

# THz 대역 반도체소자 및 회로 개발 동향

이재성 (고려대학교)

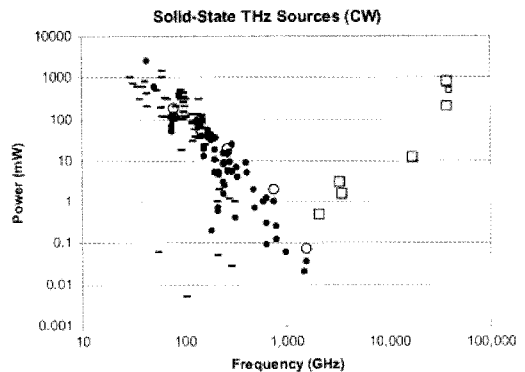
## I. 서론

테라헤르츠 주파수 대역은 대략적으로 1 THz (=  $10^{12}$  Hz) 근방의 주파수를 지칭하며 진공에서의 파장으로 환산하면 0.3 mm 부근에 해당한다. 기술적 용어로서의 '테라헤르츠 대역'이 가리키는 정확한 범위에 대해서는 여러 가지로 정의가 되고 있으나, 0.1 THz - 10 THz 의 범위가 일반적으로 받아들여지고 있다.

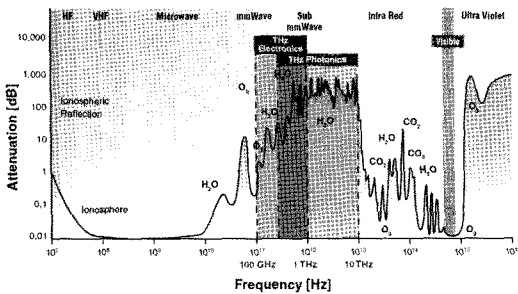
테라헤르츠 대역 전자기파는 주파수 측면에서 인접하고 있는 마이크로파나 광파 대역에 비해 여러 가지 대별되는 특성을 가지고 있다. 그 가운데 응용적 측면에서 중요한 특성으로서는 플라스틱, 종이, 옷 등과 같은 다양한 포장성 물질에 대해 우수한 투과성을 보이는 반면, 수분을 풍부히 함유한 인체 등과 같은 생물학적 매질에 대해서는 높은 흡수성을 보인다는 사실을 들 수 있다. 이 밖에도 대기 혹은 천체를 구성하는 주요 분자의 진동 에너지에 대응되는 주파수 특성 등을 지닌다는 장점 등을 가지고 있기 때문에 다양한 분야에 있어 큰 응용 잠재성을 지니고 있다고 할 수 있겠다.

그러나, 테라헤르츠 대역은 '테라헤르츠 갭

(terahertz gap)' 이라는 별칭이 암시하듯 마이크로파, 광파의 인접 대역에 비해 상대적으로 연구 개발 및 응용이 미진해 온 것이 사실이다. 그 이유로서는 우선 테라헤르츠 대역 주파수 신호를 생성하고, 검출하고, 처리할 수 있는 소자의 개발에 여러 어려움이 있다는 점을 들 수 있겠다. 특히 만족할만한 출력전력을 발생하는 신호원의 개발에 큰 어려움이 있어왔는데, <그림 1>이 이러한 난점을 상징적으로 보여주고 있다. 최근까지 보고된 테라헤르츠 대역 연속 파형 (CW) 신호의 생성 출력전력과 주파수와의 관계를 나타낸 이 그림은 테라헤르츠 대역의 중심으로 접근



<그림 1> 생성된 CW 테라헤르츠 신호의 주파수 대비 출력전력



〈그림 2〉 주파수에 따른 대기 중 감쇠도 (dB/km)

할수록 생성 신호의 출력전력이 급격히 감소하는 경향을 뚜렷이 보여주고 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 신호원 부재의 어려움 외에도 <그림 2>에 보이는 바와 같이 100 dB/km 에 이르는 대기 내에서의 높은 감쇠도도 테라헤르츠 주파수의 효과적인 활용에 장애요인으로 작용해 왔다<sup>[2]</sup>.

이러한 개발상의 난점에도 불구하고, 최근 들어 테라헤르츠 대역에 대한 관심의 크게 고조되고 있으며, 이와 함께 많은 연구가 활발하게 진행이 되고 있다. 그 범위로서는 security imaging 및 bio imaging 을 비롯, 분광 기술 및 센서, 전파천문학 등 다양한 분야에 이르고 있다. 이와 함께 최근 들어서 새롭게 대두되고 있는 분야로서는 테라헤르츠 대역이 제공할 수 있는 광활한 주파수 대역폭을 활용하기 위한 광대역 무선 통신 시스템 응용이 있으며, 이와 관련한 IEEE 의 표준화 활동이 이미 개시되었다는 사실에서 무선 통신 응용에 대한 기대를 가늠할 수 있다<sup>[3,4]</sup>.

테라헤르츠 대역 응용의 성공여부는 이 주파수를 효과적으로 생성, 검출, 신호처리 가능한 소자 및 이에 기반한 회로의 안정적 개발에 달려 있다고 볼 수 있다. 테라헤르츠 소자 연구는 광소자의 동작 주파수를 낮추는 하향 방식과 전자소자의 동작 주파수를 높이는 상향 방식으로 대별해서 볼 수 있다. 이 두 가지 방식 중 지금까지의

테라헤르츠 연구 및 응용은 광학적 방식에 기반한 하향 방식이 그 근간을 이루어 온 것이 사실이다. 그러나 최근 들어 반도체 전자소자 동작 특성의 급속한 향상이 이루어짐에 따라, 기존에는 일부 수동 소자에만 국한되어 있던 상향 방식 연구가 범용 능동소자인 트랜지스터 및 이에 기반한 회로로 확대되고 있는 추세이며, 이에 대한 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 사실 반도체는 반도체 레이저, 광검출기와 같은 광소자와 트랜지스터, 다이오드로 대변되는 전자소자에 모두 성공적으로 응용되어온 물질이며, 따라서 테라헤르츠 응용에 있어서도 상향 및 하향 방식 모두에 적용될 수 있다고 볼 수 있다. 그러나 본 고에서는 반도체 전자소자에 그 논의를 한정하도록 하고, 테라헤르츠 반도체 전자소자 및 회로의 최근 개발 동향을 살펴보고자 한다.

## II. 테라헤르츠 반도체 소자기술

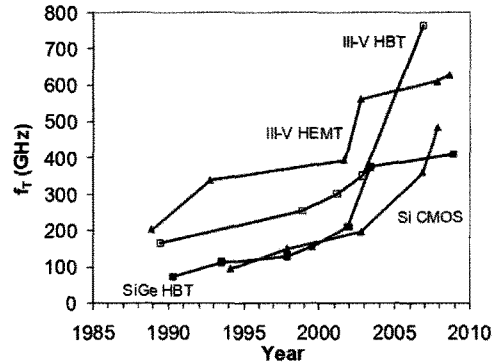
테라헤르츠 영역에 응용될 수 있는 반도체 전자소자로는 다이오드와 트랜지스터를 들 수 있다. 이 중 다이오드는 비교적 오랜 기간 테라헤르츠파 생성 및 검출에 응용되어 온 것이 사실이다. IMPATT (IMPact Avalanche Transit Time) 다이오드, Gunn 다이오드, RTD (Resonant Tunneling Diode) 등은 테라헤르츠파의 생성에 적용될 수 있으며, 100 GHz 주파수 기준 각기 최고 ~1 W, ~100 mW, ~1 mW 내외의 RF 출력 전력을 나타내는 것으로 보고되고 있다 (주파수가 증가하면 출력 전력은 급격히 감소한다)<sup>[5]</sup>. 또한 SBD (Schottky Barrier Diode) 는 테라헤르츠파의 검출에 흔히 사용되며, 등가모델에 기반하여 계산된 동작주파수는 Si 기반 공정으로

도 1 THz 를 상회하는 값을 나타낸다<sup>[6]</sup>.

그러나 다이오드는 2극 소자라는 근본적 한계가 있으며 따라서 3극 소자인 트랜지스터에 비해 그 응용성이 많이 뒤지는 것이 사실이다. 트랜지스터는 우선적으로 신호의 증폭이 가능하다는 절대적인 장점을 지니고 있다. 일반적인 전기전자 시스템과 마찬가지로 테라헤르츠 시스템에 있어서도 신호증폭 기능은 시스템의 성능 향상에 절대적으로 기여한다. 통신시스템을 비롯한 다양한 테라헤르츠 응용이 가능한 헤테로다인 수신단 (혹은 검출단) 을 예로 들면, 트랜지스터의 적용이 가능한 경우 첫 단을 저잡음 증폭기로 구현 가능할 뿐 아니라 다음 단에 연결되는 mixer 또한 이득이 있는 (혹은 손실이 상대적으로 작은) active mixer 로 구현 가능하다. 따라서 수신단 전체의 증폭도의 향상과 함께 잡음 특성의 개선을 가져올 수 있으며 결과적으로 수신단의 감도를 향상시키는 결과를 낳는다, 마찬가지로 테라헤르츠 송신단 (혹은 발생단) 에 있어서도 트랜지스터가 적용되는 경우 마지막 단을 전력증폭기로 구현 가능하므로 출력 전력을 추가로 향상시킬 수 있는 가능성을 제공한다. 이와 더불어 트랜지스터는 앞서 언급된 다이오드들의 구조에 비해 시스템 집적이 상대적으로 수월하다는 점도 장점으로 들 수 있다.

이들을 종합하여 볼 때, 전자소자 기반 테라헤르츠 시스템에 있어서 트랜지스터의 적용 가능성은 시스템의 성능 향상과 적용 범위의 확대에 결정적인 역할을 한다. 이러한 이유에서 이른바 상향 방식 테라헤르츠 기술 개발에 있어서의 핵심은 테라헤르츠 급 초고속 트랜지스터 소자 기술의 개발이라 할 수 있겠다.

〈그림 3〉은 지난 20년간의 트랜지스터 동작 속도 향상의 경향을 다양한 종류의 소자에 대해



〈그림 3〉 여러 반도체 소자의 동작속도 향상 경향

보여주고 있다. 그림에 나타난 차단주파수  $f_T$  (전류이득이 1이 되는 주파수) 값은 각 시점에 보고된 최고 속도 값으로서, GaAs 혹은 InP 등으로 대표되는 화합물반도체 계열에 기반한 HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) 와 HEMT (High Electron Mobility Transistor) 소자가 상대적으로 우월한 고속 동작 특성을 지속적으로 보여 왔음을 알 수 있다. 따라서 테라헤르츠 대역 응용이 가능한 초고속 트랜지스터 소자로서의 일차적 고려 대상은 이들 화합물반도체 소자가 될 수 있겠다.

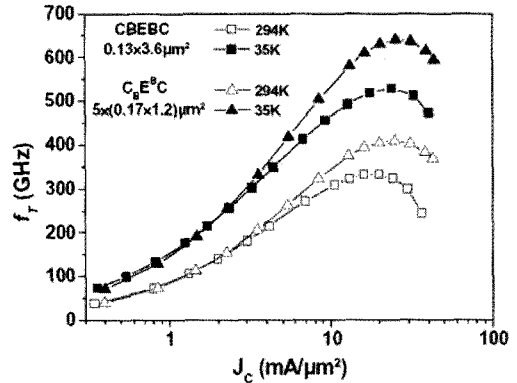
HBT 는 기본적으로 bipolar transistor 의 일종이므로 전류 구동 능력이 뛰어나고 상대적으로 큰 값의 트랜스컨덕턴스  $g_m$  을 보이지만 에피층 및 제작 공정의 상대적 복잡성이 그 약점으로 지적될 수 있다. 2006년 발표된 University of Illinois at Urbana Champaign 의 소자가  $f_T=765$  GHz 의 값을 보여 이 시점에서 최고의 속도로 기록되고 있다<sup>[7]</sup>. 반면 HEMT 는 FET (Field Effect Transistor) 의 일종으로서 그 동작 특성이 E-beam lithography 에 크게 의존한다는 한계가 있으나, 상대적으로 에피층의 구조가 간단하다는 장점을 가지고 있다. 2008년 발

표된 MIT 의 HEMT 소자는 628 GHz 의  $f_T$  값을 나타내는 것으로 보고되고 있다<sup>[8]</sup>.

상대적으로 Si 기반 소자들에 비해 우수한 이들 소자의 동작 속도는 기본적으로 화합물반도체의 우수한 물성적 특성에 기인하고 있다. 특히 높은 전자의 전송도 (mobility) 및 순간적으로 높은 전기장 영역에 진입할 때 발현되는 탄도전송특성 (ballistic transport) 이 뛰어나기 때문에 n-type 소자에 있어서 매우 높은 동작 주파수를 보이게 된다. 그러나 한편으로 이들 화합물 반도체 계열의 소자는 일반적으로 비평평 (non-planar) 구조를 가지고 있고 소자를 구성하는 에피층이 높은 defect density 를 보이는 경향이 있어 Si 기반의 소자에 비해 상대적으로 신뢰성에 대해 취약한 면을 보인다. 또한 고가의 기관 가격 및 소구경의 웨이퍼 크기 (4"-6" vs. 실리콘의 8"-12"), 그리고 고비용의 에피성장 공정과 e-beam 노광 기술 등으로 인해 대량 생산에 있어서는 제작 비용에 있어 상대적인 단점을 보이게 된다.

이들과 대별되는 소자군으로서 Si 기반 소자들을 들 수 있는데, SiGe HBT 및 Si MOSFET 이 그 대표적인 소자이다. <그림 3>에서 보듯 이들 Si 기반 소자들도 최근 그 동작 속도가 빠르게 향상되어, 최근까지만 해도 기대하기 힘들었던 Si 기반 테라헤르츠 시스템의 가능성을 제시하고 있다. 특히 이들 Si 기반 소자들의 개발은 화합물반도체 소자의 경우와는 달리 기업의 주도하에 이루어지고 있기에, 안정적인 성능에 기반한 실제 제품들의 개발에 좀 더 가깝게 위치하고 있다고 볼 수 있다.

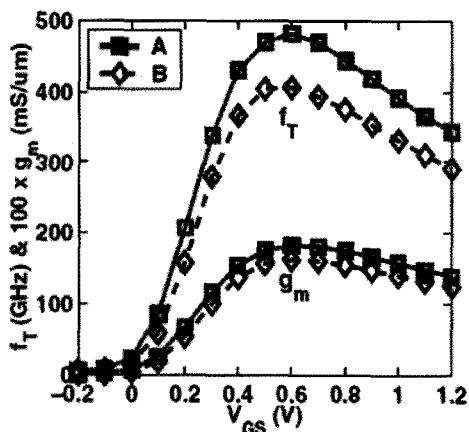
SiGe HBT 는 기본적으로 bipolar transistor 로서, 베이스 영역에 소량의 Ge 을 추가함으로써 일반적인 Si BJT (Bipolar Junction Transistor)



<그림 4> STM 의 SiGe HBT 동작 특성

에 비해 동작 특성을 향상시킨 소자이다. Si MOSFET 에 비해 우월한 전류 구동 능력 및 높은  $g_m$ , 그리고 우수한 소자간 균일도를 보이는 SiGe HBT 는 그 동작 속도의 꾸준히 향상이 이루어지고 있으며, 최근에는 STM 에 의해 410 GHz 의  $f_T$  를 보이는 소자가 개발된 바 있다 <그림 4><sup>[9]</sup>. 특히 이 소자는 T=35 K 의 저온에서는  $f_T$  가 640 GHz 까지 향상되는 것으로 측정되었다.

Si MOSFET 은 디지털 회로에의 성공적 적용에 힘입어 오늘날 전자 시스템의 주종을 이루고 있는 소자이다. 그러나 상당히 최근까지만 해도 RF 응용에는 적절치 않은 소자로 여겨져 온 것이 사실이다. 그러나 디지털 응용에의 성능 향상을 위한 소자 스케일링이 지속적으로 이루어짐에 따라 RF 특성도 더불어 향상되어 왔으며, 마침내 최근에는 IBM 에 의해  $f_T$ 가 485 GHz 에 달하는 소자가 개발되기에 이르렀다 <그림 5><sup>[10]</sup>. Si MOSFET 은 타 시스템과의 집적 가능성 및 소자의 호환성, 그리고 공정 비용에 있어 큰 장점을 가지고 있기 때문에 테라헤르츠 적용이 현실화 되는 경우 막대한 응용성을 지닐 것으로 예상된다.



<그림 5> IBM의 n-MOSFET 동작 특성

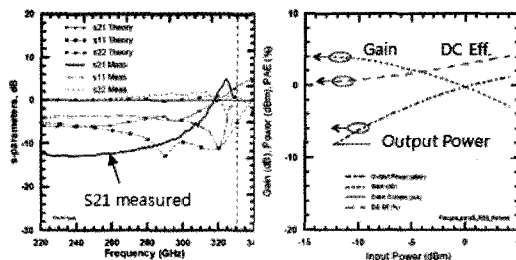
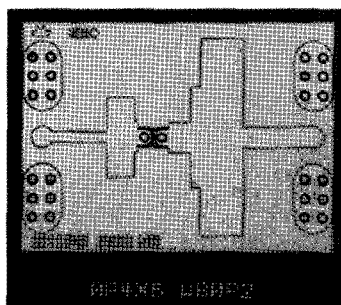
물성적 특성의 상대적 열세에도 불구하고, 이와 같은 Si 기반 소자가 화합물반도체 소자와 비견할 만한 속도 특성을 보일 수 있는 주요인으로서는 고도로 발달된 Si 공정기술을 들 수 있겠다. 이는 소자 구조의 정교한 최적화를 가능하게 하여, 궁극적으로 물성적 특성에서의 단점을 크게 보완하는 결과를 가져 온다. 이뿐 아니라 Si 소자는 화합물반도체 소자 대비 우수한 신뢰성 및 앞서 언급한 바와 같이 제작 비용 및 소자 호환성의 장점을 가지고 있어 화합물반도체 소자와는 또 다른 측면에서 테라헤르츠 응용에의 수월성을 지니고 있다고 할 수 있겠다.

### III. 테라헤르츠 반도체 회로

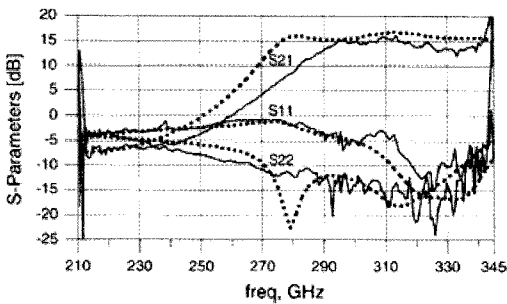
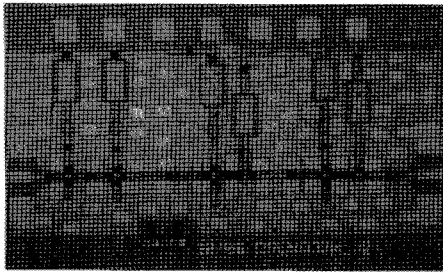
지금까지 살펴본 바와 같이 오늘날의 트랜지스터의 최고 동작 속도는 그 종류에 따라  $f_T$  기준 400 - 800 GHz 의 값을 보이고 있다. 회로의 동작 속도는 사용되는 소자의 동작 속도 보다는 일반적으로 낮지만, 앞으로 기술할 바와 같이 이

미 수백 GHz 의 성능을 보이는 결과가 보고되고 있으며, 앞서 정의한 기준에 따른다면 이미 테라헤르츠 대역에 진입하였다고 볼 수 있겠다. 본 장에서는 헤테로다인 시스템의 기본 구성 회로인 증폭기, oscillator, 그리고 mixer 등 세 가지 회로에 대해 최근의 주요 결과를 정리해 보기로 한다.

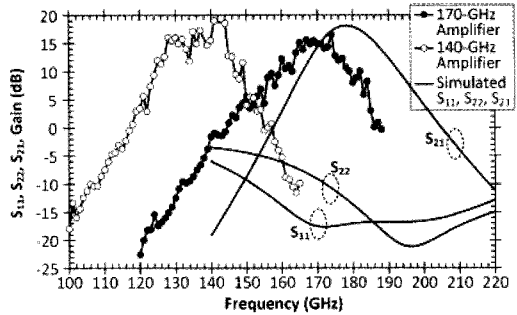
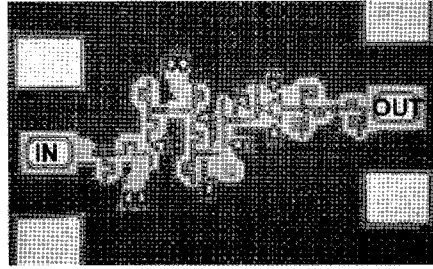
먼저 다양한 소자 기술에 기반한 증폭기의 결과를 살펴보도록 한다. HBT 소자 기술에 기반한 증폭기로서는 최근 Teledyne 사에서 발표된 324 GHz 회로가 가장 뛰어난 성능을 보이고 있다 <그림 6><sup>[11]</sup>. Teledyne 사의 InP HBT 소자 기술에 기반한 이 회로는 1단 common base 구조를 가지고 있으며 324 GHz 에서 약 4.7 dB 의 이득을 보이는 것으로 측정되었다. 상대적으로 작은 이득값이나, 여러 단을 cascade 구조로 연결하는 경우 전체 증폭도는 충분히 향상될 수 있을 것으로 보이며, 매칭에 따라 향상된 대역폭



<그림 6> Teledyne의 324 GHz InP HBT 증폭기



〈그림 7〉 JPL 과 Northrop Grumman 의 공동연구에 의한 340 GHz InP HEMT 증폭기



〈그림 8〉 Univ. of Toronto 의 140 GHz 및 170 GHz SiGe HBT 증폭기

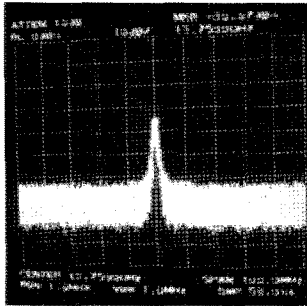
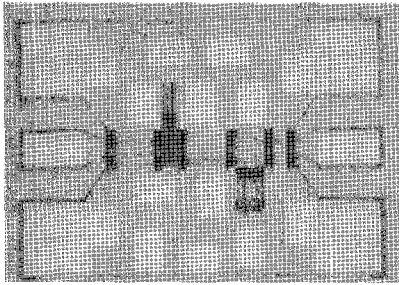
도 보일 수 있을 것으로 예측된다.

HEMT 소자 기술에 기반한 테라헤르츠 급 증폭기는 JPL 과 Northrop Grumman 의 공동 연구가 최근 그 개발을 주도하고 있다. 〈그림 7〉은 Northrop Grumman 의 35-nm InP HEMT 소자 기술에 기반하여 이들 연구진이 최근 개발한 증폭기 및 그 결과를 보여주고 있다<sup>[12]</sup>. CPW 전송선 매칭에 기반한 이 3단 증폭기는 295-340 GHz 의 비교적 넓은 대역에서 약 13-15 dB 의 이득을 보이고 있다. 이 결과는 지금까지 보고된 반도체 기반 증폭기로서 가장 높은 동작 대역에 속하며, 다양한 테라헤르츠 응용에 범용으로 적용될 수 있을 것으로 보인다.

Si 소자를 사용한 증폭기도 최근 100 GHz 이상 대역에서의 동작이 보고되고 있다. 〈그림 8〉은 University of Toronto 에서 개발된 SiGe HBT 기반 140 및 170 GHz 증폭기와 그 특성을 보여주고 있다<sup>[13]</sup>. STM 사의 SiGe HBT 소

자 기술에 기반한 이 회로는 5단 cascode 의 구조를 가지고 있으며 최대 170 GHz 에서 15 dB 의 증폭도를 보여주고 있다. 아직까지 화합물반도체 회로에는 그 성능이 못 미치고 있으나, 최근 들어 빠르게 그 동작 주파수 범위가 확장되고 있는 점은 주목할 만하다. 특히 Si 증폭기의 경우 타 회로 블록과 집적된 회로가 많이 발표되고 있어 실용적인 응용에 있어서는 한 걸음 더욱 앞서 있다고도 평가할 수 있겠다.

Oscillator는 기본적으로 회로를 구성하는 feedback loop 의 순환 경로상의 손실을 보상할 정도의 이득만 발진주파수에서 얻어지면 발진이 가능하므로, 같은 소자를 사용하는 경우 증폭기에 비해 높은 회로 동작주파수 (발진주파수) 를 얻을 수 있다. 또한 fundamental 주파수의 정수 배에 해당하는 harmonic 주파수도 출력단에서 얻을 수 있으므로, 특성은 떨어지지만 이론적으로는 소자 동작주파수보다도 높은 발진주파수를

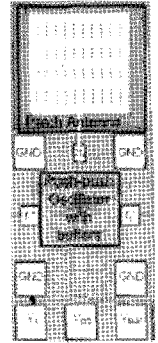
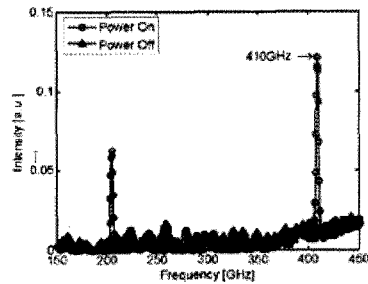
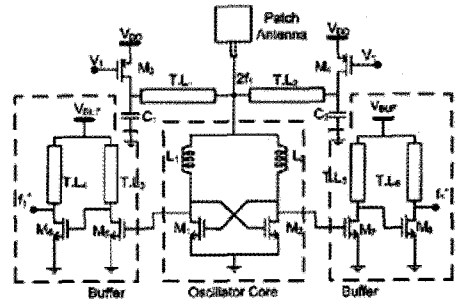


〈그림 9〉 JPL 과 Northrop Grumman 의 공동연구에 의한 346 GHz InP HEMT fundamental oscillator

얻을 수 있다고 할 수 있다.

Oscillator도 역시 JPL - Northrop Grumman 연구팀이 우수한 결과를 발표하고 있으며, 〈그림 9〉는 이들에 의해 개발된 Northrop Grumman 35-nm InP HEMT 소자 기술 기반 oscillator 결과를 보여주고 있다<sup>[14]</sup>. Common gate 구조에 CPW 기반 series feedback 을 적용한 이 oscillator 는 346 GHz 의 fundamental 발진 주파수를 보여주고 있으며 -16 dBm 의 출력 전력 특성을 나타내고 있다.

Si 소자 기반 수백 GHz 급 oscillator 에 대한 연구도 최근 활발히 진행되고 있다. SiGe HBT 와 Si MOSFET 소자 기술 모두에 대해 우수한 성능의 결과들이 보고되고 있는데, 특히 〈그림 10〉에 보인 University of Florida 의 oscillator 는 TI 의 45 nm CMOS 공정에 기반한 회로로서, 410 GHz 의 발진주파수를 보이고 있다<sup>[15]</sup>.



〈그림 10〉 Univ. of Florida 의 410 GHz n-MOSFET push-push oscillator

이 값은 현재까지 반도체에 기반한 모든 oscillator 가 보이는 주파수 중 가장 높은 값에 해당하며, 이러한 기록이 Si MOSFET 기반 회로에서 얻어 졌다는 점은 크게 주목할 만하다고 하겠다. 이 회로는 push-push 구조에 기반하고 있어 측정된 주파수는 second harmonic 에 해당하는 값이며, 출력전력도 -47 dBm 으로서 비교적 낮은 레벨이기는 하나, Si 소자가 테라헤르츠 대역 신호원으로서 충분히 적용될 수 있는 가능성을 보여주는 결과라고 할 수 있겠다. 이 회로의 또 하나의 특징은 410 GHz 대역의 상용 RF probe 가 없는 관계로 측정의 용이를 위해 on-chip 안테나를 회로와 집적하고 안테나로부터 방사된 발진 주파수를 bolometer 를 이용하여 측정하였다는 데 있다.

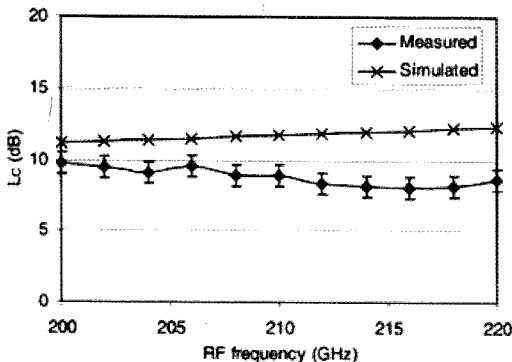
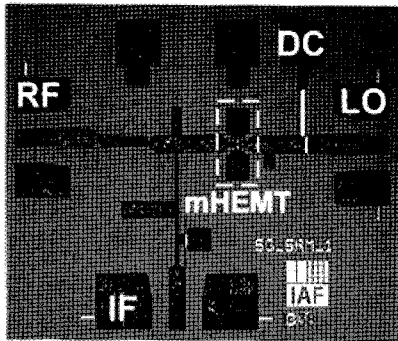
Mixer 의 경우 다이오드를 사용한 passive

mixer 는 수백 GHz 대역 동작 결과가 나와 있으나<sup>[16]</sup>, active mixer의 경우 증폭기나 oscillator 에 비해서는 상대적으로 그 동작주파수 대역이 낮은 편이다. 현재로서는 스웨덴 Chalmers 대학의 연구진에 의해 보고된 220 GHz HEMT mixer 가 가장 높은 수준의 작동 주파수를 보여 주고 있다<sup>[17]</sup>. Fraunhofer 연구소의 100-nm GaAs HEMT 소자 기술에 기반한 이 mixer 는 microstrip line 을 이용한 resistive mixer 의 구조를 가지고 있으며, resistive mixer 의 특성 상 conversion gain 은 나타내지 못하나, <그림 11>에서 보는 바와 같이 10 dB 전후의 비교적 우수한 conversion loss 특성을 보이고 있다. 일반적으로 active mixer 에 널리 적용되는 single 혹은 double balanced 구조를 적용하는 경우 더

욱 향상된 conversion gain 특성을 얻을 수 있을 것으로 예측할 수 있다.

### IV. 결론

이상으로 테라헤르츠 대역의 특성 및 응용범위와 함께 이에 수반되는 난점들을 살펴보고, 테라헤르츠 대역에 적용 가능한 여러가지 반도체 소자기술의 비교 분석과 함께 이들에 기반한 테라헤르츠 반도체 회로의 최근 동향을 살펴보았다. 현재 테라헤르츠 대역의 연구는 주로 광소자 기반 하향식 접근 방식이 그 주류를 이루고 있는 것이 사실이다. 그러나 위에서 살펴본 바와 같이 반도체 소자 및 회로의 동작 속도가 이미 수백 GHz 대에 이르고 있고, 새로운 결과가 활발히 발표되고 있는 만큼 머지 않아 반도체 전자소자에 기반한 상향 접근 방식도 테라헤르츠 대역 연구의 주류에 진입할 것으로 예측된다. 이는 테라헤르츠 시스템의 소형 경량화를 가져오고 기존의 전자회로와의 집적을 통해 높은 기능성을 제공할 것이며, 궁극적으로 테라헤르츠 시스템 상용화의 길을 빠르게 촉진할 것으로 예측된다.



<그림 11> Chalmers 대학의 220 GHz GaAs HEMT resistive mixer

### 참고문헌

- [1] T. W. Crowe, W. L. Bishop, D. W. Porterfield, J. L. Hesler, and R. M. Weikle, II, "Opening the terahertz window with integrated diode circuits," IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.40, No.10, pp.2104, 2005.
- [2] U. R. Pfeiffer, E. Ojefors, A. Lisauskas,



- H. G. Roskos, "Opportunities for silicon at mmWave and terahertz frequencies," in Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, pp.149-156, 2008.
- [3] J.-S. Rieh, B. Jagannathan, D. R. Greenberg, M. Meghelli, A. Rylyakov, F. Guarin, Zhijian Yang, D. C. Ahlgren, G. Freeman, P. Cottrell, and D. Hareme, "SiGe heterojunction bipolar transistors and circuits toward terahertz communication applications," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.52, No.10, pp.2390-2408, 2004.
- [4] <http://www.ieee802.org/15/pub/IGthz.html>
- [5] R. Miles, X. -C. Zhang, H. Eisele, A. Krotkus (Ed.), Terahertz frequency detection and identification of materials and objects, pp. 69-88, Springer, 2007.
- [6] S. Sankaran and K. K. O, "Schottky barrier diodes for millimeter wave detection in a foundry CMOS process," IEEE Electron Device Letters, Vol.26, No.7, pp.492-494, 2005.
- [7] W. Snodgrass, W. Hafez, N. Harff, and M. Feng, "Pseudomorphic InP/InGaAs Heterojunction Bipolar Transistors (PHBTs) Experimentally Demonstrating  $f_T = 765$  GHz at 25C Increasing to  $f_T = 845$  GHz at -55C," in Technical Digest of International Electron Devices Meeting, pp. Late news, 2006.
- [8] D. -H. Kim and J. A. del Alamo, "30-nm InAs Pseudomorphic HEMTs on an InP Substrate With a Current-Gain Cutoff Frequency of 628 GHz," IEEE Electron Device Letters, Vol.29, No.8, pp.830-833, 2008.
- [9] B. Geynet, P. Chevalier, B. Vandelle, F. Brossard, N. Zerounian, M. Buczko, D. Gloria, F. Aniel, G. Dambrine, F. Danneville, D. Dutartre, and A. Chantre, "SiGe HBTs featuring  $f_T > 400$ GHz at room temperature," in IEEE Bipolar/ BiCMOS Circuits and Technology Meeting, pp.121-124, 2008.
- [10] S. Lee, B. Jagannathan, S. Narasimha, A. Chou, N. Zamdmer, J. Johnson, R. Williams, L. Wagner, Jonghae Kim, J. O. Plouchart, J. Pekarik, S. Springer, and G. Freeman, "Record RF performance of 45-nm SOI CMOS Technology," in Technical Digest of International Electron Devices Meeting, pp.255-258, 2007.
- [11] J. Hacker, M. Urteaga, D. Mensa, R. Pierson, M. Jones, Z. Griffith, and M. Rodwell, "250 nm InP DHBT monolithic amplifiers with 4.8 dB gain at 324 GHz," in IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, pp.403-406, 2008.
- [12] D. Pukala, L. Samoska, T. Gaier, A. Fung, X. B. Mei, W. Yoshida, J. Lee, J. Uyeda, P. H. Liu, W. R. Deal, V. Radisic, and R. Lai, "Submillimeter-Wave InP MMIC Amplifiers From 300 - 345 GHz," IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 18, No.1, pp.61-63, 2008.
- [13] E. Laskin, P. Chevalier, A. Chantre, B. Sautreuil, and S. P. Voinigescu, "165-GHz

Transceiver in SiGe Technology,” IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.43, No.5, pp.1087-1100, 2008.

- [14] V. Radisic, X. B. Mei, W. R. Deal, W. Yoshida, P. H. Liu, J. Uyeda, M. Barsky, L. Samoska, A. Fung, T. Gaier, and R. Lai, “Demonstration of Sub-Millimeter Wave Fundamental Oscillators Using 35-nm InP HEMT Technology,” IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol.17, No.3, pp.223-225, 2007.
- [15] E. Seok, C. Cao, D. Shim, D. J. Arenas, D. B. Tanner, C.-M. Hung, and K. K. O, “A 410GHz CMOS Push-Push Oscillator with an On-Chip Patch Antenna,” in IEEE International Solid-State Circuits Conference, pp.472-473, 2008.
- [16] P. H. Siegel, “Terahertz technology,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.50, No.3, pp.910-928, 2002.
- [17] S. E. Gunnarsson, N. Wadefalk, I. Angelov, H. Zirath, I. Kallfass, and A. Leuther, “A 220 GHz (G-Band) Microstrip MMIC Single-Ended Resistive Mixer,” IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol.18, No.3, pp.215-217, 2008.

## 저자소개



이재성

1991년 2월 서울대학교 전자공학과 학사  
 1995년 2월 서울대학교 전자공학과 석사  
 1999년 11월 Univ. of Michigan EECS 박사  
 1999년 12월 ~ 2004년 8월 IBM Semiconductor R&D Center  
 2004년 9월 ~ 현재 고려대학교 전기전자전파 공학부 부교수  
 주관심 분야: 밀리미터파 및 테라헤르츠 소자 및 회로