

# 밀리미터파와 테라헤르츠-파의 발생기술

Generation of Millimeter and Terahertz Wave

## 목 차

- .....
- I. 서론
  - II. 펄스파에서 연속파(CW)까지
  - III. 단색(monochromatic) 광학 밀리미터/테라헤르츠-파 신호원
  - IV. 고출력 광전 변환기(O/E Converter)용 포토다이오드(PD)
  - V. 밀리미터/테라헤르츠-파 PD 기술의 진화
  - VI. 밀리미터/테라헤르츠-파 분광측정
  - VII. 결론

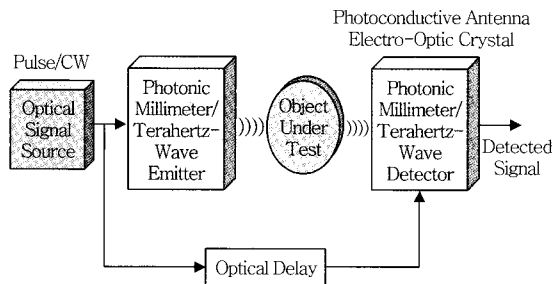
백문철 (M.C. Paek)	테라전자연구팀 책임연구원
김성일 (S.I. Kim)	테라전자연구팀 선임연구원
강광용 (K.Y. Kang)	테라전자연구팀 팀장
T. Nagatsuma	일본 오사카 대학

새로운 전파자원으로서 초고속 무선통신뿐만 아니라 분광, 센싱, 이미징 등 여러 분야에서 다양한 응용이 기대되는 연속 밀리미터파와 테라헤르츠-파에 대한 발생 및 응용 기술을 논하였다. 밀리미터파의 경우 전자소자를 이용한 방법을 주로 사용하지만, 테라헤르츠-파는 전자 및 광기술을 모두 사용하여 발생시킬 수 있다. 본 글에서는 광학적 방식을 이용한 연속 밀리미터/테라헤르츠-파의 발생기술과 이를 이용한 응용기술에 대하여 논하였다. 최근 고출력 PD의 기술발전에 따라 광학적 발생방식의 밀리미터/테라헤르츠-파를 이용한 CW 분광 측정이 유용할 것으로 보인다. 현 단계에서 1THz에서의 최대 가용 출력은 약  $10\mu\text{W}$  정도이나, 포화전류와 열 관리 문제를 해결하고 PD 성능의 개선을 함으로써, 단일 소자에서 1THz에 대한 최대 가용출력이  $100\mu\text{W}$  수준이 될 것으로 기대된다. 연속 밀리미터/테라헤르츠-파 분광법은 더욱 정밀하고, 다양하며 경제적인 분광 시스템 기술에 크게 기여할 것으로 전망된다.

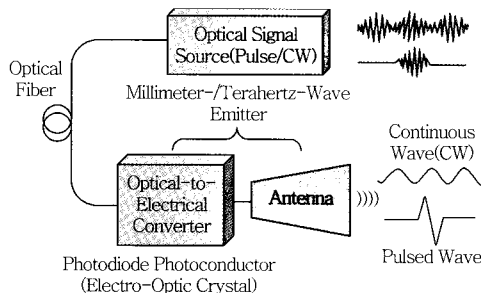
## I. 서론

밀리미터파와 테라헤르츠-파는 30GHz에서 10THz까지의 주파수 대역으로서, 최근 들어 분광 및 센싱 [1]-[3] 뿐만 아니라 초광대역 무선통신[4]-[6]에 이르기까지 우수한 특성이 알려지면서 많은 연구가 이루어지고 있다. 그런데 이와 같은 밀리미터파와 테라헤르츠-파의 응용기술을 개발하는 데 장애물 중의 하나는 적합한 고체 신호원이 없다는 것이다 [7]. 사실 이 영역의 주파수 대역은 테라헤르츠 갭(Terahertz gap)으로 불리고 있기도 하다[8].

1980년대 후반부터 광기술의 발달로 테라헤르츠-파에 대한 열정적인 연구가 이루어져 극초단 펄스 레이저(펨토초 레이저) 기술을 이용한 테라헤르츠 펄스파를 발생시키고 검출하는 기술이 개발되었으며, 해당 주파수 영역에서 풍부한 테라헤르츠 스펙트럼을 제공하고 있다. 펄스 전자기파에 기초한 이와 같은 방식은 1980년대 Maxwell에 의하여 예견된 전자기파를 실험적으로 검증한 Hertz의 경우와 매우 닮아 있다.



(그림 1) 광기술에 기반을 둔 밀리미터/테라헤르츠-파 분광 시스템의 구성도



(그림 2) 광학 기반의 밀리미터/테라헤르츠-파 방출기

광기술 시스템의 전형적인 구성은 (그림 1)과 같다. 밀리미터/테라헤르츠-파의 발생기와 검출기는 일반적으로 광전도안테나(photoconductive antenna) 혹은 비선형 광학소재(nonlinear optical materials) 등의 전광결정(electro-optic crystal)을 이용한다. (그림 2)는 광학방식의 밀리미터/테라헤르츠-파의 방출기를 자세히 나타낸 것이다. 밀리미터파와 테라헤르츠-파의 발생을 위해서는 광학 방식이 종래의 전자소자를 이용한 방식에 비하여 신호대역 폭의 측면에서 우수하다. 또한, 광섬유를 이용할 경우 밀리미터/테라헤르츠-파 신호를 장거리까지 전달할 수 있다. 이러한 펄스파 기술에 의해 발생된 주파수 스펙트럼은 170THz의 근적외선 대역까지 이르렀다[9].

레이저 펄스를 이용한 밀리미터/테라헤르츠-파 기술은 극초단 시간을 제어할 수 있는 능력을 가지고 있어 이전까지 없었던 새로운 분광 및 영상분야에 강력하고 유용한 기능을 제공할 수 있다. 특히, 테라헤르츠 시영역 분광(THz-TDS) 시스템은 밀리미터/테라헤르츠-파의 연구를 위한 실험실에 설치되고 있으며 이미 상용화되어 있기도 하다. THz-TDS 시스템에서는 주파수 특성이 시영역 데이터의 푸리에 변환(Fourier transformation)을 통하여 얻어지며, 주파수 해상도는 (그림 1)에서 보인 시간 지연(time delay)에서 정해지는 시간창(time window)에 의하여 결정된다. 보통은 THz-TDS 시스템에서의 주파수 해상도는 100MHz~1GHz 정도이며, 펄스 레이저의 반복 주파수(repetition frequency)와 광 지연선(optical delay line)의 주사길이(scan length)에 의하여 정해진다.

## II. 펄스파에서 연속파(CW)까지

최근, 연속파를 이용하는(CW) 분광 시스템은 정밀하게 제어되는 단색광원의 주파수를 사용하면서 매우 큰 관심을 끌고 있다[10],[11]. 이 CW 시스템은 높은 신호 대 잡음비(SNR)와 스펙트럼 해상도를 가진다. 시편의 분석하고자 하는 특정 흡수선에 대해서 해당하는 단색광 주파수 대역을 선택함으로써, 선택

된 주파수-스캔거리 및 해상도로 데이터를 수집하며 실제적으로 CW 시스템 가격 측면에서도 유리하다.

광학적인 밀리미터/테라헤르츠-파 발생기 및 검출기를 사용하는 CW 시스템은 호모다인 시스템(homodyne system)으로 불리며 그 구성은 광신호원을 제외하고 (그림 1) 및 (그림 2)의 THz-TDS 시스템과 동일하다. 호모다인 검출에서 광 지연선은 간섭신호를 최대로 조정된 후에 고정된다. 전광(all optical) 기반의 CW 분광 시스템에서 SNR은 80dB 이상의 값을 가진다[10].

광학 검출기 이외에도, (그림 3)과 같이 몇 가지 전자 기반의 CW 검출기가 사용된다. (그림 3)의 직접 검출에서는 차단주파수 1~10THz인 상용의 쇼트키 다이오드(Schottky diode)를 사용하여 손쉽게 얻을 수 있다. 쇼트키 장벽 다이오드 믹서(SBD)와 국부 발진(LO) 신호원(그림 3b)을 사용한 헤테로다인 검출기는 높은 감도를 가지고 있으며 이 감도는 초전도-절연체-초전도체(SIS) 믹서를 사용할 경우 더욱 향상된다. 초전도체 믹서의 다른 장점은 극히 적은 LO 파워(10nW~1μW)를 사용한다는 점이다. 헤테로다인 검출기에서 광학 LO 신호를 사용하면(그림 3c), 광학 신호 발생의 주파수 가변폭(tunability)이 본질적으로 넓으므로 수신기 대역폭을 증가시킬 수 있다. 이와 같이 다양한 방식의 밀리미터/테라헤르츠-파 검출 방식을 이용함으로써, CW 분광 시스템

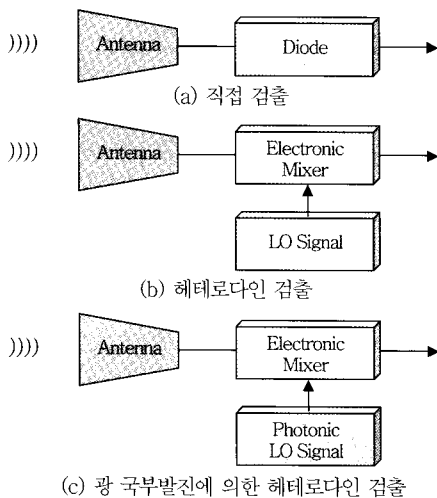
은 주파수 대역폭, 해상도, 감도 등의 시스템 성능과 크기, 가격 등을 고려하면서 최적으로 선택할 수 있기 때문에 더욱 관심을 끌고 있다.

### Ⅲ. 단색(monochromatic) 광학 밀리미터/테라헤르츠-파 신호원

CW 분광 시스템에서 주파수 가변 광신호원은 광 전 변환기와 함께 광학 기반의 밀리미터/테라헤르츠-파 방출기를 구현하는 데 매우 중요한 위치를 차지한다. 실제로, 장파장(1.3~1.55μm)에서 동작하는 광소자는 밀리미터/테라헤르츠-파의 데이터 전송용 매체로서 광섬유 케이블을 효과적으로 사용하기 위해서는 필수적이다.

주파수 가변의 CW 광학 밀리미터/테라헤르츠-파 신호의 발생을 위하여 가장 유망한 방법은 서로 다른 파장의 2개 광을 이용하는 광 헤테로다인 방식이다[12]. (그림 4a)와 같이 파장 가변의 2개 레이저 광원을 사용하는 광 헤테로다인은 가장 간단하면서 경제적인 방법이다. 밀리미터/테라헤르츠 대역용의 값비싼 전자소자를 사용할 필요가 없기 때문이다. 그러나 주파수 안정성은 일반적으로 떨어진다. 예를 들어, 위상 잡음은 100MHz의 오프셋 주파수에서 -75dBc/Hz이며, 주파수 변이(frequency drift)는 2개의 프리런(free running) DFB 레이저를 사용할 때에 10MHz/h 이상이 된다[13]. 따라서 분광 시스템에서 스펙트럼 해상도를 100MHz 이하로 요구할 때에는 특별한 위상 잠금(phase locking) 시스템이 필요하다.

(그림 4b)는 또 다른 광 헤테로다인 기법을 보인 것으로 극히 낮은 위상 잡음신호를 발생한다[11], [14]-[16]. 핵심 부품은 광 주파수 빗(frequency comb) 발생기로서 다중 주파수(파장)의 광신호를 만들고[17],[18] 하나의 광필터를 사용하며 이들 중에서 2개의 신호를 선택한다. 광 주파수 빗 발생기에는 2가지 형태가 있다. 하나는 모드-잠금(mode-locking)의 초단 펄스 레이저에 기반을 두며, 다른

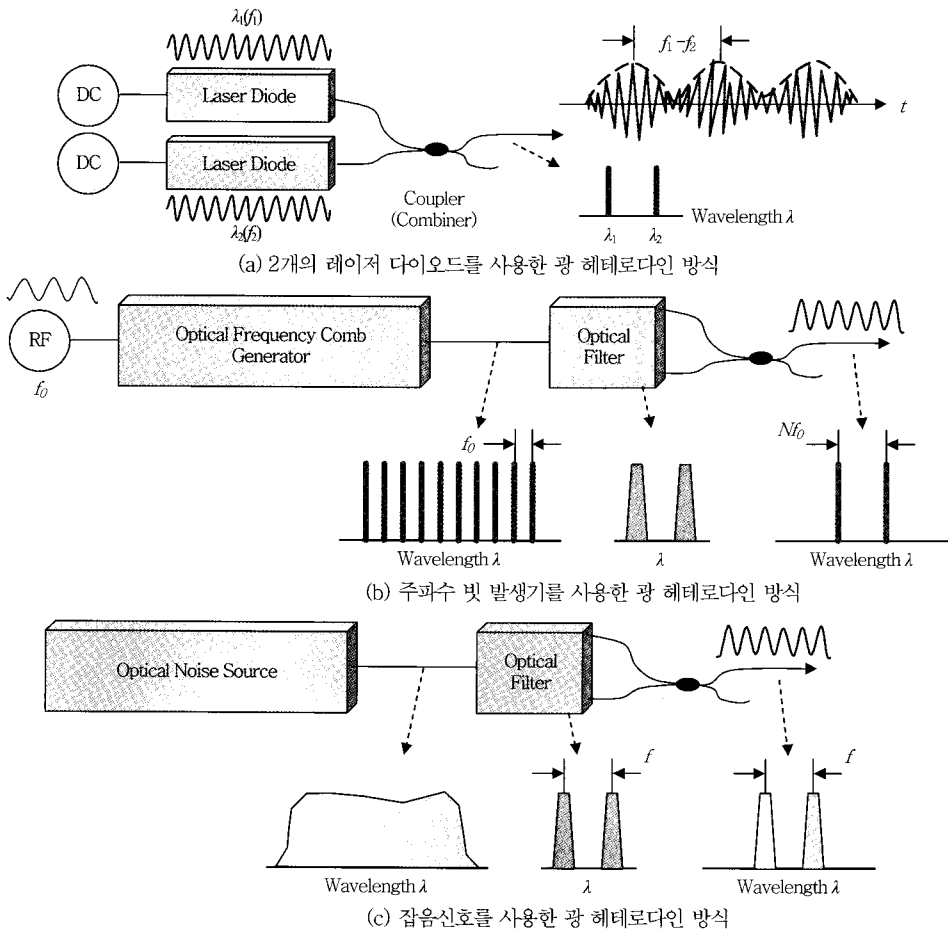


(그림 3) CW 밀리미터/테라헤르츠-파의 검출기술

하나의 단일 모드 레이저와 광 증폭기 및 위상변조기를 결합한 것이다. 이들은 모두 다중 주파수의 광 신호를 발생시키며 각 주파수의 간격은 레이저와 변조기에 대해 각각 구동 주파수(driving frequency)  $f_0$ 와 같고, 모든 모드는 위상 잠금이 되어 있다. 두 개의 모드를 선택하고 결합시키는 것은 주파수 다중화  $Nf_0$ 에 해당한다. 기본 주파수  $f_0$ 는 보통 상용화되어 있는 광 변조기 및 구동 전자소자에 대하여 10~30GHz 범위이며, 다중화 인자(multiplication factor)는 50 이상으로 조절된다. 기본 주파수  $f_0$ 의 정밀한 조정(tuning)은 합성 신호(synthesized signal) 발생기를 사용함으로써 가능하고, 주파수는  $f_0$ 에서  $Nf_0$ 까지 연속적으로 변화시킬 수 있다. 발생한 신호의 위상잡음은 합성신호 발생기보다  $N$ 배가 된

다[11]. 광학 기반의 밀리미터/테라헤르츠-파 신호 발생기의 장점은 상대적으로 낮은 주파수의 전자 및 광학부품을 이용하여 연속 가변성과 낮은 위상잡음 신호를 얻을 수 있는 점이다.

단색광원 이외에, 잡음 신호원(noise source)도 푸리에 변환 분광과 같이 광대역 분광 측정용으로 유용하게 사용될 수 있다[19]. 강력한 CW 밀리미터/테라헤르츠-파 잡음신호의 발생을 위한 간단한 광학 기법을 (그림 4c)에 보였다[20]. 광 증폭기로부터 자발적으로 발생한 광대역 잡음을 잘라서 특정 주파수  $f$ 를 가지는 2개의 대역으로 분리하면, 주파수  $f$ 를 중심으로 한 밀리미터/테라헤르츠-파 잡음이 광전 변환기에 의해 발생한다. 잡음신호의 대역폭은 광 필터에 의해 결정된다.



(그림 4) 광 연속 밀리미터/테라헤르츠-파의 서브 캐리어 발생기

## IV. 고출력 광전 변환기(O/E Converter)용 포토다이오드(PD)

광학 기반의 밀리미터/테라헤르츠-파 방출기에서는 고주파수 동작 이외에 실제로 여러 분야의 응용을 위해서 광전 변환기의 고출력 전류 동작이 요구된다. 여러 가지의 장파장 광전 변환기술 중에서 일방향 주행 캐리어 광 다이오드(UTC-PD)라 불리는 PD가 100GHz 이상의 주파수에서 가장 높은 출력을 보여왔으며, 1997년 처음 등장한 이래로 적응 및 소자구조에서 다양한 개선이 이루어져 왔다[21].

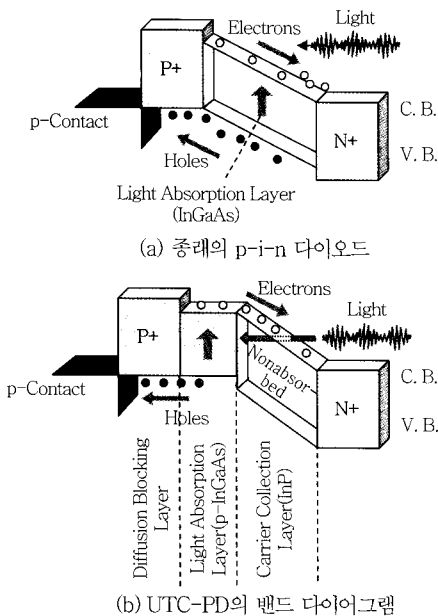
전통적인 p-i-n PD와 UTC-PD의 밴드 다이어그램을 (그림 5a, b)에 개념적으로 각각 보였다[21]-[23]. P-i-n PD에서는 광의 흡수가 InGaAs 진성 영역(공핍층)에서 일어나며 전자-정공 쌍이 생성된다. 대조적으로 UTC-PD의 활성영역은 2개의 층으로 구성되어 있는데 하나는 중성(undepleted)의 좁은 갭을 가진 광 흡수층(p-형 InGaAs)이고, 다른 하나는 도핑이 안되었거나 저농도로 n-형 도핑된 층(depleted)으로 넓은 갭을 가지는 캐리어 수집층(collection layer; InP)이다. 전자-정공 쌍은 흡수

층에서만 생성이 되며, 캐리어 수집층은 조사되는 1.55 $\mu\text{m}$  파장의 광에 대해 투명하다. 전자와 정공간에 크게 다른 전송특성(이동도(mobility)와 유동속도(drift velocity))이 이하에서 논의하는 내용의 핵심이다.

UTC-PD에서는 흡수층에서 광-생성된 소수 캐리어 전자는 수집층의 공핍영역으로 확산되거나 표류된다. 흡수층 도핑레벨이나 밴드갭 조절을 통해서 전기장(quasi-field)을 가할 경우, 흡수층에서 전자의 주행시간을 효과적으로 줄일 수 있다. 반면에, 광-생성된 다수 정공(majority hole)은 그들의 집단운동을 통해 유전체 완화시간(dielectric relaxation time) 이내에서 아주 빠르게 반응한다. 이하에서 UTC-PD의 광 응답은 전체 구조에서 볼 때 전자의 수송특성에 의해 지배를 받는다. 이것은 종래의 p-i-n 다이오드에서 전자와 정공이 모두 반응에 기여하고, 저속의 정공 수송에 의해 전체 성능이 지배를 받는 것과 확연히 차별화되는 점이다. 전자의 속도( $3\sim 5 \times 10^7 \text{cm/s}$ )는 정공의 속도( $5 \times 10^6 \text{cm/s}$ )에 비하여 6~10배 정도 빠르다. UTC-PD에서는 전자가 InP 수집층에서 지나친 속도를 갖게 되고, 그 결과 적당한 흡수층 두께를 가지는 UTC-PD의 전체 동작속도는 비공핍층에서의 전자 확산시간이 결정하게 된다.

이 외에도, RC 시상수(time constant)가 동작속도를 결정하는 또 다른 요인이다. RC 제한 대역폭(RC limited bandwidth)  $f_{3dB} = f_{3dB} = 1/RC = d/\epsilon A R$ 로 나타낸다. 여기에서  $d$ 는 활성층의 두께이고  $A$ 는 소자의 면적이다. 주행시간 제한 대역폭(transit time limited bandwidth)을 크게 하기 위해서는 매우 얇은 흡수층이 사용되지만, 이 경우 p-i-n PD에서는 RC 제한 대역폭이 감소하게 된다. 반면에, 흡수층과 캐리어 수집층 두께를 독립적으로 설계하고 흡수층 두께를 더 얇게 함으로써, UTC-PD에서는 RC 충전 시간을 희생시키지 않고 주행시간 제한 대역폭을 증가시킬 수 있다.

UTC-PD의 다른 장점은 고주파 동작임에도 불구하고 포화전류의 출력이 높다는 것이다. 이유는



(그림 5) P-i-n PD와 UTC-PD 밴드 다이어그램

공핍층의 공간전하 효과(space charge effect)가 감소하기 때문이며, 이는 공핍층에서 전자의 속도가 빨라진 결과이다. 이러한 메커니즘들의 실질적인 차이점으로 인해 포화전류에서 10배까지의 큰 차이를 보인다. P-i-n PD에서는 광-생성된 캐리어들이 흡수층에 저장되므로 밴드의 프로파일이 높은 여기조건에 의해 구부러진다(band bending). 전기장이 저하하면서 캐리어의 속도를 급격히 감소시키며 전하의 축적을 증가시키고, 결과적으로 출력전류를 포화시킨다. 이 상황은 UTC-PD에서도 유사하지만 전기장이 저하되더라도, 공간전하는 전자로만 이루어져 있으며 과도상태(overshoot)에서 이 전자의 속도는 정공에 비하여 훨씬 빠르다. 그러므로, 출력전류는 전류밀도가 p-i-n PD에 비하여 10배 정도 될 때까지도 포화되지 않는다.

## V. 밀리미터/테라헤르츠-파 PD 기술의 진화

여기에서는 UTC-PD의 진화를 다른 형태의 밀리미터/테라헤르츠-파 PD와 비교하여 논의한다. 그동안 구조의 설계, 캐리어 수송 설계 및 회로 설계

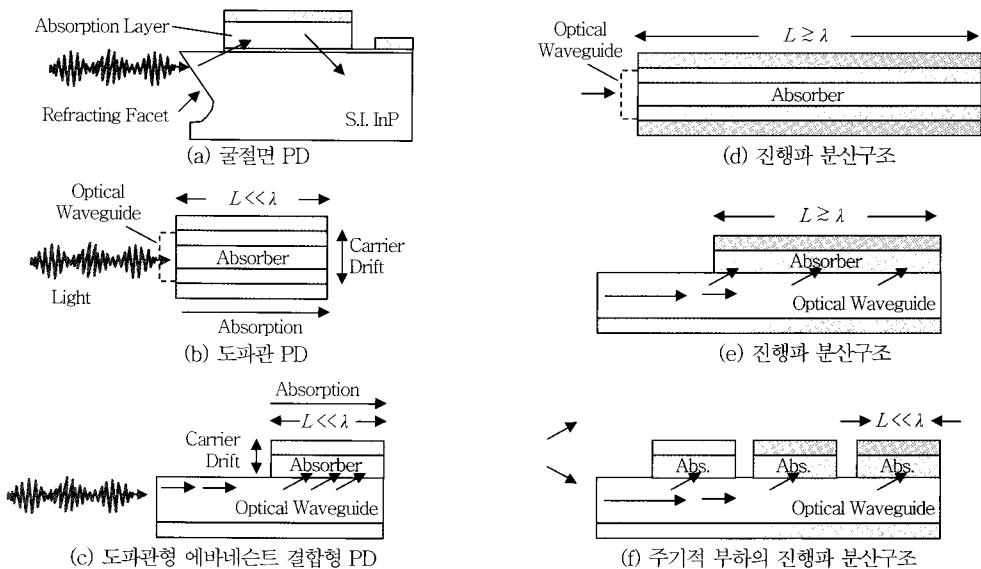
등의 관점에서 PD의 성능을 개선시키기 위한 많은 시도가 있었다.

### 1. 구조 설계

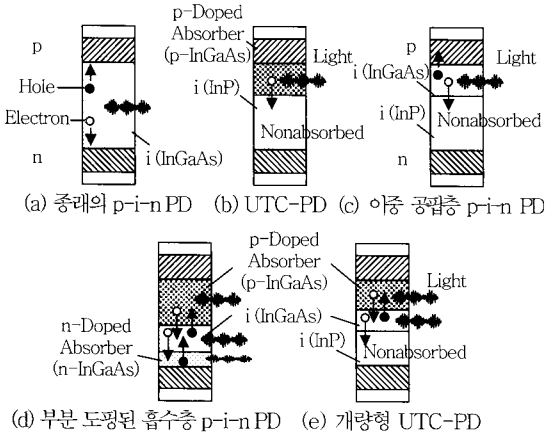
광 흡수구조에서는 모서리 조사(edge-illumination) 구조가 대역폭을 유지하면서 PD의 응답성 효율을 향상시키는 방안으로 고안되었다(그림 6 참조). 이 구조는 (a) 굴절면(refracting facet) PD[24], (b) 도파관 구조 PD[25] 및 (c) 도파관형 에바네스cent 결합형(waveguide-fed evanescently coupled) PD[26]-[30]로 구분된다. 게다가 도파관 구조 PD와 도파관형 에바네스cent 결합형 PD는 분산구조(distributed structure)로 확대되고, 빛의 조사방향으로 PD의 길이를 증가시켜 RC 시상수를 극복함으로써 대역폭을 더욱 향상시킨다. 분산구조는 진행파(traveling wave) PD(그림 6d), (그림 6e) [28]-[30]와 주기적인 부하를 받는 진행파(또는 속도와 부합한 분산의) PD(그림 6f)[26]로 구분된다.

### 2. 캐리어 수송 설계

PD에서의 캐리어 동력학을 고려하면 아직도 소



(그림 6) PD의 구조도



(그림 7) PD의 적층구조

자 적층구조 및 소재의 최적화를 위한 여지가 남아 있다[31],[32]. (그림 7)은 지금까지 실험된 다이오드 층상구조에 대해 요약한 것으로서 (a) 종래의 p-i-n 다이오드와 (b) UTC-PD에서 시작하여 개량형 PD까지, 성능 매개변수인 속도(대역폭), 응답특성 및 출력(포화전류)의 향상과정에 대해 보인 것이다. 이 매개변수 사이에는 타협점(trade-off)이 존재하며 제약점들(constraints)은 다이오드의 적층구조에 따라 달라진다. 소자의 규모(scaling) 또한 항상 대역폭을 향상시키는 방향으로 개선되고 있다. 그러므로 특정 조건 하에서의 비교가 필요하다. 여기에서는 모든 구조가 동일한 접합크기와 커패시턴스를 가지는 것으로 가정한다. 즉, RC 시상수와 자체 발열은 공통으로 한다.

혼성(hybrid) 형태의 p-i-n 유사구조를 (그림 7c)에 보였다. 여기에서 흡수 및 비흡수 진성층이 결합되어 있으며 이를 이중 공핍층형의 p-i-n PD라 한다[33],[34]. 이중 (공핍 및 비공핍) 흡수층은 (그림 7d)에서 보인 바와 같다. 이것은 부분 도핑된 흡수층 PD로도 불린다[35],[36]. 부분 도핑된 흡수층 PD는 InP 수집층이 InGaAs 수집층으로 대체된 점에서 보면 InP/InGaAs UTC-PD와 동일하다. 이 구조는 p-i-n PD보다 더 낮은 정공밀도로 동작하며 그 포화전류 수준은 점점 높아진다. 부분 도핑된 흡수층 PD에서, p-i-n PD에 비하여 InGaAs 공핍층이 더 얇아질 경우 열관리 문제에 더 심각해질 수 있

다. 왜냐하면, InGaAs 층의 열전도도가 좋지 않기 때문이다. 이 구조는 또한 응답특성을 증가시키는데 효과적이다. (그림 7e)에 보인 것은 UTC-PD와 이중 공핍층 p-i-n PD의 복합구조이다. 공핍층인 i-InGaAs의 두께는 총 흡수층의 두께가 같다는 조건에서 최소화할 수 있다. 그러므로 응답특성은 일정하게 유지된다.

이러한 결과는 정공의 공간전하밀도를 상당히 감소시키고 출력 포화수준을 더 높게 된다. 이러한 PD는 종종 개량형 UTC-PD로 불리기도 한다[37]. 복합구조는 모든 가능한 설계요소를 포함하며 다른 구조들은 이러한 구조의 변형이다.

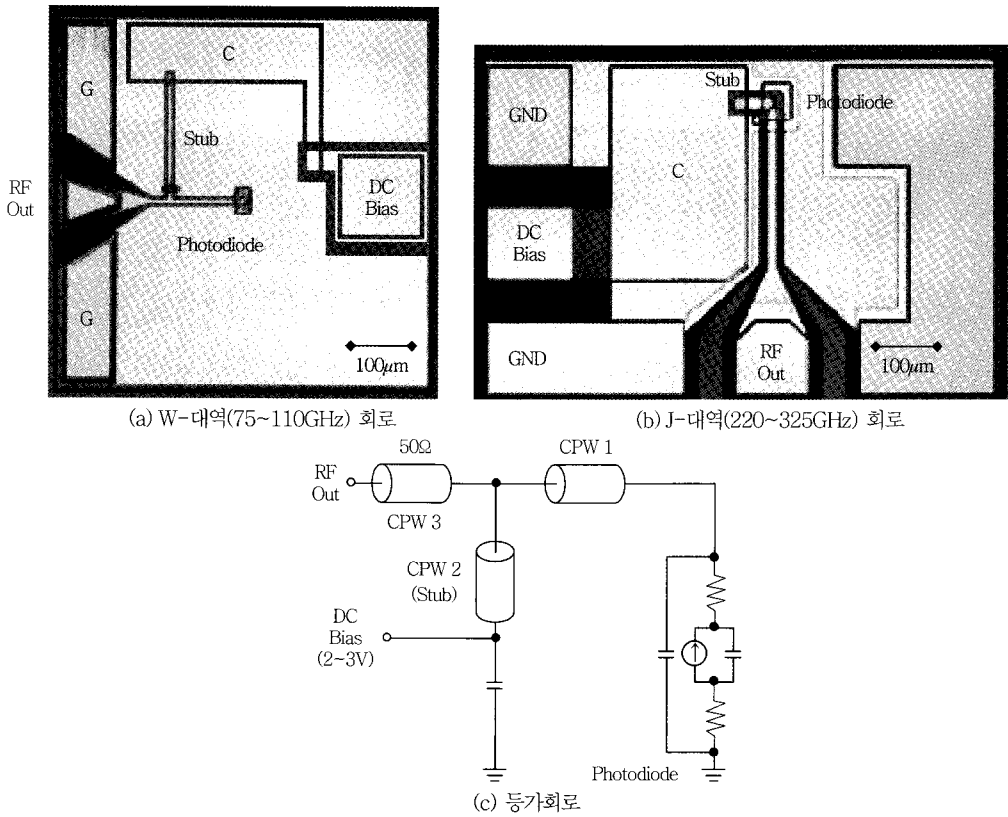
(그림 7b, c, e)에 보인 UTC 및 유사 UTC 구조에서 i-InP 캐리어 수집층은 공간전하 효과를 방지하고 전자를 준 탄도수송 거동(near-ballistic transport behavior)[38],[39]으로 가속시키기 위해 도핑된 InP로 대체할 수 있다. 이후, 공간전하 효과를 최소화하기 위해 캐리어 수집층에 도핑된 InP를 도입한 것을 전하보상(charge compensation)이라고 한다[40].

### 3. 회로 설계

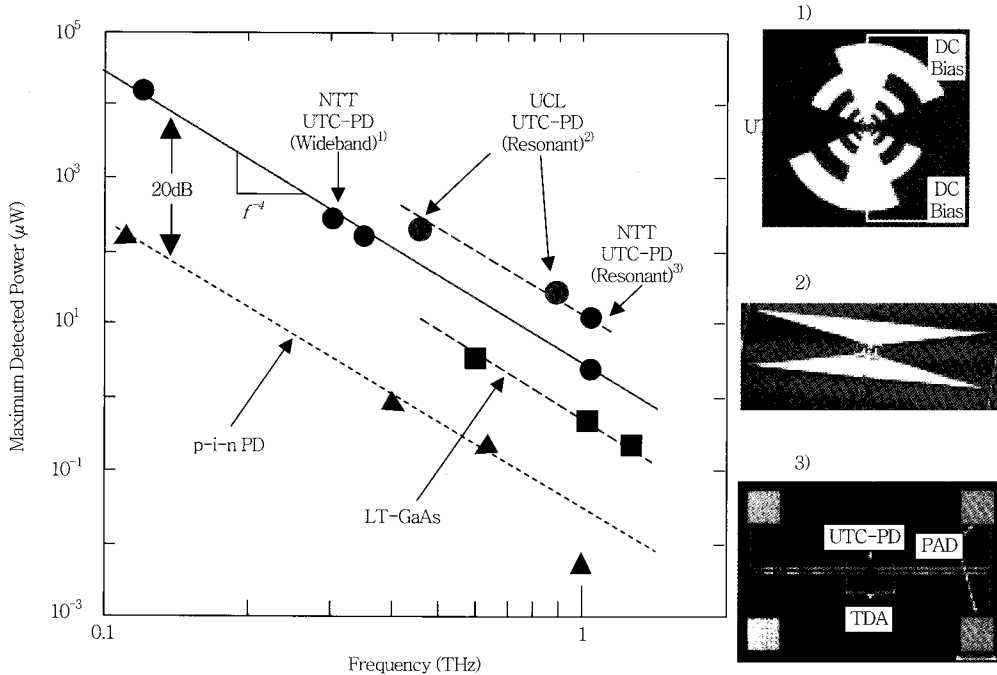
UTC-PD에 수동소자인 스텐브(stub)와 안테나 등을 집적하면 “집중정수(lumped constant) PD”에서 발생한 출력을 효과적으로 증가시킬 수 있다. 이 방법은 지정된 주파수에서 동작하는 PD의 대역에 기초한 것이다.

(그림 8)은 동일면상의 도파로(CPW)와 금속-절연체-금속(MIM) 커패시터로 구성된 짧은 스텐브 정합 회로를 집적한 UTC-PD를 보인 것이다[41]. 이 기술은 PD의 내부 커패시턴스를 보상하여 특정 주파수에서 RC 시상수의 제약을 제거하는 효과가 있다. 또한 공명주파수에서 출력을 3dB 이상 증가시킨다. UTC-PD에 공명형 평면안테나를 집적하는 것도 특히 THz 영역에서 효과적이다[42],[43].

(그림 9)는 지금까지 알려진 밀리미터/테라헤르츠-파의 출력(검출)을 UTC-PD, p-i-n PD 및 저온성장 GaAs 광혼합기에 대해 동작주파수로 비교



(그림 8) PD의 출력개선을 위한 회로기술



(그림 9) 알려진 밀리미터/테라헤르츠-파에 대한 광전변환기의 출력비교



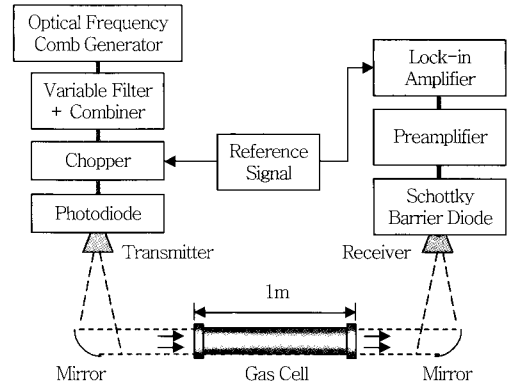
하여 나타낸 것이다. UTC-PD의 출력은 p-i-n PD에 비하여 100배 이상 높는데, 이것은 거의 높은 포화 출력전류 때문이다. 출력은 주파수에 대해  $f^{-4}$ 에 비례하여 감소한다.

단일 소자에서 출력용량의 한계를 극복하기 위해 UTC-PD와 집적한 안테나 어레이를 사용하는 출력 결합 기법이 소개되었다[44]. 총 출력은 300GHz, 3x3 어레이에서 1mW가 기대되었다.

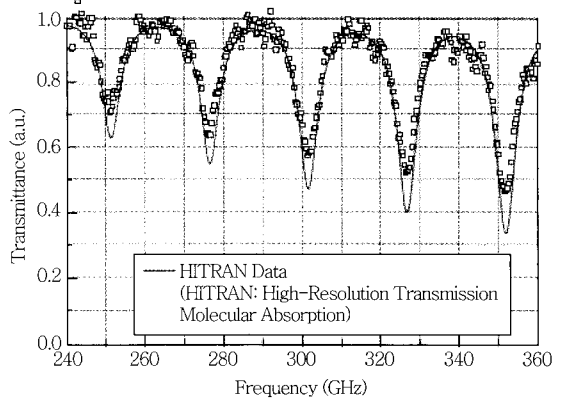
고출력 UTC 및 유사 UTC-PD에서 실제로 남은 이슈는 열관리 문제이다. 이러한 PD들은 자체 발열 때문에 포화조건에 이르기 전에 타버리는 경우가 종종 있다. PD에서 발생하는 열을 효율적으로 배출하기 위해, 웨이퍼 접착(에피층) 및 금속-금속(방열기) 접착을 한 Si 기판 사용이 시험되었다[45].

## Ⅵ. 밀리미터/테라헤르츠-파 분광 측정

다음 장은 분광측정 결과에 대한 설명으로서 (그림 3)에 나타낸 여러 가지의 검출기법을 결합한 광 밀리미터/테라헤르츠-파 방출기로 구성된 분광시스템으로 얻어진 것이다. 먼저, 광 밀리미터/테라헤르츠-파 발생기와 직접 검출방식을 사용한 간단한 분광측정법에 대해 (그림 10)에서와 같이 240~360GHz 주파수범위에서 보였다[11]. 시험에 사용된 시편은  $N_2O$ 와  $N_2$ 가 3:1(75%)의 비율로 혼합된 기체이며, 대기압 하에서 1m 길이의 기체 셀 내에 채워져 있다. 실험장치는 (그림 10a)에 보였다. 주파수 스위프(sweep)을 위해 밀리미터/테라헤르츠-파의 신호발생기는 컴퓨터로 조정되며, UTC-PD에 도달하기 직전의 광 밀리미터/테라헤르츠-파 신호는 주파수 10kHz로 세기가 변조(intensity modulation)되었다. 발생한 신호는 방사되어 대각선 형태의 혼 안테나(horn antenna)와 금이 코팅된 비정축 포물면경(off-axis parabolic mirror)에 의해 각각 포집되었다. 기체 셀을 통과한 신호는 쇼트키 배리어 다이오



(a) 실험장치. 기체는 1기압 하에서의  $N_2$ 와 75%의  $N_2O$



(b) 측정된 분광결과

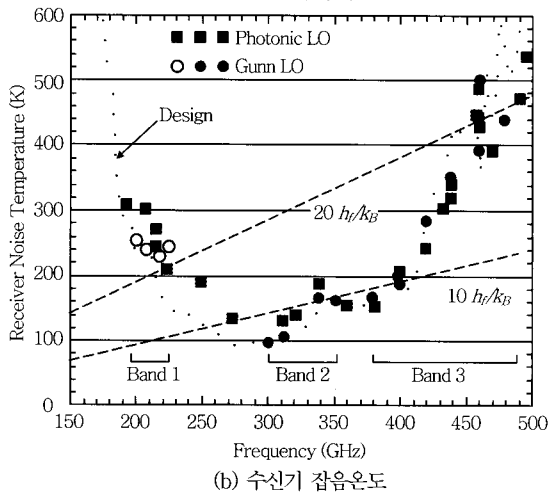
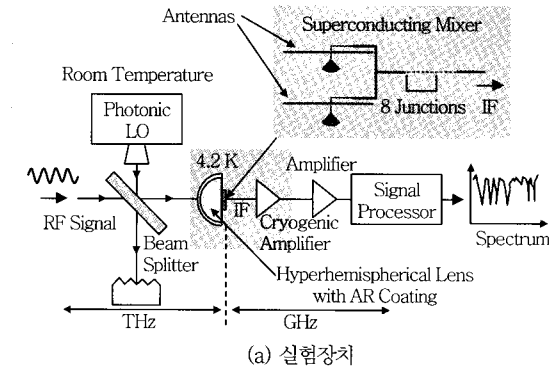
(그림 10) 광 밀리미터/테라헤르츠-파 방출기 및 직접 검출기를 사용한 분광 시스템

드(SBD) 검출기로 수신되고, 10kHz로 맞추어진 잠김 증폭기(lock-in amplifier)에 도달한다.

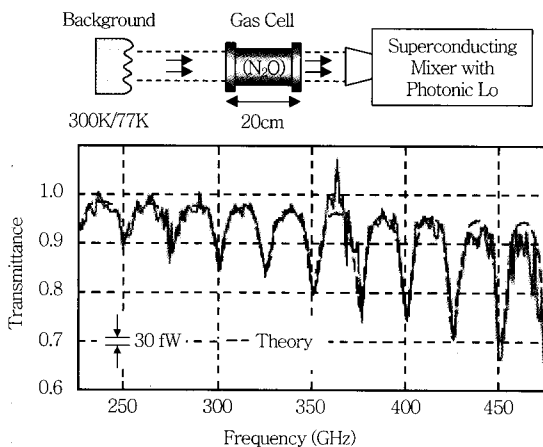
측정된 기체의 투과율을 고분해능 투과분자흡수(HITRAN) 데이터베이스에 기초한 시뮬레이션 결과와 함께 (그림 10b)에 나타내었다[46]. 보이는 바와 같이, 측정된 흡수피크의 크기와 함께 위치 및 모양의 경향이 HITRAN 값과 잘 일치한다. 측정 대역폭은 광대역 안테나와 집적한 광 혼합기와 수신기를 이용하여 확장할 수 있다[10],[42].

광학적으로 생성한 밀리미터/테라헤르츠-파 신호의 초저잡음 특성은 4.2K에서 동작하는 헤테로다인 수신기의 초전도체 믹서용 LO의 적용을 통해 증명되었다. (그림 11a)는 광 LO 신호에 의해 펌핑되는 극저온 수신기의 실험장치이다[47]. 광 LO 및 종래의 건(Gunn) LO를 구비한 수신기로 측정할 잡

음온도(noise temperature)를 180~550GHz 영역에서 나타내었다. 이 주파수 영역을 커버하기 위해



(그림 11) 광 LO와 함께 SIS 믹서를 사용한 밀리미터/테라헤르츠-파 수신기

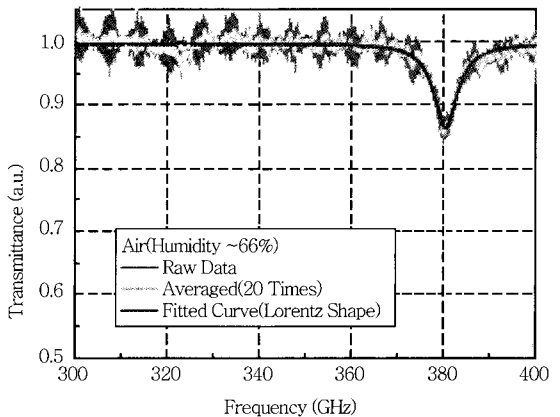
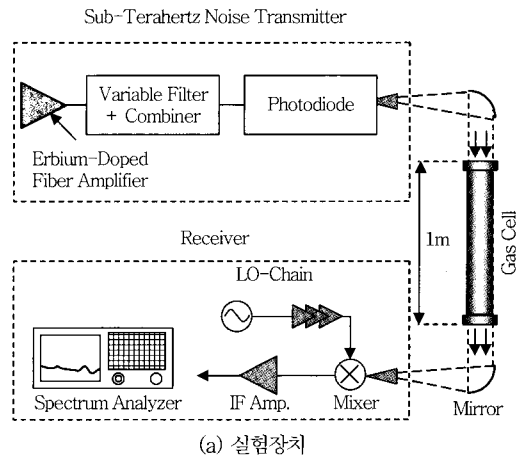


(그림 12) (그림 11)의 수신기를 이용한 기체의 수동식 분광기

서는 3개의 건 발진기(Gunn oscillator)가 부분적으로 필요하지만 광 LO를 사용하면 하나로 충분하다. (그림 11b)에 보인 바와 같이 잡음온도는 300K까지 낮아지며, 이것은 한 옥타브 주파수 범위에서 피코와트 수준 이상의 감도에 대응한다.

이 수신기는 (그림 12)와 같은 수동형 기체 분광기에 성공적으로 적용되었다. 77K 및 300K에서의 흑체복사 신호원을 이용하여 흡수에 대한 정확한 교정(calibration)을 수행할 수 있다. 주파수 범위 200~450GHz를 스캔하는 데에는 1~2분 정도가 소요된다.

초전도체-절연체-초전도체(SIS) 헤테로다인 수신기는 광 LO와 함께 전파천문학 분야에서 사용된



(그림 13) 광 밀리미터/테라헤르츠-파 잡음신호와 헤테로다인 수신기를 사용한 분광 시스템

다. 우주로부터 시작된 전파-천문학적 신호는 98GHz 광 LO[48]를 이용하여 성공적으로 관측되었다. 저온 UTC-PD[49]를 이용하면 광 LO를 SIS 믹서와 집적할 때 더욱 매력적일 것이다.

마지막으로, 광학적으로 생성한 테라헤르츠 잡음 원은 (그림 13)[20]과 같이 분광 측정에 적용되었다. 어븀 도핑(Er-doped)된 광섬유 증폭기에서 광 증폭된 자발방출 잡음은 두 개의 25GHz용 배열 도파관 격자(AWG) 필터를 이용하여 얇게 잘라지고 (slicing) WR-3 도파관 포트와 혼 안테나를 장착한 UTC-PD 모듈을 사용하여 테라헤르츠 잡음으로 변환되었다. 잡음신호의 중심 주파수는 300~420GHz 영역에서 조정되었다. 기체 셀을 통과한 밀리미터/테라헤르츠-파 신호는 고조파 믹서(harmonic mixer)로 측정되어 전기적 스펙트럼 분석기(ESA)에 도달한다. 여기에서 스펙트럼 해상도는 스펙트럼 분석기(실협에서는 3MHz)에 의해 결정된다. (그림 13b)는 습도 66%의 공기에 대한 분광추적 결과이다. 380GHz 부근의 수분에 의한 흡수선이  $5\mu\text{W}$ 의 방사기 출력에도 명확하게 보인다.

주목할 사항은 모든 신호의 발생기와 수신기는 (그림 11)과 (그림 12)의 초전도체 믹서를 제외하고 상온에서 동작한다는 사실이다.

## VII. 결론

마이크로파(또는 라디오파)와 광 기술을 접목하는 것은 미개발 전자기파인 밀리미터/테라헤르츠-파를 탐구하는 데 매우 효율적인 방법이다. 본 글에서는 연속 밀리미터/테라헤르츠-파 신호의 광학적 발생과 그 응용기술(분광측정), 특히 레이저, PD 및 광섬유 등 전자통신 기반의 광 소자에 대하여 설명하였다. 최근의 고효율 PD 기술에 힘입어 광학적 발생방식의 밀리미터/테라헤르츠-파는 CW 분광 측정 용으로도 유용하다는 것이 증명되었다. 현 단계에서 1THz에서의 최대 가용 출력은 약  $10\mu\text{W}$  정도이다. 포화전류와 열 관리 문제의 해결뿐 아니라 PD와 안

테나 선단 간의 효율적인 RF 커플링을 통해 PD 성능의 개선을 함으로써, 단일 소자에서  $100\mu\text{W}@1\text{THz}$  수준의 출력을 얻어낼 수 있을 것이다. PD 어레이를 사용한 출력 결합형 기술은 1mW 수준까지 출력을 증강시킬 것으로 전망된다. 이와 같이 연속 파 기반의 밀리미터/테라헤르츠-파 분광법은 더욱 작고, 다양하며 경제적인 분광 시스템의 새로운 세대를 위한 첨단에 설 것으로 기대한다.

## 약어 정리

AWG	Arrayed Waveguide Grating
CPW	Coplanar Waveguide
DFB	Distributed Feedback
ESA	Electrical Spectrum Analyzer
LO	Local Oscillator
MIM	Metal-Insulator-Metal
PD	Photodiode
SBD	Schottky Barrier Diode mixer
SIS	Superconductor-Insulator-Superconductor
THz-TDS	Terahertz Time Domain Spectroscopy
UTC-PD	Unitraveling Carrier Photodiode

## 참고 문헌

- [1] W.L. Chan, J. Deibel, and D. Mittleman, "Imaging with Terahertz Radiation," *Rep. Prog. Phys.*, Vol.70, July 2007, pp.1325-1379.
- [2] H.B. Liu, H. Zhong, N. Karpowicz, Y. Chen, and X.-C. Zhang, "Terahertz Spectroscopy and Imaging for Defence and Security Applications," *Proc. IEEE*, Vol.95, No.8, Aug. 2007, pp.1514-1527.
- [3] J. Chen, Y. Chen, H. Zhao, G.J. Basiaans, and X.-C. Zhang, "Absorption Coefficients of Selected Explosives and Related Compounds in the Range of 0.1-2.8 THz," *Opt. Express*, Vol.15, No.19, Sep. 2007, pp.12060-12067.
- [4] A. Hirata, T. Kosugi, H. Takahashi, R. Yamaguchi, F. Nakajima, T. Furuta, H. Ito, H. Sugawara, Y. Sato, and T. Nagatsuma, "120 GHz Band

- Millimeter Wave Photonic Wireless Link for 10 Gb/s Data Transmission," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.54, No.5, May 2006, pp.1937-1944.
- [5] R. Yamaguchi, A. Hirata, T. Kosugi, H. Takahashi, N. Kukutsu, T. Nagatsuma, Y. Kado, H. Ikegawa, H. Nishikawa, and T. Nakayama, "10-Gbit/s MMIC Wireless Link Exceeding 800 Meters," in *Proc. IEEE Radio and Wireless Symp.*, Florida, Jan. 2008, TH1C-3, pp. 695-698.
- [6] R. Piesiewicz, T. Kleine-Ostmann, N. Krumbholz, D. Mittleman, M. Koch, J. Schoebel, and T. Kuerner, "Short Range Ultra Broadband Terahertz Communications: Concept and Perspectives," *IEEE Antennas Propagat. Mag.*, Vol. 49, No.6, June 2007, pp.24-35.
- [7] C. Mann, "Practical Challenges for the Commercialization of Terahertz Electronics," in *Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.*, Honolulu, June 2007, pp.1705-1708.
- [8] M. Tonouchi, "Cutting Edge Terahertz Technology," *Nature Photon.*, Vol.1, No.2, Feb. 2007, pp.97-105.
- [9] M. Ashida, R. Akai, H. Shimosato, I. Katayama, K. Miyamoto, and H. Ito, "Ultrabroadband THz Wave Detection Using Photoconductive Antenna," in *Proc. IRMMW/THz 2008*, Pasadena, T3B2, Sep. 2008.
- [10] J.R. Demers, R.T. Logan Jr., and E.R. Brown, "An Optically Integrated Coherent Frequency Domain THz Spectrometer with Signal to Noise Ratio Up to 80 dB," in *Tech. Dig. Microwave Photonics 2007*, Victoria, British Columbia, Oct. 2007, pp.92-95.
- [11] H.-J. Song, N. Shimizu, T. Furuta, K. Suizu, H. Ito, and T. Nagatsuma, "Broadband Frequency Tunable Sub-terahertz Wave Generation Using an Optical Comb Signal, AWGs, Optical Switches, and Untravelling Carrier Photodiode for Spectroscopic Applications," *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol.26, No.15, Aug. 2008, pp.2521-2530.
- [12] Z.F. Fan and N. Dagenais, "Optical Generation of a Megahertzlinewidth Microwave Signal Using Semiconductor Lasers and a Discriminator-aided Phase-locked Loop," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.45, No.8, Aug. 1997, pp.1296-1300.
- [13] A. Hirata, M. Harada, K. Sato, and T. Nagatsuma, "Low Cost Millimeter Wave Photonic Techniques for Gigabit/s Wireless Link," *IEICE Trans. Electron.*, Vol.E86-C, No.7, July 2003, pp.1123-1128.
- [14] S. Fukushima, C.F.C. Silva, Y. Muramoto, and A.J. Seeds, "Optoelectronic Millimeter Wave Synthesis Using an Optical Frequency Comb Generator, Optically Injection Locked Lasers, and a Unitraveling Carrier Photodiode," *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol.21, No.12, Dec. 2003, pp.3043-3051.
- [15] A. Hirata, H. Togo, N. Shimizu, H. Takahashi, K. Okamoto, and T. Nagatsuma, "Low Phase Noise Photonic Millimeter Wave Generator Using an AWG Integrated with a 3 dB Combiner," *IEICE Trans. Electron.*, Vol.E88-C, No.7, July 2005, pp.1458-1464.
- [16] H.-J. Song, N. Shimizu, and T. Nagatsuma, "Generation of Two Mode Optical Signals with Broadband Frequency Tunability and Low Spurious Signal Level," *Opt. Express*, Vol.15, No.22, Oct. 2007, pp.14901-14906.
- [17] C.C. Renaud, C.F.C. Silva, M. Dueser, P. Bayvel, and A.J. Seeds, "Exact, Agile, Optical Frequency Synthesis Using an Optical Comb Generator and Optical Injection Phase Lock Loop," in *Tech. Dig. 2003 IEEE LEOS Summer Topical Meetings*, Vancouver, July 2003, WC1.3, pp.67-68.
- [18] P. Shen, N.J. Gomes, P.A. Davies, P.G. Hugard, and B.N. Ellison, "Analysis and Demonstration of a Fast Tunable Fibre Ring Based Optical Frequency Comb Generator," *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol.25, No.10, Nov. 2007, pp.3257-3264.
- [19] N.N. Almoayed and M.N. Afsar, "High Resolution Absorption Coefficient and Refractive Index Spectra of Carbon Monoxide Gas at Millimeter and Submillimeter Wavelengths," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol.55, No.4, Aug.

- 2006, pp.1033-1037.
- [20] H.-J. Song, N. Shimizu, T. Furuta, A. Wakatsuki, and T. Nagatsuma, "Subterahertz Noise Signal Generation Using a Photodetector and Wavelength Sliced Optical Noise Signals for Spectroscopic Measurement," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.93, Dec. 2008, p.241113.
- [21] T. Ishibashi, N. Shimizu, S. Kodama, H. Ito, T. Nagatsuma, and T. Furuta, "Unitraveling Carrier Photodiodes," in *Proc. OSA TOPS on Ultrafast Electronics and Optoelectronics*, Optical Society of America, Washington, D.C., Vol.13, 1997, pp.83-87.
- [22] H. Ito, S. Kodama, Y. Muramoto, T. Furuta, T. Nagatsuma, and T. Ishibashi, "High Speed and High Output InP-InGaAs Unitraveling Carrier Photodiodes," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, Vol.10, No.4, July-Aug. 2004, pp.709-727.
- [23] H. Ito, T. Furuta, F. Nakajima, K. Yoshino, and T. Ishibashi, "Photonic Generation of Continuous THz Wave Using Unitraveling Carrier Photodiode," *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol.23, No.12, Dec. 2005, pp.4016-4021.
- [24] H. Fukano, Y. Muramoto, K. Takahata, and Y. Matsuoka, "High Efficiency Edge Illuminated Unitraveling Carrier Structure Refracting Facet Photodiode," *Electron. Lett.*, Vol.35, No.19, Sep. 1999, pp.1664-1665.
- [25] Y. Muramoto, K. Kato, M. Mitsuhashi, O. Nakajima, Y. Matsuoka, N. Shimizu, and T. Ishibashi, "High Output Voltage, High Speed, High Efficiency Unitraveling Carrier Waveguide Photodiode," *Electron. Lett.*, Vol.34, No.1, Jan. 1998, pp.122-123.
- [26] Y. Hirota, T. Ishibashi, and H. Ito, "1.55- $\mu$ m Wavelength Periodic Traveling Wave Photodetector Fabricated Using Unitraveling Carrier Photodiode Structures," *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol.19, No.11, Nov. 2001, pp.1751-1758.
- [27] M. Achouche, V. Magnin, J. Harari, F. Lelarge, E. Derouin, C. Jany, D. Carpentier, F. Blache, and D. Decoster, "High Performance Evanescent Edge Coupled Waveguide Unitraveling Carrier Photodiodes for >40-Gb/s Optical Receivers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.16, No.2, Feb. 2004, pp.584-587.
- [28] C.C. Renaud, M. Robertson, D. Rogers, R. Firth, P.J. Cannard, R. Moore, and A.J. Seeds, "A High Responsivity, Broadband Waveguide Unitraveling Carrier Photodiode," *Proc. SPIE (Photonics Europe 2006)*, Vol.6194, Apr. 2006, p.61940C.
- [29] A. Stoehr, M. Weiss, A. Malcoci, A.G. Steffan, D. Trommer, A. Umbach, and D. Jaeger, "Wide Band Photonic Millimeter Wave Synthesizer Using a High Power Pin Waveguide Photodiode," in *Proc. European Microwave Conf., EuMC 2007*, Munich, Oct. 2007, pp.588-591.
- [30] A. Madjar, N. Koka, J. Bloch, M. Draa, and P.K.L. Yu, "A Novel Analytical Model for the UTC-TW Photodetector for Generation of Sub-mm Wave Signals," in *Proc. European Microwave Conf., EuMC 2007*, Munich, Oct. 2007, pp.618-621.
- [31] K.J. Williams, D.A. Tulchinsky, and J.C. Campbell, "High Power Photodiodes," in *Tech. Dig. Microwave Photonics 2007*, Victoria, British Columbia, Oct. 2007, pp.9-13.
- [32] T. Nagatsuma, H. Ito, and T. Ishibashi, "Photonic THz Sources Using Unitraveling Carrier Photodiode Technologies," in *Tech. Dig. IEEE LEOS 2007 Annual Meeting*, Florida, ThN3, pp.792-793.
- [33] K.J. Williams, "Comparison between Dual-depletion Region and Unitraveling Carrier p-i-n Photodetectors," *IEE Proc. Optoelectron.*, Vol.149, No.4, Aug. 2002, pp.131-137.
- [34] A. Joshi and D. Becker, "GRIN Lens Coupled Top Illuminated Photodetectors for High Power Applications," in *Tech. Dig. Microwave Photonics 2007*, Victoria, British Columbia, Oct. 2007, pp.18-20.
- [35] Y. Muramoto and T. Ishibashi, "InP/InGaAs Pin Photodiode Structure Maximizing Bandwidth and Efficiency," *Electron. Lett.*, Vol.39, No.24, Nov. 2003, pp.1749-1750.
- [36] X. Li, N. Li, S. Demiguel, X. Zheng, J.C. Campbell, H.H. Tan, and C. Jagadish, "A Partially Depleted Absorber Photodiode with Graded

- Doping Injection Regions," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.16, No.10, Oct. 2004, pp.2326-2328.
- [37] D.-H. Jun, J.-H. Jang, I. Adesida, and J.-I. Song, "Improved Efficiency-bandwidth Product of Modified Untravelling Carrier Photodiode Structure Using an Undoped Photo-absorption Layer," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.45, No.4B, Apr. 2006, pp.3475-3478.
- [38] J.-W. Shi, Y.-S. Wu, C.-Y. Wu, P.-H. Chiu, and C.-C. Hong, "High Speed, High Responsivity, and High-power Performance of Near-ballistic Untravelling Carrier Photodiode at 1.55- $\mu\text{m}$  Wavelength," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.17, No.9, Sep. 2005, pp.1929-1931.
- [39] Y.-S. Wu, J.-W. Shi, and P.-H. Chiu, "Analytical Modeling of a High Performance Near-ballistic Untravelling Carrier Photodiode at a 1.55- $\mu\text{m}$  Wavelength," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.18, No.8, Apr. 2006, pp.938-940.
- [40] N. Li, X. Li, S. Demiguel, X. Zheng, J.C. Campbell, D.A. Tulchinsky, K.J. Williams, T.D. Isshiki, G.S. Kinsey, and R. Sudharsanan, "High Saturation Current Charge Compensated InGaAs/InP Untravelling Carrier Photodiode," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.16, No.3, Mar. 2004, pp.864-866.
- [41] H. Ito, T. Nagatsuma, A. Hirata, T. Minotani, A. Sasaki, Y. Hirota, and T. Ishibashi, "High Power Photonic Millimetre Wave Generation at 100 GHz Using Matching Circuit Integrated Untravelling Carrier Photodiodes," *IEE Proc. Optoelectron.*, Vol.150, No.2, Apr. 2003, pp.138-142.
- [42] A. Hirata, T. Nagatsuma, R. Yano, H. Ito, T. Furuta, Y. Hirota, T. Ishibashi, H. Matsuo, A. Ueda, T. Noguchi, Y. Sekimoto, M. Ishiguro, and S. Matsuura, "Output Power Measurement of Photonic Millimeter Wave and Sub-millimeter Wave Emitter at 100-800 GHz," *Electron. Lett.*, Vol.38, No.15, July 2002, pp.798-800.
- [43] F. Nakajima, T. Furuta, and H. Ito, "High Power Continuous Terahertz Wave Generation Using Resonant Antenna Integrated Untravelling Carrier Photodiode," *Electron. Lett.*, Vol.40, No.20, Sep. 2004, pp.1297-1299.
- [44] N. Shimizu and T. Nagatsuma, "Photodiode Integrated Microstrip Antenna Array for Sub-terahertz Radiation," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.18, No.6, Mar. 2006, pp.743-745.
- [45] N. Li, H. Chen, N. Duan, M. Liu, S. Demiguel, R. Sidhu, A.L. Holmes Jr., and J.C. Campbell, "High Power Photodiode Wafer Bonded to Si Using Au with Improved Responsivity and Output Power," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.18, No.23, Dec. 2006, pp.2526-2528.
- [46] HITRAN homepage(2009). [Online]. Available: <http://cfa-www.harvard.edu/hitrان/welcome.html>
- [47] S. Kohjiro, K. Kikuchi, M. Maezawa, T. Furuta, A. Wakatsuki, H. Ito, N. Shimizu, T. Nagatsuma, and Y. Kado, "A 0.2-0.5 THz Singleband Heterodyne Receiver based on a Photonic Local Oscillator and a Superconductor-insulator-superconductor Mixer," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 93, Sep. 2008, p.093508.
- [48] S. Takano, A. Ueda, T. Yamamoto, S. Asayama, Y. Sekimoto, T. Noguchi, M. Ishiguro, H. Takara, S. Kawanishi, H. Ito, A. Hirata, and T. Nagatsuma, "The First Radioastronomical Observation with Photonic Local Oscillator," *Publ. Astron. Soc. Japan*, Vol.55, No.4, Apr. 2003, pp.L53-L56.
- [49] H. Ito, T. Furuta, S. Kodama, K. Yoshino, T. Nagatsuma, and Z. Wang, "10 Gbit/s Operation of a Untravelling Carrier Photodiode Module at 2.6K," *Electron. Lett.*, Vol.44, No.2, Jan. 2008, pp.149-150.