

<https://doi.org/10.22643/JRMP.2020.6.2.102>

# Study on terahertz (THz) photoconversion technology based on hyperfine energy-level splitting of Positronium (Ps) generated from relativistic electron beams

Sun-Hong Min<sup>1\*</sup>, Chawon Park<sup>1</sup>, Ilsung Cho<sup>1</sup>, Minho Kim<sup>1</sup>, Sukhwal Ma<sup>1</sup>, Won Taek Hwang<sup>1</sup>, Kyeong Min Kim<sup>1</sup>, Seungwoo Park<sup>1</sup>, Min Young Lee<sup>1</sup>, Eun Ju Kim<sup>1</sup>, Kyo Chul Lee<sup>1</sup>, Yong Jin Lee<sup>1</sup>, and Bong Hwan Hong<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Radiological & Medical Sciences, Seoul, Korea

## ABSTRACT

In the state of Positronium (Ps), which is an unstable material created by the temporary combination of electrons and positrons, the imaging technology through photo-conversion methodology is emerging as a new research theme under resonance conditions through terahertz electromagnetic waves. Normally, Positronium can be observed in the positron emission computed tomography (PET) process when an unstable, separate state that remains after the pair annihilation of an electron and a positron remains. In this study, terahertz (THz) waves and Cherenkov radiation (CR) are generated using the principle of ponderomotive force in the plasma wake-field acceleration, and electrons and positrons are simultaneously generated by using a relativistic electron beam without using a PET device. We confirm the possibility of Positronium photoconversion technology in terahertz electromagnetic resonance conditions through experimental studies that generate an unstable state. Here, a relativistic electron beam (REB) energy of 0.5 MeV ( $\gamma=2$ ) was used, and the terahertz wave frequencies is G-band. Meanwhile, a THz wave mode converting three-stepped axicon lens was used to apply the photoconversion technology. Through this, light emission in the form of a luminescence-converted Bessel beam can be verified. In the future, it can be used complementarily with PET in nuclear medicine in the field of medical imaging.

**Key Word:** Positronium (Ps), photo-conversion technology, terahertz (THz) waves, axicon lens, Bessel beam, relativistic electron beam (REB)

## Introduction

일반적으로 양전자 방출 단층촬영(PET, Positron Emission Tomography)에서 방출된 양전자(Positron,  $e^+$ )는 근처의 전자(Electron,  $e^-$ )와 쌍소멸(Pair Annihilation)하면서 전자의 정지 질량에 해당하는 에너지(511 keV)의 광자(감마선, gamma-ray) 두 개를 생성한다. 하지만, 이 때 쌍소멸(Pair Annihilation)은 60%만 되고(일반적인 PET 영상에서 양전자 소멸의 최대 약 40%가 중간 상태에서 준

안정성 양전자를 형성한다.), 나머지는 양전자와 전자의 일시적 결합으로 만들어지는 불안정한 물질인 포지트로늄(Positronium, Ps) 상태가 된다. 포지트로늄은 양전자와 전자가 결합하여 생기는 준안정의 원자로, 양전자가 물질 속을 통과할 때 구성 원자로부터 전자를 빼앗아 생성된다. 수소 원자의 양성자 대신에 양전자가 들어간 것이고 질량수 0인 수소의 동위 원소와 같은 것이다. 그러나 전자의 환산 질량은 보통의 전자 질량의 1/2이 되기 때문에 보어(Bohr) 반지름은 수소의 2배가 된다. 전자와 양전자의 불안정한 공존 상

Received: December 17, 2020 / Revised: December 24, 2020 / Accepted: December 29, 2020

**Corresponding Author :** Sun-Hong Min, and Bong Hwan Hong, Medical Accelerator Research Team, Division of Applied RI, Korea Institute of Radiological & Medical Sciences, 75 Nowonro, Nowon-gu, Seoul 01812, South Korea, E-mail: msh103@kirams.re.kr, burnn@kirams.re.kr

Copyright©2020 The Korean Society of Radiopharmaceuticals and Molecular Probes

태인 포지트로늄은 정밀 결합 상태 양자전기역학(Quantum Electro-Dynamics; QED) 분야에 연구하기에 좋은 모델이 기도하다. 양전자와 전자는 가장 가벼운 하드론(Hadron)과 뮤온(Muon)보다 훨씬 가볍고, 강력한 상호 작용에 의한 기여와 가상 뮤온의 기여는 실험의 측정 정확도와 비교하여 무시할 수 있다. 포지트로늄에는 전자와 양전자의 스핀이 평행한 오르토포지트로늄(ortho-Positronium; o-Ps)과 역평행인 파라포지트로늄(para-Positronium; p-Ps) 이 있다. 오르토포지트로늄은 평균 수명이 약  $10^{-7}$ 초로 소멸하여 3개의  $\gamma$ 선이 된다. 파라포지트로늄은 수명이 짧고(약  $10^{-10}$ sec) 소멸하여 2개의  $\gamma$ 선이 된다(1-5).

생체 내에서 포지트로늄 상태에서는 신진대사 반응에 민감하며, 질병 진행 정도에 대한 진행 정보를 제공할 수 있는 잠재성이 있는데, 생체 분자 내에서는 복합적인 신진대사와 반응이 발생하여, 양전자의 평균 수명 및 형성 확률은 물질의 건강, 나노 구조 및 생물 활성 분자의 농도에 의존하는 경향이 있다. 이 요인들은 인간 조직의 신진 대사 장애의 발달 단계를 나타낼 수 있다. 따라서 양전자의 붕괴에 대한 분광학적인 이미징 기법에 대한 연구는 의학적 진단에 새로운 입력을 제공할 수 있다. 또한, 암성(Cancerous) 및 건강한 조직에서 포지트로늄 특성을 비교하는 시험 관내 연구는 오르토포지트로늄 평균 수명이 암 세포에서 대사 장애의 발달 등급과 상관관계가 있음을 시사한다. 이 상관관계를 보다 정확하게 정량화하기 위해 샘플 및 암 유형에 대한 조사가 필수적이다. 이러한 상관관계에 대한 하나의 주요 가설은 대부분의 암에서 정상 조직 농도와는 다른 산소 농도(저산소증, Hypoxia)와의 연관성이 있다고 예측하고 있다. 이러한 가설들을 실험적으로 증명할 필요가 있다(6-9).

진단 영상 의학의 가장 큰 이슈 중 하나는 질병의 초기 진단과 원인의 정확한 국소화여부이다. 양전자 방출 단층 촬영은 아직 형태학적 변화로 보이지 않는 발달 초기 단계에서 암을 탐지할 수 있게 함으로써 이러한 문제를 해결할 수 있다. 양전자 방출 단층촬영 진단에서, 환자는 양전자를 방출하는 방사성 동위원소로 표시된 약제를 투여 받는다. 열성의 양전자들은 환자 내부의 전자와 직접 소멸되거나 먼저 분자 사이의 자유 체적 내부에 갇힐 수 있는 준안정 포지트로늄 상태를 형성한다(3, 6-7, 10).

그러나 포지트로늄의 발생은 현재 기술로는 양전자 방출 단층촬영 영상에 기록되거나 사용되지 않았다. 현재, 대사 변

화의 정도를 결정하는데 사용되는 파라미터(Parameter)는 표준화 된 흡수 값이며, 이는 전신 전체의 평균 흡수에 대한 부피 단위로 방사성 의약품의 흡수를 표현한다. 이러한 흡수 값이 높을수록 주어진 조직 영역에서 대사가 방해되고 정상 세포의 손상 발생 확률이 높아진다. 결국은 양전자를 방출하는 방사성 의약품을 이용하여 인체에 대한 생리화학적, 기능적 영상을 3차원으로 얻는 핵의학 영상법인 양전자 방출 단층촬영을 통한 포지트로늄 상태를 만드는 방법이 아닌 다른 방법의 모색이 필요하다(3, 6).

특히, 테라헤르츠(Terahertz; THz) 전자기 공명 발생을 기반으로 광변환 기술 적용을 위한 포지트로늄의 초미세 에너지 준위 갈라짐(Hyperfine splitting of energy-level)을 유도할 수 있다. 이러한 포지트로늄 에너지 준위 상태를 활용하여 붕괴(Decay)하는 동안 포지트로늄의 특성을 테라헤르츠파 발생 기반 분광 기법과 융합하여 유용하게 활용할 수 있다(3, 11-12).

본 논문에서는 진공 내 상대론적인 전자빔을 이용하여, 플라즈마 항적장(Plasma Wake-field) 가속 상태에서 판드로모티브 힘(Ponderomotive Force) 원리를 이용하여 테라헤르츠파 발생 및 체렌코프방사(Cherenkov radiation, CR)가 발생하는 동시에 전자와 양전자가 동시에 발생하는 불안정한 상태를 만드는 실험 연구를 통하여 테라헤르츠 전자기 공명 조건에서 포지트로늄 광변환 기술의 가능성을 확인한다. 상대론적인 전자빔에너지 0.5 MeV ( $\gamma_{\text{relativistic factor}}=2$ )를 사용하였고, 테라헤르츠파 주파수는 G-band (140 ~ 220 GHz) 대역이다. 한편, 광변환 기술 적용을 위하여 테라헤르츠 모드 변환 액시콘 렌즈(THz wave mode converting three-stepped axicon lens)가 사용되었다. 이를 통하여 광변환된 베셀빔(Bessel beam) 형태의 발광을 확인할 수 있다. 향후 의료 영상 분야에서 핵의학 분야의 양전자 방출 단층촬영과 상호 보완적으로 활용이 가능하다(13-27).

이러한 실험 결과는 포지트로늄 상태의 테라헤르츠 광변환 기술로부터의 공명 조건에서 초미세구조 에너지 준위의 갈라지는 현상에 의한 하나의 단층 촬영 시스템에 결합하여 포지트로늄 특성의 생체 내 영상화를 가능하게 하는 새로운 방법이 포함하는 것이 매우 중요하게 될 것으로 내다보고있다.

## Materials and Methods

### 1. The generation technology of Positronium

포지트로늄 상태를 만들기 위해서는 양전자 방출 단층촬영의 경우처럼, 방출된 양전자는 근처의 전자와 쌍소멸 반응이 일어날 때의 중간 상태에서 준 안정성 양전자를 형성하는 조건을 만들어야 한다. 다만, 양전자 방출 단층촬영은 쌍소멸 발생 시, 전자의 정지 질량에 해당하는 에너지(511 KeV)의 광자(감마선) 두 개를 생성하여 발생하는 방사선에 의한 정상 세포의 손상을 야기할 수 있다. 따라서, 다른 방법을 통하여 양전자를 발생하게 하면서 전자와 공존하는 불안정한 상태를 인위적으로 만드는 장치의 연구가 필요하다.

상대론적인 전자빔을 이용하여 플라즈마 항적장 가속(Plasma wake-field acceleration)를 통하여 플라즈마에 가해진 균등하지 못한 전자기장에 의해 유도되는 판드로모티브 힘을 발생하게 한다. 이 때, 전기적 그리고 자기적으로 비균등한 성질은 질량에 대한 전하의 비율 등에 의하여 플라즈마 내 각종 이온들의 편류를 일으킨다. 전기장 혹은 자기장의 비균등성(Amorphous)은 각종 이온들의 평균적 운동을 묘사하는 방정식들 속에 2차 비선형 항들을 만든다. Figure 1에서 플라즈마 항적장 가속에 의한 양전자 발생 원리를 보여준다 (28-29).

Figure 1-(a)에서 전자의 전하 밀도 플라즈마 파는 상대성 하전 입자 전자 뭉침(Bunching)에 의해 여기(Excitation)된다. 이 때 발생하는 판드로모티브 힘에 의해 전기장이 발생하고, 플라즈마 밀도에 따라 유전체(Dielectric material)의 표면 주위에 (-)와 (+)의 부호를 가진 전기장이 번갈아 가며 발생한다. Figure 1-(b)에서 파동의 에너지는 두 번째 뭉침(Witness/trailing beam)에 의해 추출 될 수 있으며, 이 뭉침은 드라이브(Driving beam)의 여파로 유도 되어 전파된다. 후행(Trailing) 입자 뭉침은 메가 전자 볼트(MeV) 이상의 에너지 이득으로 플라즈마에서 가속되고, 이 때의 입자 뭉침은 양전자 다발이 된다. 플라즈마에서 후행 양전자 다발을 가속하는 것은 양전자와 전자에 대해 플라즈마 반응이 비대칭 일 수 있기 때문에 발생한 것이다. 결국은 플라즈마 상태에서 이러한 가속 메커니즘으로 전자와 양전자가 순간적으로 분리되어 항적장 가속 현상이 일어난다. 이러한 원리를 이용하여 가

속하는 전자와 뒤따르는 양전자의 일시적인 불안정한 상태인 포지트로늄 상태를 만들 수가 있다. 이러한 전자와 양전자의 분포는 Figure 1-(c)와 같이 전기장의 분포가 주기적으로 나타나면서, 주기적으로 포지트로늄 상태가 발생할 수 있다. 이 때, 상대론적인 전자빔의 가속에 의해 유전체 물질을 통해서 발생하는 전자기파보다 전자빔이 더 빠르게 진행되는 체렌코프 방사가 발생한다.

Figure 1에서 언급한 원리를 기반으로 Figure 2에서는 실험에 이용할 실제 실험 장치들을 구축하였다. 상대론적인 전자빔을 발생할 수 있는 대전류 펄스형 정전형 가속장치인 막스 발전기(Marx generator)와 응집된 결맞는(Coherent) 상태로 원활한 상태로 상대론적인 전자빔이 가속할 수 있도록 Blumlein pulse forming line과 펄스형 전자석 발생 장치 시스템을 구성하였다. 이러한 시스템을 플라즈마 항적장 가속

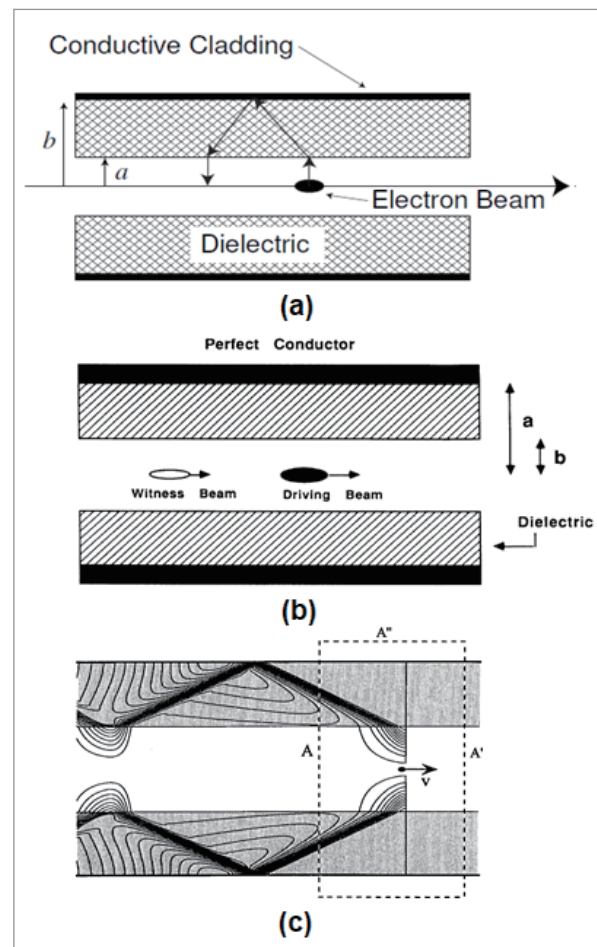


Figure 1. Principle of positron generation from plasma wake-field acceleration; (a) relativistic electron beam acceleration, (b) the generation of bunched witness (trailing) beam induced from dielectric material, (c) the electric field distribution in dielectric material meaning Cherenkov radiation

장치라고 한다. Figure 2에서는 강력한 테라헤르츠 전자기파를 발생할 수 있는 유전체를 사용하였고, 재질은 폴리카보나이트(Polycarbonate)를 사용하였다. 테라헤르츠 주파수는 0.1 THz ~ 0.3 THz의 범위에서 동작할 수 있도록 설계를 하였다(25). 또한, 반도체 소자의 pMOSFET을 사용하여 양전자와 전자의 반응으로 불안정한 상태로 발생한 포지트로늄 상태를 감마선으로 검출할 수 있는 측정 시스템도 설계와 제작을 하여 실험에 사용되었다(26~27).

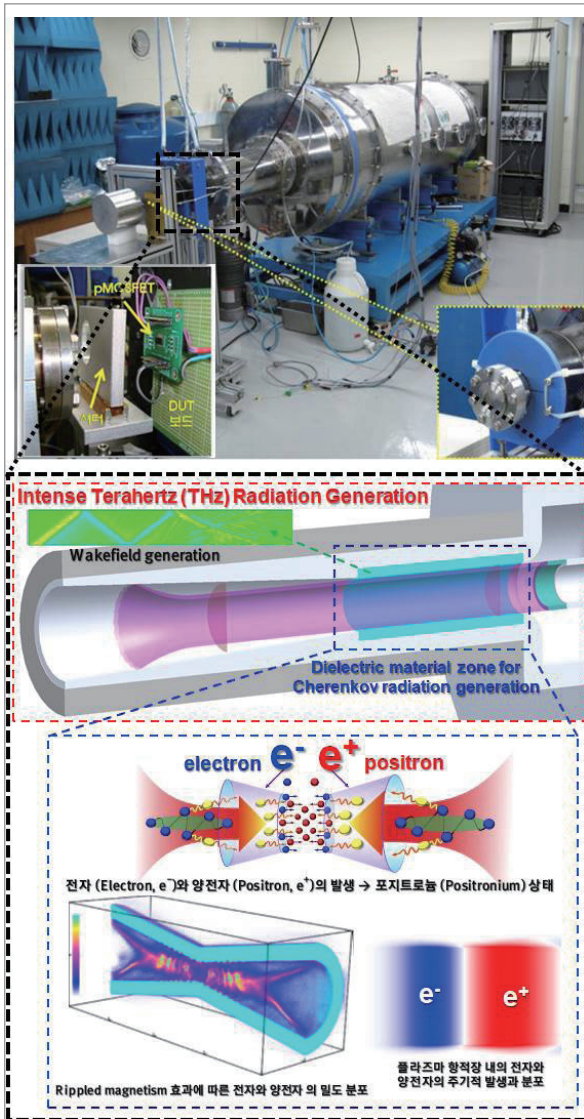


Figure 2. Experimental setup for Positronium (Ps) generation with the arrangement of gamma-ray detector using semiconductor components

## 2. Terahertz (THz) photoconversion technology

앞에서 언급 하였던 것처럼, 플라즈마 항적장 가속장치는 3가지의 물리 현상을 보여줄 수 있는 다재다능함을 가지고 있다. (1) 양전자-전자 뭉침 시스템 발생으로 인한 일시적 포지트로늄 상태 유도, (2) 유전체 설계와 제작을 통한 상대론적인 전자빔 발생 기반 고효율 테라헤르츠파 발생원, (3) 테라헤르츠파 발생 체렌코프 방사를 통한 광변환(Photoconversion) 기술 적용 등이다.

Figure 3은 포지트로늄의 광학적인 특징을 그림으로 나타낸 것으로, 공명 주파수를 조건을 만들어 주면 에너지를 방출하여 광변환하게 되어 발광하게 되어 영상화가 가능하다. Figure 3-(a)는 외부에서 전자기파 공명조건을 걸어주면 오르토-포지트로늄에서 파라-포지트로늄으로 전이유도 하면서 에너지를 방출하여 발광하는 상태로 된다는 것을 보

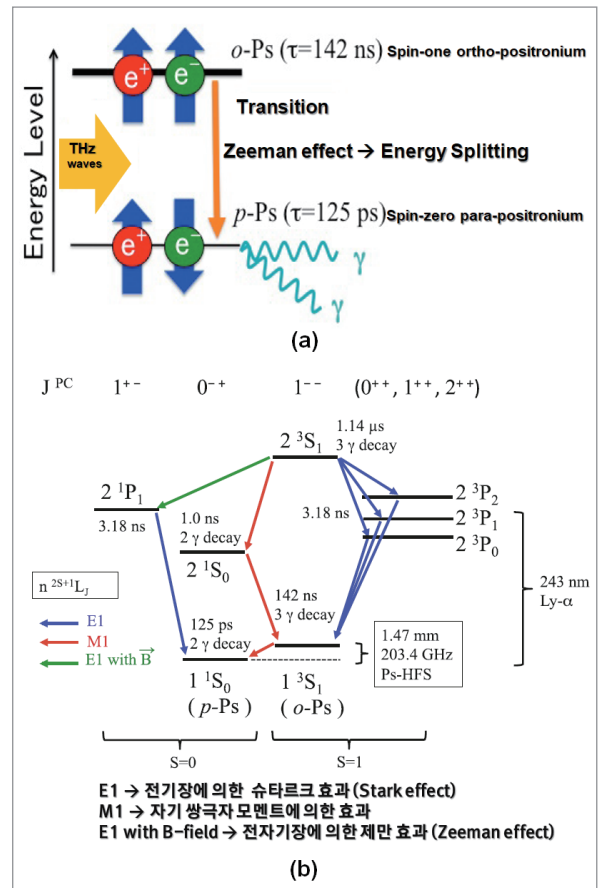


Figure 3. Optical property of Positronium; (a) the hyperfine splitting of Positronium under resonance, (b) Schematic diagram of Positronium's ground state and excited state energy levels

여준다. 이는 제만효과(Zeeman effect)에 의한 에너지 준위의 갈라짐에 대한 공명 효과와 원리가 비슷하다. Figure 3-(b)는 포지트로늄의 에너지 준위 구조보다 상세히 보여준다.  $L = 1$  상태는 불안정하고 리만- $\alpha$ 광자 (243 nm; Lyman- $\alpha$  photon)를 방출한다. 바닥상태(Ground state)에서의 자기 쌍극자 (M1) 전이가 가능하다. 바닥 상태와 관련된 스핀 상태에는  $1^3S_1$  상태 (트리플렛; triplet)와  $1^1S_0$  상태 (단일; singlet)가 있다. 삼중항스핀상태에서 발견될 때 포지트로늄은 오르토-포지트로늄이고 일중항상태에서 발견될 때 파라-포지트로늄이 된다. 스핀-스핀 상호 작용의 결과로, 최저 o-Ps 상태의 에너지 준위(Level)는 초미세 구조(Hyperfine Structure; HFS) 간격에 의해 해당 p-Ps 상태보다 분광학적인 관계에서 공진 주파수 또는 이와 이와 연관된 파장의 크기만큼 더 높다. 다시 말하면, Figure 3-(b)의 o-Ps에서 p-Ps로의 에너지 준위 전이(Transition)에 대한 공진 주파수는 203.4GHz으로, 즉 수소원자(H-HFS)의 140배가 된다. 203GHz은 테라헤르츠파-밀리미터파 주파수 대역 (0.1 ~ 10 THz)에 속해 있다. 이 주파수 대역에서 테라헤르츠파 광변환 기술과 접목하면, 양전자 방출 단층 촬영 시 양

전자-전자 쌍소멸( $2\gamma$ 발생) 감마선에 의한 방사선 피복 영향을 줄일 수 있고, 포지트로늄의 불안정한 준입자의 상태를 보다 더 지속할 수 있으며, 테라헤르츠파 주파수 대역의 에너지 준위만큼의 공진효과와 더불어 영상화에 의한 정밀 진단이 가능한 잠재성을 가지고 있다. 기존의 양전자 방출 단층촬영에 의한 발생하는 감마선의 수명 시간에 의존하는 영상화 구현 시간은 40 피코초(ps)로 대단히 짧지만, 본 논문에서 제안하는 새로운 기술을 적용하면 포지트로늄의 수명 시간이 수십 ns ~ 수백 ns의 수준으로 40 ps 보다 훨씬 긴 영상 시간을 확보할 수 있다. 양전자 소멸 수명 분광법에 의하여 포지트로늄의 수명 시간을 측정함으로써 영상 시간을 보다 더 길게 확보하면 단계 별로 각각의 픽셀의 형광 수명 시간에 대한 정보를 담을 수 있다. (Figure 11에서 모두 5단계의 과정을 걸쳐서 포지트로늄 상태가 변화하는 실험 결과를 참고한다.) 이렇게 영상화 된 결과물은 기존에 그래프나 스펙트럼으로 얻던 결과물에 비해 생체 내의 나노 물성을 보다 쉽게 이해하는데 도움을 준다.

테라헤르츠파 광변환 기술 적용을 위해 Figure 4와 같이 액시콘 렌즈를 사용한다. 액시콘 렌즈는 볼록하거나 오목할

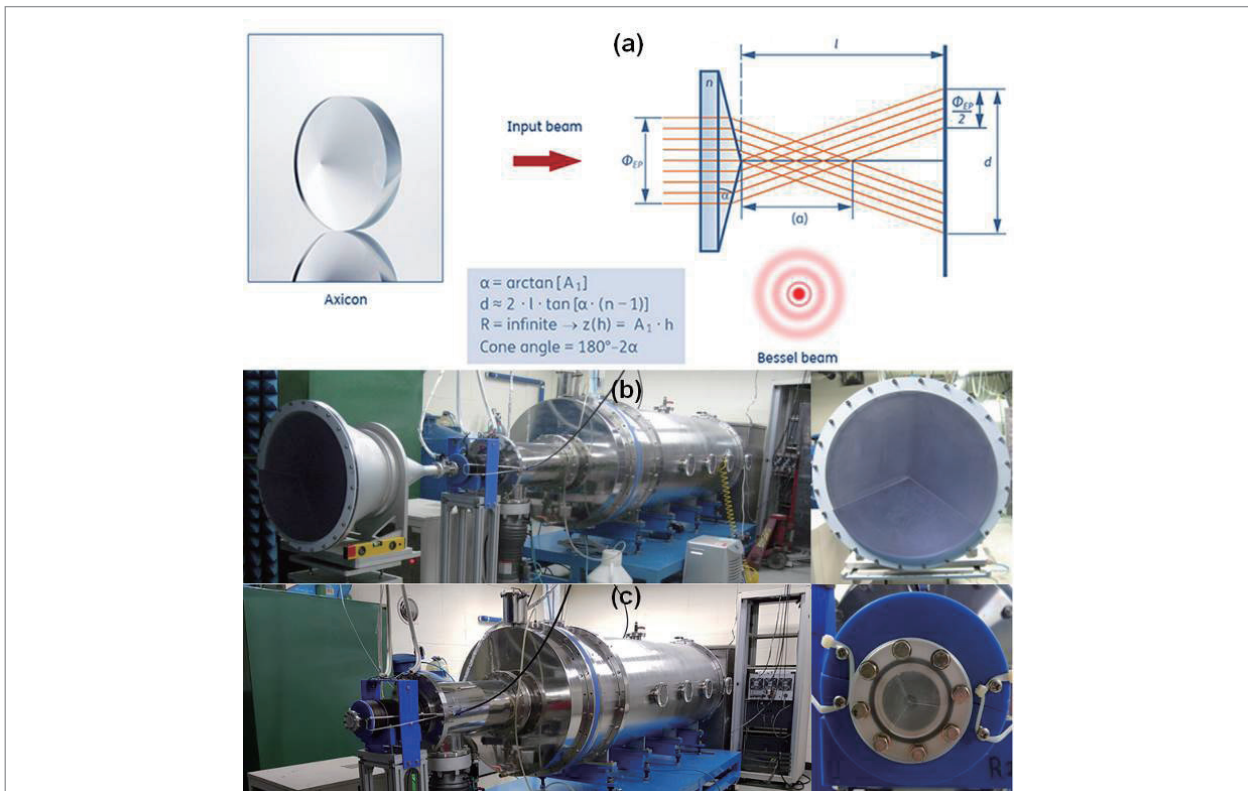
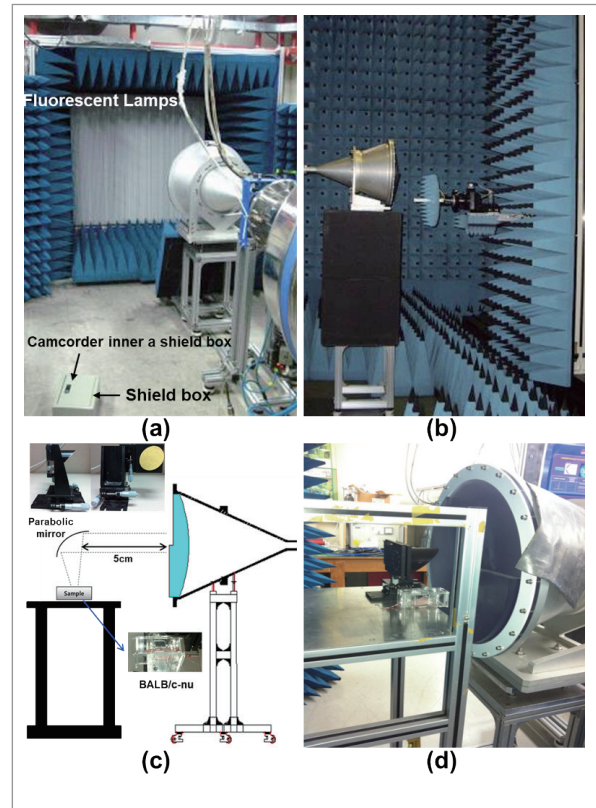


Figure 4. Axicon lens: (a) principle of axicon lens (27), (b) broadband axicon lens (10GHz~0.3THz), (c) narrow band axicon lens (0.2THz ±10%) (30-32)

수 있으며 광학 분야에서 널리 사용된다(32). 볼록 또는 오목 렌즈 등과의 조합으로 다양한 빔 패턴을 생성 할 수 있다. 고리모양의 빔(Annular beam) 또는 가우스 빔(Gauss bema)을 비회절(Non-diffraction) 베셀빔으로 바꾸는 데 사용할 수 있다. 또한 전자기파에서 TM 모드를 TE 모드로 변환하는 모드 변환 안테나 기능도 동시에 한다(31-33). 이와 같이 테라헤르츠 전자기파 공명 조건(203.4GHz)에서 포지트로늄의 에너지 방출을 통하여 광변환 모드로 발광하여 엑시콘 렌즈를 통하여 공기중으로 방사를 할 수 있다. 또한 표적화가 가능하여 원하는 동물이나 사물에 포지트로늄 노출 조건을 만들 수 있다. 여기에서는 안테나 이득(28 dBi)을 최대화하고 모든 변환으로 발생하는 베셀 빔의 분포를 가운데 정중앙에서 90%이상 발광이 가능하도록 3단계의 위상차를 가지는 엑시콘 렌즈 형태로 설계 및 제작을 하였다.

### 3. Luminescence induction for the targeted sample (in vivo)

앞서 1과 2에서 언급한 사실들을 바탕으로, 실제 실험을 수행하기 위하여 Figure 5와 같이 구성하였다. Figure 5-(a)는 엑시콘 렌즈를 통하여 발광하는 포지트로늄의 분포를 확인하기 위해 형광등을 50개 설치 하였다. 형광등은 가로방향(Transverse direction)성분과 세로방향(Longitudinal direction)으로 각각 편광하는 특성이 있어서, 배열을 가로축 중심과 세로축 중심으로 이원화 하여 형광등을 구성하였다 (보기 그림은 세로축을 중심으로 구성한 사진). 이를 통하여 x-y 2차원적으로 발생하는 포지트로늄의 발광 분포를 통하여 광변환 된 것을 확인 할 수 있다. 또한, 전기장의 세기의 합은 x와 y 성분의 각각의 제곱의 합의 제곱근 형태로 표현하기 때문에, 정확한 베셀빔의 분포를 알기 위하여 스텝 모터(Stepped motor)를 사용하여 3차원적으로 조절이 가능한 광변환 패턴 발생 모니터를 이용하여 측정하였다 (Figure 5-(b)). Figure 5-(c)는 in vivo 조건에서 광변환 기술을 활용한 포지트로늄의 생체 내 흡수도 및 분포를 확인하기 위한 실험 준비를 위한 설계 개요도이다. 이 때, 포물 거울 (Parabolic mirror)을 이용하여, 테라헤르츠 광변환된 포지트로늄광파가 손실이 거의 없이 실험용 생쥐에 도달하도록 하였다. 이 때 사용된 것은 누드 쥐(BALB/c nu/nu)로서 발광체를 통하여 영상화가 용이하도록 하였다. 이러한 실험적



**Figure 5.** Experimental arrangement; (a) luminescence pattern (b) Bessel beam scanning, (c) the conceptual design for the targeted sample, (d) photoconversion nonclinical test system (in vivo)

인 구성을 통하여 광변환된 포지트로늄 베셀빔의 분포와 동물 실험을 통하여 생체 내에 흡수된 포지트로늄의 분포를 통하여 광변환이 초미세 에너지준위 갈라짐 기반 테라헤르츠 광변환 기술이 제대로 적용되어 누드 쥐의 영상화 작업이 제대로 되었는지 확인할 수 있다.

## Results and Discussion

### 1. Terahertz (THz) photoconversion technology under the generation of Positronium (Ps)

포지트로늄 검출은 직접적으로 측정의 한계점이 있어서, 양전자와 전자가 반응하여 감마선을 방출 할 때의 광전류 (Photo current)를 측정하는 것으로 검출 시스템을 구성한

다. 발생하는 포지트로늄의 단일펄스를 조사하기 위해 서터를 제작하여 상대론적인 전자빔 출력 트리거 신호에 맞춰 서터를 열어 조사할 수 있도록 하였다. 또한 조사 시설 내에는 THz Generator로 인한 잡음 신호가 크기 때문에 정확한 광전류 측정을 위해 신호처리 회로를 추가하였다. 출력 신호는 조사실 외부로 저잡음 케이블을 연결하여 디지털 오실로스코프(Oscilloscope)로 측정한다.

Figure 6-(a)는 감마선 검출장치 내부에 DUT(Device Under Test)가 장착된 모습과 외부에서 출력 신호를 측정하는 과정을 보여주고 있다(Figure 2의 DUT위치 참조). 반도체 소자레벨에서의 과도방사선효과 분석을 위해, 자체적으로 설정한 공정 및 구조변수로 단일 pMOSFET 소자가 이 실험에 사용된 것이다. 이와 동시에 변수 설정값에 기반하여 반도체 공정시뮬레이터를 통해 모델링과 시뮬레이션(PSPICE 16.2Lite ver.)을 수행하였다. 실측 시험에서 pMOSFET 사용은, 포지트로늄 발생으로부터의 검출되는 감마선은 실리콘 매질 입사시 전리화(Ionizing)를 일으키는 원리를 이용한 것

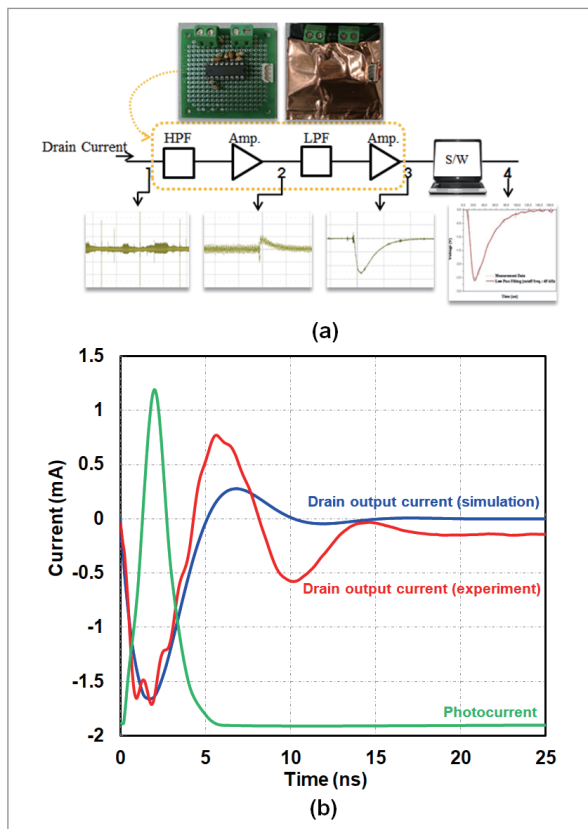


Figure 6. Detection for Positronium (Ps); (a) photocurrent measurement process by noise canceling circuit (b) comparison of current results

이다. Figure 6-(b)는 pMOSFET기반 감마선 검출기를 이용한 포지트로늄 펄스 검출 시험 결과를 보여준다. 하이패스필터(HPF)-증폭기-로우패스필터(LPF)-증폭기의 논리 회로 연산 과정을 통하여 얻은 드레인 전류의 파형을 실험적인 결과로 나타낸다(빨간색 선). 또한 시뮬레이션 결과에서 입력펄스에 대한 드레인 출력전류 파형만을 추출하여 보여주고 있는데 이는 Figure 6-(b)에서 파란색 선으로 표시를 하였다. 실험의 결과와 시뮬레이션 예상치의 두 펄스의 파형이 유사한 형태를 띠고 있음을 확인할 수 있다. 두 출력 신호는 서로 유사한 형태를 보였고, 이 결과를 통해 펄스입력 방사선 신호에 대한 pMOSFET 소자의 전반적인 모델링 및 시뮬레이션이 정확하게 수행되었음을 확인할 수 있었다. 이와 동시에 광전류의 검출을 통한 펄스 파형 측정도 수행하였다(Figure 6-(b)의 녹색 선). 이는 pMOSFET을 통한 포지트로늄 펄스 발생시 광검출을 할 수 있는 반도체 소자에 반응하여 유도된 전류를 측정하는 원리에 기반하여 포지트로늄 펄스가 제대로 검출하는지 확인을 한 것이다.

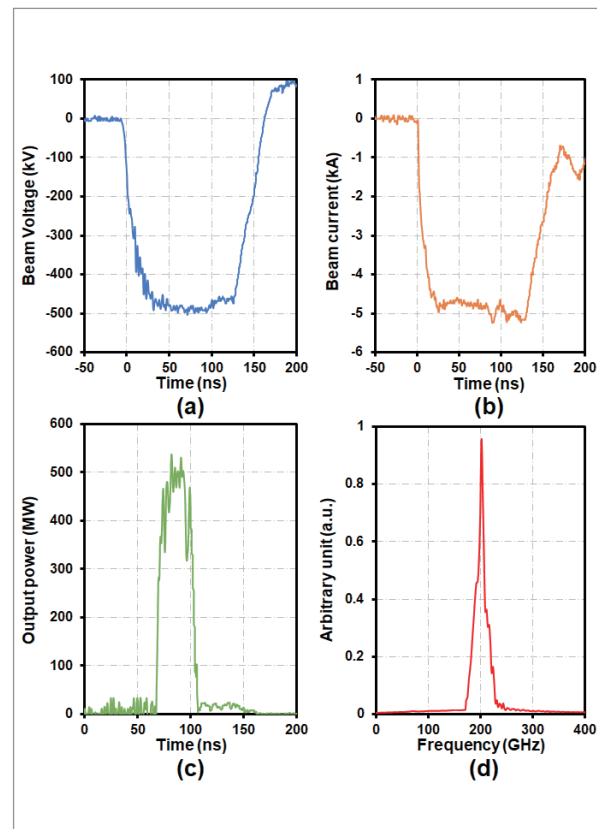
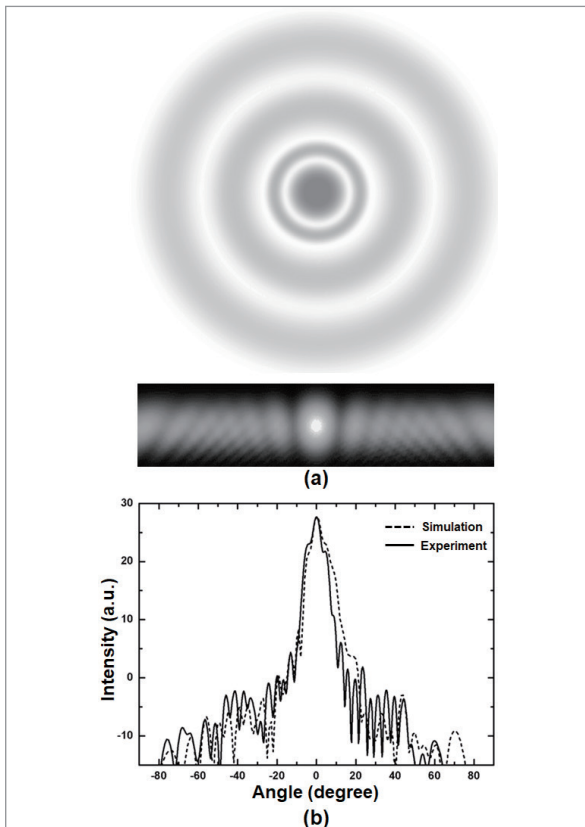


Figure 7. Measured parameters in the plasma wake-field accelerator; (a) beam voltage, (b) beam current, (c) Output power, (d) Frequency (Fast Fourier Transform, FFT)

플라즈마 항적장 가속장치에서 발생하는 상대론적인 전자빔의 물리량을 측정하는 실험 결과는 Figure 7에서 보여준다. Figure 7-(a)는 상대론적인 전자빔의 전류를 시간에 따라 나타낸다. 빔 전압은 Capacitive voltage probe라는 측정장치를 이용하여 kV ~ MV급의 펄스형 고전압을 측정한다. 이는 전도체(Conductor)의 정전유도결합(Capacitive-coupling)이 발생하는 원리를 통하여 저항기와 축전기로 구성된 측정소자이다. RC특성시간( $\sim 100 \mu\text{s}$ )이 측정하고자 하는 펄스의 길이( $\sim 100 \text{ ns}$ )보다 많이 커야 RC적분기(Integrator)없이 바로 측정이 가능하다. 실험에서는 전자빔의 가속전압은 0.5MV로 측정 되었고 이는 상대론적인 전자빔의 가속에너지가 0.5MeV이라는 것을 의미한다. 이 때 상대론적인 전자빔의 속도는 광속도의 87%정도이고 gamma-factor는 2정도이다. 상대론적인 전자빔의 위상속도(Phase velocity)가 저속파구조(Slow wave structure)의 기능을 가지고 있는 유전체를 통해 발생하는 전자기파보다 빠르게 되어서 체렌코프방사가 발생한다. Figure 7-(b)는 빔전류를

측정한 실험결과로서 플라즈마 항적장 가속기 내의 공간한계전류(Space charge limited current) 내에서 공간 다이오드 임피던스(Diode impedance)가  $100\Omega$ 의 값을 가지고 상대론적인 전자빔이 진행된다는 것을 알 수 있다. 이 때 빔 전류는 패러데이(Faraday) 법칙을 이용한 B-dot probe와 Rogowski coil을 사용하였다. 7-(c)는 플라즈마 항적장 가속기를 통하여 발생하는 상대론적인 전자빔 발생 조건에서의 테라헤르츠 전자기파의 출력 파워(Output power)를 도파관형(Waveguide) RF coupler를 통해서 측정한 결과를 보여준다. 측정할 테라헤르츠파 파워의 RF coupler의 slot 크기는 G-band 대역에서의 1/4파장 크기로 정하였고, 커플링(Coupling) 반응을 통해 주파수 모드는 TE 모드(mode)를 기본으로 측정하였다. 고출력 테라헤르츠 주파수(G-band) 측정 시스템은 신호발생기(Signal generator), 스펙트럼 분석기(Spectrum analyzer), 하모닉 믹서(Harmonic mixer), 능동 주파수 체배기(Active frequency multipliers)와 기타 도파관 구성품(Waveguide components)등의 상용 구성품을 바탕으로 Double-heterodyne 방법을 사용하였다. 출력 파워는 0.5GW로 측정되었다. Figure 7-(d)는 Figure 7-(c)의 출력 파워(Output power) 측정 시 하모닉 믹서(Harmonic mixer)에 분배기(Divider)를 연결하고 파워 측정기(Power meter)를 추가로 연결하여 테라헤르츠파의 주파수를 측정하였다. 오실로스코프에서 발생한 신호를 바탕으로 Fast Fourier Transform (FFT)를 하면 테라헤르츠파의 동작 주파수 값을 알 수 있다. Figure 7-(d)에서 동작 주파수는 0.2THz정도로 측정 되어, 테라헤르츠 전자기파 공명 조건(203.4GHz)에서 포지트로늄의 에너지 방출을 통하여 광변환 모드로 발광하여 엑시콘 렌즈를 통하여 공기중으로 방사(Radiation)을 할 수 있는 조건을 만들 수 있다는 것을 실험을 통하여 확인하였다.

Figure 8은 엑시콘 렌즈를 이용하여 테라헤르츠파 전자기 공명 조건에서 광변환된 포지트로늄의 베셀 빔 방사 패턴을 보여준다. 실험 측정에는 Figure 5-(a)와 Figure 5-(b)를 참고한다. Figure 8-(a)는 상대론적인 전자빔 기반 플라즈마 항적장 가속기에서의 테라헤르츠파 전자기 공명에 의하여 발생한 포지트로늄의 베셀 빔분포를 2차원 위상 공간(Phase space)으로 나타낸 실험 결과이다. 플라즈마 항적장 가속기에서의 고리모양의 빔 형태가 엑시콘 렌즈를 지나가면서, 베셀 빔의 형태로 공기중에 발광을 한다는 것을 보여준다.



**Figure 8.** Photoconversion of Ps by an axicon lens under THz waves resonance; (a) phase space of Bessel beam (upper) & Bessel beam distribution (lower), (b) intensity of photon-converted Bessel beam



다(위 Figure). Figure 8-(a)의 아래 실험 사진은 발광된 포지트로늄의 베셀 빔분포를 일차원적으로 밝기에 따른 세기로 보기 쉽게 나타내었다. Figure 8-(b)는 방사화된 포지트로늄의 세기 분포를 각도에 따라 나타낸 실험 데이터이다. 시뮬레이션 결과와 비교를 해도 대부분의 영역에서 거의 일치하는 것을 보여준다. 이를 통하여 정중앙에서 광변환되어 발광된 포지트로늄의 세기가 제일 높다는 것을 알 수 있다. 정중앙에서 최대의 밝기(전기장, 에너지) 특성을 지닌 광변환된 포지트로늄의 방사 패턴을 통하여 원하는 표적물에 조사 또는 노출할 수 있다.

## 2. Radiated Positronium (Ps) for the targeted sample in vivo

포지트로늄의 수명 시간은 양전자 소멸 수명 분광법 (Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy; PALS)을 이용한다. PALS를 사용하여 생물학적 시료의 구조적 변형과 미세 환경 변화를 조사하는 이점은 PALS가 비파괴적이고 시

료의 구조적 특성을 보존한다는 것이다. 특히, PALS는 키토산, 이중층 간기(에멀전, 리포좀 및 미셀 시스템)와 같은 생물학적 고분자 시스템 또는 생체막과 같은 것을 조립 생체 모방 시스템의 구조적 변화를 테스트 할 수 있다. 특정 막 확산 및 투과성 측면에서 PALS는 약물 전달 시스템에 사용되는 생체 활성 나노 입자의 형성으로 인한 나노 구조 변화에 민감하게 작용한다. 대사 과정에서 살아있는 유기체 내부의 복잡한 생물학적 구조와 분자의 구조적 안정성은 세포 내 수소 결합 상호 작용의 형성에 의해 유지된다. 예를 들어, 탈수 및 재수화 과정은 생체 분자의 무결성을 보존하는 세포 내 탄수화물 유리의 형성에 의해 보존된다. PALS 기술은 분자간 구멍 크기와 활성화 된 물 확산 사이의 상관 관계를 보여주기 위해 무정형 및 결정질 생물 물질 (지금까지 다당류 인 트레할로스(Trehalose)에서 연구 됨)에서 분자간 구멍 크기를 평가할 수 있다(34). 이러한 생물학적 시스템에 대해 PALS는 나노 구조, 생체 활성 분자의 농도 및 나노 미터 및 서브 나노 미터 규모의 차원 공극 공간을 이해하는 데 더 깊은 통찰력을 가질 수 있는 독특한 기회를 제공 할 수 있다. 이것은 나노 스케일에서 물질의 구조에 대한 효과적이고 비파괴적인 연구를 가능하게하는 유일한 기술이며, 양전자-전자가 매질과 상호 작용하는 세부 과정을 추적 할 수 있게 해준다. 이것은 지금까지 양전자 방출 단층 촬영에는 볼 수 없었던 기법이다.

PALS 분광기의 일반적인 설정에는 방사성 양전자 소스 ( $^{22}\text{Na}$ )와 두 개의 신틸레이터 검출기(Scintillator detector)를 사용한다(Figure 9). 검출기 중 하나(Scintillator detector #1)는 양전자 소스에서 양전자와 동시에 방출되는 감마선을 사용하여 Time-tagging units 모듈에 대한 "시작" 신호를 생성한다. 또다른 검출기(Scintillator detector #2)는 샘플에서 소멸 과정에 의해 방출되는 감마선을 검출하도록 배열한다. 그리고 결과 히스토그램(Histogram)을 분석하여 평균 양전자 또는 양전자 수명을 추출 할 수 있다.

Figure 9의 PALS 기본 개요도를 바탕으로 Figure 10처럼 in vivo 실험조건에서 PALS 시스템을 구성하였다. 본 실험 시스템 구성을 통하여 포지트로늄의 수명 시간은 PALS 측정 시스템을 통하여 측정이 가능하다. 이를 통하여 테라헤르츠파 전자기 공명 상태에서 엑시톤 렌즈를 통하여 광변환된 포지트로늄의 검출이 가능하다.

앞에서 언급하였듯이, 양전자를 사용한 나노 구조 물질 분석에 가장 널리 사용되는 방법은 PALS이다. 기본 원리는 측

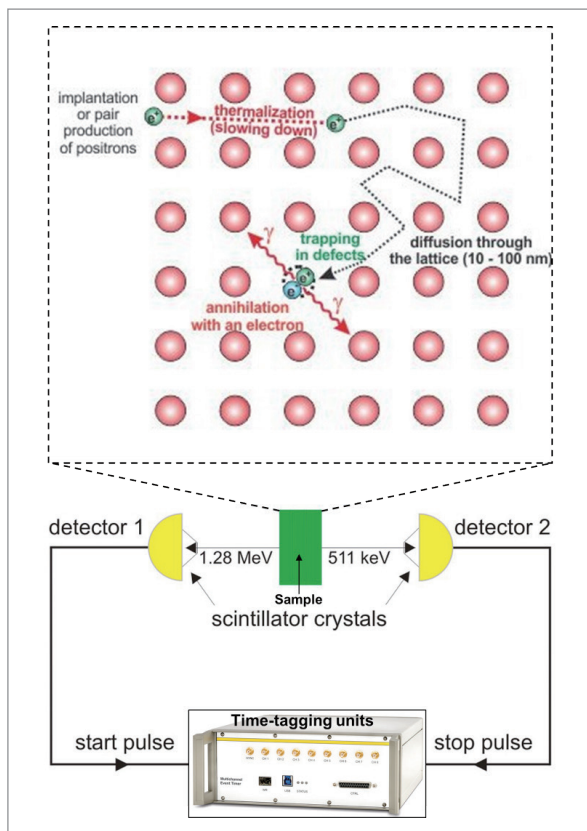
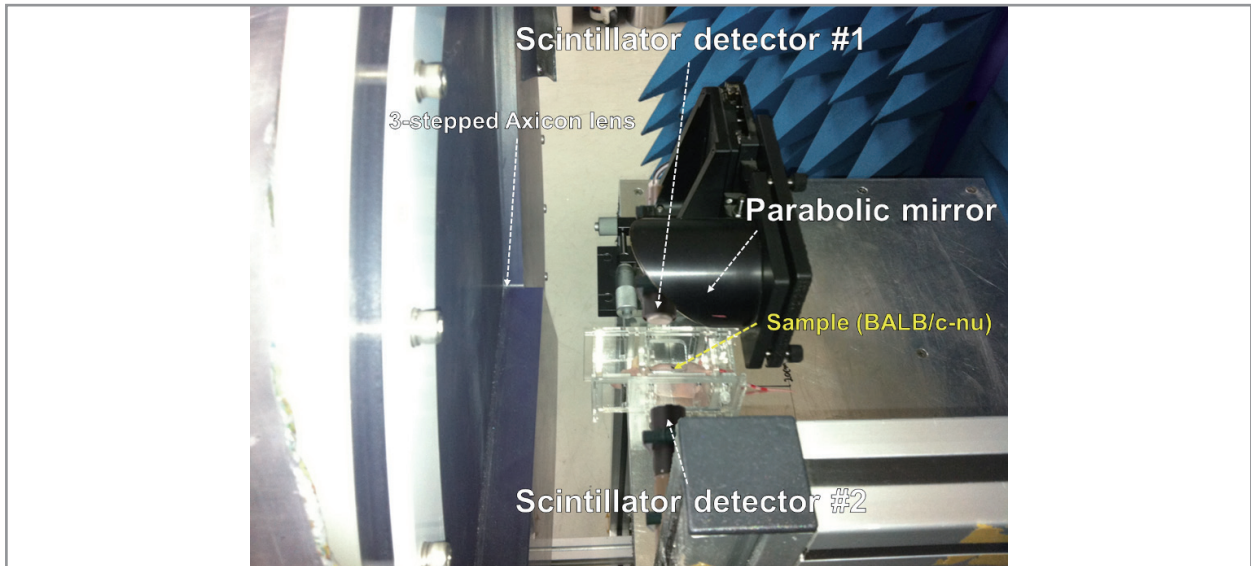


Figure 9. Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy (PALS)

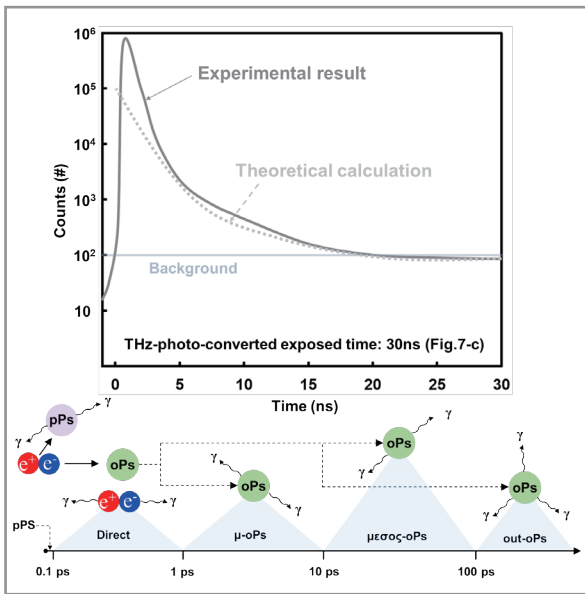


**Figure 10.** Setup of PALS system in vivo (The positron lifetime of a single event can be measured by detecting the time difference between the birth  $\gamma$ -quantum of the  $\beta^+$  decay in the  $^{22}\text{Na}$  source and one of the annihilation  $\gamma$ -quanta of an energy of 511 keV.)

정 시작 시간을 정의하기 위해 연구중인 샘플에 들어가는 양 전자에 태그를 지정하는 것이다. 정지 신호는 양전자가 전자와 함께 소멸 될 때 방출되는 감마선 광자의 검출에 의해 주어지고 Figure 11에 표시된 것과 같이 시간이 따른 소멸되는 양전자의 개수 분포를 보여준다. 양전자 소멸을 담당하는 물리적 메커니즘의 뚜렷한 시간 척도 때문에 이것이 발생한 환경에 대한 정보를 추출 할 수 있다 (Figure 11). . 각 과정에는 특정 수명이 있기 때문에 측정 된 시간 분포는 여러 지수 성분의 합과 100 ps까지의 검출기 분해능과 복잡한 상관 관계가 있다. 다양한 구성 요소의 강도와 수명을 추출하기 위해 피팅(Fitting) 프로그램을 사용할 수 있는 것이 중요하다.

Figure 11의 하단부에서 125ps 시간동안의 가장 짧은 수명은 양전자가 이온화 또는 비탄성 산란을 통한 열화 (에너지 손실) 후 몇 피코 초 내에 반대 스핀을 가진 전자와 결합하여 파라포지트로늄라고 하는 수소와 같은 원자를 형성 할 때 발생한다. 두 번째로 짧은 수명은 물질의 전자와의 직접적인 소멸로 인한 것이며 결합 상태의 형성을 포함하지 않는다. 원자 결합이 있는 경우 양전자 직접 소멸의 수명은 벌크 형태의 양전자 수명과 다르므로 양전자의 농도와 구조적인 결합의 유형을 인식하는 데 사용할 수 있다. 중간 과정에 있는  $\mu$ -oPs (micro-ortho-Positronium)와  $\mu$ eso-oPs (meso-ortho-Positronium)는 각각 10 ps와 100 ps의 수준에서 관찰된다고 볼 수 있다. 관찰된 가장 긴 수명은 100 ps

에서 30 ns까지인, 양전자가 동일한 스핀 방향으로 전자와 결합하여 삼중 항 스핀 상태인 out-오르토포지트로늄(out-oPs)을 형성하고 이는 파라포지트로늄에 비해 수명이 훨씬 길기 때문에 (진공 상태에서 142ns), 공기중에 노출된 오르토포지트로늄는 생체 내에서 전방위적으로 확산 될 수 있다. 여기에서 양전자가 결합 된 위치가 아닌 기공 표면에서 반대 스핀의 전자와의 상호 작용으로 인해 소멸 될 때 소위 픽 오프 효과(Pick-off effect)가 발생할 수 있다. 그 효과는 공극 크기 및 위상배치(Topology)와 관련된 out-오르토포지트로늄의 수명을 단축하게 할 수 있다. 구형(Sphere) 기공의 경우, 이것은 Tao-Eldrup (TE 모델)과 그 직사각형 형태의 확장에 기반하여 입자를 무한 전위 우물로 제한하는 여기 상태를 뜻한다. 따라서 나노 구조 물질 내에서 소멸되는 out-오르토포지트로늄의 수명은 1 ns ~ 142 ns 범위이며, 일반적인 미세 기공의 값은 1 ns ~ 10 ns이고 중간 기공과 관련된 값은 10 ns ~ 100 ns 이다. 고유 한 크기의 기공을 포함하는 생체 분자 내에서 각 구성분자의 크기와 관련된 소멸은 시간에 의존하는 스펙트럼에 지수 함수의 형태로 Figure 11과같이 보여준다. 기공이  $^{22}\text{Na}$ 에서 생성된 양전자가 오르토포지트로늄 발생에서 확산 될 수 있으며 142ns의 특성 수명 (실험이 진공 상태 인 경우)을 가진다. 생체 표면에서 빠져 나가는 out-오르토포지트로늄의 양은 촉매 공정에 영향을 미치는 것으로 밝혀진 기공 구조와의 상관 관계를 추측할 수 있다.



**Figure 11.** Lifetime of Positronium in the air-saturated sample (A semilog histogram of the time lag between the start and stop signals from the air-saturated sample whose slope was fitted with a single-exponential function (theoretical calculation) and a flat background (background) to determine the o-Pos lifetime. The detailed fit range was from 0.1 ns to 100 ps.)

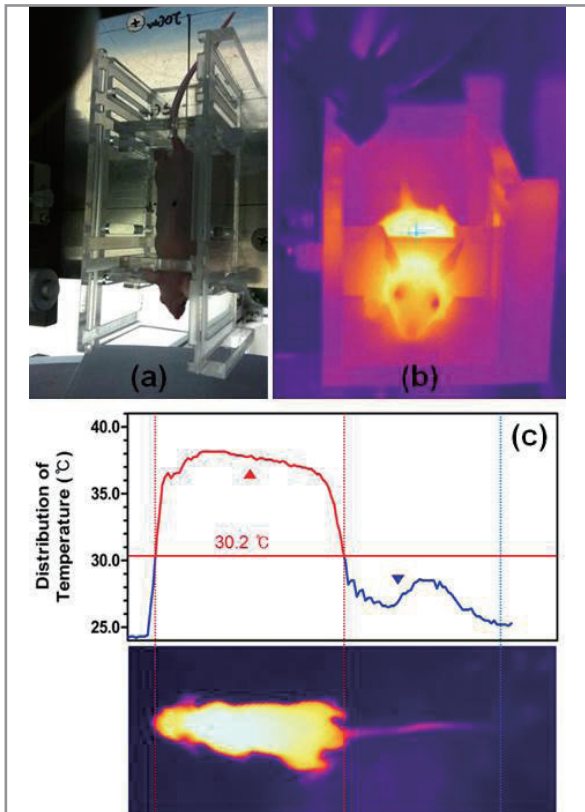
Figure 12는 포지트로늄 상태에 노출된 BALB/c nu/nu의 온도 분포를 보여준다. Figure 12-(a)는 in vivo 실험을 위한 정위치된 샘플을 보여주고 있고, 테라헤르츠파 광변환의 물리화학적 메커니즘을 통하여 포지트로늄 노출 상태에서 샘플을 조사한다. Figure 12-(b)는 포지트로늄에 조사된 샘플의 온도를 측정하기 위하여 열화상카메라(IR camera)를 이용하여 정면 부에서의 스냅샷을 보여준다. 그리고 Figure 12-(c)에서 샘플의 위치에 따른 온도 분포를 보여주고 있다. 그래프에서 포지트로늄 조사 중에 36.5 ~ 38 °C도의 범위에 온도가 분포하고 있다. 샘플인 BALB/c nu/nu의 경우 정상 체온은 36.5 ~ 38 °C도의 범위에 있으므로, 포지트로늄 조사 여부가 샘플의 체온에 별다른 영향을 미치지 않는 것을 보여주고 있다.

## Conclusion

양전자와 전자의 일시적 결합으로 만들어지는 불안정한 물질인 포지트로늄 상태에서 테라헤르츠 전자파를 통한 공명 조건에서 광변환 기술을 통한 영상 기술에 대한 실험 연구를 본 논문에서 언급하였다. 포지트로늄은 PET 과정에서 전자와 양전자의 쌍소멸 후에 남는 불안정한 별도의 상태가 남아 있을 경우에 관찰할 수 있었다.

본 연구에서는 핵의학에서 널리 쓰이는 PET 영상장비를 사용하지 않고, 상대론적인 전자빔을 이용하여 플라즈마 항적장에서 발생하는 판드로모티브힘의 원리를 이용하여 테라헤르츠 전자기파와 체렌코프방사가 발생하는 동시에 전자와 양전자가 동시에 발생하는 불안정한 상태를 만드는 실험 연구를 통하여 테라헤르츠 전자기 공명 조건에서 포지트로늄 광변환 기술의 가능성을 확인하고자 하였다. 여기서, 상대론적인 전자빔에너지 0.5 MeV를 사용하였고, 테라헤르츠파 주파수는 G-band 대역이다. 한편, 광변환 기술 적용을 위하여 테라헤르츠 전자기파의 모드변환 기능을 가진 3단계 액시콘 렌즈를 사용하였다. 이를 통하여 광변환된 베셀 빔형태의 발광을 확인할 수 있었다.

포지트로늄의 수명 시간은 양전자 소멸 수명 분광법을 이용하였다. 여기서 3단계 액시콘 렌즈를 통해서 테라헤르츠파 광변환된 BALB/c nu/nu의 노출 시간은 30 ns의 시간



**Figure 12.** The distribution of temperature exposed to Positronium under THz-photo-converted state: (a) Positioned sample (BALB/c nu/nu) in vivo, (b) IR camera scanning, (c) the distribution of temperature with noting the figures

수준이었고, 조사 기간 동안의 PALS 기법에 의한 데이터 정리 작업을 수행하여 포지트로늄의 수명 시간에 대한 결과를 얻었다. 파라포지트로늄, 전자와의 직접적인 소멸,  $\mu$ -oPs,  $\mu$ εσσσ-oPs, 그리고 out-oPs의 5단계로 테라헤르츠파-광변환된 포지트로늄의 수명 시간을 가진다. 앞의 4단계까지는 125ps의 시간이 걸리고 마지막 out-오르토포지트로늄의 단계에서 최대 조사 시간의 30ns 을 초과한 최대142 ns까지 존재할 수 있는 것으로 분석된다. 노출된 시간이 30 ns이라 할지라도, out-oPs의 마지막 단계에서는 테라헤르츠 광변환 모드로 인하여 out-oPs의 EM (Evanescent-wave mode) 상태의 감쇄 모드로 국소적으로 분포하여 30ns의 시간이 지나서도 특정한 시간 동안 존재한다. 테라헤르츠파의 공진 주파수 영역인 203.4 GHz에서의 광변환된 상황은, 국소적으로 분포된 out-oPs의 경계면으로부터 거리에 의존하는 지수적으로 감쇠하여 실질적으로 에너지를 수반하지 않는 광파라고 해석할 수 있다. 이는 테라헤르츠 전자파 노출과 관련된 물리 현상에서 흔히 볼 수 있는 현상이다. 이는 유전체와 금속의 경계면에 나타나는 전자들의 집단적 진동 현상을 입자로 간주한 준입자처럼 행동하는 표면 플라즈몬(Surface plasmon) 현상에 비유할 수 있으며, 그 자체로 기본 입자는 아니지만 입자와 유사한 행동을 하는 out-oPs의 준안정적 준입자 상태이다.

진단 의학의 가장 큰 과제 중 하나는 질병의 조기 인식과 원인의 정확한 위치 파악이다. PET을 보완한 테라헤르츠파-광변환된 포지트로늄의 연구는 암이 아직 형태학적 변화로 보이지 않는 발달 초기 단계에서 암을 감지 할 수 있도록 하여 이러한 문제를 해결할 것이라고 예상된다. PALS 및 PET 기술을 하나의 단층 촬영 시스템에 결합하여 양전자 특성의 생체 내 이미징을 가능하게하는 새로운 방법인 테라헤르츠파-광변환된 포지트로늄 발생 기술이다. 이와 더불어 PALS는 최근 여러 단계에서 암을 검출하기 위해 나노 미터 이하 규모의 자유 부피 공극의 차이를 조사하는 데 적용되고 있다. 임상 사용에서 PALS와 PET를 결합하는 테라헤르츠파-광변환된 포지트로늄 발생 기술은 위치에 민감한 방식으로 양전자 매개 변수를 결정할 수 있어야하며 살아있는 유기체에 대해 작동하도록 확장되어야 한다. 암 조직과 정상 조직의 포지트로늄의 광변환을 통한 특성을 비교한 in vivo에서 오르토포지트로늄 평균 수명 정도는 암세포의 대사 장애 발생 정도와 상관 관계가 있음을 시사한다. 이 상관 관계를 보다 정확

하게 정량화(Quantification)하기 위해 산소 농도와의 연관성이 있다는 것을 입증하는 것이 앞으로의 연구에 중요하다. 보통, 암세포는 증식과정에서 쉽게 저산소증 상태가 되고, 저산소증 암세포는 산소가 부족한 환경에서 살아남아 악성도가 증가하는 사실을 근거로 한다.

앞으로는 암세포 증식에 따른 악성 정도의 등급을 구분할 수 있는, 체외에서 진행되는 조건(in vitro)에서 성장한 세포 배양을 사용한 실험 연구가 필요할 것이다. 임상적으로 유용한 결론에 도달하려면 포지트로늄 발생 기반 광변환 및 영상화 과정을 통하여 정상 조직과 암 조직의 구분이 가능하도록 다학제적인(Multidisciplinary) 공동 연구 등의 노력이 필요하다. 생체내의 포지트로늄의 축적에 따른 포지트로늄의 수명 시간이 암의 유형에 따라 다른지 여부, 주어진 암 유형에 대한 악성 등급에 의존하는지 여부 등의 생체 활성 분자에 대한 오르토포지트로늄 수명의 의존성이 결정적으로 작용하는지 확인을 하는 실험이 생체 내에서 수행되어야 하며, 포지트로늄 이미징 기능을 갖춘 보다 정밀한 테라헤르츠파 광변환 장치의 개발이 필요하다. 여기서 가장 큰 도전 중 하나는  $^{22}\text{Na}$ 와 같은 실험실에서 일반적으로 사용할 수 있는  $\beta^+$  동위원소에서 방출되는 일반적인 양전자 범위에 해당하는 3차원 오가노이드(Organoid) 및 스페로이드(Spheroids) 시료를 포지트로늄의 테라헤르츠파 전자기 공명을 통한 광변환의 물리적 특성을 기반으로 간편하고 빠른 영상화 분석 방법을 제시할 수 있는지 여부이다.

## Acknowledgments

This study was also supported by a grant of the Korea Institute of Radiological and Medical Sciences (KIRAMS), funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT), Republic of Korea, (No. 50532-2020, 50537-2020)

## Reference

1. Brawley SJ, Armitage S, Beale J, Leslie DE, Williams AI, Laricchia G. Electron-Like Scattering of Positronium. *Science* 2016;330
2. Kaminska D et al. A feasibility study of ortho-positronium decays measurement with the J-PET scanner based on plastic scintillators. *Eur. Phys. J. C* 2016;76:445
3. Miyazaki A. Direct Measurement of the Hyperfine Structure Interval of Positronium Using High-Power Millimeter Wave Technology. Springer Japan 2015
4. Hugenschmidt C. Positrons insurfacephysics. *Surf. Sci. Rep.* 2016;71:547-594
5. Cassidy DB, Mills Jr AP. The production of molecular positronium. *Nature.* 2007;449:13:195-197
6. Moskal P, Jasińska B, Stępień EŁ, Bass SD. Positronium in medicine and biology. *Nat. Rev. Phys.* 2019;1:527-529
7. Jung KO et al. Whole-body tracking of single cells via positron emission tomography. *Nat. Biomed. Eng.* 2020;4:835-844
8. Moskal P et al. Feasibility study of the positronium imaging with the J-PET tomograph. *Phys. Med. Biol.* 2019;64:055017
9. Moskal P. Towards total-body modular PET for positronium and quantum entanglement imaging. 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Proceedings (NSS/MIC)
10. Shaffer TM, Pratt EC, Grimm J. Utilizing the power of Cerenkov light with nanotechnology. *Nat. Nanotechnol.* 2017;12:106-117
11. Miyazaki A, Yamazaki T, Suehara T, Namba T, Asai S, Kobayashi T, Saito H, Tatematsu Y, Ogawa I, Idehara T. sub-THz direct spectroscopy of positronium hyperfine splitting. *J. Phys. Conf. Ser.* 2013;443:012002
12. Miyazaki A et al. The Direct Spectroscopy of Positronium Hyperfine Structure Using a Sub-THz Gyrotron. *J. Infrared. Milli. Terahz. Waves.* 2014;35:91-100
13. Planchon TA, Gao L, Milkie DE, Davidson MW, Galbraith JA, Galbraith CG, Betzig E. Rapid three-dimensional isotropic imaging of living cells using Bessel beam plane illumination. *Nat. Methods* 2011;8:5:417-426
14. Duocastella M, Arnold CB. Bessel and annular beams for materials processing. *Laser Photonics Rev.* 2012;6:5
15. Mosk AP, Legendijk A, Lerosey G, Fink M. Controlling waves in space and time for imaging and focusing in complex media. *Nat. Photonics.* 2012;6:283-292
16. Zhu XL, Yu TP, Sheng ZM, Yin Y, Turcu ICE, Pukhov A. Dense GeV electron-positron pairs generated by lasers in near-critical-density plasmas. *Nat. Commun.* 2016;7:13686
17. Ni J, Wang C, Zhang C, Hu Y, Yang L, Lao Z, Xu B, Li J, Wu D, Chu J. *Light Sci. Appl.* 2017;6:e17011
18. Wu Z, Xinke Wang X, Sun W, Feng S, Han P, Ye J, Zhang Y. Vector characterization of zeroorder terahertz Bessel beams with linear and circular polarizations. *Sci. Rep.* 2017;7:13929
19. Gu YJ, Klimo O, Bulanov SV, Weber S. Brilliant gamma-ray beam and electron-positron pair production by enhanced attosecond pulses. *Commun. Phys.* 2018;1:93
20. Vranic M, Klimo O, Korn G, Weber S. Multi-GeV electron-positron beam generation from laser-electron scattering. *Sci. Rep.* 2018;8:4702
21. Kulya MS, Semenova VA, Bespalov VG, Petrov NV. On terahertz pulsed broadband Gauss-Bessel beam free-space propagation. *Sci. Rep.* 2018;8:1390
22. MENG Y, YI J, BUROKUR SN, KANG L, ZHANG H, WERNER DH. Phase-modulation based transmitarray convergence lens for vortex wave carrying orbital angular momentum. *Opt. Express.* 2018;26:17

23. Gong L, Zhao Q, Zhang H, Hu XY, Huang K, Yang JM, Li YM. Optical orbital-angular-momentum multiplexed data transmission under high scattering. *Light Sci. Appl.* 2019;8:27
24. Doche A. et al. Acceleration of a trailing positron bunch in a plasma wakefield accelerator. *Sci. Rep.* 2017;7:14180
25. Min SH et al. Study of Coherent High-Power Electromagnetic Wave Generation Based on Cherenkov Radiation Using Plasma Wakefield Accelerator with Relativistic Electron Beam in Vacuum. *J. Electromagn. Eng. Sci.* 2018;29:6:407-410
26. Min SH et al. Transient pulse analysis of ionized electronics exposed to  $\gamma$ -radiation generated from a relativistic electron beam. *AIP Adv.* 2018;8:025001
27. Min SH et al. Ionizing radiation in electronics from the Compton scattering of quasi-stationary particles generated by characteristic and Bremsstrahlung x rays. *AIP Adv.* 2020;10:055110
28. Thompson MC, Badakov H, Cook AM, Rosenzweig JB, Tikhoplav R, Travish G, Blumenfeld I, Hogan MJ, Ischebeck R, Kirby N, Siemann R, Walz D, Muggli P, Scott A, Yoder RB. Breakdown Limits on Gigavolt-per-Meter Electron-Beam-Driven Wakefields in Dielectric Structures. *Phys. Rev. Lett.* 2008;100:214801
29. Cook AM, Tikhoplav R, Tochitsky SY, Travish G, Williams OB, Rosenzweig JB. Observation of Narrow-Band Terahertz Coherent Cherenkov Radiation from a Cylindrical Dielectric-Lined Waveguide. *Phys. Rev. Lett.* 2009;103:095003
30. <https://www.asphericon.com/en/products/axicons>. Axicons - Highly precise from asphericon. Asphericon company.
31. Jung HC, Min SH, Park GS, An J, Lee SH, Yoon YJ, Kim JY, Choi JH, So JH, Petelin M. Transmission of gigawatt-level microwave using a beam-rotating mode converter in a relativistic backward wave oscillator. *Appl. Phys. Lett.* 2010;96:13
32. Min SH, Jung HC, Park GS, An J, Lee SH, Yoon YJ, Kim JY, Choi JH, So JH. Mode Conversion of High-Power Electromagnetic Microwave Using Coaxial-Beam Rotating Antenna in Relativistic Backward-Wave Oscillator. *IEEE Trans. Plasma. Sci.* 2010;38:6:1391-1397
33. Min SH et al. Effects for electronics exposed to high power microwave on a basis of relativistic backward wave oscillator at X-band. *J. Electromagn. Waves Appl.* 2017;31:17:1875-1901
34. Kilburn D, Townrow S, Meunier V, Richardson R, Alam A, Ubbink J. Organization and mobility of water in amorphous and crystalline trehalose. *Nat. Mater.* 2006;5:632-635