

## XeCl 엑시머 레이저에서의 Pulse Stretching 효과

주 흥 · 김동환 · 이수만 · 전영민 · 최상삼

한국과학기술연구원 정보전자연구부

박 대 윤

인하대학교 이과대학 물리학과

(1993년 9월 9일 받음)

용량이행형 방전회로를 이용하여 장펄스 XeCl 엑시머 레이저를 발진 시켰으며, 펄스폭은 150 ns (FWHM)이었다. 펄스폭에 영향을 미치는 가스분압 및 capacitance의 비에 따른 펄스폭의 변화를 관측 하였으며, 이로부터 단펄스에서 장펄스로의 발진을 쉽게 얻을 수 있음을 알았다. 일정 가스 혼합 비율([Xe]/[HCl]=15)의 상태에서 HCl과 Xe가스의 분압이 감소함에 따라 광 펄스폭의 최대 변화량은 125 ns이었고, 일정 압력 하에서의 capacitance비(Cm/Cp) 변화에 따라 늘어나는 광 펄스폭의 변화량은 60 ns이었다.

### I. 서 론

방전여기 XeCl 엑시머 레이저는 엑시머 가스의 상준위 수명이 짧고(수 ns), 안정된 방전 유지시간이 짧기 때문에 일반적으로 짧은 펄스폭( $\leq 30$  ns)을 갖고 발진이 되나, 파장 가변영역이 넓은 자외선 광원을 필요로 하는 분광학 및 많은 에너지를 광섬유를 통하여 전달시키는 의료용 기구, 단일 모드발진을 필요로 하는 비선형광학 등 여러 가지 응용면에 있어서는 긴 펄스폭( $\geq 100$  ns)으로 발진 되는 엑시머 레이저가 절실하게 요구되고 있으며, 이에 관한 연구<sup>[1-3]</sup>가 현재 활발히 진행되고 있다.

엑시머 레이저의 펄스폭은 방전상태의 불안정 정도에 의해 결정이 되기 때문에, 방전의 불안정에 영향을 미치는 요소, 즉, 선전리에 의해 생성된 전자 수 밀도(electron number density)와 방전체적 내에서의 전자의 분포 및 Xe과 HCl의 각각의 농도, 레이저 활성매체에 전달되는 에너지의 양 등을 조절하면 안정된 방전이 유지되는 시간을 길게 할 수 있으며, 이로인해 긴펄스폭을 갖고 발진되는 엑시머 레이저를 제작할 수 있게 된다.

장 펄스를 발진시키는 전기적 방법에는 크게 선전리원(preionization source)으로 자외선이나 X-선을 이용하는 방법<sup>[4,5]</sup>과 전기적인 prepulse(spiker-sustainer 회로,<sup>[6]</sup> double-discharge 회로,<sup>[8]</sup> auto-prepulse 회로<sup>[9]</sup> 등 ...)를 이용하는 방법 등이 있는데, 이 중에서 가장 널리 사용

되고 있는 방법은 prepulse 방법이다. 이 방법은 주방전 회로 외에 짧은시간 동안 고전압펄스를 발생시키는 prepulse 회로가 추가되어, 회로상으로는 복잡하나, 엑시머 가스의 절연파괴가 prepulse에 의해 이루어지기 때문에 주방전이 일어나기 전의 전자의 수 밀도는 예비전리방법에 의해 생성된 전자 수 밀도( $\approx 10^7$  cm<sup>-3</sup>)에서 고압균일 방전에 필요한 전자 수 밀도( $\approx 10^{14}$  cm<sup>-3</sup>)까지 증가하게 되어,<sup>[8]</sup> 주방전시 안정된 글로우 방전상태를 장시간 유지시킬 수 있다는 장점을 갖게 된다.

본 연구에서는 단펄스 발진에 사용된, 간단한 용량이행형 방전 회로(capacitor-charge transfer circuit)에 auto-prepulse 방법을 도입하여 장펄스를 발진 시켰으며, 펄스폭에 영향을 미치는 parameter들의 특성과 그들의 상관관계를 조사하여, 펄스폭을 단펄스(short pulse : 20 ns)에서 장펄스(long pulse : FWHM=150 ns, foot-to-foot: 250 ns)까지 간단하게 변화시키는 방법을 제시 하였다.

### II. 실험

펄스폭을 늘리는 실험에 사용된 XeCl 엑시머 레이저의 여기 회로가 그림 1에 나타내져 있으며, 이는 단펄스 발진에 사용된 회로와 동일한 용량 이행형 회로이다.

레이저 방전회로의 switching 소자로 thyatron(PIC사

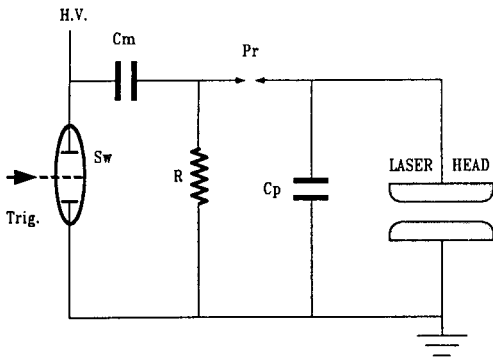


그림 1. Schematic diagram of C-C transfer circuit: Cm=main capacitor (36 nF), Cp=peaking capacitor (1.4~35 nF), Sw=thyatron switch, R=charging resistor, Pr=preionizer.

제품)을 사용 하였으며, 최대 허용전압과 전류는 각각 25 KV와 11 KA이다. Capacitor는 방전회로의 loop inductance를 최소화 하기 위하여 전극을 중심으로 대칭이 되게 병렬로 배열하였으며, main(Cm)과 peaking(Cp) capacitor는 용량이 각각 2 nF과 0.7 nF인 ceramic capacitor (TDK, 40 KV)를 사용하였다. 전력 공급 장치는 공급전압이 최대 40 KV이고 출력이 4 KW인 capacitor charging용 switching power supply(a.i.e. 402L)를 사용하였다.

레이저 펄스폭과 전압파형의 측정은 각각 phototube (Hamamatsu, R1193U-05)와 자체 제작한 전압분배기를 사용하여 oscilloscope(TEK 7854)로 측정하였고, 펄스의 에너지는 pyroelectric detector(Moletron, J50LP-1)를 사용하여 측정하였다.

Auto-prepulse 효과에 의한 장펄스 발진 특성을 조사 하기 위하여 capacitance 비,  $\beta(=Cm/Cp)$ 의 증가에 따른 펄스폭의 변화를 관측하였으며, 실험시 Cm의 용량은 36 nF으로 고정시키고, Cp의 용량을 1.4 nF( $\beta=25.7$ )부터 35 nF( $\beta=1.02$ )까지 2.8 nF씩 변화시켰다. 가스 분압비에 따른 펄스폭의 변화를 관측하기 위하여 Baratron gauge (MKS사 제품)를 사용하여 가스 분압비를 정확히 조절 하였으며, 가스의 총압력은 2280 torr로 고정하였고 버퍼 가스로는 가스의 임피던스가 낮은 Neon 가스를 사용하여 실험하였다.

레이저 공진기는 곡률반경이 무한대인 전반사 거울과 곡률반경이 4 m이고 반사율이 50%인 부분 반사 거울로 구성된 안정형 공진기를 사용하였다. 출력경을 이와 같이

단펄스 발진시에 사용되는 10% 이하의 반사율보다 높은 반사율을 사용한 이유는 장펄스의 발진시 레이저 매체의 이득계수( $\approx 2\% \text{ cm}^{-1}$ )가 단펄스 발진시의 이득계수( $\approx 13\% \text{ cm}^{-1}$ )보다 작기 때문에 공진기 내에서의 광자의 수명을 길게하여 효율적인 발진을 얻기 위함이다.

### III. 실험 결과 및 토의

#### 1. 가스 분압에 따른 펄스폭의 변화

HCl 분압의 최적 조건을 구하기 위하여, 그림 2에 HCl의 분압을 증가시킴에 따라 측정된 펄스폭(FWHM)과 펄스에너지의 변화를 나타내었다. 가스의 총압력과 Xe의 분압은 각각 2280 torr와 15 torr로 유지하였으며 Cp의 값은 1.4 nF( $\beta=25.7$ ), 인가전압은 26 KV이다.

HCl의 분압 증가에 따라 펄스폭은 35 ns 정도 늘어났으며, 1 torr 이상에서는 서서히 줄어들음을 알 수 있었고 이때의 최대 펄스폭과 [HCl]:[Xe]의 비율은 각각 135 ns와 1:15이다. 에너지의 변화는 1.5 torr까지 급격히 증가하다가 감소 하였으며, 24 mJ의 에너지 증가가 관측 되었다. 이는 0.5 torr에 비하여 에너지가 1.5 torr에서 약 100% 정도 증가함을 알 수 있으며, 펄스폭에 있어서는 [HCl]:[Xe]의 비율이 1:15인 경우가 최적 조건임을 알 수 있었다.

[HCl]:[Xe]의 비율을 최적조건인 1:15로 고정시킨

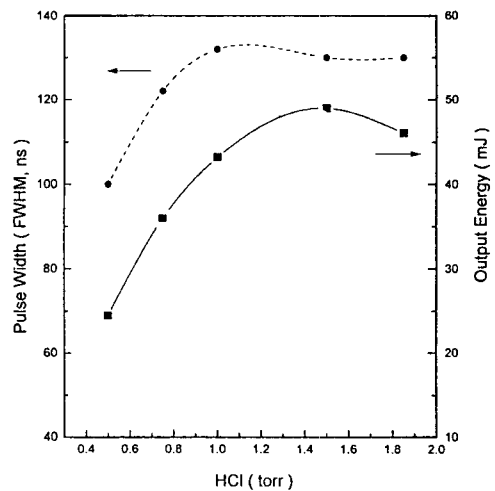


그림 2. Variations of the pulse width and output energy as a function of the HCl concentration for fixed Xe partial pressure (15 torr) and total pressure (2280 torr).

조건 하에서 분압의 증가에 따른 펄스폭과 에너지의 변화를 관측하기 위하여 그림 3(b)에 HCl 분압이 1 torr 일 때를 기준으로 이들 분압을  $M(0.5 \sim 4)$ 배 증가시키면서  $\beta=1$ 인 경우와  $\beta=25.7$ 인 경우에서의 펄스폭의 변화 및 에너지의 변화를 측정된 결과를 나타내었다. 여기서  $M=4$ 인 경우는 단펄스(20 ns)의 발전시 사용되는 가스의 혼합비율이다.

$\beta=1$ 인 경우  $M$  값의 변화에 따라 펄스폭을 30 ns 정도 늘릴 수 있음을 알 수 있다. 이때의 최대 펄스폭을 갖는  $M$  값은 0.53이고 펄스폭과 에너지는 입력전압 26 KV에

서 각각 65 ns와 23 mJ이다. 한편 이 조건 아래에서, 출력경의 반사율이 10%에서 50%로 증가함에 따른 공진기 내에서의 광자의 수명 증가가 15 ns 정도의 펄스폭 증가를 가져오게 됨도 알 수 있었다.

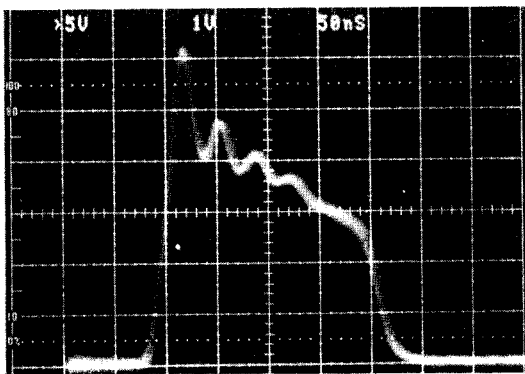
$\beta=25.7$ 인 경우  $M$  값이 4에서 0.53으로 감소함에 따라 펄스폭은 25 ns에서 150 ns까지 125 ns가 늘어나며, 그림 3(a)에 측정된 결과를 oscilloscope 사진으로 나타내었다. 에너지는  $M=1$ 일 때 최대 에너지(43 mJ)를 갖게 되고 이때의 펄스폭은 132 ns이다.

위 실험결과로부터, 방전회로의 전기적 조건이 일정한 경우, 즉  $\beta$ 가 일정한 경우, 가스의 혼합비율에 따라 최대 125 ns의 펄스폭을 폭넓게 조절할 수 있음을 알 수 있었다. 펄스당 에너지는 HCl의 최적분압까지는 HCl 분압의 증가에 따라 같이 증가하다 이후로 감소함을 알 수 있으며, 펄스폭은 HCl의 분압이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다. HCl 분압의 증가는  $XeCl^*$ 의 생성을 촉진 시킴으로써 결과적으로 출력 에너지의 증가를 가져오며,<sup>[7]</sup> 펄스폭의 감소는 HCl의 분압이 증가함에 따라 가스의 임피던스가 증가하게 되어, 전극간의 절연 파괴전압 ( $V_b$ )이 높아지게 되고 ( $\beta=1$ 인 경우  $\Delta V_b=4.5$  KV,  $\beta=25.7$ 인 경우  $\Delta V_b=2.5$  KV이다), 이로 인해 펌핑 power가 증가하면 상대적으로 펌핑에 필요한 전자들의 수명이 아크의 발생으로 인하여 줄어들기 때문에 펄스폭이 줄어들게 된다.<sup>[7,8]</sup> 따라서 펄스폭을 늘리기 위해서는  $[HCl]:[Xe]$ 의 비율을 1:15로 고정시킨 상태에서 HCl의 분압을 0.4 torr까지 감소시켜야 함을 알 수 있었으며, 0.4 torr 이하에서는 이득계수가 작아져, 레이저 발전이 불안정 하여진다는 것도 알 수 있었다. 특히  $\beta=25.7$ 인 경우에는 단펄스(22 ns)에서 장펄스(150 ns)까지  $M$  값의 변화에 의해 손쉽게 펄스폭이 변화 됨을 알 수 있었다.

### 2. $\beta$ 값의 변화에 따른 펄스폭의 변화

그림 4에  $\beta$  값의 변화에 따른 펄스폭(FWHM)의 변화 및 에너지의 변화를 나타내었다.

$\beta$  값의 증가에 따른 펄스폭의 변화는  $\beta$  값에 비례하여 증가하다가  $\beta=9$ 에서 최대 펄스폭(150 ns,  $M=0.53$ )을 얻었으며 이때의 에너지는 48 mJ이었다.  $\beta \geq 9$  이상에서는  $M=0.53$ 인 경우 펄스폭이 150 ns로 일정하였으나  $M$  값이 증가할수록 펄스폭은 감소함을 알 수 있었다. capacitance의 변화에 따른 펄스폭의 가변영역은  $M=0.53$ 인 경우, 60 ns 정도 되었으며,  $M$  값이 증가할수록, 즉, 단펄스의 가스 혼합비율( $M=4$ )에 근접할수록 펄스폭의 가변 영역이 줄어들어(40 ns)을 알 수 있다.



(a)

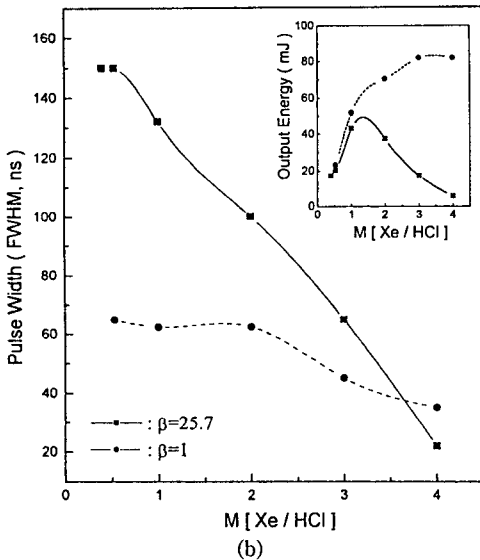


그림 3. (a) Oscillograms of stretched pulse shape in the case of  $\beta=25.7$  and  $M=0.53$ , and (b) the variations of the pulse width and the output energy as a function of  $M$  for each value of  $\beta$ .

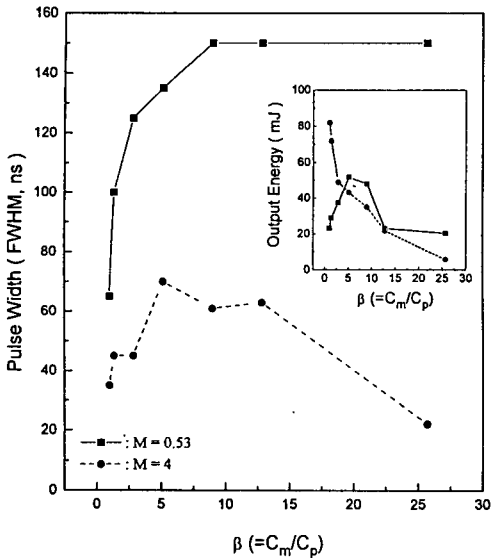


그림 4. Variations of the pulse width and output energy as a function of  $\beta$  for each value of M.

$\beta$  값의 변화에 따른 장펄스 발진의 기본 개념은 M. A. Franceschini<sup>[9]</sup>에 의하여 발표된 auto-prepulse 기술이다. 용량이행형 방전회로를 이용한 XeCl 엑시머 레이저의 발진시에는  $\beta=1$ 인 경우가  $C_m$ 에서  $C_p$ 로의 에너지 전달효율이 가장 크며, peaking loop의 인덕턴스( $L_p$ )가 작기 때문에(약 6 nH) 단펄스를 얻게되나,  $\beta \ll 1$ 인 경우, 즉 자동 prepulse 기술을 이용하는 경우에는,  $C_p$ 로의 에너지 전달 효율은 감소하나,  $C_p$ 에 걸리는 전압이 증가하여 전극간의 주방전 전에 짧은시간 동안 고전압펄스를 발생시키는 역할을 하게되어 장펄스의 발진시 일반적으로 사용하는 prepulse 회로가 없어도 장펄스가 발진되는 장점이 있게된다. 또한 단펄스 발진의 경우와는 달리,  $C_m$ 에 저장되었던 전하들에 의해 주방전이 일어나므로, 방전시 회로의 loop 인덕턴스가 peaking loop( $L_p=6$  nH)에서 main loop( $L_m \approx 180$  nH)로 바뀔에 따라 전류의 상승시간이 길어지는 효과를 얻을 수 있게 되고, 주방전시 인덕터에 의한 양전극간의 전압감소( $-L di/dt$ )가 단펄스 발진시에 비하여 줄어들게 되어, 이로인해 양전극간에 인가된 방전전압이 장시간 유지될 수 있게된다.

단펄스 발진시에는, 방전시 양전극간의 전기장의 분포가 일정한 정상상태의 방전시간이 매우 짧으나(수 ns), 장펄스의 발진시에는 가스 혼합비율 및 주방전회로의 인덕턴스의 증가, 자동 prepulse 효과 등에 의해 정상상태의 방전전압 유지시간이 약 50 ns 이상으로 길어짐을

관측하였다. 이러한 정상상태의 전압은  $\beta \geq 5.2$ 인 경우에서만 관측이 되었다. 따라서 용량이행형 방전회로를 이용한 장펄스 발진에 있어서는  $\beta \geq 5.2$ 인 경우에 자동 prepulse 효과가 지배적으로 나타남을 알 수 있었다.

#### IV. 결 론

비교적 제작이 간단한 방전회로를 이용하여 XeCl 엑시머 레이저에서의 펄스 stretching 효과를 관측하였다. 펄스 stretching 효과는  $\beta$ 와  $[HCl]:[Xe]$ 의 가스 분압비에 따라 크게 나타남을 알 수 있으며,  $\beta=25.7$ 인 경우에는 M 값의 변화에 따라 펄스폭이 125 ns 늘어났으며,  $M=0.54$ 인 경우에는  $\beta$  값의 변화에 따라 펄스폭이 60 ns 늘어남을 알 수 있었다. 따라서 150 ns 정도의 반치폭을 갖는 장펄스를 발진시키기 위해서는 prepulse 회로와 같은 복잡한 회로를 사용하지 않아도 가스 분압비와  $\beta$  값의 변화만으로 쉽게 발진시킬 수 있음을 알았다. 이는 장펄스 엑시머 레이저를 의료용으로 사용할 경우, 빔의 전달매체로 사용되는 광섬유의 입사면에 손상을 입히지 않고 큰 에너지를 전달시킬 수 있다는 장점을 갖게되며, 장시간 발진으로 인하여 공진기 내에서의 광자의 왕복(cavity round trip) 횟수가 증가하게 되므로, 에탈론 등의 분산매체를 이용하여 협소화된 선폭을 얻는 경우에 에탈론의 effective finesse 등이 증가하게 되어 선폭이 더 협소된 빔을 얻을 수 있다는 장점을 갖게된다. 따라서, 짧은 펄스를 이용한 경우에 비해 선폭을 더 줄일수 있으며, 공간적, 시간적인 면에 있어서의 빔의 질을 높일 수 있고, 빔의 발산정도와 편광방향을 조절할 수 있게 되어 고정밀 광 리소그래피 및 여러 분야에 쉽게 응용이 되리라 생각한다.

#### 참 고 문 헌

- [1] R. S. Taylor, K. E. Leopold, S. Mihailov, and R. K. Brimacombe, *Opt. Commun.* **63**, 26 (1987).
- [2] V. Pol, J. H. Bennowitz, T. E. Jewell, and D. W. Peters, *Opt. Eng.* **26**, 311 (1987).
- [3] S. V. Efimovskii, A. K. Zhigalkin, Yu. I. Karev, and S. V. Kurvasov, *Sov. J. Quantum Electron.* **22**, 481 (1992).
- [4] R. S. Taylor, *Appl. Phys.* **B41**, 1 (1986).
- [5] H. Shields, A. J. Alcock, and R. S. Taylor, *Appl. Phys.* **B31**, 27 (1983).
- [6] R. S. Taylor and K. E. Leopold, *Appl. Phys. Lett.*

- 47, 81 (1985).  
[7] M. Ohwa and M. Obara, J. Appl. Phys. **59**, 32 (1986).  
[8] S. V. Efimovskii, A. K. Zhigalkin, Yu. I. Karev, and S. V. Kurvasov, Sov. J. Quantum Electron. **21**, 1293 (1991).  
[9] M. A. Franceschini, R. Pini, R. Salimbeni, and M. Vannini, Appl. Phys. **B55**, 259 (1992).

### Pulse Stretching Effect in XeCl Excimer Laser

Hong Chu, Dong Hwan Kim, Soo Man Lee,  
Young Min Jhon and Sang Sam Choi  
*Div. of Electronics and Information Tech., KIST, Seoul 136-791, Korea*

Dae Yoon Park  
Department of Physics, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received: September 9, 1993)

Long pulse XeCl excimer laser with 150 ns (FWHM) pulse duration is developed using a simple capacitor-charge transfer circuit. We measured the laser pulse width varying the gas mixture ratio and capacitance ratio, which dominantly affect the pulse width. In this way we can easily stretch the pulse width from short pulse to long pulse. The pulse width was stretched by 120 ns as the partial pressure of HCl and Xe gas was reduced under constant gas mixture ratio ( $[Xe]/[HCl]=15$ ), and by varying the capacitance ratio ( $C_m/C_p$ ) under fixed pressure, the pulse width was stretched by 60 ns.