

1TW 고체 레이저 시스템의 개발 및 응용 분야

Development of 1TW Glass Laser System and Its Applications

이 상 수, 공 홍 진, 남 창 희*
한국과학기술원 물리학과

1. 1TW 레이저 개발

1960년 레이저의 출현이후 고출력 광원으로서 레이저 기술 및 이의 응용은 새로운 산업으로 발전하였으며, 그 출력을 높이는 연구가 계속되어 왔다. 레이저 광의 고출력성과 고집약성을 이용하여 핵융합을 일으키는 ICF(Inertial Confinement Fusion) 연구를 위해 미국과 일본에서 각각 200 terawatt와 20 terawatt급의 레이저가 개발되어 작동중에 있으며, 그 출력을 더욱 향상시키기 위한 연구가 현재 진행중에 있다. 또한 최근에는 terawatt 급의 레이저를 이용하여 레이저-플라즈마의 상호작용과 그 결과 발생하는 X-ray의 연구 및 그 응용분야가 급속히 발달하여 미래의 새로운 산업으로 각광을 받게 되어 선진 각국에서 고출력 레이저 시스템의 개발 및 그 응용 연구가 활발하게 진행중에 있다.

고출력을 낼 수 있는 레이저 매질에는 CO₂, Iodine, KrF등의 기체와 Nd doped glass가 있다.

이들중 기체 매질은 큰 부피를 pumping 하여야 하므로 기술적인 면과 경제적인 면에서 어려움이 있으므로 대부분의 terawatt 이상의 출력을 내는 시스템은 Nd:glass를 레이저 매질로 선정하고 있다. 이러한 관점에서 본 연구는 1 terawatt 급 Nd:glass 레이저 시스템을 개발하고 있다. 레이저 매질로 사용되는 Nd:glass는 host glass의

종류에 따라 silicate glass와 phosphate glass로 나눌수 있으며, 물리적, 광학적 특성을 비교할 때 phosphate glass가 종래에 많이 사용되던 silicate glass 보다 고출력 레이저 매질로 적합하여 Nd doped phosphate glass를 레이저 매질로 선정하였다. 이 레이저 매질의 최대 gain이 1.053um에 존재하므로 이에 가장 잘 부합하는 laser oscillator로서 Nd:YLF 레이저를 기본 레이저 발진기로 선택하였다. Nd:YLF 레이저를 Mode-locking 과 Q-switching 동작을 시키면 단일 레이저 펄스의 에너지는 50uJ 이상이 되며 펄스폭은 50 picosecond를 얻을 수 있으므로 출력은 1 megawatt 정도가 된다.

레이저 발진기의 출력을 1 terawatt로 증폭하기 위해서는 백만배의 증폭을 할 수 있는 일련의 증폭기가 필요하다. 이를 위해 5단의 막대 증폭기와 2단의 disc형 증폭기를 사용하여 얻고자 한다. (그림 1) 막대 증폭기의 직경은 각각 16mm, 30mm, 40mm, 64mm, 90mm이며, 4단까지의 막대 증폭기가 설계되어 제작중에 있다. 처음 2단의 증폭기는 4개 flashlamp에 의해 pumping 된다. 예상되는 증폭도는 각각 150, 50, 30, 20이며, 4개의 증폭기를 통과한 후, 50 picosecond의 펄스폭에서 10J의 출력을 얻고자 한다. 레이저 증폭기의 각단마다 레이저 beam의 크기가 달라져야 함으

로 광속 확대기가 필요하며, 증폭기 각단에서 발생하는 ASE(Amplified Spontaneous Emission)의 상호 연결을 차단하기 위해 공간주파수 여과가 필요하다. 이를 위해 1단과 2단사이에 spatial filter가 사용되고, 나머지 각단사이에 vacuum spatial filter가 사용된다. 이 spatial filter는 각 증폭기에서 thermal lensing등에 의해 발생하여 레이저 beam에 포함된 hot spot를 제거하여 준다.

고출력 레이저를 표적에 집속하여 실험하는 경우, 표적으로부터 반사된 레이저 광이 거꾸로 진행하게 되면 각 증폭기에서 증폭되어 증폭기와 발진기에 손상을 입히게 된다. 이러한 것은 영구적인 손상을 입히게 되므로 거꾸로 진행되는 광선을 차단하기 위해 Faraday rotator와 Pockels cell을 사용한다. Faraday rotator는 역방향으로 진행하는 빛을 차단하여 주며, Pockels cell은 매우 짧은 시간 (~5 nanosecond) 동안만 빛의 진행을 허용하여 반사광이 일정 시간이 지난 후에 이 Pockels cell을 통과할 때 역방향의 진행을 차단할 수 있다. 이 Pockels cell은 또한 각 증폭기에서 발생하는 ASE의 결합을 차단시켜 준다.

위에 설명한 각각의 부품을 하나의 시스템으로 작동하기 위해 이들을 시간적으로 제어하는 시간 제어장치가 사용된다. 레이저 발진기는 100MHz로 acousto-optic modulator에 의해 mode-locking되고, 또 Q-switching하여 출력을 낸다. 이 Q-switching envelope에 포함된 40여개의 펄스중에서 가장 강력한 펄스를 pulse selector를 사용하여 고른다. 또한 7단의 증폭기, 2개의 Faraday rotator, 2개의 Pockels cell등은 시간적으로 잘 제어되어 작동되어야 한다. Q-switcher, pulse selector, Pockels cell등의 작동은 레이저 펄스의 발생 및 진행과 일치되어야 하므로 1×10^{-9} 초 이내로 제어되어야 하며, 레이저 공진기의 mode-

locking 주파수와 동기화된 Digital Delay Generator에 의해 제어된다. 이에 비해 각 증폭기의 작동 신호와 Faraday rotator의 작동 신호는 $\sim 1 \times 10^{-6}$ 초 이내로 제어하여 작동시킬 수 있다.

현재 레이저 발진기가 설치되어 작동중이며, 제 4단까지의 증폭기가 수 개월내에 설치 완료되어 0.1TW의 출력을 낼 것이며, 최종 증폭기까지의 설치는 앞으로 2년정도가 소요될 것으로 예상된다.

2. 응용 분야

고출력 레이저 펄스가 고체 표적에 조사되면 고온, 고밀도의 플라즈마를 생성한다. 이 고온의 플라즈마는 강한 빛을 X-ray 파장영역에서 내며, 이 발생한 강한 X-ray를 X-ray microscopy, X-ray lithography 등에 응용할 수 있다. 고온, 고밀도의 플라즈마를 레이저 매질로 이용하면 새로운 간섭성 광원으로서 X-ray 레이저의 개발을 할 수 있다. 이러한 연구를 수행하기 위해서는 필수적으로 레이저-플라즈마의 상호작용에 대한 연구가 수반되어야 한다. 또한 고출력 레이저가 기체상태의 물질과 상호작용시에 일어나는 다광자 여기 또는 이온화 현상을 연구하는 것은 새로운 연구분야의 개척이 되며, 이의 응용 분야를 열어 준다.

반도체 산업에서 생산하는 VLSI 소자가 계속 고집적화됨에 따라 0.1 μ m이상의 분해능을 갖는 광원이 필요하다. 이 정도의 분해능을 낼 수 있는 방법으로 100Å이하의 X-ray를 이용하는 방법과 고에너지 전자빔을 이용하는 방법이 있다. 전자빔을 쓰는 경우 이를 일일이 주사하여 기관을 완성해야 하므로 긴시간이 소요되나, X-ray를 이용하는 경우 하나의 상을 형성하면 되므로 전자빔에 대해 잇점이 있다. 강한 X-ray 발생 장치로 synchrotron 장치와 고출력 레이저를 이용하는 경우가 있으며, 전자의 경우 후자에 비해 장치가 크며, 따라서 많은 비용이 소요된다. 현재 두가지

방법 모두 활발히 연구되고 있다.

레이저에 의해 생성된 플라즈마가 내는 강한 X-ray를 현미경의 광원으로 이용하면 광학 현미경이나 전자 현미경으로 얻을 수 없는 정보를 찾아 낼 수 있다. 광학 현미경의 분해능은 최대 5000A 정도이며, 그 이상의 분해능을 전자 현미경으로 얻고 있다. 전자 현미경으로 물질을 보는 경우 sample을 처리해서 보아야 하므로, 살아 있는 물체의 상태를 볼 수 없다. 물과 단백질이 23-44A 영역에서 현격한 흡수율의 차이를 가지고 있으므로, 이 영역의 X-ray를 이용하게 되면 살아 있는 세포의 상을 얻을 수 있다. 현재 1000A 정도의 분해능을 보여주는 연구 결과들이 발표되고 있으며, X-ray microscopy는 암세포의 연구등에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

고출력 레이저에 의해 생성된 플라즈마를 이용하여 X-ray 영역에서 가간섭성을 갖는 X-ray laser를 개발할 수 있다. 최근 LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)에서 collisional

excitation scheme을 써서 Se XXV의 206, 209A에서 강한 ASE를 관찰하였고, PPPL(Princeton Plasma Physics Laboratory)에서 recombination scheme을 쓰는 C VI 182A에서 강한 ASE를 관찰하였다. 두 경우 다 ASE의 증가가 자연방출에 비해 약 500 정도 강하게 관찰되고 있다. 50 picosecond, 100J의 출력을 내는 레이저로는 LLNL의 Se XXV와 같은 실험을 하기는 어려우나 같은 scheme의 Ge XXIII에서 실험을 할 수 있으며, recombination scheme의 C VI에서 강한 ASE를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 또한 microtube plasma를 이용하는 새로운 방법을 써서 X-ray laser의 개발도 연구 할 수 있다. 앞으로 X-ray laser의 개발은 많은 새로운 응용 분야를 유발 할 것이다.

위에 열거한 응용 분야는 간단히 생각 할 수 있는 몇몇 분야에 지나지 않으며, 1TW 고체 레이저의 개발은 많은 응용 분야를 창출할 것으로 기대한다.

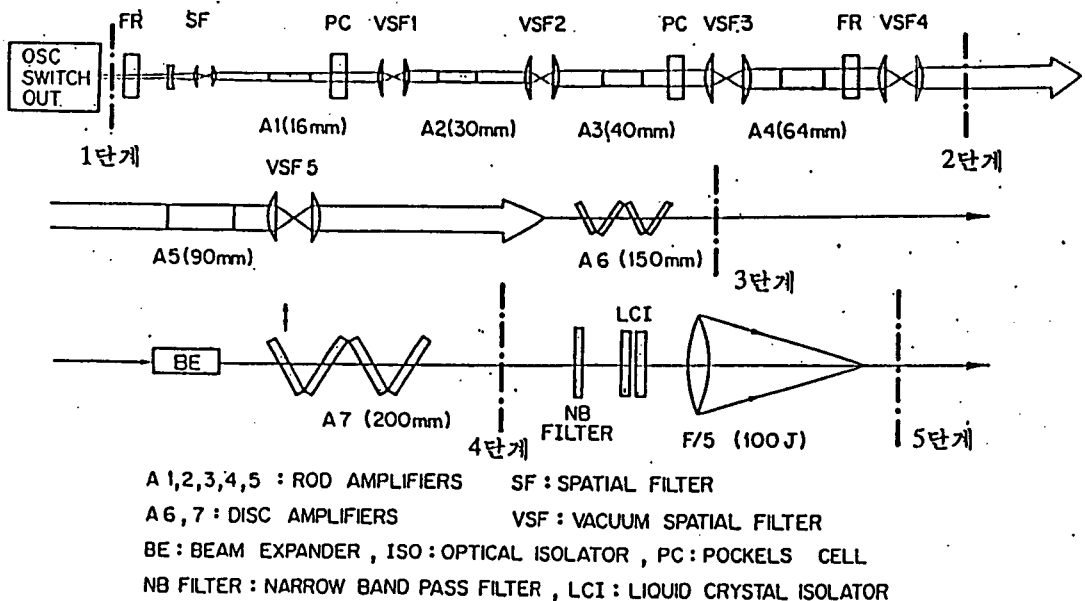


그림 1. 1TW 고체 레이저 시스템의 개략도