

방전여기 KrF 레이저의 플라즈마 프로세서 해석

Theoretical analysis of plasma processes
in discharge excited KrF laser

최 부 연*, 이 주 의
(Boo Yeon Choi, Choo Hie Lee)

경희대학교 전자공학과
(Department of Electronic Engineering, Kyung Hee Univ.)

ABSTRACT

A computer simulation code of UV preionized discharge KrF laser is developed, including time dependent circuit equations, boltzmann equations, and plasma kinetic equations for various atomic and molecular species. Rate constants for electron collision processes are calculated with a boltzmann equations as a function of E/N. In this study, we studied mainly the KrF* formation process, relaxation process, and the 248nm absorption process as a function of charging voltage.

1. 서론

1976년 R. Burnham 등은 UV 예비전리 방전여기 방식으로 XeF 레이저[1]와 ArF 레이저[2]를, D. G. Sutton 등은 KrF 레이저[3]의 방전에 각각 성공한 이후 방전여기 방식은 장치가 간단한 장치로 고효율 및 고반복의 레이저를 용이하게 얻을 수 있는 장점으로 인해 주목을 받고 있다.

방전여기 방식에서 레이저 매질은 전기적 부하로 직접 작용을 하므로 레이저 특성의 이론적 해석은 방전중에 형성되는 플라즈마 dynamics와 연사이며 형성 과정을 종합적으로 취급하여야 한다. 이와같은 이론적 해석의 시뮬레이션을 He/Kr/F2계의 ArF 레이저와 He/Kr/F2계의 ArF 레이저에 대하여 처음 시도한 것은 Greene와 Brau이다[4]. 이후로 많은 보고가 있으나, 특히 Mizunami 등의 보고는[5] 자작한 KrF 레이저를 모델로 시뮬레이션을 실험과

비교하여 매우 정도가 높은 파라미터를 해석하였다.

본 연구에서는 레이저의 대출력과 및 고효율화를 달성하기 위하여 방전중의 KrF* 형성, 탈여기, 흡수과정 및 이에 기여하는 제만 카이네릭스 점유 비율에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션 하였다.

2. 모델링

본 연구에서 사용한 모델의 흐름도는 < 그림 1 > 과 같으며 기본적으로 Mizunami 등[4]의 시뮬레이션과 유사하다. 본 모델은 E/N의 변화를 계산하기 위한 회로 방정식, 전자 충돌에 의한 이온화, 탈여기 등의 반응 정수를 계산하기 위한 볼츠만 방정식, rate 방정식을 풀기 위한 플라즈마 카이네릭스 방정식 및 광자 추출 방정식으로 구성하였다. 회로 방정식의 등가회로는 참고문헌[6]과

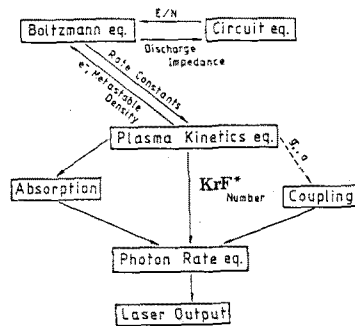


Fig. 1 Schematic diagram of UV-preionized discharge KrF laser simulation.

같으며 회로 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{C_2} \int i_2 dt = L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt$$

$$\frac{1}{C_2} \int i_2 dt = -L_2 \frac{di_2}{dt} - R_2 i_2$$

$$R_1 = \frac{d}{e A \mu(t) n_0(t)}$$

여기에서 C_1 은 60 nF, C_2 은 110nF, L_1 은 200nH, R_1 은 0.1Ω, L_2 는 7nH이며, R_d 는 회로의 수직과 같다.

볼츠만 방정식의 초기값, He, Kr, F₂의 단면적 및 플라즈마 키네틱스 방정식은 참고문헌[6]과 같으며, 공진기 내의 광자 밀도수의 시간 변화는 다음과 같다[7].

$$\frac{d n_{ph}}{dt} = \frac{k N_m}{\tau} + \frac{n_{ph} C}{L_c} \left[I_x N_m \sigma_m + \frac{1}{2} \ln(R_1 R_2) - I_x \sum_i N_i \sigma_i + \ln(1-L) \right]$$

k 는 자연방출에서 레이저 매질의 입체각에 입사되어 증폭되는 부분, n_{ph} 는 공진기 내의 광자밀도, N_m 은 역사이머 본자의 밀도수, τ 는 역사이머 본자의 자연방출 수명, N_i , σ_i 는 레이저광을 흡수하는 입자의 밀도수와 흡

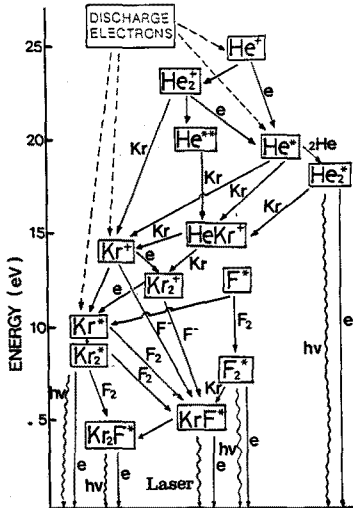


Fig. 2 Diagram of KrF laser reaction channels in a mixture of He/Kr/F₂.

수 단면적, l_p 는 이득 길이, l_c 는 공진기 길이이다. 또한 플라즈마 키네틱스 방정식에서 사용한 반응기구는 102개이며, KrF₂를 형성하는 수반 과정은 <그림 2>와 같다.

3. 결과 및 검토

3-1. 전자분포함수 및 반응정수

<그림 3>은 볼츠만 방정식으로 계산한 전자 에너지에 대한 전자에너지 분포함수 $f(u)$ 를 나타낸 것이다. Kr/F₂/He = 4/0.2/95.8 %에

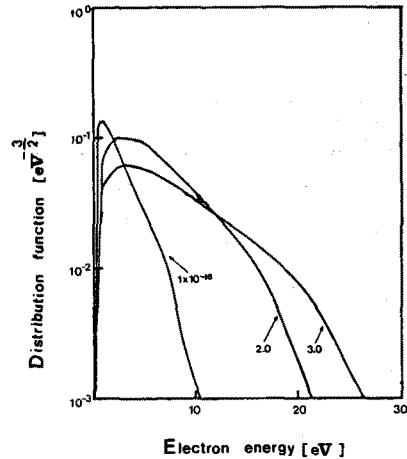


Fig. 3 Electron energy distribution function, The gas mixture is Kr/He/F₂=4/95.8/0.2 (X) at 3 atm.

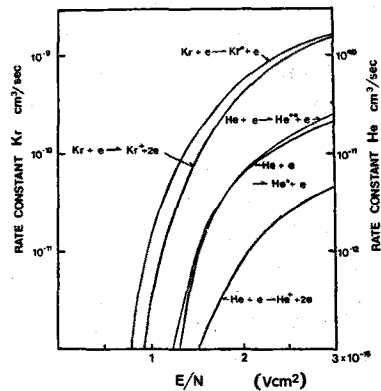


Fig. 4 Rate constants for electron collision process as a function of E/N.

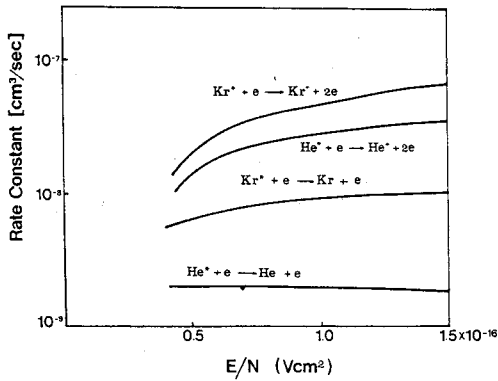


Fig. 5 Two step ionization and De-excitation rate constants for He*, Kr*.

서 E/N 이 1×10^{-16} , 2×10^{-16} , $3 \times 10^{-16} \text{Vcm}^2$ 의 경우 E/N 이 증가함에 따라 높은 전압에너지를 갖는 전자의 분포가 커지는 것을 알 수 있으며, E/N 이 낮은 영역에서는 낮은 전자에너지의 분포가 큰 것을 알 수 있다.

E/N 에 대한 Kr 및 He 과 전자와의 충돌에 의한 반응정수를 < 그림 4 > 에 나타내었다. 전자 충돌에 의한 Kr^* 와 kr 의 반응 정수는 E/N 이 $1 \times 10^{-16} \text{V cm}^2$ 근처에서 급격히 증가하는 반면, He^* 와 He^+ 의 반응정수는 $1.5 \times 10^{-16} \text{V cm}^2$ 근처에서 급격히 증가하며 반응정수도 10^{-1} 정도 차이가 생기는 것을 알 수 있다. 이것은 Kr 과 He의 단면적 데이타에서 Kr의 운동량 전달 단면적이 He의 운동량 전달 단면적보다 크고, He^* 와 He^+ 이 $Kr^+ = 14 \text{ eV}$, $Kr^* = 10 \text{ eV}$ 상태보다 높은 에너지인 각각 19.8 eV , 24.6 eV 를 갖기 때문이다. < 그림 5 > 는 Kr^* 및 He^* 와 전자와의 초탄성 충돌에 의한 반응정수를 나타내었다. E/N 이 $1.0 \times 10^{-16} \text{Vcm}^2$ 근처에서 부딪는 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

3 - 2. KrF^* 의 생성, 탈어기 및 흡수 반응기구

< 표 - 1 > 은 KrF^* 의 생성, 탈어기 및 흡수의 주변 반응기구와 반응정수이다. < 그림 6 > 은 가압전압의 변화에 대한 KrF^* 생성비율 나타냈다. 그림에서 낮은 가압전압에서는 $Kr^+ + F_2 \rightarrow KrF^* + F$ 의 반응기구가 큰 비율을 차지하는 반면, 높은 가압전압에서는 $Kr^+ + F^-$

TABLE I. Main reactions and rate constants in a He/F2/Kr system.

reactions	rate constants
$Kr^+ + F_2 \rightarrow KrF^* + F$	$7.2 \times 10^{-16} \text{cm}^2/\text{s}$
$Kr^+ + F^- \rightarrow KrF^*$	7.1×10^{-16}
$Kr^{2+} + F^- \rightarrow KrF^* + Kr$	2.0×10^{-16}
$Kr^{2+} + F_2 \rightarrow KrF^* + Kr + F$	5.0×10^{-16}
$Kr^+ + F_2^+ \rightarrow KrF^* + F$	7.2×10^{-16}
$KrF^* + e \rightarrow Kr + F + e$	2.0×10^{-16}
$KrF^* + Kr \rightarrow 2Kr + F$	1.7×10^{-16}
$KrF^* + F_2 \rightarrow 2F + Kr$	7.8×10^{-16}
$KrF^* + 2Kr \rightarrow Kr_2F^* + Kr$	$6.7 \times 10^{-16} \text{cm}^2/\text{s}$
$KrF^* + He \rightarrow Kr + F + He$	$5.0 \times 10^{-16} \text{cm}^2/\text{s}$
$KrF^* + 2He \rightarrow Kr + 2He + F$	$5.0 \times 10^{-16} \text{cm}^2/\text{s}$
$KrF^* + He + Kr \rightarrow 2Kr + He + F$	5.0×10^{-16}
$He^* + hv \rightarrow He^+ + e$	$4.8 \times 10^{-16} \text{cm}^2$
$Kr^* + hv \rightarrow Kr^+ + e$	5.2×10^{-16}
$Kr^+ + hv \rightarrow Kr^+ + e + Kr$	1.6×10^{-16}
$F_2 + hv \rightarrow 2F$	1.2×10^{-16}
$F^- + hv \rightarrow F + e$	5.6×10^{-16}
$Kr_2F^* + hv \rightarrow 2Kr + F$	1.6×10^{-16}

$\rightarrow KrF^*$, $Kr_2^+ + F \rightarrow KrF^* + Kr$ 에 의한 반응기구의 비율이 커지는 것을 알 수 있다. 이는 가압전압이 높아짐에 따라 여기밀도가 증가하기 때문이다. < 그림 7 > 은 가압전압에 대한 KrF^* 탈어기 체널을 나타냈다. 낮은 가압전압에서는 F_2 와 He에 의한 KrF^* 탈어기가 큰 반면 높은 가압전압에서는 전자에 의한 KrF^* 탈어기가 증가하는데, 이의 원인으로 고밀도 여기가 되기 때문이다. 또한 KrF^* 파장의 흡수는 주로 F_2 와 Kr^* 에 의해서 이루어 지는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구실에서는 UV에비전리 방전기기 He/Kr/F2계의 KrF 레이저의 포괄적인 모형을 개발하고, 이를 이용하여 방전중 KrF^* 생성, 탈어기 및 흡수에 기여하는 반응기구에 대하여

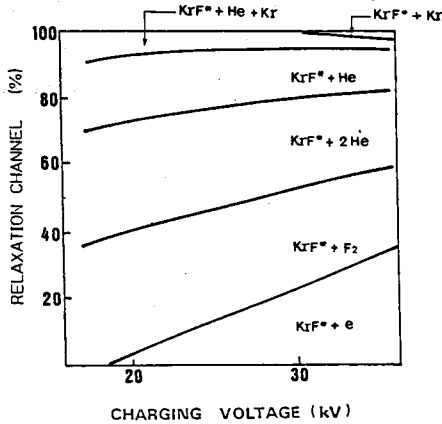


Fig. 6 Variations of the percent contribution of the KrF^* formation channels with the charging voltage.

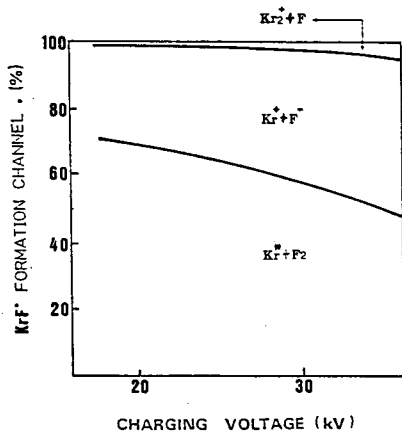


Fig. 7 Variations of the percent contribution of the KrF^* relaxation channels with the charging voltage.

연구하였다. KrF^* 의 생성은 $Kr^+ + F_2$, $Kr^+ + F^-$ 의 반응기구에 의해, 나머지는 F_2 , $2He$, He , e 에 의해서 이루어 지는 것을 알수 있었으며 또한 흡수는 대부분은 F_2 , Kr^* 로 이루어 졌다.

본 시뮬레이션 모드는 엑사이머 레이저의 발전 특성해석은 물론 대용량 레이저 시스템 개발에 이용할수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1]. R.Burnham, N.W.Harris, and N.Djeu, "Xenon fluoride laser excitation by transverse electric discharge", *Appl. Phys. Lett.*, 28, 86-87(1976)
- [2]. R.Burnham, N.Djeu, "Ultraviolet-Preionized discharge-pumped lasers in XeF, KrF, and ArF", *Appl. Phys. Lett.*, 29, 707-709(1976)
- [3]. D.G.Sutton, S.N.Suchard, O.L.Gibb, and C. P.Marg, "Fast-discharge-initiated KrF laser", *Appl. Phys. Lett.*, 28, 522-523(1976)
- [4]. A.E.Green and C.A.Brau, "Theoretical studies of UV-Preionized Transverse discharge KrF and ArF Laser", *IEEE J. Quantum Electron*, QE-14, 951-957(1978)
- [5]. T.Mizunami, M.Maeda, O.Shimomura, and Y. Miyazoe, "Computer Simulation for UV Preionized discharge KrF laser", *The laser society of Japan*, 9(5), 52-64(1981)
- [6]. B.Y.Choi, J.K.Jeong, C.H.Lee, "Analysis of Discharge Characteristics of Charge Transferred KrF Laser System", *KIEE.T.* 38 (10), 788-794(1989)
- [7]. K.Yukimura, M.Kubota, K.Naito, S.Kato, Y. Kawakita, Y.Goino, "Electrical Characteristics of UV-Preionized Discharge-Pumped KrF laser", *T.IEE Japan*, 109-A, 9-16(1989)