

산업적 응용면에서 검토해 본 DPSS 레이저 발전기

이 글에서는 반도체, 디스플레이, 정보가전 산업 및 자동차 산업 등에서 새로운 생산도구로서 그 중요성이 더해가는 고정밀 레이저 생산 장비의 핵심, 레이저 발전기인 다이오드 여기 고체 레이저(DPSSL: Diode Pumped Solid State Laser)의 기술적인 개요와 산업응용에서의 경쟁력에 관한 주요 비교 인자에 대해 소개한다.

박충범 / 하나기술(주), 연구위원

e-mail : cbpark@hanalaser.com

지금으로부터 대략 20년 전, Laser Focus World(Penn well Publication에서 발행하는 레이저 및 광학기술에 관한 월간지)에 그 당시만 해도 아주 새로운 기술인 diode array-end-pumped solid-state 레이저 구조와 diode-pumped system의 장점이 소개되었으며 1.064um 파장의 Q-switched Nd:YAG 레이저를 이용한 micromachining 분야와 1.3um 파장을 발생하는 fiber laser의 광통신 분야에 잠재적인 응용 가능성을 전망하였었다.

그 이후 현재까지 DPSS(Diode Pumped Solid State) 레이저에 대한 기초 과학적인 연구와 이를 연계한 산업적인 기술개발이 지속적으로 활발히 진행되어 오고 있으며 레이저의 수명이 10,000 시간대에 도달하게 되었다. 이는 기존의 lamp pumped 레이저 시스템이 200~500시간의 수명을 갖는 것과 비교하여 볼 때에 레이저의 수명이 20~50배로 증가하게 하는 획기적인 레이저 기술혁신이었다. 특히 레이저 시스템을 사용하는 산업현장에서 기존의 lamp pumped 레이저 시스템의 lamp를 200~500시간마다 한 번씩 교체함으로써 야기되는 레이저 시스템의 down time이 그만큼 줄어들게 하여 생산성 향상에 기여하고 있다.

DPSS 레이저 기술의 지속적인 발전과 high power diode 레이저 가격이 지난 20년 전과 비교하여 10배 이상 저렴해진 것에도 불구하고 DPSS 레이저의 가격이 lamp pumped 레이저의 가격에 비해 1.5배~2배 정도 비싼 것이 현실이다. 사업성 또는 생산성 검토를 할 때에 레이저 장비 사용자의

입장에서는 초기의 레이저 구입가격만 고려하는 측면이 있어서 레이저 장비 구매 검토에 다소나마 도움이 되고자 이 글을 쓴다.

DPSS 레이저와 lamp pumped 레이저와 비교 그리고 DPSS 레이저와 그 외의 다른 종류의 레이저를 같은 가공용도에 사용할 때의 비교를 레이저 사용자의 입장에서 고려해볼 수 있는 기준을 합리적으로 마련하고자 자료를 취합하여 정리하였으나 이러한 내용의 자료들이 산업현장에서는 매우 필요한 실정임에도 불구하고 합리적으로 객관적인 데이터에 의해 정리된 자료들이 그리 흔하지 않다.

그동안 본 저자가 준비한 자료들을 기초로 하여 미약하나마 이 작업을 위한 기본 틀을 산업적인 응용면에서 검토해 본 'DPSS 레이저와 Lamp Pumped 레이저의 비교' 부분에 서술하고 본 저자는 계속 이 부분의 자료를 보완 또는 수정해 나아갈 것이며 레이저 장비 사용자에게 입장에서 객관적이고 합리적인 자료를 구축해 나아가려 한다.

이에 대한 독자들의 DPSS 레이저의 기술적인 이해를 돕고자 DPSS 레이저에 대한 개요 및 DPSS 레이저의 한 예를 아래와 같이 설명하고 본문에 들어가고자 한다.

DPSS 레이저의 기술적 장점

DPSSL은 기존의 고출력 레이저인 CO₂ 레이저, 플래시 램프로 펌핑된 Nd:YAG 레이저, 엑시머(excimer) 레이저 등에 비해서 고출력, 고효율, 장수명, 고신뢰성, 경량 등의 탁월한 장점을 갖고 있다.

일례로, 지금까지 고체레이저의 여기에 사용되었던 플래시램프와 비교해 보면 플래시램프는 60%가 넘는 발광효율을 얻고는 있지만, 발광스펙트럼이 자외 영역에서 적외영역에 이르기까지 넓은 파장대를 형성하고 있어 고체레이저 매질의 흡수스펙트럼과 정합성이 낮아 레이저효율이 수% 정도이다. 또 고체레이저 매질에 열부하가 커서 고평균 출력을 얻는 것이 어려우며, 열 왜곡현상 때문에 레이저 빔의 균질성이 좋지 않다. 이와 대조적으로, 레이저 구조와 결정 성장기술의 급격한 진전에 의해 최근 제작이 가능한 출력 수십W급의 GaAlAs계의 레이저 다이오드는 Nd³⁺을 활성이온으로 하는 고체레이저 매질의 흡수스펙트럼과 잘 일치하여 레이저 효율이 약 30%에 이르고, 수명도 약 1만 시간으로 플래시램프에 비해 약 100배 이상 길어진다. 따라서 다이오드레이저를 이용하여 Nd:YAG 등의 고체레이저를 여기하는 DPSSL(Diode-Pumped Solid-State Laser)은 플래시램프로 펌핑된 Nd:YAG 레이저에 비하여 우수한 여기 효율과 출력 안정성을 가지고 있다. 여기원인 다이오드 레이저의 가격이 하락함에 따라 DPSSL은 중·고출력 레이저의 주력으로 자리를 잡아가고 있다.

기존의 자외선 레이저로는 아르곤 레이저, He-Cd 레이저, 엑시머 레이저가 주종을 이루고 있었으나, DPSSL을 비선형 변환시켜 가시광과 자외선 파장을 발생시키는 레이저가 이 파장대의 주력 레이저로 급속히 시장을 확대해가고 있는 추세이다.

DPSSL은 우수한 고유특성 때문에 응용범위가 대단히 넓으며, 기존에응용중인 분야로는 레이저 가공 산업, 의료용 레이저 산업, 원자력 산업, 반도체 산업, 환경 산업 등이 있다.

DPSSL의 여기구조

고출력 DPSSL의 개발은 고출력 다이오드 어레이와 이를 이용한 고체레이저 여기구조의 개발로 현실화되었다. 고출력 DPSSL을 이용하여 고체레이저 결정을 여기하는 방법은 종여기와 횡여기 방식으로 크게 구분할 수 있다. 종여기 방식은 여기레이저의 방향이 여기된 레이저 모드의 축과 동일한 방향을

가진다. 이러한 여기구조는 여기광이 레이저 결정과 공진기 모드에 잘 정합되는 잇점이 있어, 광변환 기술기 효율이 약 69%에 도달한 결과보고가 있다. 그러나 종여기 방식은 고출력의 여기레이저를 사용할 경우 결합광학계의 복잡성에 의해서 고출력화가 제한되며, 100W급 이하의 소규모 레이저 제작에 이용될 수 있다. 횡여기 구조에서는 여기레이저의 방향이 여기된 레이저의 공진기 모드에 수직하며, 이러한 여기구조에서는 고출력의 레이저를 제작하기 위해서 필요한 다수의 다이오드 어레이를 고체레이저 결정의 둘레에 쉽게 배치할 수 있는 장점이 있다. 따라서, 수십 혹은 수백W급의 고출력 레이저를 개발하기 위한 여기구조는 횡여기 방식이 적당하다.

횡여기 방식을 이용한 수백W급의 고효율을 갖는 Nd:YAG 레이저 개발을 위한 효과적인 여기방법으로 원형대칭의 근접결합방식을 사용할 수 있다. 원형대칭의 근접결합방식은 몇 개의 선형 다이오드 어레이를 레이저 결정의 둘레에 배치하여 레이저 결정을 직접 여기하거나, 수개의 다이오드 어레이의 빔들을 실린더형의 금반사체 혹은 난반사체 광공동에 입사시켜 레이저 결정을 여기하는 구조를 사용한다. 근접결합방식은 고출력의 레이저 개발을 위해서는 많은 수의 다이오드 어레이가 필요하고, 직접 여기할 경우 여기레이저의 충분한 흡수를 위해서 레이저 결정 흡수 파장대의 피크에 여기레이저의 파장을 일치시켜야 하는 문제가 있지만, 고반사율을 갖는 난반사체를 사용하거나 광공동의 체적을 줄여 사용할 경우 상대적으로 균일한 여기와 고효율의 레이저 제작이 가능하다.

레이저 발진기의 설계

레이저 발진기는 펌프 헤드, 전반사 및 출력 거울, shutter 및 expander 부, 전원장치 및 냉각장치, cover부로 구성된다. 다이오드 레이저의 발광면에서 레이저봉까지의 거리를 비롯하여 반사체의 내부 반사면에서 레이저봉까지의 거리, 레이저봉에서의 Nd 이온 농도, 레이저봉의 직경은 모두 레이저 봉에서의 균일한 여기에 큰 영향을 주는 인자들이다. 레이저 공진기는 레이저 발진 파장 1.064nm에서

산업적 응용면에서 검토해 본 DPSS 레이저 발진기

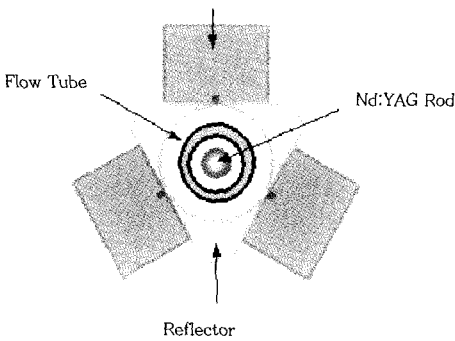


그림 1 원통형의 난반사체 광공동을 이용한 링여기 방식의 DPSSL의 여기구조

반사율이 99.8% 이상인 전반사 거울과 출력 거울을 사용한 선형 공진기(linear resonator)로 구성되어 있다. 각각의 거울은 거울 mount에 장착되어 미세 조정할 수 있도록 한다. 총 공진기의 길이는 사용된 Nd:YAG의 열렌즈 특성을 고려하여 조절할 수 있도록 설계한다. 모든 레이저 부품은 위치의 변경이 용이하면서도 고정된 상태에서는 진동에 매우 강하게 설계 제작한다.

반도체, 디스플레이, 정보가전 부품들이 고집적 초소형화 함에 따라 새로운 생산 도구로서의 레이저 가공기에서 요구되는 레이저의 정밀도가 증가하고 있다. 레이저에서는 렌즈로 빔을 집속할 때, 초점에서의 빔직경

D_f 는, $D_f = M^2 \frac{4 \times \lambda \times f}{\pi \times D_L}$ 로 주어진다. 이 크기를

줄이기 위해서는 파장이 짧아져야 하므로 자외선 레이저에 대한 수요가 급속히 증가하고 있다. 또한 빔질인자 (beam quality factor) M^2 는 가장 작은 1인 단일모드(TEM_{00})이어야 한다. 이 경우 여기에서 M^2 는 빔질인자를 나타내며, λ 는 레이저의 파장, f 는 사용한 렌즈의 초점거리, D_L 은 집속 렌즈 위치에서 빔의 직경이다.

그런레이저인 제2고조파는 기본파(1,064nm)로 발진하는 공진기 내부에 길이 LBO 결정을 두어 발생시

킨다. 이 결정은 온도에 따른 굴절을 변화를 이용하여 위상정합 조건을 맞추며, 기본파와 제2고조파가 walk-off가 없이 동일한 방향으로 나온다는 장점을 이용한 것이다.

자외선 레이저는 기본파(1,064nm)로 발진하는 공진기가 TEM_{00} 모드로 발진하게 한 다음에 이 레이저를 고효율로 제2고조파 변환시키고(532nm) 제2고조파와 기본파를 주파수 합성하는 방법으로 355nm의 파장을 가진 자외선 레이저를 발생시킨다.

레이저 펄스폭은 다이오드 레이저의 출력과 비선형 결정에서의 제2고조파 변환 효율에 영향을 받는다. 초기의 밀도 반전은 Q-switching을 하기 전에 다이오드 레이저에 의하여 강하게 여기될수록, 각 Q-switching을 시작하는 트리거 펄스 사이의 시간 간격이 길수록 증가한다. 초기 밀도 반전이 클수록, 즉, 다이오드 여기 출력이 크고 펄스 반복률이 작을수록 펄스폭이 짧아진다.

제2고조파 레이저의 출력 증가에 따른 빔질 (beam quality factor M^2)을 측정된 결과의 예로 하나기술(주)에서 개발한 DPSS Green 레이저의 경우 최고 출력인 13.6W의 제2고조파 출력에도 M^2 는 1.2 이하의 우수한 값을 유지한다. 기본파의 최고 출력은 20W이므로 기본파 출력에서 제2고조파 출력으로 변환되는 효율은 70%에 달하고 있다. 24시간 동안 출력 변동을 측정된 결과도 출력 요동 표준 편차의 3배인 3σ 가 출력 평균값의 $\pm 1.5\%$ 에 불과할 정도의 매우 안정된 출력을 얻고 있

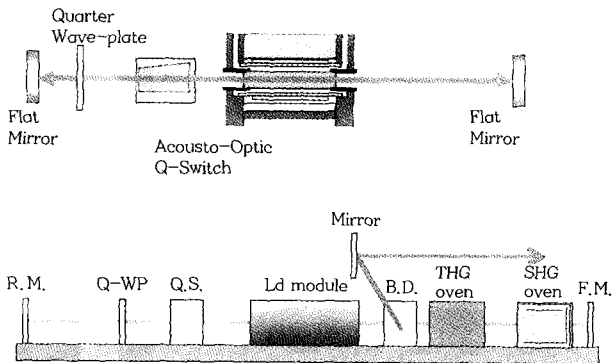


그림 2 자외선(제3고조파) 레이저를 발생시키는 공진기의 구조도

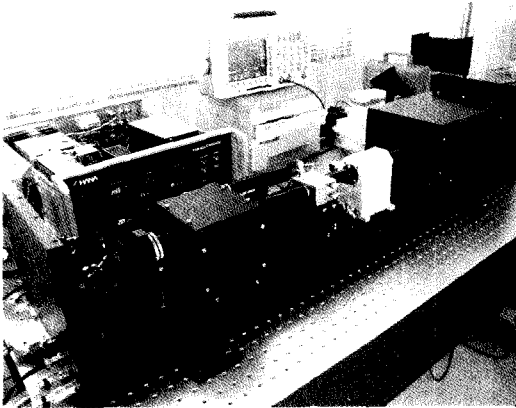


그림 3 UV laser 발진 모습(하나기술 연구소 레이저 실험실)

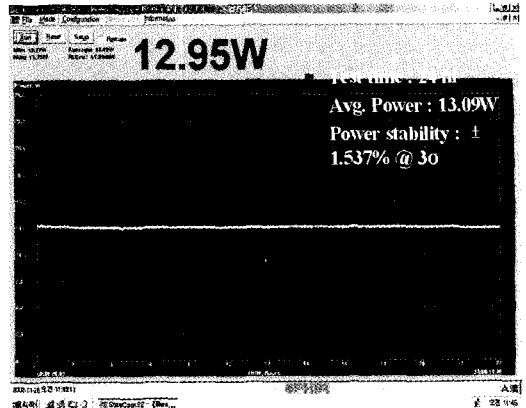


그림 4 시간에 따른 제2고조파 출력의 변화

음을 볼 수 있다. 이 출력에도 제2고조파에도 측정 한 것과 동일한 TEM_{00} 의 빔 공간 분포를 가졌다.

UV 레이저의 공간적 모양도 기본파의 TEM_{00} 모드 의 Gaussian 모드와 거의 유사하며, 그림 6은 UV 레이저 빔의 공간적 모양으로 측정한 M^2 값은 1.3이다.

DPSS 레이저와 Lamp Pumped 레이저의 수명 및 가격 비교

레이저 가격은 lamp pump 레이저에 비해 초기 구입비가 비교적 높으나 장기간(3~5년) 가동비용 을 고려하여 산출해 보면 DPSS 레이저의 가동비용 이 적게 들어 결과적으로 초기 투자비용의 차이를 극 복하고 레이저 장비 투자비용+가동비용이 lamp pump의 비용보다 저렴하다는 것을 알게 될 것이 다.

각 나라마다 각 사업장마다 전력 사용비용, 물값, 인건비 등의 차이가 있으므로 좀더 정확한 가동비용 은 표 1을 참고로 하여 산출해보면 각 사업장의 실정 에 맞게 레이저를 선택할 수 있을 것이다. 참고로 표 1은 Nd:YAG 레이저의 cw power 100W를 기 준으로 작성한 것이며 가장 중요한 레이저가동 비용 요소들을 열거한 것이다.

여기서 레이저 가격은 제조업체 마다 다르고 그 외 의 비용도 사업장 마다 달라서 따로 공란으로 남겨 두었다. 그러므로 총 비용의 산출은 각자가 다르게

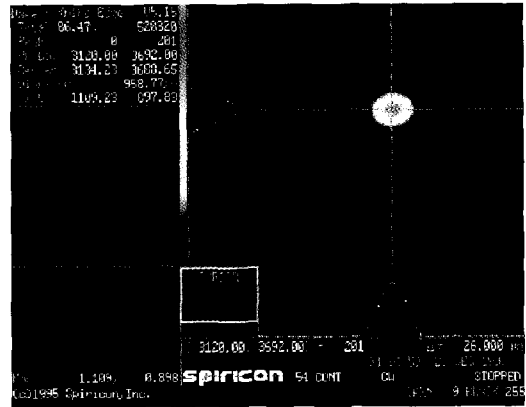


그림 5 UV 레이저 빔의 공간적 모양

나을 수 있다.

참고로 지난 20여 년 이상 저 출력 Nd: YAG레 이저(통상적으로 100W급 미만)의 산업적인 응용 은 semiconductor memory repair, resister trimming, image recording (marking) 분야에 가장 많이 적용되어 왔으며 이 분야에 DPSS 레이저의 이용이 현저하게 증가하고 있는 실정은 역으로 위 표의 DPSS 레이저 가동 총 비용이 lamp pumped 레이저의 비용보다 저렴함 을 입증한다고 말할 수 있다

DPSS 레이저와 CO₂ 레이저의 비교

지난 20여 년간 전통적인 레이저 가공분야인 Deep Welding과 Deep Cutting 분야에서는

표 1 Lamp Pumped Laser와 DPSS Laser의 가동 비용 요소 비교

	Lamp Pumped Laser	DPSS Laser
	Pumping Source	Lamp
		Diode Bar 또는 Array
1	Laser 가격	
2	장비 down time	램프교체로 인한
		장비가동 시간낭비
		200~500시간마다 교체
		8일~20일마다 교체
		Diode Bar 또는 Array의 교체
		시간이 평균 1년 이상
		교체시간x연간교체횟수
3	lamp/LD 가격	LD가격x연간 교체횟수
4	전력소모	4kW
	레이저 Power	100W
5	냉각수 소모	2차 Cooling Water
		레이저가 작동하는 동안 연속적으로
		없음

kW급 CO₂ 레이저가 가장 주류를 이루는 레이저 장비였다.

지난 10여 년간 kW급 lamp pumped 또는 DPSS Nd:YAG 레이저로 CO₂ 레이저를 대체하려는 노력이 전개되어 왔으나 레이저 빔 질이 CO₂ 레이저의 빔 질에 비해 양호하지 못하여 이 분야의 DPSS 레이저 가공에 응용은 CO₂ 레이저에 비해 매우 저조한 현실이다.

최근 몇 년간 DPSS high power Fiber 레이저의 현격한 발달로 kW급 high power Fiber 레이저가 상용화 되었으나 동급의 CO₂ 레이저에 비해 레이저 구입 가격이 높은 편이며(대략 1.2~1.5배) 워낙 고가의 장비라 CO₂ 레이저 대비 가공 성능 비교는 극히 제한적으로 이뤄지고 있다. 지난 1년간 국내의 한 업체에서 6kW급 fiber 레이저를 도입하여 현장에 적용하고 CO₂ 레이저와 비교 실험되고 있으나, 올 11월 말 현재까지의 성능 비교는 거의 비슷한 수준으로 나와 있으며 계속적인 비교 실험을 하고 있는 것으로 보고된 바 있다.(2004년 추계 레이저 가공학회 발표)

또한 반도체 레이저를 직접 이용하는 방법으로 kW급 반도체 레이저를 제조하는 기술이 있다. 이는 micro-channel cooler를 이용하여 20~25개의 diode레이저를 linear array로 배열하여 만든 출력 40W 급의 diode bar를 building block으로 이용하는 방법이다. 이 diode bar는 DPSS 레이저의 pumping source로 사용되기도 하지만 이 diode bar 150개를 차곡차곡 쌓는 방식으로 packaging한 파장 790nm~980nm의

출력 6kW급의 diode 레이저를 제조하여 CO₂ 레이저와 비교해본 결과 레이저 가공 성능 면에서 동급의 CO₂ 레이저보다 우수한 결과를 내지 못하였다. hardening process에서는 이상적인 결과를 보였음에도 불구하고 가격면에서는 CO₂에 비해 매우 비싼 편이다.(Industrial Laser Solutions October,

2002)

현재의 kW급 DPSS 레이저(DPSS fiber 레이저, diode 레이저)는 전통적인 레이저 가공분야인 deep welding 과 deep cutting분야에서는 아직도 CO₂ 레이저의 성능을 능가할 정도의 만족할 만한 결과를 얻지 못하고 있는 것이 현실이다.

그 결과로 이 분야의 DPSS 레이저 마켓은 그리 크지 않으나 이 분야에서도 DPSS 레이저의 시장이 서서히 성장하고 있는 것은 사실이다. kW급 High Power DPSS 레이저나 diode 레이저의 빔 질이 CO₂레이저만큼 좋아지고 레이저 가격도 견줄만한 정도가 되면 고체 레이저의 장점인 fiber를 이용한 beam delivery를 할 수 있는 장점과 함께 이 분야에 매력 있는 레이저 source가 될 것이다.

DPSS 레이저와 Excimer 레이저의 비교

DPSS 레이저는 thin film transistor의 결정화(crystallization)에 사용될 때에 엑시머 레이저에 비해 가격 경쟁력이 있다. DPSS 레이저는 레이저 가공이 비교적 적은 열적인 영향을 가공물질에 주게 되므로 IC(Integrated Circuit)의 생산에 레이저 공정이 자주 적용되고 있다.

LCD(Liquid Crystal Display)와 organic LED(Light Emitting Diode) 생산공정에서 low-temperature polysilicon technology에 레이저의 적용이 빠르게 확산되고 있지만 엑시머 레이저를 이용한 공정비용은 생산원가에 큰 부담이 되

고 있다.

표 2는 LCD 제조에 있어서 TFT(Thin-Film Transistor) 제조 공정에서 사용되는 Excimer Laser와 DPSS UV 레이저의 비교 표이다.

표 2는 두 타입의 레이저들을 각각 하루에 20시간, 한 달에 25일 작동하는 것으로 기준을 삼고 산출한 가동 비용이다. 레이저 비용(레이저 장비 값+가동비용)의 총계는 DPSS이 Excimer 레이저에 비해 20% 정도밖에 들지 않는다.

향후 DPSS 레이저의 전망

결론적으로 현재까지 kW급 high power CO2 레이저 응용분야를 제외한 산업용, 의료용, 군사용, 과학연구용 분야에서 DPSS 응용이 현저히 증가하는 추세이다.

그 이유는 레이저 성능 면에서 고효율(high efficiency), 좋은 빔 질(diffraction limited beam quality) 과 긴 수명(life time)의 장점을 갖고 있으며, 레이저 장비의 운용면에서 비교적 장비의 크기도 작아서 장비의 정비시간도 줄어들기 때문이다.

또한 DPSS레이저는 SHG(Second Harmonic Generation), THG(Third Harmonic Generation), OPO(Optical Parametric Oscillation) 등과 같은 비선형광학(nonlinear optics)적인 기술을 접목하여 레이저 파장 면에서 UV부터 mid-IR까지 레이저 펄스형태에 있어서 cw부터 fs(femto-second)펄스까지 광범위한

표 2 TFT 제조 공정에서의 Excimer Laser와 DPSS UV 레이저의 비교

	Excimer Laser		DPSS Laser	
	장비가격	(\$600,000/5년) \$10,000/월	(\$15,000/5년) \$2,500/월	
1	장비가격			
2	공장설비면적	2.24 제곱평방 미터 \$100/월	0 제곱 평방미터 (장비 내에 한 부품으로 장착) \$0/월	
3	전력소모비용	25kW \$1,100/월	1kW \$50/월	
4	소모품비용	\$40,000/월	\$7,500/월	
5	장비 정비(인건비)	\$1,250/월	\$125/월	
	비용총계	\$52,450/월	\$10,175/월	

(참고 : Laser Focus World July 2002)

레이저 특성을 가진 레이저 장비를 제작하기 가장 적합한 레이저이기 때문이다.

위와 같은 이유로 향후 DPSS레이저의 시장전망은 장·단기적으로 계속 증가하는 추세이며 특히, 최근 한국의 3대 수출 효자 품목으로 각광받는 반도체, 평판 디스플레이, 핸드폰 제작 공정에 사용되는 레이저 장비에 주류를 이루고 있는 외국산 레이저 장비를 대체할 수 있는 국산 DPSS 레이저의 개발/시판이 시급한 현실이다.

참 고 : 하나 기술은 지난 5개년간 정부 지원과제로 DPSS 레이저를 올 하반기에 성공적으로 개발 완료했다. 또한 산업현장에서 외국산 레이저를 대체할 수 있는 모델들을 상품화하여 올 12월부터 시판하고 있다. 성능/가격 면에서 국내에 사용되고 있는 외국산 레이저와 우월한 경쟁력을 갖추고 있으며 상품명은 YAG MIA 시리즈(7개 모델)이며 DPSS Nd:YAG 레이저로서 IR, Green, UV(TEM00), IR, Green (Multi mode) 레이저가 이에 해당 된다.

하나기술: www.hanalaser.com