

## 1. 서론

무선 통신의 발달로 인하여 광대역 무선 LAN, 대용량 단거리 통신 시스템, 무선 홈 네트워크 등 다양한 통신 서비스에 대한 시장의 요구는 점점 증가하고 있으며, 이에 따라 대용량 정보 전송이 가능한 광대역 무선 통신 시스템의 필요성이 부각되고 있다. 무선 환경에서의 대용량 데이터 전송을 위해서는 밀리미터파 대역과 같이 대역폭이 큰 고주파 캐리어의 사용이 필요하며, 특히 60GHz 대역이 주목을 받고 있다. 60GHz 대역은 무선 환경에서의 높은 전송손실로 인해 작은 크기의 cell로 무선 네트워크를 구성하게 되며, 이를 통해 주파수 재사용성의 향상, 저전력화 등의 이점을 갖는다. 그러나 cell의 크기가 작아지면서 기지국의 수가 늘어나게 되므로, 다수의 기지국을

용된 빌딩 내 무선통신 네트워크를 보여주고 있다. 각 사무실에 설치된 기지국 사이의 간섭이 없기 때문에 각각의 사무실은 60GHz 대역이 제공하는 넓은 대역폭을 독립적으로 사용할 수 있다. 그러나 RoF 시스템은 많은 수의 기지국을 필요로 하기 때문에, 기지국 구조의 단순화는 시스템의 경제적인 구현을 위해 매우 중요하다.

기지국 구조를 단순화 시키는 방법의 한 가지로 InP 기반의 HEMT (High Electron-Mobility Transistor)<sup>(2-3)</sup> 또는 HBT (Heterojunction Bipolar Transistor)<sup>(4-5)</sup>를 포토트랜지스터로 활용하는 방법이 있다. 본 연구실에서는 지난 수년간 InP 기반의 포토트랜지스터를 이용한 RoF 시스템 구현에 관한 연구를 수행하였으며, 이 글에서는 광전주파수 변환기<sup>(6-7)</sup>, OIL-SOM (optically injection-locked self-oscillating optoelectronic mixer)<sup>(8)</sup> 등 포토트

# 특집 ┃ Microwave Photonics

## 고속 포토트랜지스터를 이용한 마이크로파 광전송 기술

김재영, 최창순, 서준혁, 최우영

작은 전송 손실로 중앙국과 연결할 수 있는 유선 네트워크가 필요하게 된다. 또한 대용량 데이터의 수용을 위해서는 기지국과 중앙국 사이에 넓은 대역폭을 갖는 유선 채널이 필요하므로, 시스템의 효율적인 구축을 위해 광통신망과의 연계가 필수적이다.

이와 같은 광대역 무선 통신망의 구현을 위하여 최근 Radio-on-Fiber (RoF) 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. RoF 시스템은 기지국과 중앙국 사이를 광섬유로 연결하고, 무선 신호를 광신호로 변환하여 광섬유를 통해 전송하는 시스템이다. 전송 매체로서 광섬유를 사용하는 것은 동축선을 사용하는 것에 비해 낮은 전송손실과 넓은 대역폭을 제공하며<sup>(1)</sup>, 보다 효과적으로 광통신망과 연동되는 장점을 갖는다. 그림 1은 RoF 시스템이 적

용된 빌딩 내 무선통신 네트워크를 보여주고 있다. 각 사무실에 설치된 기지국 사이의 간섭이 없기 때문에 각각의 사무실은 60GHz 대역이 제공하는 넓은 대역폭을 독립적으로 사용할 수 있다. 그러나 RoF 시스템은 많은 수의 기지국을 필요로 하기 때문에, 기지국 구조의 단순화는 시스템의 경제적인 구현을 위해 매우 중요하다.

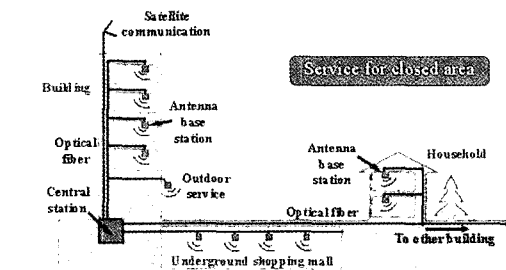


그림 1. RoF 시스템을 적용한 빌딩 내 무선통신

## 2. 포토트랜지스터를 이용한 RoF 시스템 구성

RoF 시스템의 구성은 그림 2에 보이는 것과 같이, 크게 2가지 방식으로 나누어진다. 그림 2(a)는 중앙국에서 무선으로 전송하려는 RF 신호를 광변조 하여 광섬유를 통해 기지국에 전송하고, 기지국에서는 이 광신호를 단순하게 광/전 변환하여 증폭 후 안테나를 통해 전파하는 광학적 밀리미터 웨이브 전송방식이다. 이 경우 고가의 장비를 중앙국으로 집중하여 기지국의 구조를 단순화 할 수 있는 장점이 있으나, 중앙국에는 고속의 광변조기가 필요하고 기지국에도 특성이 좋은 광검출기가 필요한 단점이 있다. 그림 2(b)는 IF-feeder 방식으로 중앙국(Central station)에서 기저대역의 신호를 IF(intermediate frequency) 대역으로 변환하여 광섬유를 통해 전송하고, 기지국에서는 이 신호를 검출하여 LO(local oscillator)와 믹서를 이용해 원하는 RF(Radio frequency) 대역으로 주파수 상향변조를 한 뒤 안테나로 전파한다. 이 방식은 기지국에 값비싼 고주파 믹서와 밀리미터 웨이브 발진기가 필요한 문제가 있으나, 중앙국에서 고속의 광변조기를 사용할 필요가 없고, 광섬유의 dispersion에 의해 발생하는 반송파 억압 현상이 나타나지 않는 등의 장점이 있다. 또한, 비교적 주파수가 낮은 IF대역으로 데이터가 전송되기 때문에 포토트랜지스터를 광검출기로 사용하기에 적합하다. 이 경우 포토트랜지스터와 동일한 기층 구조를 갖는 트랜지스터 소자들로 기지국에 포함되는 마이크로웨이브 증폭기, 발진기, 믹서 등을 모두 구현할 수 있기 때문에 MMIC (monolithic-microwave integrated-circuit) 공정을 이용한 전체 기지국의 집적화가 가능하며, IF-feeder 방식의 단점인 기지국의 복잡도 문제를 크게 줄일 수 있다<sup>[9-10]</sup>.

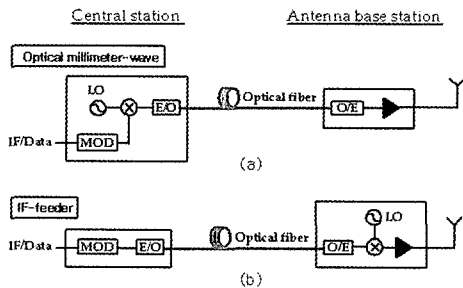


그림 2. RoF 시스템의 구성도

IF-feeder 방식을 사용하는 RoF 시스템의 기지국에서, 광검출기로 사용될 수 있는 고속 포토트랜지스터에는 HEMT와 HBT가 있다. 본 연구실에서는 InP HEMT 연구에 사용된 InP HEMT는 서울대학교 서광석 교수 연구실에서 제작되었음.

와 HBT 연구에 사용된 InP HBT는 일본 NTT의 photonics 연구소에서 제작되었음.

를 사용하는 RoF 시스템에 관한 연구를 수행하였으며, 여기서는 이 포토트랜지스터들의 구조를 보이고 광검출 원리와 특성을 설명하겠다. 그림 3(a)은 사용된 InP HEMT의 적층구조를 나타낸다. 이 소자는 10nm의  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 와 10nm의  $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$  사이의 이종접합에서 발생한 2차원 전자가스층을 채널로 사용하기 때문에 매우 빠른 동작이 가능하며,  $f_T$  (current gain cutoff frequency)와  $f_{max}$  (maximum oscillation frequency)는 각각 148GHz 와 165GHz이다. 적층구조의 위 부분은 metal contact로 덮여있기 때문에 광신호는 lensed fiber를 이용해서 소자의 뒷면을 통해 주입되며, 입사된 1.55um 파장의 광신호는 InAlAs 층과 InP substrate를 통과하여 내부의 InGaAs 채널층에서 흡수되어 photocurrent를 발생시킨다. 트랜지스터의 게이트-소스 전압 ( $V_{GS}$ )이 문턱 전압보다 높을 경우(Tr-mode), 발생된 photocurrent가 HEMT의 문턱 전압을 낮추는 photovoltaic 효과를 나타내어 결과적으로 전류이득을 얻게 된다<sup>[11]</sup>. 그림 3(b)은 network analyzer를 이용해 turn-on 및 turn-off 상태에서 측정된 InP HEMT의 광변조 응답으로, turn-on 상태에서 측정된 광변조 응답의 3dB bandwidth는 약 580MHz로 나타났으며, 포토트랜지스터 이득은 낮은 주파수에서 약 50dB이다<sup>[6]</sup>.

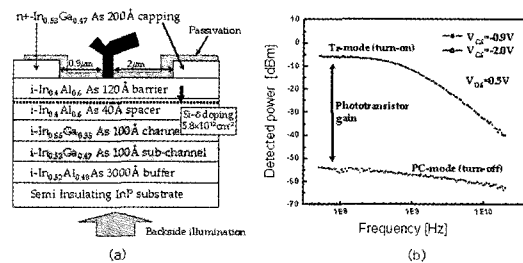


그림 3. InP HEMT의 (a)적층구조와 (b)측정된 광변조 응답

## 고속 포토트랜지스터를 이용한 마이크로파 광전송 기술

InP HBT는 에미터-베이스 접합을 InP와 InGaAs의 이종접합으로 구성하여 동작 속도를 높인 바이폴라 트랜지스터로, 에미터 상단에 optical window를 설치할 경우 이를 통해 광신호를 입력시킬 수 있다. 그림 4(a)는 본 연구실에서 사용된 InP HBT의 구조를 보여준다<sup>[12]</sup>. Optical window를 통해 입사된 1.55 $\mu$ m 파장의 광신호는 InP로 구성된 에미터 층을 통과하여 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As로 구성된 베이스와 컬렉터 영역에서 흡수되며, 베이스-컬렉터 접합은 p-n 포토다이오드와 같은 구조이므로 컬렉터에서 베이스로의 photocurrent가 발생하게 된다. 베이스 영역으로 입력된 photocurrent는 bipolar 트랜지스터의 전류이득 특성에 의해 증폭된 크기의 컬렉터 전류를 발생시킨다. 즉 optical window가 포함된 HBT는 전기적인 bipolar transistor에 빛을 흡수할 수 있는 p-n 포토다이오드가 합쳐진 소자라 할 수 있다. 그림 4(b)는 측정된 InP HBT의 광변조 응답으로, turn-on 상태에서 광변조 응답의 3dB

bandwidth는 약 2.2GHz로 나타났으며, 포토트랜지스터 이득은 낮은 주파수에서 약 30dB이다.

HEMT는 그 구조상 흡수영역의 폭이 매우 작기 때문에 quantum efficiency가 비교적 낮으며, 측정된 InP HEMT의 경우 turn-on 상태에서의 responsivity가 약 1.5A/W로 나타났다. 그에 비해 HBT는 광신호의 흡수영역이 정사각형에 가깝고, 에미터 상단에 optical window가 존재하기 때문에 광신호의 주입이 HEMT에 비해 용이하며, 측정된 InP HBT는 turn-on 상태에서의 responsivity가 약 20A/W로 나타났다. 이것은 수신 신호의 신호 대 잡음비를 높일 수 있다는 점에서 HEMT에 대한 HBT의 장점이 된다. 그러나 IF feeder 방식을 사용하는 RoF 시스템에서 광검출기는 그 개별적 성능 못지않게 기지국에 포함된 다른 구성품들과의 집적화가 중요하다. HEMT는 현재 널리 사용되고 있는 전계효과 트랜지스터(FET)로서 증폭기, 믹서 등 고주파 회로의 설계가 주로

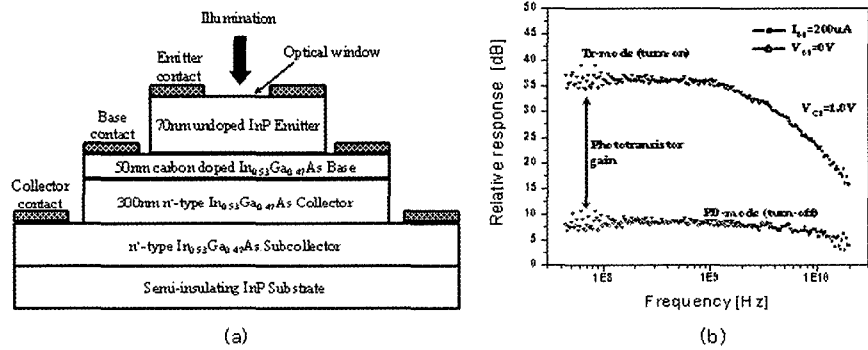


그림 4. InP HBT의 (a)적층구조와 (b)측정된 광변조 응답

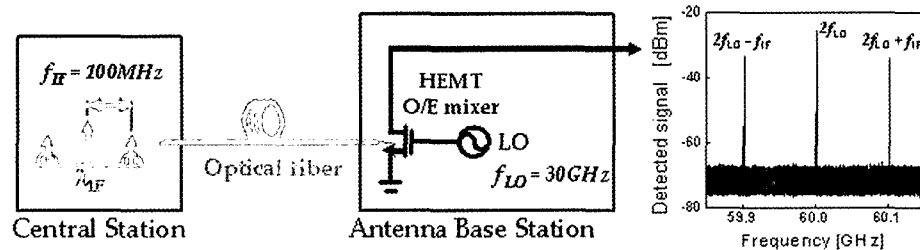


그림 5. HEMT 광전 주파수 변환기를 사용한 RoF 시스템

HEMT를 기반으로 이루어지기 때문에, 기지국 전체의 집적화 관점에서는 HEMT가 HBT에 비해 유리한 면을 가지고 있다.

이들 포토트랜지스터는 MMIC 공정을 이용한 집적화 뿐만 아니라 광전 주파수 변환기나 OIL-SOM과 같이 단일 소자를 이용한 다중기능의 구현이 가능하기 때문에 기지국의 단순화에 큰 도움이 되며, 이에 관한 연구 결과를 소개하겠다.

### 3. 광전 주파수 변환기

일반적으로 트랜지스터는 비선형적인 동작을 하기 때문에 주파수 변환기로의 사용이 가능하며, 특히 포토트랜지스터는 광검출이 가능하기 때문에 입력되는 광신호를 흡수하는 동시에 Local Oscillator (LO) 신호를 이용하여 주파수 변환을 수행하는 광전 주파수 변환기로의 사용이 가능하다. 그림 5는 HEMT를 광전 주파수 변환기로 사용하는 IF-feeder 방식의 시스템과 이를 이용한 60GHz 대역의 광전 주파수 변환 결과를 보여준다(6). 광학적 IF 신호는 lensed fiber를 통해 HEMT에 입력되었고 30GHz의 LO 신호는 HEMT의 게이트 포트에 전기적으로 입력되었다. 입력된 광학적 IF 신호는 주파수 상향 변환되어

LO 신호의 양쪽 대역에 나타남은 물론, HEMT의 harmonic mixing 특성으로 인하여 LO 신호의 harmonic 성분 주변에도 나타나게 된다. 이 경우 입력된 LO 신호의 2배인 60GHz 대역에서 그림 5에 보이는 것과 같은 주파수 상향 변환 결과를 얻을 수 있다.

HEMT 광전 주파수 변환기를 이용하여 그림 6과 같은 60GHz 대역의 RoF 하향 전송 시스템을 구성하였으며, 이를 통해 622Mbps의 NRZ 데이터 전송 실험을 수행하였다(6). DFB 레이저 다이오드는 622Mbps의 NRZ 기저대역 신호로 직접변조 되었으며, 생성된 광신호는 30km 길이의 광 링크를 통해 전송되어 InP HEMT에 입력되었다. HEMT 광전 주파수 변환기와 30GHz의 LO 신호에 의해 60GHz 대역으로 harmonic 주파수 상향 변환된 신호는 그림 6과 같이 스펙트럼 분석기로 관찰되었다. 또한 이 RF 신호는 혼 안테나를 이용한 3m 거리의 무선 링크로 전송된 후 단말국(Mobile terminal)에서 기저대역으로 복조되었으며, 결과 파형과 BER(bit error rate)이 측정되었다. HEMT에 입력되는 광신호의 크기가 9dBm 이상에서 error-free (BER( $10^{-9}$ )) 상태의 전송이 가능하며 이때 측정된 eye-diagram은 그림 6에 나타나 있다.

광전 주파수 변환기는 광검출과 주파수 변환을 하나의 소자로 수행하기 때문에 기지국의 구조를 단순화 시키는데 도움을 준다. 그러나 위의 방식과 같이 전기적인 LO

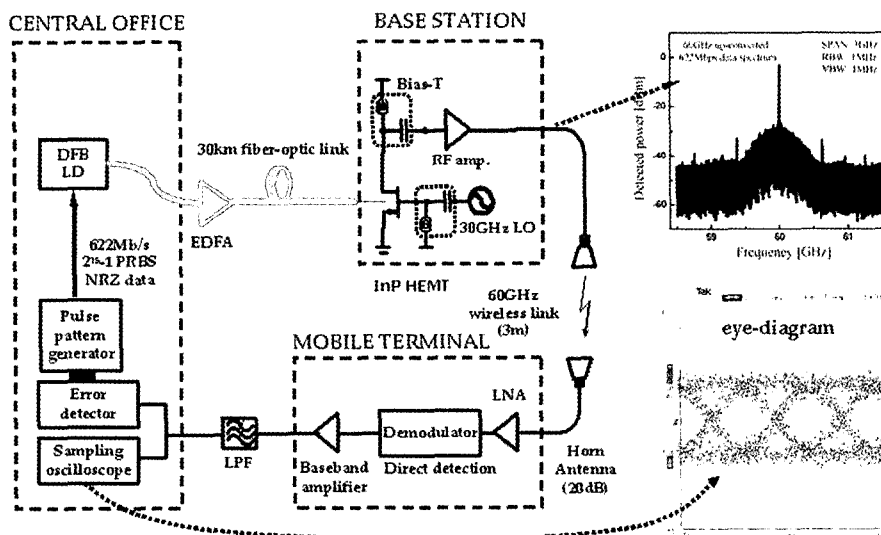


그림 6. HEMT 광전 주파수 변환기를 사용한 60GHz 대역 RoF 하향 전송

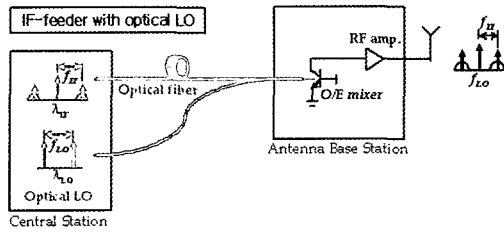


그림 7. 광학적 LO를 사용하는 IF-feeder 방식의 RoF 시스템

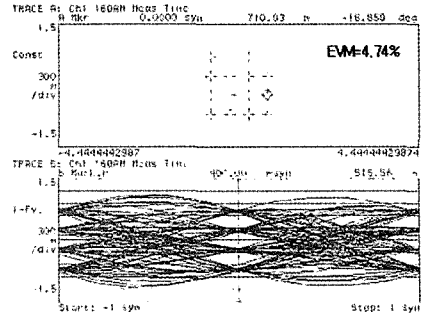


그림 9. 복원된 16QAM 신호의 constellation 과 eye-diagram

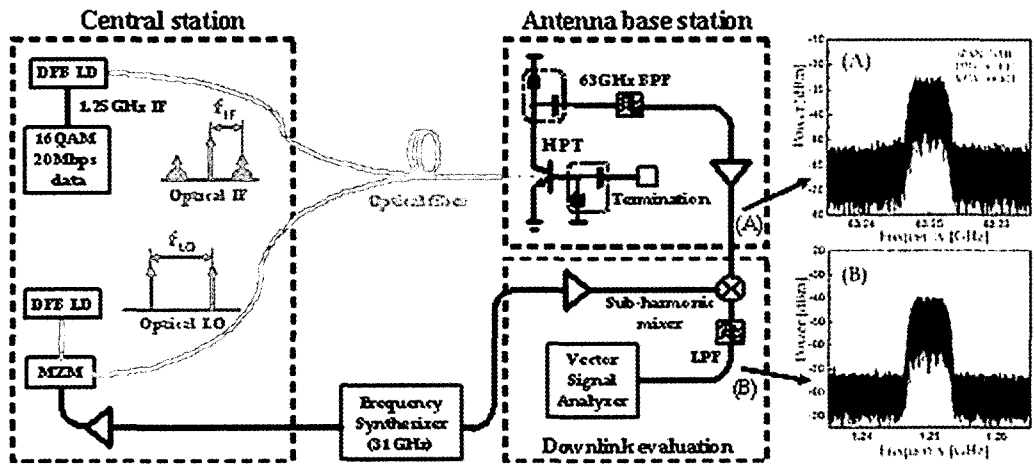


그림 8. HBT 광전 주파수 변환기를 이용한 60GHz 대역 RoF 하향 전송

신호원을 사용할 경우 기지국은 값비싼 밀리미터 웨이브 대역의 발진기를 포함하여야 하므로 여전히 복잡한 구조를 갖는다. 또한 무선통신 시스템에서 널리 쓰이는 위상 변조 방식의 신호를 전송할 경우에는 일반적으로 구현하기 매우 힘든 고주파 위상 고정 발진기가 필요하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 중앙국에서 위상 고정된 LO 신호를 광학적으로 기지국에 공급하는 광학적 LO 분배방식이 있다<sup>[13]</sup>. 그림 7은 광학적 LO를 사용하는 IF-feeder 방식의 RoF 시스템을 보여준다. 광학적 LO는 중앙국에서 광학적 헤테로다인 방법으로 생성되며, 이것은 LO 주파수만큼의 차이를 갖고 발생된 두 개의 광모드가 광섬유를 통해 전파된 후, 광검출기에서 두 광모드의 beating에 의해 전기적 LO 신호를 생성하는 기법이다<sup>[14]</sup>. 이 때 광학적 LO 신호와 IF 신호를 동시에 광전

주파수 변환기에 입력하게 되면 검출된 IF와 LO 신호 사이의 주파수 합성을 통하여 LO 주파수 대역으로 상향 변환된 RF 신호를 얻을 수 있다. 따라서 광학적 LO를 이용하게 되면 중앙국에 포함된 하나의 위상 고정 발진기로 모든 기지국을 커버할 수 있게 되어 전체 시스템의 복잡도를 크게 줄일 수 있다.

여기서는 HBT 광전 주파수 변환기와 광학적 LO 분배 방식을 이용한 60GHz 대역의 RoF 하향 전송 시스템을 소개하겠다<sup>[7]</sup>. 그림 8의 실험 장치도에 보이는 것과 같이 광학적 LO 신호는 원하는 LO 주파수의 절반인 31GHz로 Mach-Zehnder 변조기를 변조하여 62GHz 간격을 갖는 두 개의 광모드를 생성하여 구현하였으며 충분한 크기의 LO를 공급하기 위하여 EDFA (광섬유 증폭기)를 사용하였다. 그리고 광학적 IF 신호를 위하여 1.25GHz의

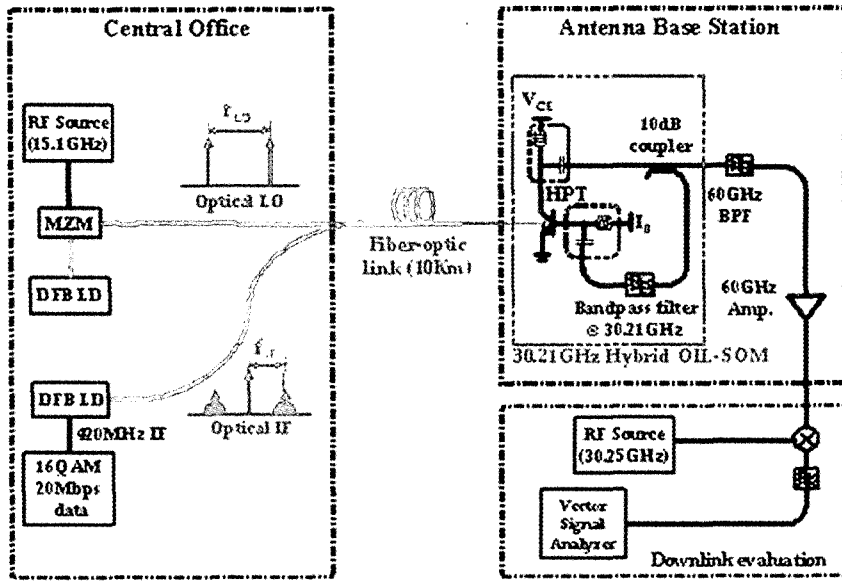


그림 10. HBT OIL-SOM을 이용한 60GHz RoF 하향 전송 시스템

IF 주파수를 갖는 20Mbps 16QAM 신호로 DFB 레이저 다이오드를 직접 변조하였다. Lensed fiber를 통하여 HBT 광전 주파수 변환기에 입력된 신호는 광학적으로 입력된 62GHz LO 신호에 의해 63GHz대역으로 주파수 상향 변환되었으며, 컬렉터 단에서 스펙트럼 분석기를 이용해 관찰되었다. 실제 시스템에서는 이 RF 신호가 안테나를 통해 전파되나, 실험에서는 이 신호를 sub-harmonic 믹서를 이용하여 다시 IF 대역으로 주파수 하향 변환하였으며 VSA (vector signal analyzer)를 이용하여 시스템의 성능을 평가하였다. 그림 9는 HBT에 입력된 광학적 LO 신호와 IF 신호의 크기가 각각 2dBm과 -3dBm일 때, 하향 변환된 16QAM 신호의 eye-diagram과 constellation을 보여준다. 이 때 측정된 EVM (error vector magnitude)은 4.53%로 24.5dB의 신호 대 잡음비 (SNR)에 해당하며, 이는 대부분의 무선 application이 요구하는 수준을 충족한다.

실험 결과에서 보인 것과 같이, HBT를 이용한 광전 주파수 변환기는 밀리미터 웨이브 대역에서 위상 변조 방식의 신호를 충분히 전송할 수 있는 성능을 보여주며, 광학적 LO를 사용할 경우 기지국의 구조를 매우 단순화 할 수 있다는 장점이 있다.

#### 4. OIL-SOM

IF-feeder 방식의 RoF 시스템은 앞에서 설명한 광전 주파수 변환기와 광학적 LO를 사용할 경우 기지국 구조의 단순화에 크게 기여 할 수 있다. 그러나 광학적 LO를 사용하는 것은 실용적인 관점에서 몇 가지 문제점을 안고 있다. 먼저 광신호가 lensed fiber를 통해 입력될 때 적지 않은 삽입 손실이 발생하기 때문에, 충분한 변환 효율을 얻기 위해서는 입력되는 광학적 LO의 크기가 비교적 커야 한다. 또한 변환 효율은 광학적 LO의 크기에 매우 민감하기 때문에, 중앙국과 기지국 사이의 거리가 일정하지 않을 경우 광섬유 손실로 인해 기지국에 입력되는 광학적 LO의 크기가 다르게 되어, 기지국에 따라 변환 효율이 일정하지 않게 되는 문제가 발생한다. 반면에 기지국내에 전기적인 발진기를 포함할 경우에는 위와 같은 문제를 피할 수 있으나, 위상 고정 발진기의 사용은 기지국의 복잡도를 크게 상승시키게 된다.

이와 같은 문제를 해결할 수 있는 방법으로 OIL-SOM (optically injection-locked self-oscillating optoelectronic mixer)이 있다. OIL-SOM은 하나의 소자를 이용해 LO 신호의 생성, 광검출 그리고 주파수 합성을 동시에 수행하는 것으로, 그림 10은 InP HBT를 이용한 OIL-SOM

## 고속 포토트랜지스터를 이용한 마이크로파 광전송 기술

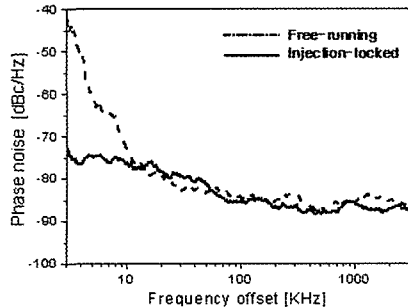


그림 11. free-running 및 위상 고정 발진기의 위상 잡음

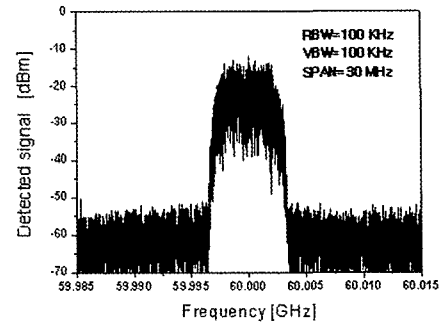


그림 12. 주파수 상향 변환된 신호의 RF 스펙트럼

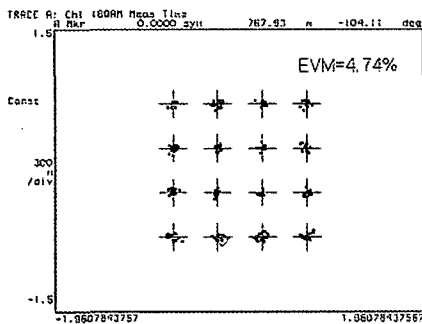


그림 13. 복원된 16QAM 신호의 constellation 및 EVM

의 구성과 이를 이용한 60GHz 대역의 하향 전송 시스템을 보여준다<sup>8)</sup>. OIL-SOM은 HBT의 컬렉터 단을 원하는 동작 주파수에 해당하는 BPF (band-pass filter)를 통해 베이스에 연결하는 것으로 구현할 수 있다. 이 때 HBT는 free-running 발진기로 동작하게 되며, 이 실험의 경우 추가된 BPF의 통과대역에 해당하는 30.21GHz의 LO 신호를 생성한다. 중앙국에서 생성된 30GHz 대역의 위상 고정된 광학적 LO 신호를 lensed fiber를 통해 HBT에 입력하게 되면, 입력된 LO 신호에 HBT의 free-running 발진 신호가 locking 되는 광 주입 고정 현상이 발생한다<sup>15)</sup>. 이 경우 HBT 발진기의 출력 신호는 그 크기를 free-running 일 경우와 같게 유지하면서, 주파수와 위상 잡음은 광학적으로 입력된 LO 신호와 같아지게 된다. 따라서 간단한 구조의 HBT 발진기와 광학적 LO를 이용하여 기지국에서 위상 고정된 일정한 크기의 LO 신호를 생성할 수 있다. 그림 11은 광학적 LO가 주입되지 않은 free-running 발진기와 광학적 LO에 의해 위상 고정된 발진기의 위상 잡음을 측정된 결과이다.

여기에 광학적 IF 신호를 lensed fiber를 통해 같이 입력하게 되면, 입력된 IF 신호가 이미 생성된 LO 신호와 주파수 합성되어 HBT 발진기의 컬렉터 단에서 주파수 상향 변환된 RF 신호를 얻을 수 있다. 특히 이 실험에서는 30GHz 대역에서 동작하는 OIL-SOM의 harmonic mixing 특성을 이용하여 입력된 IF 신호를 60GHz 대역으로의 상향변환 하였다. 광학적 IF 신호를 위해 420MHz의 IF주파수를 갖는 20Mbps 16QAM 신호를 이용하여 DFB 레이저 다이오드를 직접 변조하였을 때, 60GHz 대역으로 주파수 상향 변환된 RF 신호의 스펙트럼은 그림 12와 같다. 시스템의 성능평가를 위하여 출력된 RF 신호를 sub-harmonic 믹서를 이용해 다시 IF 대역으로 주파수 하향변환 하였고, VSA를 이용해 EVM을 측정하였다. OIL-SOM에 입력되는 광학적 LO와 IF의 크기가 각각 -3dBm과 -6dBm일 때 측정된 EVM은 4.74%로 측정되었으며, 광학적 LO의 크기가 -11dBm 이상일 경우 EVM은 광학적 LO 크기에 관계없이 유지되었다<sup>8)</sup>. 이때 복원된 16QAM 신호의 constellation 은 그림 13과 같다.

OIL-SOM은 기지국에 별도의 위상 고정 발진기를 포함하지 않고도 높은 변환 효율을 얻을 수 있기 때문에 기지국의 단순화에 크게 기여할 수 있다. 또한, 광학적 LO의 크기에 시스템 성능이 영향 받지 않기 때문에 기지국 배치를 비롯한 무선 네트워크의 설계에 도움을 준다.

## 5. 결론

본 연구실에서 수행해온 고속 포토트랜지스터를 이용한 RoF 시스템에 관한 연구 내용을 기지국에서의 포토트랜지스터의 역할에 따라 정리하였다. InP HBT와 HEMT는 고속 광검출기의 역할 뿐만 아니라 광전 주파수 변환기로 사용될 수 있으며 대용량의 데이터 전송이 가능함을 실험을 통해 확인하였다. 특히 광학적 헤테로다이인 기법을 이용한 광학적 LO를 사용하게 되면 기지국에 위상 고정 발진기를 포함할 필요가 없게 되며, OIL-SOM으로 충분한 크기의 LO 공급이 가능하기 때문에, 기지국을 단순한 구조로 구성하면서도 뛰어난 성능의 시스템을 구현할 수 있다. 이와 같이 포토트랜지스터의 다중기능 특성과 집적화의 용이성은 IF-feeder 방식을 사용하는 RoF 시스템의 복잡도를 크게 줄일 수 있기 때문에 관련된 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 향후 InP를 기반으로 하는 HEMT와 HBT 등의 소자들과 관련된 MMIC 공정 기술이 성숙하게 되면 이를 이용한 기지국의 구성비용이 크게 감소할 것이므로, RoF 시스템을 이용한 광대역 무선망의 실현 가능성을 높일 수 있을 것으로 예상된다.

## 참고문헌

- (1) A. J. Seeds, "Microwave Photonics," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., Vol. 50, no. 3, pp. 877-887, March 2002.
- (2) R. E. Lee, R. S. Beaubien, R. H. Norton and J. W. Bacon, "Ultra-low-noise millimeter-wave pseudomorphic HEMT's," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., Vol. 37, no. 12, pp. 2086-2092, December 1989.
- (3) M. Z. Martin, M. Matloubian and L. Shaw, "High-speed optical response of pseudomorphic InGaAs high electron mobility transistors," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 4, no. 9, pp. 1012-1014, September 1992.
- (4) A. Paoletta, L. E. M. de Barros Jr., P. Herczfeld, P. Enquist and W. Van Meerbreke, "Heterojunction bipolar phototransistors for analog microwave photonic systems," Proceeding of URSI Int. Signals, Systems, and Electronics Symposium, pp. 351-354, October 1995.
- (5) C. Gonzalez, "InP-based bipolar phototransistors for microwave photonic applications," Proceeding of Int. Topical Meeting on Microwave Photonics, pp. 99-104, September 2003.
- (6) C. S. Choi, H. S. Kang, D. H. Kim, W. Y. Choi and K. S. Seo, "Phototransistors Based on InP HEMTs and Their Applications to Millimeter-Wave Radio-on-Fiber Systems," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., Vol. 53, no. 1, pp. 256-263, January 2005.
- (7) C. S. Choi, J. H. Seo, W. Y. Choi, H. Kamitsuna, M. Ida, K. Kurishima, "60-GHz Bidirectional Radio-on-Fiber Links Based on InP-InGaAs HPT Optoelectronic Mixers," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 17, no. 12, pp. 2721-2723, December 2005.
- (8) J. Y. Kim, J. H. Seo, W. Y. Choi, H. Kamitsuna, M. Ida, K. Kurishima, "60GHz radio-onfiber downlink systems using optically injection-locked self-oscillating optoelectronic mixers based on InP/InGaAs HPTs," to be presented on OFC/NFOEC Meeting, 5-10 March 2006.
- (9) H. Kamitsuna and H. Ogawa, "Monolithic image-rejection optoelectronic up-converters that employ the MMIC process," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., Vol. 41, no. 12, pp. 2323-2329, December 1993.
- (10) L. Tran, J. Cowles, T. Block, H. Wang, J. Yonaki, D. Lo, S. Dow, B. Allen, D. Streit, A. Oki and S. Loughran, "Monolithic VCO and mixer for Q-band transceiver using InP-based HBT process," Proceeding of IEEE Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symposium, pp. 101-104, May 1995.
- (11) H. S. Kang, C. S. Choi, W. Y. Choi, D. H. Kim and K. S. Seo, "Characterization of phototransistor internal gain in metamorphic high-electron-mobility transistors," Appl. Phys. Lett., Vol. 84, no. 19, pp. 3880-3782, May 2004.
- (12) M. Ida, K. Kurishima, H. Nakajima, N. Watanabe and S. Yamahata, "Undoped-Emitter InP/InGaAs HBTs for High-Speed and Low-Power Applications," Proceeding of IEEE International Electron Device Meeting, pp. 854-856, December 2000.
- (13) L. Noel, D. Wake, D. G. Moodie, D. D. Marcenac, L. D. Westbrook and D. Nasset, "Novel Techniques for High-Capacity 60GHz Fiber-Radio Transmission Systems," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., Vol. 45, no. 8, pp. 1416-1423, August 1997.
- (14) 서준혁, 최우영, "헤테로다이인 기법을 이용한 광 밀리미터파 신호생성," 광학과 기술, pp. 5-11, January 2001.
- (15) M. Karakucuk, W. Li, D. Yang, P. Freeman, J. East, G. I. Haddad and P. Bhattacharya, "Direct optical injection locking of InP-based MODFET and GaAs-based HBT oscillators," Proceeding of IEEE/Cornell Advanced Concepts in High Speed Semiconductor Devices and Circuits Conference, pp. 365-374, August 1993.