

## Undulator에 설치된 사중극 전자석에 의한

### 자유전자레이저의 발진 이득 증가

# Gain Enhancement of Compact Far Infrared Free Electron Laser by a Extended Quadrupole Magnet in Undulator

정영욱, Gregory Kazakevich, 이병철, 김선국, 조성오, 차병현, 이종민\*

한국원자력연구소 양자광학팀, '광주과학기술원 신소재공학과 고등광기술연구소

yujung@kaeri.re.kr

Undulator에서의 전자빔 운동은 자유전자레이저 발진 이득에 직접적인 영향을 미친다. 특히, 전자빔의 에너지가 낮거나 전자빔 전류가 높아서 퍼짐 효과가 큰 경우, 또는 길이가 긴 undulator를 사용하는 경우는 전자빔의 퍼짐 현상을 최소화하면서 발진 모드와의 상호작용을 극대화시키는 문제가 중요해진다. Planar undulator의 경우 수직방향으로는 집속력이 있으나 수평방향으로는 전자빔을 모으는 힘이 존재하지 않기 때문에 수평방향의 전자빔 궤적을 조절하기 위해서는 별도의 집속 장치가 필요하다. 본 연구에서는 간단한 구조와 원리로 undulator에서의 전자빔 궤적을 조절할 수 있는 방법을 실현하였으며, 이를 이용하여 원적외선 자유전자레이저의 발진 이득이 증가함을 실험적으로 확인하였다.

한국원자력연구소에서 세계 최초로 개발된 마이크로트론 구동 원적외선 자유전자레이저는 낮은 전자빔 전류에 의한 이득 저하를 극복하기 위한 몇 가지 방안들이 모색되어 채택되었다. 그 중 하나가 도파관 모드와 자유공간 모드 복합형 공진기의 사용이다.

100  $\mu\text{m}$  영역의 원적외선은 파장이 길기 때문에 자유공간 모드의 단면적이 전자빔 단면적에 비하여 상대적으로 크다. 자유전자레이저의 소신호 이득은 공진모드 유효 단면적의 크기에 반비례한다. 공진기 내에서의 모드 손실을 증가시키지 않으면서 이득을 증가시키는 방안으로 공진기 단면적의 수직방향으로 평행 도파관을 사용하였다. 이 때 평행 도파관의 간격은 2 mm이다. 본 연구에서는 수평방향으로 3 m 길이의 동초점형 공진기를 사용하고 있으며, 이 경우 공진기 내에서의 유효 모드 크기(FWHM)는 약 10 mm이다. 2 mm 간격의 도파관을 사용하면, 1 mm로 수직방향 모드 크기를 줄일 수 있어 약 10배의 이득 증가 효과가 있다. 전자빔에 의해서 발생하는 빛은 수평방향의 편광을 가진다. 수평방향의 편광을 가진 빛은 수직방향의 도파관에 대해서는 거의 손실이 없다. 그러나, 수평방향의 도파관에 대해서는 간격이 작아지면 급격히 손실이 증가한다. 그러므로 본 연구에서는 공진모드 단면적의 수평방향으로는 동초점의 자유공간 모드를 사용하고 수직방향으로는 모드 크기를 줄이기 위하여 도파관 모드를 사용하였다. 전자빔이 통과하는 공진기 내부의 단면적은  $2 \times 30 \text{ mm}^2$ 이다.

본 연구와 같이 복합 모드 공진기인 경우는 입사되는 전자빔의 분포 최적 조건이 수평과 수직방향에 대해서 다르다. 수직방향의 전자빔 분포는 길이가 약 3 m이면서 2 mm의 좁은 간격을 가진 도파관을 손실 없이 통과하면서 자기장 값의 변화에 따른 이득 손실이 낮은 값으로 결정된다. 즉, 전자빔의 입사 각과 입사 크기에 따른 베타트론 운동의 궤적이 최소화되는 값이다. 본 연구에서는 입사 전자빔의 수직방향 크기(FWHM)는 약 0.3-0.4 mm일 때 최적인 것으로 평가되었다.

수평방향의 전자빔 운동은 동초점 공진기 모드와 상호작용이 가장 좋은 궤적으로 결정된다. 측정된 전자빔의 수평방향 에미턴스는 3-4 mm·mrad이다. 이 경우 제한된 전자빔 광학계를 이용하여 수직방향 전자빔 분포와 별도로 공진기 모드의 전기장이 높은 영역에 집중된 수평방향 전자빔 분포를 독립적으로 실현하는 것은 쉽지가 않다. 특히, undulator의 주기수가 많고 전자빔 투과 거리가 짧지 않는 경우 방사광 모드와의 상호작용이 최적이 되는 전자빔 분포를 실현하는 것은 별도의 장치가 없이는 거의 불가능하다.

이제까지 undulator를 통과하는 전자빔을 집속하기 위하여 시도된 방법들은 영구자석이나 편향 전자석을 추가적으로 사용하거나 undulator 자극면을 타원으로 만드는 것 등으로 구조적으로 간단하지 않으면서도 전자빔 궤적 조절이 용이하지 않았던 단점이 있었다. 본 연구에서는 2 m 길이의 얇은 동판 2개와 구리선 2개를 이용하여 간단한 구조의 사중극 전자석을 undulator에 설치하였으며, 전류값을 최대 26 A까지 흘려주어 전자빔이 2 m 길이의 undulator에서 1 주기 이상의 베타트론 운동을 할 수 있도록 하였다. 이 경우 전자빔 운동에 따라서 발진 이득이 달라짐을 확인하였고, 약 1 주기 운동시에 최대 이득을 얻음을 알 수 있었다. 출력 포화시까지의 평균 이득은 사중극 전자석을 사용하지 않는 경우 1% 미만이나 사중극 전자석의 자기장 세기가 증가함에 따라서 최대 14%까지 증가하였다. 그 이상의 자기장 세기에서는 발진 이득이 떨어짐을 확인하였다. 이러한 결과는 전자빔 수평 방향 운동의 베타트론 주기가 undulator 길이와 일치할 때 방사광 모드와의 상호작용이 가장 좋을 것이라는 예측과 일치하였다.

현재, 본 연구팀의 소형 원적외선 자유전자레이저는 응용연구를 위하여 레이저빔을 방사광이 차폐된 실험공간으로 전송하는데 성공하였다. 그리고, 전자빔 에너지 가변 영역을 대폭 넓혀서 발진 파장을 100-160  $\mu\text{m}$ 에서 90-300  $\mu\text{m}$ 로 확장하기 위한 연구가 진행중이다. 이러한 성능 개선은 반도체와 물성의 분광학연구, 생명공학연구, 환경감시 기술개발, 원적외선 영상, 플라즈마 진단, 가스 분광학 등의 응용연구를 목표로 한 것으로, 가까운 시일 내에 다양한 응용연구가 이루어질 수 있을 것으로 기대하고 있다.

#### 참고문헌

1. Young Uk Jeong, et al., "First Lasing of the KAERI Compact Far-Infrared Free-Electron Laser Driven by a Magnetron-Based Microtron", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A (2001), accepted for publication
2. Young Uk Jeong, et al., "Short-period equipotential-bus electromagnetic undulator for a far infrared free-electron laser", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 407, 396-400 (1998)

