

## 마이크로트론을 이용한 소형 원적외선

## 자유전자레이저에서의 발진 특성

Output Characteristics of Compact Far Infrared Free  
Electron Laser driven by a Conventional Microtron

정영욱, 이병철, 김선국, 조성오, 차병현, 이종민  
한국원자력연구소 양자광학팀  
yujung@kaeri.re.kr

Gregory Kazakevich  
Budker Institute of Nuclear Physics, Russia

한국원자력연구소에서는 가속기의 직경이 70 cm이고, 마그네트론 고주파 발생장치를 사용하는 소형 마이크로트론을 이용한 원적외선 자유전자레이저를 개발하였다<sup>(1)</sup>. 발진 파장은 100 - 200  $\mu$  m 영역이며, 침투 출력은 약 1 - 10 kW이다. 본 연구에서는 개발된 원적외선 자유전자레이저의 시스템 개요와 출력 특성에 관하여 살펴보았다.

최근, 반도체와 물성의 분광학연구, 생명공학연구, 광화학 반응연구, 환경감시 기술개발, 인체영상, 군사용 감시기술 개발 등의 분야에서 새로운 연구와 첨단기술개발에 필요한 원적외선 광원의 요구가 점차 높아지고 있다. 이러한 요구에 부응하기 위하여 원적외선 영역의 다양한 광원 개발이 이루어지고 있으며, 특히, 테라헤르쯔 반도체 소자를 개발하기 위한 노력이 국내외에서 활발히 이루어지고 있다. 그러나, 아직까지는 이러한 광원의 출력이 mW 이하이고, 분광특성이 나빠서 실제 응용에 많은 제한이 있다.

자유전자레이저는, 넓은 영역에서 연속적인 파장변환이 가능하며 출력이 높고 분광특성이 우수하여, 원적외선 영역에서 가장 이상적인 광원으로 알려져 있다. 그러나, 거대한 시스템의 크기와 높은 개발비로 인하여 전세계적으로 몇 개의 연구소에서만 활용되고 있는 실정이었다.

실험실 규모의 소형 원적외선 자유전자레이저를 개발하기 위한 노력이 여러 연구팀에서 이루어지고 있다. 특히, 규모가 작고 가격이 저렴하며, 전자빔의 특성이 우수한 마이크로트론(microtron)은 소형 자유전자레이저에 가장 적합한 전자빔 가속기 중의 하나이며, 이를 이용한 소형 자유전자레이저의 개발이 1990년대 초반부터 미국, 이태리, 일본, 러시아 등을 중심으로 이루어져 왔다. 그러나, 레이저 이득을 결정하는 전자빔의 전류가 낮아서 레이저 발진에 어려움을 겪고 있다. 본 연구에서는 마그네트론을 사용하는 마이크로트론의 주파수 안정화와 전자빔 특성 분석을 통하여 발진이득을 최적화 하였으며, 고성능 undulator와 복합형 공진기를 사용하여 레이저 발진에 필요한 이득을 얻을 수 있었다.

전자빔의 낮은 전류에 의한 이득을 보상하기 위해서는, 높은 자기장 세기와 낮은 자기장 오차를 가지는 고성능의 undulator가 필요하다. 본 연구팀에서는 전자석과 영구자석을 동시에 사용하는 새로운 구조의 undulator를 개발하여 25 mm 주기에서 4.8 - 6.5 kG의 높은 자기장 세기를 얻었으며, 0.05% 이하의 극히 낮은 자기장 오차를 실현하였다<sup>(2)</sup>. 특히, 구조가 간단하고 제작비가 저렴하며, 전류로 자기장 세기를 실시간 정밀조정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 주기수는 80개로 발진 이득을 최적화하는 값으로 결정되었다. Undulator의 전체 길이는 2 m이다. 한편, 원적외선 영역의 공진기에서는 회절에 의해서 공진 모드의 빔직경이 커지므로 전자빔과 효과적으로 상호작용을 일

오키지 못하는 문제점이 발생한다. 공진기에서의 손실을 최소화하면서 전자빔과 공진모드의 결합도를 높일 수 있는 방법으로 복합형 공진기를 도입하였다. 공진모드는 전자빔의 운동에 의해서 수평방향으로 선형편향되며, 이 경우 수직방향의 도파관에서는 낮은 손실을 가진다. 본 연구의 공진기는 수직축으로 도파관 모드이며, 수평축으로 동초점형의 자유공간모드이다. 도파관의 간격은 2 mm로서, undulator에서의 전자빔 운동궤적을 3차원으로 계산하여 손실이 발생하지 않는 최소값으로 결정되었다. 공진기의 길이는 2781 mm이며, 공진 모드 왕복시의 총 손실은 출력을 포함하여 약 10%이다. 공진거울은 양쪽 모두 곡률이 3 m인 원기둥형이며 표면은 금 박막으로 이루어져 있다. 출력경의 중심에 위치한 0.7 mm의 구멍으로 공진모드의 약 1%를 레이저 출력으로 발생한다. 원적외선 출력과 시간적인 파형은 액체 헬륨 온도(4K)로 냉각된 Ge:Ga와 InSb 반도체 측정장치로 측정한다. 그림 1은 측정된 레이저 출력 파형이며, 사용된 전자빔의 전류는 약 40 mA이다. 이 때의 레이저 파장은 120  $\mu\text{m}$ 이며, 첨두출력은 약 1 kW이다. 레이저 출력은 약 2  $\mu\text{s}$ 의 포화된 펄스 폭을 가지며, 1%이하의 안정된 출력변동율을 나타내었다. 레이저의 선폭은 0.1 - 0.01  $\text{cm}^{-1}$ 로 평가된다. 레이저빔의 출력 및 분광에서의 우수한 특성은 물성 및 반도체의 분광학 연구 등 응용연구에 적합한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Jongmin Lee, *et al.*, Nucl. Instr. and Meth., A 407 (1998) 161.
2. Y. U. Jeong, *et al.*, "U-25 Undulator for KAERI FIR FEL", 4th Asian Symposium on FELs, Taejon, Korea, 1999.

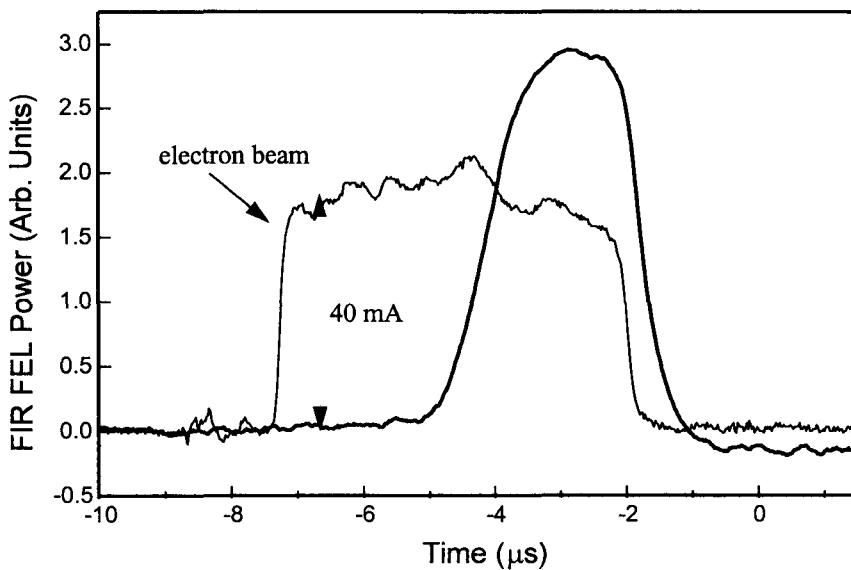


그림 1. 원적외선 자유전자레이저의 발진 파형.