



테라헤르츠 포토믹서용 안테나

박익모(아주대학교) · 한해욱(포항공과대학교)

I. 서론

테라헤르츠파는 마이크로파와 적외선 사이에 존재하는 전자기파를 일컬으며 주파수로는 대략 100 GHz 부터 10 THz 까지의 구간으로 정의된다^[1]. 이와 같이 전파와 광파 영역의 경계에 위치한 테라헤르츠파는 전파와 같이 비금속 매질을 투과하면서도 광파 만큼 직진성이 강하고, 우주신호나 분자운동 수준의 에너지와 같은 특정 에너지 대역의 물성에 대한 강한 상호작용을 가지며, 다른 대역의 전자기파에 비하여 수분에 강한 반응을 갖는 독특한 특성을 지니고 있다. 테라헤르츠 기술을 이용한 분광영역의 확장은 다양한 생명체나 고분자 및 전자재료 내의 미지 메커니즘과 물성분석 등을 가능하게 해줄 것이며^[2], 투과매질에 따른 굴절계수 변화와 높은 직진성은 불투명한 사물의 내부 이미지를 보여줌으로써 효과적인 보안검색과 의료영상 진단기술을 출현시킬 것이다^[3]. 또한 마이크로파 및 밀리미터파 보다 상대적으로 넓은 통신대역의 확보는 초고속·대용량의 근거리 무선통신 환경을 제공할 수 있을 것이다^[4]. 따라서 테라헤르츠 기술은 기존의 전자기파 대역으로 접근이 불가능하거나

어려운 응용 분야들에 대해 새로운 돌파구를 마련해줄 수 있을 것이라 예상된다.

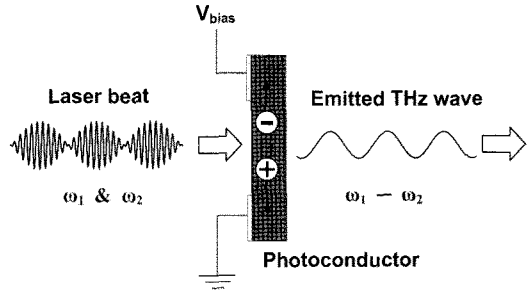
테라헤르츠 산업의 성장을 위해서는 상용화된 광원과 검출기의 개발이 매우 중요하다. 테라헤르츠 펄스 광원기술로는 광전도 현상을 이용한 광전도안테나^[5]와 전기광학 결정의 비선형성을 이용한 광정류 방법^[6] 등이 있다. 연속파 광원기술로는 혼합된 레이저빔의 주파수 편차를 이용한 포토믹서^[7], 핫홀의 밀도 반전분포 현상을 이용한 핫홀 레이저^[8], 주기적인 자기장을 받는 전자빔의 공명현상을 이용한 자유전자레이저^[9], 양자우물 내에서 서브밴드 간의 전이현상을 이용한 양자 캐스케이드 레이저^[10] 등이 있다. 테라헤르츠파의 검출 기술로는 신호의 상대크기와 위상을 구하는 광전도 안테나^[11]와 전기광학 샘플링^[12], 절대출력을 측정할 수 있는 볼로미터^[13] 등이 있다. 그러나 현재까지 어떠한 테라헤르츠 광원기술도 상용화 수준에는 이르지 못하고 있는데, 이는 소형시스템, 고효율, 상온동작, 주파수 가변특성 등이 동시에 만족되지 않고 있기 때문이다^[14].

그 중에서 테라헤르츠 포토믹서는 다른 광원들에 비하여 상용화 가능성이 매우 높은 연속파

광원기술이다. 포토믹서는 반도체 다이오드의 혼합 레이저빔으로 여기되는 고체형 발진소자이기 때문에 상온에서 동작하고, 출력주파수가 가변적이며, 저가의 소형시스템으로 구현된다는 장점을 지녔다^[15]. 반면에 출력이 수십 μW 로 다른 광원구조에 비하여 매우 낮다는 문제점을 지니고 있는데, 그 원인은 테라헤르츠파의 발생 메커니즘을 따라 두 가지로 살펴볼 수 있다. 첫째는 입사 레이저광이 광전도체를 거쳐 광전류로 바뀌는 과정에서 낮은 변환효율 문제로서, 광전도체에서 발생하는 광캐리어쌍의 재결합 및 이동 속도, 열전도도 등과 관련이 있다^[15]. 둘째는 광전류가 안테나를 거쳐 전자기파로 복사되는 과정에서 발생하는 반사손실 문제로서, 전원부에 해당하는 포토믹서의 임피던스가 매우 높아서 안테나와의 부정합이 커지기 때문이다^[16,17]. 본고에서는 포토믹서와 안테나의 임피던스 부정합으로 인하여 출력이 저하되는 문제를 개선할 수 있는 높은 입력 임피던스를 가지는 테라헤르츠 포토믹서용 안테나에 대하여 살펴보았다.

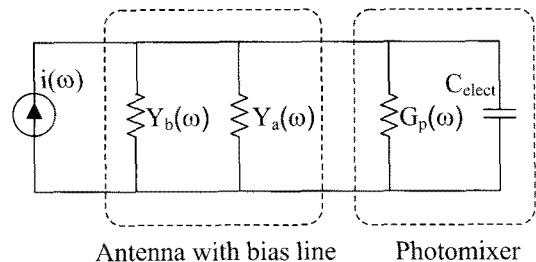
II. 테라헤르츠 포토믹서 원리

테라헤르츠 포토믹서는 광전도체와 안테나를 일체화시킨 형태의 테라헤르츠 연속파 광원 기술로서 동작 원리는 <그림 1>과 같다. 안테나 전극 사이의 광전도체에 레이저광이 입사되면 광캐리어쌍이 발생하는데, 캐리어들은 바이어스 전장을 따라 이동하면서 광전류로 나타난다. 이 때 입사광으로 주파수 ω_1 과 ω_2 의 레이저가 혼합되어 들어오므로, 간섭 현상에 의한 $|\omega_1 - \omega_2|$ 의 맥놀이 (beat) 성분도 입력 신호로 나타난다. 광전류의 순시값은 입사광에 반응하여 발생하는 광



<그림 1> 테라헤르츠 포토믹서 동작 원리

캐리어쌍 수에 비례하므로, 광전류는 $|\omega_1 - \omega_2|$ 의 주파수 성분을 갖게 된다. 하지만 다른 주파수 성분인 ω_1 , ω_2 , $\omega_1 + \omega_2$ 는 속도가 너무 빨라 포토믹서에서 검출해 낼 수 없어 무시할 수 있다. 즉 두 입사주파수가 포토믹서를 거침으로써, 두 주파수의 차이가 테라헤르츠 주파수가 되는 전자기파를 발생하게 된다. 이런 동작 특성의 포토믹서를 등가회로로 표시하면 <그림 2>와 같다. 포토믹서는 전도도와 전기용량의 병렬회로로 등가화할 수 있다^[18]. $G(\omega)$ 는 포토믹서의 전도도이고 C_{elect} 는 포토믹서의 전극 양단에 축적된 전하량을 나타낸다. $Y_a(\omega)$ 는 안테나의 어드미턴스이고 $Y_b(\omega)$ 는 바이어스 선의 어드미턴스를 나타낸다. 안테나와 바이어스 선은 모두 포토믹서와 병렬회로로 등가화할 수 있다. 그리고 바이어스 선 또한 안테나의 일부로 작용하기 때문에



<그림 2> 테라헤르츠 포토믹서 등가회로



$Y_a(\omega)$ 와 $Y_b(\omega)$ 의 등가 어드미턴스를 안테나 전체의 어드미턴스 $Y_L(\omega)$ 로 나타낼 수 있다. 등가회로를 바탕으로 안테나에서 발생하는 테라헤르츠파의 출력을 계산하면 다음과 같다.

$$P_L(\omega) = \frac{I_o^2}{2(1 + \omega^2 \tau^2)} \frac{G_L(\omega)}{[G_p(\omega) + G_L(\omega)]^2 + [\omega C + B_L(\omega)]^2} \quad (1)$$

여기서 $P_L(\omega)$ 은 안테나의 출력이고, t 는 캐리어 수명이며 $Y_L(\omega)$ 은 전도도와 감수도인 $G_L(\omega)$ 과 $B_L(\omega)$ 로 나타낼 수 있다. 공진주파수에서 허수부 성분인 $\omega C_{elect} + B_L(\omega) = 0$ 이 되므로 안테나에 전달되는 출력은

$$P_L(\omega) = \frac{I_o^2}{2(1 + \omega^2 \tau^2)} \frac{G_L(\omega)}{[G_p(\omega) + G_L(\omega)]^2} \quad (2)$$

과 같이 나타낼 수 있다. 안테나에 전달되는 최대 파워를 구하기 위해서 양변을 $G_L(\omega)$ 에 대하여 미분하면,

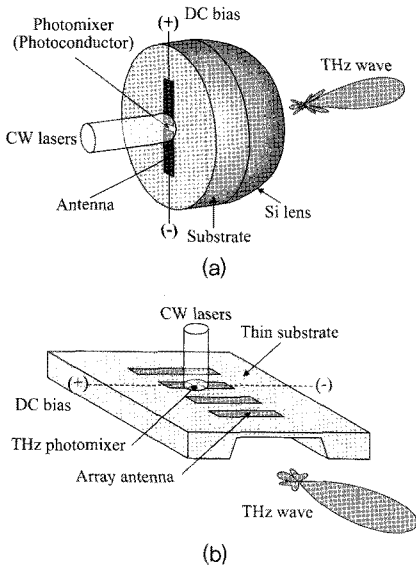
$$\frac{\partial P_L(\omega)}{\partial G_L(\omega)} = \frac{I_o^2}{2(1 + \omega^2 \tau^2)} \frac{G_p(\omega) - G_L(\omega)}{[G(\omega) + G_L(\omega)]^3} \quad (3)$$

으로 되며, $\partial P_L(\omega) / \partial G_L(\omega) = 0$ 이 되는 조건인 $G(\omega) = G_L(\omega)$ 일 때 안테나에 최대 파워가 전달된다. 따라서 안테나와 포토믹서의 입력 임피던스가 일치할 때 테라헤르츠파의 출력이 최대가 되는 것을 알 수 있다. 이때 광전도체의 광전도도 $G(\omega)$ 는 $(10 \text{ k}\Omega)^{-1}$ 이하이기 때문에^[7], 안테나의 입력 어드미턴스 $G_L(\omega)$ 는 부정합이 최소로 발생하도록 낮추어져야 한다. 즉 포토믹서 안테나는 복사 효율은 물론 입력 임피던스도 높은 값을 지니도록 설계되어야 한다.

III. 테라헤르츠 포토믹서용 안테나

테라헤르츠 대역에서 사용하는 안테나는 크게 광대역 안테나(broadband antenna)와 공진 안테나(resonant antenna)로 나눌 수 있다. 스카이럴 안테나^[19,20], 로그 주기 안테나^[21,22], 보우타이 안테나^[23]는 테라헤르츠 대역에서 쓰이는 대표적인 광대역 안테나이다. 아주 넓은 테라헤르츠 주파수 영역에 걸쳐 동작하므로 출력은 그다지 크지 않지만 주파수 가변성이 중요한 분야에 응용될 수 있다. 공진 안테나는 다이폴 안테나^[24]나 슬롯 안테나^[25]가 일반적인데 동작 주파수 대역은 좁은 대신 출력을 증가시킬 수 있어 고효율 테라헤르츠 소자에 응용이 가능하다.

테라헤르츠 대역은 기존의 마이크로파 및 밀리미터파에 비해 파장이 아주 짧아서 안테나의 크기가 작으므로 안테나를 제작할 때 보통 평면 안테나 형태로 <그림 3>(a)와 같이 단일 안테나를 LT-GaAs 기판 위에 제작한다. Photolithography 공정으로 금속을 증착시켜 LT-GaAs에 제작한 안테나를 비유전율이 높고 두꺼운 GaAs ($\epsilon_r = 11.7$) 기판위에 위치시킴으로써 공기 중에 있는 일반적인 안테나와는 특성이 많이 다르게 된다. 유전체 기판 위에 설계된 안테나에서 발생하는 전자기파는 $\epsilon_r^{3/2} : 1$ 의 비율로 대부분이 기판 쪽으로 복사되는 특성이 있다^[26]. 기판으로 복사되는 전자기파는 기판 내부에서의 전반사로 인하여 많은 양이 표면파 형태로 갇히게 되고 일부만 자유공간으로 복사되기 때문에 원하는 복사특성을 얻기가 매우 어렵다. 따라서 기판 뒷면에 실리콘 렌즈를 결합하여 테라헤르츠파를 집속시켜 사용한다. 렌즈에 의하여 빔이 집속되면 단일 안테나 구조일 때보다 안테나의 빔폭이 매우 좁아지게 되어 지향성이 크게 증가



〈그림 3〉 테라헤르츠 안테나
 (a) 두꺼운 기판 위에 설계된 안테나
 (b) 얇은 기판 위에 설계된 안테나

하는 장점이 있으나 기판의 비유전율에 의하여 안테나의 입력 임피던스가 $\{(\epsilon_r + 1)/2\}^{1/2}$ 만큼 감소하는 단점이 있다. 두꺼운 기판을 사용함에 따라 나타나는 안테나 입력 저항의 감소는 <그림 3>(b)와 같이 두께가 매우 얇은 기판 위에 안테나를 설계하면 해결할 수 있다. 기판의 두께를 얇게 하면 기판의 유효 유전율이 낮아지기 때문에 기판 쪽으로 복사되는 빔을 줄일 수 있게 된다. 따라서 안테나 설계에 따른 고유의 복사패턴을 얻을 수 있게 되고, 배열 안테나로 설계 시 실리콘 렌즈를 사용하지 않고도 높은 지향성을 얻을 수 있다.

또한, 기판의 유전율에 의한 안테나의 임피던스 저하를 줄일 수 있기 때문에 두꺼운 기판 위에서 설계된 안테나에 비하여 높은 입력 임피던스를 얻을 수 있다. 안테나의 입력 임피던스를 높임으로써 높은 입력 임피던스를 가지는 테라헤르츠 신호원인 포토믹서와의 임피던스 부정합을 개선

할 수 있는 장점이 있으나, 높은 지향성을 얻기 위해서는 많은 안테나 소자의 배열이 필요하다^[27].

일반적으로 테라헤르츠 포토믹서는 테라헤르츠 파를 발생시키기 위한 포토믹서와 발생된 테라헤르츠 파를 자유 공간으로 복사하기 위한 안테나가 결합되어 있는 구조다. 따라서 포토믹서에 바이어스 전압을 인가하여 광전류를 흐르게 하기 위해서는 바이어스 선이 필요하고, 그 바이어스 선은 구조적으로 안테나와 연결 되게 된다. 따라서 바이어스 선이 안테나 특성에 대해 어떠한 영향을 주는지 잘 파악해야 할 필요성이 있다. 가장 이상적인 바이어스 선은 안테나의 특성에 전혀 영향을 주지 않고 단지 바이어스만을 가하는 것이겠지만 실제로는 그런 구조를 만들기가 어려우므로 안테나 특성에 가장 영향을 적게 주는 방식으로 바이어스 선을 구현해야 한다.

또한 포토믹서에 사용되는 안테나는 안테나의 입력임피던스가 포토믹서의 임피던스와 유사한 값을 가져야 할 뿐 아니라 안테나 자체의 복사효율이 높아야 한다. 안테나의 전체효율 ϵ_{total} 은 다른 특성들보다 중요하게 다루어지는데, 전체효율은 식(4)와 같이 복사효율 $\epsilon_{radiation}$ 과 부정합효율 $\epsilon_{mismatch}$ 을 곱한 것으로 포토믹서의 출력과 비례관계에 있기 때문이다^[28].

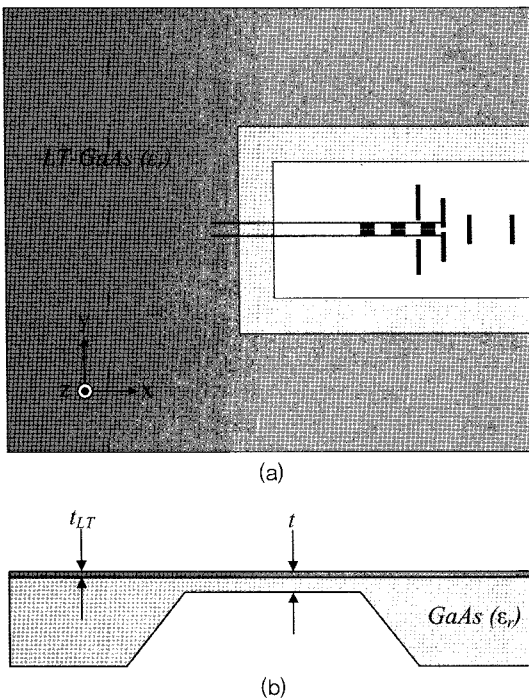
$$\epsilon_{total} = \epsilon_{radiation} \cdot \epsilon_{mismatch} = \epsilon_{radiation} (1 - |\Gamma|^2) \quad (4)$$

본 고에서는 테라헤르츠파의 출력을 크게 하기 위한 여러 가지 방법 중 앞에서 서술한 포토믹서와 안테나간의 임피던스 부정합의 개선에 목적을 두고, 복사효율이 높고 입력 임피던스가 큰 안테나인 얇은 기판위에 설계된 Yagi-Uda 안테나와 렌즈 기판위에 설계된 네일 크로버 형태의 안테나에 대하여 특성을 살펴보았다.

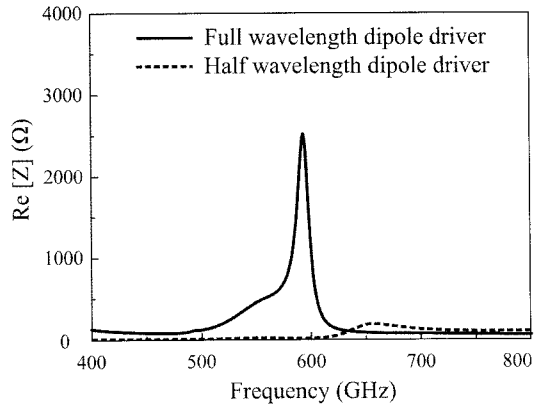
1. 얇은 기판에 설계된 Yagi-Uda 안테나

<그림 4>에는 driver가 전 파장 다이폴인 Yagi-Uda 안테나의 구조를 나타내었다. Yagi-Uda 안테나는 driver, director, reflector, photomixer, 그리고 바이어스 선으로 구성되어있고 driver 중 양에는 테라헤르츠파 발생을 위한 포토믹서가 결합되어 있다^[29]. 안테나의 driver는 높은 안테나 입력저항을 얻기 위하여 일반적으로 사용되는 반 파장 다이폴이 아닌 전 파장 다이폴을 사용하였다. 포토믹서에 직류전압을 가하기 위하여 driver 양쪽에 바이어스 선을 연결하였다. 바이어스 선으로의 교류전류가 흐르는 것을 차단하기 위하여 바이어스 선 내부에 Photonic Bandgap (PBG) 셀을 삽입하였다.

바이어스 선 삽입에 따른 reflector 설계의 어



<그림 4> 얇은 기판위에 설계된 Yagi-Uda 안테나 (a) 정면도 (b) 측면도

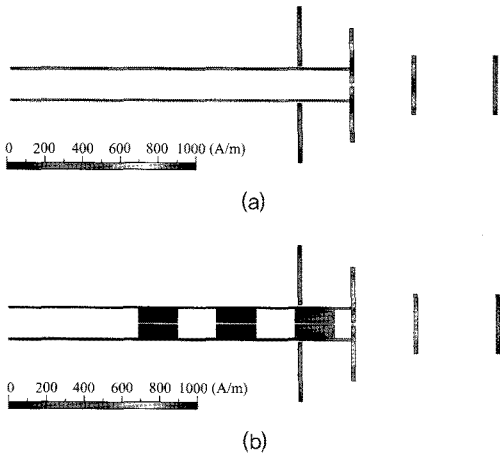


<그림 5> 드라이버 종류에 따른 안테나 입력저항 특성

려움으로 인하여 두 개의 reflector를 바이어스 선 양쪽에 각각 배치하여 효과적인 전자기파의 반사가 이루어지도록 설계하였다.

<그림 5>에는 Yagi-Uda 안테나의 driver 종류에 따른 입력 저항 특성을 나타내었다. Yagi-Uda 안테나의 driver를 반 파장 다이폴로 설계 하였을 때는 입력 저항이 전체 주파수 대역에서 수백 Ω 정도로 매우 낮게 나타난다. 그러나 전 파장 다이폴을 Yagi-Uda 안테나의 driver로 설계하게 되면 공진 주파수에서 매우 높은 입력 저항 특성이 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 반 파장 다이폴과는 달리, 전 파장 다이폴은 안테나의 급전부에서 전류 분포가 최소가 되는 특성이 있기 때문이다.

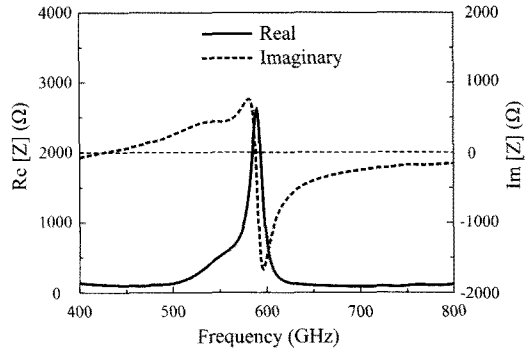
<그림 6>에는 바이어스 선의 종류에 따른 안테나의 표면 전류분포를 나타내었다. <그림 6> (a)는 안테나에 CPS 형태의 바이어스 선을 연결 하였을 때의 전류분포이다. Driver에서 생성된 교류전류가 바이어스 선으로 흐르게 되어서 바이어스 선에 주기적인 전류 분포가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 바이어스 선으로 교류전류가 흐르게 되면 바이어스 선로에서 전자기파의 복



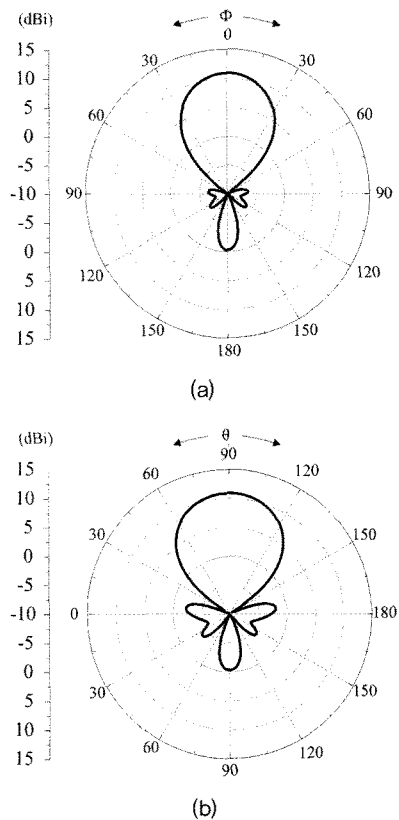
〈그림 6〉 Yagi-Uda 안테나의 표면전류 분포
(a) CPS 바이어스 선을 안테나에 연결하였을 때
(b) PBG 바이어스 선을 안테나에 연결하였을 때

사가 발생하게 되어 안테나의 특성이 변하게 된다. 따라서 안테나에 직류전압을 가할 수 있게 하면서 교류 전류를 효과적으로 차단할 수 있는 바이어스 선의 구조가 필요하다. 〈그림 6〉(b)는 안테나에 PBG 바이어스 선을 삽입하였을 때의 전류분포를 나타내었다. 그림에서 두 번째 PBG 셀부터 교류전류가 완전히 차단되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 첫 번째 PBG 셀에는 교류전류가 일부 흐르게 되어 안테나의 특성에 영향을 주게 된다. 그러나 이러한 특성은 첫 번째 PBG 셀과 driver와의 거리를 조절하면 Yagi-Uda 안테나의 reflector로 활용이 가능하여 안테나 특성을 향상 시킬 수 있다.

〈그림 7〉에는 최적화된 안테나의 임피던스 곡선을 나타내었다. 전 파장 다이폴인 Yagi-Uda 안테나는 590 GHz에서 공진하며 이때 입력 임피던스는 2591 Ω이다. 이는 기존에 설계된 반 파장 다이폴, 전 파장 다이폴, 듀얼 다이폴, 폴딩 다이폴 안테나 등의 입력 저항이 수십 Ω ~ 수백 Ω 정도인데 비하여 매우 높은 값을 가진다.



〈그림 7〉 Yagi-Uda 안테나 입력 임피던스



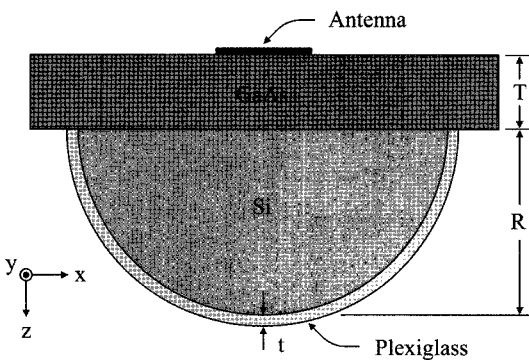
〈그림 8〉 Yagi-Uda 안테나 복사패턴
(a) x-y 평면 (b) x-z 평면

〈그림 8〉에는 Yagi-Uda 안테나의 공진주파수인 590 GHz에서 x-y 평면과 x-z 평면으로 본 복사패턴을 나타내었다. 반전력빔폭은 x-y 평

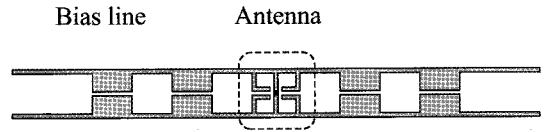
면에서 49° , $x-z$ 평면에서 58° 이다. 그리고 10.9 dB의 지향성과 80.8%의 복사효율을 가지며 단방향 지향적인 복사패턴을 가지는 것을 확인할 수 있다.

2. 렌즈 기관에 설계된 네잎 클로버 형태의 안테나

일반적으로 무한기관 위에 위치한 안테나의 복사패턴은 유전율이 높은 기관방향으로 지향되므로 단방향 특성을 갖지만, 실제로 유한한 두께를 지닌 평판형 기관에서는 전 반사효과에 의한 기관모드 손실이 발생하여 안테나의 지향성과 복사효율 등이 크게 저하된다. 그러나 렌즈기관을 사용하면 전반사 효과가 사라지는 동시에 집속효과를 통하여 복사패턴의 지향성을 높일 수 있다^[30]. 안테나 설계에서는 <그림 9>과 같이 고정된 크기의 반구렌즈 위에 있는 평판의 두께를 조절하여 복사패턴의 지향성을 크게 높일 수 있는 확장형 반구렌즈(extended hemispherical lens)를 사용하였다^[31]. 이 때 GaAs 평판 아래에 부착되는 반구의 재질로 Si($\epsilon_r=11.7$)를 사용하였는데, Si은 GaAs와 유전율이 비슷하면서도 상대적으로 가공이 쉽고 유전체 손실이 적게



<그림 9> 확장형 반구렌즈 구조

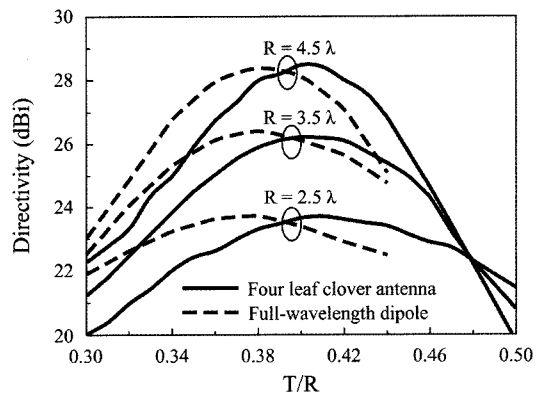


<그림 10> 안테나와 DC 바이어스 회로 구조

발생하기 때문이다. 렌즈면에 코팅된 plexiglass ($\epsilon_r=3.4$) 재질의 $\lambda/4$ 정합층은 렌즈에서 발생하는 내부반사파의 영향을 최소화 할수 있다^[32].

네잎 클로버 형태의 포토믹서용 안테나 구조는 <그림 10>과 같이 복사부인 안테나와 DC 급전부인 바이어스 회로로 구성된다. 네잎클로버 안테나 구조는 전파장 공진특성에 거의 영향을 미치지 않는 DC 바이어스라인의 설계가 가능하며, 공진주파수에서 높은 입력임피던스 특성을 가지므로 포토믹서와의 부정합 효율을 크게 개선시킬 수 있고, 복사패턴에서 회전 대칭성이 매우 좋아 가우시안 빔 효율을 높여줄 수 있다.

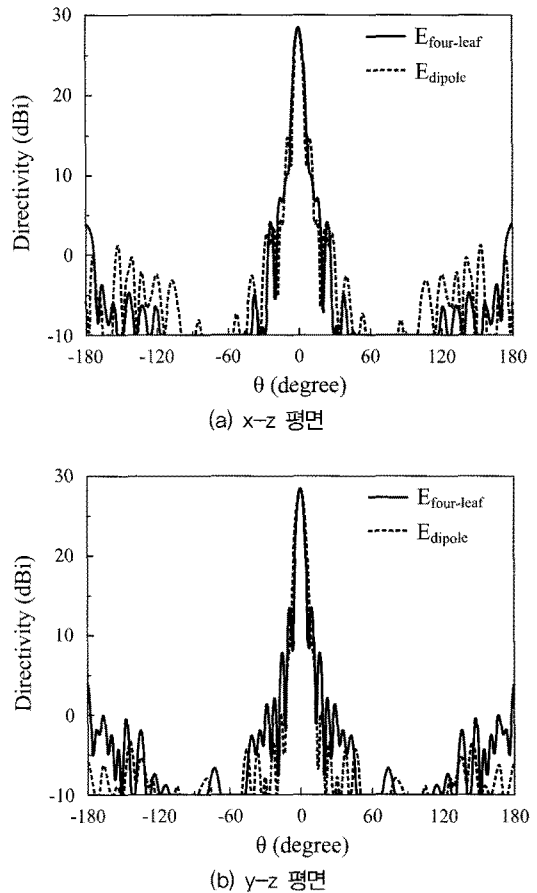
<그림 11>은 반구반경에 대한 평판두께비율 T/R에 따라 z축으로 나타나는 주빔의 지향성을 나타낸 것으로, 반구반경 R은 1 THz에서 자유공간에서의 파장 λ 인 $300 \mu\text{m}$ 를 기준으로하여 2.5λ , 3.5λ , 4.5λ 로 주어졌으며 평판두께비율



<그림 11> 렌즈반경에 대한 평판두께비율 T/R에 따른 지향성

T/R은 0.3에서 0.5까지 변화되었다. 실선과 파선은 각각 최적화된 네잎클로버 안테나구조와 전파장 다이폴 구조의 특성을 보여주고 있다. 반구반경 R이 4.5λ 인 경우의 지향성 변화가 2.5λ 인 경우보다 뚜렷한 것에서 알 수 있듯이, 반구반경 R이 커짐에 따라 주빔의 지향성은 전반적으로 높아지며 최대지향성이 형성되는 평판두께 조건도 명확해지고 있다. 네잎클로버 안테나는 반구반경이 2.5λ , 3.5λ , 4.5λ 인 경우 평판두께 비율 T/R이 각각 0.41, 0.40, 0.40 지점에서 최대 지향되었고, 그 값은 각각 23.7 dBi, 26.2 dBi, 28.5 dBi 였다. 전파장 다이폴은 반구반경 R이 2.5λ , 3.5λ , 4.5λ 인 경우 평판두께비율 T/R이 0.38인 지점에서 모두 최대 지향되었고, 그 값은 각각 23.7 dBi, 26.5 dBi, 28.4 dBi 였다. 이 때 전파장 다이폴에서는 평판두께비율 T/R이 0.44인 지점을 넘어서면서 주빔 방향인 z 축으로 널이 발생하여 지향성이 급격히 감소하였으며, 이에 따라 평판두께비율 T/R이 0.44 이상인 경우에는 전파장 다이폴 안테나에 대한 최대 지향성을 나타내지 않았다. 즉 동일한 반구반경의 확장형 반구렌즈에서 네잎 클로버 안테나와 전파장 다이폴의 최대지향성은 거의 동일하게 구현되었지만, 최적화된 평판두께비율 T/R은 네잎클로버 안테나가 전파장 다이폴의 경우 보다 약간 두꺼웠다. 이것은 확장형 반구렌즈가 타원렌즈와 제일 유사한 형태일 때 안테나의 복사 패턴이 최대 지향된다는 사실^[32]과 함께 렌즈 위에 부착된 안테나구조 자체도 최대지향성에 영향을 주는 것을 알 수 있다.

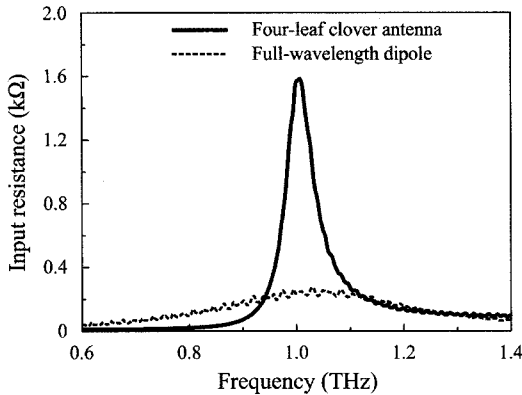
<그림 12>는 반구반경 R이 4.5λ 일때 최대 지향된 복사패턴을 x-z 평면과 y-z 평면에서 비교한 것으로, 네잎 클로버 안테나와 전파장 다이폴은 평판두께비율 T/R이 0.40과 0.38인 지



<그림 12> 확장형 반구렌즈기판 위의 복사패턴 (반구반경 4.5λ) (a) x-z 평면 (b) y-z 평면

점에서 각각 28.5 dBi와 28.4 dBi의 지향성을 보이고 있다. x-z 평면에서 네잎 클로버 안테나와 전파장 다이폴의 반전력빔폭은 각각 6.8° 와 5.6° 이고, 부엽레벨은 각각 -21.3 dB와 -13.5 dB 이하이며, 전후방비는 각각 24.6 dB와 27.1 dB이다. y-z 평면에서 네잎 클로버 안테나와 전파장 다이폴의 반전력빔폭은 각각 5.6° 와 7.0° 이고, 부엽레벨은 각각 -14.7 dB와 -27.9 dB 이하이며, 전후방비는 각각 24.6 dB와 25.2 dB이다.

<그림 13>은 최대지향성이 형성되는 확장형 반구렌즈 조건에서 네잎 클로버 안테나와 전파



〈그림 13〉 확장형 반구렌즈기판에서의 입력 임피던스 비교 (반구 반경 4.5λ)

장 다이폴의 입력임피던스를 비교한 것으로, 반구반경 R 은 4.5λ 로 동일하고, 평판두께비율 T/R 은 각각 0.40, 0.38로 주어졌다. 구체적인 치수로 반구반경 R 은 $1350\ \mu\text{m}$, 정합층 두께 t 는 $39\ \mu\text{m}$ 로 동일하였고, 평판 두께 T 는 각각 $540\ \mu\text{m}$, $513\ \mu\text{m}$ 이다. 네잎 클로버 안테나는 동일한 공진주파수에서 전파장 다이폴보다 6배 이상의 높은 입력임피던스를 보이며, 렌즈면의 내부반사파에 의해 발생하는 리플현상에 대해서도 훨씬 안정적임을 알 수 있다.

IV. 결론

본 고에서는 포토믹서와 안테나의 임피던스 부정합으로 인하여 출력이 저하되는 문제를 개선할 수 있는 높은 입력 임피던스를 가지는 테라헤르츠 포토믹서용 안테나에 대하여 알아보았다. 먼저 테라헤르츠 포토믹서의 기본원리에 대하여 설명하였고, 얇은 기판위에 설계한 Yagi-Uda 안테나와 렌즈 기판위에 설계된 네잎 클로버 안테나의 특성에 대하여 살펴보았다. 본 고에서 제시

한 안테나 구조는 공진 주파수에서 높은 입력 임피던스를 가지기 때문에 기존에 설계된 테라헤르츠 안테나들에 비하여 포토믹서와의 임피던스 정합 문제를 크게 개선할 수 있게 되어, 보다 증가된 테라헤르츠파 출력을 얻을 수 있을 것이다.

테라헤르츠 포토믹서는 상온에서 동작하고, 출력주파수가 가변적이며, 저가의 소형시스템으로 구현된다는 장점을 지녀 다른 광원들에 비하여 상용화 가능성이 매우 높은 연속파 광원기술로서, 향후 전개될 테라헤르츠 시장에 대비한 국제 경쟁력을 갖추기 위해서는 지속적인 연구가 요구되며 이를 위한 다양한 지원이 필요할 것이다.

참고문헌

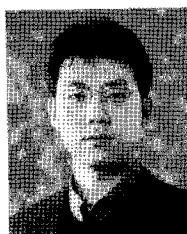
- [1] D. Mittleman, *Sensing with Terahertz Radiation*. Springer, Berlin, 2003.
- [2] A. Markelz, S. Whitmore, J. Hillebrecht, and R. Birge, "THz time domain spectroscopy of biomolecular conformational modes," *Phys. Med. Biol.*, Vol.47, No.21, pp.3797-3805, Nov., 2002.
- [3] B. B. Hu and M. C. Nuss, "Imaging with terahertz waves," *Opt. Lett.*, Vol.20, No.16, pp.1716-1718, Aug., 1995.
- [4] T. Kleine-Ostmann, K. Pierz, G. Hein, P. Dawson, and M. Koch, "Audio signal transmission over THz communication channel using semiconductor modulator," *Electron. Lett.*, Vol.40, No.2, pp.124-126, Jan., 2004.
- [5] D. H. Auston, K. P. Cheung, and P. R.

- Smith, "Picosecond photo-conducting Hertzian dipoles," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.45, No.3, pp.284-286, Aug., 1984.
- [6] 3. B. Hu, X. -C. Zhang, D. H. Auston, and P. R. Smith, "Free-space radiation from electro-optic crystals," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.56, No.6, pp.506-508, Feb., 1990.
- [7] E. R. Brown, F. W. Smith, and K. A. McIntosh, "Coherent millimeter-wave generation by heterodyne conversion in low-temperature-grown GaAs photo-conductors," *J. Appl. Phys.*, Vol.73, No.3, pp.1480-1484, Feb., 1993.
- [8] E. Brundermann, E. E. Haller, and A. V. Muravjov, "Terahertz emission of population-inverted hot-holes in single-crystalline silicon," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.73, No.6, pp.723-725, Aug., 1998.
- [9] Y. U. Jeong, G. M. Kazakevitch, B. C. Lee, J. W. Yoo, and S. H. Park, "Compact free-electron laser operating in the wavelength range of 0.1-1 mm," in *IEEE Int. Vacuum Electron. Conf.*, 2003, pp.290-291.
- [10] R. Kohler, A. Tredicucci, F. Beltram, H. E. Beere, E. H. Linfield, A. G. Davies, D. A. Ritchie, R. C. Iotti, and F. Rossi, "Terahertz semiconductor-heterostructure laser," *Nature*, Vol.417, pp.156-159, May, 2002.
- [11] P. U. Jepsen, R. H. Jacobsen, and S. R. Keiding, "Generation and detection of terahertz pulses from biased semi-conductor antennas," *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol.13, No.11, pp.2424-2436, Nov., 1996.
- [12] Q. Wu, and X. -C. Zhang, "Free-space electro-optics sampling of mid-infrared pulses," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.71, No.10, pp.1285-1286, Sept. 1997.
- [13] D. E. Prober, "Superconducting terahertz mixer using a transition-edge micro-bolometer," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.62, No.17, pp.2119-2121, Apr., 1993.
- [14] E. Linfield, "Terahertz applications: A source of fresh hope," *Nature Photonics*, Vol.1, pp.257-258, May, 2007.
- [15] R. E. Miles, X. -C. Zhang, H. Eisele, and A. Krotkus, *Terahertz Frequency Detection and Identification of Materials and Objects*. Springer: Berlin, 2007, pp.167-184.
- [16] O. Morikawa, M. Tonouchi, M. Tani, K. Sakai, and M. Hangyo, "Sub-THz emission properties of photoconductive antennas excited with multimode laser diode," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.38, No.3A, pp.1388-1389, Mar., 1999.
- [17] S. M. Duffy, S. Verghese, K. A. McIntosh, A. Jackson, A. C. Gossard, and S. Matsuura, "Accurate modeling of dual dipole and slot elements used with photomixers for coherent terahertz output power," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol.49, No.6, pp.1032-1038, June, 2001.
- [18] M. Tani, O. Morikawa, S. Matsuura, and M. Hangyo, "Generation of terahertz radiation by photomixing with dual- and

- multiple-mode lasers,” *Semicond. Sci. Technol.*, Vol.20, No.7, pp.S151-S163, 2005.
- [19] E. R. Brown, K. A. McIntosh, K. B. Nichols, and C. L. Dennis, “Photomixing up to 3.8 THz in low-temperature-grown GaAs,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol.66, No.3, pp.285-287, Jan., 1995.
- [20] E. R. Brown, A. W. M. Lee, B. S. Navi, and J. E. Bjarnason, “Characterization of a planar self-complementary square-spiral antenna in the THz region,” *Microwave Opt. Technol. Lett.*, Vol.48, No.3, pp.524-529, Mar., 2006.
- [21] R. Mendis, C. Sydlo, J. Sigmund, M. Feiginov, P. Meissner, and H. L. Hartnagel, “Tunable CW-THz system with a log-periodic photoconductive emitter,” *Solid State Electron.*, Vol.48, pp.2041-2045, June, 2004.
- [22] R. Mendis, C. Sydlo, J. Sigmund, M. Feiginov, P. Meissner, and H. L. Hartnagel, “Spectral characterization of broadband THz antennas by photoconductive mixing: Toward optimal antenna design,” *IEEE Antennas Wireless Propagat. Lett.*, Vol.4, pp.85-88, June, 2005.
- [23] I. S. Gregory, C. Baker, W. R. Tribe, I. V. Bradley, M. J. Evans, E. H. Linfield, A. G. Davies, and M. Missous, “Optimization of photomixers and antennas for continuous-wave terahertz emission,” *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol.41, No.5, pp.717-728, May, 2005.
- [24] S. Verghese, E. K. Duerr, K. A. McIntosh, S. M. Duffy, S. D. Calawa, C. Y. E. Tong, R. Kimberk, and R. Blundell, “A photomixer local oscillator for a 630-GHz heterodyne receiver,” *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, Vol.9, No.6, pp.245-247, June, 1999.
- [25] P. Focardi, W. R. McGrath, and A. Neto, “Design guidelines for terahertz mixers and detectors,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.53, No.5, pp.1653-1661, May, 2005.
- [26] D. B. Rutledge, D. P. Neikirk, and D. P. Kasilingam, in *Infrared and Millimeter Waves*, K. J. Button Ed., Academic Press, 1983.
- [27] N. V. Venkatarayalu and T. Ray, “Optimum design of Yagi-Uda antennas using computational intelligence,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol.52, No.7, pp.1811-1818, July, 2004.
- [28] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, Wiley: New York, 1997, pp.60-61.
- [29] K. Han, Y. Park, S. Kim, H. Han, I. Park, and H. Lim, “A terahertz Yagi-Uda antenna for high input impedance,” *Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Pasadena, California, Sept. 2008.
- [30] G. M. Rebeiz, “Millimeter-wave and terahertz integrated circuit antenna,” *Proc. IEEE*, Vol.80, No.11, pp.1748-1770, Nov., 1992.
- [31] D. F. Filipovic, S. S. Gearhart, and G. M. Rebeiz, “Double-slot antennas on extended hemispherical and elliptical silicon dielectric

- lenses,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.41, No.10, pp.1738-1749, 1993.
- [32] M. J. M. van der Vorst, P. J. I. de Maagt, and M. H. A. Herben, “Effect on internal reflection on the radiation properties and input admittance of integrated lens antennas,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.47, No.9, pp.1696-1704, 1999.

저자소개

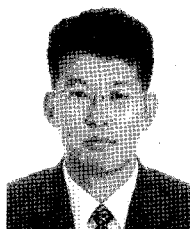


한 해 옥

1986년 2월 서울대학교 전기공학과, 공학사
 1988년 2월 서울대학교 전기공학과, 공학석사
 1995년 5월 University of Illinois at Urbana-Champaign,
 전기컴퓨터공학과, 공학박사
 1995년 1월 ~ 1997년 1월 AT&T Bell Labs 연구원
 1998년 10월 ~ 2001년 9월 과학기술부창의연구단,
 Center for THz Photonics, 연구단장
 1997년 2월 ~ 현재 포항공과대학교 전기컴퓨터공학부
 교수

주관심 분야 : 테라헤르츠 포토닉스, 나노 포토닉스

저자소개



박 익 모

1984년 5월 State University of New York at Stony
 Brook, 전기공학과, 공학사
 1989년 8월 University of Illinois at Urbana-Champaign,
 전기컴퓨터공학과, 공학석사
 1994년 1월 University of Illinois at Urbana-Champaign,
 전기컴퓨터공학과, 공학박사
 1994년 9월 ~ 1996년 2월 LG 종합기술원 선임연구원
 1996년 3월 ~ 현재 아주대학교 전자공학부 교수

주관심 분야 : 안테나