

# 편광 및 위상 부정합을 이용한 광혼합을 통하여 발생된 서브 밀리미터파 대역 연속파의 위상 잡음 특성 개선

## Improvement of Phase Noise Characteristics of Continuous Wave in the Sub-Millimeter Bands Generated by Photomixing Using Polarization and Phase Mismatch

김 성 일 · 강 광 용

Sungil Kim · Kwang-Yong Kang

### 요 약

본 논문에서는 광혼합 방식으로 서브 밀리미터 및 테라헤츠 대역 연속파 신호를 발생시키는 기법 중 가장 널리 사용되는 광반송파가 억제된 양측 대역 발생 방식(Double Sideband-Suppressed Carrier: DSB-SC)을 이용하여 발생된 연속파(Continuous Wave: CW) 신호의 위상 잡음 개선을 위하여 광신호의 편광과 위상 제어 기법을 제안하고 실험적으로 증명하였다. 광신호의 편광 및 위상 제어 기법은 일반적인 DSB-SC 신호와 DSB-SC 신호에 포함된 광반송파와 동일한 파장과 위상차를 가지며, 광반송파의 편광 성분 중 하나의 편광 성분만을 갖도록 편광 제어된 광신호를 결합하여 광혼합하는 방법이다. 실험 및 측정 결과, 서브 밀리미터파 대역 CW 신호의 크기는 1.5 dB 증가하였으며, 위상 잡음 특성은 약 3 dB@10 kHz offset frequency 개선됨을 확인하였다. 따라서 본 논문의 결과는 광신호의 위상 및 편광 성분 제어만으로 광반송파를 효과적으로 억제하여 서브 밀리미터 및 테라헤르츠 대역 CW 신호의 특성을 개선함으로써 광혼합 방법을 이용한 밀리미터파 및 테라헤르츠파 대역 CW 신호 발생기의 저가화를 위한 기본적인 데이터로서 활용 가치가 높다.

### Abstract

In this paper, we have proposed and experimentally performed a polarization and phase control method of an optical signal which has same wavelength with the optical carrier to improve phase characteristics of a continuous wave(CW) generated by the double sideband-suppressed carrier(DSB-SC) as one of the famous photomixing technique for making sub-millimeter and terahertz waves. A polarization and phase controlled optical signal has been coupled with the general DSB-SC on an optical coupler. The output of the optical coupler is then photomixed by a photomixer. From our analysis and measurement results, we have found that the amplitude of the generated sub-mm and terahertz CW signal is higher 1.5 dB and the phase noise is lower about 3 dB@10 kHz offset frequency than the general DSB-SC. Consequently, since our proposed method has improved the amplitude and phase noise of CW signals in the sub-mm and terahertz bands, it can be helpful results to make low cost CW generator in sub-millimeter and sub-terahertz bands.

Key words : Polarization, Phase, DSB-SC, Sub-mm Wave, CW, Photomixing

「본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 정보통신 산업원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음[2009-F-037-01, 테라헤르츠대역 전파환경 및 무선전송 플랫폼기술연구.]」

한국전자통신연구원 융합부품·소재연구부문 테라헤르츠연구팀(Terahertz Research Team, Convergence Components & Materials Research Laboratory, Electronics and Telecommunications Research Institute)

· 논문 번호 : 20100319-027

· 교신저자 : 김성일(e-mail : silkim@etri.re.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 5월 10일

## I. 서 론

정보 통신 기술 및 방송 기술의 발달로 인하여 HD(High Definition)급 고화질 멀티미디어 데이터의 무선 전송에 대한 요구가 증가하고 있다. 고화질 영상 및 방송 기술은 Full HD급 영상에서 3차원 영상 기술로 진화하고 있다. 또한, Full HD급 고화질 영상을 이용한 스포츠 중계, 원격 진료 등을 현장과 시간 지연 없이 실시간 전송하기 위해서는 무압축 전송이 필수적이다.  $10^{-12}$  전송 오율(BER: Bit Error Rate)를 유지하며,  $1,920 \times 1,080$ 의 해상도와 60 Hz의 프레임 율(frame rate)을 갖는 Full HD급 영상을 시간 지연 없이 무압축으로 전송하기 위해서는 약 3 Gbps의 데이터 전송 속도가 필요하다<sup>[1]</sup>. 또한, 3차원 TV를 위한 영상 전송을 위해서는 HD급 데이터 전송 속도의 약 1.5배의 데이터 전송 속도가 요구된다<sup>[2]</sup>. 상기와 같은 무압축된 한 채널의 Full HD급 신호를 전송하기 위해서 약 2 GHz의 대역폭이 필요하다<sup>[3]</sup>. 이러한 방송 통신 기술의 발달로 인하여 단위 시간당 송수신되는 정보의 양이 비약적으로 증가하여 초광대역 무선 통신 시스템에 대한 관심과 연구가 증가되고 있다<sup>[4]~[8]</sup>. 포화 상태인 기존 주파수 자원에서는 초광대역 무선 통신 시스템의 구현 및 실현을 위한 충분한 주파수 대역폭을 확보할 수 없으므로 서브 밀리미터파(sub-millimeter wave) 및 서브 테라헤르츠파(sub-terahertz wave) 대역에 대한 관심이 증가하고 있다<sup>[9]</sup>.

서브 밀리미터파 및 서브 테라헤르츠파를 이용하여 안정적인 초고속 무선 통신 시스템의 구현을 위하여 낮은 위상 잡음과 주파수 및 전력 안정성이 뛰어난 서브 밀리미터파 및 서브 테라헤르츠파 대역의 연속파(Continuous Wave: CW) 발생 장치의 개발 필요성이 증가하고 있다. 서브 밀리미터파 및 서브 테라헤르츠 대역이 광파와 초고주파 대역의 중간에 위치하는 물리적 특성으로 인하여 서브 밀리미터파 및 서브 테라헤르츠파 대역의 연속파를 생성하기 위하여 크게 광전(opto-electronics) 방식과 전전자(fully electronics) 방식의 두 영역에서 연구가 진행되고 있다.

전전자 방식의 경우, 주로 건 발진기(gunn oscillator)와 주파수 체배기(frequency multiplier) 등을 사용하고 있다. 상용화된 건 발진기는 30~100 GHz 대

역에서 동작이 가능하며<sup>[10]</sup>, 일반적으로 발생시키고자 하는 밀리미터파 대역 신호의 크기보다 20~50배의 DC 전력이 필요하므로 효율이 매우 낮다는 단점이 있다<sup>[11]</sup>. 따라서 전전자 방식은 기술적 성숙도가 미약하다는 단점은 있으나, 향후 SiGe, BiCMOS, InP 등을 이용하여 발진기와 능동 및 수동소자를 SoC(System-on-a Chip) 형태로 집적화함으로써 서브 밀리미터파 및 서브 테라헤르츠 대역 시스템을 소형화할 수 있다는 장점으로 많은 연구가 진행되고 있다<sup>[6],[7]</sup>.

광전 방식을 이용한 서브 밀리미터파 및 서브 테라헤르츠파 대역 연속파 발생 기법으로는 1,550 nm 파장 대역 광신호를 이용한 광혼합(photomixing) 기법이 주로 연구되고 있다. 1,550 nm 파장 대역은 기존 광통신망에서 사용되는 파장 대역이므로 다른 파장대에 비하여 상대적으로 많은 능동 및 수동 광부품에 대한 연구가 진행되었으며, 상용화 되었다는 장점이 있다. 광전 방식은 서브 밀리미터파 및 서브 테라헤르츠파 대역 연속파를 생성하기 위하여 전전자 방식에 비하여 상대적으로 좁은 스펙트럼 폭(spectral width)과 낮은 잡음 성분을 갖는 광신호를 신호원으로 사용하므로 발생하는 연속파의 순도(purity)를 증가시킬 수 있고, 기존에 개발된 부품을 활용함으로써 구현이 용이하다는 장점으로 많은 연구가 진행되고 있다<sup>[5],[9],[12]~[22]</sup>. 전전자 방식의 서브 밀리미터파 및 서브 테라헤르츠파 시스템과 비교할 경우, 광전 방식은 광부품과 전자부품이 하이브리드 집적됨으로써 시스템의 크기가 증가한다는 단점이 있으나, 향후 OEIC(Opto-Electronic Integrated Circuits) 등으로 집적화가 진행되면 소형화가 가능할 것으로 예상된다. 따라서, 관련 부품 수급 및 구현의 용이성 관점에서 광전 방식은 서브 밀리미터파 및 서브 테라헤르츠파 대역 시스템의 조기 구현 및 상용화를 실현할 수 있는 기술로서 기대되고 있다<sup>[18]</sup>.

특히, 광전 방식 중 광반송파가 억제된 양측 대역(Double Sideband-Suppressed Carrier: DSB-SC) 발생 방식을 이용한 서브 밀리미터파 대역 연속파 신호 발생 방식은 그 방법이 다른 방식에 비하여 간단하고 구성 비용을 절감할 수 있으며, 안정적인 주파수 특성을 갖는 연속파 신호원을 제작할 수 있다는 장점으로 많은 연구가 진행되고 있다<sup>[17],[19]~[21]</sup>. DSB-

SC 방식은 광반송파 억제 레벨에 따라서 위상 잡음 특성이 변화되므로, 낮은 위상 잡음을 갖는 연속파를 생성하기 위하여 광반송파 억제 레벨을 증가시켜야 한다<sup>[21]</sup>. 일반적인 DSB-SC 방식에서는 광반송파 억제 레벨을 증가시키기 위하여 고가의 광필터를 사용하고 있다.

본 논문에서는 낮은 위상 잡음을 갖는 서브 밀리미터파 대역 연속파 신호를 발생시키기 위하여 별도의 광필터를 사용하지 않고 광신호의 위상과 편광 제어를 통한 DSB-SC 신호에 포함된 광반송파의 억제 레벨을 증가시키는 광신호 편광 제어 기법을 제안하고 실험적으로 증명하였다. 300 GHz 이상의 서브 밀리미터 및 테라헤르츠 파의 검출이 용이하지 않으므로 검출 및 해석이 용이한 100 GHz 연속파를 이용하여 본 논문에서 제안된 방법의 효율성을 검증하였다. 실험 및 측정 결과, 서브 밀리미터파 대역 CW 신호의 크기는 1.5 dB 증가하였으며, 위상 잡음 특성은 약 3 dB@10 kHz offset frequency 개선됨을 확인하였다. 따라서 본 논문의 결과는 광혼합 방법을 이용한 밀리미터파 및 테라헤르츠파 대역 CW 신호 발생기의 저가화를 위한 기본적인 데이터로서 활용 가치가 높다.

## II. 이론적 배경

낮은 위상 잡음과 온도 및 전파 환경 등의 동작 환경에 민감하지 않은 서브 밀리미터파 대역 이상의 주파수를 갖는 CW 신호 발생을 위하여 광신호를 이용하는 광혼합 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[13]~[21]</sup>. 광혼합 기법은 서로 다른 두 개의 광신호를 광혼합기(photomixer)에 입력하여 비팅(beat)시켜 광혼합함으로써 낮은 위상 잡음과 좁은 반치폭(Full Wave Half Maximum: FWHM)을 갖는 초고주파 대역, 서브 밀리미터파 대역 및 테라헤르츠 대역의 CW 신호를 발생시키는 기법이다.

광혼합 기법을 이용하여 서브 밀리미터파 대역 연속파를 발생시키기 위하여 상관관계가 강한 서로 다른 두 파장을 광학적으로 생성시키기 위하여 모드 로킹 레이저(mode locking laser) 기법, 듀얼 모드 레이저(dual mode laser) 기법 혹은 인젝션 로킹(injection locking) 기법 및 DSB-SC 발생 기법, 주파수 콦

(frequency comb) 기법 등이 연구되고 있다<sup>[13]~[21]</sup>.

상기한 다른 기법들에 비하여 DSB-SC 방법은 광학적 헤테로다인(heterodyne) 방식의 일종으로써 그 구성이 단순하며, 원하는 주파수의 신호를 얻기가 용이하기 때문에 많은 연구가 진행되어 왔다<sup>[17]~[21]</sup>. DSB-SC 기법을 이용한 서브 밀리미터 연속파 발생 장치는 단일 파장의 광신호를 광반송파로 활용하여 광 강도 변조기(optical intensity modulator)와 국부 발진기(Local Oscillator: LO)를 사용하여 양측 대역(DSB) 신호를 발생시키고, 광 강도 변조기에 인가되는 바이어스 전압 조절을 통하여 광반송파 레벨을 억제시켜 광혼합기로 입력한 후, 광혼합 과정을 통하여 밀리미터파 및 테라헤르츠파 대역 연속파 신호를 발생시킨다. DSB-SC 변조된 광신호에 포함된 광반송파의 억제 레벨이 증가할수록 발생하는 서브 밀리미터 및 테라헤르츠 파의 위상 잡음 및 전력 특성이 개선된다<sup>[21]</sup>. 따라서 광 강도 변조기에 인가되는 바이어스 전압 조절만으로 광반송파를 억제시키는 일반적인 DSB-SC 신호<sup>[21]</sup>에 포함되는 광반송파의 억제 레벨을 추가적으로 증가시키고자 할 경우에는 광 강도 변조기와 광혼합기 사이에 AWG(Arrayed Waveguide Grating)이나 노치 필터 등의 광필터가 장착된다.

참고문헌 [21]은 광 강도 변조기에 인가되는 바이어스 전압 조절로 변화되는 DSB-SC 신호에 포함된 광반송파 레벨에 따른 서브 밀리미터 및 테라헤르츠 신호의 위상 잡음 및 전력 특성을 분석하였다. 본 논문에서는 광 강도 변조기와 광혼합기 사이에 별도의 광필터를 삽입하지 않고 일반적인 DSB-SC에 포함된 광반송파의 억제 레벨을 추가적으로 증가시키기 위한 광반송파의 편광 및 위상 제어 기법을 제안한다. 별도의 광필터를 사용하지 않고 광반송파의 억제 레벨을 향상시키기 위하여 DSB-SC 신호에 포함된 광반송파와 동일한 파장과 위상차를 가지며, 한 가지 편광 성분만을 갖는 광신호를 DSB-SC 신호와 결합하여 광반송파의 편광 벡터와 DSB 신호의 편광 벡터를 부정합시켜 광혼합함으로써 낮은 위상 잡음을 갖는 서브 밀리미터 및 테라헤르츠 대역 연속파를 생성하였다.

DSB-SC 방식으로 발생하는 광신호의 광혼합된 서브 밀리미터파 신호의 순시 전기장(instantaneous

electric field)은 Square-Root 이론에 의해서 식 (1)과 같이 표현된다<sup>[21],[22]</sup>. DSB-SC 방식의 특성으로 인하여 광반송파와 광반송파를 DSB 변조하여 광반송파의 좌우에 생성되는 측대역 신호의 전기장은 동일한 벡터 방향의 서로 다른 파장을 가지며, DSB 신호의 크기는 동일하다<sup>[21]</sup>. 따라서  $|\vec{E}_c|$ ,  $|\vec{E}_s|$ ,  $\omega_c$ ,  $\omega_{SL}$ ,  $\omega_{SR}$ ,  $\omega_{mm}$  와  $\omega_N$ 는 각각 광반송파와 DSB 전기장의 크기, 광반송파와 DSB 광신호, 광혼합되어 발생된 서브 밀리미터파와 잡음 성분의 주파수를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \vec{E}(0, t) &= |\vec{E}_s|^2 + \frac{|\vec{E}_c|^2}{2} \\ &+ |\vec{E}_s|^2 \cos(2\omega_s t) + \frac{|\vec{E}_c|^2}{2} \cos(2\omega_c t) \\ &+ |\vec{E}_s|^2 \cos(\omega_{OR} t) + 2|\vec{E}_s||\vec{E}_c| \cos(\omega_{OR} t) \\ &+ |\vec{E}_s|^2 \cos(\omega_{mm} t) + 2|\vec{E}_s||\vec{E}_c| \cos(\omega_N t) \end{aligned}$$

(단,  $\omega_{OR} = \omega_{SL} + \omega_{SR}$ ,  $\omega_{OR} = \omega_{SL} + \omega_c$   
 $= \omega_{SR} + \omega_c$ ,  $\omega_N = \omega_{SL} - \omega_c$   
 $= \omega_{SR} - \omega_c$ ,  $\omega_{mm} = \omega_{SL} - \omega_{SR}$ ) (1)

식에서 첫 번째와 두 번째 항은 DC 성분(DC terms)을 나타내며, 세 번째에서 여섯 번째 항은 광혼합을 위하여 사용되는 광전변환기의 동작 주파수 범위를 넘어서는 성분(out-of-range terms)이고, 일곱 번째 항은 DSB 광신호가 광혼합되어 생성되는 서브 밀리미터파 대역의 신호를 나타내며, 마지막 여덟 번째 항은 광혼합기의 동작 주파수 내에 존재하는 DSB 광신호와 광반송파 신호의 광혼합으로 발생하는 잡음 성분을 나타낸다<sup>[21]</sup>.

식 (1)로부터 광혼합 신호에 포함된 잡음 성분은 광반송파와 DSB 신호 벡터의 dot product의 크기에 비례하므로 광반송파 벡터 방향을 변화시키면 DSB 신호 벡터와의 각도 차이로 인하여 광반송파가 추가적으로 억제될 수 있음을 예상할 수 있다. 본 논문에서는 식 (2)와 같이 광반송파와 동일한 파장을 갖고 단일 편광 성분만을 갖도록 제어된 광신호를 DSB-SC 신호와 광결합하여 식 (3)과 같이 벡터 방향이 변화된 광반송파 ( $\vec{E}'_c$ )를 생성하였다. 식 (2)와 (3)에서  $\vec{E}_p$ 와  $E_{p,x}$ 는 각각 단일 편광 성분만을 갖도록 제어된 광신호의 전기장 벡터와 x 방향 성

분을 나타내며,  $E_{c,x}$ 와  $E_{c,y}$ 는 각각 광반송파의 전기장 벡터 ( $\vec{E}_c$ )의 x 방향과 y 방향 성분을 나타낸다.  $\vec{E}_p$ 와  $E_{p,x}$ 는 각각 단일 편광 성분만을 갖도록 제어된 광신호의 전기장 벡터와 x 방향 성분을 나타낸다.  $E_{p,x}$ 는 DSB-SC 신호에 포함된 x 성분 광반송파( $E_{c,x}$ )의 a배( $E_{c,x}$ )에 비례하며, DSB-SC에 포함된 광반송파와 단일 편광 성분만을 갖도록 제어된 광신호의 진행 경로 차이로 인하여  $\phi$ 의 위상차를 갖는다.

$$\begin{aligned} \vec{E}_p(0, t) &= Re\{[\hat{x}E_{p,x}e^{-jktz}]e^{j\omega ct}\} \\ &= \hat{x}E_{p,x}\cos(\omega ct) = \hat{x}aE_{c,x}\cos(\phi)\cos(\omega ct) \end{aligned}$$

(단,  $a \geq 0$ ) (2)

$$\begin{aligned} \vec{E}'_c(0, t) &= Re\{\vec{E}_c + \vec{E}_p\} \\ &= \hat{x}[1 + a\cos(\phi)]E_{c,x}\cos(\omega ct) \\ &+ \hat{y}E_{c,y}\cos(\omega ct) \end{aligned}$$

(3)

DSB 신호와 식 (3)의 광반송파를 이용한 광혼합 결과는 식 (1)의 경우와 동일하게 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 본 논문에서 제안하는 광반송파 억제 방법이 효과가 있는 영역은 식 (1)과 식 (4)의 차이가 1보다 큰 경우이므로, 식 (5)와 같이 표현될 수 있다. 식 (4)와 (5)에서  $\cos(\alpha)$ 는 DSB 벡터와 광반송파 벡터 방향의 차이를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \vec{E}'(0, t) &= DC\ Terms + Out-of-Range\ Terms \\ &+ |\vec{E}_s|^2 \cos(\omega_{mm} t) + 2|\vec{E}_s||\vec{E}_c| \cos(\alpha)\cos(\omega_N t) \end{aligned}$$

(단,  $\omega_{mm} = \omega_{SL} - \omega_{SR}$ ,  $\omega_N = \omega_{SL} - \omega_c$   
 $= \omega_{SR} - \omega_c$ ) (4)

$$\begin{aligned} |\vec{E}'_c| \cos(\alpha) &< |\vec{E}_c| \\ [1 + a\cos(\phi)]\cos(\alpha) &< 1 \text{ and } \cos(\alpha) < 1 \end{aligned}$$

(5)

식 (5)에서  $\cos(\alpha)$ 는 항상 1보다 작으므로  $[1 + a\cos(\phi)]\cos(\alpha)$ 이 1보다 작은 값을 갖도록  $\vec{E}_p$ 의 위상 및 크기를 조절할 경우 광혼합 신호에 포함된 전체 잡음을 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

### III. 실험 결과

그림 1은  $\vec{E}_p$ 와  $\vec{E}_c$ 의 전력 비( $a$ ) 및 위상차

( $\varphi$ )와  $[1 + a \cos(\varphi)]\cos(a)$ 의 관계를 모의 실험한 결과이다. 식 (5)에서 확인한 바와 같이  $[1 + a \cos(\varphi)]\cos(a)$ 가 1보다 작은 영역에서 본 논문에서 제안한 위상 및 편광 제어된 광신호를 이용한 광반송파 억제 기법이 효과가 있으므로 단일 편광 제어된 광신호와 광반송파의 위상차를  $90^\circ$ 에서  $270^\circ$  사이로 조절하고, 광반송파의 전력과 동일하거나 60배 이하의 단일 편광 제어된 광신호를 DSB-SC 신호와 결합하였을 때 DSB-SC에 포함된 광반송파의 억제 레벨을 증가시킬 수 있음을 예상할 수 있다. 또한, 그림에서  $\sim 2$  cm Delay는 단일 편광 제어된 광신호와 DSB-SC 신호의 경로차를 2 cm로 하였을 경우의  $[1 + a \cos(\varphi)]\cos(a)$  값의 변화를 나타낸다. 단일 편광 제어된 광신호와 DSB-SC 신호의 경로차를 조절하여 두 신호의 위상차를 발생시키고, 단일 편광 제어된 광신호의 전력을 조절하여 DSB-SC에 포함된 광반송파의 전력비가  $[1 + a \cos(\varphi)]\cos(a)$ 의 값이 최소값을 갖도록 조절함으로써 광반송파 억제 레벨을 극대화할 수 있음을 예상할 수 있다. 광반송파와 DSB 신호는 강한 상관 관계를 가지므로, 광반송파 억제 레벨이 최대가 되는  $[1 + a \cos(\varphi)]\cos(a)$ 이 최소값을 가질 경우, DSB 신호의 크기가 증가하여 서브 밀리미터 및 테라헤르츠 신호의 파워가 증가한다. 따라서 본 논문에서 제안된 방법으로 광반송파의 억제 레벨은 약 1.5 dB 증가하므로 결과적으로 발생되는 서브 밀리미터 및 테라헤르츠 신호의 파워와 위상 잡음은 각각 약 1.5 dB, 3 dB 개선될 수 있음을 확인할 수 있다.

광반송파와 위상차를 갖는 단일 편광 제어된 광신호를 이용한 DSB-SC 방식의 광반송파 억제 레벨 증가를 확인하기 위한 실험 개념도를 그림 2에 나타내었다. 개념도는 DSB-SC 발생부, 단일 편광 제어된 광신호 발생부와 서브 밀리미터파 대역 CW 발생 및 측정부로 구성된다. DSB-SC 발생부는 MLD, LO, Optical Modulator, EDFA로 구성되며, 각각 DSB-SC 신호 발생을 위한 광반송파를 출력하는 주광원(Master Laser Diode: MLD), 광반송파를 DSB 변조하기 위한 국부 발진기와 광 강도 변조기를 나타낸다. 단일 편광 제어된 광신호 발생부는 광반송파와 동일한 파장을 갖고 상관관계를 갖는 광신호 발생을 위하여 MLD와 동기화된 부광원(Slave Laser Diode:

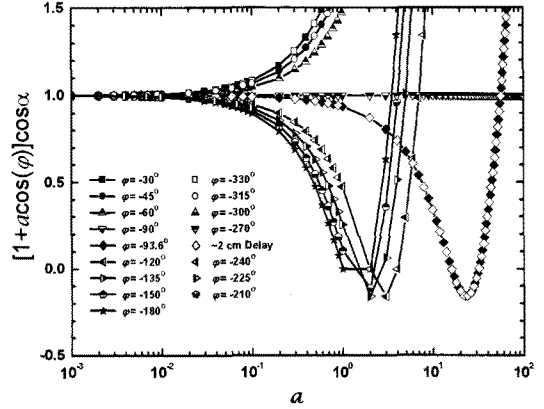


그림 1. DSB-SC의 광반송파 억제 레벨 증가를 위한 위상 및 편광 제어된 광신호의 전력과 광반송파의 전력비( $a$ )와  $[1 + a \cos(\varphi)]\cos(a)$ 의 관계 모의 실험 결과

Fig. 1. A simulation result of a relation between power ratio ( $a$ ) of an phase and polarization controlled optical signal and optical carrier, and  $[1 + a \cos(\varphi)]\cos(a)$  to increase an optical carrier suppression level in the DSB-SC scheme.

SLD), 부광원으로부터 출력된 광신호를 단일 편광 성분만을 갖도록 제어하는 편광 분리기(Polarization Beam Splitter: PBS), 단일 편광 제어된 광신호의 크기 조절을 위한 광증폭기(Erdoped optical Fiber Amplifier: EDFA), 그리고 단일 편광 제어된 광신호와 DSB-SC 신호를 광학적으로 결합하기 위한 광결합기(3 dB coupler)로 구성된다. 서브 밀리미터파 대역 CW 발생 및 측정부는 광혼합기(Photomixer), 전자 주파수 분석기(Electrical Spectrum Analyzer: ESA)와 광 주파수 분석기(Optical Spectrum Analyzer: OSA)로 구성된다.

그림 2에서  $P_{MLD}$ ,  $P_C$ ,  $\lambda_C$ ,  $P_{SL}$ ,  $\lambda_{SL}$ ,  $P_{SR}$ ,  $\lambda_{SR}$ ,  $P_{SLD}$ ,  $P_P$ ,  $V_{LO}$ ,  $f_{LO}$ ,  $V_{DC}$ , 그리고  $V_R$ 은 각각 MLD에서 출력되는 광신호의 전력, 광반송파의 전력과 파장, DSB 신호 중 좌측 대역 신호의 전력과 파장, DSB 신호 중 우측대역 신호의 전력과 파장, SLD에서 출력되는 광신호의 파장, 단일 편광 제어된 광신호의 전력, LO의 출력 신호의 크기와 주파수, 광 강도 변조기에 인가되는 DC 바이어스 전압, 광혼합기에 인가되는 DC 바이어스 전압을 나타낸다.

MLD에서 출력된 광신호는 광반송파로서 50 GHz

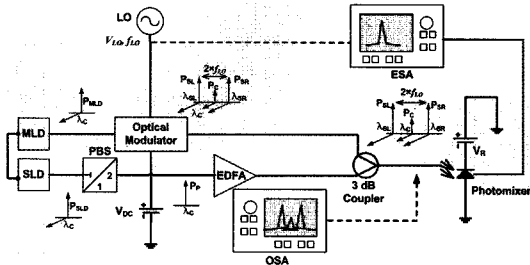
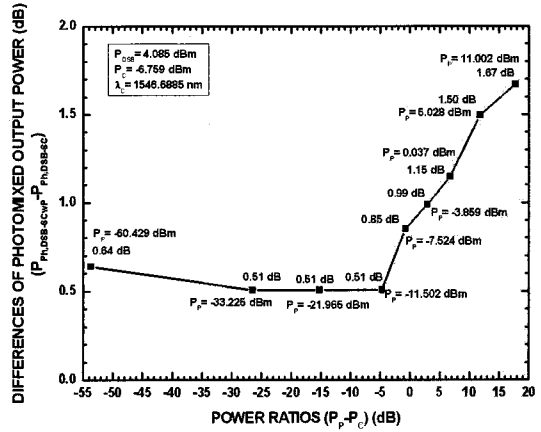


그림 2. 위상 및 편광 제어된 광신호를 이용한 DSB-SC에 포함된 광반송파 억제 레벨 향상 기법의 실험 개념도

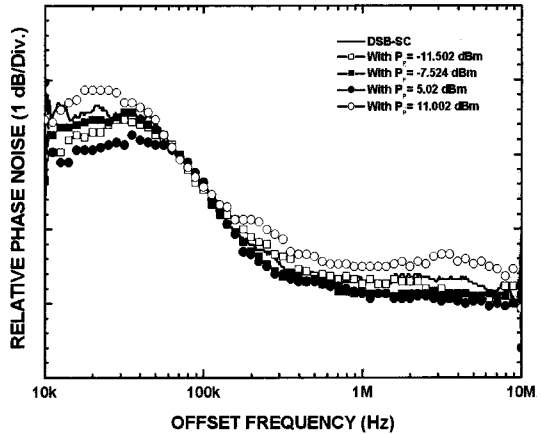
Fig. 2. An experimental diagram for increasing the optical carrier suppression level in the DSB-SC signals coupled by an phase and polarization controlled optical signal.

LO와 광 강도 변조기를 통하여 DSB-SC 변조되어 100 GHz 파장 간격을 갖는 양측 대역 광신호를 생성하며, 광 강도 변조기에 인가되는 DC 바이어스 전압에 의하여 그 크기가 억제된다. PBS에 입력되는 SLD의 출력 광신호는 PBS에 의해서 그림과 같이 단일 편광만을 갖도록 제어되고, 위상차를 갖도록 delay line을 통하여 DSB-SC 신호와 광결합되어 광혼합기로 입력된다. 광혼합기로 입력된 서로 다른 파장을 갖는 광신호는 비팅(beat)되어 100 GHz 서브 밀리미터파 대역 CW 신호를 발생시킨다. MLD의 출력 광신호를 이용하여 양측 대역 변조하여 발생된 양측 대역 광신호와 광반송파는 강한 상관관계로 인하여 동일하게 두 개의 편광 성분(TE와 TM)을 가지므로 편광 벡터도 동일한 방향을 갖는다. 따라서, 광반송파와 동일한 파장을 갖는 단일 편광 제어된 광신호와 결합된 DSB-SC에 포함된 광반송파는 두 편광 성분 중 한 방향 성분의 크기가 변화하여 광반송파의 편광 벡터 방향과 양측 대역 광신호의 편광 벡터 방향간에 식 (4)와 같이  $\alpha$ 의 각도 차이를 발생시킨다. 또한, 그림과 같이 단일 편광 제어된 광신호와 DSB-SC 신호의 전송 경로 차이로 인하여  $\varphi$ 의 위상차를 발생시킨다. 따라서 식 (5)에 나타낸 바와 같이 광혼합되어 발생하는 서브 밀리미터파 대역 CW 신호의 위상 잡음 특성은  $\cos(\alpha)$ 와  $\cos(\varphi)$ 에 비례하여 감소될 수 있다.

위상과 편광 제어된 광신호를 사용하여 DSB-SC 신호에 포함된 광반송파 억제 레벨 증가 효과를 확



(a)



(b)

그림 3. 위상 및 편광 제어된 광신호와 결합된 DSB-SC 방식과 일반적인 DSB-SC 방식으로 광혼합하여 발생된 서브 밀리미터파 대역 CW 신호의 (a) 전력 차이와 (b) 위상 잡음 특성 변화

Fig. 3. (a) Power differences and (b) relative phase noise of the sub-mm CW signal generated by photomixing of the DSB-SC with an phase and polarization controlled optical signal and general DSB-SC.

인하기 위하여 단일 편광 제어된 광신호와 DSB-SC 신호의 전송 경로차가 2 cm일 경우, 광반송파와 단일 편광 제어된 광신호의 전력 비에 따른 서브 밀리미터파 대역 CW 신호의 크기와 위상 잡음을 측정하여 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)와 (b)는 각각 위상 및 편광 제어된 광신호가 DSB-SC와 결합되어 광혼합기에 인가되었을 경우, 발생된 서브 밀리미터파

대역 CW 신호의 크기와 위상 잡음 특성의 변화를 나타낸다.

그림 3(a)에서  $P_{DSB}$ ,  $P_C$ ,  $\lambda_C$ ,  $P_P$ ,  $P_{Ph,DSB-SC}$ ,  $P_{Ph,DSB-SCwP}$ 는 각각 양측 대역 신호의 전력, 광반송파의 전력파장, 위상 및 편광 제어된 광신호의 전력, 일반적인 DSB-SC 방식과 일반적인 DSB-SC 신호에 위상과 편광 제어된 광신호를 추가하여 광혼합한 서브 밀리미터파 대역 CW 신호의 전력을 나타낸다. 실험에 사용된 광반송파의 파장은 1,550 nm 대역의 파장 대역에서 임의로 선택되었다. 그림에서 위상과 편광 제어된 광신호의 전력이 광반송파의 전력보다 작은 영역에서는 광혼합되어 발생된 서브 밀리미터파의 전력 변화가 거의 없으나, 광반송파의 전력, 즉  $P_C = -6.759$  dBm과 동일하거나 그 이상일 경우에는 서브 밀리미터파의 전력이 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 DSB-SC 방식의 광혼합에서 광반송파의 억제 레벨이 증가할수록 광혼합되어 발생하는 서브 밀리미터파의 전력이 증가한다<sup>[21]</sup>. 따라서 위상 및 편광 제어된 광신호의 전력이 증가하여 전력 비가 증가할수록 광혼합된 전력의 차이가 증가하므로 위상 및 편광 제어된 광신호로 인하여 DSB-SC 신호에 포함된 광반송파의 억제 레벨이 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 그림 3(a)에서 위상 및 편광 제어된 광신호의 크기를 5.02 dBm까지 증가시켜 광반송파의 전력과의 전력 비가 약 12 dB일 경우, 광혼합되어 발생하는 서브 밀리미터파 대역 CW 신호의 전력은 일반적인 DSB-SC 방식에 비하여 1.5 dB 증가한다. 12 dB의 전력비는 그림 1의 ~2 cm의 경로차로 인하여  $[1 + a \cos(\varphi)]\cos(\alpha)$ 이 최소값을 갖는 전력 비와 동일한 영역이다.

그림 3(b)에서 위상 및 편광 제어된 광신호의 전력에 따른 광혼합된 서브 밀리미터파 대역 CW 신호의 위상 잡음 특성을 나타낸다. 그림에서 DSB-SC, with  $P_P = -11.502$  dBm, with  $P_P = -7.524$  dBm, with  $P_P = 5.02$  dBm, with  $P_P = 11.002$  dBm은 각각 일반적인 DSB-SC 경우와  $-11.502$  dBm,  $-7.524$  dBm,  $5.02$  dBm,  $11.002$  dBm의 전력을 갖는 단일 편광 제어된 광신호가 일반적인 DSB-SC 신호와 위상차를 갖도록 결합되었을 경우에 발생된 광혼합 서브 밀리미터파 대역 CW 신호의 위상 잡음 특성을 나타낸다. With  $P_P = -11.502$  dBm, with  $P_P = -7.524$  dBm, with  $P_P = 5.02$  dBm,

with  $P_P = 11.002$  dBm은 각각 전력 비(a)가  $-5$  dB,  $-1$  dB,  $12$  dB,  $18$  dB일 경우에 대응된다. 위상 및 편광 제어된 광신호로 인한 광혼합된 서브 밀리미터파 대역 CW 신호의 위상 잡음 특성이 10 kHz에서 10 MHz의 offset frequency 영역에서 일반적인 DSB-SC에 비하여 개선됨을 확인할 수 있다. 특히,  $[1 + a \cos(\varphi)]\cos(\alpha)$ 이 최소값을 갖는 전력 비에 가장 근접한 with  $P_P = 5.02$  dBm의 경우, 일반적인 DSB-SC 방식에 비하여 10 kHz offset frequency에서 약 3 dB 개선됨을 확인할 수 있다. 또한, 모의실험에서 예상한 바와 같이  $[1 + a \cos(\varphi)]\cos(\alpha) \geq 1$ 인 with  $P_P = 11.002$  dBm( $a > 60$ )의 경우, 일반적인 DSB-SC 방식에 비하여 위상 잡음이 증가함을 확인할 수 있다. 따라서 모의실험 결과와 같이 전력 비가 증가하여  $[1 + a \cos(\varphi)]\cos(\alpha)$ 이 최소값을 갖는 전력 비에서 광반송파 억제 레벨이 극대화되어 서브 밀리미터파 대역의 전력과 위상 잡음이 개선됨을 확인할 수 있다.

그림 4는 광혼합된 100 GHz 서브 밀리미터파 대역 CW 신호의 주파수 편이(frequency drift) 특성을 측정된 주파수 스펙트럼이다. 그림에서 DSB-SC와, with  $P_P = 5.02$  dBm는 각각 일반적인 DSB-SC 방식과

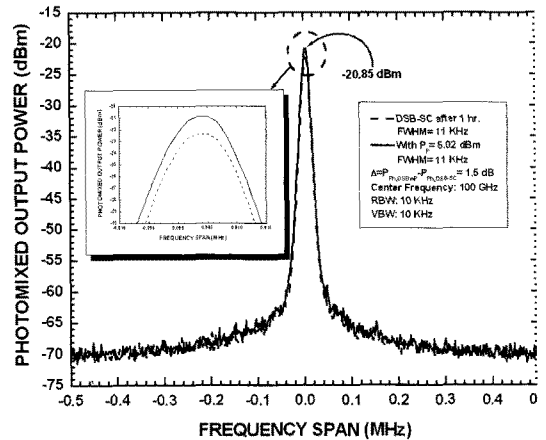


그림 4. 위상 및 편광 제어된 광신호와 결합된 DSB-SC 방식과 일반적인 DSB-SC 방식으로 광혼합하여 발생된 서브 밀리미터파 대역 CW 신호의 주파수 편이 특성

Fig. 4. The frequency drift characteristics of the sub-mm CW signal generated by photomixing of the DSB-SC with an phase and polarization controlled optical signal and general DSB-SC.

5.02 dBm의 위상 및 편광 제어된 광신호가 추가된 DSB-SC 방식에서의 주파수 스펙트럼을 나타낸다. 주파수 편이 특성은 발생된 CW 신호의 시간 변화에 따른 주파수 변화를 나타내므로 신호의 안정성을 평가할 수 있는 지표이다. 주파수 편이를 측정하기 위하여 신호 발생 직후와 1시간 후의 FWHM(Full Wave Half Maximum) 값을 측정하였다. 측정 결과, 위상 및 편광 제어된 광신호가 추가된 DSB-SC 방식과 일반적인 DSB-SC 방식 모두 1시간 전후의 FWHM이 11 kHz로 변화가 없으므로 위상 및 단일 편광 제어된 광신호를 이용하였을 경우에도 DSB-SC 방식과 동일한 주파수 안정도를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 단일 편광 제어된 광신호 발생부가 일반적인 DSB-SC 시스템에 추가되는 본 논문에서 제안된 구조는 구성의 복잡도는 증가하였으나, 신뢰성 있는 동작이 가능함을 확인할 수 있다.

따라서, 본 논문에서 제안한 단일 편광 제어된 광신호를 DSB-SC 신호와 결합하여 광혼합할 경우, 발생된 서브 밀리미터파 대역 CW 신호의 전력 및 위상 잡음 특성 개선에 효과적임을 실험을 통하여 확인할 수 있다. 또한, 본 논문은 광반송파의 편광 및 위상제어를 통하여 DSB-SC에 포함된 광반송파의 억제 레벨을 증가시키는 방법에 관한 내용으로써 본 논문에서 사용한 광반송파의 파장인 1,546.6885 nm 대역 뿐만 아니라 편광과 위상 특성을 갖는 모든 전자기파에서 사용 가능하다.

#### IV. 결 론

서로 다른 두 파장의 광신호를 비팅시켜 밀리미터파 대역 CW 신호를 발생하는 광혼합 방식은 발생되는 신호의 주파수 안정성 확보를 위하여 광혼합에 사용되는 서로 다른 두 파장의 광신호가 강한 상관관계를 유지해야 한다. 단일 파장의 광신호를 갖는 광반송파를 극부발진기와 광변조기를 이용하여 DSB-SC 변조시켜 서로 다른 두 파장을 갖는 광신호를 발생시키는 방법은 그 구성이 단순하고 동작 신뢰성이 우수하여 많은 연구가 진행되고 있다. 일반적인 DSB-SC 방식에서는 광반송파의 억제 레벨을 증가시키기 위하여 고가의 광필터를 별도로 사용하고 있다.

본 논문에서는 별도의 광필터를 사용하지 않고

광반송파와 동일한 파장과 경로차를 갖는 단일 편광 제어된 광신호를 광결합하여 광반송파와 DSB 신호의 벡터 방향과 위상 차이를 발생시켜 광반송파 억제 레벨을 효과적으로 증가시킬 수 있음을 수식과 실험을 통하여 증명하였다. 실험 결과, 광혼합하여 발생된 서브 밀리미터파 대역 CW 신호는 일반적인 DSB-SC 방식과 비교하여 주파수 안정성은 변화가 없었으며, 1.5 dB의 전력 상승과 3 dBc/Hz@10 kHz offset frequency의 위상 잡음 특성 개선이 가능함을 확인하였다.

본 논문의 결과는 고가의 광필터를 사용하지 않음으로서 광신호를 이용한 서브 밀리미터파 대역과 테라헤르츠 대역 신호 발생 장치의 저가격화를 실현시킬 수 있는 기본적인 데이터로서 활용 가치가 높다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Su Khiong Yong, Chia-Chin Chong, "An overview of multigigabit wireless through millimeter wave technology: potentials and technical challenges", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2007, issue 1, pp. 1-10, Jan. 2007.
- [2] Matthew C. Forman, Amar Aggoun, and Malcolm McCormick, "Novel coding scheme for full parallax 3D-TV pictures", *Proceedings of The 1997 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing(ICASSP '97)*, vol. 4, pp. 2945-2947, Apr. 1997.
- [3] IMEC, *IEEE 802.15-0387-02-003c*, Sep. 2006.
- [4] Michael J. Fitch, Robert Oslander, "Terahertz waves for communications and sensing", *Johns Hopkins APL Technical Digest*, vol. 25, no. 4, pp. 348-355, 2004.
- [5] T. Nagatsuma, A. Hirata, R. Yanmaguchi, H. Takahashi, T. Kosugi, M. Tokumitsu, K. Murata, T. Furuta, and H. Ito, "Sub-terahertz wireless communications technologies", *18th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications*, pp. 1-4, Oct. 2005.
- [6] Martin Koch, *Terahertz Communications: A2020 Vision*, pp. 325-338, 2007, Springer.



- [7] C. Jastow, K. Munter, R. Piesiewicz, T. Kurner, M. Koch, and T. Kleine-Ostmann, "300 GHz transmission system", *IEE Electronics Letters*, vol. 44, no. 3, pp. 213-214, Jan. 2008.
- [8] C. M. Mann, *Towards Terahertz Communications Systems*, pp. 261-267, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [9] Akihiko Hirata, Tadao Nagatsuma, Toshihiko Kosugi, Hiroyuki Takahashi, Ryoichi Yamaguchi, Naofumi Shimizu, Naoya Kukutsu, Koichi Murata, Yuichi Kado, Hidehiko Ikegawa, Hiroshi Nishikawa, and Toshihiro Nakayama, "10-Gbit/s wireless communications technology using sub-terahertz waves", *Proc. of SPIE*, vol. 6772, pp. 67720B-1-11, 2007.
- [10] 정현수, 한석태, 이창훈, 밀리미터파 공학, 문운당, pp. 71-75, 1998년 8월.
- [11] Delton T. Horn, *Basic Electronics Theory*, McGraw Hill Professional, pp. 302-307, 1994.
- [12] Toshihiko Kosugi, Akihiko Hirata, Tadao Nagatsuma, and Yuichi Kado, "Mm-wave long-range wireless systems", *IEEE Microwave Magazine*, pp. 68-76, Apr. 2009.
- [13] Amarildo J. C. Vieira, Peter R. Herczfeld, "Microchip laser for microwave and millimeter-wave generation", *IEEE MTT-S IMOC'97 Proceedings*, pp. 333-337, 1997.
- [14] D. Y. Kim, M. Pelusi, Z. Ahmed, D. Novak, H.-F. Liu, and Y. Ogawa, "Ultrastable millimetre-wave signal generation using hybrid modelocking of a monolithic DBR laser", *IEE Electronics Letters*, vol. 31, no. 9, pp. 733-734, Apr. 1995.
- [15] G. Allen Vawter, Alan Mar, Vince Hietala, John Zolper, and John Hohimer, "All optical millimeter-wave electrical signal generation using an integrated mode-locked semiconductor ring laser and photodiode", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 9, no. 12, pp. 1634-1636, Dec. 1997.
- [16] S. Fukushima, C. F. C. Silva, Y. Muramoto, and Alwyn J. Seeds, "Optoelectronic millimeter-wave synthesis using an optical frequency comb generator, optically injection locked lasers, and a uni-traveling-carrier photodiode", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, no. 12, pp. 3043-3051, Dec. 2003.
- [17] Hiroyuki Furuta, Mikio Maeda, Toshihiro Nomoto, Jun Kobayashi, and Shegeo Kawasaki, "Optical injection locking of a 38-GHz-band InP-Based HEMT oscillator using a 1.55- $\mu\text{m}$  DSB-SC modulator lightwave", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 11, no. 1, pp. 19-21, Jan. 2001.
- [18] Hiroshi Ito, Fumito Nakajima, Tomofumi Furuta, and Tadao Ishibashi, "Continuous THz-wave generation using antenna-integrated uni-travelling-carrier photodiodes", *Semiconductor Science and Technology*, vol. 20, pp. S191-S198, Jun. 2005.
- [19] J. J. O'Reilly, P. M. Lane, R. Heidemann, and R. Hofstetter, "Optical generation of very narrow line-width millimetre wave signals", *IEE Electronics Letters*, vol. 28, no. 25, pp. 2309-2311, Dec. 1992.
- [20] Guohua Qi, Jianping Yao, Joe Seregelyi, Stephane Paquet, and Claude Belisle, "Generation and distribution of a wide-band continuously tunable millimeter-wave signal with an optical external modulation technique", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 10, pp. 3090-3097, Oct. 2005.
- [21] 김성일, 강광용, "광반송파가 억압된 양측 대역 방식의 광혼합을 통하여 발생된 밀리미터파 대역 연속파에서 광 반송파 억압 레벨에 따른 위상 잡음 특성 분석", *한국전자파학회논문지*, 20(9), pp. 974-982, 2009년 9월.
- [22] Masahiko Tani, Osamu Morikawa, Shuji Matsuura, and Masanori Hangyo, "Generation of terahertz radiation by photomixing with dual-and multi-mode lasers", *Semiconductor Science and Technology*, vol. 20, no. 7, pp. S151-S163, Jul. 2005.

김 성 일



1995년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)  
1997년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)  
2008년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학박사)  
1997년 1월~1997년 10월: 현대전자

연구원

1997년 11월~2000년 4월: LG 전자 주임연구원

2000년 5월~현재: 한국전자통신연구원 선임연구원

[주 관심분야] 초고속/고밀도 반도체 집적 회로/패키지를 위한 Signal Integrity/EMI/EMC 설계 및 측정, THz 통신 시스템 설계 및 구현

강 광 용



1975년: 서울대학교 섬유고분자공학과 (공학사)  
1988년: 부산대학교 물리학과 박사 졸업 (이학박사)  
1989년~현재: 한국전자통신연구원 융합·부품연구부문 테라전자연구팀장

[주 관심분야] 강유전체(ferroelectrics) 박막성장/물성 및 초고주파 소자, 고온초전도 마이크로파 수동·능동 부품 설계/제작(공진기, 필터, 믹서등), 금속-절연체 상전이(MIT)형 소자 및 소자(초고속 트랜지스터), THz-electronics/photonics 소자/THz-wave Source, THz 응용 분야(T-ray 분광/이미징/센싱/통신 기술)