



반도체레이저 여기 고체레이저

김 병 태*

(청주대 공대 광학공학과 교수)

1. 서 론

반도체레이저(Laser-Diode)의 고출력·장수명화에 따라 이것을 여기원으로 하는 반도체레이저 여기 고체레이저가 고기능성을 겸비한 차세대 전고체(holosteric)레이저로서 대단한 주목을 받고 있다.

고체레이저의 여기광원으로는 일반적으로 Xe 플래시램프와 Kr 아르곤램프 등이 주로 사용되고 있다. 플래시램프는 60%가 넘는 발광효율을 얻고 있지만, 발광 스펙트럼이 자외선 영역에서 적외선 영역에 이르는 넓은 파장영역을 형성하고 있어 고체레이저 매질의 흡수 스펙트럼과 상호 정합성이 좋지 못하다. 이 때문에 레이저매질에 흡수되어 레이저 발진에 기여하는 에너지가 발광에너지의 10%에도 미치지 못하므로 램프류 여기방식에서는 높은 레이저 발진효율을 기대하기가 어렵다. 또 고체레이저 매질에 열부하도 커져 고평균출력을 얻는 것이 어려우며, 열 왜곡현상 때문에 비임질도 좋지 않다. 더욱이 플래시램프의 경우 발광하는 강한 자외광은 레이저매질을 선택하는데 제약을 주기도 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법의 일환으로 반도체레이저를 여기광원으로 하여 레이저매질의 흡수 스펙트럼 가운데 여기에 유효한 특정한 파장영역만을 선택적으로 조사시키는 방법의 레이저에 대한 연구·개발이 선진 각국에서 활발히 진행되고 있다.

반도체레이저 여기 고체레이저는 실온에서 동작 가능한 양자우물 구조의 반도체레이저가 개발되고, MOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)법 등의 결정 성장기술이 급격히 진전된 결과 발광효율 60%급의 실용화, 연속 발진 출력 수십 W급이 실현되면서 응용영역이 확대되어 고체레이저의 여기원으로서도 적극적인 투자와 개발을 유도하고 있다. 특히 Nd^{3+} 을 활성이온으로 하는 고체레이저 매질의 흡수 스펙트럼은 800 nm 부근에서 발진파장을 갖는 GaAlAs계 반도체레이저의 스펙트럼과 잘 일치하여 여기

효율도 높일 수 있고, 레이저매질에서의 열부하를 최소화시킬 수 있으므로 이를 여기원으로 하는 레이저의 발진 스펙트럼과 횡모드가 깨끗하다. 반도체레이저의 지향성은 여기광원으로서 레이저매질과의 결합효율 향상에도 기여하기 때문에 발진효율을 크게 향상시킬 수 있다. 또한 종래의 램프류 여기로는 발진이 어려웠던 레이저매질에서도 고효율의 레이저 발진이 가능하게 되었다. 더욱이 반도체레이저는 소형이고, 전원부의 저전압화로 고전압 스위치가 필요하지 않으며, 수명에서도 연속동작에서 10^5 시간, 펄스동작에서 10^9 shots(10 Hz로 3년 작동에 해당) 이상으로 램프류에 비해 100 배 이상 긴 것 등 레이저 장치 전체적으로도 콤팩트화와 장수명화의 실현으로 유지 보수가 용이하게 되어 고신뢰성을 갖게 된다.

본 지면에서는 반도체레이저 여기 고체레이저의 제특성, 개발 현황 및 전망과 응용 등에 대하여 개략적으로 기술하기로 한다.

2. 반도체레이저 여기의 제특성 및 여기방법

반도체레이저 여기 고체레이저는 발진효율이 높고, 레이저매질에 대한 열부하를 경감시킬 수 있을 뿐만 아니라 고기능성도 겸비하고 있다. 또 여기원인 반도체레이저의 고효율화와 고조파 변환 특성이 좋은 비선형 광학결정들의 개발에 힘입어 소형 레이저에서 수월하게 자외선 영역의 광까지도 발생시킬 수 있는 것 등으로 고효율에서까지도 램프류 여기 고체레이저 영역을 잠식해 가고 있다.

반도체레이저 여기의 가장 큰 장점으로 레이저 장치의 고효율화를 들 수 있다. 표 1에 Xe 플래시램프 여기와 반도체레이저 여기의 효율을 구체적으로 비교하여 나타낸다. 발광효율은 전기에너지가 광으로 변환되는 것으로 구동전원의 효율을 고려한 것이다. 전달효율은 여기원으로부터 레이저매질에 도달하는 에너지의 비율이다. 플래시램프의 출

력광에는 지향성이 없어 레이저매질에 광을 효율 좋게 전달시키기 위해서는 집광반사경이 필요하다. 이 때문에 모든 출력광이 레이저매질에 도달할 수 없고, 플래시램프에 의한 재흡수, 집광반사경에 의한 손실 및 레이저매질 이외에서의 흡수 등에 의해 전달효율이 낮아진다. 반도체레이저의 출력광에는 지향성이 있기 때문에 collimator 렌즈와 focusing 렌즈 등을 포함하는 집속광학계로 레이저매질에 효율 좋게 조사시킬 수 있다. 이 때문에 손실로는 광학계의 손실만 고려하면 되므로 2 배 이상의 효율 개선 효과를 보게 된다. 레이저매질까지 전달된 여기광이 매질에 얼마나 효과적으로 흡수되는가를 나타내는 흡수효율에 있어서도 반도체레이저의 발광 스펙트럼과 흡수 스펙트럼의 정합성이 기인하여 약 3 배에 가까운 효율 개선을 볼 수 있다. 그 외에도 양자효율 등을 고려하면 반도체레이저 여기 고체레이저가 플래시램프를 여기원으로 이용하는 것보다 약 10 배 이상의 출력효율을 얻을 수 있다는 것은 쉽게 알 수 있다.

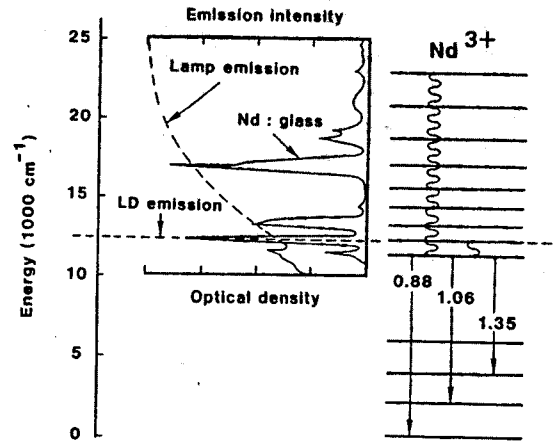


그림 1. Nd³⁺ 첨가 레이저매질에 대한 Xe 플래시램프와 반도체레이저의 스펙트럼 정합성

표 1. Xe 플래시램프 여기와 반도체레이저 여기의 효율 비교

Items	Flashlamp Pumping	Laser-Diode Pumping
Radiation Efficiency	60%	60%
Transfer Efficiency	40%	90%
Absorption Efficiency	35%	90%
Quantum Efficiency	35%	70%
Storage Efficiency	75%	75%
Excitation Efficiency	2.2%	25.5%

그림 1에 Nd³⁺이 첨가된 Nd:Glass의 흡수 스펙트럼에 대한 Xe 플래시램프의 발광 스펙트럼과 반도체레이저의 발광 스펙트럼의 정합성을 나타낸다. 그림에서 표시한 플래시램프의 발광 스펙트럼은 고출력 고체레이저의 여기원으로 이용되는 Xe 플래시램프의 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이 반도체레이저의 발광 스펙트럼은 Nd³⁺ 첨가 레이저매질의 흡수 스펙트럼 밴드와 잘 일치한다. 이 때문에 레이저 발진에 기여하지 못하는 다른 스펙트럼 영역에서의 에너지 흡수가 없어 비방사천이에 의한 열의 영향을 억제할 수 있으므로 고효율에 고반복동작을 가능하게 한다. 이에 비하여 Xe 플래시램프의 발광 스펙트럼은 매질에서 레이저 발진에 기인하는 흡수 스펙트럼 이외의 전파장영역에 걸쳐 방사하고 있어, 플래시램프의 발광효율이 60% 정도에 달하더라도, 레이저발진에 기여하는 에너지의 양은 대단히 적다. 이 때문에 레이저매질에서 흡수한 대부분의 에너지는 비방사천이로 열을 발생시켜 매질에 열부하를 주게 되고, 결국에는 발진 효율 및 출력의 감소를 동반하게 된다.

반도체레이저의 고출력화가 진행됨에 따라 이를 여기원으로 사용할 수 있는 레이저매질 중에서 가장 일반적이고 고출력을 낼 수 있는 것은 Nd³⁺이 첨가된

Nd:YAG 결정이다. Nd:YAG는 물리·광학적 특성이 우수하여 램프 여기의 고출력 고체레이저 가공기에서도 가장 널리 쓰이고 있는 완성도가 가장 높은 이득매질이다. 낮은 발진문턱값과 높은 발진효율을 갖는 Nd:YVO₄는 반도체레이저 여기용 레이저 매질로 가장 많은 연구가 진행되어 왔다. 최근에는 낮은 발진문턱값을 갖는 Nd:S-VAP 결정이 개발되어 필자의 연구실에서 여기에너지 17μJ에서 레이저 출력 1μJ을 얻는 등 우수한 출력 특성을 보여 마이크로칩 레이저용 매질로서의 가능성이 확인되었다. 그 외에도 레이저 핵융합용 레이저시스템의 발진기용 매질로 잘 알려진 Nd:YLF와 러시아에서 개발된 가네트계의 비정질(disordered crystal) Nd:CNGG가 반도체레이저 여기용 매질로 우수한 특성을 갖고 있음을 표 2에서 볼 수 있다. Nd:CNGG는 흡수 스펙트럼의 폭이 다른 결정체에 비해 약 10 배정도 넓고, 열전도율도 비교적 높은 우수한 특성을 보이고 있다. 참고로 그림 2에 Nd:CNGG, Nd:YAG 및 Nd:Glass(LHG-8, Hoya)의 흡수 스펙트럼 부근에서 흡수계수의 형상을 나타낸다. 한편 여기용 반도체레이저의 단파장화가 진행됨에 따라 670 nm 부근의 발진과광을 갖고 있는 InGaAlP계 반도체레이저로 여기가 가능하고, Cr³⁺도 다량 첨가시킬 수 있는 LiCAF와 LiSAF가 전고체레이저 매질로서 장래성을 대단히 밝게 평가받고 있다.

표 2. 반도체레이저 여기에 주로 사용되는 레이저 매질의 물리·광학적 특성

	Nd:YAG	Nd:S-VAP	Nd:YVO ₄	Nd:CNGG	Nd:YLF
Lasing Wavelength (nm)	1064	1065	1064	1062	1053
Nd ₂ O ₃ (%)	1.1at.	0.38at.	1.1at.	2wt.	1.1at.
Stimulated Emission Cross Section (×10 ⁻¹⁹ cm ²)	2.8	5	9.8	1.3	1.2
Absorption Wavelength (nm)	808	809	809	807	792
Absorption Coefficient (cm ⁻¹)	4.8	16.9	31.1	10.9	7.2
Absorption Bandwidth (nm)	0.6	1.6	0.8	8.5	1.2
Fluorescence Lifetime (μs)	230	230	90	161	480
Thermal Conductivity (W/m°C)	13	1.7	5.2	4.7	6

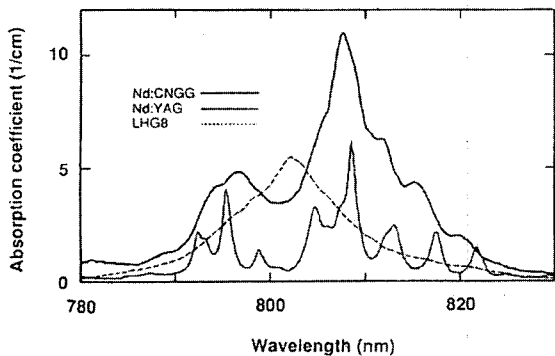


그림 2. 800 nm 부근에서 Nd:CNGG, Nd:YAG 및 Nd:Glass(LHG-8)의 흡수계수

반도체레이저를 이용한 고체레이저의 여기방법은 단면여기(end pumping)와 측면여기(side pumping)의 두 가지로 크게 나눌 수 있다.

단면여기는 여기광을 광축과 같은 방향으로 입사시키는 구성이다. 여기광을 집속광학계에 의해 매질 단면에 조사하고, 여기영역을 레이저 발진모드 체적내에 맞출 수 있기 때문에 여기광의 이용 효율이 높다. 이 때문에 낮은 문턱전류에서 레이저의 발진은 TEM₀₀ 모드를 얻을 수 있고, 동시에 고효율로 발진시킬 수 있다. 그러나 광축과 같은 방향으로 여기광을 입사시켜야만 하기 때문에 여기원으로서 사용할 수 있는 반도체레이저의 수와 출력이 제한되어 고출력을 얻기 어렵다는 단점이 있어 평균 출력 10 W 이하 정도의 레이저에서 주로 이용하고 있다. 단면여기 방식에서는 여기광원의 고휘도화가 레이저의 고효율·대출력화에 특히 중요하다. 단면 여기밀도를 높이기 위해 반도체레이저 어레이를 직접 결합하는 것을 지양하고, 다수의 반도체레이저 출력광을 광섬유에 의해 결합시키거나 실린더리플 렌즈 등의 비임 정형 광학계를 이용하여 휘도를 높이는 방법으로 어느 정도까지는 해결할 수도 있으나 근본적인 방법은 되지 못한다.

측면여기 방식은 반도체레이저 광을 광축에 대해 수직방향에서 조사하는 방법이다. 이 방식에서는 반도체레이저의 배열이나 광축 조정도 비교적 자유롭게 할 수 있고, 다수의 반도체레이저를 결합하여 사용할 수 있다. 또 반도체레이저의 지향성을 이용하여 여기밀도를 올릴 수 있고, 반도체레이저의 배치가 자유로워 유지 보수의 용이성 및 고출력화 등에서 많은 장점을 갖고 있어 고출력 레이저에서 주로 이용하고 있다. 그러나 단면여기와는 달리 여기영역이 넓기 때문에 발진모드는 멀티모드가 되기 쉽다.

3. 반도체레이저 여기 고체레이저의 발전 및 연구동향

반도체레이저 여기 고체레이저의 역사는 비교적 오래되어 1968년에 170 K의 저온에서 동작하는 GaAs 반도체레이

저를 이용하여 Nd:YAG 레이저를 실온에서 발진시킨바 있다. 그 당시의 반도체레이저는 신뢰성이나 수명 등에서 문제가 산재하여 이에 대한 연구가 잠시 중단되었다. 그후 1985년경부터 반도체레이저 어레이 등으로 고출력 여기원으로서의 개발이 진행되어 이를 이용한 반도체레이저 여기 고체레이저의 개발이 급진장하기에 이르렀다.

반도체레이저 여기 고체레이저의 연구 개발에서도 횡·종모드 제어, 초단펄스 발생, 고조파 발생 및 결맞음(가간섭성, coherence) 향상 등의 레이저 발진 제어는 물론 레이저 매질의 종류와 형태, 여기원과의 광결합 방식 등의 레이저 공진기 구성 등을 응용 목적에 맞게 최적화 설계하여 활용도를 극대화해야 한다. 반도체레이저 여기 고체레이저는 고출력화와 펄스동작에 대한 연구가 더 진척되어 있지만, 연속동작 레이저의 고출력화도 최근 급격한 발전을 보이고 있다. 레이저 트리밍이나 레이저 마킹 등의 응용을 고려하면, 음향광학 변조기와 결합시켜 고반복동작에 높은 침투출력의 펄스를 발생시킬 수 있어 연속여기 레이저의 고출력화도 실용상 중요한 목을 점하고 있다.

최근 보고에 의하면 발진출력을 1 kW 이상까지도 낼 수 있는 고출력의 연속동작 반도체레이저 여기 고체레이저들이 속속 개발되고 있다. 고출력에서의 레이저매질로는 Nd:YAG 결정이 주로 사용되고 있지만 중·소출력영역에서는 Nd:YAG 외에도 Nd:YVO₄ 등을 포함하여 다양한 매질들을 사용하고 있다. 독일의 레이저센터 하노바에서는 1995년도에 이미 연속출력 300 W의 측면여기 Nd:YAG 레이저를 개발하였다. Nd³⁺이 0.9 at% 첨가된 길이 220 mm, 직경 5 mm의 Nd:YAG 막대에 10 W 출력의 반도체레이저 108 개를 막대 측면 9 방향으로부터 여기하여 1.06 μm에서 다중모드로 300 W, TEM₀₀ 모드에서는 45 W의 출력을 얻었다. 현재 Rofin-Sinar나 미국의 U.S. Laser 등에서는 1 kW 출력의 레이저를 개발하여 판매에 나서고 있다. 일본의 미쓰비시 전기도 1997년도에, 그림 3에 나타내듯이, 25 W 출력의 반도체레이저 어레이 16 개를 Nd:YAG 막대 측면 4 방향으로부터 여기하여 1.06 μm, TEM₀₀ 모드에서 M²=1.1의 비임질로 80 W의 출력을 얻었다고 발표하였다. 이들은 1999년 9월에는 500 Hz 펄스 발진에서 평균 출력 270 W로 전기-광 변환효율 18.4%를 얻었고, CLBO 결정을 이용하여 266 nm 파장에서 10 kHz 동작으로 20.5W의 출력을 얻었다. 한편, 도시바에서는 Nd:YAG 막대 측면 3 방향에서 2.1 kW의 연속출력 반도체레이저로 여기하여 19 %의 전기-광 변환효율로 1 kW의 레이저 출력을 얻었다. 이들은 2001년말까지 10 kW의 출력 달성을 목표로 활발히 연구 개발하고 있다. 이와 같이 반도체레이저 여기 고체레이저는 레이저의 산업분야 응용에서 가장 많이 사용되는 용접, 절단 및 천공 등에서 레이저 가공기의 광원으로 개발이 활발히 진행되고 있다. 이들의 연구 개발 최종목표가 달성되면 고출력화, 고효율화, 유지 관리 기간의 연장 및 고기능화가 진행되어 레이저 가공의 새로운 분야에서 이용 창출 및 종래의 이용분야 확대를 예측할 수 있다.

고출력 펄스동작의 경우에는 미국의 로렌스 리버모어 국

립연구소(LLNL)와 일본의 오사카대학 레이저핵융합연구소(ILE) 등에서 레이저 핵융합용 에너지 드라이버로서 사용할 수 있는 고출력 레이저를 개발하기 위한 연구에 심혈을 기울이고 있으며 좋은 결과들을 얻고 있다. LLNL에서는 "Mercury 프로젝트"로 Yb:S-FAP를 증폭기로 하는 반도체 레이저 여기 레이저 시스템에서 출력 에너지 100 J, 펄스폭 1~10 ns, 반복동작을 10 Hz에서 10%의 총효율에 회절 한계 5 배 이내의 비임 질을 목표로 개발하고 있다. 오사카대학의 ILE에서는 지그재그 슬랩형 Nd:Glass(HAP-4)를 증폭기로 하여 출력 에너지 10 J, 반복동작을 10 Hz에 20%의 효율을 갖는 레이저 시스템이 개발되었다. 핵융합용 드라이버에 사용될 레이저 시스템을 개발하는 "L 프로젝트"는 500~200 nm의 파장에서 출력 에너지 2~5 MJ, 반복동작을 ~20 Hz에 총효율 10%를 목표로 반도체레이저 여기 레이저 시스템의 개발을 진행하고 있다. 그림 4.에 351 nm에서 10 kJ의 에너지를 낼 수 있는 모듈의 개략도를 나타낸다.

국내의 반도체레이저 여기 고체레이저의 연구 동향을 살펴보면 아직까지도 미진한 상태이나 필자를 비롯하여 한국과학기술원 등 몇몇 대학교와 한국원자력연구소 등의 몇몇 연구소에서 연구를 진행하고 있고, 기업체에서는 이제 개발에 착수하는 단계에 지나지 않는다. 한국원자력연구소에서는 출력 200 W급의 반도체레이저 여기 Nd:YAG 레이저가 개발되었고, 1 kW의 출력을 목표로 연구를 진행하고 있다. 필자의 연구실에서도 단면여기 방식으로 펄스동작 Nd:YAG 레이저와 낮은 발진 문턱값을 갖는 Nd:S-VAP 레이저를 개발하고 제특성에 대하여 이미 발표한바 있다. 또 고출력 레이저 개발의 첫 단계로 그림 5와 같이, Ti:sapphire 레이저의 여기원으로 사용할 목적으로 KTP 비선형 광학결정을 이용하는 내부공진기형 Nd:YAG 레이저를 구성하고 출력특성 및 열영향에 대

한 연구를 진행시키고 있다.

반도체레이저 여기 고출력 고체레이저의 국가별 연구상황에 대하여 살펴보자. 미국에서는 고등연구 계획국(Advanced Research Projects Agency)에서 기술 재투자 계획의 일환으로 기업 및 대학연구소 등 20여 단체가 정밀 레이저가공 연구조합(Precision Laser Machining Consortium)을 결성하여 용접 및 절단용으로 6 kW의 고평균출력, 천공용으로

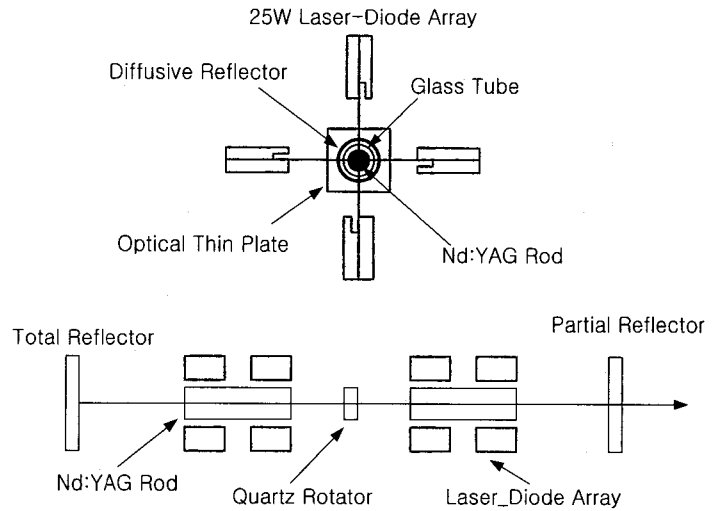


그림 3. TEM₀₀, 80 W 출력의 반도체레이저 측면여기 Nd:YAG 레이저

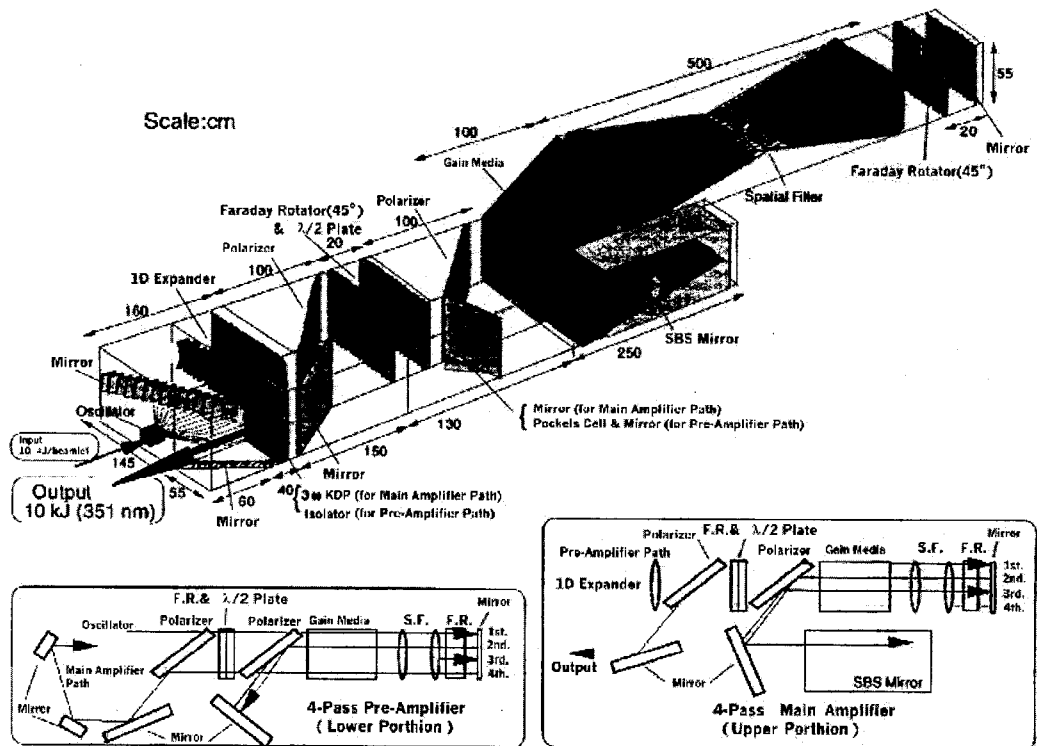


그림 4. 10 kJ 출력에너지의 관성핵융합용 드라이버 모듈 개략도

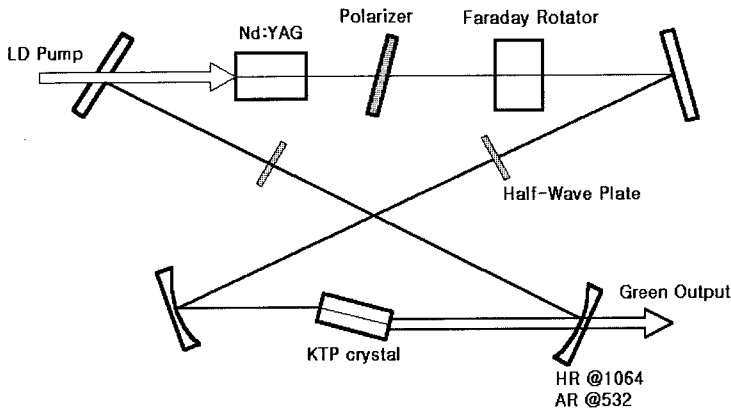


그림 5. 반도체레이저 여기 Nd:YAG 그린 레이저

2.5 kW 첨두출력의 레이저를 개발하고 있다. 그외에도 위성탐재용, 반도체 노광을 위한 X-선 발생용(X-선 리소그래피)으로 사용할 레이저를 개발하고 있다. 독일에서도 1995년부터 "Laser 2000"이라는 국가 프로젝트를 시작하여 반도체레이저 여기 고체레이저 개발계획에 따라 가공용 및 의료용으로 사용할 레이저를 개발하고 있다. 일본에서는 1988년부터 일본 레이저학회에 다이오드 여기 고체레이저 기술 전문위원회가 결성되어 연구를 주도해 왔다. 현재에는 통산성 공업기술원에서 산업과학기술 개발제도에 따라 광자 기술(Photon Technology)로 고품질 광자발생 기술, 광자 제어 전송 시스템 기술 및 광과 원자분자의 새로운 상호작용을 기초로하는 최첨단 프로세스 기술을 개발하고 있다.

Laser Focus World에 따르면 반도체레이저 여기 고체레이저는 그 활용도가 다양하여 가공기 및 의료 분야를 비롯해 연구분야 등에서도 꾸준한 성장을 보이며 총매출에서도 1998년도 8,432만달러에서 1999년에는 10,119만달러로 약 120% 정도의 증가가 예상되고 있어 세계 각국에서 개발에 박차를 가하고 있는 실정이다.

4. 반도체레이저 여기 고체레이저의 응용분야

반도체레이저 여기 고체레이저의 응용범위는 대단히 넓다. 이것은 반도체레이저 여기 고체레이저가 갖는 우수한 특성 때문이다. 여기에서는 응용할 수 있는 예를 몇 가지 들어본다.

4.1 라이더

라이더(lidar : Light Detection and Ranging)는 레이저의 고출력 펄스와 결맞음 특성을 이용하여 먼 곳의 물체나 그 상태, 밀도, 조성비 및 거리 등의 정보를 측정하는 것이다. 최근에는 지구 대기의 온난화와 환경파괴 등을 측정하기 위해 인공위성 탑재형 라이더가 개발되고 있다. 인공위성 탑재를 위해서는 소형, 경량, 견고, 저소비전력 및 장수명에

고신뢰성까지 요구된다. 또 라이더의 심장부인 레이저장치에는 전고체화가 필수로 되어 있다. 이런 조건을 만족시킬 레이저로 가장 유망한 것이 반도체레이저 여기 고체레이저이다. 반도체레이저 여기 고체레이저는 소형에 경량, 장수명 등 상기의 조건을 거의 만족시키고, 파장도 비선형광학 결정을 이용하여 비교적 수월하게 적외영역에서 자외영역까지 얻을 수 있기 때문에 활발히 개발되고 있다.

4.2 레이저 가공기

절단 및 용접 등의 레이저 가공분야에서는 CO₂ 레이저나 기존의 램프 여기 방식 Nd:YAG 레이저가 주류를 형성하고 있다. 최근에는 반도체레이저 여기 슬랩형 Nd:YAG 레이저에서 1 kW 이상의 평균출력을 달성하여 가공기에 이용이 검토되고 있는 등 전설에서 기술한 바와 같이 세계 각국에서 국가 프로젝트로 가공기에 이용할 반도체레이저 여기 고체레이저의 개발에 심혈을 기울이고 있다. 반도체레이저의 출력 향상에 따라 반도체레이저 여기 고체레이저는 고평균출력화에 초점을 맞추어 연구 개발하고 있어 레이저 마킹, 레이저 트리밍 및 반도체 수리 등의 마이크로 가공분야를 포함하여 폭 넓은 응용이 기대된다. 한편 반도체레이저 자체의 출력도 첨두출력에서 MW급을 넘어서는 등 고출력화가 진척되고 있는 연유로 반도체레이저광을 직접 조사하여 가공에 사용하는 것도 검토되고 있다.

4.3 레이저 핵융합로용 에너지 드라이버

지구 대기의 온난화와 환경파괴는 우리가 해결해야 할 가장 중요한 문제중의 하나이다. 현재 에너지생산은 화석연료에 의한 화력발전, 우라늄에 의한 원자력발전이 주류를 이루고 있다. 그러나 화석연료는 조만간 고갈상태에 달할 것이고 공해 문제 또한 심각하다. 원자력발전의 경우도 방사능에 의한 오염 부담을 앓고 있다.

최근 미래의 에너지원 개발에 대해 활발한 연구가 진행되고 있다. 그 중에서도 핵융합에 의한 발전은 가장 주목을 받고, 연구에서도 대단한 성과를 얻고 있다. 핵융합발전은 연료로 바다 물에 무한히 포함되어 있는 중수소 및 삼중수소를 사용하는 무공해의 깨끗한 에너지원이다. 핵융합에 접근하는 방법은 토카마크를 이용한 자장밀폐방식과 레이저 등을 이용하는 관성밀폐방식이 있다. 레이저핵융합 연구에 이용되는 대출력 레이저는 플래시램프 여기 방식의 Nd:Glass 레이저 시스템이 주류를 이루고 있다. 플래시램프 여기 고체레이저는 1 shot 형태의 레이저로서는 대단히 높은 완성도를 지니고 있다. 그러나 레이저 핵융합로용 드라이버로서 볼 때 반복동작과 총효율면에서 문제점이 있다. 이 문제점들을 해결하기 위해 제안된 것이 반도체레이저 여기 방식이다. 반도체레이저 여기 고체레이저는 레이저매질에 대한 열부하를 경감시킬 수 있어 고효율에 고반복동작까지 가능하다.

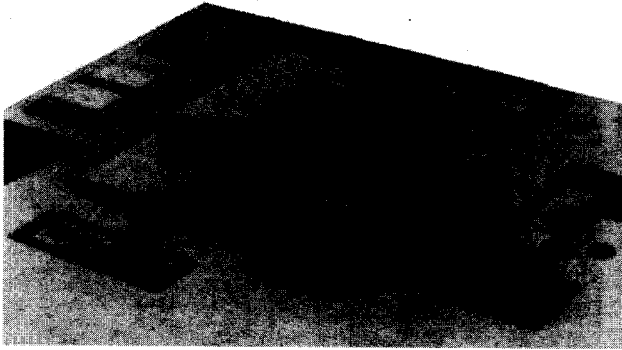


그림 6. 오사카대학 ILE의 레이저 핵융합 발전소 "광양" 개념도

이 때문에 반도체레이저를 여기원으로 하는 고출력 Nd:Glass 레이저 시스템을 핵융합용 에너지 드라이버로 사용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그림 6에 오사카대학의 ILE가 계획하고 있는, 32 개 비임 라인의 반도체레이저 여기 고체레이저를 사용하여 레이저 핵융합 반응로 4 대를 구성하고, 한 대당 60만 kW의 전기를 출력시킬 레이저 핵융합 발전소 "광양"의 개념도를 나타낸다.

5. 결 론

고체레이저의 고효율화, 콤팩트화 및 장수명화를 이룩하고, 응용성을 한층 더 높이기 위해 반도체레이저를 여기원으로 하는 레이저에 대한 연구 개발은 아주 중요하다.

반도체레이저 여기 고체레이저의 발전에는 반도체레이저의 고출력화와 집광·광결합광학계의 연구에 의한 고휘도화 등 여기광원의 개발, 새로운 레이저매질 및 비선형 광학 결정 등의 광학소자 개발에 의한 고기능화, 다기능화가 아주 중요하게 작용한다. 따라서 반도체레이저의 고출력화가 더욱더 진전되어감에 따라 반도체레이저 여기 고체레이저는 레이저가공 등의 에너지 응용분야에서 상당한 역할을 하리라 생각된다.

우리는 일본의 미쯔비시 전기가 1988년부터 가장 기초적인 반도체레이저 여기 Nd:YAG 레이저를 개발하기 시작한 이래 꾸준히 연구하고 개발하여 지금의 결과를 얻게되었다는 것을 주지해야 한다. 우리나라에서도 대학 및 연구소를 비롯하여 기업들도 꾸준한 투자와 일관성 있는 계획 아래 기반기술의 개발이 동반되는 응용에 임해야 좋은 결과를 얻을 수 있으리라 생각한다.

참고문헌

- [1] 김병태, 한국원자력연구소 보고서 (1994).
- [2] 김태식, 이형권, 이종웅, 정치섭, 김병태, 응용물리 8, 54(1995).

- [3] 김병태, 김태식, 한국광학회지 8, 303(1997).
- [4] 김병태, 제14회 광학 및 양자전자 학술발표회 (1997).
- [5] B. T. Kim and T. S. Kim, J. Korean Phys. Soc. 34, 185(1999).
- [6] K. Naito, Ph.D. Thesis (Osaka Univ., Japan, 1993).
- [7] T. Y. Fan and R. L. Byer, IEEE J. Quantum Electron. QE-24, 895(1988).
- [8] W. Streifer, D. R. Scifres, G. L. Harnagel, D. F. Welch, J. Berger, and M. Sakamoto, IEEE J. Quantum Electron. QE-24, 883(1988).
- [9] R. L. Byer, Science 239, 742(1988).
- [10] S. Basu and R. L. Byer, Appl. Opt. 29, 1765(1990).
- [11] W. Koechner, Solid-State Laser Engineering (Springer-Verlag, Berlin, 1996).
- [12] K. Washio, Review Laser Eng. 24, 316(1996).
- [13] D. Golla, S. Knoke, W. Schone, M. Bode, A. TurnerMann, and H. Welling, Opt. Lett. 20, 1148(1995).
- [14] K. I. Martin, W. A. Clarkson, and D. C. Hanna, Opt. Lett. 21, 875(1996).
- [15] E. C. Honea, C. A. Ebberts, R. J. Beach, J. A. Speth, J. A. Skidmore, M. A. Emanuel, and S. A. Payne, Opt. Lett. 23, 1203(1988).
- [16] H. Kiriya, T. Yoshida, M. Yamanaka, Y. Izawa, T. Yamanaka, S. Nakai, T. Kanzaki, H. Miyajima, M. Miyamoto, H. Kan, Fusion Engineering and Design 44, 419(1999).
- [17] S. Kono, S. Fujikawa, K. Yasui, CLEO '97 Technical Digest 19, CThL25(1997).
- [18] Annual Progress Report, Institute of Laser Engineering, Osaka University(1998).
- [19] M. D. Skeldon, R. B. Saager, and W. Seka, IEEE J. Quantum Electron. QE-35, 381(1999).
- [20] T. Kojima, S. Fujikawa, and K. Yasui, IEEE J. Quantum Electron. QE-35, 377(1999).
- [21] S. G. Anderson, Laser Focus World 35, 80(1999).

저 자 소개



김병태(金炳泰)

1958년 5월 9일생. 1982년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 일본 오사카대학 대학원 전자에너지공학전공 졸업(공학박). 1984년-85년 (주)대우중공업 중앙연구소. 1986년-90년 오사카대학 레이저핵융합연구소. 1990년-현재 청주대 공대 광학공학과 교수. 주연구분야: 고출력 고체레이저 시스템