

도플러넓어짐에 의한 Hg방전플라즈마의 온도결정

김문옥, 오철수, 최향미

위대한 수령 김일성동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《새로운 과학분야를 개척하며 최신과학기술의 성과를 인민경제에 널리 받아들이기 위한 연구사업을 전망성있게 하여야 합니다. 세포공학, 유전자공학, 초고압물리학, 극저온 물리학을 발전시키며 원자에너지, 태양에너지를 비롯한 새로운 에너지를 개발하며 레이자와 플라즈마를 깊이 연구하여 인민경제에 널리 리용하도록 하는데 힘을 넣어야 하겠습니다.》(《김일성전집》 제72권 292페이지)

플라즈마에서 복사되는 스펙트르선은 복사마당과 원자들사이의 호상작용, 복사원자들 자체의 무질서한 열운동, 복사원자들과 주위립자들의 호상작용으로 인하여 넓어지게 된다.[2] 스펙트르선의 넓어짐측정에는 고분해능분광기구인 파브리-페로간섭계가 널리 리용되고있으며 측정된 스펙트르선폭으로부터 방전플라즈마에서 복사립자온도뿐아니라 핵융합플라즈마에서 전자밀도나 이온온도를 결정하고있다.[3, 4]

최근 새에너지개발연구에 널리 리용되고있는 구형또까마크와 같은 핵융합실험장치들에서 발생하는 고온, 고이온화상태의 플라즈마들에서 전자밀도와 온도 특히 복사원자 및 서로 다른 이온화상태에 있는 이온들의 온도를 정확히 평가하는것은 플라즈마형성 및 가열, 가두기효율을 높이는데서 선차적으로 해결하여야 할 문제이며 이를 위해서는 스펙트르선폭측정에 기초한 플라즈마진단체계를 세우는것이 필요하다.[5-10]

우리는 낮은압력Hg방전플라즈마에서 스펙트르선의 간섭무늬를 측정하여 도플러넓어짐선폭으로부터 복사원자들의 온도를 결정하기 위한 연구를 하였다.

실험 방법

스펙트르선의 간섭무늬측정체계는 Hg플라즈마광원과 파브리-페로간섭계, 분광사진기(《ИСП-51》), CCD촬영기, 컴퓨터로 구성하였다.[1]

먼저 방전전류가 $20\mu A$ 인 저압수은방전관에서 방출되는 복사빛을 분해능이 $5.5 \cdot 10^5$ 인 파브리-페로간섭계에 입사시키고 분광사진기와 CCD촬영기로 스펙트르선의 간섭무늬화상을 얻는다.

다음 무늬추적법에 의한 간섭무늬해석계산프로그램으로 얻은 간섭무늬화상에 대한 해석과 측정을 진행한다.

간섭무늬해석은 무늬방향려파에 의한 잡음제거, 미분부호2값 및 경계화상결정, 간섭무늬의 직경측정에 의한 선폭결정의 세 단계로 진행하였다.

Hg I스펙트르 546.1nm선의 간섭무늬화상은 그림 1과 같다.

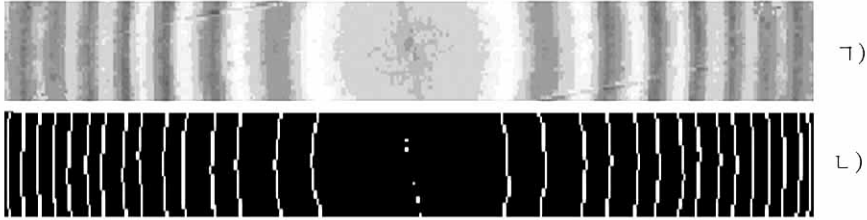


그림 1. Hg I스펙트르 546.1nm선의 간섭무늬화상

ㄱ) 측정체계에 의하여 얻어진 간섭무늬의 초기화상,

ㄴ) 간섭무늬해석결과에 의하여 얻어진 2값경계화상

스펙트르선폭은 2값경계화상으로부터 간섭무늬의 고리직경들을 측정하여 식

$$(\Delta\lambda)' = \Delta\lambda \frac{(D_m^{1/2})^2 - D_m^2}{D_m^2 - D_{m-1}^2} \quad (1)$$

에 따라 평가할수 있다. 여기서 $(\Delta\lambda)'$ 는 스펙트르선폭, $\Delta\lambda$ 는 간섭계의 자유스펙트르구간, $D_m^{1/2}$ 은 $1/2I_{\max}$ 에 해당하는 m 차고리의 직경, D_m 과 D_{m-1} 은 각각 m 차와 $m-1$ 차극대고리의 직경이다.

실험결과 및 해석

식 (1)에 따라 Hg I스펙트르 546.1nm선의 선폭을 계산하면 $(2.00 \pm 0.08) \cdot 10^{-3} \text{nm}$ 이다. 선폭결정에서 상대불확정도는 약 3%정도이다.

이 선폭은 플라즈마에서 선포프로필에 영향을 주는 모든 인자들이 동시에 작용하여 나타나는 결과로서 일반적으로 보이트프로필형태를 가지게 된다.

플라즈마에서 스펙트르선의 로렌츠프로필과 가우스프로필의 중첩으로 나타나는 보이트프로필은 다음과 같이 표시된다.

$$P_V(a, w) = \frac{a}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp(-y^2)}{a^2 + (w - y)^2} dy \quad (2)$$

$$a = \frac{\Delta\lambda_L}{\Delta\lambda_G} \sqrt{\ln 2}, \quad w = \frac{2(\lambda - \lambda_0)}{\Delta\lambda_G} \sqrt{\ln 2}, \quad y = \frac{(\lambda - \lambda')}{\Delta\lambda_G} \sqrt{\ln 2}$$

여기서 λ_0 은 스펙트르선의 중심파장, $\Delta\lambda_G$ 와 $\Delta\lambda_L$ 은 각각 가우스프로필과 로렌츠프로필의 반폭이다.

로렌츠프로필과 가우스프로필은 다음과 같이 표시된다.

$$P_L(\lambda) = L_{\max} \frac{\Delta\lambda_L^2}{4(\lambda - \lambda_0)^2 + \Delta\lambda_L^2} \quad (3)$$

$$P_G(\lambda) = G_{\max} \exp(-4 \ln 2 (\lambda - \lambda_0)^2 / \Delta\lambda_G^2) \quad (4)$$

여기서 L_{\max} 는 로렌츠프로필의 극대값, G_{\max} 는 가우스프로필의 극대값이다.

로렌츠프로필에 영향을 주는 넓어짐성분들로는 자연넓어짐($\Delta\lambda_N$), 스타르크넓어짐($\Delta\lambda_S$), 공명넓어짐($\Delta\lambda_{\text{Res}}$), 완더월넓어짐($\Delta\lambda_{\text{vdw}}$)이 있으며 이외에 자체흡수에 의한 넓어짐과 기구넓어짐($\Delta\lambda_A$)도 영향을 미치며 가우스프로필에는 도플러넓어짐이 영향을 준다.

Hg I스펙트르 546.1nm선에서는 자체흡수의 영향이 거의 없으므로 로렌츠프로필은

$$\Delta\lambda_L = \Delta\lambda_N + \Delta\lambda_S + \Delta\lambda_{vdw} + \Delta\lambda_{Res} + \Delta\lambda_A \quad (5)$$

로 쓸수 있다.

일반적으로 스펙트르선의 자연넓어짐에 의한 선폭은 다른 모든 넓어짐성분들에 의한 선폭들보다 무시할수 있을 정도로 작으며 공명넓어짐, 완더월넓어짐에 의한 선폭은 밀도가 높은 플라스마들에서 크다. 핵융합플라스마를 비롯한 고온, 고밀도, 고이온화상태의 플라스마들에서는 스타르크효과와 도플러효과에 의한 넓어짐이 우세하며 자기마당에 의한 제만효과도 선폭에 큰 영향을 미친다.

실험로 $T_e = 19\,000 \sim 43\,000\text{K}$, $N_e = (1 \sim 16.5) \times 10^{22} \text{m}^{-3}$ 일 때 He I스펙트르 667.8nm선 (2^1p-3^1d)의 스타르크선폭은 $0.01 \sim 0.1\text{nm}$ 정도로서 도플러선폭과 같은 크기정도이거나 더 크며[4] $N_e = 10^{24} \text{m}^{-3}$, $T_e = 17\,000\text{K}$ 일 때 Kr I스펙트르 587.09nm선의 스타르크선폭은 0.7nm 로서 도플러선폭보다 크다.[9] 따라서 이러한 고밀도플라스마들에서는 스타르크효과와 도플러효과에 의한 선폭을 고려하여 플라스마의 특성량들을 진단하여야 한다.

그러나 우리가 관측한것과 같은 낮은압력방전플라스마에서는 자연넓어짐, 스타르크넓어짐, 공명넓어짐과 완더월넓어짐에 의한 선폭이 전체 선폭에 비하여 1%이하의 작은 값을 가지므로 거의 무시할수 있으며 로렌츠프로필의 선폭은 $\Delta\lambda_L \approx \Delta\lambda_A$ 로 된다.

$\Delta\lambda_A$ 는 실험에서 리용한 파브리-페로간섭계의 기구폭으로서

$$\Delta\lambda_A = \frac{(1-R)\lambda^2}{2\pi\sqrt{R}} \quad (6)$$

에 따라 계산하면 $\Delta\lambda_A = 10^{-3}\text{nm}$ 이다. 여기서 R 는 간섭계거울의 반사결수이다.

가우스프로필의 선폭 $\Delta\lambda_G$ 는

$$\Delta\lambda_D = 2\lambda_0 \sqrt{\frac{2kT \ln 2}{mc^2}} \quad (7)$$

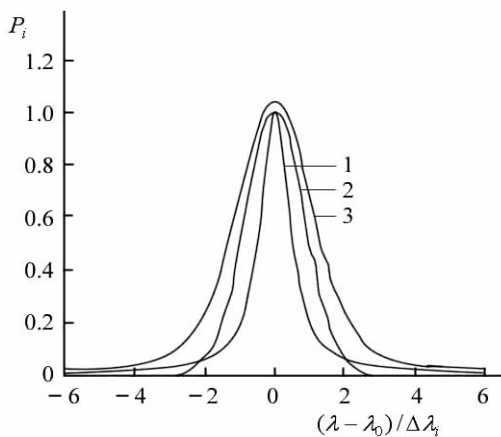


그림 2. 스펙트르선폭에 따르는 프로필함수값

1-로렌츠프로필, 2-가우스프로필, 3-보이트프로필

로 표시되는 도플러넓어짐선폭과 같다.

$\Delta\lambda_G$ 는 식 (2)-(4)에 따르는 가우스프로필과 로렌츠프로필, 보이트프로필선폭사이의 관계로부터 구할수 있다.

Hg I스펙트르 546.1nm선의 측정선폭($\Delta\lambda_V$)과 로렌츠프로필의 선폭을 고려하여 $\Delta\lambda_L / \Delta\lambda_V = 0.5$ 인 경우 스펙트르선폭에 따르는 프로필함수값을 계산하면 그림 2와 같다.

그림 2에서 보는바와 같이 $\Delta\lambda_L / \Delta\lambda_V = 0.5$ 일 때 $\Delta\lambda_G / \Delta\lambda_V = 0.694$ 이므로 가우스프로필의 도플러넓어짐선폭은 $\Delta\lambda_G = \Delta\lambda_D = 1.4 \cdot 10^{-3}\text{nm}$ 이다. 또한 도플러넓어짐선폭 $\Delta\lambda_D$ 로부터 식 (7)을 리용하여 Hg방전플라스마에서 복사원자들의 온도를 평가하면 $T = (320 \pm 20)\text{K}$ 라는것을 알수 있다.

맺 는 말

파브리－페로간섭계를 리용하여 플라즈마복사스펙트럼선의 간섭무늬를 측정하였다.

스펙트럼선의 도플러넓어짐에 의한 선폭을 평가하여 낮은압력Hg방전플라즈마에서 복사원자온도를 결정하였다.

참 고 문 헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), **56**, 12, 92, 주체99(2010).
- [2] 김문옥 등; 원자력, **3**, 24, 주체99(2010).
- [3] Zanda Gavrae et al.; International Journal of Spectroscopy, ID804506, 8, 2010.
- [4] N. Konjevic; Physics Reports, **316**, 339, 1999.
- [5] I. B. Gornushkin et al.; Spectrochimica Acta, B **54**, 1207, 1999.
- [6] E. Stambulchik et al.; J. Quant. Spectr. & Rad. Transfer, **99**, 730, 2006.
- [7] R. L. Mills; IEEE Transactions Plasma Science, **31**, 3, 338, 2003.
- [8] S. Alexiou; J. Quant. Spectr. & Rad. Transfer, **99**, 10, 2006.
- [9] J. C. Valognes; J. Quant. Spectr. & Rad. Transfer, **95**, 113, 2005.
- [10] D. M. Goltz; J. Anal. Atom Spectrom., **17**, 395, 2002.

주체104(2015)년 1월 5일 원고접수

Temperature Determination in Hg Discharge Plasma by Doppler Broadening

Kim Mun Ok, O Chol Su and Choe Hyang Mi

We measured the interference fringe of spectral line by Fabry-Perot interferometer and determined the temperature of radiating atoms by estimating the linewidth of Doppler broadening in Hg discharge plasma.

Key words: Doppler broadening, plasma