

Fresnel 프리즘 간섭계를 이용한 플라즈마 밀도 측정

Measurement of plasma density by use of an interferometer using a Fresnel biprism

정태문¹, 최일우¹, 성재희¹, Akito Sagisaka², 김형택¹, 김정훈¹, 노영철¹, 고도경¹, Hyrouki Daido², 이종민¹

¹광주과학기술원 고등광기술연구소 펨토과학연구실 ²일본원자력연구개발기구

jeongtm@apri.gist.ac.kr

극초단 고출력 레이저 펄스와 표적과의 상호 작용은 X선, 전자 및 양성자 빔과 같은 2차 선원을 발생시키며 전 세계적으로 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 2차 선원의 발생 mechanism을 이해하고 고효율의 2차 선원을 발생시키기 위해서는, 레이저 펄스와 표적과의 상호 작용시 발생하는 레이저 유도 플라즈마의 진단이 필요하다. 현재 레이저 유도 플라즈마를 진단하기 위해서 광학 간섭계가 많이 이용되고 있다.¹ 광학 간섭계에서 얻어진 간섭무늬는 레이저 유도 플라즈마의 밀도 및 분포에 대한 정보를 포함하고 있어 이의 분석을 통해서 플라즈마의 상태를 연구함으로써 2차 선원 발생 연구에 직간접적인 도움을 준다. 본 연구에서는 고등광기술연구소에 설치된 100 TW Ti:sapphire 레이저를 이용한 양성자 빔 발생 실험시, prepulse에 의해 발생한 플라즈마 밀도를 Fresnel 프리즘을 이용하는 간섭계²로 측정할 실험 결과에 대해서 발표한다.

고등광기술연구소에 설치된 100 TW Ti:sapphire 레이저 시설 및 표적 chamber 구성 및 성능에 대한 자세한 내용은 이미 다른 문헌에 소개되어 있다. 본 연구에서 사용된 간섭계는 그림 1에서 보여준 바와 같이 표적 chamber내와 표적 chamber의 한쪽 창에 연결된 광학 table 위에 설치되었다. 양성자 빔 발생용 극초단 고출력 레이저 펄스는 그림 1에서 보여준 바와 같이 경로 A(M1-M2-M3-OAP)를 따라서 진행하며, 비축 포물 거울에 의해서 표적(Cu tape target)에 집속된다. 극초단 고출력 레이저 펄스의 일부는 탐침광이 되어, 거울 M1에 존재하는 직경 5 mm의 구멍을 통과하여 경로 B(M1-M4-M5-M6-M7)를 따라 표적에 도착하고 표적에 나란한 방향으로 진행한다. 표적에 도착한 탐침광은 극초단 고출력 레이저 펄스와 표적과의 상호작용에 의해 생성된 플라즈마를 통과한 후, 간섭계 장치로 입사한다. 간섭계 장치는 초점거리가 각각 300 mm와 50 mm인 렌즈와 Fresnel prism 및 CCD로 구성되어 있다. 초점거리가 300 mm

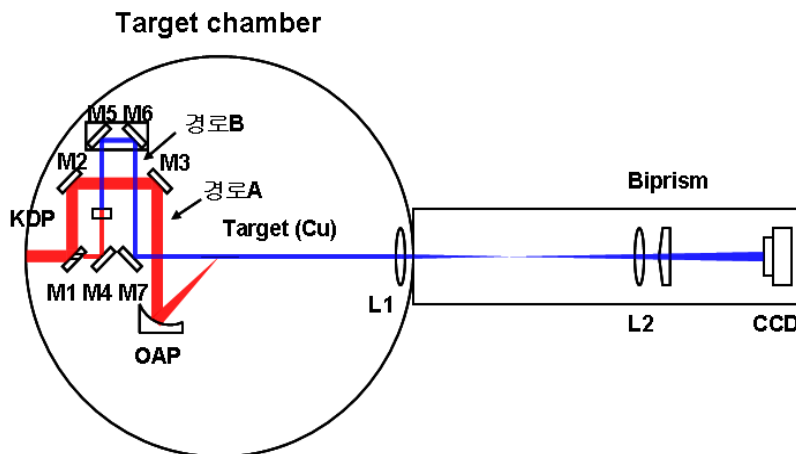


그림 1 플라즈마 밀도를 측정하기 위한 간섭계 장치도

인 렌즈는 플라즈마 위치에서 탐침광의 상을 전송하기 위해서 설치되었고, 초점거리가 50 mm인 렌즈로 탐침광의 상을 CCD 상에서 10배로 확대하였다. 이 때, 경로 B의 시간 지연을 조절하기 위해서 거울 M5, M6을 선형 이동기 위에 설치하였다.

실험에 사용된 레이저 펄스는 약 10 TW의 첨두 출력을 갖고 있었고, ns contrast ratio는 약 $10^4 \sim 10^6$ 이었다. 레이저 펄스의 펄스폭은 약 35 fs이었다. 그림 2의 (a)는 본 연구에서 사용된 간섭계에서 측정된 간섭무늬 영상이다. 간섭무늬 영상은 main 레이저 펄스가 도착하기 약 160 ps전에 측정되었다. 간섭무늬 영상에서 알 수 있는 바와 같이, ns prepulse에 의해서 형성된 플라즈마에 의해 굴절률 변화가 일어났고 굴절률 변화에 의해 간섭무늬 영상이 구부러졌다. 레이저 펄스는 오른쪽에서 왼쪽으로 입사하였고, 점선이 표적의 표면이다. 그림 2의 (b)는 간섭무늬 영상으로부터 계산된 위상 변화이다. 간섭무늬 영상으로부터 위상 변화 계산은 Takeda등이 제안한 Fast Fourier Transform (FFT) 알고리즘³과 phase unwrapping 알고리즘을 사용하여 계산하였다. 계산으로부터 maximum 위상 변화는 약 -3.6 rad임을 알 수 있었다.

플라즈마에 의한 2차원 위상 변화 정보를 구하면, Abel inversion transform을 이용하여 플라즈마 밀도의 분포를 계산할 수 있다. 그림 2의 (c)는 2차원 위상 변화로부터 계산된 플라즈마 밀도의 분포이다. 이 때, 가로축은 레이저 빔의 입사축이고 세로축은 플라즈마의 반경이다. 이 경우 prepulse에 의해서 생성된 플라즈마 밀도는 최고 $1.9 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 임을 알 수 있었다. 본 실험에서는 또한 main 레이저 펄스가 도착하기 160, 110, 60, 10 ps 전에 간섭무늬를 측정하여 플라즈마 밀도를 계산하였다. 다른 시간 지연에서 측정된 플라즈마 밀도는 이 정도의 시간 지연에 대해서 크게 차이 나지는 않았으며, $1.4 \sim 2.2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 정도의 밀도 영역에서 플라즈마 밀도가 유지되었다. 이로부터 main pulse가 도착하기 10 ps전까지 main 레이저 펄스의 ps background에 의해 생성되는 플라즈마에 의한 영향은 거의 없는 것으로 생각할 수 있었다.

본 논문에서는 Fresnel biprism을 이용하는 간섭계를 구성하여 간섭무늬를 측정하는 방식으로 극초단 고출력 레이저를 이용한 양성자 발생 실험시 prepulse에 의해 생성된 플라즈마 밀도를 측정하였다. 이로부터 prepulse에 의해 생성된 전자 밀도는 약 $1 \sim 2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 정도임을 알 수 있었다. 간섭계를 이용한 플라즈마 밀도의 측정은 극초단 고출력 레이저와 표적과의 상호 작용 연구에 중요한 도구로 사용될 수 있을 것이다.

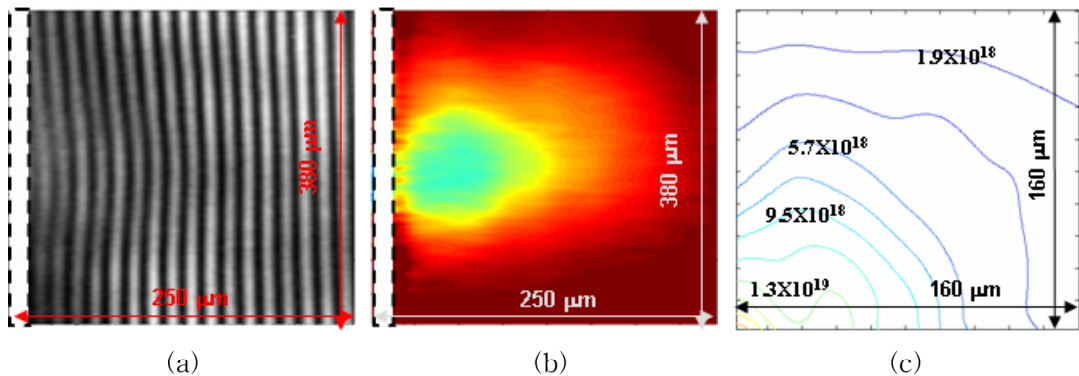


그림 2. (a) 간섭계에서 얻어진 간섭 무늬 영상. (b) 간섭 무늬 영상으로부터 계산된 2차원 위상 변화 map. (c). 2차원 위상 변화 map으로부터 계산된 전자 밀도 분포.

참고문헌

1. L.A. Gizzi, *et al.*, Phys. Rev. E **49**, 5628-5643 (1994).
2. A. Sagisaka *et al.*, Appl. Phys. B **78**, 919-922 (2004).
3. M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, J. Opt. Soc. Am. **72**, 156-160 (1982).