

레이저-플라즈마를 이용한 X-선 레이저의 연구

남 창 희

한국과학기술원 물리학과

(1992년 3월 3일 받음)

1. 서 론

극자외선(Extreme Ultraviolet: XUV) 영역이나 X-선 영역에서 작동하는 레이저를 개발하기 위해 플라즈마를 증폭 매질로 사용하는 이론이 1960년대에 제안된 이래,^[1] 고출력 레이저에 의해 발생된 고밀도의 플라즈마를 증폭 매질로 이용하여 연 X-선(soft X-ray) 영역의 레이저를 실험적으로 입증하고자 하는 연구가 여러 그룹에 의해 활발히 이루어져 왔다.

레이저 작동 파장이 10-300 Å 인 연 X-선 영역에서 유도 방출되는 광양자의 에너지는 1200-40 eV이며 증폭 매질의 여기는 이보다 높은 에너지 준위에서 이루어지므로, X-선 레이저는 고차적으로 이온화된 플라즈마를 증폭 매질로 이용하여야 된다. 이 영역에서 여기 상태의 수명이 일반적으로 10⁻⁹s 이하로 매우 짧기 때문에 증폭 매질의 이온화도 매우 빠르게 일으켜야 한다. 또한, 연 X-선 영역에서 금속의 발사율이 매우 낮고 다층 박막 코팅으로도 고발사율의 거울을 제작하는데 아직까지 많은 어려움이 있으므로, 연 X-선 레이저는 증폭 매질내에서 단일 통과로도 충분한 증폭이 이루어져야 한다. 증폭 매질내에서 유도방출의 증폭이득은 반전밀도(population inversion density)의 증폭 매질의 길이의 곱에 비례하므로, 수 cm 길이의 플라즈마에서 충분한 증폭도를 얻기 위해서는 고밀도의 플라즈마를 생성시켜야 한다. 이러한 점들은 연 X-선 영역에서 작동하는 레이저의 개발에 많은 어려움을 주어 몇몇 그룹에서만 좋은 실험결과를 발표하고 있다.

이들 연구중에서 대표적인 것은 1984년도에 Princeton Plasma Physics Laboratory(PPPL)^[2]와 Lawrence Livermore National Laboratory(LLNL)^[3]에서 각각 182 Å과 206, 209 Å의 파장에서 자발 방출에 비해 ~100배 정도 강한 증폭된 자발 방출(Amplified Spontaneous Emis-

sion: ASE)을 실험적으로 관찰한 것이다. 전자는 CO₂ 레이저에 의해 발생된 탄소 플라즈마를 이용하여 CVI의 $n=3 \rightarrow 2$ 천이에서 밀도 반전을 일으켜 182 Å의 강한 증폭된 자발 방출을 얻었으며 후자는 Nd: glass 레이저에 의해 발생된 Selenium 플라즈마에서 Se XXV $2p^5 3p \rightarrow 2p^5 3s$ 천이에서 강한 증폭된 자발 방출을 일으켰다. 이 두 실험은 각기 다른 밀도반전 방법을 이용한 것으로 전자는 완전히 이온화된 원자들이 재결합하면서 밀도반전을 일으키는 재결합법을 따른 것이며, 후자는 이온화가 진행중인 상태에서 바닥상태에 있는 이온을 전자 충돌에 의해 여기시킨 후 저준위 상태로 복사붕괴하는 과정에서 밀도반전을 얻는 충돌여기법을 따른 것이다. 위 연구들의 증폭도를 높이기 위한 실험과 동작과장을 짧게 하기 위한 실험들이 현재 집중적으로 추진되고 있다.

강력한 연 X-선 레이저의 개발은 새로운 응용분야를 창출하게 된다. X-선 레이저를 이용한 X-선 현미경, X-선 홀로그래피, X-선 리소그래피 기술은 암의 퇴치, 초고집적 반도체 소자의 제작등에 활용될 것이며, 또한 X-선 레이저는 새로운 가간섭성 X-선 광원으로 기초물리 발전에 기여할 것이다.

본 논문은 X-선 레이저 개발을 위한 대표적인 반전 방법을 제 2장에서 설명하고, X-선 레이저의 연구 동향과 X-선 레이저의 응용분야를 각각 제 3장과 제 4장에서 설명하며, 결론을 제 5장에서 제시할 것이다.

2. 밀도 반전 방법

플라즈마를 증폭매질로 이용하여 밀도 반전을 일으키는 것은 여러 이온화 상태의 이온들이 동시에 존재하므로 높은 이온화 상태에서 낮은 이온화 상태로 재결합하면서

밀도 반전이 되는 경우와 바닥상태의 이온을 높은 에너지 준위로 여기시켜서 밀도 반전을 일으키는 경우로 나누어 생각할 수 있다. 전자의 대표적인 예는 완전히 이온화된 원자를 급격히 냉각시켜 수소- 같은 이온으로 재결합하면서 비평형 상태를 일으키는 재결합법(recombination scheme)이 있고, 후자의 대표적인 예는 전자의 충돌 여기에 의한 충돌여기법(collisional excitation scheme)과 다른 이온에서 방출된 강한 복사선을 흡수하여 선택적으로 광여기를 일으키는 공명 광여기법(resonant photoexcitation scheme)이 있다. 이 세가지 방법에 대하여 다음에서 간단히 설명하고자 한다.

2.1 재결합법

완전히 이온화된 원자들이나 헬륨 같은(helium-like) 이온들이 재결합하게 되면, 자유전자들이 포획되어 높은 에너지 준위의 이온들이 형성되고 이 이온들이 낮은 에너지 준위로 천이되면서 수소같은 이온이나 Li 같은 이온에서 밀도 반전이 일어나게 되는 것이 재결합법이다. 전자밀도가 높게 유지되면서 플라즈마가 급격히 냉각되면, 완전히 이온화된 원자들이나 헬륨 같은 이온들은 2개의 자유전자들과 충돌하면서 삼체 재결합(three-body recombination)을 통하여 높은 에너지 준위의 수소 같은 이온이나 Li 같은 이온들을 형성하게 되고 cascade de-excitation을 통하여 차츰 아래 에너지 준위로 천이하게 된다. 이 경우 전자 충돌과 복사에 의한 천이가 동시에 일어나며, 높은 에너지 준위에서는 충돌에 의한 천이가 왕성하게 일어나고 낮은 에너지 준위에서는 복사천이가 중요하게 작용한다. 이 때 가장 강한 lasing transition이 일어날 수 있는 천이는 수소같은 이온에서 $n=3$ 과 2사이이다. $n=3$ 준위는 높은 에너지 준위에서의 cascade de-excitation에 의하여 준위 밀도가 증가하게 되고, $n=2$ 준위는 바닥 상태로 복사 천이가 강하게 일어나서 준위 밀도가 빨리 감소하게 되므로, 이들 사이에서 밀도 반전이 일어날 수 있는 요건이 형성된다 (그림 1참조).

재결합법에서 밀도 반전을 강하게 일으킬 수 있는 이상적인 조건은 첫째, 전자밀도는 높고 전자온도는 낮아서 삼체 재결합이 강하게 일어날 수 있고, 둘째, 밀도 반전이 충돌 현상에 의해 소멸되지 않도록 전자 밀도가 너무 높지 아니하며, 셋째, $n=2$ 준위에서 바닥 상태로의 천이가 optical trapping이 되지 않는 조건이다.^[4] 탄소 플라즈마를 재결합 scheme에 사용했을 때 전자밀도 $Ne \leq 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 와 전자온도 $Te \sim 10 \text{ eV}$ 정도에서 이러한 조건이 만족된다.^[5]

재결합법에 대한 실험적인 입증은 프랑스의 P. Jaegle

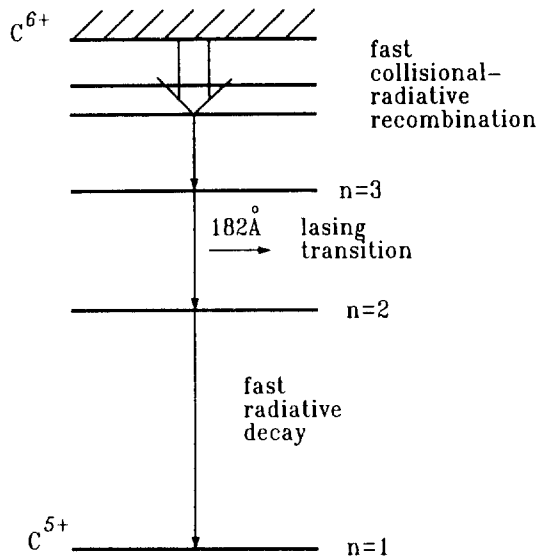


Fig. 1. Recombination scheme for hydrogen-like carbon.

그룹^[6]과 영국의 M. Key 그룹^[7]에 의해 시도되어 왔으나, 가장 성공적인 실험은 PPPL의 S. Suckewer 그룹에 의해서였다.^[2] PPPL의 실험은 50 ns, 500 J의 CO_2 레이저에 의해 발생된 탄소 플라즈마를 자기장으로 가두어서 생성된 플라즈마가 자기장과 평행한 방향으로 팽창하고 수직방향으로 구속되도록 하여 높은 전자밀도를 유지하면서 복사 냉각(radiative cooling)에 의한 방법으로 플라즈마가 급속히 냉각되도록 하여 수소 같은 탄소의 $n=3 \rightarrow 2$ 천이에서 lasing transition이 일어나도록 하였다. 관측된 단위 길이당 이득(G)과 이득 길이(L)의 곱은 8이었다.

2.2. 충돌 여기법

가시광선이나 자외선 영역의 기체 레이저를 작동시킬 때 전자충돌에 의해 바닥상태에서 준안정 상태로 증폭 매질을 여기시켜 주는 방법이 주로 이용된다. 이 방법을 X-선 영역으로 확장시킨 것이 충돌 여기법이다. 레이저에 의해 생성된 플라즈마는 높은 전자밀도를 가지므로 바닥상태의 이온들을 충돌에 의해 효과적으로 높은 에너지 준위로 여기시킬 수 있다. 네온과 같은 이온의 경우 그림 2에서 보는 것과 같이 바닥 상태인 $2p^6$ 준위에서 전자충돌에 의해 $2p^5 3p$ 준위로 여기가 된다. $2p^5 3s$ 준위는 바닥 상태로 복사 붕괴 (radiative decay)가 빠르게 일어나므로, $2p^5 3p$ 준위의 밀도가 전자충돌에 의해 빠르게

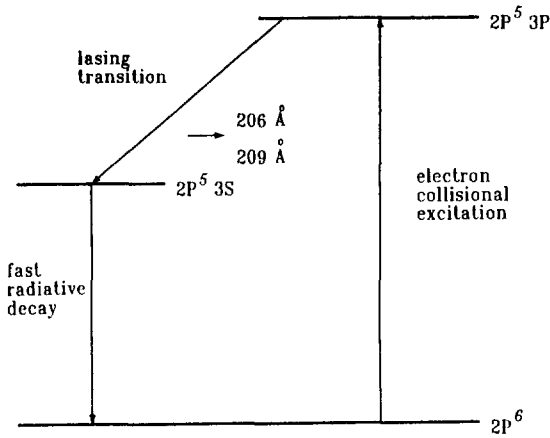


Fig. 2. Collisional excitation scheme for neon-like selenium.

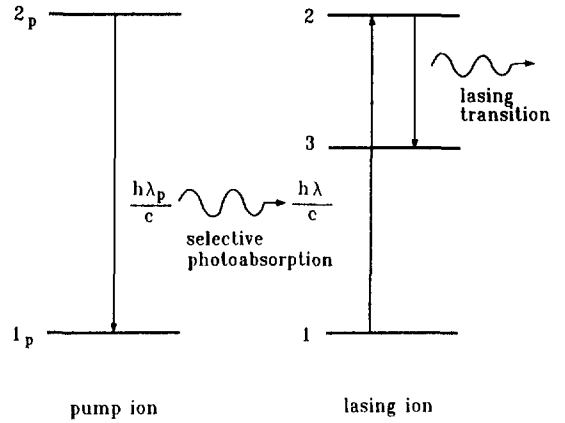


Fig. 3. Schematics of resonant photoexcitation scheme.

증가하는 경우 $2p^5 3p$ 와 $2p^5 3s$ 준위 사이에서 밀도 반전이 일어날 수 있다.

충돌 여기법을 실험적으로 가장 먼저 입증시킨 것은 LLNL에서 출력 2 TW/beam, 파장 $0.53 \mu\text{m}$ 인 Nova 레이저 (그리고 전단계인 Novette 레이저)를 사용하여 강한 ASE를 관측한 것이었다.^[3] 얇은 플라스틱 막에 1000 \AA 의 selenium을 코팅한 표적에 레이저 빔을 선집속하여 전자온도 1 keV 정도인 고온의 플라즈마를 생성하여 네온 같은 selenium 이온들을 전자 충돌에 의하여 강하게 여기시켜 밀도반전을 시킨 후, 파장 206, 209 Å인 증폭된 자발 방출이 선집속 방향으로 강하게 발생하도록 하였다. 선 집속된 레이저 빔의 길이를 4 cm까지 하여 이득과 이득길이의 곱이 206 Å에서 16까지 되는 좋은 실험 결과를 얻었다.^[8]

Selenium X-선 레이저의 경우 Nova와 같은 매우 큰 레이저 시스템이 필요하나, 원자번호가 이보다 적은 germanium을 표적으로 사용하는 경우 규모가 적은 레이저의 기본파장을 사용하여서도 네온 같은 germanium의 196, 232와 236 Å에서 큰 이득이 얻어졌다.^[9] 이 실험은 현재 몇 군데의 기관에서 성공적으로 수행되었으며,^[10] 국내에서도 1 TW 급의 고출력 레이저가 개발되면 시도해 볼 수 있으리라 기대된다.

2.3. 공명 광여기법

레이저 천이를 일으키는 이온들이 바닥 상태에서부터 높은 레이저 준위로 다른 이온들로부터 방출된 복사선을 공명흡수하여 여기될 수 있다 (그림 3 참조). 이 경우 펌프 이온들은 펌프 파장에서 강한 복사선을 방출하여야

하며, 레이저 천이 이온들은 바닥 상태에서 선택적으로 광여기되어서 낮은 레이저 준위에 대해 밀도반전을 일으킨다. 낮은 에너지 준위에서는 바닥 상태로 복사 붕괴가 빠르게 일어날수록 밀도 반전이 용이하게 일어난다. 펌프 파장과 흡수 파장의 차이는 선포보다 작아야 공명흡수가 일어날 수 있으므로, 두 파장간의 일치가 $\Delta\lambda/\lambda \leq 10^{-4}$ 정도로 잘 되어야 광여기가 될 수 있다.^[11] 이러한 공명 광여기의 한 예를들면 11 Å에서 NaX의 $1s^2 - 1s2p \ ^1P_1$ 복사선이 NeIX의 $1s^2 - 1s4p \ ^1P_1$ 천이에 광흡수 되는 것을 생각할 수 있다.

펌프 이온과 레이저 천이 이온들의 생성에 요구되는 최적 플라즈마의 온도나 밀도가 일반적으로 서로 다르므로, 두 종류의 이온들이 각각 다른 최적 조건을 따라 생성되는 것이 이상적이다. 그러나, 분리된 플라즈마의 광학적 결합이 비효율적이어서 연 X-선 영역에서 공명 광여기법의 실험적 입증에 매우 어렵다.

Rochester 대학의 Laboratory for Laser Energetics (LLE)에서 행해진 충돌 여기법에 의한 네온 같은 Ti 실험에서 의외로 공명 광여기에 의한 것으로 보이는 실험 결과가 관측되었다.^[12] 이 실험에서 362 Å 천이로부터 2.7 cm^{-1} 의 이득이 2.2 cm 길이의 플라즈마에서 측정되었는데, 이는 전자충돌에 의한 것이라기 보다 탄소 같은 Ti의 $3s \rightarrow 2p$ 와 질소 같은 Ti의 $3d \rightarrow 2p$ 복사선이 공명 흡수에 의해 네온 같은 Ti의 $2p \rightarrow 4d$ 천이를 일으켜 밀도 반전을 일으켰을 것으로 보고 있다. 이것이 입증되면 공명 광여기법에 의한 X-선 레이저를 시범보인 최초의 실험이 될 것이다.

3. 최근의 연구 동향

앞장에서 X-선 레이저 개발의 세가지 방법에 대해 설명하였다. 수소 같은 이온을 이용하는 재결합법과 네온 같은 이온을 이용하는 충돌 여기법을 사용하여 200 Å 부근에서 강한 증폭된 자발방출의 발생을 입증하였다. 전세계적으로 1990년 11월 까지 이루어진 X-선 레이저의 연구 결과가 참고문헌[13]에 잘 요약이 되어 있다. 이러한 결과에 대한 개선은 증폭도 증가, 작동 파장 영역 확장, X-선 레이저의 소형화, 새로운 개념의 X-선 레이저 개발등의 방향에서 추진되고 있다.

첫째, 증폭도의 증가는 증폭 매질 길이의 증가나 제2의 증폭 매질의 연결을 이용하여 이루어지고 있다. LLNL에서 행한 네온 같은 selenium 실험의 경우, 매질의 길이를 2.2 cm에서 4 cm로 증가시켜 이득과 이득 길이의 곱을 16까지 얻었으며, 포화 상태에 도달하기 위해 노력하고 있다.^[14]

영국의 Rutherford-Appleton Laboratory (RAL)에서는 22 mm와 14 mm의 2개의 germanium 표적을 연이어 배열하여 14 mm 플라즈마에서 방출되는 유도 방출이 22 mm 플라즈마에서 강하게 증폭되는 것을 보았으며, 이들은 불균일한 플라즈마로 인한 굴절 효과를 고려하여 22 mm의 단일 표적을 쓰는 경우에 비해 100-1000배 증가된 신호를 얻었으며, 232 236 Å에서 각각 2 MW 정도의 출력을 얻었다.^[10] 이 때의 펄스 폭은 0.3 ns로 측정되었다.

둘째, 작동 파장 영역의 확장은 특히 "water window" 영역, 즉 23-44 Å에서 작동하는 X-선 레이저의 개발을 위해 노력하고 있다. 탄소의 K edge와 산소의 K edge 흡수의 경계 영역인 "water window"에서 작동하는 X-선 레이저의 개발은 X-선 현미경 기술에 적극 응용될 것이다. 파장이 23-44 Å인 영역에서는 연X-선이 탄소에는 흡수되고 산소에는 흡수되지 아니하므로, "water window" 영역은 단백질(주로 탄소 성분)과 물(주로 산소 성분)의 X-선 흡수율이 10배 정도 차이가 나서 생체 세포의 단백질과 물을 잘 구분할 수 있는 영역이다. 그러므로, 이 영역의 X-선 레이저는 살아있는 생체 조직을 고분해능으로 관찰하는데 매우 중요한 역할을 할 것이다.

X-선 레이저의 작동 파장을 짧게 하는 방법으로 기존의 방법에서 원자 번호가 보다 높은 증폭 매질을 사용하는 경우와 기존의 개념을 확장하여 X-선 레이저를 개발하는 경우를 생각할 수 있다. 재결합법이나 충돌 여기법등의 기존의 방법에서 원자 번호가 높은 물질을 isoelectronic sequence를 따라 이용하여 보다 짧은 파

장에서 작동하는 X-선 레이저를 만들 수 있다. 수소 같은 이온을 이용하는 재결합법의 경우, 영국의 RAL에서 수소 같은 불소 이온으로부터 81 Å에서 이득을 관측하였고,^[14] 오사카 대학의 Institute of Laser Engineering (ILE)에서 수소 같은 NaIX으로 부터 54.2 Å에서 4정도의 이득과 이득길이 곱을 관측하였다.^[15] 후자의 경우 플라즈마의 밀도 기울기에 의한 굴절 효과 때문에 이들 길이의 증가가 제한을 받아서 이에 대한 해결책이 필요하였다.

충돌 여기법의 경우, 네온 같은 은이온으로부터 99 Å에서 이득이 관찰되었다.^[16] 이와 같이 isoelectronic sequence를 따라 작동 파장을 짧게 할 경우, 플라즈마를 생성하는 펌프레이저의 출력은 λ^{-4} 에 비례하여 증가해야 된다. 레이저 작동 파장을 1/10로 줄이려면 펌프 레이저의 출력은 10⁴배로 커져야 하기 때문에 레이저의 규모가 엄청나게 커져서 현실적인 실현성에 문제가 있다. 그러나, 위의 방법들은 Li 같은 이온들에 대해 재결합법을 적용시키고 Ni같은 이온들에 대해 충돌여기법을 적용시키면 이들의 양자 효율이 높아서 작동 파장 영역을 짧은 쪽으로 확장하는데 유리하다. 특히, Ni 같은 이온들을 이용한 경우, LLNL에서 Ni 같은 tungsten으로부터 43.18 Å에서 GL=7을 입증하여 "water window"에서 작동하는 X-선 레이저 개발에 밝은 전망을 주고 있다.^[17] 또한 Ni 같은 tantalum으로부터 44.83 Å에서 GL=8을 획득하였다.

셋째, X-선 레이저의 소형화는 X-선 레이저의 사용자들 위해 매우 필요한 일이다. 수소 같은 이온을 이용하는 재결합법은 네온 같은 이온을 이용하는 충돌 여기법에 비해 플라즈마의 생성이 낮은 온도에서 이루어지기 때문에 이를 소형화할 수 있는 가능성이 크다. PPPL에서 25J의 Nd:glass 레이저를 3 mm 길이로 탄소 표적에 선집속하여 단위 길이당 이득, $G \approx 7 \text{ cm}^{-1}$ 을 얻었고,^[18] 6 J의 Nd:glass 레이저를 8 mm 탄소 표적에 선집속하여 $G \approx 4.5 \text{ cm}^{-1}$ 을 얻어 소형 X-선 레이저의 가능성을 보여 주었다.^[19]

플라즈마 생성에 고효율 레이저를 이용하지 아니하고, 모세관 내에서 전기 방전을 일으켜서 모세관 구성 물질을 플라즈마로 바꾸는 모세관 방전 방법도 소형 X-선 레이저로 고려되고 있다.^[20] 이 방법은 고효율 레이저를 이용하는 방법보다 기술적으로 간단하고 경제적인 면이 있으나, 모세관 내벽의 상태가 연속된 전기 방전에 따라 바뀌게 되어 생성되는 플라즈마의 특성이 변화하는 단점이 있다.

넷째, 1 ps 이하의 펄스폭을 갖는 극초단 레이저 기술의 진보에 따라 새로운 개념의 X-선 레이저가 가능하게

되었다. 집속된 레이저의 세기가 10^{16} W/cm^2 인 실험실 규모의 레이저가 등장했으며, 이러한 세기의 집속된 레이저가 갖고 있는 전기장은 원자내의 Coulomb field보다 강하여 레이저와 물질의 상호작용을 이해하기 위해 많은 노력이 행하여지고 있다. 이러한 극초단 레이저를 이용하면 바다 상태에 대해 밀도반전이 일어난 X-선 레이저, 다광자 이온화나 내층(inner shell) 이온화를 이용한 X-선 레이저 등을 시도해 볼 수 있을 것이다.^[21]

X-선 레이저의 작동 파장 영역이 짧아짐에 따라 요구되는 펄스 레이저의 출력의 증가를 해결하기 위해 "two-laser approach" 방법이 PPPL에서 제안되어 연구되고 있다.^[21] 여기 상태에 있는 이온들의 수명은 10^{-8} 초인 영역에서 대략 10 fs로 매우 짧으나, 바다 상태 이온들의 수명은 이보다 훨씬 길다. 그러므로, 출력은 낮으나 에너지가 큰 통상의 CO_2 레이저나 Nd:glass 레이저를 이용하여 필요한 이온화 상태의 이온들을 생성한 후, 에너지는 적지만 강력한 출력을 가진 극초단 레이저를 이용하여 바다 상태의 이온들을 원하는 여기 상태로 만들어 줄 수 있다. 이와 같은 방법은 에너지와 출력이 모두 큰 레이저를 사용하지 아니하고, $10 \sim 50 \text{ \AA}$ 영역에서 작동하는 X-선 레이저를 개발할 수 있는 방법이 될 수 있다.

국내의 X-선 레이저 연구는 주로 포항공과대학과 과학기술원에서 이루어지고 있다. 포항공과대학에서는 모세관 방전을 이용하여 수소같은 탄소 이온으로부터 재결합법에서 밀도 방전을 일으키고자 하며, 모세관 방전 플라즈마로부터 발생하는 연 X-선 영역의 스펙트럼을 최근 발표하였다.^[22] 과학기술원에서는 1 GW 육속 레이저와 현재 개발되고 있는 100 ps, 1 TW Nd:glass 레이저와 1 ps 펄스폭의 극초단 고출력 레이저를 이용하여 재결합법과 충돌 여기법으로부터 X-선 레이저 발전을 일으키고자 준비중이다. 그리고, X-선 분광선의 관측을 위해 평면 결상형 XUV 분광기와 X-선 결정 분광기를 제작중에 있다.

4. X-선 레이저의 응용

30여년전 최초의 레이저가 개발될 당시에는 레이저가 레이저 프린터나 콤팩트 디스크 등과 같이 우리 생활에 밀접한 분야에까지 쓰이게 될 것을 상상하기 어려웠다. 이와 마찬가지로 X-선 레이저의 개발은 앞으로 다양한 분야에서 유용하게 쓰일 것이다. X-선 레이저를 응용하는 분야로 X-선 현미경 기술, X-선 홀로그래피 기술, X-선 리소그래피 기술등을 생각할 수 있다.

X-선 현미경 기술은 살아있는 생체 조직을 고분해능

으로 관찰할 수 있는 기술이다.^[23] X-선 레이저를 쓰는 경우 작동 파장이 잘 정의되어 있으므로, X-선 필터를 사용하여 파장을 선택할 필요가 없으며, 다층 박막 코팅을 한 거울로 고휘도의 X-선을 매우 짧은 시간동안 ($n \sim 1 \text{ ns}$) 생체조직에 집속 조사하여 살아있는 세포의 상을 얻을 수 있다. 이는 살아있는 세포의 형태와 기능을 알려주어 암세포의 연구등에 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

X-선 홀로그래피 기술은 생체 세포의 고분해 3차원 상을 얻게 해 준다. LLNL에서 206 \AA 과 209 \AA 의 selenium X-선 레이저를 이용하여 홀로그래피를 얻는 실험을 행하였다.^[24] 생체조직의 최적 홀로그래피는 "water window" 영역보다 파장이 약간 더 긴 파장에서 얻을 수 있는 것으로 알려져 있으므로,^[25] Ni 같은 tantalum의 44.83 \AA 이 이러한 용도로 적합하다. 앞으로 증폭도의 증가가 이루어지면, 인간의 chromosome과 같은 세포의 3차원 상을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

X-선 레이저를 이용한 X-선 리소그래피 기술은 매우 높은 집적도를 가진 반도체 소자의 제작에 유용할 것이다. 그러나, 산업용으로 활용되기 위해서는 X-선 레이저의 효율이 훨씬 증대되어야 할 것이고, 평균 출력도 크게 증가되어야 할 것이다.

그 외에 X-선 레이저는 X-선 영역에서 고조파 발생, 비선형 광학, 고밀도 플라즈마의 진단, 또는 매우 미세한 회절 격자의 제작 등에서 응용될 것으로 기대된다.

5. 결 론

7년전 두 개의 그룹에 의해 강한 증폭된 자발 방출이 200 \AA 영역에서 관찰된 이래, 증폭도의 증가와 작동 파장 영역의 확장등에서 세계적으로 많은 X-선 레이저 연구가 이루어져 왔다. X-선 레이저의 개발은 살아있는 생체 조직을 고분해능으로 관찰할 수 있는 X-선 현미경 기술, 세포의 3차원 상을 가능케 하는 X-선 홀로그래피 기술, 고밀도 플라즈마의 진단 등의 여러 분야에 응용될 것이다. 국내에서도 기초적인 X-선 레이저 개발에 대한 연구가 과학기술원과 포항공과대학에서 시작되고 있어 곧 고무적인 연구결과가 나올 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] G. A. Gudzenko and L. A. Shelepin, Sov. Phys. JETP, **18**, 998 (1964).
- [2] S. Suckewer, C. H. Skinner, H. Milchberg, C.

- Keane and D. Voorhees, Phys. Rev. Lett. **55**, 1753 (1985).
- [3] D. L. Mathews et al., Phys. Rev. Lett. **54**, 110 (1985).
- [4] S. Suckewer and H. Fishman, J. Appl. Phys. **51**, 1922 (1980).
- [5] C. H. Nam, E. Valeo, S. Suckewer and U. Feldman, J. Opt. Soc. Am. **B3**, 1199 (1986).
- [6] P. Jaeglé, G. Jamelot, A. Carillon, A. Klisnick, A. Sureau and H. Guennou, J. Opt. Soc. Am. **B4**, 563 (1987).
- [7] M. H. Key, J. Mod. Opt. **35**, 575 (1988).
- [8] C. J. Keane, N. M. Ceglio, B. J. MacGowan, D. L. Mathews, D. G. Nilson, J. E. Trebes and D. A. Whelan, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **22**, 3343 (1989).
- [9] T. N. Lee, E. A. McLean and R. C. Elton, Phys. Rev. Lett. **59**, 1185 (1987).
- [10] D. Neely et al., Annual Report of Central Laser Facility, Rutherford-Appleton Laboratory (Chilton, England, 1991), p. 3.
- [11] P. L. Hagelstein, Plasma Phys. **25**, 1345 (1983).
- [12] T. Boehly et al., Phys. Rev. A Rapid Commun. **42**, 6962 (1990).
- [13] C. H. Skinner, Phys. Fluids **B3**, 2420 (1991).
- [14] M. Grande et al., Opt. Commun. **74**, 309 (1990).
- [15] Y. Kato et al., App. Phys. **B50**, 247 (1990).
- [16] D. J. Fields et al., "X-ray Lasers: Proceedings of the 2nd International Colloquium on X-ray Lasers," edited by G. J. Tallents (Hilger, Bristol, England, 1991), p. 131.
- [17] B. J. MacGowan et al., Phys. Rev. Lett. **65**, 420 (1990).
- [18] D. Kim, C. H. Skinner, A. Wouters, E. Valeo, D. Voorhees and S. Suckewer, J. Opt. Soc. Am. **B6**, 115 (1989).
- [19] C. H. Skinner, D. Kim, D. Voorhees and S. Suckewer, J. Opt. Soc. Am. **B7**, 2042 (1990).
- [20] M. C. Marconi and J. Rocca, Appl. Phys. Lett. **54**, 2180 (1989).
- [21] C. H. Nam, W. Tighe, E. Valeo and S. Suckewer, Appl. Phys. **B50**, 275 (1990).
- [22] 신현준, 김달우, 이동녕, 새물리 **31**, 676 (1991).
- [23] S. Suckewer, D. Diccico, D. Kim, L. Meixler, C. H. Nam, J. Robinson, C. H. Skinner, W. Tighe, "X-ray Instrumentation in Medicine and Biology, Plasma Physics, Astrophysics, and Synchrotron Radiation," Proceedings of SPIE, Vol. 1140 (1989), p. 33.
- [24] J. Trebes, S. B. Brown, E. M. Cambell, D. L. Mathews, D. G. Nilson, G. F. Stone and D. A. Whelan, Science **238**, 517 (1987).
- [25] R. A. London, M. D. Rosen and J. E. Trebes, Appl. Opt. **28**, 3398 (1989).

X-ray Laser Development Using Laser-Produced Plasmas

Chang Hee Nam

Dept. of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology

(Received March 3, 1992)

Since the inception of the idea to develop an X-ray laser in 1960's, a rapid progress to demonstrate soft X-ray lasers in the wavelength region below 300 \AA has been made during the last ten years. Among many prospective proposals, the recombination scheme and the collisional excitation scheme have been most successful in achieving a significant gain. An appreciable single-pass amplification was achieved at 182 \AA from CVI ions using the recombination scheme and at 206 and 290 \AA from the Se XXV ions using the collisional excitation scheme. The current research on X-ray lasers emphasizes the enhancement of amplification upto saturation and the extension of operating wavelength to shorter wavelengths, especially to the water window region between 23 and 44 \AA . X-ray lasers are expected to open many application fields, such as X-ray laser microscopy, X-ray holography, X-ray lithography, and more, in the near future.