

## 밀리미터파 InP 소자기술

.....



범진욱

서강대학교 전자공학과 교수



윤상원

서강대학교 전자공학과 교수

### 요약문

InP 소자 기술은 밀리미터파 회로 제작에 지금까지 개발된 기술 중 가장 경쟁력 있는 기술로 InP HEMT와 HBT를 이용하여 100 GHz 이상의 회로가 만들어지고 있다. GaAs소자 기술에 비해 InP 소자기술은 주파수 특성과 잡음특성, 집적도에 있어서 우수하나 반면에 V-band 이하의 주파수에서 전력특성이 나쁘며, 가격이 비싼 단점이 있다. V-band 이상의 고주파 대역에서 InP소자기술은 대부분의 면에서 GaAs소자기술을 능가하여 극초고주파에서 적용가능한 유일한 소자기술이 된다. 본 논문에서는 InP 소자 기술에 대한 기본적인 내용과 응용 예를 소개한다.

### 1. 개요

기존에 주로 군사용으로 이용되던 밀리미터파 (30GHz이상) 대역이 WLAN(Wireless Local Area Network), LMDS(Local Multiple Distribution Services) 및 자동차 충돌방지 레이더 등의 상업용으로 활용되기 시작하면서 급격한 이

용 증가 추세를 보이고 있다. 이 같은 급격한 이용의 증가는 고성능과 저가를 동시에 만족시키는 monolithic millimeterwave integrated circuit(MMIC)의 개발을 촉진시킨다. 지금 현재 기술적으로 사용하고 널리 쓰이는 밀리미터파 전자소자 기술은 크게 GaAs pseudomorphic high electron mobility transistor(pHEMT) 및 Heterostructure Bipolar junction Transistor (HBT)와 InP HEMT와 HBT, SiGe HBT 등으로 구분된다. 이중 InP계 HEMT 및 HBT는 밀리미터파 신호 처리에 가장 적합한 전자소자로 개발되어 왔다. InP계 화합물 반도체란 InP 기판에 결정성장될 수 있는 일련의 물질로 InP,  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ,  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ , InGaAsP 등을 포함한다. 이러한 전통적인 구분 이외에도 최근 metamorphic기법과 같은 결정성장기법의 발전으로 위와 다른 조성비의 반도체 등도 포함하게 되었다[1, 2]. InP계 화합물반도체가 밀리미터파용 전자소자로 각광받는 이유는 InGaAs에서의 높은 전자이동도와 빠른 전자속도에 기인한다. 실온에서  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 의 전자이동도는 대략  $11000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ [3]으로 GaAs의  $4600 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 이나 GaAs기판 위에 pseudo-morphic 성장되는  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ 의  $5800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ [4]보다 월등히 큰 값

으로  $f_T$ ,  $f_{max}$ ,  $g_m$  값 향상과 저항을 줄여 noise figure와 전력이득 등을 개선한다. InP기판이 GaAs 기판에 비해 약 1.5배 좋은 열전도도를 갖는 것도 전력소자의 제작에 도움이 되는 요소이다. 몇 가지 중요한 InP계 화합물 반도체에 대해 binary 화합물의 기본적인 성질에 Vegard의 법칙을 적용시키거나 실험식을 적용하여 얻은 물성이 표 1에 요약이 되어 있다.

표 1. InP계 반도체의 물성. 반도체들의 격자상수는 모두 5.8687Å로 InP의 격자상수와 같다.

반도체	$In_{0.53}Ga_{0.47}As$	$In_{0.52}Al_{0.48}As$	InP
전자질량* [5]	0.044	0.39	0.075
저주파 유전율* [5]	14.1	12.7	12.61
열전도도* (W/cmK) [6]	0.46	0.8	0.68
Energy Bandgap† (eV)	0.7734	1.543	1.34
InP와 valence band편차 측정값 (eV) [5]	0.346	0.39 0.36 0.46	-
실온전자 이동도 ( $cm^2/Vs$ )	11,000 [3]	-	2800 [4]
포화전자속도 (cm/s) [4]	$2.1 \times 10^7$	-	$2.4 \times 10^7$

\*Vegard의 법칙 적용

†실험식 (empirical formula) 이용

InP기판은 한편 가격이 비싸며 기계적으로 약하고 큰 크기로 만들어지기 어려워 대량생산 및 산업화에 제약요인이 되고 InP와 격자상수가 일치하는  $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 의 작은 energy bandgap으로 이 물질에 Schottky 접촉의 형성이 어렵고 항복전압이 낮은 단점이 있다. 이러한 단점에도 불구하고, 이미 선진 화사를 중심으로 InP계 반도체에 대한 활발한 연구 및 적용을 통해 뛰어난 성능의 밀리미터파 소자와 회로가 생산되어 이용되고 있다.

## II. InP계 화합물 반도체의 결정성장

InP계 화합물 반도체 결정은 OMVPE(Organo-metallic Vapor Phase Epitaxy)와 MBE(Molecular Beam Epitaxy) 등의 결정성장방법에 의해 얻어진다. 전술한 방법 중 MBE기반의 결정성장방법이 전자 소자, 특히 HEMT의 경우 선호되는데 이는 MBE가 좋은 두께 조절성으로 HEMT의 얇은 층 성장에 유리하며 C 등의 유기금속(metal-organic)에 의한 불순물이 적어 전자속도를 높일 수 있기 때문이다. InP기판 위에 P화합물을 포함하지 않고 As 화합물인  $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 와  $In_{0.52}Al_{0.48}As$ 만 성장하는 경우 일반 MBE로 쉽게 성장이 가능하다. Al을 포함한 반도체는 Al의 산화에 따른 신뢰성 문제가 지속적으로 일어나기도 하므로  $In_{0.52}Al_{0.48}As$  대신 InP를 선호하여 쓰기도 하는데 이 경우에는 P화합물의 결정성장이 필요하다. P의 solid source를 사용하는 일반 MBE는 P가 대기 중에서의 활발하게 자발적인 산화반응을 일으키므로 P source의 소실과 때로는 MBE의 화제 등의 문제점이 있다. 이런 이유로 유 지 보수가 까다로운 solid source P보다 gas source P를 이용한 MBE가 많이 쓰이는데 크게 V족의 원소만을 gas로 공급하는 GSMBE(Gas Source MBE)와 III족과 V족 원소를 모두 gas로 공급하고 Chemical Beam Epitaxy(CBE)라고도 불리는 MOMBE(Metal Organic MBE)로 구분된다.

## III. InP계 HEMT

InP계 반도체를 이용한 HEMT는 InGaAs 채널과 InAlAs 배리어로 구성된다. InGaAs에서는 전자질량이 작고 전자이동도가 높아 고속특성을 구현하는데 크게 도움이 된다. 주파수특성을 향상시키기 위해서 HEMT의 경우 gate길이를 짧게 하여 전자의 이동시간을 줄이는 접근방법이 쓰인다. Electron beam lithography에 의해 형성되는 초미세 gate의 제작 기술 수준은 0.1 $\mu m$ 을 일상적으로 만들며 수십 nm의 gate까지도 제작이 가능한 정도로 발전하였다. 초미세 gate를 이용하여 InP HEMT의 주파수 특성은 이미  $f_T$  350 GHz [7],  $f_{max}$  600 GHz 이상[8]을 넘어섰다.

고출력증폭기 제작을 위한 소자는 큰 전류밀도와 항복전압 필요하다. 고전류밀도를 위해서 흔히 쓰이는 방법은 InGaAs 채널 밑의 InAlAs 버퍼층에

doping을 하거나 2개 이상의 채널 [9]을 형성시켜 많은 양의 이동전하를 형성시킨다. 항복전압은 InGaAs의 작은 energy bandgap의 영향으로 GaAs계와 비교해 작는데 이를 증대시키기 위해 최근에 일반적인 InGaAs 채널을 InP와 InGaAs의 적층구조로 채널을 형성한 composite-채널 방법이 사용되기도 한다[3]. 이렇게 형성된 channel 낮은 drain bias상태에서는 InGaAs만이 전자의 이동에 관계하고 drain이 bias가 증가되면 전자가 InP채널로 이동해 항복전압 향상에 도움을 준다(그림 1).

HEMT 제작시 공정의 안정화를 위해서 가장 중요한 부분이 미세 gate와 연관된 공정이다. sub- $\mu\text{m}$  미세 gate을 형성하는 과정은 electron-beam lithography에는 주로 사용된다. Electron-beam lithography가 미세 gate을 형성하는데는 많은 장점이 있으나 대량생산은 어려운데 이러한 문제점은 위상전이 (phase shift) mask와 side wall 공정을 사용한 optical lithography를 사용함으로써 해결하여 0.12 $\mu\text{m}$ 의 gate의 형성이 보고되었다[10].

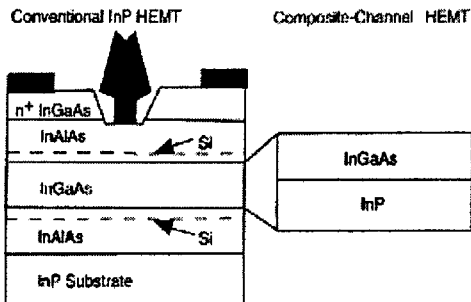


그림 1. 일반 InP HEMT와 composite-channel HEMT[3].

Threshold voltage특성에 영향을 미치는 recess-etch공정의 재현성을 위해 etch stop layer와 selective etch를 이용하는 방법이 사용된다. selective etch로는 P 화합물/As 화합물 사이에는 HCl 용액과 과산화수소수+인산용액 등이 있으며 InGaAs/InAlAs사이에는 succinic산과 HCl 용액 등이 있어 균일하고 재현성 높은 공정의 확립이 가능하다.

뛰어난 성능의 InP HEMT는 저잡음 증폭기(Low Noise Amplifier : LNA), 전력증폭기(Power Amplifier : PA) 등의 밀리미터파 회로와 10 Gbps

나 40 Gbps등의 고속광통신용 디지털 및 아날로그 회로로 많이 적용되고 있다. InP HEMT를 이용한 LNA의 경우 밀리미터파 영역에서 대단히 활발한 연구개발이 수행되어 W-band(95 GHz)에서 20 dB gain, 2.5 dB의 NF를 갖는 LNA, 3.8~4.5 dB NF와 gain 14.5 dB이상을 갖는 118 GHz LNA 등이 의해 보고되었다[11].

전력증폭기의 경우 InP HEMT기술과 GaAs pHEMT기술을 비교하면 V 또는 W-band까지는 GaAs pHEMT가 높은 전력밀도와 전력첨가효율(power-added efficiency : PAE)면에서 우수한데 비해 InP HEMT는 고이득, 고효율면에서 우수하다[12]. W-band이상에서는 InP HEMT가 거의 모든 면에서 우수하여 95GHz에서 427mW, 19% PAE 전력증폭기[13], 140GHz에서 30dB의 이득을 갖는 3단 증폭기[14] 등을 이루었다. 그외에 InP HEMT는 213GHz oscillator[15], 5 dB 이득의 1~180GHz traveling amplifier [16] 등이 제작되는 등 많은 예술의 경지의 제품이 개발되고 있다. InP HEMT를 이용한 디지털 회로 역시 많이 연구되는데 Source-Coupled FET Logic(SCFL)을 사용하여 기본 gate과 flipflop을 구성하는 방식으로 49 GHz static divider[17]와 80 Gbps multiplexer [18] 등이 보고되었다.

#### IV. InP계 HBT

InP HBT는 RF회로의 여러 부분에서 응용이 가능하겠으나 가장 큰 시장이 되리라 예측되는 곳은 이동통신용 전력증폭기이다. 이는 turn-on voltage가 낮고 RF power gain이 크기 때문에 GaAs HBT에 비해 유리하다. InP HBT는 고선형성, 높은 PAE와 전력밀도로 현재 GaAs HEMT정도의 가격으로 소형 전력증폭기로 만들어질 수 있다[19]. InP계 반도체로 만들어지는 HBT는 이미터가 energy bandgap이 큰 AlInAs 또는 InP로 이루어지며 베이스는 InGaAs, 콜렉터는 InGaAs를 사용하거나 (single heterojunction) 항복전압을 높이 고자할 때 energy bandgap이 큰 InAlAs나 InP 같은 물질이 사용된다(double heterojunction). 소자의 주파수 특성의 척도인  $f_T$ 는 주로 베이스의 두께와 콜렉터 층의 두께에 의해 결정된다.  $f_T$ 를 증가시키기 위해서는 베이스와 콜렉터의 두께를 감소하는 방법이 가능하지만 베이스의 두께가 감소하는 경우 베이스 저항이 증대하게 되며 콜렉터 두께의 감소하는 경우에는 항복전압이 감소하고 베이스와 콜렉터

사이의 capacitance가 커져 출력단에서 입력단으로의 feedback이 증가하게 된다. 주어진  $f_T$ 에 대해 HBT의  $f_{max}$ 는 베이스 저항을  $R_B$ , 베이스-콜렉터 capacitance를  $C_{BC}$ 라고 할 때 대략적으로 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$f_{max} = \sqrt{\frac{f_T}{8\pi R_B C_{BC}}}$$

그러므로  $f_T$  증가를 위한 베이스와 콜렉터 두께의 감소는  $f_{max}$ 의 급격한 감소로 이어져 RF응用に 좋지 않은 영향을 주게 된다. FET의 경우 gate 길이를 줄여 주파수 특성을 향상시키려는 노력과 유사하게 HBT 소자연구는  $C_{BC}$ 를 줄이는 노력에 집중하고 있다.  $C_{BC}$ 를 줄이는 방법으로는 regrowth법[20], transferred substrate법[21], side-wall 공정법[22] 등이 있다. 이 중 transferred substrate법은 이미터와 베이스 공정 후 웨이퍼 전면을 GaAs 등 다른 기계적 기판(mechanical substrate)에 붙여 InP기판을 제거하고 InP기판과 접해 있는 콜렉터를 공정하는 방법이다(그림 2).

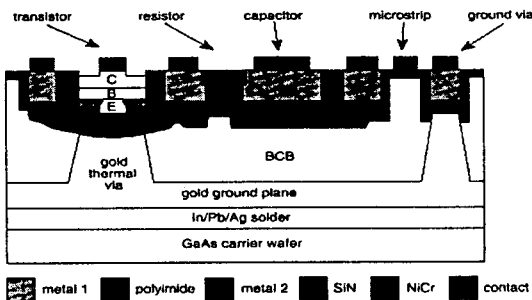


그림 2. Transferred-substrate법에 의한 HBT의 단면[21].

이 방법을 통해 베이스-콜렉터 접합 영역을  $0.4 \mu\text{m}$ 로 하여  $C_{BC}$ 를 최소화함으로써  $f_{max}$ 를 증진시켜  $f_T=162 \text{ GHz}$ ,  $f_{max} 800 \text{ GHz}$ 이상인 소자를 제작하였다[21]. 고속 HBT의 경우 대부분이 작은 베이스-콜렉터 접합 영역 이외에도 emitter width가  $1 \mu\text{m}$  이하인데 이는 distributed base 저항을 줄여 RF특성을 향상시키고 작은 전류로 shot 잡음을 줄이면서도 HBT가 좋은 주파수 특성을 유지하게 하기 위해서이다. 이 같은 특성의 HBT를 이용하여 300

GHz 이상의 IC제작이 가능하게 되어 여러 가지 마이크로파 및 밀리미터파 회로와 더불어 특히 고속 광통신 회로와 같은 광대역 회로에 많이 쓰이고 있다.

HBT를 이용한 디지털회로는 current mode logic(CML)과 emitter coupled logic(ECL)의 master-slave flip flop으로 만들어져 약 50 GHz 정도나 그 이상 작동하여 [21, 23] 40 Gbps 고속광통신은 물론 그 이상의 신호처리용 회로까지 제작이 가능하게 되었다. 이러한 고속 HBT 디지털 회로는 대량생산이 가능한 상태여서 이 분야의 기술이 급속도로 발전할 것이라 예상된다.

HBT의 아날로그 및 RF회로 역시 밀리미터 대역에서 광대역 증폭기, oscillator, 전력증폭기 등의 여러 분야에서 사용된다. 광대역 증폭기의 경우 분산형 설계를 사용하기도 하나 [24] 주로 feedback을 많이 사용하여 bandwidth를 늘이는 형태가 많이 사용되는데 50 GHz differential input amplifier, 50 GHz bandwidth broadband Darlington amplifier [25] 등이 있다. 50 GHz 광대역 증폭기의 경우 [25] 10 dB gain에 약 8 dB의 noise figure를 보였다.

InP계 HBT를 oscillator로 사용할 때 특히 유리한데 이는  $1/f$  잡음의 corner frequency가 수 kHz로 HEMT에 비해 월등히 작기 때문에 동급의 AlGaAs/GaAs계 HBT와 비교할 때도 약 1/3 정도 밖에 되지않는다[26]. HBT의 저잡음 증폭기 응용의 경우 일반적으로 HEMT보다 진폭잡음(amplitude noise) 특성이 열악한데 이는 HBT소자 크기의 축소와 base저항의 개선할 수 있다. 이러한 개선 가능성에도 불구하고 HBT는 저잡음 회로에는 거의 사용되고 있지 않다.

## V. Metamorphic 소자

Metamorphic법은 GaAs기판에 약  $1 \mu\text{m}$  정도에서 두께에서 점진적으로 격자상수를 변화시켜 InP계 반도체와 격자상수가 일치되는 물질 성장을 가능케 하는 방법이다. 이렇게 제작된 metamorphic HEMT(MHEMT)의 장점은 GaAs기판을 사용하여 InP보다는 대형 웨이퍼(4인치)에 대량생산이 가능하다는 것과 필요에 따라 InP와 격자 일치하지 않는 물질을 성장할 수 있다는 점이다. InP HEMT의 경우 항복전압이 낮는데 항복전압 특성을 개선시키고자 할 때는  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  보다 In 적은 농도의  $\text{In}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}$  채널을 사용할 수 있다[1]. InP와 격자일치된 MHEMT의 경우 InP HEMT와 비슷한 전자기동도

를 가지며 이런 소자는  $0.15\mu\text{m}$  gate을 사용하여  $f_T=150\text{ GHz}$ 가 보고 되었다[2]. 하지만 신뢰성에 문제가 있는 것으로 알려져 있어 아직 기술개발이 더 진행되어야 하는 상황이다[12].

## VI. 결 론

InP HEMT는 GaAs HEMT에 비해 주파수 특성과 잡음 특성이 좋고 V 또는 W-band 이상에서는 전력과 PAE면에서 우세하며 InP HBT는 GaAs HBT에 비해 적은 전력소모와 높은 PAE, 기관의 열전도가 뛰어나 집적도를 높일 수 있어 생산성에서도 유리하다. HEMT는 HBT에 비해 잡음특성이 우수한 반면 선형성과 집적도, 공정의 용이성, 위상잡음 특성 면에서는 뒤지나 각각의 소자는 응용 목적에 따라 여러 방면으로 광범위하게 이용되고 있다. InP HEMT와 HBT는 밀리미터파 및 그 이상의 주파수 대역에서 가장 경쟁력있는 소자이며 이를 이용하여 여러 가지 W 및 D-band를 포함한 고주파 회로가 제작되고 있다.

## 감사의 글

이 연구는 1999년도 서강대학교 교내 연구비 지원에 의하여 이루어졌음.

## 참 고 문 헌

- [1] C. S. Whelan, et al. "High Breakdown Voltage InAlGaAs/In<sub>0.32</sub>Ga<sub>0.68</sub>As Metamorphic HEMT for Microwave and mm-wave Power Applications", IEEE MTT-S, WE4E-2, Anaheim, CA, June 1999.
- [2] P. F. Marsh, et al., "Low Noise Metamorphic HEMT Devices and Amplifiers on GaAs Substrates", IEEE MTT-S, MO2B-2, Anaheim, CA, June 1999.
- [3] Y. C. Chen, et al. "Composite-Channel InP HEMT for W-Band Power Amplifiers", 11th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, pp. 305-306, Davos, Switzerland, 1999.
- [4] S. J. Pearton and N. J. Shar, Heterostructure Field-Effect Transistors, Chapt. 5, High Speed Semiconductor Devices, S. M. Sze Ed., Wiley, 1990.

- [5] V. Swaminathan, Properties of InP and Related Materials, A. Katz, Ed, Indium Phosphide and Related Materials : Processing, Technology, and Devices, Artech House, 1992.
- [6] M. G. Holland, Semiconductors and Semimetals, Vol. 2, ed. R. K. Willardson and A. C. Beer, New York : Academic Press, p. 3, 1966.
- [7] T. Suemitsu et al. "30-nm gate InAlAs/InGaAs HEMT's lattice-matched to InP substrates", IEDM Technical Digest, pp. 223-226, 1998.
- [8] M. Matloubian, et al., "Submillimeter wave InP-based HEMTs with  $f_{\text{max}}$  over 600 GHz", Ultrafast Electronics and Optoelectronics Conference, April 1999.
- [9] H. Maher, J. Decobert, A. Falcou, G. Post, A. Scavennec, "A 3-channel InP-HEMT with low output conductance", 11th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials Davos, Switzerland, 1999.
- [10] H. J. Siweris, H. Tischer, T. Grave, W. Kellner, "A Monolithic W-Band HEMT VCO with Feedback Topology", INTERNATIONAL MICROWAVE SYMPOSIUM DIGEST, June 1999.
- [11] M. Nishimoto et al., "HIGH PERFORMANCE D-BAND (118 GHz) MONOLITHIC LOW NOISE AMPLIFIER", IEEE MTT-S, MON6-5, Anaheim, CA, June 1999.
- [12] M. Matloubian, "Advances in Millimeter-wave FET MMIC Technology", IEEE MTT-S, TUE3-1, Anaheim, CA, June 1999.
- [13] D. L. Ingram et al. "A 427 mW, 20 % Compact W-Band InP HEMT MMIC Power Amplifier", IEEE MTT-S, MON6-4, Anaheim, CA, June 1999.
- [14] C. Pobanz, et al., "A High-Gain Monolithic D-Band InP HEMT Amplifier", IEEE GaAs IC Symposium Digest, pp. 41-44, 1998.
- [15] S. E. Rosenbaum, et al., "155 GHz and

- 213 GHz AlInAs/GaInAs/InP HEMT MMIC Oscillators", IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., vol. 43, no. 4, pp. 927-932, 1995.
- [16] B. Agarwal et al., "112-GHz, 157-GHz, and 180 GHz InP HEMT traveling-wave amplifiers", IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., vol. 46, no. 12, pp. 2553-2559, 1998.
- [17] Y. Umeda, et al., "SCFL static frequency divider using InAlAs/InGaAs/InP HEMTs", Proc. 25th European Microw. Conf., Bologna, pp. 222-228, Sep. 1995.
- [18] T. Otsuji, et al., "An 80-Gbit/s multiplexer IC using InAlAs/InGaAs/InP HEMTs", 1997 IEEE GaAs IC Symp. Tech. Dig., pp. 183-186, Oct. 1997.
- [19] A. K. Oki, et al., "Future Technologies for Commercial and Defense Telecommunication Electronics", IEEE MTT-S, WE2E-1, Anaheim, CA, June 1999.
- [20] T. Nomura, et al., "Novel InP/InGaAs D-HBTs with selective multisteps MOCVD regrowth techniques for high-speed application", IEDM technical digest, 30\_3, 1997.
- [21] M. Rodwell et al., "Transferred-Substrate Heterojunction Bipolar Transistor Integrated Circuit Technology", 11th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials Davos, Switzerland, 1999. B. Agarwal, et al., "A 50 GHz Feedback Amplifier with AlInAs/GaInAs Transferred-Substrate HBT", IEDM technical digest, 30\_2, 1997.
- [22] Tohru Oka, et al., "InGaP/GaAs HBT's with High-Speed and Low-Current Operation Fabricated Using WSi/Ti as the Base Electrode and Burying SiO<sub>2</sub> in the Extrinsic Collector", IEDM technical digest, 30\_1, 1997.
- [23] Sokolich et al., "Optimizing InP HBT-Technology for 50 GHz Clock-rate MSI Circuits", 11th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials. pp. 195-198, Davos, Switzerland, 1999.
- [24] S. Mohammadi et al., "Optimal Design and Experimental Characterization of High-Gain GaInP/GaAs HBT Distributed Amplifiers", IEEE MTT-S, TU4C-3, Anaheim, CA, June 1999.
- [25] A. Huber et al. "Design and Characterization of a 50 GHz InP/InGaAs HBT amplifier", 11th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials. pp. 191-194, Davos, Switzerland, 1999.
- [26] U. G. Tich, et al., "24-27 GHz dielectrically stabilized oscillators with excellent phase noise properties utilizing InP/InGaAs HBTs", IEEE MTT-S, TU2F-2, Anaheim, CA, June 1999.