

자외선 예비전리 KrF 레이저의 방전특성 해석

최 부 인 *, 이 주 의
 경 의 내 학 교

Analysis of discharge characteristics of
 KrF laser system with UV preionization.

Boo Yeon Choi *, Choo Hye Lee
 Kyung Hee Univ

ABSTRACT

We have developed analysis program of discharge characteristics of KrF laser system with charge transfer type, that studied about deposited energy, nonlinear discharge, and electron number density in the laser tube. With this program, voltage, current, and deposited energy was calculated 27 KV, 32.6 KA, 200 MW at total pressure 2 atm and charging voltage 33 KV, respectively. At this condition, circuit parameters are $L1=150nH, R1=0.3\Omega, L2=15nH, R2=0.3\Omega$. In addition, nonlinear discharge resistance and electron number density was calculated $40 \sim 0.17\Omega, 1 \times 10^{16} cm^{-3}$, respectively.

1. 서론

1976년 R. Burnham 등은 UV예비전리 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 시스템의 전기적 특성과 출력 특성에 영향을 준다. 더욱이 엑사이머 레이저의 경우, 엑사이머의 반응과정은 레이저관의 구동전계 E에 따라 크게 변화한다. 따라서 레이저 특성의 이론적 해석은 레이저관의 방전중에 형성되는 Plasma dynamics와 엑사이머의 형성과정을 종합적으로 취급을 하여야 한다. 이와같은 이론적 해석의 시뮬레이션을 KrF 레이저와 ArF 레이저에 대하여

처음 시도한 것은 Greene와 Brau이다[4]. 이후 엑사이머 반응소과정 연구 및 회로해석의 발달로 컴퓨터 시뮬레이션 보고는 많이 있으나, 특히 Mizunami 등의 보고는[5] 자작한 KrF 레이저를 모델로 시뮬레이션을 실험과 비교하여 매우 정도가 높은 파라미터를 해석하였다.

레이저의 대출력과 및 고효율화를 달성하기 위하여 레이저 매질의 조건 이외에 레이저 시스템의 전기적 특성을 파악하는 것은 매우 중요한 과제이다. 본 논문에서는 KrF 레이저의 최적화에 필요한 파라미터를 해석하기 위하여 UV예비전리 용량이행형 방식의 레이저 시스템을 모델로 이의 전기적 특성을 컴퓨터 시뮬레이션 하였다. 이의 구성은 레이저관의 방전 전압을 유도하기 위한 볼프만 방정식 및 카이네틱 방정식과 방전중의 전압, 전류를 해석하는 EMTP로 하였다.

2. 시뮬레이션 모델링

2-1. 모델의 등가회로

시뮬레이션 모델로 설정한 용량이행형 방전여기 KrF 레이저의 등가회로는 <그림-1>과 같다. 이 장치는 반도체 미세가공용으로 개발되었고, 레이저 출력은 100 [mJ/pulse], 펄스폭 20ns [FWHM]을 목표로 장수명과 실험을 진행 중에 있다[6]. 그림1과 같이 1차속의 Storage 콘덴서 C1과 2차속의 Peaking 콘덴서 C2는 BaTiO3 계의 세라믹 콘덴서를 사용하였고, 용량은 각각 113.4 nF이다. C1과 C2는 회로내의 인덕턴스를 최소화 하기 위하여 레이저관의 전극에 인접하여 배열하였다. 예비전리 용 핀은 주전극 양단에 각각 30 개를, 핀 간격은 2mm로 구성하였다. 예비전리는 C1의 전하가 트리거 스위치에 의해 C2로 이송될 때 핀의 아아크 방전 때문에 형성된다.

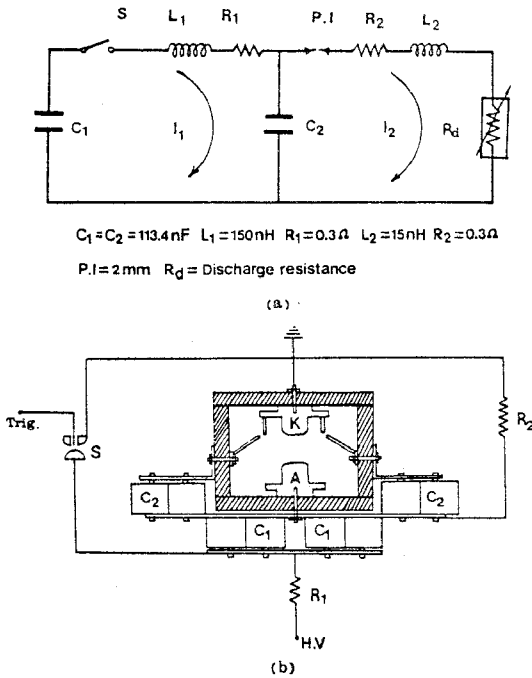


Fig. 1 Equivalent circuit of KrF laser with UV preionization; S = gap switch, P.I. = preionization gap.

TE방식으로 구성된 주전극의 유효길이는 60 cm, 전극 간격은 2 cm이고, 황동 재료를 준 Chang 형으로 가공하여 평행으로 배치하였다. 레이저 공진기의 레이저창과 출력거울은 CaF₂ 재를 사용하였고, 레이저 매질은 최대출력의 경우 Kr/He/F2 = 4/95.8/0.2 (X)의 혼합비에서 2.2 atm이다. 등가회로에서 L1과 R1은 C1에 충전된 전하가 C2로 이송할때 부피의 인덕턴스 및 저항이다. 이때 인덕턴스 L1은 권회수 1 회의 솔레노이드($L_1 = \mu_0 N^2 l$)로 가정하여 L1 = 150 nH이다. 또한 측정된 I1의 파형으로 계산된 R1은 0.3Ω이다. 이때 전류 파형은 Rogowski모일로, 전압파형은 CuSO₄ 분압기를 사용하여 Tektronix 2465로 측정하였다.

2 - 2. 흐름도

모델의 시뮬레이션 흐름도는 <그림-2>와 같이 초기값, 볼츠만 방정식, 카이네틱스 방정식 및 EMTP로구성하였다[7].

흐름도에서 초기값들은 구동전계 E와 레이저 혼합가스 He, Kr 및 F2등의 단면적이다. 이때 준 안정상태 Kr*, He*가스의 이온화 단면적은 D.Ton-That보고[8], 희가스의 전자 부착과 이온화 단면적은 D.Rapp 보고[9], F2가

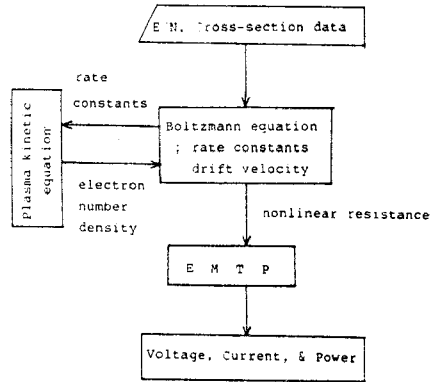


Fig. 2 Flowchart of analysis program of discharge characteristics of KrF laser.

스의 단면적은 M.Hayashi 등의[10] 데이터를 사용하였다. 볼츠만 방정식의 해의 초기값은 $f_i - f_{i-1} = 10^{-20}$ 이다. 플라즈마 카이네틱스 방정식의 초기값은 UV예비전리 전자수밀도 및 F⁻ 밀도를 각각 $5 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ 와 $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 로 하였다[11,12].

볼츠만 방정식에서는 전자분포함수, 전자와 혼합가스의 충돌에 의한 반응정수 및 이동속도등을 계산하고, 플라즈마 카이네틱스 방정식에서는 전자수밀도를 계산하였다. 또한 비선형 방전저항은 전자수밀도와 이동속도로 계산하였고, 회로 방정식은 EMTP로 해석하였다. 이때 사용한 EMTP는 Version M21 이다[13].

3. 레이저 시스템의 방전특성

3 - 1. 회로 정수

<그림-3>는 L1 = 150nH, L2 = 15nH, R2 = 0.3Ω으로 고정하고 R1 = 0.1Ω, 0.3Ω으로 변화시켰을 때의 방전 전압파형이다. 그림에서 R1이 작은경우 전압의 최대값과 강하시간이 빨라진다. 그러므로 C1에서 C2로 전하의 전달효율을 크게하기 위해 R1의 값을 작게해야 한다.

<그림-4>는 L1 = 150 nH, R1 = 0.3Ω으로 고정하고 L2 = 10 nH ~ 30 nH, R2 = 0.1Ω, 0.5Ω으로 변화 시켰을때의 결과이다. 그림에서 L2 값이 작을수록 전류상승 시간이 빨라지고 전류 최대값도 커지는 것을 알 수 있다. 그러므로 방전관의 속직 에너지를 크게하기 위해서는 L2 값을 작게 해야한다.

<그림-5>는 회로정수 L1 = 150 nH, R1 = 0.3Ω, L2 = 15 nH, R2 = 0.3Ω에서 측정된 방전전압과 시뮬레이션 계산에 의한 방전전압을 나타냈다. <그림-5>와 같이 측정된 전압 파형과 계산한 전압파형이 거의 일치 하였다.

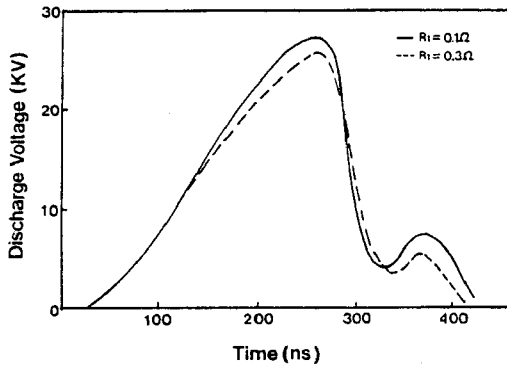


Fig. 3 Temporal histories of discharge voltage. The circuit parameter is $L1 = 150 \text{ nH}$, $L2 = 15 \text{ nH}$, $R2 = 0.3 \Omega$.

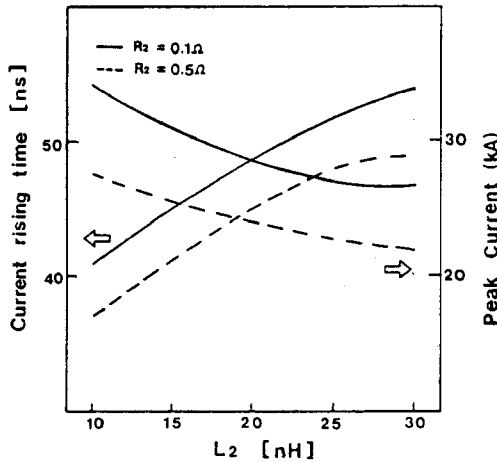


Fig. 4 Discharge current and rising time as a function of $L2$. $L2 =$ laser head inductance.

이때 충전전압, 전체압력, 가스혼합비는 각각 33 KV, 2atm, Kr/He/F₂ = 4/95.8/0.2 (%)이다. 컴퓨터 시뮬레이션 계산에 의한 방전 전압의 최대값, 상승시간, FWHM은 각각 27 KV, 170 ns, 160 ns였으며, 방전전류는 각각 32.6 KA, 43 ns, 69 ns 이었다. 이때 방전관의 속직 에너지는 200 MW이다.

3 - 2. 방전저항

E/N 에 대한 이동도의 변화를 <그림-6>에 나타내었다. E/N 이 증가함에 따라 이동도가 감소함을 알수 있다. 왜냐하면 그림에서 E/N 이 증가함에 따라 드리프트 속도가 증가하지만, 일정압력 2 atm 에서 구동전계가 더 빠르게 증가하기 때문이다. <그림-7>은 전자수밀도와 방전저항의 변화를 나타낸다. 이때 전체

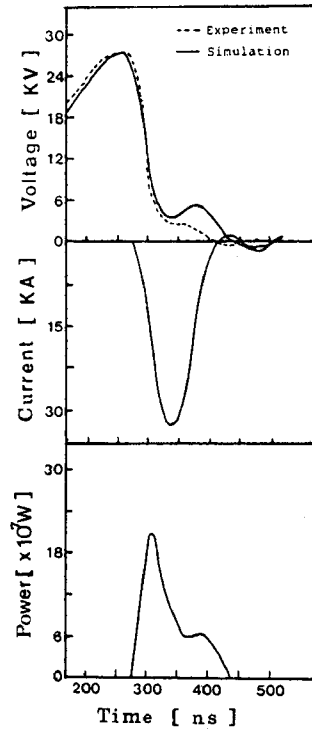


Fig. 5 The comparison of the theoretical voltage, current, and deposition power, which are calculated by EMTP, and measured voltage; charging voltage = 33 KV; total pressure = 2atm; gas mixture = Kr/He/F₂ = 4/95.8/0.2 (%).

입력 2 atm, 가스혼합비 Kr/He/F₂ = 4/95.8/0.2 %, <그림-5> 와 같은 회로정수 조건이다. 방전저항 R_d 는 무한대의 저항값에서 ~ 0.17Ω 으로 변화하고, 전자수밀도는 최대값 1 x 10¹⁶ cm⁻³, 펄스폭 110 ns이다.

3 - 3. 전자분포함수 및 반응정수

<그림-8>은 볼츠만 방정식으로 부터 계산한 전자 에너지에 대한 전자 에너지 분포함수 f(u) 를 나타낸 것이다. 2 기압, Kr/F₂/He = 4/0.2/95.8 %에서 E/N 이 증가함에 따라 높은 전자 에너지를 갖는 전자의 분포가 커지는 것을 알수 있다. 2 atm, Kr/F₂/He/Ne = 4/0.2/47.9/47.9 (%) 의 경우 He보다 높은 전자에너지 분포가 더 큰것을 알수있다. 특히 Kr* = 9.9 eV, Kr* = 14.0 eV임을 감안 할때 그림에서 10 eV 에서부터 He/Ne 이 높은 전자에너지 분포가 크기 때문에 효율이 높을 것으로 기대된다.

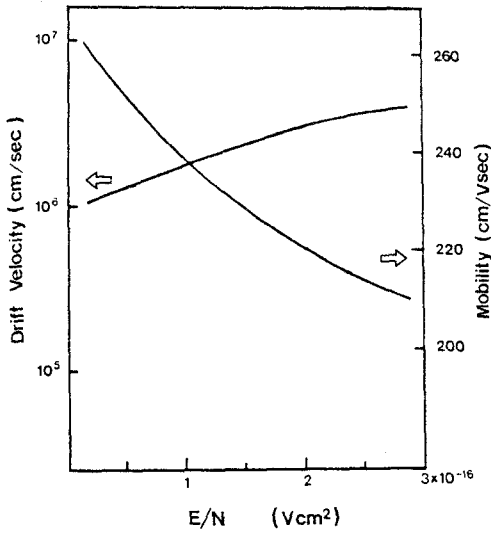


fig.6 Electron mobility and drift velocity as a function of E/N.
Kr/He/F2 = 4/95.8/0.2 %
Total pressure = 2 atm

E/N에 대한 Kr 및 He 과 전자와의 충돌에 의한 반응정수를 <그림-9>에 나타내었다. 전자 충돌에 의한 Kr* 와 kr*의 반응정수는 E/N 이 $1 \times 10^{16} \text{ V cm}^2$ 근처에서 급격히 증가하는 반면에, He* 와 He 의 반응정수는 $1.5 \times 10^{16} \text{ V cm}^2$ 이상에서 부터 증가한다. 또한 E/N 이 $3 \times 10^{16} \text{ V cm}^2$ 에서 반응정수가 10^1 정도 차이가 생기는 것을 알수 있다. 이것은 Kr 과 He의 단면적 대이타[15,16]에서 Kr의 운동량 전달 단면적이 He의 운동량 전달 단면적보다 크고, He* 와 He* 이 Kr* = 14 eV, Kr* = 9.9 eV 상태보다 높은 에너지인 19.8 eV, 24.6 eV를 갖기 때문이다.

4. 결 론

본 연구실에서 개발한 장치의 전압파형은 실험치와 계산치가 거의 일치 하였으며, 계산된 방전전압, 전류의 최대값 및 방전관의 축적에너지는 각각 27 KV, 32.6 KA, 200 MW 이었다.

실험값과 비교하여 최적화된 회로 정수는 L1 = 150 nH, R1 = 0.3Ω, L2 = 15 nH, R2 = 0.3Ω 이다. 이때 비선형 방전저항의 최소값은 0.17Ω, 전자수밀도의 최대값은 10¹⁶ cm⁻³ 이었다

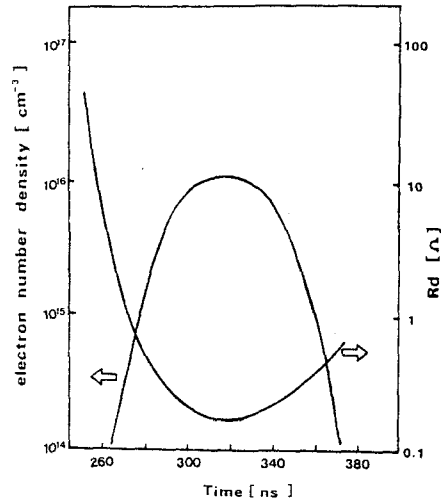


Fig.7 Electron number density and nonlinear discharge resistance as a function of time dependence. The condition is total pressure of 2 atm, DC charging voltage of 33 KV, and gas mixture of Kr/He/F2= 4/95.8/0.2 (%).

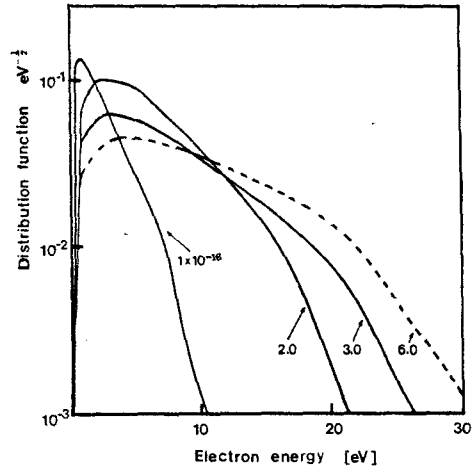


Fig.8 Electron energy distribution function.
—— ; F2/Kr/He= 0.2/4/95.8 (%).
- - - ; F2/Kr/He/Ne= 0.2/4/47.9/47.9(%).

L2값이 작을수록 방전전류 상승시간이 빨라지는 것을 알수 있었다. 그러므로 방전관의 축적에너지를 크게 하기 위해서는 가능한 한 등가회로에서 I2루프 길이를 짧게 해야한다. 또한 I1루프의 저항값이 작아야 C1에서 C2로 전하 전달 효율이 증가함을 알수 있었다.

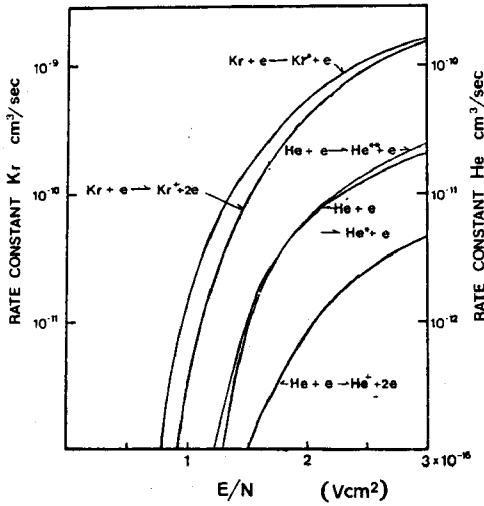


Fig. 9 Rate constants for electron collision process as a function of E/N. The gas mixture is Kr/He/F₂ = 4/95.8/0.2 (%) at 2 atm.

전자에너지 분포에서 He만을 버퍼가스로 사용 할때보다 He과 Ne을 혼합해서 사용하는 것이 효율면에서 유리할 것으로 판단된다.

본 시뮬레이션 모드는 엑사이머 레이저의 방전특성 해석에 유용하게 이용할수 있고, 또한 본 프로그램에서 광자수출 방정식과 반응정수들을 좀더 보완하면 대용량 레이저 시스템 개발에 이용할수 있을 것으로 생각된다.

5. 참고문헌

- [1]. R.Burnham, N.W.Harris, and N.Djeu, Appl. Phys.Lett., 28, 86-87(1976)
- [2]. R.Burnham, N.Djeu, Appl.Phys.Lett., 29, 707-709(1976)
- [3]. D.G.Sutton, S.N.Suchard, O.L.Gibb, and C.P.Wang, Appl. Phys.Lett., 28, 522-523(1976)
- [4]. A.E.Green and C.A.Brau, IEEE J.Quantum Electron, QE-14, 951-957(1978)
- [5]. T.Mizunami, M.Maeda, O.Shimomura, and Y.Miyazoe, The laser society of Japan, 9(5), 52-64 (1981)
- [6]. 최부연, 이주희, '89 레이저 광기술 워크샵, 1~6(1989.6)
- [7]. 정계근, 석사학위논문, 경희대학교(1988.8)
- [8]. D.Rapp and P.Englander Golden, J.Chem. Phys., 43, 1464-1479(1965)
- [9]. D.Ton That and M.R.Flannery, Phys.Rev. A15, 517-526(1977)
- [10]. M.Hayashi and T.Nimura, J.Appl.Phys. 54(9), 4879-4882(1983)
- [11]. R.C.Sze and T.R.Loree, IEEE J.Quantum Electron., QE-14, 944-950(1978)
- [12]. J.Hsia, Appl.Phys.Lett., 30(2), 101-103 (1977)
- [13]. W.scott-Meyer, "EMTP user's Manual"(1978)