기 위해, 그리고 인듐(In)은 InP과의 계면에서 인듐의 재산화와 주석의 확산에 의한 효과를 관찰하기 위해 채택되었다. 그 결과 인듐과 주석 박막을 증착한 경우에만 선형적인 전류-전압 특성을 나타내었다. 특히 인듐을 증착했을 경우에 가장 좋은 접촉 저항 특성을 나타내었고, 비접촉저항(Specific contact resistance), ρ<sub>c</sub>는 TLM패턴에서 거리에 대한 전체저항을 측정을 통해 계산되었다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 약 6.6×10<sup>-4</sup>Ωcm<sup>2</sup>이고, 면저항은 25.3Ω/□이다. TLM을 이용한 측정이 측정오차에 아주 민감하게 계산 결과가 바뀌는 것을 고려할 때, Au/n<sup>+</sup>-InP TLM 결과와 거의 유사한 값을 가졌다고 볼 수 있다. 박막증착으로 인해 스

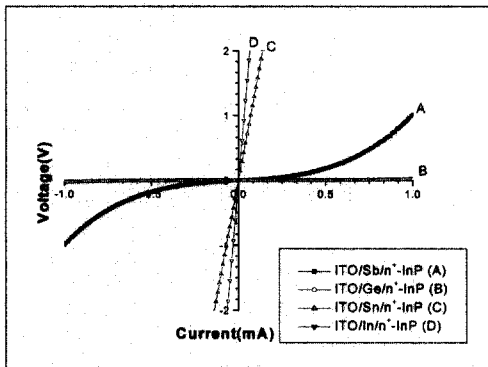


그림 5. ITO/Metal/n<sup>+</sup>-InP 접촉의 전류-전압 특성 곡선.

Fig. 5. I-V characteristics of the ITO/Metal contact on n<sup>+</sup>-InP.

퍼팅 공정중 발생할 수 있는 InP 표면결합을 최소화하였다고 가정할 때, 또한 열처리 과정에서의 phosphorus outdiffusion을 무시할 때, 주석에 의한 접촉저항의 감소는 주석 박막이 인듐 산화막으로 효과적으로 확산하여, ITO/InP 계면에 가까운 ITO의 전도대의 전자농도를 증가시켰기 때문이라 생각된다. 반면에 인듐 박막이 ITO와 n<sup>+</sup>-InP간의 접촉 저항 특성을 개선시킬 수 있었던 이유는 현재 명확하지 않다. 그러나 인듐 박막이 열처리에 의해 인듐 산화막으로 변화하는 과정에 주석의 확산

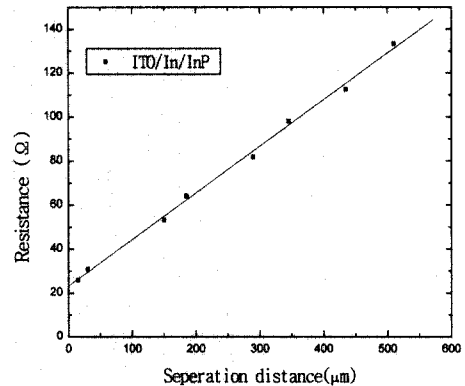


그림 6. 250°C 열처리 후 ITO/In/n<sup>+</sup>-InP 접촉에 대한 TLM 결과.

Fig. 6. TLM results of the ITO/In/n<sup>+</sup>-InP structure after ITO thermal annealing at 250°C.

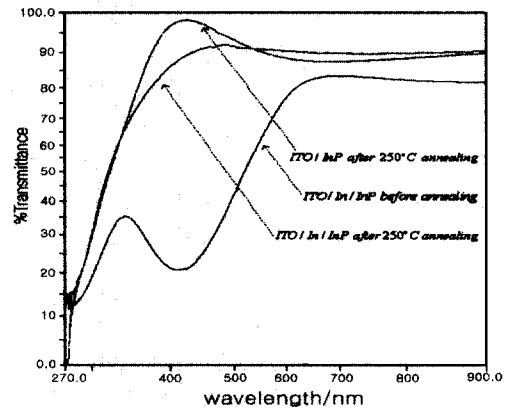


그림 7. 250°C 열처리 후 ITO 투과도 변화.

Fig. 7. The variation of transmittance of ITO film after 250°C annealing .

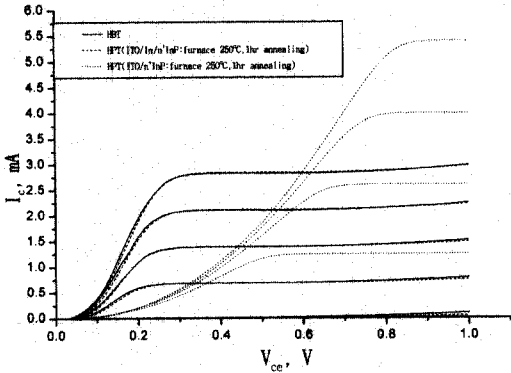


그림 8. InP/InGaAs HBT 와 ITO 에미터 투명 전극을 갖는 InP/InGaAs HPT의 전류-전압 특성 곡선.

Fig. 8. I-V characteristics of the InP/InGaAs HBT and InP/InGaAs HPT with ITO (ITO/In) emitter contact.

이 보다 효과적으로 이루어져, 보다 높은 전자농도를 갖는 ITO가 ITO/InP 계면에 생성되었다고 생각된다.

그림 7은 또 하나의 ITO 특성인 광 투과도에 대한 인듐(100Å) 박막의 영향을 보여준다. ITO만 증착해서 열처리했을 경우, ITO의 광투과도가 90%였다. 그러나 ITO와 유리판 사이에 인듐을 증착하고 열처리 하지 않았을 경우는 광 투과도가 90%에서 83%로 감소했다. 250°C 열처리했을 때는 인듐의 산화로 인해 광 투과도가 다시 90%로 회복되는 것을 알 수 있다.

그림 8은 에미터의 접촉저항특성에 따라 금속전극을 갖는 InP/InGaAs HBTs와 ITO를 에미터 투명전극으로 갖는 InP/InGaAs HPTs의 DC 공통-에미터 컬렉터 전류-전압특성( $I_c-V_{ce}$ ) 곡선을 각각 보여준다.

InP/InGaAs HBTs와 인듐박막을 사용한 HPTs의 경우, 베이스 전류( $I_B$ )를 0 $\mu$ A에서 40 $\mu$ A까지 10 $\mu$ A씩 증가시켰고, ITO만 사용한 HPTs의 경우, 0 $\mu$ A에서 80 $\mu$ A까지 20 $\mu$ A씩 증가시켰다. 음 접촉을 형성한 InP/InGaAs HBTs를 기준으로 했을 때, 인듐박막 증착 및 ITO 열처리를 통해 제작된 HPTs의 음셋 전압은 0.04V, 전류이득(베이스 전류 40 $\mu$ A, 컬렉터-에미터 전압( $V_{ce}$ ) 0.6V)은 71로 HBT와 같았고, 비슷한 DC특성곡선을 나타냈다. 하지만 ITO만 증착하고 열처리해서 제작된 HPTs의 경우, 비슷

한 전류이득을 나타냈지만, 음셋전압이 0.05V로 증가했다. 특히 HBTs의 DC 특성 곡선과 비교했을 때, 포화영역의 기울기가 상당히 완만한 것을 볼 수 있는데, 이는 그림 4에서와 같이 ITO와 n<sup>+</sup>-InP 에미터 사이에 접촉저항이 큰 Schottky 특성의 접촉이 형성됐기 때문인 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

n<sup>+</sup>-InP위에 ITO를 RF 스퍼터링 방법으로 증착하여, 열처리 온도에 따른 접촉저항 특성을 분석하고, ITO증착 전에 다양한 박막물질을 진공증착하고, ITO를 열처리했을 때의 접촉 저항 특성을 비교하기 위해 TLM 패턴을 제작하였다. I-V 특성곡선을 측정하여 음 접촉을 확인하였고, 특수 접촉저항은 TLM 패턴에서 거리에 대한 전체 저항 측정을 통해 얻어졌다. n<sup>+</sup>-InP 위에 ITO만 증착한 경우, 열처리 후에도 Schottky 접촉특성을 나타내는 반면에 실험에 사용된 박막물질 중 인듐을 증착한 경우, 음 접촉이 가장 성공적으로 형성되었고, 또한 열처리 후 ITO만 증착했을 때와 유사한 투과도를 얻을 수 있었다. ITO/In/InP의 경우, 특수 접촉 저항은 약 6.6 $\times 10^{-4}$   $\Omega$ cm<sup>2</sup>, 면저항은 25.3  $\Omega/\square$ 로써, 특수 접촉 저항이 약 1.7 $\times 10^{-4}$   $\Omega$ cm<sup>2</sup>이고, 면저항이 28.3 $\Omega/\square$ 으로 측정된 Au/n<sup>+</sup>-InP TLM 결과와 비교할 때, 금속 음접촉에 근접함을 알 수 있다. 그리고 인듐 박막을 증착하고 열처리한 ITO를 에미터 전극으로 갖는 InP/InGaAs HPTs와 금속전극을 갖는 InP/InGaAs HBTs가 동시에 제작하여 측정한 결과, 매우 유사한 전류-전압특성을 나타내었고, 음셋 전압이 0.04V, 전류이득이 71로 매우 유사한 값을 가지고 있다. 따라서 인듐 박막을 이용하여 ITO 에미터 투명전극을 갖는 InP/InGaAs HPTs를 성공적으로 구현할 수 있음을 알수있다.

#### 참고 문헌

- [1] M. A. Matin, A. F. Jezierski, S. A. Bashar, D. E. Lacklison, T. M. Benson, T. S. Cheng, T. E. Sale, J. W. Orton, C. T. Foxon, and A. A. Razazadeh, "Optically transparent indium-tin-oxide(ITO) ohmic contacts in the fabrication of vertical cavity surface-

- emitting lasers", *Electron. Lett.*, Vol. 30, No. 5, p. 318, 1994.
- [2] A. H. Khalid and Razazadeh, "Fabrication and characterisation of transparent-gate field effect transistors using indium tin oxide", *IEE Pro.-optoelectron*, Vol. 143, No. 1, p. 7, 1996.
- [3] S. A. Bashar and Razazadeh, "Fabrication and spectral response analysis of AlGaAs/GaAs and InP/InGaAs HPTs with transparent ITO emitter contacts", *IEE Pro.-optoelectron*, Vol. 143, No. 1, p. 89, 1996.
- [4] 남상욱, 지성원, 손제봉, 조정수, 박정후, "반응성 스퍼터링에 의한 ITO의 형성과 유전체 소성 공정중의 특성변화에 관한 연구", 한국전기전자재료학회 1997추계학술대회논문집, p. 510, 1997.
- [5] 김호수, 정순원, 구경완, "sputtered ITO (glass)의 열처리효과", 한국전기전자재료학회 2001추계학술대회논문집, p. 554, 2001.
- [6] H. H. Kim, C. H. Park, M. J. Cho, K. J. Lim, J. H. Shin, and K. I. Park, "Control of deposition parameters in ITO films: figure of merit", *Proc. 2001 Autumn Conf. KIEEME*, p. 398, 2001.
- [7] P. Freeman, X. Zhang, I. Vurgaftman, J. Singh, and P. Bhattacharya, "Optical control of 14 GHz MMIC oscillators based on InAlAs/InGaAs HBT's with monolithically integrated optical waveguides", *IEEE trans. Electron Devices*, Vol. ED-43, No. 3, p. 373, 1996.
- [8] S. A. Bashar and Razazadeh, "Optically transparent ITO emitter contacts in the fabrication of InP/InGaAs HPT's", *IEEE trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 43, No. 9, p. 2299, 1995.
- [9] M. Higuchi, S. Uekusa, R. Nakano, and K. Yokogawa, "Postdeposition annealing influence on sputtered indium tin oxide film characteristics", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 33, p. 302, 1994.
- [10] C. H. L. Weijtens, "Influence of the deposition and anneal temperature on the electrical properties of indium tin oxide", *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 138, No 11, p. 3432, 1991.
- [11] W. Wu and B. Chiou, "Effect of annealing and optical properties of RF magnetron sputtered indium tin oxide films", *Applied Surface Science*, Vol. 68, p. 497, 1993.
- [12] G. K. Reeves and H. B. Harrison, "Obtaining the specific contact resistance from transmission line model measurements", *IEEE Electron Dev. Lett.*, Vol. 3, No. 5, p. 111, 1982.