

단파장 응용을 위한 InGaP/GaAs HPT의 광특성

이 상 훈, 박 재 홍, 송 정 근, 홍 창 희
동아대학교 전기전자컴퓨터공학부

김 용 규
대구기능대학 메카트로닉스과

Optical Characteristics of InGaP/GaAs HPT for Short-wavelength Applications

Sang-Hun Lee, Jae-Hong Park, Chung-Kun Song*, Chang-Hee Hong
School of Electrical and Electronics and Computer Eng., Dong-A University
* cksong@daunet.donga.ac.kr

Yong-Kyu Kim,
Dept. of Mechatronics, Taegu Polytechnic College

Abstract

This paper shows the high performance as a photodetector of InGaP/GaAs HPT with 3-terminal caused by its inherent good electrical properties compared with AlGaAs/GaAs HPT. InGaP/GaAs HPT produced the high optical gain of about 61 where HPT is biased at $V_C=3V$, $I_B=2\mu A$ with an input optical power of $1.23\mu W$. This is 2.5 times higher than that of AlGaAs/GaAs HPT. And we examined that the optical gain of HPTs becomes larger when operating in 3-terminal configuration rather than 2-terminal with the floating base. For a given base current of $2\mu A$, the optical gain is enhanced about 18% in the InGaP/GaAs HPT and about 27% in the AlGaAs/GaAs HPT over that of the 2-terminal device.

I. 서론

21세기 정보사회의 근간이 되는 정보통신망은 화상, 데이터, 음성 등을 통합하는 멀티미디어 서비스 즉, 입체 영상통신 서비스, 가상 현실 서비스, 그리고 인터넷의 폭발적인 확산을 수용하기 위해서 초고속화, 대용량화 되어 가고 있다. 화합물 반도체를 이용한 주요

광소자들은 광섬유가 각 가정까지 연결되는 이러한 초고속 정보통신시대에 없어서는 안되는 핵심부품으로, 수요가 급격히 증가할 것으로 예상되고 있다. 1999년 세계 화합물 반도체 시장에서 보면 광소자와 전자소자의 시장 비율이 8억 5천 3백만불 대 2억 4천 5만불로 이미 광소자가 약 3.4배를 상회함을 보여주고 있다.[1] 따라서 국내에서도 지속적인 연구와 투자를 통해 광소자에 대한 기술 확보 노력이 절실히 요구된다.

HBT (Heterojunction Bipolar Transistor)를 베이스로 하는 광수신기 OEIC (Optoelectronic Integrated Circuit)의 광검출기로서는 PIN PD와 APD(Avalanche Photodiode)가 널리 사용되어 왔다.[2] PIN PD는 동작이 간단하고, HBT와 에미터를 제외한 에피구조의 동일화로 집적화가 용이하지만, 내부이득이 없기 때문에 수신감도가 낮고, 두 소자가 추구하는 성능이 다르기 때문에 trade-off를 통하여 에피구조를 최적화 해야하는 단점이 있다. APD는 역방향 바이어스된 PN 접합의 애벌런치 현상을 이용하기 때문에 내부이득에 의한 매우 높은 수신감도의 장점이 있지만, PN 접합에 높은 전계를 인가하기 위한 바이어스 문제, 높은 잡음지수, 균일한 애벌런치를 유도하기 위한 가드링 형성 문제, 그리고 HBT와의 에피층 호환성 문제 등이 해결되어야 HBT와 집적화가 가능해진다.

이에 반하여 HPT (Heterojunction Phototransistor)는 HBT와 완전히 동일한 에피구조를 사용하므로 제

조공정의 호환성이 뛰어나고, 부가적인 잡음없이 트랜지스터 고유의 증폭 동작을 이용한 큰 내부이득을 가질 수 있다. 이러한 장점들 때문에 단파장 응용을 위한 GaAs 계열, 장파장 응용을 위한 InP 계열의 HPT들이 꾸준히 연구되어 왔다.[3]

단파장의 경우 PIN PD를 채택한 AlGaAs/GaAs HBT 광수신기 OEIC가 일반적이고, 일부 HPT와의 집적화가 보고되었다.[4] HBT의 이종접합 재료시스템으로 AlGaAs-GaAs 대신 최근에 InGaP-GaAs가 여러 장점 때문에 제안되어 활발히 연구되어 왔다.[5] 그러나 이 재료시스템을 광검출 소자로써의 응용에 대한 연구는 거의 희박한 실정이다.[6] 본 논문은 HPT 기술과 결합한 InGaP-GaAs 시스템이 기존의 AlGaAs/GaAs HPT와의 비교를 통해 얼마나 광이득을 향상시킬 수 있는지를 실험결과를 통해 분석하였다. InGaP/GaAs HPT와 AlGaAs/GaAs HPT의 암실 상태와 광주입시의 DC특성이 비교되었으며, 베이스에 DC 바이어스를 인가하는 3단자 구성을 통해 트랜지스터 고유의 증폭 동작으로 높은 광이득을 나타내어 이전의 2단자 구성에 비해 향상된 성능을 확인하였다.

II. 소자 구조 및 광측정 시스템

본 실험에 사용된 InGaP/GaAs HPT와 AlGaAs/GaAs HPT 소자는 (100) 반질연 GaAs 기판위에 MOCVD 기술을 사용하여 그림 1과 같이 에피층을 성장하였다. HPT의 구조는 광수신기 OEIC의 전치증폭기로 사용되는 전형적인 메사 식각 방식의 단일 에미터 HBT의 구조와 매우 흡사하다. 에미터 전극 접촉 저항을 줄이기 위해 세개의 에미터 캡층이 사용되었는데, 500Å n-InGaAs는 $H_3PO_4:H_2O_2:H_2O$ 로 습식 식각하였고, 1300Å 및 500Å의 n-GaAs는 CCl_2F_2 를 사용하여 RIE하였다. InGaP 에미터 ledge는 HCl/H_2O 에 의한 비자극정렬 공정에 의해 형성되어, 외인성 베이스 표면을 포장하게 하였다. InGaP ledge의 두께와 폭은 각각 500Å, 1.5 μm 이며, 베이스 전극과의 거리는 0.2 μm 였다.

기존의 2전극 구성에 대해 HPT의 3전극 구성의 효과를 실험하기 위해 비합금 Pt/Ti/Pt/Au를 사용하여 베이스 전극을 형성시켰다. InGaP의 이종포장 효과를 살펴보기 위해서 SiN로 포장된 AlGaAs/GaAs HPT 역시 제작되었는데, AlGaAs/GaAs HPT는 n-InGaP 대신에 n-AlGaAs를 사용한 것을 제외하면 두 소자의 구조는 거의 일치하며, AlGaAs/GaAs HPT의 경우, 에미터-베이스 접합면에서의 스파이크를 제거하기 위해서 300Å의 조성경사영역 ($x=0.3 \rightarrow 0$)이 삽입되어 있다.

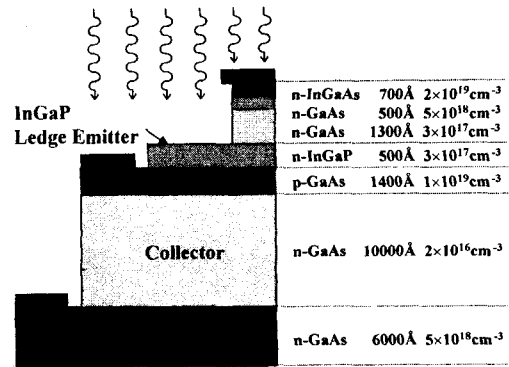


그림 1. InGaP/GaAs HPT의 에피구조 및 단면도

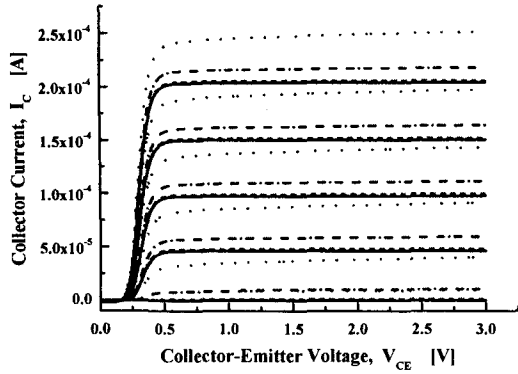
두 소자 모두 n형 도펀트로는 Si을, p형 도펀트로는 확산 계수가 낮은 C를 사용하였다. 또한 실험에 사용된 소자들의 에미터 사이즈는 $6 \times 20 \mu m^2$ 이고, 베이스-컬렉터 접합면의 넓이는 $20 \times 20 \mu m^2$ 이다.

광원으로는 785nm 파장의 CW 반도체 레이저 다이오드를 사용하였다. LD는 광발산각을 가지므로, 양면 볼록렌즈를 사용하여 프로브 스테이션 상의 시편에 집광하였다. 세가지 다른 광전력-1.23 μW , 364nW, 98nW-의 광주입은 on-wafer 상태로 GaAs 웨이퍼의 전면에 조사되었으며, 캘리브레이션된 광전력계로 입사 광전력을 측정하였다. 바이어스 인가와 전류-전압 특성 및 기본적인 DC 파라미터 측정을 위해 HP 4155A 반도체 파라미터 분석기를 이용하였다.

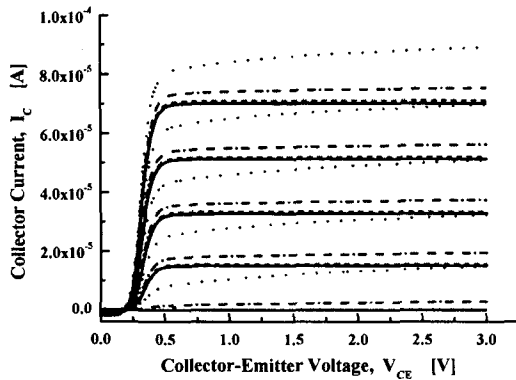
III. 실험 결과 및 분석

그림 2는 암실상태와 여러 다른 광전력의 조사시에 InGaP/GaAs 및 AlGaAs/GaAs HPT의 출력 특성을 보여준다. 베이스 전류 스텝을 0.5 μA 로 두어 측정하였으며, 에미터-베이스 내부전위를 offset시키기 위한 턴-온 전압은 두 소자 모두 약 0.2V를 나타냈다.

계면에서의 재결합은 베이스로 주입되는 에미터 전류를 감소시켜서, 에미터 주입효율을 감소시키고 결국 소자의 이득을 열화시키게 된다. GaAs 외인성 베이스의 표면에 대한 InGaP 이종포장은 AlGaAs/GaAs HPT에서의 SiN 포장에 비해서 표면 재결합 특성을 향상시킬 수 있다. 이것은 InGaP의 낮은 표면 재결합 속도와 낮은 deep level trap (DX center) 농도에 따른 것이다.[7] 또한, InGaP의 300K에서 에너지값은 1.86eV로써 AlGaAs의 1.86eV와 차이가 크게 나지는



(a) InGaP/GaAs HPT



(b) AlGaAs/GaAs HPT

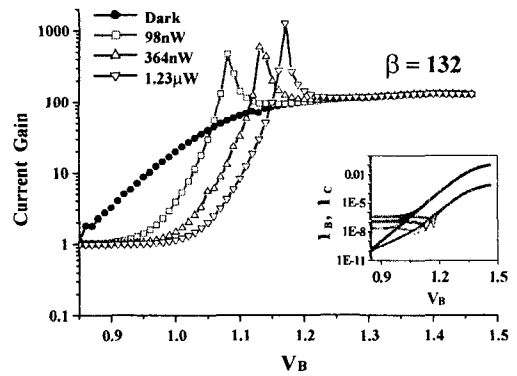
그림 2. 3전극구성의 (a) InGaP/GaAs 및 (b) AlGaAs/GaAs HPT 공통에미터 출력 특성. 암실상태[solid] 및 여러 입력 전력-1.23μW[dot], 364nW[dash dot], 98nW[dash]- 광조사시 특성이 비교되었다. (I_B step=0.5μA)

않지만, InGaP-GaAs 재료시스템은 AlGaAs-GaAs에 비해 더 작은 전도대 에너지 불연속 ΔE_C 와 더 큰 가전자대 에너지불연속 ΔE_V 을 가진다. 그러므로 조성경사영역이 없이도 원활한 전자전송이 가능하고, 베이스에서 에미터로의 정공주입을 크게 줄일 수 있다. 그 결과 에미터 주입효율의 증가로 인해 전류이득이 크게 향상된다. AlGaAs/GaAs HPT의 45에 비해 InGaP/GaAs HPT는 약 132의 높은 DC 전류이득을 나타내었다. 그림 3에서 InGaP/GaAs 및 AlGaAs/GaAs HPT의 암실상태와 다른 광 레벨에서의 전류이득과 Gummel 도표(삼입그림)를 나타내었다.

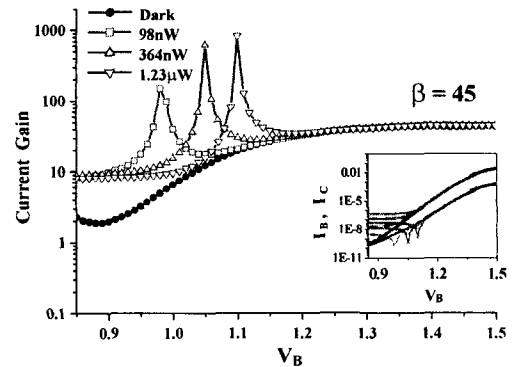
낮은 베이스-에미터 바이어스 하에서 HPT는 PIN PD와 유사한 동작을 한다. 즉, HPT의 베이스-컬렉터 서브컬렉터는 각각 PIN PD의 p-i-n 영역과 같은 역할을 한다. 역방향 베이스 포화전류는 이미 상온에서 존

재하고 있는 열생성된 소수캐리어에 광생성된 전자정공쌍이 더해져서 형성된다. 그러므로 광전력이 커질수록 이 역방향 전류는 증가하게 된다. 전류이득 그림의 스파이크와 Gummel 도표에서 V형의 노치는 동일한 바이어스점에서 발생하는데, 이것은 베이스 전류의 방향이 바이어스 인가에 의해 순방향으로 바뀌는 지점이다. 광전력이 증가하게 되면 역방향전류는 증가하므로 그만큼의 더 큰 바이어스를 필요로 하기 때문에 스파이크와 노치는 그림과 같이 오른쪽으로 이동하게 된다. 베이스 전류가 순방향으로 바뀌면 HPT는 광다이오드 특성으로부터 트랜지스터 고유의 증폭동작을 하게된다. 즉, 광생성된 정공은 베이스 전류에 더해져서 트랜지스터에 의해 증폭되게 된다.

그림 4는 2전극 구성(베이스 floating)에서 동작시킨 InGaP/GaAs 및 AlGaAs/GaAs HPT의 공통에미터 특성을 여러 광전력에 따라 나타내었다. 또한 각 광전력에서의 광이득을 계산하여 표시하였다. 일반적으로 광



(a) InGaP/GaAs HPT



(b) AlGaAs/GaAs HPT

그림 3. 3전극구성의 (a) InGaP/GaAs 및 (b) AlGaAs/GaAs HPT의 암실상태와 광조사시의 DC 전류이득. (Gummel 도표 삼입)

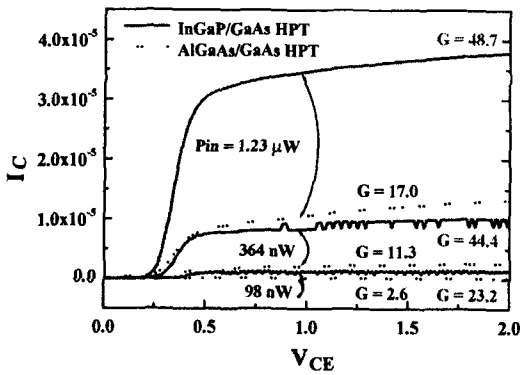


그림 4. 여러 광전력에 따른 2전극 HPT의 I-V 출력 특성

이득 G 는 다음식과 같이 표현되어진다.

$$G = \frac{hc}{q\lambda} \frac{\Delta I_C}{P_{in}}$$

여기서 $hc/\lambda = h\nu$ 는 입사되는 광자에너지를 나타내고, ΔI_C 는 암전류에 대한 입력 광전력 P_{in} 에서의 광전류간의 증분을 나타낸다. $hc/q\lambda$ 는 실험에 사용된 LD의 동작 파장이 785nm이므로, 그 값은 1.582가 된다.

InGaP/GaAs HPT는 $V_{CE}=2V$ 에서 $1.23\mu W$ 의 광조사시에 약 49의 광이득을 나타내었는데, AlGaAs/GaAs HPT의 약 44에 비해 2.9배 가량 향상된 결과였다. InGaP/GaAs HPT가 AlGaAs/GaAs HPT의 광이득에 비해 월등히 향상된 이유는 빛 광이득 식을 추출하는데 사용되는 $G \approx \beta\eta$ 라는 일반적인 표현으로부터 설명되어질 수 있다. 두 HPT사이 베이스-컬렉터 광다이오드의 양자효율 η 가 동일하다고 가정하면, 전기적 특성이 뛰어난 InGaP의 외인성 베이스 표면에 대한 이중포장이 전류이득 β 를 증가시켜 결국 InGaP/GaAs HPT의 향상된 광이득 특성을 이끌어냈다는 결론에 도달할 수 있다.

그림 5에서 3전극 구성 HPT의 베이스 전류에 대한 함수로써 표현된 광이득을 나타내었다. 베이스-에미터 바이어스가 증가함에 따라 양 HPT의 광이득은 증가하였다. 이 결과는 기존의 2전극 구성에 비해 HPT의 3전극 구성이 DC 이득 특성을 향상시킬수 있음을 확인할 수 있었다.[8] $2\mu A$ 의 베이스 전류에 의해 InGaP/GaAs 및 AlGaAs/GaAs HPT는 각각 18%, 27%의 향상을 보였다. 또한 3전극 구성에서도 역시 InGaP/GaAs HPT가 약 61의 높은 광이득을 나타내어 AlGaAs/GaAs HPT보다 2.5배 가량 향상된 특성을 나타내었다.

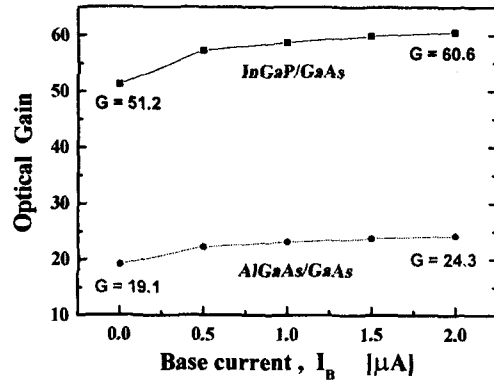


그림 5. 베이스 바이어스 인가에 따른 HPT의 광이득 변화 ($P_{in}=1.23\mu W$, $V_{CE}=3V$)

V. 결론

InGaP/GaAs HPT는 고유의 우수한 물리적 특성에 의해서 2전극 구성은 물론 3전극 구성에서도 AlGaAs/GaAs HPT에 비해 광이득 특성이 2.5배 이상 향상된 결과를 나타내었다. 따라서 InGaP-GaAs 물질 시스템은 전자소자(HBT)로써 뿐만아니라 광검출기(HPT)로써도 우수한 특성을 나타내므로 단파장 광수신기 OEIC에 훌륭히 응용되어질 수 있을 것으로 사료된다. 또한 베이스 전극을 통해 외부 전류를 공급하는 3전극 구성에 의해 HPT의 광이득을 향상시킬수 있음을 확인하였다. 이러한 3전극 구성은 HPT의 고속응답 특성의 향상에도 영향을 줄것으로 예견되는데, 추가실험의에도 자세한 정량적 분석이 필요하다.

[* 본 논문은 2000년도 한국과학재단의 연구비 지원에 의해 수행되었음. (과제번호; 2000-1-30200-019-3)]

Reference

- [1] T. Hausken, *Compound Semiconductor*, 6(3) p23, 2000
- [2] Y. Matsuoka et al, *Solid-State Electronics*, 38(9), p1703, 1995
- [3] H. Kamitsuna, *J. Lightwave Tech.*, 13(12), p2301, 1995
- [4] H. Wang et. al., *Electron. Lett.*, 22, p391, 1986
- [5] W. Liu et. al., *ED*, 40(8), p1378, 1993
- [6] S. Govindaswamy et. al., *Electro-chemical Soc. Proc.*, 98-12, p304, 1998
- [7] W. Liu et al, *EDL*, 14, p301, 1993
- [8] S. Chandrasekhar et. al., *EDL*, 12(10), p550, 1991