

진공 내 상대론적인 영역의 전자빔을 이용한 플라즈마 항적장 가속기 기반 체렌코프 방사를 통한 고풍력 전자파 발생 기술 연구

Study of Coherent High-Power Electromagnetic Wave Generation Based on Cherenkov Radiation Using Plasma Wakefield Accelerator with Relativistic Electron Beam in Vacuum

민선홍 · 권오준* · 사토로프마틀랍** · 백인근*** · 김선태**** · 홍동표**** · 장정민**** ·
라나조이**** · 조일성 · 김병수 · 박차원 · 정원균 · 박승혁***** · 박건식**

Sun-Hong Min · Ohjoon Kwon* · Matlabjon Sattorov** · In-Keun Baek*** · Seontae Kim**** ·
Dongpyo Hong**** · Jungmin Jang**** · Ranajoy Bhattacharya***** · Ilsung Cho · Byungsu Kim ·
Chawon Park · Wongyun Jung · Seunghyuk Park***** · Gun-Sik Park**

요 약

일반적으로 전자파의 동작 주파수가 높아짐에 따라 최대 출력이 작아지고, 파동의 파장도 작아지기 때문에, 회로의 크기도 작아질 수밖에 없다. 특히, kW급 이상의 고풍력 테라헤르츠파 주파수 대역의 회로를 제작하려면, μm ~mm 규모의 회로 크기 문제 때문에 제작에 한계점이 있다. 이러한 한계점을 극복하기 위해 본 논문에서는 회로의 지름이 2.4 cm 정도의 원통형으로, 0.1 THz~0.3 GW급의 발생원 설계 기술을 제안한다. 판드로모티브 힘이 생기는 플라즈마 항적장 가속원리와 인위적인 유전체 활용한 체렌코프방사 발생 기술 기반의 고풍력 전자파 발생원의 최적화된 설계를 위해 모델링 및 전산모사를 수행하였다. 객관적인 검증 과정을 통해 회로의 크기에 제한을 덜 받도록 하는 대구경 형태의 고풍력 테라헤르츠파 진공소자 제작이 용이하도록 효과적인 설계의 가이드라인을 제시하였다.

Abstract

As the operating frequency of an electromagnetic wave increases, the maximum output and wavelength of the wave decreases, so that the size of the circuit cannot be reduced. As a result, the fabrication of a circuit with high power (of the order of or greater than kW range) and terahertz wave frequency band is limited, due to the problem of circuit size, to the order of μm to mm. In order to

「이 연구는 2018년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.NRF-2017R1C1B2004760 & 2016R1A3B1908336).」
한국원자력의학원(Korea Institute of Radiological and Medical Sciences, KIRAMS)

*기초과학연구원 엑시온가속기사업단(Institute for Basic Science Center for Axion and Precision Physics Research)

**서울대학교 물리천문학부 테라헤르츠파생체제어연구단 & 서울테라콤(주)(Center for THz-Driven Biological Systems, Department of Physics and Astronomy, Seoul National University & Seoul-Teracom, Inc.)

***삼성전자 생산기술연구소(Manufacturing Technology Center, Samsung Electronics Co., Ltd.)

****서울대학교 물리천문학부 테라헤르츠파생체제어연구단(Center for THz-Driven Biological Systems, Department of Physics and Astronomy, Seoul National University)

*****한화(Hanwha Corporation)

· Manuscript received November 30, 2017 ; Revised May 23, 2018 ; Accepted June 7, 2018. (ID No. 20171130-01S)

· Corresponding Author: Gun-Sik Park (e-mail: gunsik@snu.ac.kr)

overcome these limitations, we propose a source design technique for 0.1 THz~0.3 GW level with cylindrical shape (diameter ~2.4 cm). Modeling and computational simulations were performed to optimize the design of the high-power electromagnetic sources based on Cherenkov radiation generation technology using the principle of plasma wakefield acceleration with ponderomotive force and artificial dielectrics. An effective design guideline has been proposed to facilitate the fabrication of high-power terahertz wave vacuum devices of large diameter that are less restricted in circuit size through objective verification.

Key words: Plasma Dielectric Wake-Field Accelerator, Ponderomotive Force, High Power Millimeter-Terahertz Waves

I. 서 론

진공 전자 물리학 분야에서 플라즈마 상태에서 상대론적인 영역의 전자빔 가속기와 회로 내의 유전체를 활용한, 고출력 전자파 발생원 설계 기술은 차세대 고출력 전자파 진공 소자로서 각광을 받고 있다. 이는 플라즈마 밀도 차이로 인한 플라즈마에 가해진 균등하지 못한 전자기장에 의해 유도되는 판드로모티브 힘(ponderomotive force)에 의해 가속하는 전자빔을 이용하는 것이다. 그리고 유전체가 전자파의 저속파 구조(Slow Wave Structure: SWS) 역할을 하면서 체렌코프 방사(Cherenkov radiation)를 발생하게 하여, 결맞는(coherent) 고출력 전자파 발생원 설계가 가능하다.

최근 들어 미래 국방 기술의 한 분야로 자리를 잡은 고출력 밀리미터-테라헤르츠파 발생장치를 기반으로 적극적 거부 시스템(Active Denial System: ADS)과 은폐 탐지 이미징 기술(Standoff detection)에도 활용과 함께 이에 대한 응용 및 실용화 연구가 주목을 받고 있다. 또한, 인체 표피에 조사된 고출력 테라헤르츠파(THz wave)에 의한 영향 연구와 생체조직 조사실험과 함께 인체 및 표적에 조사된 전자파 전파 특성 연구를 수행하며, THz 전자파에 의한 인체 조직을 포함한 다양한 표적의 산란 특성 DB (DATA Base)를 구축이 가능하다. 이외에도 생체 분자의 회전(rotation), 진동(vibration), 전이(transition)등의 영향을 확인할 수 있는 THz 주파수 영역에서 고출력 테라헤르츠파 전자기파를 이용하여 생물학적인 효과를 확인하여 바이오-의료 분야의 진단과 치료에 활용될 수 있다. 본 논문에서 제안하는 설계 연구가 위와 언급된 고출력 테라헤르츠파 발생 장치의 응용에 필수적이다.

회로 내의 발진 또는 동작 주파수를 고려하면, 테라헤르츠파 발생원의 회로 크기는 보통 수 mm 이내이다. 파워 밀도(power density)를 고려하면 kW급 이상의 고출력으로 설계하는 것은 매우 어렵다. 이러한 한계를 극복하기 위해 전자파 펄스 뒤의 상대론적인 빔의 진행 방향으로 전기장이 형성되는 플라즈마 파동에 의해 유도되는

전기장인 항적장(wake-field) 가속 원리를 이용한 고출력 테라헤르츠파 발생원 설계 기술이 필요하다^{[1]~[4]}.

따라서 본 논문에서는 앞서 언급한 항적장 가속기 기반 회로의 발진 주파수를 결정하고 체렌코프 방사를 발생시키는 유전체를 통하여, 고출력 THz 전자파 진공 회로의 설계 기술을 3차원 모델링과 전산모사 해석을 통하여 입증하였다. 여기에서는 회로의 지름이 2.4 cm 정도의 원통형으로 0.1 THz~0.3 GW급의 발생원 설계 기술을 제안한다.

II. 플라즈마 항적장 가속기 원리 기반 회로 설계

일반적으로 진공 소자 내의 출력(P)과 주파수(f)와의 관계는 $P \propto 1/f^2$ 의 함수로 주파수가 높아짐에 따라 최대 출력 파워가 작아지고, 또한 주파수가 높아질수록 파동의 파장도 작아지기 때문에, 회로의 크기도 작아질 수밖에 없다^[5].

고출력 테라헤르츠파 주파수 대역의 회로를 제작하려면, $\mu\text{m} \sim \text{mm}$ 규모의 회로의 크기 문제 때문에 제작에 한계점이 생기기 마련이다. 그러나 출력 밀도(power density)를 줄이고, 테라헤르츠파 주파수 대역의 목표 성능 동작 주파수 대역을 유지하면서 고출력 영역(MW~GW)급의 파워를 발생할 수 있는 기술이 가능하다. 플라즈마 항적장 가속원리와 상대론적인 전자빔 발생을 이용한 overmoded(oversized)의

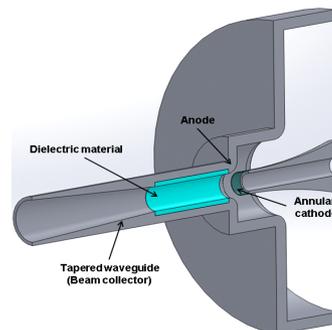


그림 1. 항적장 가속기 기반 고출력 전자파발생 회로
Fig. 1. High power electromagnetic circuit on the basis of dielectric wake-field accelerator.

특성을 가지는 대구경(large diameter)의 고효율 테라헤르츠(THz)파 발생 진공 소자의 최적화된 설계가 가능하다.

인위적인 유전체를 고안하여 전자기파보다 빠른 상대론적인 영역의 전자빔을 발생하게 하여 체렌코프방사를 발생하도록 설계에 착안점을 둔다. 유전체의 두께와 구조에 따른 원하는 주파수 모드(TM₀₁)로의 모드경쟁(mode competition)이 없이 최적화된 파위의 효율을 가지기 위해 고리(annular) 모양 형태의 음극을 사용하여 설계를 한다. 또한 전자기파와 상대론적인 전자빔의 상호작용 단면적(cross-sectional area)을 크게 하고, 정전과외 전기장의 크기를 크게 하기 위해 overmoded(oversized) 구조로 설계를 한다(그림 1). 여기서는 유전체의 내부 직경을 2.4 cm로 설정하였다(D/λ=8, D/λ ≥ 1.76이면, overmoded 구조; D=원통형 회로의 지름, λ=파장). 인위적인 유전체 구조에서 생성된 항적장의 크기는 다음과 같은 공식으로 쓸 수 있다.

$$\lambda_{n=1} = \frac{4(b-a)}{n} \sqrt{\epsilon - 1} \approx 3 \text{ mm for TM}_{01} (0.1 \text{ THz})$$

위의 식과 같이 주모드(dominant mode)를 TM₀₁으로 설정하고, 동작주파수(operating frequency)를 0.1 THz로 설계를 구상한다. 여기서 a는 유전체 내경이고, b는 유전체 외경이다. 그리고 ε는 상대 유전율으로 여기서의 값은 3이고, 보통 이산화규소(SiO₂)의 화합물 또는 폴리카보나이트(polycarbonate)를 소재로 유전체로 쓸 수 있다. 또한 그림 1의 구성된 회로와 위의 식을 바탕으로 분산관계식을 이론적으로 계산하고, 전산모사 구동을 통해 전자빔의 가속전압에 따른 동작 주파수 분포를 그림 2와 같이 나타내었다.

가속전압이 500 kV일 때, 동작(발전) 주파수는 100 GHz 가 될 수 있도록 설계를 하였다. TM₀₁ 모드를 중심으로 주파수가 아래에 있는 모드는 fast wave 모드이므로, 전자

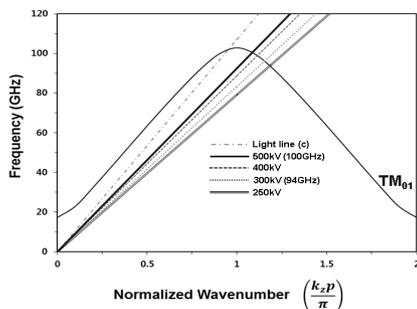


그림 2. 분산관계식
Fig. 2. Dispersion relation.

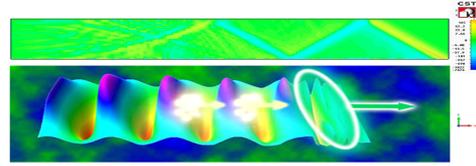


그림 3. 플라즈마 밀도 분포로 인한 Ponderomotive 힘
Fig. 3. Ponderomotive force by plasma density distribution.

기파의 속도가 전자빔보다 빨라서 상호 작용할 수 없는 상황이 된다. 그리고 TM₀₁ 모드보다 주파수가 위인 모드는 위상속도의 접선의 기울기인 군속도의 음의 절대값이 TM₀₁ 모드인 경우보다 더 크므로 TM₀₁ 모드보다 공진 주파수 모드로서의 발전이 일어나기가 어렵다. 이러한 사실을 바탕으로 overmoded 구조로 설계를 하여, TM₀₁ 모드 이외의 다른 모드가 발생하는 것을 사전에 차단하도록 하였다.

그림 3은 플라즈마상태에서 Ponderomotive 힘을 통해 발생하는 항적장 밀도의 분포를 보여준다. 이는 플라즈마 밀도에 있어서 밀한 부분과 소한 부분이 발생하게 되며, 이로 인한 가해진 균등하지 못한 전자기장에 의해 유도되는 힘이 발생한다. 그림 3의 윗부분에 유전체 내부에 전기장 분포를 살펴볼 수 있다. 이는 전자기파의 위상속도를 늦춤으로써, 상대적으로 가속하는 전자빔의 진행속도를 빠르게 할 수 있는 환경을 조성함으로써, 체렌코프방사를 유도할 수 있다. 이 때 동작 주파수의 발전 모드는 유전체의 구조와 두께에 의존한다.

III. 전산모사 결과

앞 절의 이론적인 모델링과 수치해석분석을 통한 설계를 기반으로 다음과 같은 전산모사 결과를 얻었다.

그림 4를 통하여 유전체 표면에 surface mode가 발생하여 전자빔과 전자기파가 상호 작용하여 발전 주파수 공진모드가 발생함을 알 수 있다. 그림 5와 그림 6을 통하여

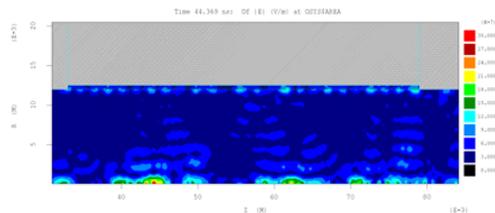


그림 4. 전기장 값과 분포
Fig. 4. Electric field distribution.

모드경쟁이 없는 오직 TM_{01} 만 발전하여 0.1 THz의 0.3 GW급의 고출력 전자파를 발생하는 것을 확인하였다.

위의 전산모사 결과를 바탕으로 다른 전문가 그룹의 관련 분야의 연구 자료들과 비교를 하여 표 1과 같이 정리를 하였다.

표 1에서 다른 연구 그룹의 연구결과와 비교하여 특별한 차별성을 언급하면 다음과 같다. 이는 대구경 구조($D/\lambda=8$)의 고리모양의 전자빔(hollow e-beam)으로 회로 내에 0.1 THz의 단일 주파수로만 발전하여 모드 경쟁 현상이 없고, 회로 내의 전기장 값이 매우 커서 출력 파워를 기가와트(GW)급까지 올릴 수 있다는 것이다.

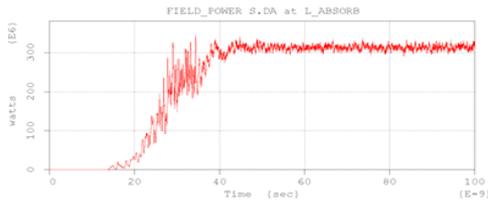


그림 5. 출력 파워
Fig. 5. Output power.

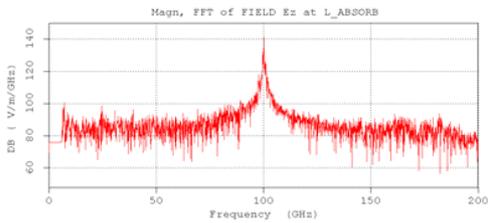


그림 6. 동작주파수
Fig. 6. FFT(operating frequency).

표 1. 항적장 가속기반 고출력 THz 소자 사양 비교
Table 1. Comparison of specifications of high-power THz device based on the wake-field acceleration.

회로형태	사양	특징	비고
Fundamental mode, solid e-beam	0.367 THz, 150 kW, 60 ps	Mode competition	Ref. [1]
Fundamental mode, solid e-beam	7.8 GHz, 14.1 GHz, 16 MeV/m	Tunable	Ref. [2]
Fundamental mode, sheet e-beam	0.17 THz, 0.5 THz, 0.843 THz, 60 MeV	Slab-symmetric, mode competition	Ref. [3]
Fundamental mode, solid e-beam	0.422 THz, 1.27 THz, 1.347 GeV/m	Mode competition	Ref. [4]
Oversized mode, annular e-beam	0.1 THz, 0.3 GW, 20 ns, 3.2 GeV/m	$D/\lambda=8$, overmoded w/o mode competition	본 논문

IV. 결 론

고출력 테라헤르츠파 주파수 대역의 진공소자 크기의 한계를 극복하기 위해, overmoded 대구경 구조의 인위적인 유전체를 사용하여 ponderomotive 힘 발생과 결맞는(coherent) 체렌코프방사를 유도하는 플라즈마 항적장 가속기 기반 회로 설계를 하였다. 전압과 빔 전류가 500 kV-5 kA($\gamma=2$, $\beta=0.87c$)인 상대론적인 전자빔의 영역에서 모드(mode)가 TM_{01} 이고, 0.1 THz의 0.3 GW급의 고출력 테라헤르츠파 주파수 대역의 전자파 발생하는 것을 전산모사를 통해 확인하는데 성공하였다. 앞으로 회로 제작 및 응용 실험 연구가 가능하다.

References

- [1] A. M. Cook, R. Tikhoplav, S. Y. Tochitsky, G. Travish, O. B. Williams, and J. B. Rosenzweig, "Observation of narrow-band terahertz coherent Cherenkov radiation from a cylindrical dielectric-lined waveguide," *Physical Review Letters*, vol. 103, p. 095003, Aug. 2009.
- [2] C. Jing, A. Kanareykin, J. G. Power, M. Conde, W. Liu, and S. Antipov, et al., "Experimental demonstration of wakefield acceleration in a tunable dielectric loaded accelerating structure," *Physical Review Letters*, vol. 106, p. 164802, Apr. 2011.
- [3] G. Andonian, D. Stratakis, M. Babzien, S. Barber, M. Fedurin, and E. Hemsing, et al., "Dielectric wakefield acceleration of a relativistic electron beam in a slab-symmetric dielectric lined waveguide," *Physical Review Letters*, vol. 108, p. 244801, Jun. 2012.
- [4] B. D. O'Shea, G. Andonian, S. K. Barber, K. L. Fitzmorris, S. Hakimi, and J. Harrison, et al., "Observation of acceleration and deceleration in gigaelectron-volt-per-metre gradient dielectric wakefield accelerators," *Nature Communications*, vol. 7, p. 12763, Sep. 2016.
- [5] S. H. Min, O. Kwon, M. Sattarov, H. Jung, I. K. Baek, and S. Kim, et al., "Effects on electronics exposed to high-power microwaves on the basis of a relativistic backward-wave oscillator operating on the X-band," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 31, no. 17, pp. 1875-1901, Jul. 2017.