

포토닉스 기반 연속파 테라헤르츠 소자 및 시스템 기술

이원희 · 이의수 · 문기원 ·
이일민 · 김남제 · 김현수 ·
박정우 · 고현성 · 한상필 ·
박경현

한국전자통신연구원

I. 개 요

테라헤르츠(Terahertz)파는 낮은 에너지 대역으로, 세포 구조를 파괴하지 않아 인체에 영향이 거의 없는 미가적 주파수 원이다. 영상 산업에서 테라헤르츠파는 고해상도의 투과 이미지를 얻을 수 있다는 특성으로 인해 엑스레이에 비해서 인체에 위해를 가하지 않으며, 암조직과 정상 조직에 대한 일정 수준 이상의 명암비를 가지고 있어 의료 영상으로써의 가능성이 제시되고 있다. 또한, 총 또는 칼 등의 은닉된 무기를 찾기에 매우 유용하여, 보안 영상으로써의 활용은 이미 상용화 단계에 있다. 이 외에도 비금속 연결 물질을 검출할 수 있는 테라헤르츠파의 특성으로, 식품 속의 이물질질을 탐지하는 영상 기술이 연구되었다^[1]. 통신 산업에서 테라헤르츠파는 광대역의 주파수 특성과 전파 직진 특성으로 인해 대용량, 초고속, 가시거리(Line of Sight; LOS) 통신의 연구가 활발히 이루어지고 있다. 향후 미래에는 초소형, 고효율, 광대역 테라헤르츠 통신 기술의 접목으로 초고화질(Ultra High Definition; UHD) 비압축 영상 전송 및 대용량 의료 영상 전송의 초고속, 대용량 무선 통신이 상용화될 전망이다^[2]. 특히, 시간 영역 분광(Time Domain Spectroscopy; TDS) 기술은 테라헤르츠파의 가장 많은 응용 분야로써 연구되어 오고 있다^[3].

이러한 테라헤르츠 기술의 발전은 결국 대량 생산 및 상용화가 가능한 저가격, 소형, 고성능의 발생 및 검출 소자의 개발에 달려 있다. 포토닉스에 기반한 테라헤르츠 발생 및 검출 소자 기술은 광대역, 저잡음, 저가격, 소형 테라헤르츠 시스템의 초석이 된다. 특히, 주목할 만한 기술은 두 개의 연속파 레이저를 중첩시켜 얻은 비팅 광원 및 연속파 테라헤르츠 발생용 포토믹서의 파원과 InGaAs 쇼트키 다이오드(Schottky

Barrier Diode; SBD)의 검출 소자의 설계 및 제작 기술이다.

본 고에서는 테라헤르츠 연속파 발생 및 검출 기술의 핵심 소자들의 연구 개발 성과들을 살펴보고, 개발된 소자들의 시스템 응용 현황 등을 소개하고자 한다.

II. 포토닉스 기반 연속파 테라헤르츠 소자

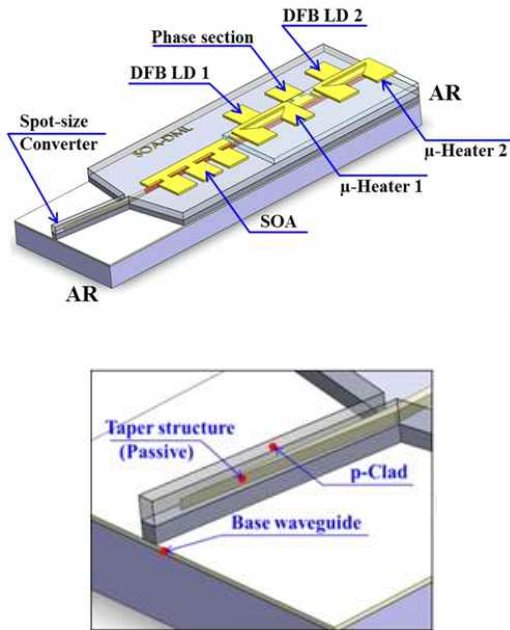
2-1 반도체 레이저 기반 비팅 광원

포토믹싱을 이용한 테라헤르츠 연속파 발생은 두 개의 레이저 빔의 주파수 차이에 의해 생성되는 비팅 신호를 포토믹서에 인가하고, 이때 발생하는 교류 전류에 의해 테라헤르츠 연속파를 안테나를 통하여 방사하는 것이다. 그러므로 두 개의 레이저 빔에 의해 생성되는 비팅 신호의 특성이 발생하는 테라헤르츠 연속파의 주파수, 선폭, 그리고 노이즈 특성들을 결정하게 되므로, 안정적이고 효율적이며 특성이 우수한 비팅 광원은 테라헤르츠 연속파 시스템 상용화의 핵심기술이라 할 수 있다. 현재까지 상용화된 시스템은 주로 두 개의 독립된 레이저를 사용하고 있다. 주로 DFB 레이저의 동작 온도를 조절하는 방법을 사용하거나, 파장 가변 레이저를 사용하는 것이 일반적이다^[4]. 비팅 광원으로 사용되는 레이저는 테라헤르츠 연속파의 주파수를 1 GHz 미만으로 제어해야 하기 때문에 모드 호핑이 있는 일반적인 반도체 파장 가변 레이저를 사용하기 어려운 실정이다. 또한 발생하는 테라헤르츠 연속파의 노이즈 및 선폭 특성 등을 향상시키기 위하여, 단일 공진기 구조의 레이저에서 두 개의 발진 모드를 사용하는 것이 우수한 것으로 알려져 있지만, 단일 공진기 구조에서 두 개의 발진 모드를 독립적으로 튜닝하는 것이 기술적으로 매우 어렵기 때문에, 실제 구현한 연구 그룹

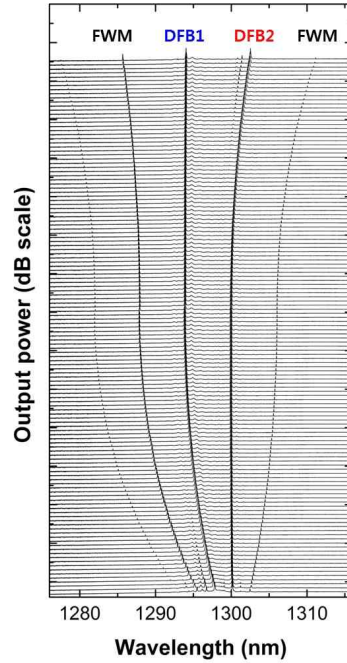
이 매우 적은 상황이다.

ETRI THz포토닉스창의연구센터에서는 두 개의 DFB 레이저를 하나의 공진기 구조로 집적하고, 마이크로히터를 이용하여 각각의 발진모드를 독립적으로 튜닝할 수 있는 이중 모드 반도체 레이저(Dual Mode Laser; DML)를 개발하여 이와 관련한 다수의 원천 기술을 확보한 상태이다. 또한 이중 모드 반도체 레이저를 기반으로 다양한 용도의 비팅 광원을 개발하였으며, 이러한 소자들을 바탕으로 작고 효율적인 테라헤르츠 연속파 시스템 제작이 가능함을 증명하였다. [그림 1]에는 최근 개발한 반도체 광증폭기(Semiconductor Optical Amplifier; SOA) 집적형 이중모드 반도체 레이저의 개략도를 나타내었다. 두 개의 DFB 레이저와 두 DFB 레이저 사이의 상호작용을 조절하는 위상조절영역 그리고 마이크로히터가 집적된 형태이며, 낮은 포토믹싱 효율을 극복하기 위하여 반도체 광증폭기를 집적화하였다.

패키지된 모듈의 출력은 30 mW 이상이며, 1.5 THz까지 광대역의 비팅 주파수 튜닝이 가능하여 실제 산업 현장에서 사용 가능한 테라헤르츠 연속파 시스템의 중요 소자가 될 것으로 기대된다. [그림 2]는 제작한 소자의 튜닝 특성을 나타낸 것이다.

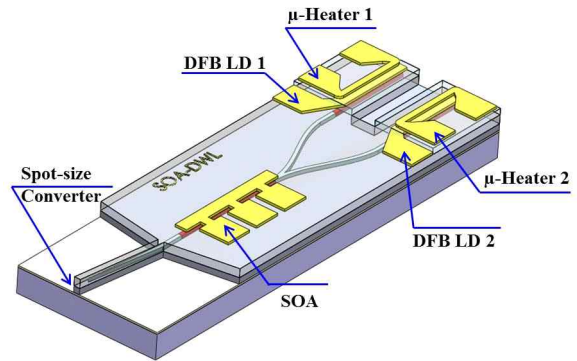


[그림 1] 광증폭기 집적형 DML의 개략도

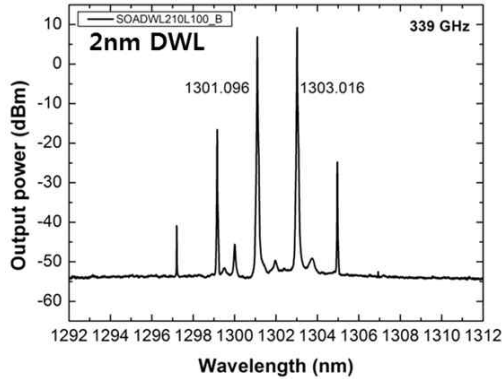


[그림 2] 광증폭기 집적형 DML의 튜닝 스펙트럼

그동안 축적된 이중모드 반도체 레이저의 원천 기술을 바탕으로 앞에서 언급한 것과 같이, 용도에 맞추어 다양한 형태의 비팅 광원을 제작하여 왔다. [그림 3]에 나타낸 것과 같이 두 개의 DFB 레이저를 이용하여 초기 비팅 주파수가 350 GHz인 이중 파장 반도체 레이저(Dual Wavelength Laser; DWL)를 제작하였고, 이를 이용하여 100~350 GHz 대역에서 비팅 주파수를 변화시키며, 테라헤르츠 영상을 얻기 위한 연구를 진행 중이다. [그림 4]에는 이중 파장 반도체 레이저의 초기



[그림 3] 영상용 고풍출력 이중파장 반도체 레이저의 개략도

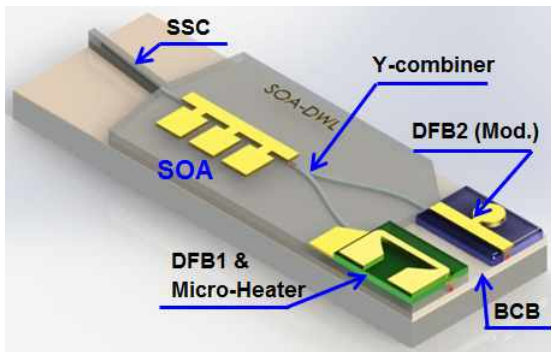


[그림 4] DWL의 초기 발진 스펙트럼

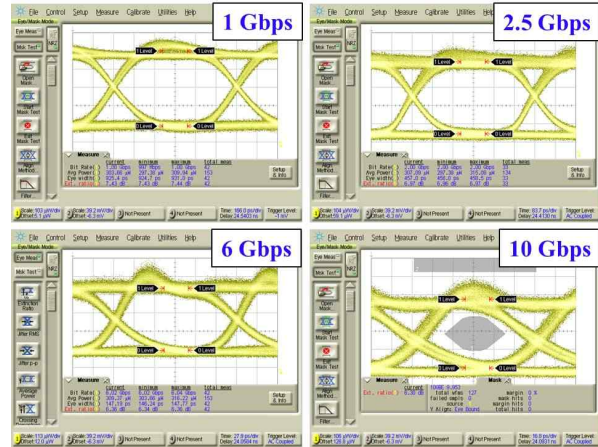
발진 스펙트럼을 나타내었다.

최근 테라헤르츠 연속파를 이용한 고속 무선 통신이 근거리, 대용량 통신의 목적으로 주목을 받고 있는 상황으로 고속 무선 통신을 위하여 10 Gbps 이상의 고속 직접 변조가 가능한 1.3-DML, DWL을 제작하였다. 집적된 반도체 광증폭기를 이용하여 출력 20 mW 이상을 확보함과 동시에 10 Gbps의 직접 변조가 가능함을 확인하였다. [그림 5]에는 광증폭기가 직접화된 고속변조 DWL을 나타내었고, [그림 6]에는 직접 변조 속도에 따른 DWL의 아이패턴(eye diagram)을 나타내었다.

테라헤르츠 연속파를 이용한 분광, 영상, 통신 등 다양한 응용 분야가 실제 현장에서 사용되기 위해서는 작고 휴대 가능하며, 효율적인 시스템의 개발이 중요할 것이다. 이와 같은 흐름 속에서 단일 칩의 형태로 구현된 고효율, 고효율의 비팅 광원은 매우 큰 기여를 할 것으로 기대되며, 포토믹서



[그림 5] 광증폭기가 집적화된 고속변조 DWL

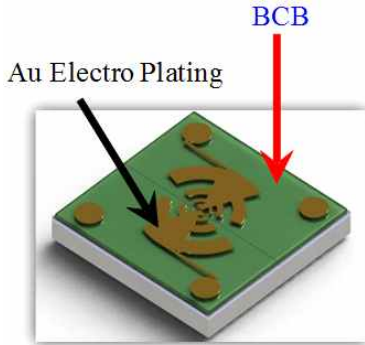


[그림 6] 직접변조 속도에 따른 DWL의 아이패턴

및 고효율 포토다이오드들의 효율이 향상되면서 곧 실제 시스템에 적용되어 상용화가 가능할 것으로 생각된다. 그러므로 다양한 형태의 비팅 광원의 개발 및 소자 특성의 안정화는 부품 산업에서 원천 기술의 확보로 직결될 것이고, 테라헤르츠 연속파뿐만 아니라, 다양한 분야에서 응용이 가능할 것이다.

2-2 포토다이오드 기반 포토믹서

최근에 광대역, 고효율의 파이버-광통신 시스템과 무선 통신 등에 대한 연구가 증가해 오고 있다. 광대역 광신호를 높은 효율의 전기적인 신호로 변환이 가능한 연속파 테라헤르츠 발생용 포토다이오드(Photodiode; PD)는 이러한 시스템에 있어 핵심 소자임이 분명하다. 이와 관련한 광대역 및 고효율을 위한 다양한 구조의 포토다이오드가 개발 중이며, 이 중에서 비교적 간단한 구조와 상대적으로 높은 반응도(responsivity)를 가지는 pin-PD가 많이 사용된다. 그리고 또 다른 구조로 기존의 pin-PD 구조가 가지는 공간 전하 영향(space charge effect)에 의한 전류 한계 및 상대적으로 이동도가 느린 홀(hole)의 영향을 제거하고, 고효율, 광대역 특성 향상이 가능한 UTC-PD가 있다^{[5],[6]}. [그림 7]은 pin-PD 구조를 이용하여 개발된 연속파 테라헤르츠 발생용 포토다이오드로 높은 광결합 효율 및 전류 한계를 극복하기 위해 설계된 비스듬한 광결합(evanescently coupled) 도파관 구조와 광대역 특성을 위한 유전율이 낮은 BCB(Benzocyclobutene), 금 전기 도금(Au



[그림 7] Au electro plating과 BCB 공정을 완료한 ECPD

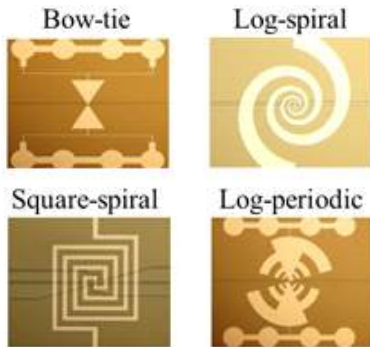
Electro Plating) 구조, 그리고 발생된 연속파 테라헤르츠파를 효율적으로 자유공간으로 방사하기 위한 안테나 구조를 설계한 ECPD(evanescently coupled PD)이다. [그림 8]에는 여러 안테나 구조를 갖는 도파로형 ECPD를 나타내었다.

[그림 9]는 제작된 ECPD의 주파수에 따른 출력 파워 특성으로 300 GHz에서 약 1.5 μ W의 출력 파워를 확인하였다.

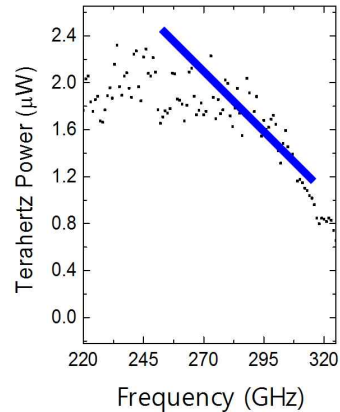
현재의 포토닉스 기반 테라헤르츠 파원 기술은 여러 가지 테라헤르츠 응용 시스템 구현을 위해서 손색이 없다. 다만, 더 넓은 무선 통신 거리, 더 안정적인 분광, 영상 측정을 위하여 출력 파워 향상을 위한 테라헤르츠 파원 연구를 계속하고 있다.

2.3 테라헤르츠파 검출기

테라헤르츠파 검출기는 테라헤르츠파가 검출기에 흡수될 때 흐르는 전류를 검출하는 광자 검출기(photon detector)와 테라헤르츠파가 검출기에 흡수될 때 온도 변화에 의하여



[그림 8] 여러 안테나 구조를 갖는 도파로형 ECPD



[그림 9] 제작된 ECPD의 주파수에 따른 출력 파워

일어나는 효과를 측정하는 열 검출기(thermal detector)로 구분할 수 있다^[7]. 최근에는 이미 성숙되어 있는 포토닉스 기술과 고주파 기술을 이용할 수 있는 InGaAs 쇼트키 다이오드(Schottky barrier diode) 테라헤르츠파 검출기가 주목을 받고 있다. 쇼트키 다이오드 검출기는 안테나와 정류기로 이루어져 있는 렉티나(rectenna) 검출기로서, 고속 통신 및 이미징 시스템 적용에 적합한 검출기이다. 렉티나 검출기는 안테나에 수신된 고주파 전류를 정류기를 이용하여 직류로 바꾸어 신호를 측정하는 구조의 검출기이다^[8]. 이러한 렉티나 검출기는 반응속도가 빠르고 극저온 냉각 장치가 필요하지 않은 장점이 있다. 테라헤르츠 쇼트키 다이오드 검출기에서 정류기로 사용하는 쇼트키 다이오드는 이동도(mobility)가 큰 GaAs나 InGaAs 쇼트키 다이오드가 주로 사용된다. InGaAs 쇼트키 다이오드는 GaAs 쇼트키 다이오드보다 턴온 전압(turn-on voltage)이 낮고, 0 V 바이어스(bias) 동작이 가능하다는 장점이 있다. 0 V 바이어스 동작이 가능하면 샷 노이즈(shot noise)를 줄일 수 있으며, 바이어스 회로가 필요하지 않아 전체 회로를 단순하게 만들 수 있는 장점이 있다^[8]. 쇼트키 다이오드의 차단주파수(f_c)는 $1/(2\pi R_s C_j)$ 로 나타낼 수 있다^[9]. 위에서 R_s 는 시리즈 저항, C_j 는 정션(junction) 정전용량이다. f_c 를 테라헤르츠 주파수 대역으로 높이기 위하여 R_s 와 C_j 값을 최소화하도록 설계해야 한다. [그림 10]은 실제 제작한 광대역 로그 주기(log periodic) 안테나가 적용된 테라헤르츠파 쇼트키 다이오드 검출기와 에어브리지 구조의 SEM 사진이다.

현재 InGaAs 쇼트키 다이오드 검출기의 반응도와 동작 주



[그림 10] 제작된 테라헤르츠 쇼트키 다이오드 검출기 및 에어 브리지 구조의 SEM 사진

파수를 높이기 위하여 특정 주파수에서 효율을 향상시킬 수 있는 공명형 안테나를 제작하여 성능 평가 중이며, 고주파 패키지를 설계, 제작 중에 있다. 또한 임피던스 정합을 위하여 쇼트키 다이오드 고주파 임피던스 측정 방법을 개발 중이다. 테라헤르츠파 영상에 쇼트키 다이오드 어레이 검출기를 활용하기 위하여서는 소자의 수율과 균일성이 중요하므로, 이를 확보하기 위한 연구가 또한 진행 중이다.

2.4 저온 성장 반도체 기반 포토믹서

연속파 테라헤르츠 발생과 검출 기술의 중요한 응용으로써 테라헤르츠 분광 기술을 들 수 있다. 기존의 테라헤르츠 분광기술은 펄스 레이저에 관한 시영역 분광법을 중심으로 개발되어 왔다. 시영역 분광법은 극초단 펄스 레이저를 광전도 물질에 입사시켜 순간적인 전류의 흐름을 생성하고, 이를 이용해 자유공간으로 광대역 테라헤르츠 펄스를 방출시켜 이를 검출하는 기법으로, 광대역 펄스와 시료간의 상호작용을 측정함으로써 시료의 특성을 측정하는 기법이다. 이러한 시영역 분광법은 광대역 측정을 한번에 얻을 수 있다는 장점이 있는 반면, 상대적으로 크고 고가의 레이저 시스템을 필요로 하고, 그 측정 시간이 길다는 점 때문에 산업적 파급효과를 기대하기 어렵다.

이에 비해, 연속파 테라헤르츠 기술은 매우 작고 저렴한 반도체 레이저 기술에 기반한 분광시스템을 가능하게 하고, 광대역 튜닝이 가능하면서도 특정 주파수만을 선택적으로 측정할 수 있기 때문에, 많은 산업적 응용이 파생될 수 있다는 장점을 가진다. 연속파 비팅 광원에서 생성된 광비팅을 짧은 전하수명시간을 갖는 반도체 물질에 입사시켜 테라헤르츠 주파수로 진동하는 광전류를 생성하고, 이로써 광대역 안테나를 구동, 자유공간으로 연속파 테라헤르츠를 방출시키게 된다. 제작된 포토믹서의 사진을 아래에 보였다.

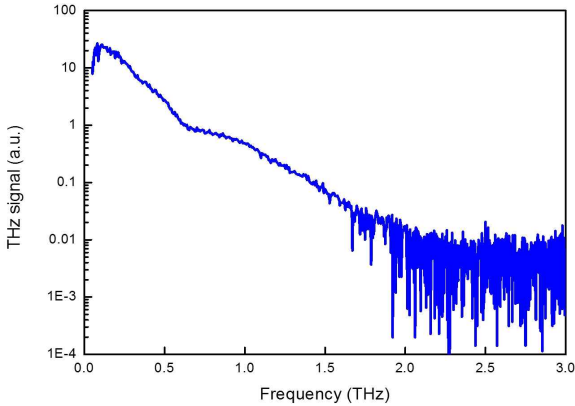
[그림 11]은 광대역 안테나의 일종인 로그 나선형(log-spiral) 안테나가 집적된 포토믹서의 현미경 사진이다. 가운데의 사각형 영역이 분자선 증착법을 이용한 저온 성장 기술을 통해 성장된 InGaAs 결정으로, 이 영역에 집속된 비팅 광원을 흡수, 광전하를 생성한다. 사각형 영역에 형성된 손가락 모양의 전극은 광전하의 효율적인 포집을 위해 제작되었다. 흡수 영역의 전하수명시간은 1 ps 이하로, 테라헤르츠 주파수로 진동하는 전류의 흐름을 생성하는 것을 가능하게 한다.

테라헤르츠파의 검출에도 앞에서 설명한 포토믹서가 사용되는데, 이 과정은 다음과 같다. 자유공간을 전파하는 연속파 테라헤르츠파는 렌즈 등을 통해 포토믹서의 광대역 안테나에 입사된다. 이렇게 입사된 전자파는 광대역 안테나의 가운데 위치한 InGaAs 물질에 형성된 양극과 음극 사이에 전기장을 형성한다. 한편, 발생의 경우와 동일하게 비팅 광원을 흡수영역에 집속시켜 광전하를 생성한다. 테라헤르츠 파에 의한 전기장과 비팅 광원에 의해 생성된 광전하가 전류를 생성하고, 이 전류를 측정함으로써 테라헤르츠파의 검출이 이루어진다. 비팅 광원의 주파수를 연속적으로 튜닝하면서 이와 같이 수행하면 광대역 스펙트럼을 얻을 수 있는데, 그 결과를 [그림 12]에 보였다.

연속파 테라헤르츠파 발생 소자로써 최근 앞서 서술한 포토다이오드 기반의 포토믹서가 좋은 성능을 보여줌에 따라, 저온 성장 반도체 물질을 이용한 포토믹서의 역할은 검출용으로 국한되고 있는 상황이다. 그러나 최근 나노 전극 구조를 통한 플라즈몬 효과 및 진계효과를 이용하여 수십 배의 성능 개선을 이끌어냈다는 연구들이 발표되고 있으며,^{[10],[11]} 검출 소자로써 저온 성장 반도체 물질 기반의 포토믹서의



[그림 11] 제작된 테라헤르츠 포토믹서



[그림 12] 광대역 테라헤르츠 스펙트럼

감도가 가장 높기 때문에, 여전히 많은 연구 개발이 필요한 상황이다. 향후 산업적으로는 포토다이오드 기반의 포토믹서가 발생용 소자로서 유망해 보이며, 분광 시스템용 검출 소자로서는 저온 성장 반도체 물질 기반의 포토믹서가 중요한 역할을 할 것으로 보인다.

Ⅲ. 포토닉스 기반 연속파 테라헤르츠 시스템

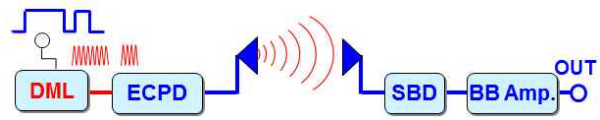
3-1 테라헤르츠 무선 통신 시스템

데이터 통신의 수요는 날이 갈수록 기하급수적으로 증가하고 있다. 이에 따라 수요를 해결하기 위한 무선 통신 기술이 매우 중요하게 대두되고 있으며, 그 방향에 있어서 현재까지 10~1,000 km에 이르는 장거리 전송을 목표로 하는 Core DWDM, Metro, 기업망 중심의 기술들이 중요하게 여겨져 왔지만, 향후에는 100 m 이내의 전송거리를 갖는 데이터 센터 내 통신에서 수 밀리미터 전송거리를 갖는 칩 간 통신까지 매우 짧은 거리 간 통신 시장이 급격히 증가하고 있다. 이에 폭발적으로 증가하는 데이터 트래픽의 효율적 처리를 위해 전통적인 구리선 통신 방식이 광대역 제공이 가능한 광통신 방식으로 급격히 대체될 것으로 전망된다. 이와 더불어 기존의 광통신 기술의 유연성 제고 측면에서 무선 통신 기술의 장점을 접목한 테라헤르츠 통신 기술이 주목을 받고 있다. 포토닉스 기반 테라헤르츠 무선 통신 기술은 초고주파 소자의 기술적 한계와 크기, 가격적 한계를 극복할 수 있을 것으로 기대되며, 이의 실현을 위해 필요한 다수의 핵심

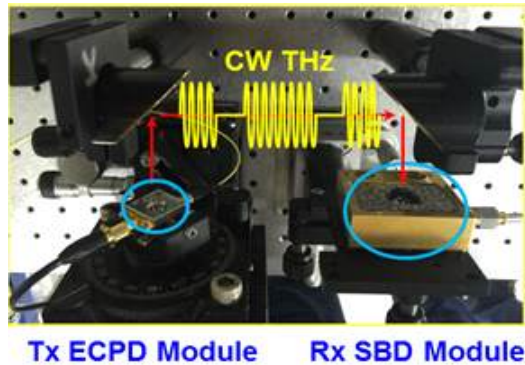
부품들을 상기에 기술한 바와 같이 개발하였다. 구체적으로는 이중 모드 반도체 레이저를 기반으로 10 Gbps급 직접변조가 가능한 광원을 개발하고, 이를 고출력 테라헤르츠파로 변환하기 위한 광대역 포토믹서를 개발하였다. 또한 발생된 테라헤르츠파의 검출을 위해 InGaAs 쇼트키 다이오드를 개발하였다. 포토닉스 기반 테라헤르츠 무선 통신 기술 개발은 광통신 기술에 비해 차별화된 기술을 제공할 수 있으며, 나아가 미래 핵심 수요 기술인 테라헤르츠 통신 및 센서 플랫폼 기술로 발전될 것으로 예상된다. [그림 13]은 테라헤르츠 무선 통신 시스템의 블록도이다.

직접 변조한 이중 파장 반도체 레이저(DML)에서는 고속의 광변조 신호를 고출력 연속파 발생기인 포토다이오드 기반 포토믹서(ECPD)에 인가하고, 그 때 발생한 테라헤르츠 전송 신호는 무선 링크를 통해 수신 검출기인 쇼트키 다이오드(SBD)에 수신되며, 베이스밴드 증폭기(BaseBand Amplifier, BB Amp.)에 의해 신호 증폭되어 출력되는 개념으로 되어 있다.

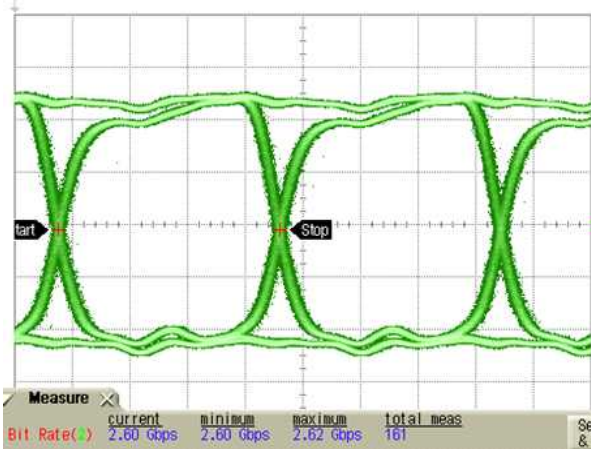
[그림 14]에는 테라헤르츠 무선 통신 시스템의 실험 구성을 나타내었다. 캐리어 주파수 220 GHz에서 수 Gbps의 무선 전송 실험을 위해 포토닉스 기반 테라헤르츠 소자들로 구성하였다. [그림 15]는 캐리어 주파수 220 GHz, 전송속도 2.5 Gbps에서 무선 전송 후 측정된 아이패턴(eye diagram) 결



[그림 13] 테라헤르츠 무선 통신 시스템의 블록도



[그림 14] 테라헤르츠 무선 통신 시스템의 실험 구성



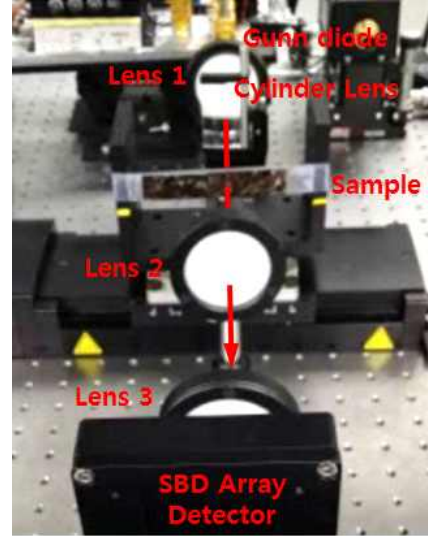
[그림 15] 220 GHz, 2.5 Gbps로 전송된 아이패턴

과이다. 상기의 실험 결과들과 구성된 테라헤르츠파 무선 통신 시스템을 바탕으로 향후 폭발적으로 증가하고 있는 데이터 트래픽의 효율적 처리를 위한 포토닉스 집적회로 기반의 대용량 무선 양방향 통신 기술을 개발할 예정이다.

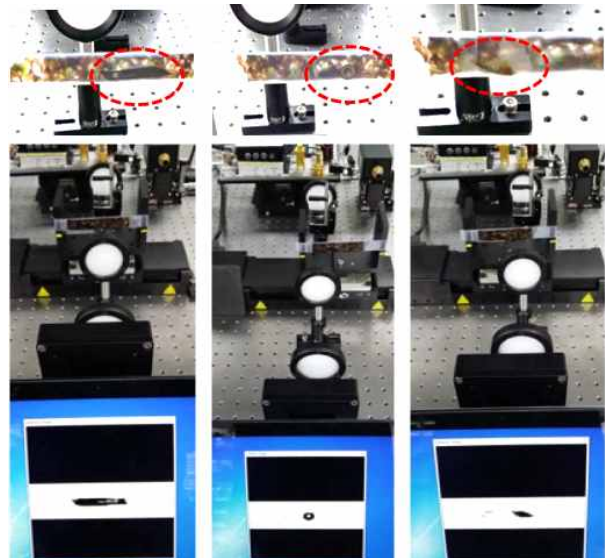
3-2 테라헤르츠 영상 및 분광 시스템

3-2-1 테라헤르츠 투과 영상 시스템

쇼트키 다이오드 어레이 검출기를 이용하여 테라헤르츠 투과 영상을 측정하였다. [그림 16]의 시료를 스캔 속도 3.9 cm/s로 설정된 테라헤르츠 투과 영상 시스템 구성을 이용하여 측정하였다. 그 결과 [그림 17]에서 보인 바와 같이, 금속 칼날, 금속 와셔, 나비 번데기 이미지가 비교적 선명하게 얻어졌다. 테라헤르츠 영상은 금속 물체와 비금속의 연결 물체 모두의 검출이 가능한 장점이 있다. 따라서 나비 번데기와 같은 연결 물체의 영상도 측정이 가능하다. 이는 번데기와 같은 연결 물질의 영상을 측정 못하는 엑스레이와는 구별되는 테라헤르츠만의 고유 특성이다. 앞서 설명한 바와 같이, 엑스레이에 비해 테라헤르츠파는 인체 유해성이 없으며, 연결의 물체까지 영상 이미지를 추출할 수 있다는 매우 흥미로운 특성이 있다. 이러한 테라헤르츠파의 장점을 이용하여 앞으로의 연구를 확대하면 엑스레이를 대체 또는 결합하여 사용할 수 있고, 더 나아가 은닉 또는 검사하고 싶은 모든 물체의 구분이 가능한 이상적인 영상 시스템 구현이 가능할 것으로 생각된다. 테라헤르츠 영상 시스템의 상용화



[그림 16] 테라헤르츠 투과 영상 시스템의 실험 구성

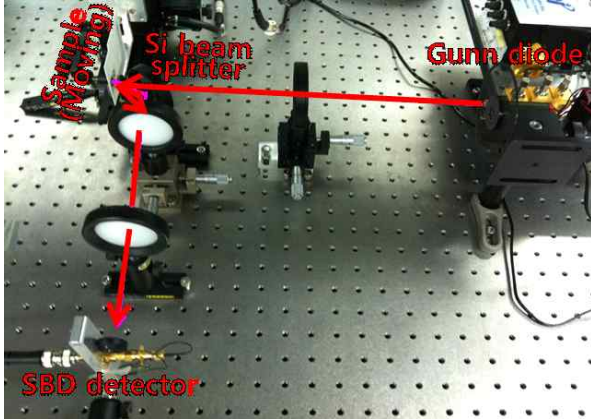


[그림 17] 측정된 테라헤르츠 투과 영상, 금속 칼날, 금속 와셔, 나비 번데기 영상 검출

가 실현될 때 의료, 보안, 재난 등의 무한한 영상 시스템의 응용은 현대 사회를 획기적으로 바꾸어 놓을 것이다.

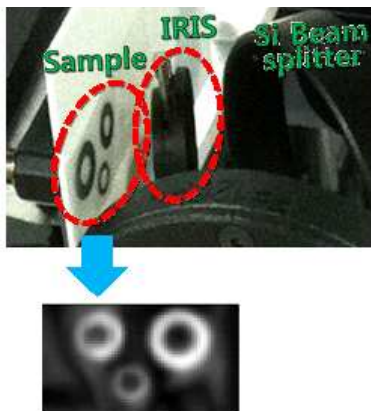
3-2-2 테라헤르츠 반사 영상 시스템

테라헤르츠 반사 영상을 얻기 위해 [그림 18]과 같이, 단일 채널 쇼트키 다이오드 검출기를 이용한 포인트 스캔 방



[그림 18] 테라헤르츠 반사 영상 시스템 측정 구성

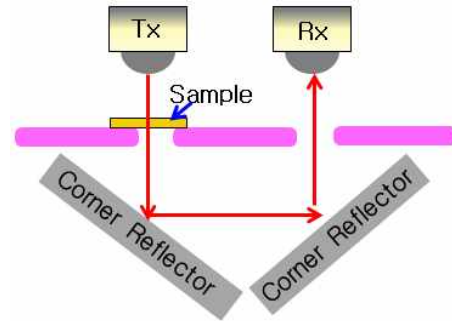
식의 테라헤르츠 반사 영상 시스템을 구축하였다. 시료가 움직이는 방법으로 최종적인 영상을 조합하였다. 측정 결과 [그림 19]에서 보는 바와 같이, 시료인 금속 와셔 3개가 선명하게 관측되었다. 잡광의 발생 및 검출을 막기 위해 이리스(iris)를 시료 앞에 기울여 장착하였다. 테라헤르츠 반사 영상은 투과 영상이 시료의 반대편에 검출기를 놓아 측정하는 단점을 보완한 방식이다. 측정하고자 하는 대상을 직접 영상 측정이 가능하고, 시료의 가공 또는 크기에 대한 제한 조건이 거의 없다. 그러나 반사 영상은 투과 영상에 비해 시료의 놓인 위치에 따라 영상의 품질이 많은 차이를 보이므로, 시스템 정렬(align)이 매우 중요하다. 현재 상기의 반사 영상 시스템을 최적화하여 소형, 포터블 테라헤르츠 반사 영상 시스템의 연구를 수행하고 있다.



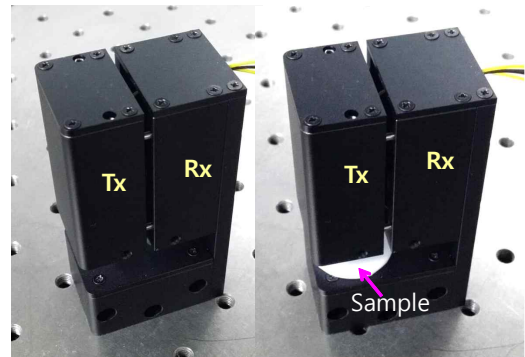
[그림 19] 측정된 테라헤르츠 반사 영상

3-2-3 테라헤르츠 포터블 분광 시스템

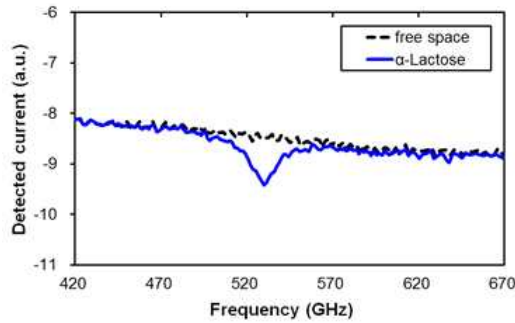
전체의 분광 시스템은 테라헤르츠 발생 모듈과 검출 모듈을 일체형으로 제작하였다. [그림 20]의 테라헤르츠 포터블 분광 시스템의 개요도를 보면 발생기와 검출기 모듈을 같은 방향으로 평행하게 배치하고, 테라헤르츠 에미터용 포토믹서 모듈에서 출발한 연속파 테라헤르츠가 코너 반사기(corner reflector)를 통해 시료를 투과 또는 반사한 후, 테라헤르츠 검출기용 포토믹서 모듈에 도착하는 구조이다. [그림 21]에는 제작된 투과형 테라헤르츠 분광 시스템을 나타내었다. [그림 22]에는 투과형 테라헤르츠 분광 시스템을 이용하여 측정된 분광 특성을 나타내었다. 측정된 시료는 3 mm 두께를 가진 펠렛 형태의 알파-락토오스(α -lactose)이며, 532 GHz에 존재하는 시료의 흡수선이 정확히 측정되었다. 제작된 연속파 테라헤르츠 포터블 분광 시스템은 소형 및 저가격의 특성을 갖고, 기존의 펄스 레이저를 사용한 분광법에 견줄만한 성능을 제시하였다.



[그림 20] 테라헤르츠 포터블 분광 시스템의 개요도



[그림 21] 제작된 투과형 테라헤르츠 분광 시스템



[그림 22] 투과형 테라헤르츠 분광 시스템에 의해 측정된 시료의 테라헤르츠 분광 특성

IV. 결 론

테라헤르츠파는 무한한 응용 가능성을 보이고 있는 미개척 주파수 영역이다. 이에 최근 세계의 많은 테라헤르츠 연구 그룹들이 실용화에 가까운 연구 결과들을 발표하고 있다. 나날이 증가하는 고속, 광대역, 대용량의 무선 통신 수요와 산업, 대용량 무압축 영상의 초고속 전송을 위한 의료계와 방송계의 수요와 산업, 그리고, 고해상도 영상의 재난, 보안 산업과 수요들은 테라헤르츠 연구와 발전을 촉발시켰으며, 현재도 다양한 테라헤르츠 응용 기술들이 연구되고 있다. 국내에서는 ETRI의 THz포토닉스창의연구센터가 포토닉스 기반 테라헤르츠 소자부터 시스템에 이르는 테라헤르츠 기술의 전 분야를 망라한 연구를 수행해 왔으며, 이러한 연구들을 매년 발전시켜 나가고 있다. 테라헤르츠 기술이 포함하고 있는 광범위한 응용 영역으로 영상, 분광 복합 스캐너 기술과 무선 통신 기술은 대표적 미래 기술로 인식되고 있는 테라헤르츠 기술의 산업화를 가속시켜, 미래 국가 경쟁력 확보에 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] S. P. Han, et. al., "Real-time continuous-wave terahertz line scanner based on a compact 1×240 InGaAs Schottky barrier diode array detector", *Optics Express*, 22(23), pp. 28977-

28983, Nov. 2014.
 [2] T. J. Chung, W. H. Lee, "10-Gbit/s wireless communication system at 300 GHz", *ETRI Journal*, 35(3), pp. 386-396, Jun. 2013.
 [3] M. Naftaly, R. E. Miles, "Terahertz time-domain spectroscopy for material characterization", *Proceedings of IEEE*, 95 (8), pp. 1658-1665, Aug. 2007.
 [4] J. R. Demers, et. al., "An optically integrated coherent frequency-domain THz spectrometer with signal-to-noise ratio up to 80 dB", *Microwave Photonics Technology Digest*, Victoria, Canada, pp. 92-95, 2007.
 [5] B. Sartorius, et. al., "Continuous wave terahertz systems exploiting 1.5 μm telecom technologies", *Optics Express*, 17, pp. 15001-15007, 2009.
 [6] A. Hirata, et. al., "Design and characterization of a 120-GHz millimeter-wave antenna for integrated photonics transmitters", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 49(11), pp. 2157-2162, 2001.
 [7] A. Rogalski, "Infrared detectors: Status and trends", *Progress in Quantum Electronics*, 27, pp. 59-210, 2003.
 [8] V. Varlamava, et. al., "Terahertz sensor for integrated image detector", *Procedia Engineering*, 87, pp. 1131-1134, 2014.
 [9] U. V. Bhapkar, et. al., "InGaAs/InP heteroepitaxial Schottky barrier diodes for terahertz applications", *Proceedings of the 3rd International Symposium on Space Terahertz Technology*, pp. 661-677, 1992.
 [10] H. Tanoto, et. al., "Nano-antenna in a photoconductive photomixer for highly efficient continuous wave terahertz emission", *Scientific Reports*, 3, 2824; DOI:10.1038/srep02824, 2013.
 [11] C. W. Berry, et. al., "Significant performance enhancement in photoconductive terahertz optoelectronics by incorporating plasmonic contact electrodes", *Nature Communications*, 4, 1622; doi:10.1038/ncomms2638, 2013.

≡ 필자소개 ≡

이 원 희



2003년 2월: 건국대학교 전자정보통신공학과 (공학박사)
 2002년 8월~2008년 1월: LG전자 HA연구소 책임연구원
 2008년 1월~2009년 8월: 포항공과대학교 미래정보기술사업단 Post Doc.
 2009년 8월~현재: 한국전자통신연구원 THz 포토닉스창의연구센터 선임연구원
 [주 관심분야] THz 무선 통신, THz 이미징, RF 회로 및 시스템 설계, 투과 및 반사 광학계 설계

김 남 제



2007년 8월: 충남대학교 물리학과 (이학박사)
 2008년 9월~현재: 한국전자통신연구원 THz 포토닉스창의연구센터 선임연구원
 [주 관심분야] 반도체 레이저, 반도체 광소자, THz 포토닉스

이 의 수



2013년 2월: 한국해양대학교 전기전자공학과 (공학박사)
 2013년 7월~현재: 한국전자통신연구원 THz 포토닉스창의연구센터 선임연구원
 [주 관심분야] 반도체 광소자, CW THz 발생용 포토믹서

김 현 수



2001년 2월: 고려대학교 재료공학과 (공학박사)
 2001년 3월~현재: 한국전자통신연구원 THz 포토닉스창의연구센터 책임연구원
 [주 관심분야] THz 비팅광원 설계 및 제작, THz 무선 통신

문 기 원



2011년 8월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
 2000년 2월~2005년 4월: 삼성전기 SD 사업부 선임연구원
 2011년 8월~2012년 7월: 포항공과대학교 Post Doc.
 2012년 7월~현재: 한국전자통신연구원 THz 포토닉스창의연구센터 선임연구원
 [주 관심분야] THz Spectroscopy, THz Photomixer, THz Near-Field Microscopy Spectroscopy, Semiconductor Optical Device

박 정 우



2000년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학박사)
 2001년 3월~현재: 한국전자통신연구원 THz 포토닉스창의연구센터 책임연구원
 [주 관심분야] 반도체 광소자, THz 포토닉스

이 일 민



2009년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학박사)
 2000년 1월~2003년 2월: 삼성전자 정보통신총괄 선임연구원
 2013년 7월~현재: 한국전자통신연구원 THz 포토닉스창의연구센터 선임연구원
 [주 관심분야] THz Photonics, Plasmonics, Optical Metamaterials, Nanophotonics

고 현 성



1999년 2월: 서울대학교 물리학과 (이학박사)
 1999년~2000년: 숭실대학교 생산기술연구원
 2000년~현재: 한국전자통신연구원 THz 포토닉스창의연구센터 책임연구원
 [주 관심분야] 반도체 광소자 설계, 제작 및 시뮬레이션

한 상 필



1998년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학 박사)
2000년 4월~현재: 한국전자통신연구원 THz 포토닉스창의연구센터 책임연구원
[주 관심분야] THz 무선 통신, THz 이미징, THz 시스템 설계, 투과 및 반사 광학계 설계

박 경 현



1996년 2월: 연세대학교 물리학과 (이학박사)
1990년 4월~1999년 9월: 한국과학기술연구원 광기술연구센터
1999년 9월~현재: 한국전자통신연구원 THz 포토닉스창의연구센터 센터장
[주 관심분야] 반도체 레이저, 반도체 광소자, THz 포토닉스, 포토닉스 기반 THz 시스템 응용