

전자빔 여기 KrF / XeCl 레이저의 개발  
Development of Electron - Beam Excited KrF / XeCl Lasers

이 주 의, 최 부 언  
( CHOO-HIE LEE\*, BOO-YEON CHOI )

경희대학교 전자공학과  
( DEPT. OF ELECTRONIC ENGINEERING, KYUNG HEE UNIV. )

김 용  
( UNG KIM )

연세대학교 물리학과  
( DEPT. OF PHYSICS, YONSEI UNIV. )

I. 서 론

의가스 할라이드 계통의 엑사이머는 자외선 영역에서 고효율의 레이저 발진을 할 수 있으므로 1975년 경부터 본격적인 연구가 시작되었다. [1]

현재까지 레이저 발진이 보고된 파장은 175 nm(ArCl) ~ 490 nm(XeF)의 영역에 있고 발진이 확인되지 않은 파장도 어마어마하다. [2] 최근의 연구 경향은 레이저의 실용화를 목표로 대출력과 고효율화에 있으므로 이에 적합한 전자빔 여기 KrF 레이저 (248 nm), XeCl 레이저 (308 nm) 에 연구가 집중되고 있다. 또한 핵융합의 Driver 와 광유기화학, 반도체 미세가공 등의 응용연구가 활발해지므로써 새롭게 각광을 받고 있다.

전자빔으로 엑사이머를 여기하는 방식은 다른 방식에 비하여 큰 용적의 활성 매질을 근밀하게 여기할 수 있으므로 대출력에 적합하고 또한 전자빔 장치의 기술이 확립되어 주로 전자빔 여기방식을 사용하고 있다. 본 연구실에서 발진이 확인된 것으로 ArF(193 nm), KrF(248 nm), XeCl(308 nm), XeF(354 nm) 레이저 등이 있는데 [3], 본 보고에서는 KrF, XeCl 레이저에 대해서 실험과 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 중심으로 보고한다.

II. 실험 장치

본 실험에서 사용한 장치는 일본의 Ku-bota[4] 등이 제안한 원리로서 가운데 gap 스위치 주위에 정교하게 동축형으로 콘덴서를 배열하여 잔류인덕턴스와 내부임피던스를 낮추었기 때문에 부하의 정합임

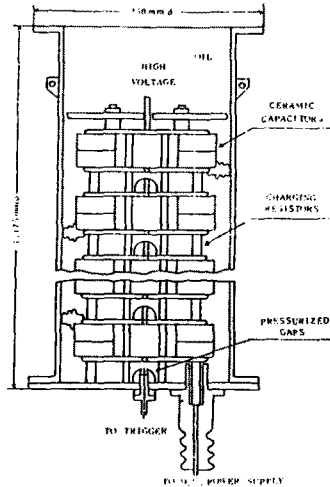


Fig.1 Cross-sectional View of MARX

피던스가 30 정도로 낮아서 빠른 상승시간 (rising time)의 큰 에너지를 갖는 펄스를 얻을 수 있다.

그림.1. 은 동축형 MARX 발생기의 내부 구조도이다. 본 실험장치의 구성은 10단으로서 직렬충전 방식이고 개폐시키는 BaTiO3계질의 세라믹 콘덴서 ( 2.5 nF, 30kV ) 2 개를 직렬연결 하였으며 그것을 다시 8 초로 병렬연결 하였을 때 1 단이 되며 충전저항은 10k 이다.

본 연구실에서 제작한 전자빔 장치는 최대전압 600 keV, 전류 2.5 kA이고 그림 .2. 은 전자빔장치의 출력파형으로서 본 실험에서 사용한 충전전압 42 keV, A - K gap 간격 10 mm 에서 측정하였다. 펄스 상승시간 5 ns 이내, 출력전압 320 keV, 펄스폭 35 ns (FWHM)로 나타났다.

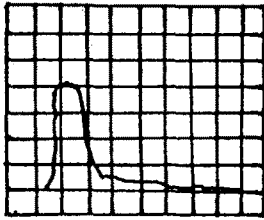


Fig.2 Output Voltage Waveform of MARX.

레이저 공진기는 전자빔의 방사속과 광속을 일치선 상에 있게끔 구성된 증속형이므로 공진기의 전반사경은 전자빔 발생 장치의 양극막으로 대치하였다. 따라서 빔의 반사손실은 매우 크다. 양극막은 50  $\mu\text{m}$  Ti foil, 음극은 25 mm의 carbon graphite이다. 공진기의 전자빔 속적단면적은 양극막 직후에서 855.3  $\text{mm}^2$ , 부과거리는 양극막에서 30 mm 이다. 이때 전자빔 패턴은 Nitto 사의 Rad color 필름 (No.381)으로 측정하고 에너지는 carbon graphite 를 사용한 carolimeter 로 측정하여 전자빔 속적에너지[5] 를 환산하였다.

KrF, XeCl 레이저에 대한 발전 실험을 하기전에 도우너 가스(F<sub>2</sub>, HCl)와 공진기 벽과의 입반응을 방지하기 위하여 각각 F<sub>2</sub>/He = 5/95%, HCl/Ar = 10/90% 로 1 일간의 passivation 을 시켰으며 에너지는 Gentec ED-500 으로 레이저 펄스는 Biplan-ar 공진관 R 1193U 로 측정하였다.

### III. 시뮬레이션 모델

엑사이머 레이저는 하위준위가 해리상태에 있으므로 1 준위 레이저로 볼 수 있기 때문에 모델화가 매우 용이하다. 따라서 전체 레이저 출력에너지 및 power 밀도, 효율에 대한 계산은 point source 모델로 충분히 높은 정도의 시뮬레이션을 할 수 있다. 본 시뮬레이션 모드에서는 전자빔 에너지 속적의 불균일에 따른 여기밀도, 흡수 소신호 이득 불균일, 또는 공진기 내의 불균일 파라메타를 무시하는 Fabry-Perot 공진기모 가정하고 0 차 모델로 시뮬레이션을 구성하였다.[4][16]

여기모델 작성의 첫번째 단계는 레이저 매질에 속적되는 전자빔 에너지의 계산으로 전자빔의 전압파형과 전류파형으로 평가되는 전자의 저지능(stopping power)에

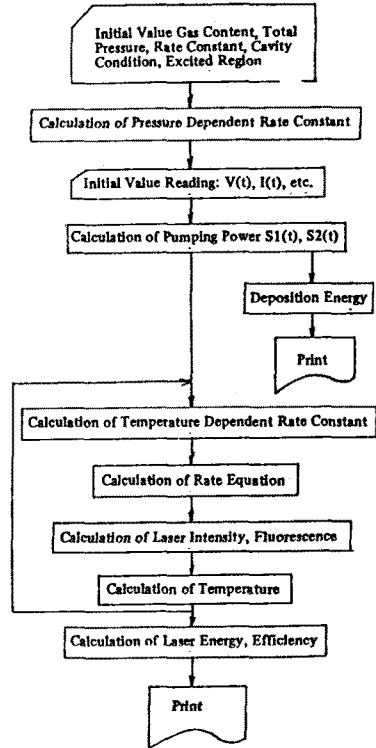


Fig.3 Flow-Chart of the KrF Laser Model.

의해서 계산한다. 저지능은 전자빔의 전류와 전압의 시간변화를 Berger와 Selter의 방법에 적용하여 간단히 계산된다.

다음 단계는 Kr<sup>+</sup>, Ar<sup>+</sup>, Kr<sup>\*</sup>, Ar<sup>\*</sup>의 생성율과 2 차 전자를 계산한다.[7] 전자와 의가스의 충돌은 의가스의 이온화와 여기 를 일으킨다.

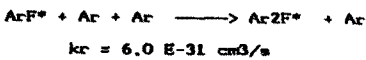
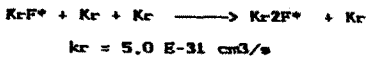
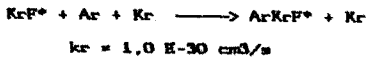
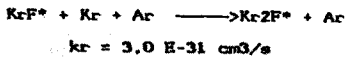
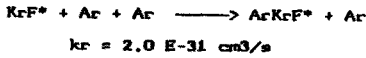
monte carlo 법으로 이온화와 여기의 생성비율은 계산한 바에 의하면[8] 75%, 25%이므로 1 개의 이온을 생성함과 동시에 0.33개의 여기원자를 생성한다는 것을 의미한다.

모델에 사용된 반응기구는 130 개 정도가 되지만 여기반응 중에서 중요하게 고려된 반응은 입력에 의존하는 반응, 온도 의존성이 큰 반응, F<sub>2</sub>의 전자 해리부착반응, 전자의 엑사이머 팔머기 반응등이다.

그런데 Kr<sup>+</sup>, Kr<sub>2</sub><sup>+</sup>, Ar<sup>+</sup>, Ar<sub>2</sub><sup>+</sup>과 F<sup>-</sup>의 삼체충돌, 이온-이온 반응은 중성가스 입력에 크게 의존하므로 J.M.Wadhehra 등[9]의 실험적 이체충돌의 반응정수를 사용하였다

또한 KrF<sup>\*</sup>, ArF<sup>\*</sup>와 Kr, Ar간의 삼체충돌에 의한 ArKrF<sup>\*</sup>, Kr<sub>2</sub>F<sup>\*</sup>, Ar<sub>2</sub>F<sup>\*</sup>의 생성은 온도의존성이고, 엑사이머의 팔머기 반응이므로 레이저 출력특성에 영향을 준다.

특히 여기밀도가 큰 경우 말어기에 따른 가스온도의 상승을 수반하므로 에너지 보존법칙에 의해 에너지 평균을 계산하고, 가스온도의 시간변화를 구한 후 반응정수를 조정하였다. 반응정수는 C. Duzy 등의 보고[10]와 van H. Shui 등의 보고[11]를 참조하여 300 K 에서 다음과 같이 결정하였다.



고밀도 여기입력의 경우 2 차 전자에 의한 말어기는 레이저 출력에 크게 영향을 주므로 모델에서 반응정수는 D.H. Tra- inor 의 실험결과[12]인  $2 \text{ E-7 cm}^3/\text{s}$  를 사용하였다. F2의 전자해리부착은 모든 2 차전자를 약 1.0 eV로 가정하고 C. Duzy의 실험결과[10]인  $4.5 \text{ E-9 cm}^3/\text{s}$  를 사용하였다.  $\text{Ar}^*$  과  $\text{Kr}^*$  의 photoionization 은 Johnson 과 Hunter[7] 에 의해서 정의된 반응정수를 사용하였다. 그리고 진동완화가 순간적이라고 가정하고 진동준위의  $\text{KrF}^*$  말어기 속도는 통일하여  $v = 0, 1$  의 2 준위에서만 유도방출을 한다고 가정하였다.

그러나 고밀도 영역에서 전자의 말어기는 크고 상충준위에서  $\text{KrF}^*$ 의 수명은 단속되는 것과 동시에 가스 온도의 상승으로 높은 진동준위에 여기되므로 이의 효과는 크게 영향을 준다.

최근 F. Kannari[13] 등에 의해 이 효과에 대한 고려로 시뮬레이션의 정도를 향상시켰다. 시뮬레이션 프로그램의 흐름도는 그림.3. 과 같다.

IV. 결과 및 검토

시뮬레이션 모델의 계산정도를 검증하기 위해 출력에 매우 민감한 영향을 주는

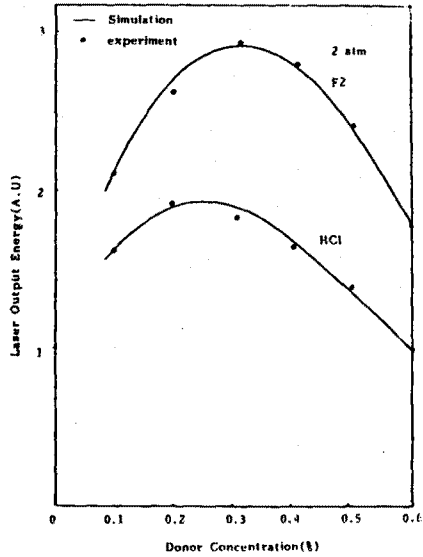


Fig 4 Laser Output Energy as a Function of Donor Concentration.

도우니 농도[14][16]에 대한 레이저 출력의 의존성을 시뮬레이션과 실험에 대하여 비교하였다. 그림.4. 와 같이 KrF, XeCl 레이저 물다 거의 일치하므로 작성한 모델로 레이저 파라미터를 충분히 정확하게 해석할 수 있는 것으로 판단된다.

그림.4. 에서 피이크 출력 이상의 농도에서 출력이 감소하는 것은 각각의 도우니에 의한  $\text{KrF}^*$ ,  $\text{XeCl}^*$  deactivation rate 의 증가에 기인하고 피이크 출력이하에서 출력이 낮은 것은 도우니 밀도가 낮기 때문이다.

혼합가스의 총압력을 3 atm 으로 고정하고 Kr과 Xe[17]농도를 변화시켰을 때 KrF, XeF, XeCl 레이저는 각각 4%, 4%, 5% 에서 최대값을 얻은 것이 그림.5. 이다.

그림에서 도우니 가스의 농도를 고정하였으므로 KrF, XeF, 그리고 XeCl 레이저에서 각각의 피이크치 이상의 농도에서 출력이 감소하는 것은 Kr, Xe에 의한  $\text{KrF}^*$ ,  $\text{XeF}^*$ , 그리고  $\text{XeCl}^*$  의 말어기 반응에 기인한 것이고, 피이크치 이하의 농도에서 출력이 작은 것은 충분히  $\text{KrF}^*$ ,  $\text{XeF}^*$ ,  $\text{XeCl}^*$  이 형성되지 않았기 때문으로 판단된다.

그림.6. 은 전체 압력변화에 따른 출력 의존성을 나타내고 있다. 3기압과 3.5 기압 사이에서 피이크 출력을 얻었다.

여기에서 도우니 가스로 사용된 F2가스는 F2 + He 으로 의석되어 있으나 He가스는 Bethe 의 근사식에 의한 저지능 계산

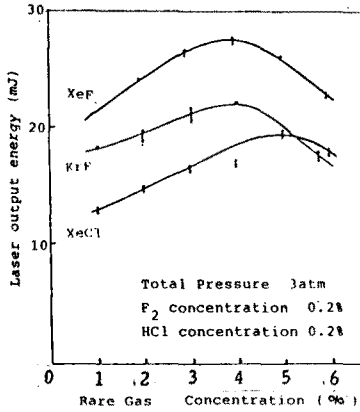


Fig.5 Laser Output Energy as a Function of Rare Gas Concentration.

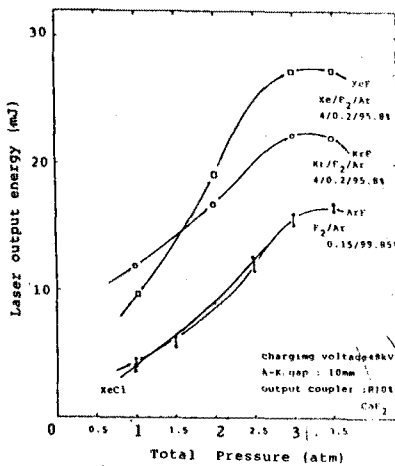


Fig.6 Laser Output Energy as a Function of Total Pressure.

시 Ar, Xe, Kr에 비해 매우 작으므로 무시했고, 3.5 기압 이상의 압력에서 전자빔 에너지와 레이저 매질과의 화학반응에 따른 순간적인 압력의 증가로 양극막의 잦은 파열과 광학계의 손상을 감안하여 3.5 기압 이상의 압력 상승은 하지 않았다.

V. 결 론

전자빔 여기 액사이어 레이저의 출력에 대한 의가스화 도우니 가스의 의존성은 이상의 실험결과에서처럼 도우니 농도 변화시 의가스 농도 변화시 보다 출력에너지에 민감한 반응을 보이며 KrF, XeCl, XeF, ArF의 최적화된 가스 혼합비는 각각 Kr 4 / F2 0.3 / Ar 95.7%, Xe 5 / HCl 0.2 / Ar 94.8%, Xe 4 / F2 0.2 / Ar 95.8%, 그리고 Ar 99.85 / F2 0.15이고 출력은 모두 3 ~

3.5 기압에서 최대출력을 기록하였다.[18] 또한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 출력에 민감한 영향을 미치는 도우니 농도에 대한 출력에너지의 실험결과와 비교하였을 때 잘 일치하였다.

그러므로 시뮬레이션 코드를 이용하여 KrF, XeCl 레이저 발진 및 증폭시스템의 규모설정에 유용하게 이용될 수 있다고 판단된다.

\* 본 연구는 1984년 하반기 한국과학재단 연구과제 지원으로 시행되었음.

\*\*\*\*\* 참고문헌 \*\*\*\*\*

[1] J.E.Valazco, D.W.Setser; IEEE J. Quant-um Electron, QE-11, 708 (1975)  
 [2] C.H.Lee; JIEE of Korean, 33, 322(1984)  
 [3] 이 주의, 최 부연, 류 한용; 한국물리학회, vol.3, No.2, 183(1985)  
 [4] Y.Kubota et al; Japan J. Appl.Phys., vol.13, 260 (1974)  
 [5] 이 주의, 이 영우, 최 부연, 김 용; 대한전기학회 하계학술회의 논문집, 294 (1984)  
 [6] 이 주의, 최 부연; 경희대학교 논문집 ( 자연과학편) vol.14, 533 (1985)  
 [7] T.H.Johnson et al; Appl.Phys.Lett. 51(5) 2406 (1980)  
 [8] E.Fujihara et al; Rev.Laser.Eng.8, 524 (1980)  
 [9] J.M.Wadehara et al; Appl.Phys. Lett.32 76 (1978)  
 [10] C.Duzy et al; AVCO Everett Research Lab. DE AC 08-79 40103 (1980)  
 [11] ven,H.Shui et al; Appl.Phys.Lett. 36, 135 (1980)  
 [12] D.W.Trainor et al; Appl.Phys.Lett.36 675 (1980)  
 [13] F.Kannari et al; J.Appl.Phys. 57(9), 4309 (1985)  
 [14] 이 주의, 최 부연, 김 용; 한국물리학회, vol.3, No.2, 183 (1985)  
 [15] 이 주의, 최 부연; 대한전기학회 순계 양자전자연구회 논문집, pp.61 (1985)  
 [16] 이 주의, 최 부연; 대한전기학회 하계 학술회의 논문집, pp.329 (1985)  
 [17] 이 주의, 최 부연; 대한전기학회 하계 학술회의 논문집, pp.606 (1986)  
 [18] 이 주의, 최 부연, 류 한용; 제 1회 파동 및 레이저 학술 발표회, 2-1 (1986)