

고 출력 색소레이저의 개발 현황

(Development of High Power Dye Laser)

오 철 한 * 한 광 수 이 자 현

경북대학교 Hampton Univ. NASA

1. 서 언

색소레이저(Dye Laser)는 가변할 수 있는 파장 폭이 크므로 이용되는 분야가 많다. 광의 흡수와 산란, 선택적 여기, 비선형 분광학으로부터 광화학, 동위원소분리, 홀로그래피, 광통신, 집적광학, 생명과학 및 의학에 이르기까지 다양하게 이용될 수 있다.

파장으로는 근자외선 영역의 300nm에서 1.3 μ m의 적외선영역에 이르기까지 많은 색소들이 개발되어 있다. 그러나 이들을 매질로 한 색소레이저는 대개가 출력이 약하여 이용하는데 제한을 받고 있다. 해저통신이나 해저개발에 필요한 청록색소레이저는 파장이 450-530nm이내로서 펄스로서는 수MW, CW로서는 100-1000W가 요구된다. 한편 원자력발전에 필요한 U²³⁵ 동위원소분리, 농축에도 수KJ의 에너지가 요구되고 있으나 아직 이에 못 미치고 있다.

따라서 색소레이저는 이용하고자 하는 곳에 적합한 파장과 파장범위를 가져야하고 또한 그 수준에 미치는 출력과 에너지를 가져야한다. 파장정합과 파장선택의 기술은 어느정도 개발이 되어 있으나 출력과 에너지가 못미치고 있으므로 이의 향상에 노력을 기울여야 한다. 여기서는 최근에 발표된 바 있는 일본 Hachinohe공대에서 개발한 방전관펌핑 색소레이저(110J, 1Hz, 110W)와 미국 Hampton대학에서 개발한 HCP펌핑 색소레이저(1MW/P, 1Hz, 60mJ)를 소개하고 끝으로 본 연구실에서 개발한 색소혼합법에 의한 색소레이저의 출력 및 에너지증가에 대한 결과를 소개코자 한다.

2. 색소레이저의 종류와 특성

표1. 고에너지 색소레이저 각종 특성

1) Pulse laser

	(Pumping)	(L.E.or P/pulse)	(PR)	(Av.Power)
Cu vapor L.		3.6mJ	6KHz	20W
Nd YAG L.		60mJ	100KHz	6W
Excimer L.		10J	-	-
Coaxial F.L.		400J	4PPM	27W
Linear F.L.		110J	1Hz	110W
HCP Array	{	1.3J(1.9MW)	-	-
		60mJ	1Hz	(60)

2) C.W. Laser

Ar ⁺ Laser	-	-	1W
-----------------------	---	---	----

지금까지 U 농축용으로 개발된 색소레이저는 표1과 같다. 크게 나누어서 레이저 펌핑형과 방전관(주로 Xe flash lamp)형으로 나누어 진다. 미국에서는 Cu Vapor laser pumping을 주로 연구하고 있는데 이것은 고속반복 발진이 가능하고 스펙트럼 손도가 비교적 양호하기 때문이다. 그러나 증기레이저 자체가 고도의 기술과 복잡성을 내재하고 있으므로 Nd.YAG laser에 의한 펌핑보다 낫다고 단정하기는 어렵다.

1펄스당 에너지는 방전관펌핑형이 훨씬 앞서고있다. Coaxial flashlamp pumping이 400J/P까지 도달하고 있다. 문제점은 lamp의 수명과 입력에너지의 한계때문이다. 이런점을 고려하여 새로 대두된 것이 HCP(Hypocycloidal Pinch)펌핑장치이다. 이것은 원래 PlasmaFocus장치로 개발된 것인데 Laser Pumping용으로 개량하여 각종 레이저 펌핑원으로 많이 응용되고 있다. 이 장치는 수명과 투입에너지의

제한이 없으므로 앞으로 고출력, 고에너지 레이저개발에 유능한 펄핑원으로 전망되고 있다.

3. 방전관펄핑형 색소레이저

3.1 동축형 방전관 색소레이저

방전관 펄핑형에는 두 가지로 나눌 수 있는데 동축형 방전관(Coaxial flashlamp)과 직선형방전관(Linear Flash-lamp)이다. 동축형 방전관은 Fig.1과 같은 구조를 하고 있는데 펄핑광펄스의 폭이 좁고 lamp와 dye cell과의 사이에 광학적 결합이 양호한 것이 장점이다. 그러나 저입력에서는 filament 모양의 방전이 일어나 spot dancing이 생겨서 전면이 균일한 방전이 일어나지 않는 것이 결점이다.

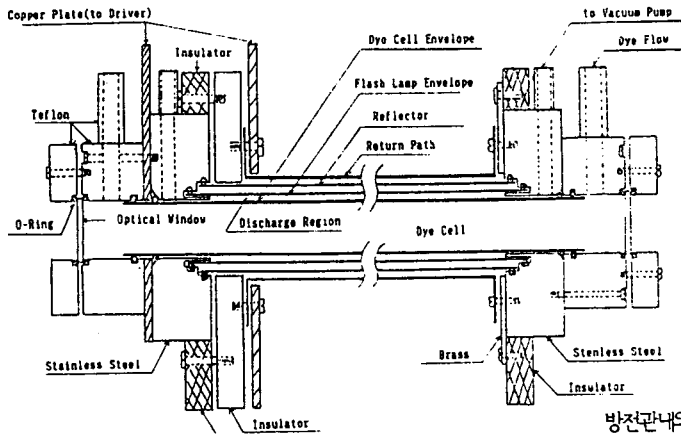


Fig.1. 동축형방전관 색소레이저(Hachinohe공대)

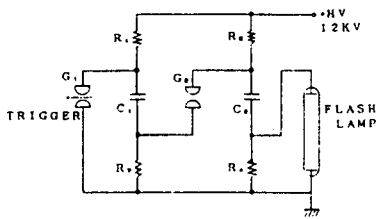


Fig.2. 방전관의 전기회로도

Fig.2는 방전관을 동작시키기 위한 충방전회로도 인데 Marx Bank(Impulse Generator)를 2단을 이용한 것이다. 입력 에너지 100J급까지 사용할 수 있으나 실제로는 lamp의 수명이나 파손될 때 처리가 문제이다.

3.2 직선형 방전관 색소레이저

Fig.3은 직선형방전관으로 펄핑된 색소레이저의 구조를 대략 나타낸 것이다. 4종터빈통의 초점에 4개의 방전관을 배치하고

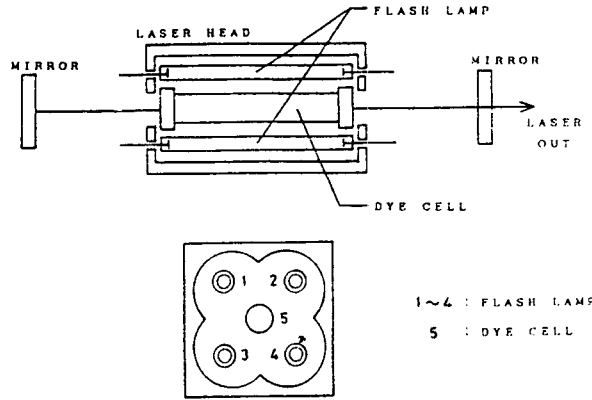


Fig.3. 직선형 방전관 레이저의 구조(Hachinohe공대)

그 중심에 dye cuvette를 놓았다. 그리고 이들 방전관의 충방전 회로는 Fig.2와 같은 2단 Marx Bank를 각 방전관에 연결하고 이들을 H.V.에 병렬로 연결하여 사용하였다. 4조의 Marx Bank회로는 1개의 main gap switch에 의하여 trigger로 정한다. 각 condenser는 10 μ F, 15KV의 저임피던스로서 8개가 연결되어 있으므로 최대입력에너지는 9KJ까지 가능하다. 방전관은 2mm두께의 투명석영관을 사용하고 전극은 Brass rod로서 끝에 Mo를 붙여서 유효방전거리를 420mm로 하였다.

방전관내의 기압을 수 Torr로 배기하여 항상 glow discharge로 안정화 시켜서 사용하였다. dye cell은 내경 28 ϕ 및 44 ϕ 의 pyrex tube를 사용하였다. window는 무반사코팅한 광학유리로 사용하였다. 전기회로는 저항과 잔유인덕턴스가 극소화되도록 배선은 폭 넓은 동판으로 사용하였다. 이제 색소로서는 U²⁶에 동조하여야 할 것과 고출력이 얻어지는 것을 고려하여 Rhodamine 6G를 에탄올에 용해하여 사용하였다.

이상의 장치로 실험한 결과 여러가지 특성을 얻었으나 색소 농도에 따른 출력변화(Fig.4)와 입력에너지에 따른 출력에너지의 변화(Fig.5)만 소개한다.

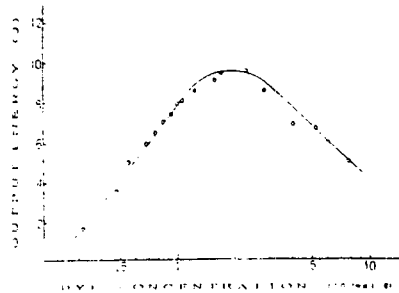


Fig.4. 색소농도에 따른 출력에너지 변화 (28 ϕ)

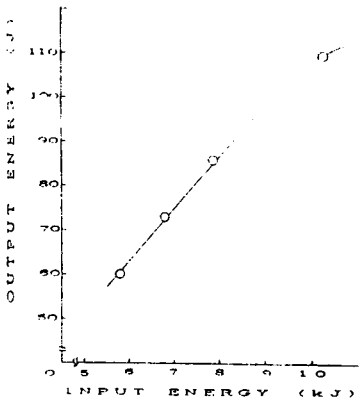


Fig. 5. 입력에너지에 따른 출력에너지 증가

Fig. 4는 28φ cell일 경우 색소농도에 따른 출력에너지의 관계를 나타내는데 2×10^{-4} mol/l 일때 최대 출력을 얻었다.

dye cell을 44φ로 바꾸어 실험했을 경우에는 최대인가전압 16KV일때 110J의 최대출력을 얻었다. Fig. 5에서와 같이 laser energy는 입력에너지에 따라 거의 직선적으로 비례하다가 입력에너지 10KJ 이상에서는 출력이 포화현상이 나타난다. 이것은 lamp의 광강도의 포화에 의한 것으로 생각된다.

4. HCP펌핑 색소레이저

4.1. 1MW펄스 청록색소 레이저

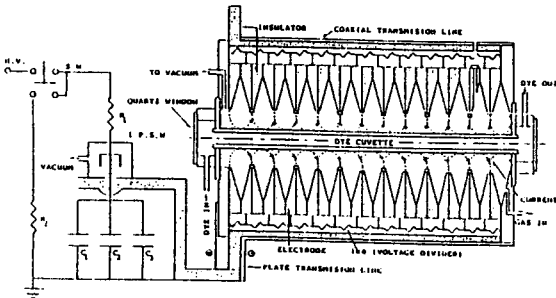


Fig. 6 HCP펌핑색소 레이저의 구조와 방전회로(Hampton대학)

HCP(Hypocycloidal Pinch) 장치의 내부구조는 Fig. 6과 같이되어 있다. 14개의 disk전극과 13개의 절연판으로 조립되었으며 1KΩ의 저항을 사이에 두고 모두 직렬로 연결되어 있다. 전극은 Brass로 제작되고 절연판은 Teflon 또는 Fiber Glass로 되었다. 각 전극의 끝은 Mo ring을 끼워서 사용한다. disk전극의 중심축상에 dye cuvette를 고정시킨다. gas는 Ar, Xe을 주로 사용하고 방전전압과 기압은 용도에 따라서 다르게 한다. 왜냐하면 발광 Spectrum이 전압과 기압에 따라서

달라지기 때문이다. Capacitor bank는 모두 8μF이고 인가전압은 32KV이므로 입력 에너지는 4KJ이다. 이때 사용한 switch는 Inverse Pinch s.w.로서 진공상자속에서 동작시키며 대전류용이다. peak current는 200KA인데 그 이상에서도 견딜수 있게 고안한 것이며 이것은 NASA에서 최근에 개발하였다.

Fig. 7은 HCP를 방전시켰을 때의 방전광의 진전과정을 streak picture로 관찰한 것이다. 0.2μs이내에는 전극사이의 절연체표면방전이 일어나고 0.2μs에서 0.5μs사이에는 전극끝에서 중심으로 발전하고 0.5μs-1μs사이에는 plasma focus가 일어나 중심으로 집중되는 것을 알수있다. 이와 같이하여 광펄스는 1μs내외에서 최대치를 이루게 된다.

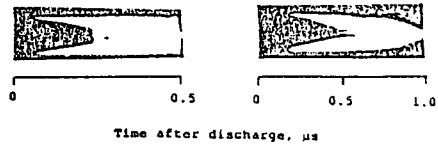
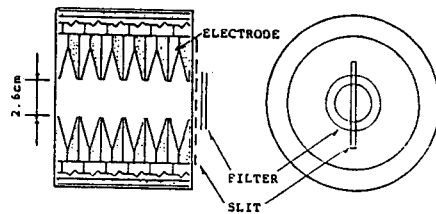


Fig. 7 HCP방전플라즈마의 Streak Picture

Fig. 8은 HCP방전시의 방출광의 spectrum이다. 실선은 20Torr때이고 점선은 5Torr때이다. 대개 300-850nm이상 분포되는 데 400nm근처가 강하다. 기압을 낮춤에 따라서 장파장폭이 감소하고 단파장폭이 증가한다.

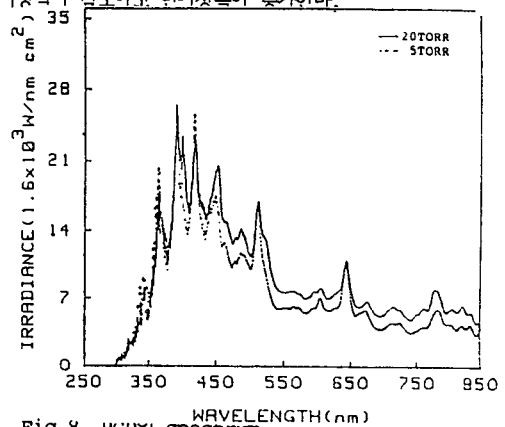


Fig. 8 HCP의 spectrum

이 펌핑광원을 사용하여 청록색영역의 색소인 LD490를 발진시켜보면 Fig.9와 같이 된다. 용액의 농도는 최적농도인

4×10^{-4} mol/l을 사용하였다. HCP내의 기압을 5, 20, 50Torr씩 바꿈에 따라 레이저펄스의 최대치가 감소하고 반치폭이 조금씩 커진다. 이것은 펌핑광펄스의 risetime이 증가하고 피크치가 감소하고 반치폭이 커짐에 그 원인이 있음을 확인할 수 있다.

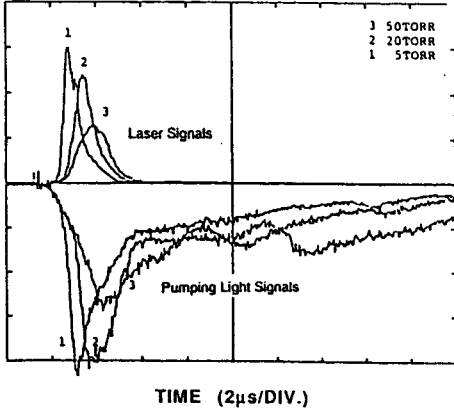


Fig.9 펌핑광과 레이저펄스

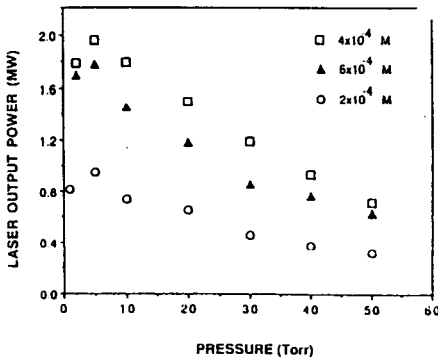


Fig.10 HCP의 충전기체의 압력에 따른 변화

Fig.10에서 알 수 있는 바와 같이 Ar압력에 따라서 레이저출력이 변하는데 5Torr에서 가장 크고 그 이상에서는 감소한다. 이것은 Fig.9에서와 같이 기압이 커질수록 펌핑광 펄스가 변하기 때문이다. 색소용액의 농도에 따라서도 변하는데 이것은 최적농도 4×10^{-4} mol/l일때 가장 크고 그외의 농도에서는 감소한다. 최적조건일때 레이저의 최대출력은 1.9MW까지 얻었다. 그리고 입력에너지가 5KJ일때 레이저에너지는 1.3J를 얻음으로써 효율은 아직 떨어진다.

4.2. 1Hz UV 색소레이저

이것은 출력을 높이기 보다는 자외선 색소레이저로서 반복율을 높이는데 노력하였다. Fig.11과 같이 HCP를 Rail Gun Switch를 사용하여 고전압의 L-R-C 진동회로로서 충.방전시키면 1Hz까지 가능하다.

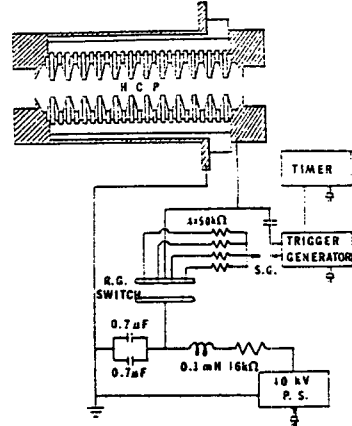


Fig.11 1Hz HCP색소레이저 전기회로도

1.4μF의 Condenser에 직렬로 L-R를 연결하여 spark gap을 trigger시키면 Rail Gun Switch를 통하여 진동방전이 일어난다. 그 결과는 펌핑광펄스를 detector로 조사하면 Fig.12와 같이 아주 균일하게 잘 나타난다.

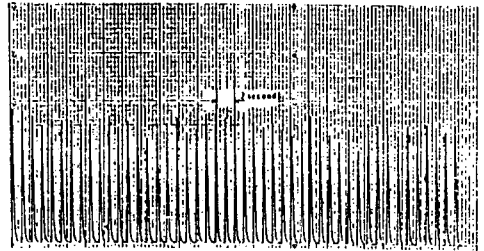


Fig.12 펌핑광 펄스의 반복성

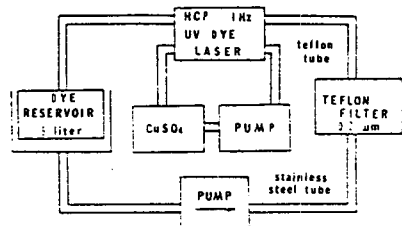


Fig.13 Dye와 CuSO_4 순환장치

펌핑에 따라서 색소내부에는 열적불균일 현상이 발생하는데 이것을 제거하기 위하여 색소를 흘리면서 순환시켜야 한다. 그리고 냉각수와 직렬저항의 역할로 CuSO_4 용액을 사용하여 마찬가지로 순환시켜야 한다.

Fig.13은 Ar기압에 따른 레이저 에너지변화를 나타낸 것이다. 이 경우는 최적기압이 10Torr임을 알 수 있다. 이것은 BBQ의 흡수대인 280-330nm가 10Torr일때 최대치를 나타내기 때문이다. BBQ의 농도는 $5 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$

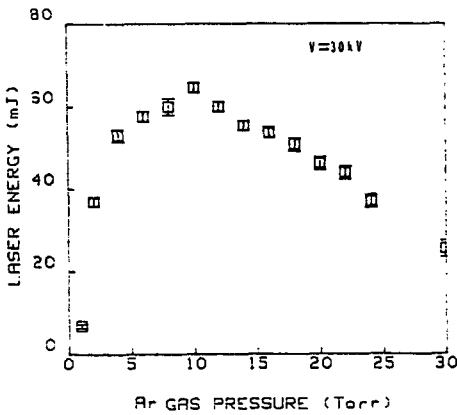


Fig.14 Ar기압변화에 따른 레이저에너지

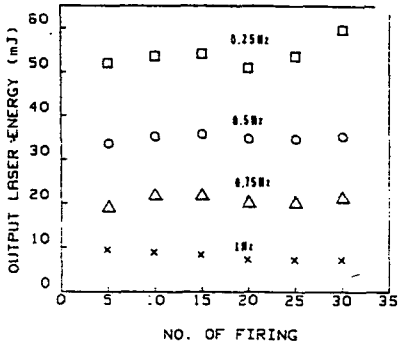


Fig.15 PRR에 따른 레이저에너지의 안정도

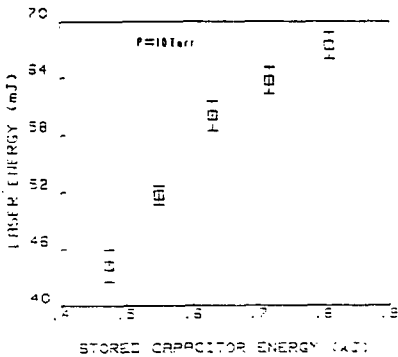


Fig.16 입력에너지에 따른 출력에너지

Fig.15는 pulse repetition rate에 따른 출력에너지의 안정도를 나타낸 것이며 Fig.16은 입력에너지대 레이저에너지 사이의 관계를 나타낸 것이다.

5. 색소혼합에 의한 레이저에너지의 증가

5.1. 에너지증가 이론

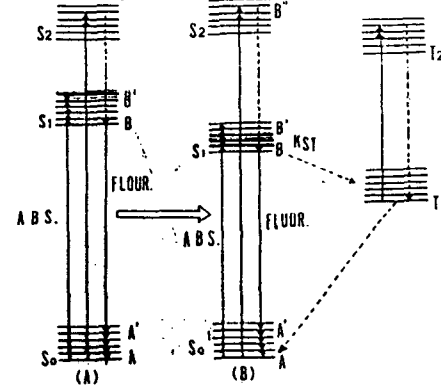


Fig.17 두 색소의 분자에너지 준위도

Fig.17은 전환색소(A)와 레이저색소(B)의 준위도를 나타낸 것이다. 먼저 펌핑광에 의해서 (A)의 $S_0 \rightarrow S_1$ 여기에 의한 흡수가 일어나고 (A)B $\rightarrow A'$, A 형광방출이 일어난다. 이 형광이 다시 (B)의 $S_0 \rightarrow S_1$ 여기에 흡수되어 (B)B $\rightarrow A'$, A형광 방출을 증가시키게 된다. 따라서 레이저색소만을 사용할때 보다 그 만큼 형광방출이 증가하므로 레이저출력, 에너지가 증가하게 된다.

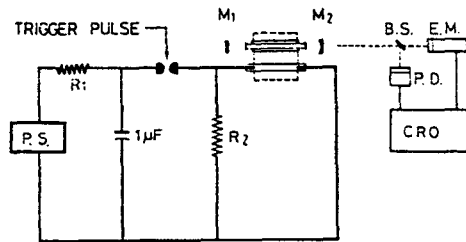


Fig.18 레이저공진기, 방전회로, 측정장치

실험에 사용된 펌핑광원은 Xe-flashlamp를 사용하였으며 레이저색소로서는 LD490 (390-480nm), 전환색소로서는 BBQ (320-390nm)를 사용하였다. 미러 M_1 , M_2 는 중심파장 500 nm, $\Delta\lambda=70\text{nm}$, 100%, 98% 반사율을 가졌다. Condenser는 $1\mu\text{F}$, 15KV로서 110J까지 입력이 가능하나 주로 80J를 사용하였다. 검출기로서는 photodiode와 energy meter를 사용하였다.

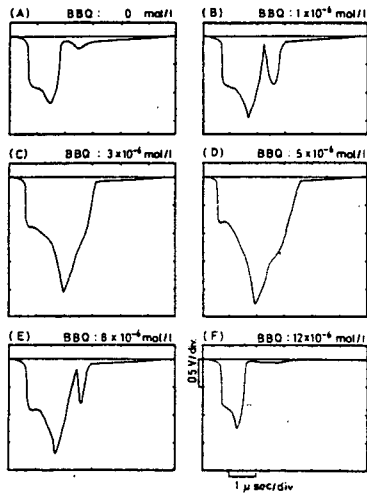


Fig.19 BBQ농도에 따른 레이저의 변화

BBQ농도 증가에 따라서 레이저펄스가 피크치와 폭이 다 같이 증가하다가 다시 감소한다. 즉 power와 energy가 증가한다고 볼 수 있다. BBQ의 농도가 5×10^{-6} mol/l 일때 최대가 된다.

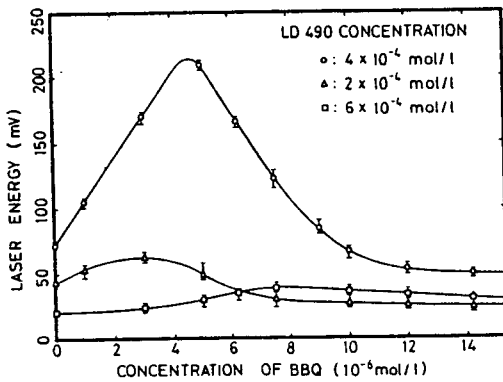


Fig.20 LD490농도와 BBQ농도에 따른 레이저에너지

Fig.20에서 알 수 있는 것은 LD490의 최적농도 4×10^{-4} mol/l 일때 에너지증가가 가장 크고 이때 에너지증가율은 180% 이고 출력증가는 92%이다. 이 결과는 지금까지의 청록색영역에서 가장 좋은 성과를 나타낸다.

결 언

이상과 같이 고효율 색소레이저의 몇가지지를 개관하였으나 아직도 특수분야응용에는 못 미치고 있다. 각 응용분야에 맞는 레이저개발을 목표로 노력을 기울이면 미국의 장래에 달성할 수 있을 것으로 믿는다.

REFERENCE

- 1) M. JYUMONJI, N. NAGAMINE, H. UCHIYAMA
"Flashlamp-Pumped High-Energy Dye Lasers", Rev. of Laser Engg. vol.19, No.5 p346 (1989). Laser Society of Japan
- 2) K. S. Han, K. Nam and Ja H. Lee
"One Megawatt Blue-Green Laser By High Temperature Plasma Arrays" Private Communication (1988)
- 3) S. M. Lee, et al
"One Hertz Ultraviolet Source for Laser Excitation", Hampton Univ. M.S. Thesis (1988)
- 4) K. S. Han, C. H. Oh and Ja H. Lee
"Spectrum Converter Dye for Enhancement of Blue-Green Laser Efficiency" J. Appl. Phys. 62, 10 (1986)