



과학기술부 지정 국가지정 연구실

## Microwave Photonics 연구실

서준혁, 최우영\*  
 연세대학교 전기전자공학부  
 \*wchoi@yonsei.ac.kr

### 서론

Microwave Photonics 기술은 microwave 영역의 신호를 광섬유 사용이 가능한 광신호로 변환하여 전송, 처리하는 기술이다. 여기서 microwave 영역이라 함은 radio frequency, microwave frequency, millimeter 및 sub-millimeter wave 영역의 모든 전자기파를 통합적으로 지칭한다. Microwave 영역의 신호를 광신호로 변환하여 전송, 처리할 경우의 장점은 다음과 같다. 첫째, microwave 신호의 전송 거리 한계를 저손실 광섬유로 극복할 수 있으며, 둘째, 동축선의 크기, 무게 등의 물리적 단점 및 이로 인한 시스템 구축상의 제한을 가볍고 전자파 방해로부터 자유로운 광섬유 사용으로 극복할 수 있으며, 셋째, 광섬유의 엄청난 bandwidth를 활용하여 광대역 신호의 전송 및 처리를 가능하게 하며, 넷째, fiber-optic 기술을 활용한 photonic 신호 처리를 통해 새로운 microwave 영역의 기능을 구현할 수 있다<sup>1,3</sup>.

Microwave Photonics 기술은 미국의 국방 기술의 일환으로 개발이 시작되었다. 고성능 전투기 및 전투함의 경우 수많은 microwave 신호 전달 시스템이 필요하며, 이들의 보안성, 공간 배치의 용이성은 전체 성능을 좌우하는 주요 요소이다. 이러한 microwave 신호 전달 시스템 연결에 사용되어왔던 동축선을 광섬유로 대체하여 시스템을 구축할 경우, 전체 시스템 구축의 자유도가 크게 향상될 수 있으므로, 국방기술 분야에서의 Microwave Photonics 기술에 대한 관심은 매우 크다<sup>3,4</sup>.

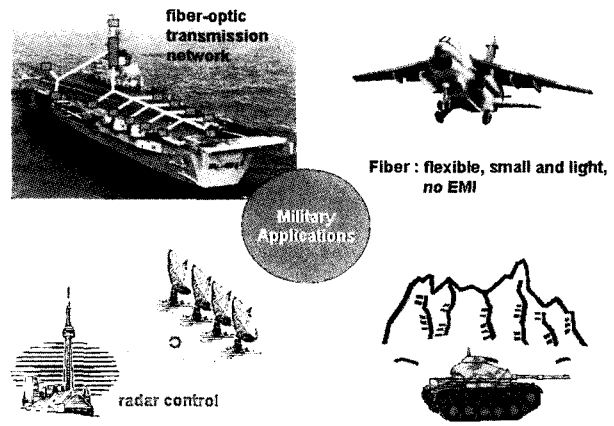


그림 1. Microwave Photonics 기술의 국방기술 응용

그림 1은 이러한 국방기술 분야의 적용 사례들이다. 또한, Microwave Photonics 기술은 현재의 이동 통신망 구축에 광중계기의 형태로 많이 응용되었으며, 차세대 무선통신 기술에도 활용될 전망이다. 차세대 무선 통신 네트워크에서는 서비스 종류의 증가 및 품질의 향상을 위해 더욱 큰 대역폭이 필요하다. 이를 위해 높은 carrier 주파수를 사용하게 되고, 작은 cell size를 갖는 네트워크 구축이 필요해 진다. 이 경우, 시스템의 효율적인 구축 및 관리 면에서 광통신망과의 연계가 필수적으로 요구되며, 여기에 필요한 제반 기술을 Microwave Photonics 기술이 제공한다. Microwave Photonics 기술이 적극 검토되고 있는 시스템으로는 광대역 무선 LAN, 위성통신, LMDS(Local Multipoint Distribution System), ITS(Intelligent Transportation System) 용 차량 충돌 방지 시스템 등이 있다<sup>[2,5,6]</sup>. 그림 2는 이와 같은 시스템의 적용 예를 보여주고 있다.

이외에도, Microwave Photonics 기술은 전파 천문학과 같은 기초과학 분야에서 사용된다. 전파 관측 망원경의 경우 아주 높은 주파수 영역까지의 신호 관측이 필요하며, 이와 같이 높은 주파수 신호의 전송 및 처리는 Microwave Photonics 기술을 활용할 경우, 훨씬 경제적이며 효율적으로 수행될 수 있다. 이러한 예로 현재 세계 여러 나라들이 연합하여 ALMA(Atacama Large Millimeter Array)라고 불리는 대형 전파 망원경 구축을 시도하고 있으며, Microwave Photonics 기술은 이에 필요한 중요 기술 중의 하나로 연구되고 있다<sup>[7]</sup>. 그림 3은 과학 잡지 Newton에 게재되었던 칠레의 Atacama에서 제작중인 전파망원경의 조형도이다<sup>[8]</sup>.

본 글에서는 Microwave Photonics 기술의 많은 연구 분야 중 연세대학교 Microwave Photonics 국가지정연구실에서 지난 수 년 간 수행해온 연구를 Microwave Photonic 신호생성, 신호 전송 그리고 신호 처리 세 분야로 나누어 간단히 소개하고자 한다.

## Microwave Photonic 신호 생성 기술

Microwave Photonic 신호 생성 기술은 주어진 microwave 신호를 광신호로 변환하는 기술이며, Microwave Photonics 기술의 모든 응용 분야에 기본적으로 필요한 기술이다. 이를 가장 간단하게 구현하는 방법은 원하는 microwave 영역에서 동작하는 광소자를 사용하는 것이며, 이에 대해서는 초고속 광통신 시스템을 위한 광소자 연구와 더불어 최근 많은 연구가 진행되어 왔다. 원하는 주파수 대역의 신호로 반도체 레이저를 직접 변조하거나, Electrooptic Modulator 혹은 Electroabsorption Modulator 등의 외부 변조기를 이용해서 변조함으로써 원하는 Microwave Photonic 신호를 생성할 수 있다<sup>[1]</sup>. 현재까지 보고된 바로는 반도체 레이저의 경우 직접 변조 가능한 주파수 범위가 약 40 GHz에 이르고 있으며, 외부 변조 방식의 경우에는 110 GHz까지 동작하는 변조기가 개발되기도 했다<sup>[9,10]</sup>. 직접 변조 반도체 레이저의 경우, 가장 간단하며 값싸게 Microwave Photonic 신호를 생성할 수 있다는 장점을 가지고 있으나, 반도체 레이저가

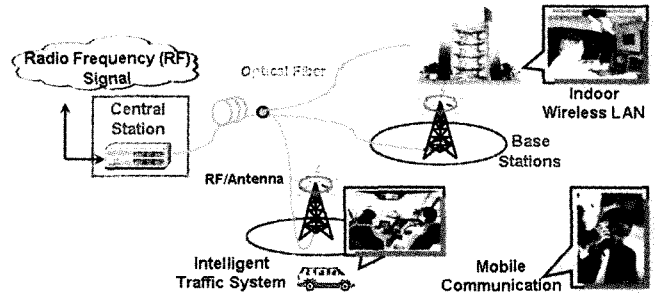


그림 2. Microwave Photonics 기술의 차세대 통신 분야 응용

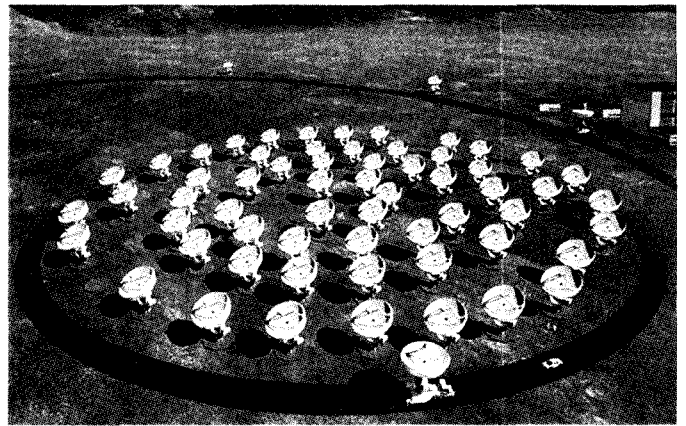


그림 3. ALMA 프로젝트에서 제작중인 전파 망원경

가지고 있는 chirp 특성으로 인해 수십 GHz 이상의 높은 주파수 대역의 신호를 요구하는 시스템에서는 사용이 힘들어지며, 이러한 응용 분야에서는 외부 변조기가 주로 사용된다. 그림 4는 외부 변조기인 Mach-Zehnder 변조기를 이용한 예를 보여주고 있다.

하지만, Microwave Photonics 기술이 요구하는 millimeter wave 영역과 같은 높은 주파수 영역의 외부 변조기를 사용할 경우, 전기 신호와의 정합, packaging, 구동 전자회로의 복잡성, 그리고 고가성의 문제 등이 발생한다. 또한 외부 변조기를 사용하여 Microwave Photonic 신호를 발생시킬 경우, 그림 4에 나타난 바와 같이 double sideband(DSB) 신호가 발생하고, 이는 dispersion induced carrier suppression이라는 문제를 발생시킨다<sup>[11]</sup>. DSB 신호가 광섬유를 통해 전송 될 경우 광섬유의 색분산(chromatic dispersion)에 의해 두 개의 sideband 간의 속도 차이가 발생한다. 이 속도 차이는 광 carrier에 대한 각 신호의 위상을 변화시키며, 전송 거리에 따라 광검출기에서의 검출 신호의 크기는 전송 거리에 따라 달라진다. 특히 두 광신호의 위상차이가 180 차이가 될 경우 광검출기의 신호가 거의 검출되지 않을 수도 있다. 그림 4의 그래프는 30 GHz로 변조한 DSB 신호를 전송 거리에 따라 검출한 신호의 크기 변화를 보여주고 있다.

이러한 문제는 고주파 신호의 전송에 있어 중대한 문제로 작용하며, 변조 주파수에 따라 전송 거리에 대한 제약이 발생한다. 이와 같은 문제점들을 해결할 수 있는 방법으로 여러 가지 기술이 사용될 수 있지만, 본 연구실에서는 헤테로다인 방법의 일종인 반도체 레이저 기반 sideband injection-locking 방식에 대한 연구를 수행하여 왔으며, 이에 대해 간단히 설명하도록 하겠다.

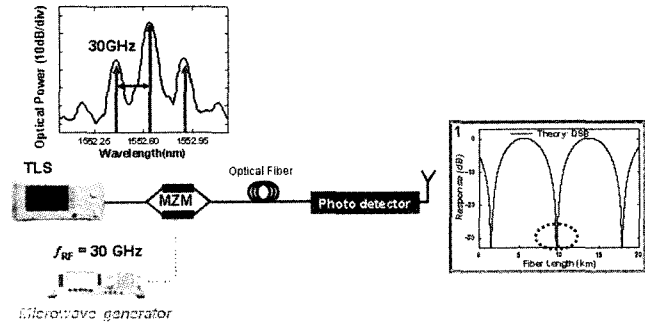


그림 4. 외부 변조기를 이용한 신호 생성 및 전송 거리에 따른 생성 신호 크기 변화 결과

### 1. 헤테로다인 기법의 원리

헤테로다인 기법은 각각  $\omega_1, \omega_2$  주파수를 갖는 두 레이저에서 나온 광신호가 광검출기에서 beating하여 두 주파수의 차이에 해당하는 주파수를 갖는 신호를 생성하는 방법이다<sup>[11, 12]</sup>. 이 두 신호가 함께 광검출기에 들어가면 전류 신호가 생성되고, 생성된 전류,  $I_{PD}$ 는 그림 5 아래에 있는 식과 같다. 이 식에서 볼 수 있듯이 광검출기의 square-law 특성에 의해  $I_{PD}$ 라는 전류가 생성되면서  $\omega_1$ 과  $\omega_2$  차이에 해당되는 주파수 성분을 갖는 beat신호가 생성된다.  $P_1$  과  $P_2$ 는 광검출기로 들어오는 두 광신호의 출력이고  $R$ 은 광검출기의 responsivity이다.

이 방법은 레이저가 수백 THz 주파수의 광신호를 만들기 때문에, 생성 가능한 신호 주파수는 단지 광검출기의 대역폭에 의해서만 제한되므로 아주 높은 주파수의 Microwave Photonic 신호를 비교적 자유롭게 생성할 수 있다. 하지만, 독립적으로 구동되는 두 레이저의 위상은 서로 correlation이 없으므로 생성된 beat 신호는 매우 큰 위상 잡음(phase noise)을 가지게 된다. 따라서 독립적인 두 레이저의 위상을 동기 시키는 것이 Microwave Photonic 신호 생성에는 반드시 필요하다. 헤테로다인 방식을 위한 위상 동기 방법으로는 OPLL(Optical Phase Lock Loop), Mode-Locking, 그리고 Optical Injection-Locking 등을 사용한다<sup>[12]</sup>.

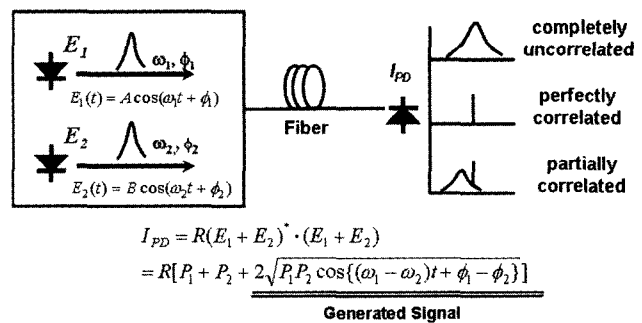


그림 5. 헤테로다인 기법을 이용한 마이크로파 신호 생성 방법

## 2. Sideband Injection-Locking을 이용한 신호 생성

Sideband injection-locking 기법은 optical injection-locking 기법을 이용한 신호 생성 방법 중 하나이다. Optical injection-locking은 하나의 안정화된 레이저(ML : Master Laser)의 광 신호를 다른 Free-running 레이저(SL: Slave Laser)에 주입했을 때, 두 레이저의 발진 파장의 차이와 출력의 비를 특정조건에 맞추면, 두 레이저의 위상차를 일정하게 만들어 동기화 시키는 방법이다<sup>[12,13]</sup>.

Sideband injection-locking 기법의 신호 생성 방법을 60 GHz 신호 생성의 예를 통해 살펴보겠다<sup>[13]</sup>. 그림 6은 실험 장치도를 나타낸다. 세 개의 DFB(Distributed Feedback) 레이저를 사용하며, 이 중 한 개는 ML로, 다른 두 개는 SL로 동작한다. 먼저, ML을 생성할 주파수인 60 GHz의 sub-harmonic인 10 GHz로 변조하면, 레이저의 FM(Frequency Modulation) 변조 특성에 따라 10 GHz 간격의 여러 광모드들이 발생한다. 이들 중 60 GHz 떨어진 두 개의 모드로 두 개의 SL를 각각 injection-locking 시키면, 그림 6에 나타난 두 SL 출력 광스펙트럼과 같이 ML에 동기된 두 개의 광 모드가 60 GHz 떨어져 나타난다. 이 두 모드가 광검출기의 입력으로 들어가면, 광검출기의 square law 특성에 의해 그림 6의 RF 스펙트럼에서 볼 수 있듯이 60 GHz 신호를 얻을 수 있다. 한편 그림 6의 single sideband 위상 잡음 측정 결과는 생성된 60 GHz 신호와 10 GHz source 사용에 따른 위상 잡음의 이론적 한계에 대한 것으로, 60 GHz 신호의 위상 잡음은 100 kHz offset에서 약 -88.71 dBc/Hz를 얻었다. 이 결과는 이론적인 한계 값과 유사한 깨끗한 신호를 얻었음을 나타낸다<sup>[13]</sup>.

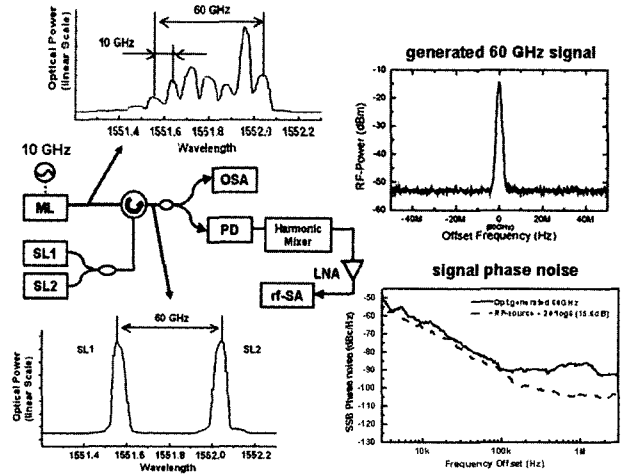


그림 6. Sideband injection-locking 기법을 이용한 60 GHz 신호 생성 방법 및 결과

## Microwave Photonic 신호 전송 기술

Microwave 대역 신호를 광섬유를 통해 전송할 경우 동축선을 사용하는 것 보다 전송 용량, 거리 면에서 우수한 성능을 얻을 수 있다. 이와 같은 특성을 활용하여 현재 Radio-on-Fiber(RoF)라 불리는 유무선 통합 시스템으로써 Microwave Photonics 기술 연구가 활발히 진행되고 있다. Microwave 대역의 신호 전송을 위한 방법으로는 크게 세 가지 방식이 가능하며, 그림 7은 이들의 시스템 형태를 보여주고 있다<sup>[12]</sup>. 그림 7(a)의 시스템에서는 CS(Central Station)에서 기저 대역의 데이터 신호를 광섬유를 통해 전송하면, BS(Base Station)에서 광/전 변환 후 IF(Intermediate Frequency) 단으로 변환하고, 다시 원하는 주파수 대역의 LO(Local Oscillator)를 이용해 주파수 상향변조를 해서 안테나로 전파 시킨다. 이 방법은 광섬유 전송에 대한 어려움이 많이 줄어드는 대신에 BS에 복잡한 전기적 시스템을 적용해야 하는 문제가 있다. 그림 7(b)는 IF-feeder 방식이라 불리는 시스템으로, CS에서 IF신호로 변환하여 전송하면, BS에서 LO를 통해 원하는 주파수 신호로 주파수 상향하여 전파하는 시스템을 나타낸다. 이 경우 7(a)에 비해 비교적 간단한 BS 구성이 가능하게 되지만, 시스템의 동작 주파수 영역이 높아질수록 필요한 전기적 LO 및 mixer의 구현 문제는 여전히 존재한다. 그림 7(c)의 시스템은 CS에서 원하는 주파수의 신호생성을 위한 광학적 신호원을 데이터 신호와 같이 보내면, BS에서는 단순한 광/전 변환 후 증폭만 시켜 안테나를 통해 전파한다. 이 시스템의 경우 광기술에 대한 부담이 높고, BS단에 주파수 응답 특성이 좋은 광검출기가 필요한 문제가 있지만, 시스템의 사용 주파수 대역이 높아질수록 그에 해당하는 고가의 복잡한 설비들은 CS로 집중화 할 수 있어 BS의 단순화가 가능하며, 효율적인 BS 관리 제어를 기대할 수 있다.

한편 최근의 Microwave Photonic 전송 시스템의 경우 시스템의 다양화 및 서비스 확대, 대용량 데이터 전송을 위해서 millimeter-wave 대역과 같은 대역폭이 큰 고주파 carrier 신호의 사용이 제안되고 있다. 그러나 고주파 신호를 사용할 경우 무선 환경에서의 전송 손실이 커지고, 이에 많은 수의 BS가 필요하게 된다. 그러므로 간단한 구조의 BS 구현이 점차 더 중요해지며, 구현 방법의 하나로 IF-Feeder 전송 방법을 적용할 수 있다<sup>[14,15]</sup>. 그러나 앞서 설명한 바와 같이 구현이 어렵고 값비싼 고주파의 전기적 mixer 및 LO가 필요한 문제가 발생한다. 이와 같은 문제를 해결하는 방법으로 광학적 방법으로 고주파 대역의 LO 신호를 생성하고, 광학적 방법의 주파수 상향하는 방법들이 연구되어 왔다. 대표적인 연구 결과로 광검출기의 비선형 특성을 이용한 방식이 있다<sup>[15]</sup>. 이 방법은 광검출기만으로 동작 가능하므로 BS를 매우 간단히 만들 수 있으나, 신호의 변환 효율이 매우 낮아 추가적인 전기적 고주파 증폭기가 많이 필요하며, 비선형 동작을 위해 광신호 입력이 커야 하는 문제가 있다. 이러한 단점을 극복할 수 있는 방법으로 반도체 광증폭기(SOA : Semiconductor Optical Amplifier)를 이용한 전광 주파수 상향 장치(Frequency Up-converter)가 제안되었다<sup>[16,17]</sup>. 여기서는 SOA를 이용한 주파수 상향 장치의 동작 원리 및 특성을 살펴보고, 이를 622Mbps급 유·무선 전송 시스템에 적용한 결과를 살펴보고자 하겠다.

### 1. SOA를 이용한 Photonic Frequency Up-converter

그림 8은 SOA를 이용한 주파수 상향 장치의 간단한 동작 원리를 나타낸다. 먼저 60 GHz LO 신호는 위에서 언급된 sidemode injection-locking 방법을 사용하여 생성하였다. IF 데이터 신호는 다른 파장의 광신호에 원하는 IF 주파수 신호를 변조하여 전송한다. 여기서는 1 GHz의 신호를 변조하였다. 이 광학적 LO 신호와 IF 데이터 신호가 BS의 SOA의 입력 신호가 되면, SOA 내에서 광학적 LO의 두 광모드에 IF 신호가 상호 이득 변조(cross-gain modulation)되어 LO 신호에 IF 신호가 변조된다. 이후 광검출기를 지나면, beating 신호들이 발생하고 원하는 LO 주파수 대역으로 상향된 신호를 얻을 수 있다. 그림 8의 두 스펙트럼은 각각 SOA 입력 전의 IF 신호의 RF 스펙트럼과 SOA를 거친 다음 검출된 주파수 상향된 IF 신호의 RF 스펙트럼을 나타낸다. SOA 입력 전의 1 GHz의 IF 신호가 SOA 입력 후 60 GHz 신호에 1 GHz 떨어진 IF 신호로 주파수 상향되었다.

SOA를 이용한 주파수 상향 장치의 장점으로는 첫째, 광증폭기를 사용함으로써 IF 신호에서 LO 주파수 대역 신호로의 변환 이득을 얻을 수 있다는 점이 있다. SOA의 이득 및 LO 신호의 크기가 주파수 상향 신호의 크기에 영향을 주며, 결과적으로 SOA의 이득이 크도록 주입 전류를 높이

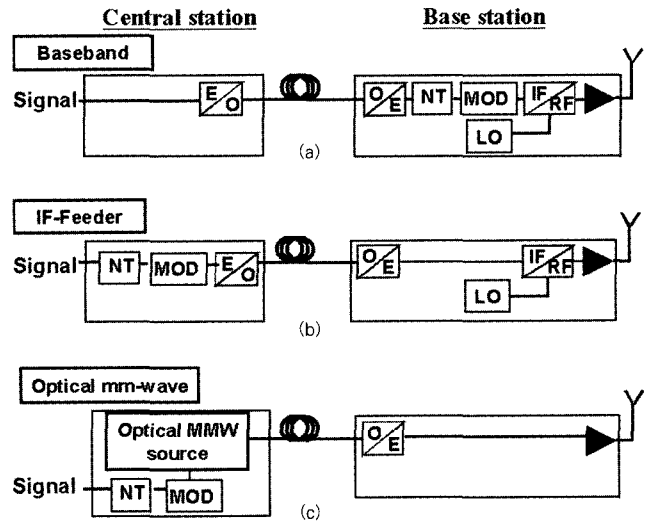


그림 7. Microwave Photonic 신호 전송 방법

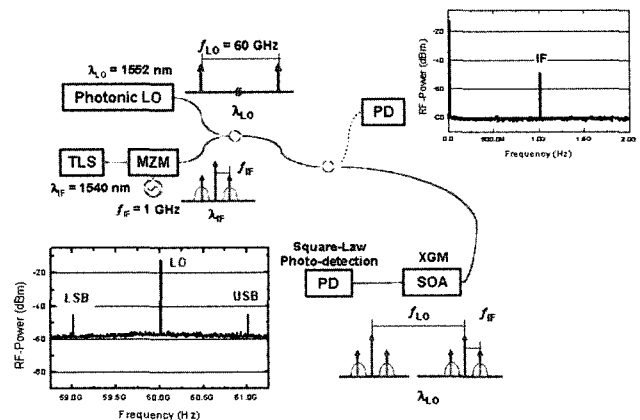


그림 8. SOA를 이용한 주파수 상향 장치 구성 및 동작 원리

거나, 입력 LO 신호의 출력을 높이면 큰 변환 효율을 얻을 수 있다. 또 다른 장점으로 입력 LO 신호의 주파수에 상관없이 동작 가능하다는 장점이 있다. 헤테로다인 신호 생성 방법을 사용하고 있어 SOA의 주파수 응답 특성과 상관없이 큰 주파수의 LO 신호 생성 방법을 적용할 수 있다. 그 밖의 다른 장점으로 SOA의 넓은 이득 스펙트럼 대역을 모두 사용할 수 있다는 점, IF 변조 신호의 주파수 범위가 넓다는 점, 일반적으로 상용화 되고 있는 SOA를 사용할 수 있기 때문에 편광에 대한 민감도가 낮다는 점 등이 있다<sup>[16,17]</sup>.

## 2. 60 GHz 622 Mbps급 광대역 유·무선 통합 시스템

다음은 SOA 주파수 상향 방법을 적용한 Microwave Photonic 전송 시스템을 살펴해보도록 하겠다. 유·무선 통합 시스템을 위해서 무선 전송은 60 GHz carrier 신호를 사용하는 시스템을, 유선망은 622 Mbps급의 두 채널을 WDM (Wavelength Division Multiplexing)을 이용하여 전송하는 prototype 시스템을 구축하였다<sup>[18]</sup>.

그림 9는 전체 시스템을 간략히 나타낸 그림이다. Microwave Photonic 60 GHz 신호 생성을 위해서 sideband injection-locking 방법을 사용하였다. IF 데이터 전송을 위해서 두 개의 DFB 레이저를 사용하였으며, 각각의 파장은 1546 nm, 1547.7 nm이다. 데이터는 IF 신호를 사용하지 않고, 기저대역으로 데이터 변조하였다. 변조 데이터 속도는 622 Mbps이다. 그림 10(a)는 변조한 IF 광신호 및 LO 생성용 광신호의 광스펙트럼으로, IF 신호에서는 데이터 변조된 모습이 나타나 있으며, LO 신호 또한 원하는 주파수 간격만큼 떨어져 있음을 볼 수 있다. 한편 그림 10(b)는 두 개의 IF 광신호 중 하나만을 AWG(Arrayed Waveguide Grating)을 사용해서 뽑아낸 결과 스펙트럼이다. 이 스펙트럼 신호가 최종적으로 SOA의 입력이 된다. LO신호의 스펙트럼이 비대칭적으로 바뀐 이유는 AWG 필터의 통과 대역 제한에 의한 결과이며, 데이터 열화에는 크게 영향을 미치지 않는다.

광섬유를 통한 유선 전송 거리는 20 km이며, 무선 전송은 60 GHz 대역의 horn 안테나를 사용하여 3 m 전송하였다. 그림 11은 60 GHz 대역으로 IF 데이터가 주파수 상향된 결과 스펙트럼이다. 그림 10의 (A)에서 측정된 결과로 데이터 변조를 ASK(Amplitude Shift Keying)를 이용하였으므로 스펙트럼은 sinc 함수의 형태가 되며, 레이저를 기저대역 변조했기 때문에 스펙트럼 상에는 주기적으로 delta 함수 형태가 나타난다. 그림 12는 그림 10의 (B)에서 측정된 결과로써 20 km 광섬유와 3 m 안테나 전송 후의 eye diagram이다. 20분 동안 수신단의 데이터를 누적한 결과로 깨끗한 eye

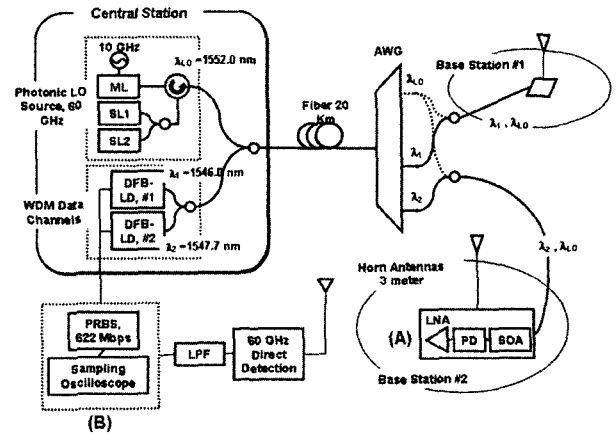


그림 9. 2×622 Mbps WDM 유선망과 60 GHz 무선망을 결합한 Microwave Photonic 전송 시스템

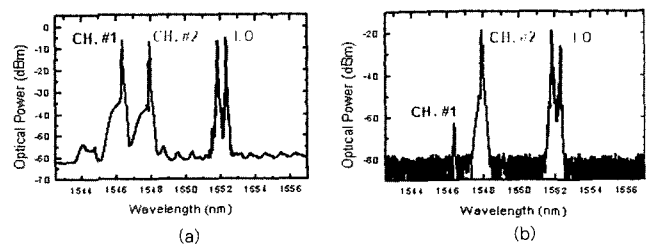


그림 10. (a) 두 개의 WDM IF 데이터 및 LO 생성을 위한 광신호의 광스펙트럼  
(b) SOA 통과 전의 AWG를 통과한 광스펙트럼

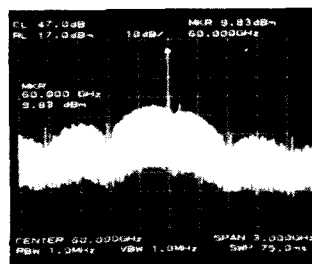


그림 11. 데이터 변조된 60 GHz 스펙트럼 (A)

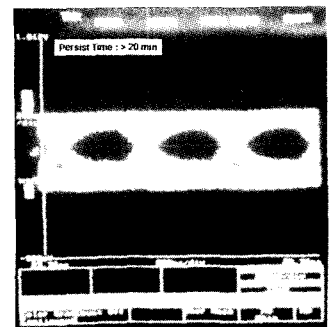


그림 12. 광섬유 및 안테나 전송 후에 복원된 622 Mbps 데이터 (B)

diagram이 유지되고 있음을 볼 수 있다.

## Microwave Photonic 신호 처리

Microwave Photonic 신호 처리 기술은 광섬유 및 광소자의 넓은 대역폭과 큰 동작영역(Dynamic Range), 손실이 적으며, 작고 가벼운 광섬유의 특성을 이용하여 기존의 microwave 영역에서는 쉽게 구현할 수 없는 기능 구현이 가능하도록 한다. 이러한 예로는 위상 배열 안테나에 사용될 수 있는 True-time Delay, 대역 조절 가능한 광대역 필터, 고성능의 photonic A/D(Analog to Digital), D/A(Digital to Analog) 변환기 등이 있다<sup>1)</sup>. 또한 최근에는 광학적 조절이 가능한 microwave 소자 연구와 microwave 소자를 사용하여 빛을 검출하고, 이를 통해 광검출기와 microwave 소자를 단일 칩에 집적시키기는 기술도 연구되고 있다<sup>20,21)</sup>. 이러한 연구는 optical injection-locked oscillator, optoelectronic mixer 등의 개발과 소자간의 집적화 기술 발전에 크게 기여하고 있다. 이와 같이 광기술과 microwave 기술의 접합을 통해 기존의 microwave 소자 기술만으로는 구현하기 힘든 기능 소자의 개발을 가능하도록 Microwave Photonics 기술이 널리 응용되고 있다.

이 장에서는 다양한 응용 분야 중 True-time Delay 기술을 응용한 대역 조절 가능한 광학적 마이크로파 필터(photonic microwave filter) 구현과 Metamorphic HEMT를 이용한 optoelectronic mixer에 대해서 살펴보겠다.

### 1. Photonic Microwave Filter

기존의 광학적 마이크로파 필터를 구성하는 방법에는 여러 개의 매우 긴 High Dispersive Fibers(HDF)를 이용하는 방법, 여러 개의 광원과 하나의 HDF를 이용하는 방법, 그리고 여러 개의 광원과 하나의 광섬유 격자(Fiber Bragg Grating)를 이용하는 방법 등이 있다. 그러나 이 방법들은 반드시 필터를 구성하려는 탭 수만큼의 광원 또는 매우 큰 분산 광섬유가 필요하다는 단점을 지닌다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 짧은 분산 보상 광섬유(DCF : Dispersion Compensation Fiber)의 모드 간의 속도 차이를 이용하여 하나의 DCF와 하나의 광원만으로 동시에 여러 개의 탭을 구성하는 방법이 본 연구실에서 제안되었다<sup>19)</sup>.

그림 13은 제안한 광학적 마이크로파 필터 구조를 보여주고 있다. 제안한 필터는 광대역 광원(broadband source), 변조기(modulator), 다중모드 분산 보상 광섬유(MDCF : Multi-mode Dispersion Compensation Fiber)와 중공 광섬유(Hollow Optical Fiber)로 이루어진 광 지연 선로(optical delay line), 그리고 광검출기로 이루어져 있다<sup>1)</sup>. 그림 13은 또한 광 지연 선로 내부에서 진행되는 필드의 모습을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 먼저 단일모드광섬유(SMF)의 기본 모드(fundamental mode)인 LP<sub>01</sub> 모드의 출력이 중공 광섬유의 ring-shaped 모드로 전달되고, 다시 이 모드의 출력은 MDCF 내에 있는 여러 모드로 전달된다. 이 때 각 모드로 전달되는 출력비는 중공 광섬유의 중공 반지름에 의해 결정된다. 중공 광섬유 내에 guide되는 ring-shaped 모드의 출력을 전달받은 DCF내의 각 모드들은 서로 다른 속도로 전파되어, DCF 끝단에서 시간 지연을 만들어 낸다. 결국 탭 수는 모드 수에 의해 결정된다. 실험에서는 4개의 모드(LP<sub>01</sub>, LP<sub>11</sub>, LP<sub>21</sub>, LP<sub>02</sub>)를 갖는 DCF를 이용하였다. 그러나 LP<sub>11</sub>모드와 LP<sub>21</sub>모드로는 중공 광섬유의

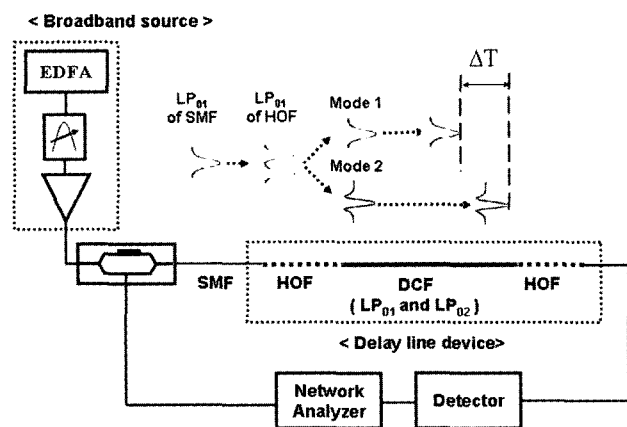


그림 13. 제안한 광학적 마이크로파 필터 구조와 동작 원리

1) HOF와 MDCF는 광주과학기술원 오경환 교수 연구실에서 제작되었음.

ring-shaped 모드와의 mode orthogonality 특성에 의해 중공 광섬유 모드의 신호가 전달되지 않는다. 따라서 오직 LP<sub>01</sub>과 LP<sub>02</sub>모드만이 DCF 내에서 전파한다. 분산 보상 광섬유를 통과한 두 모드는 각각 다시 중공 광섬유를 거쳐 단일 모드 광섬유에 맞는 기본 모드로 coupling 되어 광검출기로 들어가게 된다. 이때 두 모드의 출력이 같다면, 광검출기에서 검출된 신호의 출력은 아래의 식과 같다.

$$p \propto \left| \cos \left( \frac{\beta_{01}L - \beta_{02}L}{2} \cdot \omega_c \right) \right| = \left| \cos \left( \frac{\Delta T}{2} \omega_c \right) \right|$$

위 식에서  $\beta_{0i}$ 는 LP<sub>0i</sub> 모드의 전파 상수 값의 미분 값이고,  $\omega_c$ 는 변조기에 의해 변조된 주파수이다. 그림 14는 network analyzer를 이용하여 측정된 필터의 주파수 응답이다. 광원의 파장에 따라 필터의 특성이 변화됨을 알 수 있다.

## 2. 60 GHz Harmonic Optoelectronic Up-conversion

Millimeter-wave 대역의 유무선 통합 시스템을 위해서 현재 RoF 시스템이 활발히 연구되고 있다. Millimeter-wave 대역은 대기 중의 높은 전송 손실로 인해 많은 수의 BS가 필요로 하게 되는데, 경제적인 유무선 통합 시스템의 구현을 위해서는 간단하고 값싼 BS의 개발이 필요하다. 이의 구현을 위해서, InP HEMT 및 HBT를 이용한 optoelectronic mixer가 활발히 연구 중에 있다. 이러한 소자들은 광수신 및 주파수 상향 변환이 하나의 소자에서 가능하다는 점뿐만 아니라 MMIC공정을 이용, 다른 RF 부품들과 단일 칩으로 구현할 수 있게 되어, 매우 값싼 BS의 구현이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 InP substrate의 높은 가격과 낮은 항복전압 등의 문제는 그것의 대량생산의 걸림돌이 되고 있다. 또한 millimeter-wave 대역의 phase-locked oscillator의 구현은 여전히 논란의 대상이 되고 있다.

이와 같은 문제를 해결할 수 있는 한 가지 방법으로 GaAs substrate 기반의 metamorphic HEMT를 이용할 수 있다.<sup>20,21)</sup> 여기서는 metamorphic HEMT를 이용하여 60 GHz 대역의 harmonic optoelectronic 주파수 상향변환 방법을 소개하겠다<sup>2)</sup>. 그림 15는 사용한 metamorphic HEMT의 epitaxial layer를 나타낸다. 채널 층은 10 nm의 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 층과 20 nm의 In<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>As 층을 사용하여 composite 형태로 구성되어 있다. 1.55  $\mu$ m 빛은 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 채널 층에서만 흡수되며, 이것이 photocurrent를 야기한다. 본 연구에 사용된 소자의 최대 transconductance는 680 mS/mm이고, current gain cut-off frequency( $f_t$ )와 최대 공진 주파수(oscillation frequency( $f_{max}$ ))는 각각 65 GHz와 98 GHz이다. 60 GHz 주파수 상향을 위한 실험 장치도는 그림 16과 같다. IF 신호를 생성하기 위해서 1 GHz로 레이저를 직접 변조하였으며, HEMT의 substrate를 통하여 빛을 입사시켰다. 입사 시 적지 않은 삽입 손실이 발생하므로 lensed fiber와 광섬유 증폭기(EDFA)

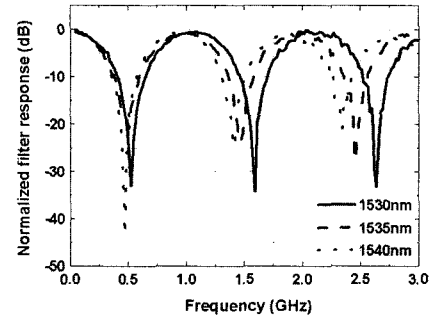


그림 14. 제안된 필터의 주파수 응답

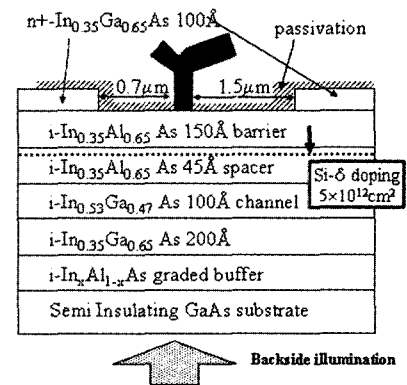


그림 15. Metamorphic HEMT의 epitaxial layer

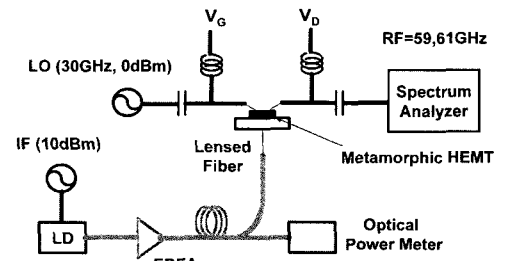


그림 16. 60 GHz optoelectronic 주파수 상향을 위한 실험 장치도

2) 실험에 사용된 Metamorphic HEMT는 서울대학교 서광석 교수 연구실에서 제작되었음.



를 사용하였다. 실험은 common-source configuration을 사용하였고, harmonic optoelectronic 주파수 상향을 위하여 게이트 단에 60 GHz의 절반인 30 GHz LO 신호를 인가하였다. 결과 신호는 드레인(drain)단의 신호를 스펙트럼 분석기를 통해 관찰하였다.

그림 17은 metamorphic HEMT를 사용하여 60 GHz 대역으로 harmonic optoelectronic 주파수 상향의 결과이다. 한편 좀 더 낮은 주파수의 LO 신호를 사용 가능성을 살펴보고자 10 GHz LO를 사용하여 같은 실험을 해 본 결과 같은 61 GHz 대역의 주파수 상향된 신호의 출력은 -45 dBm으로 감소하였다. 그러나 10 GHz의 LO 신호로도 주파수 상향 가능성을 살펴볼 수 있었다. 한편 mixing 효율은 사용한 HEMT에 인가하는 전류 값에 따라 조절 가능하며, 게이트 및 드레인 단에 공급하는 전류 값에 따라 동작 성능을 최적화 할 수 있다.<sup>(20,21)</sup>

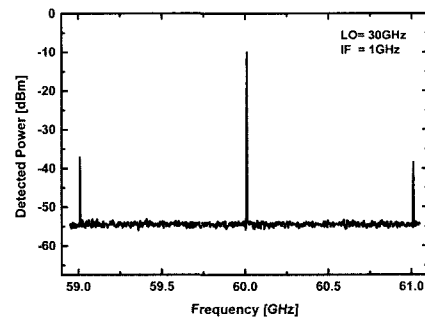


그림 17. 60 GHz 주파수 상향된 스펙트럼

## 결 론

연세대학교 Microwave Photonics 국가지정연구실에서 수행되고 있는 연구 내용을 microwave photonic 신호의 생성, 전송 및 처리 면에서 간략하게 정리하였다. 신호 생성 부분에서는 sideband injection-locking을 이용한 헤테로다인 신호 생성 방법에 대해 정리하였으며, 신호 전송 부분에서는 SOA를 이용한 주파수 상향 방식 및 이를 적용한 60 GHz 유무선 전송 시스템을 살펴보았다. 신호 처리 부분에서는 실시간 지연 방식을 적용한 광학적 마이크로파 필터와 metamorphic HEMT를 이용하여 optoelectronic 방식으로 주파수 상향 기능을 구현한 예를 보였다. 이러한 기술들은 Microwave Photonics 기술의 일부에 지나지 않는다. 많은 Microwave Photonics와 관련된 연구들이 세계 곳곳에서 활발하게 진행 중이다. 더욱이 최근 유무선 통합망을 기반으로 하는 차세대 네트워크에 대한 관심이 고조됨에 따라 Microwave Photonics 기술에 대한 요구는 더욱 증가하리라 예상된다. 또한 우리나라에서도 첨단 국방기술에 대한 자체 기술 확보의 필요성이 대두됨에 따라 microwave photonics 기술을 기반으로 하는 국방과학기술 분야에 대한 관심도 점점 커지리라 예상된다.

## 참고문헌

- (1) A. J. Seeds, "Microwave Photonics," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., vol. 50, no. 3, pp. 877-887, March 2002.
- (2) G. H. Smith, D. Novak, and C. Lim, "A Millimeter-Wave Full-Duplex Fiber-Radio Star-Tree Architecture Incorporating WDM and SCM," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 10, no. 11, pp. 1650-1652, 1998.
- (3) G. L. Abbas, C. S. Hong, G. E. Miller, C. R. Porter, S. Ray, M. C. Reddy, D. K. Smith, and L. Figueroa, "Photonics technology for avionic systems," Proceedings of Digital Avionics Systems Conference, pp. 349-356, 1993.
- (4) J. Leight, B. Toland, "Photonic beamforming technologies for advanced military and commercial SATCOM antennas," Proceedings of Aerospace Conference, vol. 3, pp. 233-237, 1999.
- (5) J. M. Fuster, J. Marti, V. Polo, and F. Ramos, "Demonstration of Dispersion-tolerant 34 Mbit/s Data Transmission in Electrooptically Upconverted 28 GHz LMDS Fiber Optic Link," Proceedings of Int. Microwave Symp., pp. 1205-1208, 1999.

- [6] M. Fujise, H. Harada, and K. Sato, "A Radio-on-Fiber Based Millimeter-wave Road-Vehicle Communication System by a Code Division Multiplexing Radio Transmission Scheme," *IEEE Trans. Intelligent Transportation Sys.* vol. 2, no. 4, pp. 165-179, Dec. 2001.
- [7] J. M. Payne and W. P. Shillue, "Photonic Technique for Local Oscillator Generation and Distribution in Millimeter-wave Radio Astronomy," *Proceedings of Int. Microwave Photonics*, pp. 9-12, 2002.
- [8] *Newton Graphic Science Magazine*, March 2003.
- [9] S. Weisser, E. C. Larkins, K. Czotscher, W. Benz, J. Daleiden, I. Esquivias, J. Fleissner, J. D. Ralston, B. Romero, R. E. Sah, A. Schonfelder, and J. Rosenzweig, "Damping-limited modulation bandwidths up to 40 GHz in undoped short-cavity  $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ -GaAs multiple-quantum-well lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 8, no. 5, pp. 608-610, May 1996.
- [10] D. Chen, D. Bhattacharya, A. Udupa, B. Tsap, H. R. Fetterman, A. Chen, S.-S. Lee, J. Chen, W. H. Steier, and L. R. Dalton, "High-frequency polymer modulators with integrated finline transitions and low  $V_{\pi}$ ," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 1, pp. 54-56, Jan. 1999.
- [11] U. Gliese, et al., "Chromatic dispersion in Fiber-optic microwave and millimeter-wave links," *IEEE Trans. Microwave and Techniques*, vol. 44, no. 10, pp. 1716-1724, 1996.
- [12] 서준혁, 최우영, "헤테로다인 기법을 이용한 광 밀리미터파 신호 생성," *광학과 기술*, pp. 5-11, Jan. 2001.
- [13] 유혜승, 서영광, 최우영, "반도체 레이저의 Side-band Injection-Locking을 이용한 광학적 60GHz 신호 생성," *한국광학회지*, 제14권, 2호, pp. 161-165, April 2003.
- [14] E. Suematsu, and N. Imai, "A Fiber Optic/Millimeter-Wave Radio Transmission Link Using HBT as Direct Photodetector and an Optoelectronic Upconverter," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 44, no. 1, pp. 133-143, 1996.
- [15] M. Tsuchiya, and T. Hoshida, "Nonlinear Photodetection Scheme and Its System Applications to Fiber-Optic Millimeter-Wave Wireless Down-Links," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 47, no. 7, pp. 1342-1350, 1999.
- [16] Y.-K. Seo, C.-S. Choi, W.-Y. Choi, "All Optical Signal Up-Conversion for Radio-on-fiber Applications Using Cross-Gain Modulation in Semiconductor Optical Amplifiers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 10, pp. 1448-1450, October 2002.
- [17] Y.-K. Seo, J.-H. Seo and W.-Y. Choi, "Photonic Frequency-Upconversion Efficiencies in Semiconductor Optical Amplifiers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, no. 5, pp. 751-753, May 2003.
- [18] Y.-K. Seo, J.-H. Seo, and W.-Y. Choi, "60 GHz Radio-on-Fiber Distribution of 2 \* 622 Mb/s WDM Channels Using Remote Photonic-Frequency Upconversion," will be published in *Microwave and Optical Tech. Lett.*, vol. 39, no. 3, pp. 201-203, Nov. 2003.
- [19] K.-H. Lee, W.-Y. Choi, S. Choi, and K. Oh, "A Novel Tunable Fiber-Optic Microwave Filter using Multimode DCF," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, no. 7, pp. 969-971, Jul. 2003.
- [20] C.-S. Choi, H.-S. Kang, D.-H. Kim, K.-S. Seo, and W.-Y. Choi, "60GHz Harmonic Optoelectronic Up-Conversion Using an InAlAs/InGaAs Metamorphic High-Electron-Mobility Transistor on a GaAs Substrate," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 42, pp. L658-L659, June 2003.
- [21] C.-S. Choi, W.-Y. Choi, D.-H. Kim and K.-S. Seo, "A Millimeter-wave Harmonic Optoelectronic Mixer based on InAlAs/InGaAs Metamorphic HEMT," *Proceedings of Int. Microwave Symp.*, pp. 1383-1386, June 2003.