

방전여기 KrF 레이저 장치의 방전특성 해석

정 재근\*, 최 부연, 이 주의

경희대학교 전자공학과

The Analysis of Discharge Characteristics for Discharge Excited KrF Laser System

JAE - KEUN JEONG\*, BOO - YEON CHOI, CHOO - HIE LEE

Dept. of Electronic Engineering, Kyung Hee Univ.

ABSTRACT

In discharge excited excimer laser, it is hard to say that the analysis of laser operation was well explained until now. But this can be improved by analysing the nonlinear discharge characteristics in the cavity. The nonlinear characteristics can be analysed by solving the nonlinear resistance which depends on electron mobility and number density.

We can calculate the electron mobility and number density each other using Boltzmann equation and Kinetics equation. So we calculated the nonlinear resistance and analysed nonlinear discharge characteristics.

1. 서론

자외역 영역을 중심으로 고효율, 대출력의 방전하는 희가스 할라이드계의 액사이드 레이저는 최근 여러 응용분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 특히 방전여기 방식의 경우 반도체 미세 가공공의 실질적인 분야에서 각광을 받고있다.

그러나 방전여기 방식은 전자빔 여기방식에 비해 효율이 낮으며 그 시뮬레이션의 신뢰성도 뒤떨어져 있다. UV 예비전리 방식의 시뮬레이션은 Green 과 Braue 에 의해 처음으로 보고되었으며[1], 여러가지 실험결과와의 비교가 행하여지고 있으나 방전회로를 포함한 방전과정의 기술이 복잡하고 또한 많은 가정을 포함하기 때문에 그 계산의 정확도가 충분하게 보증되는 것이 아니다.

그러므로 본 연구에서는 방전관 내의 비선형 방전저항을 플라즈마 카이네틱스 방정식과 볼츠만 방정식을 이용하여 구하므로써 신뢰성 높은 시뮬레이션 모드를 개발하여 대출력 및 고효율화의 지침을 얻고자한다.

2. 용량이행형 방전여기 장치의 비선형 방전 특성의 해석

2-1. 비선형 방전저항의 계산

본 실험에서 사용한 용량이행형 방전여기 장치의 등가회로는 그림 1과 같다. 각회로 정수는 실험 및 이론적으로 간단히 구해지며 또한 가정하여 표시한 것이다. 그러나 비선형 방전저항 Rd는 레이저 방전관의 내부 저항으로, 플라즈마 다이내믹스에 의해서 계산되는 것으로 다음과 같은 수식으로 표현된다[2].

$$Rd = d / ( e A \mu_e n_e ) \text{ ----- 식(1)}$$

여기에서 d는 전극의 간격, e는 전자의 전하, A는 방전 유효단면적,  $\mu_e$ 는 전자의 이동도,  $n_e$ 는 전자의 수밀도를 나타낸다.

방전저항이 비선형성을 나타내는 것은 전자의 이동도  $\mu_e$ 와 전자의 수밀도  $n_e$ 가 전계강도 E에 의해서 변하기 때문이다. 그러므로 전자의 이동도  $\mu_e$ 와 수밀도  $n_e$ 를 구하므로써 비선형 방전저항을 구할 수 있는데 이들은 각각 볼츠만 방정식(Boltzmann equation)과 카이네틱스 방정식(Kinetics equation)으로 부터 구해진다.

비선형 방전저항 Rd를 구하는 다이어그램은 그림 2에 나타내었다.

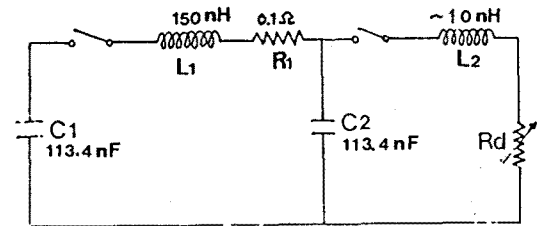


그림 1. 용량이행형 방전여기 장치의 등가회로

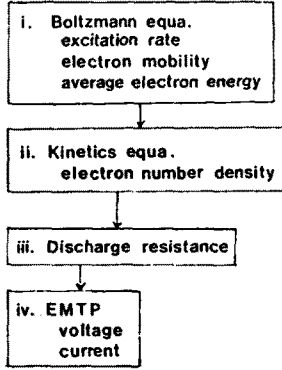


그림 2. Rd를 구하는 다이어그램

2-2. 볼츠만(Boltzmann) 방정식

전자와 각 입자와의 충돌과정 반응정수는 전자가 지니는 에너지에 의존하므로 방전형의 경우 플라스마내의 전자 에너지의 분포를 알아야 하므로 볼츠만 방정식을 사용하여 전자의 에너지 분포함수를 계산한다. 일반적으로 정상상태의 볼츠만 방정식은 다음과 같다[3].

$$\begin{aligned}
 & (1/3) (E/N)^2 (d/du) (u/Q_1) (df/du) \\
 & + (2m/M) (d/du) (u^2 Q_2 f) \\
 & + (2mkT/Me) (d/du) (u^3 Q_2) (df/du) \\
 & + \sum_j (u + u_j) f(u + u_j) Q_j(u + u_j) \\
 & - uf(u) \sum_j Q_j(u) \\
 & + \sum_j (u - u_j) f(u - u_j) Q_j(u - u_j) \\
 & - uf(u) \sum_j Q_j(u) = 0 \quad \text{----- 식 (2)}
 \end{aligned}$$

여기에서

- $M = \sum_n M^n G^n$ ,
- $Q_1(u) = \sum_n Q_{1n}^n(u) G^n$ ,
- $Q_2(u) = \sum_n (M Q_{2n}^n(u) G^n / M^n)$ ,
- $u$ : 전자 에너지,  $E$ : 전계강도,
- $N$ : 전 가스 입자밀도의 총합,
- $T$ : 가스온도,  $k$ : 볼츠만 상수,
- $e, m$ : 전자의 전하 및 질량,
- $M^n, G^n$ : 성분  $n$ 의 분자질량과 몰분율,
- $M$ : 평균 분자질량,
- $Q_{1n}^n(u)$ : 성분  $n$ 의 운동량 전달단면적
- $Q_j(u)$ :  $j$  번째 비탄성 충돌단면적,
- $Q_j(u)$ :  $j$  번째 초탄성 충돌단면적

을 나타낸다.

이 방정식은 정상상태의 경우 성립하는 것이지만 입자의 평균 충돌시간이 수 pico초 정도이고, 또한 1 nsec이하에서 평균화된다고 생각된다. 따라서 볼츠만 방정식은 각각의 E/N에 따라 준안정상태의 분포함수  $f(u)$ 를 계산한다.

계산에 사용한 Kr와 He의 운동량전달 단면적(momentum transfer cross-section), 여기 및 이온화 단면적(excitation and ionization cross-section)

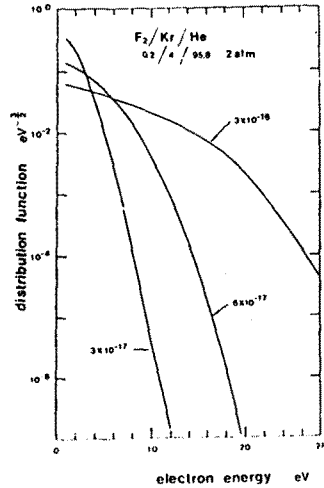


그림 3. 전자에너지 분포함수

-tion)의 데이터는 각각 참고문헌 [4],[5]를 참고하였다. F<sub>2</sub>의 전자와의 충돌은 F<sub>2</sub>의 양이 극소수이기 때문에 볼츠만 모드에서는 포함하지 않았다. 또한 초탄성충돌(superelastic) 단면적은 비탄성충돌(inelastic) 단면적과 관련되어 있지만 분포함수에서 무시할 수 있을 정도이므로 고려하지 않았다[6]. 전자-전자의 충돌도 무시하였다. 식 (2)는 다음과 같이 규격화된다.

$$\int_0^\infty u^{1/2} f(u) du = 1 \quad \text{----- 식 (3)}$$

전자의 분포함수  $f(u)$ 가 위의 식과 같이 표현되면 전자의 이동도  $\mu$ 와 전자의 평균 에너지  $\bar{u}$ 는 다음의 식으로 표현 가능하다.

$$\mu_e = (1/3N) (2e/m)^{1/2} \int_0^\infty (u/Q_1) (df/du) du \quad \text{--- 식 (4)}$$

$$\bar{u} = \int_0^\infty u^{3/2} f(u) du \quad \text{----- 식 (5)}$$

또한 반응과정  $j$ 의 반응계수  $K_j$ 는

$$K_j = (2e/m)^{1/2} \int_0^\infty Q_j(u) u f(u) du \quad \text{-----식 (6)}$$

로 계산된다.

그림 3,4,5는 각각 볼츠만 모드로 구한 E/N에 따른 전자의 에너지 분포함수  $f(u)$ , 각 반응과정의 반응계수  $K_j$ , 전자의 표류속도(drift velocity)  $V_d$  및 전자의 이동도  $\mu_e$ 를 나타낸 것이다. 이는 M.Maeda 등[2]이 계산한 결과와 비교해 볼때 잘 일치하였다.

전자충돌에 의한 Kr\*와 Kr+의 생성정수는 그림 4에서와 같이 E/N이 작은 곳에서는 전자가 느리지만 E/N이  $3.0 \times 10^{-16} \text{ V cm}^2$  이상에서는 역전함을 알 수 있다. 이에 대해 He\*와 He+의 생성정수는 E/N이 작은 곳에서는 극히 작다. 이것은 He의 여기상태가 19.8 eV 또는 높은 레벨에 있기 때문이다.

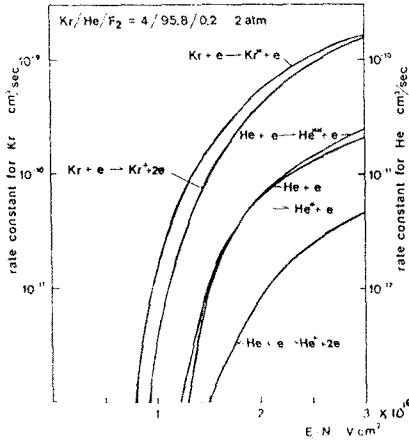


그림 4. Kr과 He의 반응정수

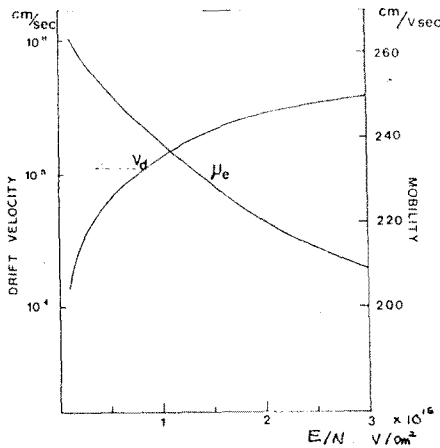


그림 5. Vd 및 μe

2-3. 카이네틱스 방정식

방전관 내의 액사이머와 각종 순간정 원자, 이온의 생성, 소멸은 표 1에 나타난 것과 같은 입자간의 반응을 고려하고, 각 반응계수를 사용하여 카이네틱스 방정식을 세워 계산한다. 전자의 수밀도  $n_e$ 를 구하는 수식은 일반적으로 다음의 식으로 주어진다.

$$d n_e / dt = S + (v_i - \beta) n_e \text{ -----식 (7)}$$

여기에서 S는 UV 예비전리에 의해 생성되는 전자-이온쌍의 비율상수,  $v_i$ 는 2차전자에 의한 이온화 비,  $\beta$ 는 부착비를 나타낸다.

카이네틱스 방정식은 미지수로서 e, Kr\*, Kr+, Kr<sub>2</sub>\*, Kr<sub>2</sub>+, He\*, He+, He<sub>2</sub>\*, He\*\*, He<sub>2</sub>, KrF\*, Kr<sub>2</sub>F\*, F<sup>-</sup>, F<sup>+</sup> 및 광자밀도 Nph를 위하여 15개의 연립 상미분 방정식이 된다.

F<sub>2</sub>의 burn up은 없는 것으로, 그리고 Kr, He, F<sub>2</sub>의 밀도는 일정한 것으로 하였다. 전자의 충돌에 기여하는 반응정수는 E/N의 변화에 따라 볼츠만 코드에 계산한다.

표. 1 KrF Kinetic Reactions

e + Kr	→	Kr* + e
e + Kr	→	Kr + 2e
e + Kr*	→	Kr + 2e
e + Kr*	→	Kr + e
e + He	→	He + 2e
e + Kr <sub>2</sub> <sup>+</sup>	→	Kr* + Kr
e + He*	→	He + e <sup>-</sup>
e + He <sup>+</sup>	→	He <sub>2</sub> * + hv
e + F <sub>2</sub>	→	F <sup>-</sup> + F <sup>+</sup>
Kr <sup>+</sup> + F <sup>-</sup>	→	KrF*
Emission & Quenching		
KrF* + F <sub>2</sub>	→	Kr + 3F
KrF*	→	Kr + F + hv
Kr <sub>2</sub> F*	→	hv + 2Kr + F
Absorption		
Kr* + hv	→	Kr <sup>+</sup> + e
F <sup>-</sup> + hv	→	F + e
Kr <sub>2</sub> F* + hv	→	products
He* + hv	→	He <sup>+</sup> + e

UV 예비전리의 효과는 단순히 전자의 정상적인 발생으로 하여 카이네틱스 방정식에 받아들였다. 전자의 발생율, 전자의 초기밀도, F의 초기밀도는 예비전리의 효과를 R.C.Sze 등의 측정 결과와 같은 정도[7]로 생각하여 각각  $1 \times 10^{16} \text{ sec}^{-1} \text{ cm}^{-3}$ ,  $5 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ ,  $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 로 하여 계산하였다. 그림 6는 각각의 입자밀도를 시간변화에 따라 나타낸 것이다.

전자의 수밀도는  $3 \times 10^{16}$  정도의 최고치를 나타내었으며, 이의 시간에 대한 변화는 방전 전류파형과 거의 비슷한 형태를 가지리라 생각된다.

2-4. EMTP[8]를 이용한 방전 전압 및 전류의 계산

일단 방전관 내의 비선형 저항 Rd가 구해지면 방전 전압 및 전류는 회로방정식에 의해서 구한다. 그러나 본 연구에서는 따로 회로방정식을 세우지 않고 최근 선진국에서 과도현상의 고찰에 많이 사용하는 EMTP (Electro-Magnetic Transients Program)[8]를 이용하여 방전 전압 및 전류의 과도현상의 특성을 고찰하였다.

그림 7은 EMTP를 이용하여 구한 방전 전압 및 전류의 파형과 방전 저항 Rd를 시간의 변화에 따라 표시한 것이다. 방전 전류는 방전 전압의 최대치에서 시작하며 방전 저항은 무한대의 값에서 시작하여 곧바로 방전이 지속될 때에는 0.2Ω의 값을 유지한다. 물론 이 방전 저항은 방전관 내의 플라즈마 다이내믹스 저항과 회로 내의 저항을 합한 것이다. 그림 1의 등가회로에서 표시한 바와 같이 회로 내의 저항값을 0.1Ω으로 가정할 때 방전관 내의 플라즈마 다이내믹스 저항은 그 최소치가 0.1Ω

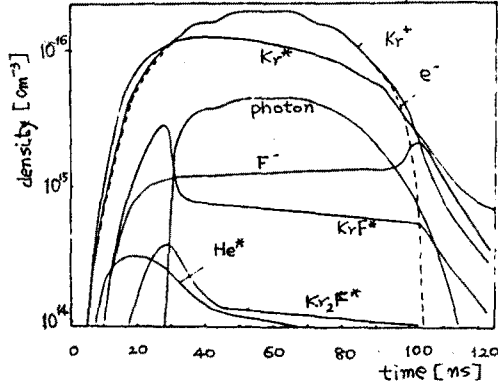


그림 6. 각 가스입자의 시간에 대한 변화

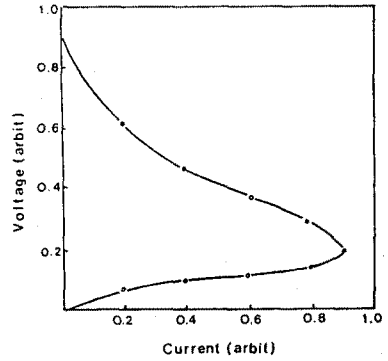


그림 8. 규격화한 전압 및 전류

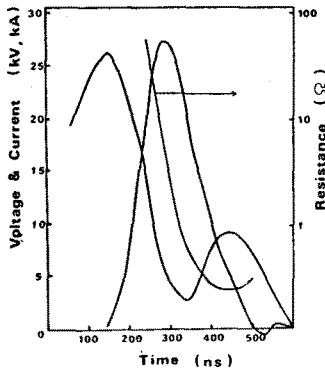


그림 7. 방전 전압 및 전류, Rd

입을 알 수 있다.

그림 8은 방전 전압 및 전류 특성을 나타내 수 것으로 동일 시각에서의 전압과 전류를 동시에 표현한 것이다. 전압이 낮은 상태에서 높은 전류가 형성되므로써 방전여기의 경우 방전 전류에 크게 좌우됨을 알 수 있었다. 즉 방전여기 액사이머 레이저의 고출력화 및 고효율화의 조건으로서 효과적인 준안정(metastable)상태의 형성을 위하여 방전관 부분의 인덕턴스를 10 nH 이하로 하여 빠른 전류 상승시간을 얻어 아함을 알 수 있다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 방전여기 방식의 액사이머 레이저의 신뢰성 높은 시뮬레이션 코드를 개발하기 위한 한 방안으로 비선형 방전 저항을 구하였다. 비선형 방전 저항은 방전관 내의 방전 저항으로서 식(1)에서와 같이 방전의 플라즈마 역학에 의해 결정되므로 볼츠만 방정식과 카이네틱스 방정식에 의해 구하였다. 그 결과

플라즈마 역학에 의한 저항의 최소치는 0.1Ω 이고 외부내의 저항치를 0.1Ω 으로 하여 계산하였다. 비선형 방전저항을 구한후 방전관내의 회로해석은 EMTP를이용하여 행하였다. 그 결과 방전 전압의 최고치는 약 26 kV, 전류의 최고치는 28 kA를 얻었다.

액사이머 레이저의 고출력 및 고효율화를 위해서는 방전관 내의 인덕턴스를 최소화하므로써 빠른 전류상승시간이 필요하다는 것을 알 수 있다.

### 참고문헌

- [ 1 ] A.E.Greene and C.A.Brau, IEEE J.Quantum Electron, QE-14(12),951(1978)
- [ 2 ] M.Maeda et al, Japan J. Appl. Phys.,21(8), 1161(1982)
- [ 3 ] K.Smith, R.M.Thomson, " Computer Modeling of Gas Lasers ",Plenum Press, N.Y.(1978)
- [ 4 ] D.Rapp and P.Englander- Golden J.Chem.Phys.,43, 1464(1965)
- [ 5 ] D.Ton-That and M.R.Flannery, Phys.Rev., A 15, 517(1977)
- [ 6 ] R.C.Sze and T.R.Loree, IEEE J.Quantum Electron, QE-14(12),944(1978)
- [ 7 ] R.Burnham, et al, Appl. Phys. Lett., 28, 86 (1976)
- [ 8 ] H.W.Dommel, IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-88(4),388 (1969)