

높은 출력의 THz 포토믹서를 위한 네잎클로버 형태의 안테나

우인상 · Truong Khang Nguyen · 박익모[†] · 임한조

아주대학교 전자공학부
☎ 443-719 경기도 수원시 영통구 원천동 산 5

한해욱

포항공과대학교 전자컴퓨터공학과
☎ 790-784 경상북도 포항시 남구 효자동 산 39

주 흥

레이저옵텍
☎ 461-714 경기도 성남시 중원구 상대원동 223-12번지

(2009년 7월 17일 받음, 2009년 9월 21일 수정본 받음, 2009년 9월 21일 게재 확정)

테라헤르츠 광원인 포토믹서의 출력을 향상시키기 위하여 강한 공진의 복사부와 안정적인 DC 급전부로 구성된 네잎클로버 형태의 새로운 안테나구조를 제안하였다. 먼저 복사환경을 단순화시킨 무한기판 위에서 제안한 안테나구조의 공진특성을 살펴보고, 이를 바탕으로 제안한 구조가 확장형 반구렌즈 위에서 최대의 전체효율과 지향성을 지니도록 설계하였다. 기존의 전파장 다이폴안테나와 비교한 결과, 제안한 구조는 공진주파수에서 6배 이상의 높은 입력임피던스 특성을 가짐으로써 포토믹서와의 부정합효율을 크게 개선시켰으며, 이로 인해 테라헤르츠 출력이 전파장 다이폴의 경우보다 2.7배 높게 예상되었다.

Four-leaf Clover-shaped Antenna for THz Photomixer for High Output Power

Insang Woo, Truong Khang Nguyen, Ikmo Park[†], and Hanjo Lim

Department of Electrical and Computer Engineering Ajou University, 5 Wonchon-dong, Youngtong-gu, Suwon 443-749, Korea

[†]*E-mail: ipark@ajou.ac.kr*

Haewook Han

Department of Electrical and Computer Engineering Pohang University of Science and Technology

San 31 Hoyja-dong, Nam-gu, Pohang 790-784, Korea

Hong Chu

Laser Optek, 223-12 Sangdaiwon-dong, Jungwon-gu, Sungnam 462-714, Korea

(Received July 17, 2009; Revised manuscript September 21, 2009; Accepted September 21, 2009)

To improve the output power of a photomixer as a THz source, we propose a four-leaf clover-shaped antenna structure which is composed of a highly resonant radiation element and a stable DC feed element. The resonance characteristics of the proposed structure were investigated on a half-infinite substrate first as a simplified radiation environment in order to save the computation time. Based on the antenna characteristics on a half-infinite substrate, the antenna structure was designed to have a maximum total efficiency and a maximum directivity on an extended hemispherical lens. In comparison with a full-wavelength dipole, an input resistance of this structure increased six fold and this characteristic significantly improved the mismatch efficiency between a photomixer and an antenna. THz output power from this structure is expected to increase by 2.7 times as compared to a full-wavelength dipole case.

Keywords: THz photomixer, Antenna, Input impedance, Efficiency, Lens substrate.

OCIS codes: (160.5140) Photoconductive materials; (190.7070) Two-wave mixing; (350.5610) Radiation

[†]E-mail: ipark@ajou.ac.kr

I. 서 론

테라헤르츠파는 마이크로파와 적외선 사이에 위치하는 전자기파로서, 주파수는 대략 0.1~10 THz의 구간으로 정의된다. 스펙트럼 위치상 전파의 유전체 투과성과 광파의 직진성을 동시에 지니며, 수분에 흡수가 잘 되는 테라헤르츠파는 영상과 분광 및 통신 분야 등에서 새로운 기술로 적용이 가능하다. 테라헤르츠파를 이용하면 불투명한 사물의 내부를 볼 수 있고, 분자운동 에너지레벨의 생체 메커니즘과 우주신호 등을 분석할 수 있으며, 마이크로파 및 밀리미터파보다 훨씬 우수한 초고속 근거리 무선통신이 가능해진다.^[1-6] 이와 같은 응용성을 지닌 테라헤르츠파 기술은 과거에는 광원 및 검출기의 개발이 어려워 그 활용이 제한적으로 이뤄졌다. 하지만 최근의 반도체와 레이저 및 초전도 기술의 발달은 과거보다 훨씬 다양한 광원의 출현을 가능하게 해 주었다. 지금까지 개발된 펄스 광원기술로는 광전도 안테나(photoconductive antenna)와 광정류(optical rectification) 방식이 있으며,^[7-9] 연속파 광원기술로 포토믹서(photomixer)와 핫홀 레이저(hot hole laser), 자유전자 레이저(free electron laser), 양자 캐스케이드 레이저(quantum cascade laser) 등이 있으나,^[10-13] 실용화 수준에는 아직 이르지 못한 상태이다.^[14] 그 중에서 테라헤르츠 포토믹서는 다른 광원에 비하여 실용화 가능성이 높은 기술로서, 상온에서 동작하고, 주파수 가변이 자유로우며, 저가의 소형시스템으로 구현된다는 장점을 지니고 있다.^[15] 하지만 출력이 수 십 μw 이하로서 다른 광원보다 매우 낮다는 문제가 있는데, 이러한 저출력 요인은 테라헤르츠파 발생메커니즘을 따라 두 가지로 나뉘어진다. 첫째는 레이저 입사광으로부터 광전류(photo current)가 형성되는 과정에서의 낮은 변환효율로서, 광전도체 내에서 광운반자의 이동 시간(transit time)과 운반자수명(carrier lifetime) 등과 관계되며 광전도체 재료와 포토믹서 구조의 설계를 통하여 개선되어야 한다.^[15-16] 둘째는 광전류가 안테나를 통하여 테라헤르츠파로 복사되는 과정에서의 낮은 전체효율(total efficiency)로서, 안테나구조 설계를 통하여 개선될 수 있다.^[17-18] 특히 안테나설계와 관련된 기존의 연구는 부정합효율(mismatch efficiency)만을 개선하려 하였는데, 테라헤르츠 대역에서는 도체의 전도율도 낮아지므로 안테나의 복사효율(radiation efficiency)도 함께 고려되어야 한다.^[19]

본 논문에서는 테라헤르츠 포토믹서의 저출력 문제를 높은 입력임피던스 특성의 안테나를 설계하여 개선하고자 하였으며, 최적화는 공진시의 입력임피던스와 복사효율 그리고 복사패턴을 모두 고려하며 이루어졌다. 계산시간의 절약을 위하여 먼저 제한한 안테나의 특성을 무한기판 위에서 살펴보고, 이를 바탕으로 렌즈기판 위에서 안테나의 전체효율과 지향성이 최대로 형성되도록 기판을 포함한 전체 안테나구조를 설계하였다. 계산 및 분석은 Finite Integration Technique (FIT) 기반의 시뮬레이션툴인 CST사의 Microwave Studio를 사용하였다.

II. 테라헤르츠 포토믹서 안테나

2.1. 포토믹서의 특성과 안테나의 구조

테라헤르츠 포토믹서는 광전도체와 안테나의 구조를 일체화시킨 연속파 광원기술로서, 동작은 레이저 혼합광에 포함된 테라헤르츠 대역의 맥놀이신호(beat signal)가 광전도체를 거쳐 광전류로 변환된 뒤, 광전류신호가 안테나를 거쳐 테라헤르츠파로 복사되는 과정으로 구성된다. 이런 동작 특성의 포토믹서를 등가회로로 나타내면 그림 1과 같이 되어 전원부에 해당하는 광전도체는 광전류원 I_{photo} , 광전도도 G_{photo} , 전극커패시턴스 C_{elect} 의 병렬회로로, 부하에 해당하는 안테나는 입력어드미턴스 Y_{antenna} 로 표현된다. 특히 포토믹서에서 광전도체는 펄스가 아닌 연속파 레이저로 여기되므로 광전도도 G_{photo} 가 $(10 \text{ k}\Omega)^{-1}$ 이하로 매우 낮게 형성되는 현상을 보이는데, 이런 특성은 상대적으로 높은 입력어드미턴스 Y_{antenna} 를 지닌 안테나와의 사이에서 심각한 부정합문제를 유발시킨다.^[10,15] 그러므로 포토믹서에 사용되는 안테나는 복사효율이 높아야 할 뿐만 아니라, 입력임피던스도 포토믹서의 임피던스와 유사한 값을 가져야 한다.

제안하는 전체 포토믹서 안테나구조는 그림 2와 같이 복사부인 안테나와 DC 급전부인 바이어스 회로로 구성된다. 전파장에서 공진되도록 설계된 네잎클로버 형태의 안테나는 가로길이 D_x , 세로길이 D_y , 전극 선로와 안테나 끝단의 가로간격 G_x , 마주하는 안테나 끝단의 세로간격 G_y , 그리고 선폭 w 등을 설계변수로 갖는다. 안테나에 연결되는 PBG 셀을 갖

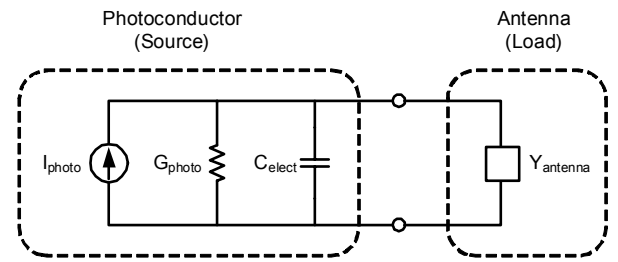


Fig. 1. Equivalent-circuit model for a photomixer.

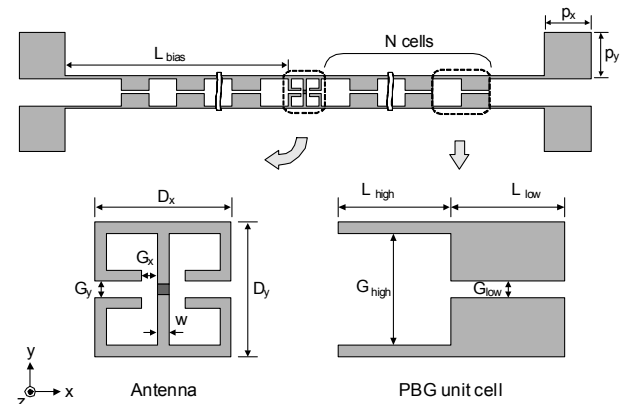


FIG. 2. Structure of the proposed antenna and DC bias circuit.

는 CPS (coplanar strip) 바이어스 회로는 높은 임피던스선로의 간격 G_{high} , 낮은 임피던스선로의 간격 G_{low} , 각 선로의 길이 L_{high} 와 L_{low} , PBG 셀의 개수 N , DC 바이어스라인의 길이 L_{bias} , 그리고 DC 전원패드의 가로 길이 p_x 와 세로 길이 p_y 등을 설계변수로 갖는다. 도체선로에는 전도도가 1.6×10^7 S/m 이고 두께가 $0.35 \mu\text{m}$ 인 Ti/Au 박막을 사용하였으며,^[20] 도체 구조가 위치하는 기판의 재질로는 유전율인 12.9인 GaAs를 사용하였는데 우수한 특성의 광전도체인 LTG-GaAs(low-temperature-grown GaAs)의 성장을 고려한 것이다.^[21]

2.2. 무한기판 위의 포토믹서 안테나 특성

렌즈기판 위에 있는 안테나와 무한기판 위에 있는 안테나는 복사패턴을 제외한 일반적인 공진특성이 유사하게 나타나는 것으로 잘 알려져 있다.^[22] 따라서 안테나 설계를 위한 계산시간을 단축하기 위하여 GaAs 무한기판 위에서 제안한 안테나의 공진특성을 먼저 살펴보았다. 이 때 안테나의 전체 효율 e_{total} 은 다른 특성들보다 중요하게 다루어지는데, 전체 효율은 식 (1)과 같이 복사효율 $e_{radiation}$ 과 부정합효율 $e_{mismatch}$ 을 곱한 결과로서 포토믹서의 출력과 비례관계에 있기 때문이다.^[23] 식 (2)는 부정합효율의 주요인자인 반사계수 (reflection coefficient) Γ 가 전송선로의 특성임피던스가 아닌 포토믹서

의 임피던스 $Z_{photomixer}$ 에 기준하여 결정됨을 보여준다.

$$e_{total} = e_{radiation} \times e_{mismatch} = e_{radiation} \times (1 - |\Gamma|^2) \tag{1}$$

$$\Gamma = \frac{Z_{antenna} - Z_{photomixer}}{Z_{antenna} + Z_{photomixer}} \tag{2}$$

제안한 구조의 특성을 기존의 전파장 다이폴과 비교하였다. 이 때 제안한 안테나는 가로간격 G_x 과 세로간격 G_y 를 $2 \mu\text{m}$ 로, 가로길이 D_x 와 세로길이 D_y 를 $36 \mu\text{m}$ 로, 선폭 w 를 $3 \mu\text{m}$ 으로 두었고, 직선 다이폴은 길이와 선폭을 각각 $88 \mu\text{m}$ 과 $3 \mu\text{m}$ 로 두어 두 안테나 구조 모두 1 THz 근처에서 전파장 공진을 하도록 하였다. 첫째로 제안한 구조에서는 안테나의 전파장 공진특성에 거의 영향을 미치지 않는 DC 바이어스라인의 설계가 가능하다. 전파장 다이폴의 경우 교류전류 성분이 DC 바이어스라인으로 누설됨으로써 본래의 입력임피던스와 복사특성에 큰 변화가 수반된다.^[24] 그러나 제안한 구조의 경우 안테나의 양쪽 모서리에 바이어스라인을 연결하여도 본래의 입력임피던스와 복사효율 특성이 각각 그림 3과 그림 4와 같이 거의 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 전파장 공진시의 교류 전계분포인 그림 5를 통하여 확

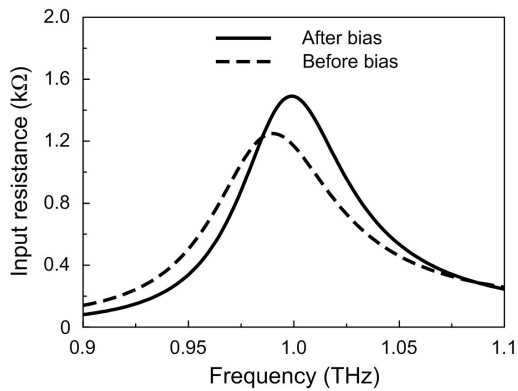


FIG. 3. Input impedance characteristics of the proposed antenna before and after attaching DC biaslines.

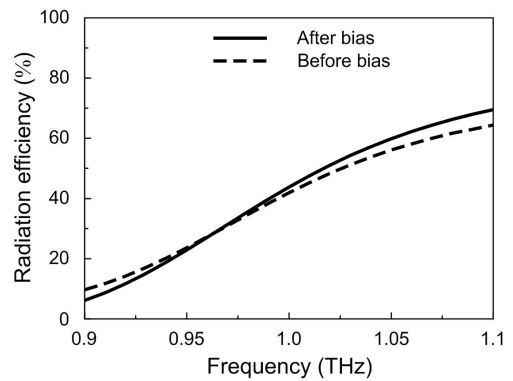


FIG. 4. Radiation efficiency characteristics of the proposed antenna before and after attaching DC biaslines.

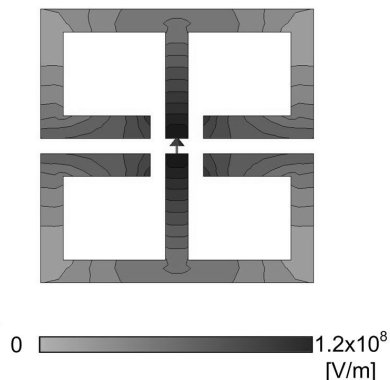


FIG. 5. AC E-field distribution on the proposed antenna at a full-wavelength resonance.

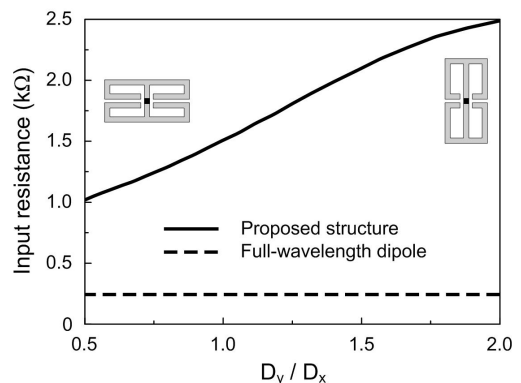


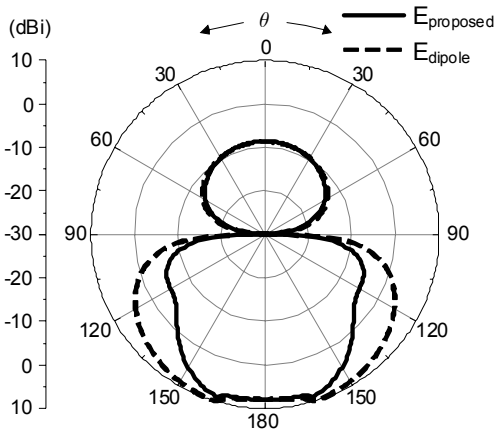
FIG. 6. Input impedance at a full-wavelength resonance when a ratio of length to width D_y/D_x varies.

인할 수 있듯이, 전극으로부터 $\lambda/4$ 거리만큼 떨어진 모서리 부근에서 최소 전계가 형성됨으로써 교류 전계가 0인 DC 바이어스라인으로의 누설전류가 크게 억제되기 때문이다.

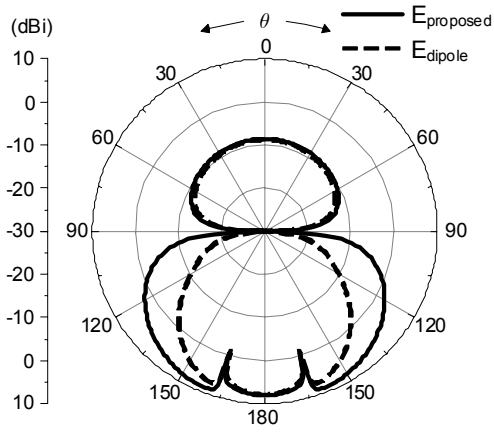
둘째로 전파장 공진시에 높은 입력임피던스 특성을 가지므로 포토믹서와의 부정합효율을 크게 개선시킬 수 있다. 그림 6은 가로세로 길이비 D_y/D_x 을 달리하는 네잎클로버 구조에서의 입력임피던스 변화를 나타낸 것으로, 가로세로 길이합 D_x+D_y 이 고정된 경우 가로세로 길이비 D_y/D_x 에 상관없이 공진주파수가 거의 일정하게 나타나는 특성을 이용한 것이다. 고정된 공진주파수 1 THz에서 네잎클로버 구조의 입력임피던스는 전파장 다이폴의 246 Ω 에 비하여 최소 4배에서 최대 10배까지 높음을 알 수 있는데, 안테나 양단이 구조의 내부로 구부러진 형태가 유지됨으로써 공진이 강하게 유도되기 때문이다. 셋째로 복사패턴에서 z축 방향의 회전대칭성이 전파장 다이폴보다 높으므로, 가우시안 빔효율(Gaussian beam efficiency)을 높여줄 수 있다. 그림 7은 제안한 구조와 y축 상에 위치한 전파장 다이폴의 1 THz 복사패턴을 x-z 평면과 y-z 평면 상에서 비교한 것이다. $\theta < 90^\circ$ 인 자유공간 영역의 경우 동일한 복사패턴이, 복사가 주로 이뤄지는 $\theta > 90^\circ$ 인 기관 영역의 경우 임계각(critical angle)인 $\theta = 165^\circ$ 부근에

서 각각 피크(peak)와 널(null)이 구조에 상관없이 형성되고 있다.^[25] 제안한 구조는 전파장 다이폴과 비교하여 x-z 평면 상에서는 보다 좁은 빔폭을, y-z 평면 상에서는 보다 넓은 빔폭을 가지나, 상대적으로 빔폭의 변화가 적다.

다음으로 제안한 구조로부터 최대의 전체효율을 구현하고자 설계변수조사를 하였으며, 특히 공진주파수가 고정되는 가로세로 길이비 D_y/D_x 의 조절 조건에서 효율을 살펴보았다. 그림 8은 DC 바이어스라인이 연결된 상태에서 가로세로 길이비 D_y/D_x 에 따른 효율변화로서, 이 때 가로간격 G_x 과 세로간격 G_y 를 모두 2 μm 로, 가로세로 길이합 D_x+D_y 를 64 μm 로 두었으며, 포토믹서 임피던스는 10 k Ω 으로 가정하였다. 구조가 세로방향으로 길어질수록 입력임피던스가 높아져 부정합효율이 개선되고 있으나, 복사효율은 오히려 낮아지므로 두 효율이 상충적인 관계를 보여주고 있다. 전체효율의 변화는 그림 9와 같이 나타났고, 최대 전체효율은 가로세로 길이비 D_y/D_x 가 1.06인 지점에서 22.9%였다. 이 수치는 전파장 다이폴의 결과인 8.3%보다 2.7배 가량 높은 것으로, 제안한 안테나를 사용함으로써 테라헤르츠파의 출력이 해당 수치만큼 증가 가능함을 의미한다. 표 1은 전체효율이 최대인 안테나의 설계수치로서 1 THz의 공진주파수 조건에서 얻어진 것이다.



(a) x-z plane



(b) y-z plane

FIG. 7. Radiation patterns of antennas at 1 THz on a half-infinite GaAs substrate (a) x-z plane (b) y-z plane.

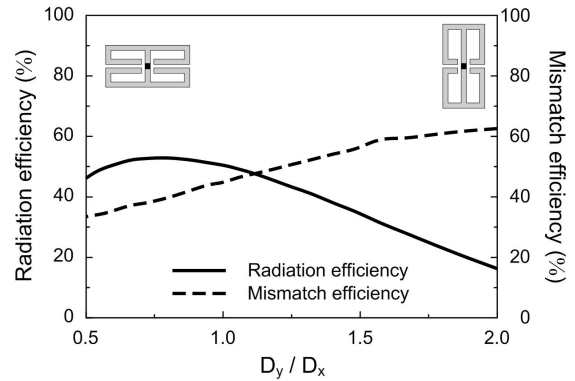


FIG. 8. Radiation efficiency and mismatch efficiency at a full-wavelength resonance when a ratio of length to width D_y/D_x varies.

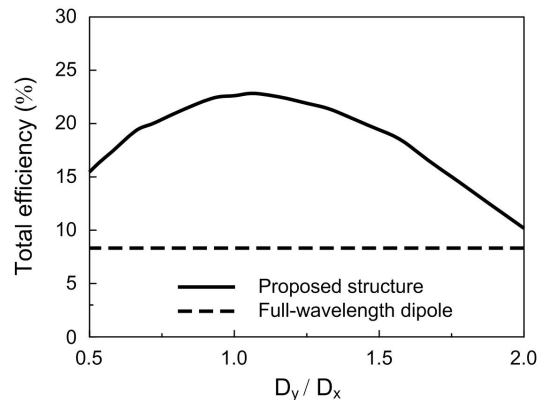


FIG. 9. Total efficiency at a full-wavelength resonance when a ratio of length to width D_y/D_x varies.

TABLE 1. Design parameters of the proposed antenna for a maximum total efficiency at 1 THz on a half-infinite GaAs substrate

Design parameter	Length (m)	Design parameter	Length (m)
G_x	2	L_{high}	30
G_y	2	L_{low}	30
D_x	35	d	30
D_y	37	N	4
w	3	L_{bias}	450
G_{high}	31	p_x	100
G_{low}	2	p_y	100

2.3. 렌즈기판 위의 포토믹서 안테나 특성

무한기판 위에서 설계한 안테나구조를 바탕으로 복사패턴의 지향성을 높여주는 렌즈기판구조를 설계하였다. 일반적으로 무한기판 위에 위치한 안테나의 복사패턴은 유전율이 높은 기판방향으로 지향되므로 단방향 특성을 갖지만, 실제로 유한한 두께를 지닌 평판형 기판에서는 전반사효과에 의한 기판모드손실(substrate mode loss)이 발생하여 안테나의 지향성과 복사효율 등이 크게 저하된다. 그러나 렌즈기판을 사용하면 전반사효과가 사라지는 동시에 집중효과를 통하여 복사패턴의 지향성을 높일 수 있다.^[25] 본 설계에서는 그림 10과 같이 고정된 크기의 반구렌즈 위에 있는 평판의 두께를 조절하여 복사패턴의 지향성을 크게 높일 수 있는 확장형 반구렌즈(extended hemispherical lens)를 사용하였다.^[26] 이 때 GaAs 평판 아래에 부착되는 반구의 재료로 Si($\epsilon_r=11.7$)을 사용하였는데, Si은 GaAs와 유전율이 비슷하면서도 상대적으로 가공이 쉽고 유전체 손실이 적게 발생하기 때문이다. 그리고 렌즈면에 코팅된 plexiglass ($\epsilon_r=3.4$) 재료의 $\lambda/4$ 정합층은 렌즈에서 발생하는 내부반사파의 영향을 최소화하기 위함이다.^[24]

확장형 반구렌즈의 설계변수 조사로서 일정한 크기의 Si 반구조건에서 GaAs 평판의 두께를 변화시키며 복사패턴을 살펴보았다. 그림 11은 반구반경에 대한 평판두께비율 T/R 에 따라 z축으로 나타나는 주빔의 지향성을 나타낸 것으로, 반구반경 R 은 1 THz에서 자유공간에서의 파장 λ 인 300 μm 를 기준으로하여 2.5 λ , 3.5 λ , 4.5 λ 로 주어졌으며 평판두께비율 T/R 은 0.3에서 0.5까지 변화되었다. 실선과 파선은 각각 최적화된 제안 구조와 전파장 다이폴 구조의 특성을 보여주고 있다. 반구반경 R 이 4.5 λ 인 경우의 지향성 변화가 2.5 λ 인 경우보다 뚜렷한 것에서 알 수 있듯이, 반구반경 R 이 커짐에 따라 주빔의 지향성은 전반적으로 높아지며 최대지향성이 형성되는 평판두께 조건도 명확해지고 있다. 제안한 구조는 반구반경 R 이 2.5 λ 와 3.5 λ 와 4.5 λ 인 경우 평판두께비율 T/R 이 각각 0.41와 0.40와 0.40 지점에서 최대 지향되었고, 그 값은 각각 23.7 dBi, 26.2 dBi, 28.5 dBi였다. 전파장 다이폴은 반구반경 R 이 2.5 λ 와 3.5 λ 와 4.5 λ 인 경우 평판두께비율 T/R 이 0.38인 지점에서 모두 최대 지향되었고, 그

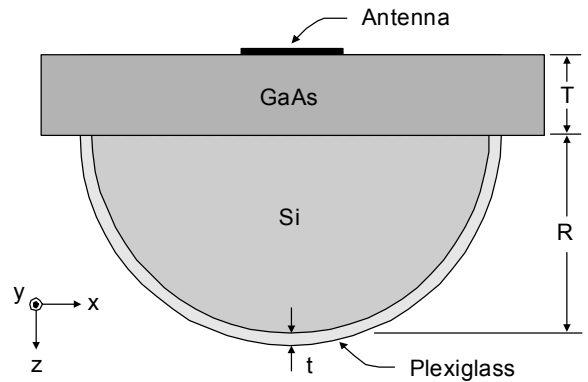


FIG. 10. Extended hemispherical lens substrate.

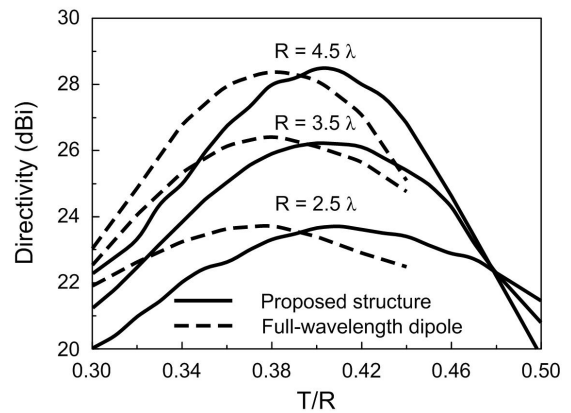


FIG. 11. Directivities of antennas at 1 THz on lens when a ratio of substrate thickness to radius of hemisphere T/R varies.

값은 각각 23.7 dBi, 26.5 dBi, 28.4 dBi였다. 이 때 전파장 다이폴에서는 평판두께비율 T/R 이 0.44인 지점을 넘어서면서 주빔 방향인 z축으로 널리 발생하여 지향성이 급격히 감소하였으며, 이에 따라 평판두께비율 T/R 이 0.44 이상인 경우에는 전파장 다이폴 안테나에 대한 최대지향성을 나타내지 않았다. 즉 동일한 반구반경의 확장형 반구렌즈에서 제안한 구조와 전파장 다이폴의 최대지향성은 거의 동일하게 구현되었지만, 최적화된 평판두께비율 T/R 은 제안한 구조가 전파장 다이폴의 경우보다 약간 두꺼웠다. 이것으로 확장형 반구렌즈가 타원렌즈(elliptical lens)와 제일 유사한 형태일 때 안테나의 복사 패턴이 최대 지향된다는 사실^[27]과 함께 렌즈 위에 부착된 안테나구조 자체도 최대지향성에 영향을 줄 수 있다.

그림 12은 반구반경 R 이 4.5 λ 인 조건에서 1 THz에서의 복사패턴을 x-z 평면과 y-z 평면에서 비교한 것으로 제안한 구조와 전파장 다이폴은 평판두께비율 T/R 이 각각 0.40과 0.38인 지점에서 각각 28.5 dBi와 28.4 dBi의 지향성을 보이고 있다. x-z 평면에서 제안한 구조와 전파장 다이폴의 반전력빔폭(half-power beamwidth)은 각각 6.8°와 5.6°이고, 부엽 레벨(side lobe level)은 각각 -21.3 dB와 -13.5 dB 이하이며, 전후방비(front-to-back ratio)는 각각 24.6 dB와 27.1 dB이다. y-z 평면에서 제안한 구조와 전파장 다이폴의 반전력빔폭은

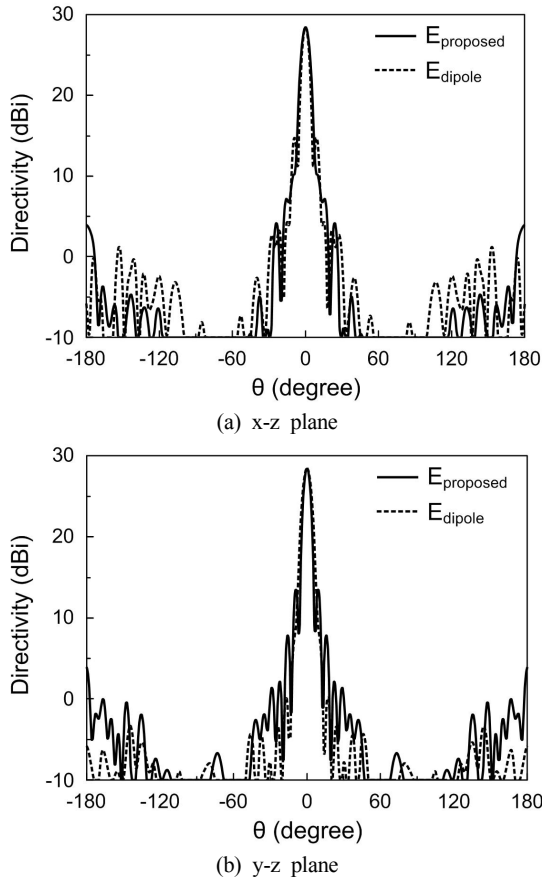


FIG. 12. Radiation patterns of antennas at 1 THz on an extended hemispherical lens substrate ($R = 4.5 \lambda$) (a) x-z plane (b) y-z plane.

각각 5.6° 와 7.0° 이고, 부엽레벨은 각각 -14.7 dB와 -27.9 dB 이하이며, 전후방비는 각각 24.6 dB와 25.2 dB 이다. 제안한 구조의 경우 평면 방향에 따른 반전력빔폭의 변화가 1.2° 로서 전파장 다이폴의 1.4° 보다 적게 나타나고 있는데, 이는 제안한 구조의 고유한 복사패턴이 z축 방향으로 높은 회전대칭성을 갖는 것과 관련된 것으로 사료된다.

평판두께비율 T/R 을 변화시키면서 제안한 안테나의 입력 임피던스 특성을 살펴보았다. 그림 13은 반구반경 R 을 4.5λ 로 고정시킨 상태에서, 평판두께비율 T/R 이 각각 0.3 , 0.4 , 0.5 인 경우를 무한기판 위에서의 결과와 비교한 것이다. 공진주파수의 변동은 무한기판의 경우에 비하여 1.0% 범위 내에서 이루어졌으며, 최대 입력임피던스는 무한기판에 비하여 최대 15% 까지 증가되었다. 무한기판의 결과에 기준하여 유한한 렌즈기판에서 발생하는 리플(ripple)특성은 평판두께비율 T/R 이 커질수록 강해지는데, 이러한 리플특성의 증가는 렌즈면으로부터 안테나로 유입되는 내부반사파의 경로가 점차 증가하기 때문인 것으로 사료된다. 하지만 최대지향성이 나타나는 평판두께비율 T/R 이 0.4 인 지점까지는 입력임피던스 특성이 안정적임을 확인하였다.

그림 14는 최대지향성이 형성되는 확장형 반구렌즈 조건에서 제안한 안테나와 전파장 다이폴의 입력임피던스를 비

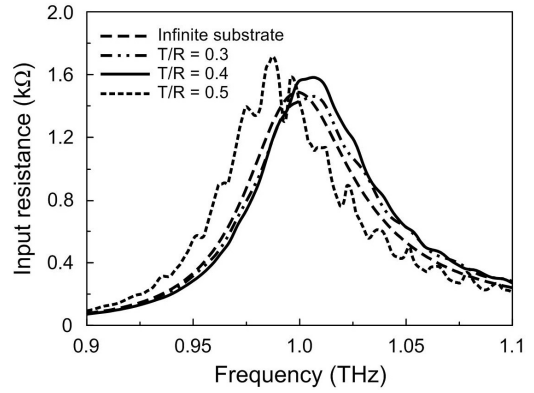


FIG. 13. Input impedance characteristics of the proposed antenna when a ratio of substrate thickness to radius of hemisphere T/R varies ($R = 4.5 \lambda$).

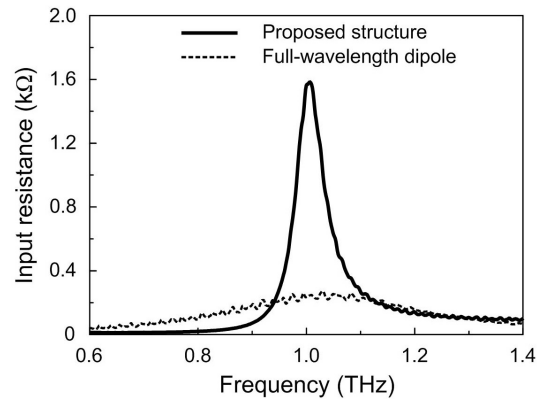


FIG. 14. Input impedance characteristics of the proposed antenna and a full-wavelength dipole antenna on an extended hemispherical lens substrate ($R = 4.5 \lambda$).

교한 것으로, 반구반경 R 은 4.5λ 로 동일하고, 평판두께비율 T/R 은 각각 0.40 , 0.38 로 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. 제안한 안테나는 동일한 공진주파수에서 전파장 다이폴보다 6배 이상의 높은 입력임피던스를 보이며, 렌즈면의 내부반사파에 의해 발생하는 리플현상에 대해서도 훨씬 안정적임을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 테라헤르츠 포토믹서에 사용되는 안테나로서 네잎클로버 형태의 전파장 공진구조를 제안하였다. 제안한 안테나는 기존의 전파장 다이폴에 비하여 높은 입력임피던스 특성과 안정적인 DC 바이어스라인, 그리고 높은 대칭성의 z축 복사패턴을 지녔다. 계산 시간의 절약을 위하여 제안한 안테나의 공진특성을 무한기판 위에서 먼저 살펴보고, 이를 바탕으로 실제 제작에 쓰이는 확장형 반구렌즈 위에서 전체효율과 지향성이 최대로 형성되도록 기판을 포함한 전체 안테나구조를 설계하였다. 제안한 안테나의 특성을

기존의 전파장 다이폴과 비교한 결과, 최대지향성이 나타나는 평판두께비율 T/R 은 전파장 다이폴보다 약간 두꺼웠고 최대지향성은 거의 동일하였다. 하지만 제안한 안테나는 전파장 공진주파수에서 다이폴보다 6배 이상의 높은 입력임피던스를 지녀 포토믹서와의 부정합효율을 크게 개선시켰으며, 동시에 복사효율까지 고려한 결과 복사체로서의 전체효율이 기존 다이폴보다 2.7배 가량 향상되었다. 그러므로 상기와 같은 특성을 지닌 제안한 안테나 구조를 테라헤르츠 포토믹서 설계에 적용한다면 저출력 특성이 효과적으로 개선될 것이다.

References

1. A. Markelz, S. Whitmore, J. Hillebrecht, and R. Birge, "THz time domain spectroscopy of biomolecular conformation modes," *Phys. Med. Biol.* **47**, 3797-3805 (2002).
2. B. B. Hu and M. C. Nuss, "Imaging with terahertz waves," *Opt. Lett.* **20**, 1716-1718 (1995).
3. S. J. Oh, C. Kang, and J.-H. Son, "Imaging with terahertz electromagnetic pulses," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **15**, 46-50 (2004).
4. I. H. Maeng and J.-H. Son, "Optical properties of human tooth in terahertz frequency region," in *Proc. OSK Annual Meeting* (Univ. of Seoul, Korea, Feb. 2009), pp. 529-530.
5. E. Jung, H. Park, J. Kim, and H. Han, "Terahertz pulse imaging of articular cartilage tissues," in *Proc. OSK Summer Meeting* (Jeju Univ., Korea, July 2006), pp. 529-530.
6. T. Kleine-Ostmann, K. Pierz, G. Hein, P. Dawson, and M. Koch, "Audio signal transmission over THz communication channel using semiconductor modulator," *Electron. Lett.* **40**, 124-126 (2004).
7. D. H. Auston, K. P. Cheung, and P. R. Smith, "Picosecond photo-conducting hertzian dipoles," *Appl. Phys. Lett.* **45**, 284-286 (1984).
8. B. B. Hu, X.-C. Zhang, D. H. Auston, and P. R. Smith, "Free-space radiation from electro-optic crystals," *Appl. Phys. Lett.* **56**, 506-508 (1990).
9. Y.-S. Jin, S.-G. Jeon, K.-J. Kim, C.-H. Sohn, and S.-S. Jung, "Pulsed terahertz emission and detection properties from ZnTe crystal," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **16**, 553-559 (2005).
10. E. R. Brown, F. W. Smith, and K. A. McIntosh, "Coherent millimeter-wave generation by heterodyne conversion in low-temperature-grown GaAs photoconductors," *J. Appl. Phys.* **73**, 1480-1484 (1993).
11. E. Brundermann, E. E. Haller, and A. V. Muravjov, "Terahertz emission of population-inverted hot-holes in single-crystalline silicon," *Appl. Phys. Lett.* **73**, 723-725 (1998).
12. B. C. Lee, Y. U. Jeong, S. H. Park, and S. J. Hahn, "Status and prospect of free electron lasers," *J. Kor. Vac. Soc.* **15**, 435-450 (2006).
13. 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* **417**, 156-159 (2002).
14. E. Linfield, "Terahertz application: A source of fresh hope," *Nature Photonics* **1**, 257-258 (2007).
15. R. E. Miles, X.-C. Zhang, H. Eisele, and A. Krotkus, *Terahertz Frequency Detection and Identification of Materials and Objects* (Springer, Berlin, Germany, 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.* **38**, 1388-1389 (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 Tans. Microwave Theory Tech.* **49**, 1032-1038 (2001).
18. K. Moon, H. Han, and I. Park, "Terahertz folded half-wavelength dipole antenna for high output power," in *Proc. International Topical Meeting on Microwave Photonics* (Seoul, Korea, Oct. 2005), pp. 301-304.
19. K. Han, T. K. Nguyen, and I. Park, "A terahertz Yagi-Uda antenna with high input impedance," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **20**, 65-75 (2009).
20. U. D. Keli, D. R. Dykarr, A. F. J. Levi, R. F. Kopf, L. N. Pfeiffer, S. B. Darack, and K. W. West, "High-speed coplanar transmission line," *IEEE J. Quantum Electron.* **28**, 2333-2342 (1992).
21. S. Y. Chou, Y. Liu, and P. B. Fischer, "Terahertz metal-semiconductor-metal photodetectors with 25 nm finger spacing and finger width," *Appl. Phys. Lett.* **61**, 477-479 (1992).
22. M. Kominami, D. M. Pozar, and D. H. Schaubert, "Dipole and slot elements and arrays on semi-infinite substrate," *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **33**, 600-607 (1985).
23. C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design* (Wiley, New York, USA, 1997), pp. 60-61.
24. K. Moon, Ph. D. Thesis, Pohang University of Science and Technology (2007), pp. 59-73.
25. K. J. Button, *Infrared and Millimeter Waves* (Academic Press, New York, USA, 1983), vol. 10, pp. 1-90.
26. 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.* **41**, 1738-1749 (1993).
27. 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.* **47**, 1696-1704 (1999).