

# X선 레이저의 원리와 개발 현황

김 동 언

포항공과대학교 물리학과

kimd@vision.postech.ac.kr

1960년에 처음 레이저가 개발되어 레이저광의 결맞음성(coherence), 세기, 방향성(directionality)등이 과학자들을 매료한 때부터 x선 레이저 개발의 꿈과 이것을 실현하려는 노력은 시작되었다. 그러나 x선 레이저 개발에 필요한 제반 기술의 부족으로 그 실현 가능성은 1980년대에야 이르러 비로서 가능해졌고, 1984년에 최초로 실현되었다<sup>(1,2)</sup>. 그 이후로 15년동안 다양한 종류의 원자 및 이온들을 이용하여 여러 종류의 x선 레이저가 개발되었고 그와 관련된 물리현상의 많은 것을 알게 되었다.

본 발표를 통하여 x선 레이저 관련 physics, 개발 현황 및 전망등에 관해서 소개하고자 한다<sup>(3)</sup>. x선 레이저 개발을 위하여 지난 30여년간 다양하고 기발한 물리적 방법들이 제안되었다. 이 방법들은 주로 이온의 충돌 재결합 과정, 전자 충돌 여기 과정, 내각 전자의 광이온화 과정, metastable상태, 다광자 현상등을 이용하고 있다. 본 글에서는 그 중에서도 실험적으로 확실히 증명된 방법인 전자 충돌 여기 공급 방법과 3자 재결합 공급 방법을 설명하고자 한다. 또한 지난 수년간 레이저 기술의 급속한 발전으로 고출력(TW급 이상) 펄스 레이저가 개발됨에 따라 이를 이용한 x선 레이저 개발 방식을 소개하고자 한다.

## 전자 충돌 여기 공급 방법(electron collisional-excitation pumping scheme)

1970년대 중반에 이 방법을 이용하여 x선 레이저를 개발할 수 있다는 것이 Elton, Vinogradov 등의 연구로 알려졌으며 1984년 미국 Lawrence Livermore 국립 연구소(LLNL)의 연구팀에 의해서 실험적으로 실현되었다. LLNL 연구팀이 이용한 네온형  $Se(Se^{24+})$ 으로 예를 들어 보자.  $2p^53p$ 와  $2p^53s$  준위들은  $2s^22p^6$  바닥상태로부터 전자 충돌 과정으로 직접적으로 채워진다.  $2p^53p$  준위로의 전자 충돌 여기 과정이  $2p^53s$  준위로부터 빠르므로  $2p^53p$  준위가  $2p^53s$  보다 더 빨리 채워지게 된다. 한편  $2p^53p$  준위로부터  $2s^22p^6$  바닥상태로의 복사전이(radiative transition)은 선택법칙(selection rule)에 의해서 금지되어 있는 반면  $3p^53s-2s^22p^6$  복사전이는 공명전이로서 매우 빠르다. 따라서 적당한 전자온도( $\sim keV$ )와 밀도( $\sim 10^{20}cm^{-3}$ )하에서  $2p^53p$  준위는  $2p^53s$ 준위보다 빨리 채워지고 천천히 줄어들므로 그들사이에 밀도반전(population inversion)이 형성된다. 이러한 비슷한 현상은 Ni형, Be형, B형, C형 이온계에서도 일어날 수 있음이 알려져 있다.

## 3자 재결합 공급 방식(3-body Recombination pumping scheme)

이 방법은 1964년에 러시아 과학자인 Gudzenko와 Shelepin에 의해서 처음 기본적인 방법이 제안된 이래로 여러 ion계에 대해서 보다 자세하게 연구되었다. 고출력 레이저(수십GW이상)를 통하여 우선적으로 뜨거운 플라즈마( $>100eV \approx 10^6K$ )를 형성시킨다. 이 뜨거운 플라즈마를 팽창과 복사에 의해서 급격히 냉각하게 되면 비평형 재결합 플라즈마가 형성된다. 여러 재결합 과정중에서 3자 재결합 과정은  $n^4(n$ :주양자수)에 비례하므로, 주양자수가 클수록 그 준위로의 재결합율이 크게되고 따라서 밀도 반전을 가능하게 한다. 반면 복사 재결합(radiative recombination)과정과 이중 전자 재결합(dielectronic recombination)과정은 주양자수 작을수록 그 주양자수 준위로의 재결합율이 크므로 밀도 반전 형성을 방해한다. 재결합 상태에서 밀도 반전을 형성시키기 위해서는 3자 재결합과정이 우세하도록 플라즈마 조건이 형성되어야 한다. 3자 재결합 과정은 또한  $Ne^2/Te^2$ 에 비례하므로 전자 밀도가 높은 상태에서 온도를 낮추면 3자 재결합 과정이

우세하게 된다. 이렇듯 밀도가 높고 온도가 낮은 상태에서는 주양자수가 높은 준위들부터 채워지게 된다. 한편  $n=2 \rightarrow n=1$  복사전이는 공명전이(L<sub>α</sub>전이)로서 매우 빠르다. 따라서  $n=3$ 준위와  $n=2$ 준위,  $n=4$ 준위와  $n=2$ 준위 사이에 가장 큰 밀도반전이 이루어지게 된다. 이러한 방법은 수소형 이온, Li형이온, Na형 이온 등에서 가능하다.

### x선 레이저 개발 현황

70년대 중반이 되어서야 x선 레이저 개발에 필요한 기반 기술이 어느 정도 확보됨에 따라 그 이후부터 x선 레이저 개발을 위한 실험 연구들이 시작되었고 1984년에 이르러서야 연 x선에서의 lasing현상이 확실하게 실현되었다. LLNL 연구팀과 Princeton대학의 2개의 독립된 연구그룹이 각각 다른 물리적 방법을 이용하여 거의 동시에 연 x선 lasing현상을 실험적으로 실현시키는데 성공하였다[2,3]. 그 이후로 전세계적으로 이에 대한 연구가 더 확산되었고, 1984년 이후 10여년간의 연구는 주로 전자 충돌 여기 방법 및 3자 재결합 방법을 Se과 C이외의 다른 이온에 적용하여 다양한 분광선에서의 레이징 현상을 실현하는 데 치중되었다. 최근 5년간은 이미 레이징 현상이 실현된 분광선에 대해서 증폭을 극대화함으로써 빛의 세기와 결맞음 정도(degree of coherence)를 최대화하는 노력에 초점이 맞추어져왔다. x선 레이저 개발에 필요한 플라즈마는 레이저에 의해서만 형성될 수 있는 것은 아니다. 전기 방전 Z-pinch현상을 이용하면 고밀도, 고온의 플라즈마를 만들 수 있다. 전기 방전을 이용하는 경우는 전기에너지를 광에너지로 변화시키는 단계가 빠지므로 레이저를 이용하는 경우에 비해서 전체적인 효율이 100배정도 향상될 수 있는 장점이 있다. 그러나 나노초 시간대 이하의 고전류 펄스를 만들기가 어려우므로 수 nm 영역의 짧은 파장에서의 증폭현상을 실현하는 데는 이용될 수가 없다. 1994년에 모세관 전기방전을 이용하여 Colorado대학의 연구팀<sup>(4)</sup>과 포항공대의 연구팀<sup>(5)</sup>이 각각 전자 충돌 여기 공급 방법과 3자 재결합 공급 방법을 이용하여 ArIX 46.9nm와 CVI 18.2nm의 분광선의 증폭을 실현하였고, 곧이어 독일의 연구팀도 OVI 분광선의 증폭을 실현함으로써 전기방전에 의한 x선 레이저 개발의 가능성을 보여주었다.

x선 레이저 개발 연구에 주로 거대한 고출력 가시광 또는 적외선 레이저가 사용된 점은 개발된 x선 레이저가 쉽게 활용될 수 없는 단점으로 작용하여 왔다. 3자 재결합 공급 방법이 물리학적 원리상 더 효율이 높으므로 3자 재결합 공급 방법을 이용하여 연구들이 진행되어 오고 있다. 1988년에 Princeton연구그룹과 RIKEN의 연구그룹이 수 J, 수 nsec. 레이저를 이용하여 수소형 탄소 18.2nm와 Li형 알루미늄의 15.4nm에서 레이징을 실현하였고 최근에는 모세관 구조를 이용하고 이중 레이저 펄스 기술을 이용하여 BV 26.2 nm 분광선의 증폭을 실현하였다 모세관 전기 방전을 이용한 x선 레이저 개발도 효율을 높이고자 하는 노력의 일환으로 볼 수 있다. 전자 충돌 여기 공급 방식의 경우도 그 효율을 높이기 위해서 과도기적 방식(transient scheme)을 도입하여 상당한 성공을 거두었다

x선 레이저 연구는 기초적인 원자물리, 플라즈마 물리, 광물리 등에 있어서 우리의 이해를 증진시켰을 뿐만 아니라 비교적 새로운 연구 영역임에도 불구하고 x-ray microscopy holography등 기초 과학 분야에도 이용되기 시작하고 있다. x선 레이저 및 광학에서 있어서 최근 10여년동안의 발전은 실로 눈부신 것이었으며, 그러나 이를 기반으로 하는 새로운 연구 영역이 열릴 수 있으리라 기대된다.

- [1] D. L. Matthews, et al., Phys. Rev. Lett. 54, 110 (1985).
- [2] S. Suckewer, et al. Phys. Rev. Lett. 55, 1753 (1985);  
S. Suckewer, et al. Phys. Rev. Lett. 57, 1004 (1986).
- [3] R. C. Elton, "X-ray Lasers" (Academic, Boston, MA, 1990).
- [4] J. J. Rocca, et al. Phys. Rev. Lett. 73, 2192 (1994).
- [5] Hyun-Joon Shin, et al. Phys. Rev. E. 50, 1376 (1994).