

## 고밀도 플라즈마에서의 이온화 과정과

### 재결합 x-선 레이저에 미치는 영향

# Ionization Process in high density plasmas and its effect on the recombination x-ray laser

이기태\*, 이용주, 이종민

한국원자력연구소 양자광학기술개발팀

\*klee@kaeri.re.kr

김동연

포항공과대학교 물리학과

고온 고밀도 플라즈마는 그 자체가 가지는 다양한 응용성 때문에 분광학적 특성에 대한 보다 나은 이해가 필요하다. 그 중에서도 이온화 균형은 플라즈마에서의 빛의 방출과 흡수를 결정하는데 중요한 역할을 하는 것으로 일반적으로는 기저 준위의 점유밀도가 들뜬 준위에 비해 월등히 많기 때문에 각 이온화 상태의 기저 준위들 간의 이온화 과정들만이 고려된다. 하지만 플라즈마의 밀도가 높아지면 들뜬 준위가 이온화에 기여하는 정도가 커지기 때문에 더 이상 기저 준위들만을 고려하는 것은 맞지 않게 된다.

X-선 레이저는 고온 고밀도 플라즈마를 이용하는 것들 중의 하나로, 들뜬 준위들의 역할에 대한 연구가 특히 중요한데, 전자 충돌 재결합 pumping을 이용하는 x-선 레이저<sup>(1)</sup>의 경우는 플라즈마의 상태에 따른 이온화와 재결합의 속도가 중요하기 때문에 이 과정들을 정확히 계산하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 들뜬 준위의 기여를 고려한 원자나 이온의 이온화율 계수( $S^{CR}$ )와 재결합율 계수( $\alpha^{CR}$ ), 즉 collisional-radiative(CR) rate coefficient를 계산하는 전산코드를 개발하였다. 이 것은 Bates 등에<sup>(2)</sup> 의해 개발된 방법으로 quasi-steady-state<sup>(3)</sup> collisional-radiative atomic kinetic 방정식을 이용하여 각 이온화 상태의 기저 준위의 이온화 계수에 들뜬 준위들의 기여를 포함한다. 이와 같은 계산에는 각 이온들의 에너지 준위를 필요로 하는데 이 계산은 이온 전체의 변화를 나타내는 것이기 때문에 간단한 screened hydrogenic 모형<sup>(4)</sup>을 이용하였다.

그림 1은 C IV와 C VI 이온에 대한 CR 계수의 계산 결과이다. 우선 밀도가 증가할수록 값들이 증가하는 것을 알 수 있으며, 증가되는 정도가 온도가 낮을수록 커짐을 알 수 있다. 그리고 밀도가 아주 낮은 경우에 이온화 계수는 들뜬 준위를 고려하지 않은 경우와 차이가 없지만 재결합율 계수는 그렇지 않은 것을 알 수 있다. 이를 이해하기 위해서 전자 밀도가 아주 낮은 경우에 대해 해석적 해를 구하였는데 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} N_1^q = -N_e N_1^q S_1 + N_e N_1^{q+1} \sum_i \alpha_i^r$$

이 식에 의하면, 전자 밀도가 아주 낮은 경우에 이온화는 기저 준위로부터 이온화로만 나타내어지며, 재결합에는 모든 들뜬 준위들의 radiative 재결합이 기여한다는 것을 알 수 있다. 밀도에 따른 증가를 보

다 자세히 살펴보기 위해 CR 재결합 계수와 들뜬 준위를 고려하지 않은 계수의 비를 그림 2에 나타내었다. 비교적 낮은 온도, 높은 밀도에서 수 배 정도 증가하는 것을 알 수 있는데, 흥미로운 것은 C II와 C IV의 경우에는 오히려 감소하는 부분이 존재하는 것이다. 이것을 이해하기 위해서 간단한 3-level 원자에 대한 계산을 하였는데, 이것은 전자충돌 이온화와 재결합의 경쟁에 기인한다. 낮은 밀도에서는 앞의 식에서 보여준 바와 같이 증가한 값을 가지지만, 전자의 온도가 이온화 에너지보다 높을 때는, 밀도가 증가함에 따라 전자 충돌에 의한 여기와 이온화가 빨라져서 오히려 재결합이 줄어드는 효과를 주게 되는 것이다.

그림 3은 모세관 방전 플라즈마를 이용한 재결합 레이저, C VI Ha(18.2nm)선의 gain을 CR 계수를 포함한 것과 그렇지 않은 것을 비교한 것이다. 이 계산은 single-fluid, two-temperature MHD 식을 이용한 Lagrangian<sup>(5)</sup> 전산 코드로 수행되었으며, 사용된 조건은 초기 반지름 2mm, 초기 밀도  $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 플라즈마 전류의 세기 110kA, 4분의 1주기 100ns이다. 우선 CR 계수를 사용하였을 때 이온화되는 시점이 훨씬 빠르며 또한 온도가 내려가는 시점에서 재결합이 빨리 이루어지는데, 재결합 레이저에서는 재결합 속도가 플라즈마가 냉각하는 속도에 비해 느려야 하는 것이 중요하기 때문에 증가된 재결합율은 레이징의 입장에서는 나쁜 영향을 미치게 된다. 따라서 그림 3에 나타난 gain은 3배 정도 줄어들며, gain이 발생하는 시간도 짧아지는 것을 알 수 있다.

참고문헌

- 1 E. C. Elton, *X-ray lasers* (Academic, New York, 1990).
- 2 D. R. Bates, F. R. S., A. G. Hearn, R. W. P. McWhirter, Proc. R. Soc. London, Ser. A 267, 297(1962).
- 3 E. W. P. McWhirter and A. G. Hearn, Proc. Phys. Soc. London 82, 641(1963).
- 4 E. M. More, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 27, 345(1982).
- 5 K. T. Lee, S. H. Kim, D. Kim, and T. N. Lee, Phys. Plasmas 3, 1340(1996).

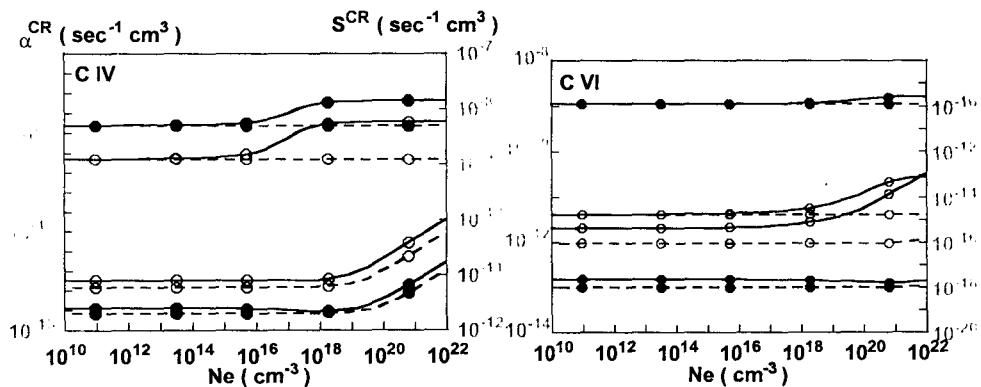


그림 1. C IV와 C VI 이온에 대한 CR 계수 계산 결과. 점선은 들뜬 준위의 기여를 고려하지 않은 것이며, 빈 원은 46.4 eV, 찬 원은 1 keV인 경우다. 각 그림에서 위의 두 선은 이온화 계수, 아래의 두 선은 재결합화 계수를 나타낸다.

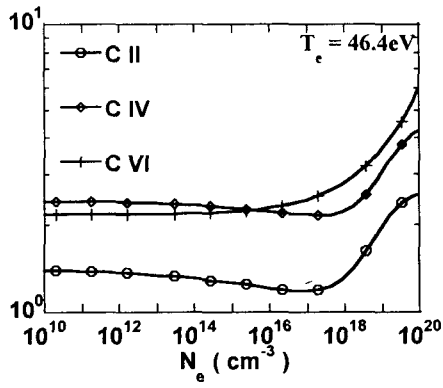


그림 3. 밀도에 따른 CR 재결합화 계수의 증가율. 그림 안의 숫자들은 각 이온화 상태의 이온화 에너지를 나타낸다.

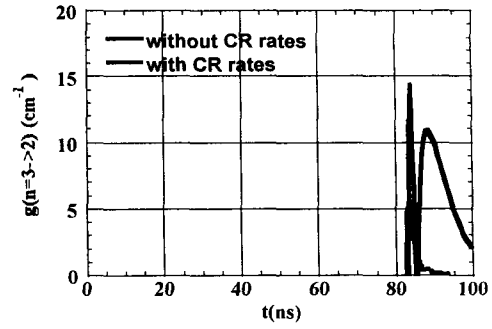


그림 2. CR 계수를 사용하였을 때와 그렇지 않았을 때의 C VI Ha(18.2nm)선의 gain 비교.