

소형경량 1.5 μm 대역 발진용 레이저 매질 및 포화 흡수체의 비교분석

Comparative Analysis on Laser Material and Saturable Absorber for Compact
Lightweight 1.5 μm Wavelength Radiation

박도현*
Park, Do-Hyun

오승일*
Oh, Seung-Il

배효욱*
Bae, Hyo-Wook

김대성*
Kim, Dae-Sung

ABSTRACT

Laser materials for eyesafe wavelength generation and Q-switching crystals for short pulse operation were studied and compared with each other. Er,Yb:phosphate glass as a laser material and $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ as a saturable absorber were found to be an effective pair for a compact, light-weight passively Q-switched eyesafe laser operation. Simplified rate equation was used to estimate pulse parameters of the diode-pumped passively Q-switched laser.

주요기술용어(주제어) : Passive Q-switching(수동형 큐 스위칭), Eyesafe Laser(눈에 안전한 레이저), Saturable Absorber(포화 흡수체), DPSSL(다이오드 레이저 여기 고체 레이저), Laser Range Finder(레이저 거리측정기)

1. 머리말

1.5 μm 대역의 레이저는 의료, 통신 분야 뿐 아니라 군사적으로 레이저 거리측정기의 광원으로 중요한 의미를 갖는다. 현재 사용되고 있는 레이저는 소형경량화의 어려움과 낮은 전기광학 효율을 갖고 있기 때문에 이를 개선하려는 노력들이 계속되어 왔다.

눈에 안전한 파장에서 동작하는 레이저 거리 측정기용 레이저 개발에는 두 가지 문제가 존재한다. 첫째는 고효율의 안정적인 레이저 매질을 찾는 것이며, 두 번째는 펄스 동작을 위한 큐 스위칭 물질을 확보

하는 것이다.

본 연구에서는 눈에 안전한 파장에서 동작하는 레이저 물질 및 큐 스위칭 물질들의 물성을 분석하고 이로부터 적절한 레이저 매질과 큐 스위칭 물질을 제시하였다.

선택된 레이저 매질과 큐 스위치를 조합하였을 때 다양한 여기조건에 대해 예상되는 펄스 에너지를 이론적으로 해석하여 레이저 거리 측정기용 광원으로 타당성을 검토하였다.

2. 눈에 안전한 레이저

눈에 안전한 레이저(eyesafe laser)란 인체의 각막을 투과하지 못하는 1.4 μm 이상의 파장을 가진 레이

† 2004년 8월 7일 접수~2004년 11월 26일 심사완료

* 고등기술연구원(IAE)

주저자 이메일 : dohyun@iae.re.kr

저를 지칭한다. 일반적으로 눈에 대한 안전성은 레이저 등급으로 표현되며 Class I으로 표현되는 레이저는 눈에 안전한 레이저로 분류된다. 레이저의 안전성을 분류하는 표준은 미육군의 TB MED 524, FDA의 Regulation-21 CRF 1040, ANSI-1986, MIL-STD-1425 등에서 정의하고 있다.^[1]

이 가운데에서도 100ns 이하의 펄스폭을 가진 펄스 레이저에 대한 Class I AEL(accessible Emission Limits)의 정의에 따르면 1.535~1.545 μ m 사이의 파장영역이 매우 중요한 의미를 지닌다. 그 이유는 이 파장영역에서 눈에 미치는 손상강도가 다른 파장과 비교하여 높기 때문이다. 따라서 레이저 거리 측정기에 사용되는 많은 레이저가 1.54 μ m 영역에서 발진하도록 설계되어 있음을 알 수 있다.^[2]

현재까지 군사적인 목적으로 레이저 거리 측정기에 사용되는 광원은 Er:glass 레이저, 라만 변이 Nd:YAG 레이저, Nd:YAG OPO 레이저 등이 있다. Er:glass 레이저는 기본발진 파장을 이용하는 레이저라는 장점을 갖고 있지만 고반복에 사용할 수 없는 단점을 갖고 있다. 라만 변이 Nd:YAG 레이저와 Nd:YAG OPO 레이저는 1.06 μ m에서 발진하는 Nd:YAG의 기본 파장을 바탕으로 광의 파장변환 기법을 이용하여 1.54 μ m 파장을 얻는 경우이다. 라만 셀을 이용한 Nd:YAG 레이저는 고반복, 고출력 레이저로 적합하지만 고압의 셀을 사용함으로써 유지보수의 어려움과 소형화가 힘든 단점이 있다. 최근에 비선형 결정 기술과 파장 혼합(wave mixing) 기법의 발달로 말미암아 OPO 레이저를 적용하려는 추세가 두드러지게 늘어나고 있다. OPO 레이저의 장점은 전 고체화 레이저(all solid-state laser)이기 때문에 반영구적인 수명과 유지보수의 용이함에 있다.

그러나 어떠한 경우든 파장변환 기법을 이용하게 되면 에너지 효율이 저하되고 시스템이 복잡해지는 단점이 있다.

3. 눈에 안전한 레이저용 매질

본 연구에서는 기본발진 파장용 레이저 매질들을 비교하고 소형경량화에 적합한 레이저 매질을 선택하

는 것이 목적이다.

소형경량화를 위해서는 에너지 효율을 극대화하는 작업이 필요하다. 이를 위해서 먼저 기본발진 파장을 이용하는 것이 바람직하다. 또한 에너지 효율을 높이는 기법으로 많이 활용되고 있는 것이 다이오드 레이저 여기 방식을 사용하는 것이다. 이 것은 레이저 매질의 선택된 흡수 대역보다 좁은 발진 특성을 갖는 다이오드 레이저를 여기광으로 사용하며 이 경우 레이저 매질의 $\alpha \times l$ 즉, 흡수계수와 길이의 곱에 비례하여 효율이 결정된다. 최근에는 다이오드 레이저의 파장 스펙트럼이 다양해지고 배열구조를 이용한 고출력 다이오드 레이저가 개발되어 여기광원으로서의 선택 폭이 그 만큼 넓어진 상태이다.

지금까지 1.54 μ m의 눈에 안전한 파장에서 기본발진 파장을 갖는 레이저는 모두 Er이 첨가된 매질을 사용하고 있다. Er³⁺의 레이저 발진은 ⁴I_{3/2} → ⁴I_{15/2} 준위 간의 전이를 이용하고 있다. Er³⁺ 이온의 전이선은 이미 1965년에 알려졌지만 지금까지 상용화된 예는 그리 많지가 않다.

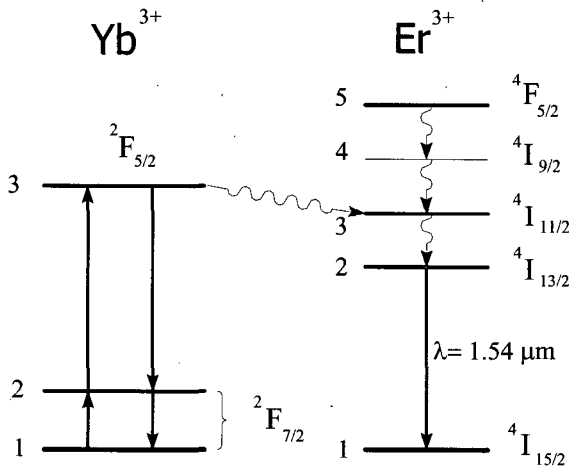
Er 레이저는 3 준위계의 특성을 갖고 있기 때문에 문턱조건이 높고 연속발진이 어려운 특징을 갖고 있다. 여기광의 세기가 제한된 경우에 문턱조건은 레이저 매질의 크기와 관계한다. 또한 Er³⁺은 흡수 단면적이 작기 때문에 플래시 램프나 레이저 다이오드를 이용한 직접 여기 방식은 효율이 매우 떨어지게 된다. 따라서 일반적으로 흡수 단면적이 높은 Yb³⁺ 이온의 도움을 받아서 여기광의 에너지를 효율적으로 흡수한 다음 에너지의 비공진 전이(nonresonant transfer)에 의하여 손실을 최소화하여 Er³⁺에 전달된다. Yb³⁺는 900~1000nm에 이르는 넓은 흡수띠를 갖고 있으며 동일한 파장영역에서 강한 형광세기를 갖고 있다. 이로 인하여 Yb³⁺의 농도에 관계없이 형광의 양자효율이 거의 1에 접근한다. 따라서 최근에 눈에 안전한 파장을 위한 레이저 물질은 Er만 첨가된 물질보다는 Er,Yb이 동시에 첨가된 레이저를 이용하는 것이 일반적인 추세라고 할 수 있다.

그림 1은 Er,Yb 레이저의 에너지 모형을 나타낸 것이다.

레이저 매질을 선택하는데 다음으로 중요한 것이 모매질의 문제이다. 모매질(host material)은 레이저

물질을 첨가하기 위한 바탕물질로써. 모매질에 따라 레이저 물질의 광학적, 기계적, 물리적 특성이 크게 차이가 난다. 이러한 모매질은 상대적인 특성들을 갖고 있기 때문에 일반적으로 우수한 물질이란 존재하지 않으며 응용에 따라서 적절한 선택을 하는 것이 바람직하다.

예를 들어 Nd³⁺를 첨가하는 경우, YAG가 대표적으로 사용되고 있지만 이것은 어디까지나 YAG의 열적 특성이 우수하기 때문이며, 다이오드 레이저를 여기광원으로 사용하는 경우에는 분광특성이 중요하기 때문에 YVO₄나 LSB와 같은 물질이 오히려 적합함



[그림 1] Er,Yb 레이저의 에너지 모형

을 알 수 있다.

Er,Yb 레이저의 경우 분광특성의 모매질 의존성을 알아보기 위하여 그림 2에서 다양한 모매질에 대한 전이특성을 비교하였다.

실제로 결정 성장 기술이 발달하면서 Nd³⁺의 경우와 마찬가지로 다양한 모매질을 이용하여 Er,Yb 레이저의 성능을 향상시키려는 시도가 계속되어 왔다.^[3~5] 이것은 기존의 glass 모매질의 열적 특성을 개선하려는 의도에서 진행되어 왔다. 그림 2에 나타낸 매질은 이 가운데 대표적인 물질들을 비교한 것이다. 이러한 다양한 시도들이 진행되는 과정에서 예기치 않았던 문제점들이 나타나게 되었다. 즉 레이저 매질로 기능하기 위해서는 우선적으로 레이저 준위의 형광수명(⁴I_{13/2}의 형광수명)과 비교하여 ⁴I_{11/2} 준위의 형광수명이 무시할 수 있을 정도로 아주 짧아야 한다. 특히 Er,Yb 레이저와 같이 도움물질(sensitizer)을 이용하는 레이저에서는 Er³⁺의 ⁴I_{11/2} 준위에서 Yb³⁺의 ²I_{5/2} 준위로 역전이되는 것이 레이저 물질로의 효율을 떨어뜨리는 큰 문제가 된다. 이를 피하기 위해서는 ⁴I_{11/2} 준위에서 ⁴I_{13/2}로 신속하게 전이하는 과정이 필요한데 그림에서 보는 바와 같이 LSB와 phosphate glass를 제외한 모매질들의 경우에는 이러한 조건을 만족하지 못하고 있음을 알 수 있다. 따라서 지금까지 나타난 결과들을 두고 보면 레이저 매질들 가운데에서도 LSB와 glass가 레이저 매질로서는 가장 적절

	GdVO ₄	YAG	YAlO ₃	YLF	YSGG	GGG	LSB	glass
⁴ I _{9/2}	<0.5μs	<0.5μs	1μs	7μs	-	-	<1ns	~1μs
⁴ I _{11/2}	80μs	100μs	1ms	4ms	1.3ms	0.96ms	<1ns	~1μs
⁴ I _{13/2}	3ms	7.3ms	7ms	10~15ms	3.4ms	4.86ms	0.7ms	8ms
⁴ I _{15/2}								

[그림 2] Er,Yb 레이저의 다양한 모매질에 대한 전이특성 비교

하다는 것을 알 수 있다.

다음으로 표 1과 표 2에서 LSB와 phosphate glass의 분광 파라미터 및 레이저 성능을 지금까지 발표된 내용을 중심으로 각각 비교하였다.

표 1에서는 LSB와 phosphate glass를 모매질로 사용한 Er,Yb 레이저의 분광 특성을 비교하고 있다. 표 1.에서 보는 바와 같이 LSB와 phosphate glass의 분광특성을 보게되면 전반적으로 분광특성은 LSB 보다 phosphate glass가 우수하다는 것을 확인할 수가 있다. 다만 여기에서는 물리적인 특성과 열적인 특성에 대해서는 충분한 데이터가 제공되지 않아서 비교하지 못하였다. phosphate glass의 장점은 Yb³⁺의 유효첨가농도 및 Er³⁺의 유효 첨가농도를 높일 수 있다는데 있다. 이로 인해 지금까지 가장 효과적인 눈에 안전한 파장을 낼 수 있는 레이저 물질로 주목 받고 있다. glass 류의 많은 모매질들이 존재하지만 phosphate glass가 모매질로 우수한 이유는 앞서 지적한 바와 같이 phonon 에너지가 크기 때문에 ⁴I_{11/2} 준위에서 ⁴I_{13/2} 준위로의 전이확률이 높고 이로 인해 양자수율이 거의 1에 가까운 장점을 갖고 있다는 것이다.

이러한 분광특성에 기초하여 두 가지 모매질의 특성을 직접 비교하기 위하여 현재까지의 레이저 성능을 비교한 것이 표 2이다.

[표 1] Er,Yb:LSB와 Er,Yb:phosphate glass 분광특성 비교^[3,6-9]

항 목	Er,Yb:LSB	Er,Yb:glass
Yb ³⁺ 최대첨가농도, cm ⁻³	(7~8) · 10 ²⁰	4 · 10 ²¹
Yb 유효흡수단면적 (980nm), cm ²	(1.1~1.2) · 10 ⁻²⁰	2 · 10 ⁻²⁰
Er ³⁺ 유효 농도, cm ⁻³	(5~7) · 10 ¹⁹	(0.3~2) · 10 ²⁰
Yb ³⁺ →Er ³⁺ 전이시간, μs	100	80
Er ³⁺ 방출단면적, cm ²	~5.2 · 10 ⁻²¹	(4.0~8.7) · 10 ⁻²¹
Er ³⁺ 형광의 양자수율	~0.1	1

[표 2] 두 가지 레이저 매질의 CW 출력비교(인용)

Er,Yb:LSB ^[10]	R ₁ =HR, R ₂ =98% 공진기 조건에서 400mW의 문턱발전. 1.5W의 여기조건에서 약 100mW 출력
Er,Yb:glass	최대 출력은 353mW 레이저 효율 : 20%

표 2에서 보는 바와 같이 현재까지 발표된 바에 의하면 Er,Yb:phosphate glass의 연속모드 발전 특성이 우수한 것을 알 수 있다.

여기에 덧붙여 고려하여야하는 사항은 Er,Yb:LSB는 아직 결정 성장기술이 안정화되지 않은 상태이며, 결정성장에 오랜 시간이 소요되기 때문에 성장에 필요한 비용이 Er,Yb:phosphate glass와 비교하여 매우 크다는 것이다. 실제로 연구기간 동안 수차례에 걸쳐 Er,Yb:LSB 결정성장을 시도하였으나 단 한 차례 성장에 성공하는 등 아직까지 Er,Yb:LSB를 레이저 매질로 선택하기에는 위험성이 따른다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 비록 열적 특성이 나쁘기는 하지만 결정성장이 용이하고 분광특성이 지금까지 나타난 눈에 안전한 레이저용 매질로 가장 우수한 Er,Yb:phosphate glass를 선택하였다.

4. 눈에 안전한 레이저용 큐 스위칭 결정

레이저 거리 측정기용 광원으로 사용하기 위해서는 펄스폭이 짧고 봉우리 출력이 높은 레이저 광원을 필요로 한다. 이러한 고에너지 펄스 발전을 위해서 일반적으로 사용하는 광학적 기법이 큐 스위칭(Q-switching)이다. 큐 스위칭 방식에는 회전거울, 전기광학소자, 음향광학소자 등을 활용하는 능동형 방식과 포화 흡수체를 이용한 수동형 방식이 있다. 능동형 방식은 지금까지 널리 사용되는 방식이기는 하지만 소형화가 어렵고 소모전력이 크다는 단점이 있다. 이에 반해서 포화흡수체를 이용한 수동형 방식은 얇은 흡수체를 공진기에 삽입하기만 하면 되기 때문에 소형화 연구에는 적합한 방식으로 소형경량 극

초단 펄스 레이저 구현을 위해서 많은 연구가 진행되고 있다.

1.0 μm 대역에서 Cr:YAG라는 성능이 우수한 큐 스위치(포화 흡수체)가 있는 반면에 1.5 μm 대역의 큐 스위치는 아직까지 다양한 시도와 비교하여 이렇다 할만한 결정이 나타나지 않고 있다. 지금까지 주로 연구되어 왔던 결정으로 Er:CaF₂, U:CaF₂, Co:ZnSe 등이 있지만 fluoride 계의 결정은 습도에 매우 취약하고, halcogenide 계의 결정은 손상강도(damage threshold)가 낮은 단점들을 갖고 있다.

이러한 단점을 보완하기 위하여 큐 스위치로 당초 본 연구에서 관심을 가졌던 물질은 Pr:LSB이다. 이 물질은 바닥상태에서 여기상태로의 ³H₄→³F₃ 전이선에 의해서 발생하는 1.4~1.6 μm 영역의 넓은 흡수대를 갖고 있다는 것에 주목하였다.

그러나 Pr³⁺:LSB는 ³F₃과 ³F₄ 준위의 아래에 존재하는 준위와의 에너지 차가 약 1700cm⁻¹로서 이는 M-O(metal-oxide)와 B-O 화합물의 phonon 에너지와 거의 일치하기 때문에 이들 준위 사이의 고속 전이(1ns)가 존재하여 실제로 ³H₄→³F₃로의 전이는 거의 이루어지지 않게 된다. 이로써 효과적인 2 준위계로 기능하지 못하게 됨으로써 Pr³⁺:LSB 역시 효과적인 포화흡수체가 될 수 없다는 것을 알 수 있다.

1.5 μm 대역에서 이상적인 2 준위계에 가까우면서 큐 스위칭 효율이 높은 물질로 최근에 연구가 활발한 물질이 Co²⁺를 첨가한 Co²⁺:MgAl₂O₄, Co²⁺:LaMgAl₁₁O₁₉, Co²⁺:YSGG, Co²⁺:ZnSe, Co²⁺:YAlO₃ 등이 있다. 위에서 열거한 바와 같이 tetrahedral 대칭 자리에 Co²⁺ 이온이 첨가된 결정은 넓은 흡수 대역과 넓은 형광 대역을 보이고 있기 때문에 근적외선 영역의 파장가변 레이저 광원으로 또는 눈에 안전한 파장의 포화 흡수체로서 가능성이 제시되어 왔다. 다양한 Co²⁺ 첨가물질 들 가운데 Co²⁺:MgAl₂O₄는 흡수단면적이 $\sigma_{abs} \approx 3.5 \cdot 10^{-19} \text{cm}^{2(11)}$ 로써 상대적으로 Pr³⁺:LSB의 $\sigma_{abs} \approx 2.3 \cdot 10^{-20(3)}$ 와 비교하여 월등하게 흡수 단면적이 크다는 것을 알 수 있다.

이상적인 2 준위계를 가정한다면 포화 흡수체의 밀도표백(bleaching)과 레이저 물질의 밀도반전의 관계

를 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$\left| \frac{N}{N_0} \right| = \left(\frac{n}{n_0} \right)^\mu, \quad \mu = \frac{\sigma_{abs}}{\sigma_{em}} \quad (1)$$

여기에서,

n_0 : 활성매질의 초기 반전 밀도

n : 흡수체의 완전표백시 활성매질의 평균 반전밀도

N_0 : 포화 흡수체의 총 입자수

N : 흡수체의 완전표백시 흡수체 바닥준위의 평균 밀도

σ_{abs} : 레이저 파장에서 흡수체의 흡수 단면적

σ_{em} : 방출 단면적

좌변은 밀도표백의 변화율을 나타내며, 우변은 밀도반전의 변화율을 의미한다. μ 는 포화 흡수체의 흡수 단면적과 활성매질의 방출 단면적 사이의 상대적인 비를 나타내며, 물질의 고유한 물리량이다. 수식 (1)에 의하여 μ 값의 크기에 따른 밀도반전의 변화량에 대한 표백의 변화를 가늠할 수 있다. 즉 μ 값이 크게 되면 작은 밀도반전의 감소에 의해서도 큰 표백의 변화를 유도할 수 있게 됨을 의미한다. 따라서 μ 값은 활성 매질과 포화 흡수체의 조합이 일단 결정되었을 때 큐 스위칭 효율을 비교 예측할 수 있다. μ 값이 1보다 작게되면 10ns 이하의 고속 펄스 발진은 불가능한 것으로 알려져 있다. 그러나 μ 값이 클 필요는 있지만 무조건 커야하는 것은 아니다. 너무 μ 값이 크게 되면 활성매질의 밀도반전이 조금 진행된 상태에서 이미 포화 흡수체의 밀도표백이 완전히 진행되기 때문에 오히려 큐 스위칭 출력을 높이는 데 방해가 될 수 있다.

표 3에는 세 가지의 활성매질과 포화 흡수체 조합에 대한 μ 값을 비교하였다.

표 3에서 앞서 지적한 것처럼 Er,Yb:LSB와 Pr:LSB의 조합은 가장 낮은 μ 값을 나타내고 있으며 이는 큐 스위칭 효율이 낮고 극초단 펄스를 생성하는 데 어려움이 있다는 것을 예측할 수 있다. 또한 표 3에서 보는 바와 같이 포화 흡수체로써 Co²⁺:MgAl₂O₄가 Pr²⁺:LSB와 비교하여 상대적으로 우

[표 5] 다양한 조합에 대한 μ 값 비교

활성매질 + 포화 흡수체	$\mu(\sigma_{abs}/\sigma_{em})$
Er,Yb:LSB + Co ²⁺ :MgAl ₂ O ₄	~70
Er,Yb:phosphate glass + Co ²⁺ :MgAl ₂ O ₄	40~88
Er,Yb:LSB + Pr ²⁺ :LSB	~2.3

수한 큐 스위칭 성능을 낼 수 있다는 것을 알 수 있다. 여기에서 활성매질의 차이에 따른 수치의 차이는 큰 의미가 없다.

따라서 눈에 안전한 파장에서 동작하는 레이저 활성매질과 포화흡수체에 대한 비교 연구를 통해서 Er,Yb:phosphate glass와 Co²⁺:MgAl₂O₄의 조합이 적어도 현재까지는 고효율의 소형경량 레이저에 가장 적합한 것으로 판단할 수 있다.

5. 큐 스위칭 해석

포화 흡수체에 의한 수동형 큐 스위칭 동작을 해석하기 위해서는 세 개의 결합된 미분 방정식을 풀어야 한다.^[12] 그러나 이러한 미분 방정식은 몇 가지 근사식을 이용하여 접근함으로써 단순화할 수 있고 수치적인 해를 얻을 수 있게 된다.

최근에 고효율 다이오드 레이저가 등장하면서 수동형 큐 스위칭을 적용한 소형 마이크로(칩) 레이저에 대한 연구가 크게 증가하고 있다. Degnan은 Lagrange multiplier 기법을 사용하여 큐스위칭 파라미터를 최적화하였으며, Peterson은 수동형 큐 스위칭에 의한 펄스 파형 해석을 시도하여 실험값과 비교한 바가 있다.

이상적인 포화 흡수체는 순수한 2 준위계이지만 현실적으로 이러한 2 준위계는 존재하지 않기 때문에 우선적으로 여기 준위의 재흡수(ESA)에 의한 손실을 반드시 고려하여야만 한다.

ESA 효과를 미분 방정식에 반영하였을 때, 공진기 내의 광자 밀도 방정식은 아래와 같이 표현된다.^[13]

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{c \cdot \phi(t)}{l_c} \quad (2)$$

$$\left[\Delta n_l l_l \sigma_l + \Delta n_q l_q \sigma_q \left(1 - \frac{\sigma_q^{ESA}}{\sigma_q} \right) - n_{0q} l_q \sigma_q^{ESA} \right] - \frac{c \cdot \phi(t)}{2 \cdot l_c} \cdot \left(\ln \left(\frac{1}{R_{out}} \right) + Loss \right)$$

$$\frac{d\Delta n_l}{dt} = -\gamma \sigma_l \Delta n_l \phi(t) \quad (3)$$

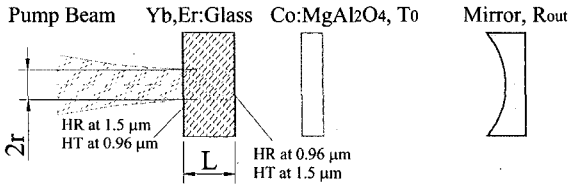
$$\frac{d\Delta n_q}{dt} = -\frac{A}{A_s} c \sigma_q \Delta n_q \phi(t) \quad (4)$$

- 여기에서,
 $\phi(t)$: 공진기 광자 밀도
 c : 광속
 l_c : 공진기 길이
 Δn_l : 활성매질의 반전밀도
 l_l : 활성매질의 길이
 σ_l : Stark level에 참조한 분광 방출 단면적
 Δn_q : 포화 흡수체의 반전밀도
 l_q : 포화 흡수체의 길이
 σ_q : 레이저 파장에서 포화 흡수체의 GSA
 σ_q^{ESA} : 레이저 파장에서 포화 흡수체의 ESA
 n_{0q} : 흡수체의 이온 농도
 A/A_s : 활성매질과 흡수체의 레이저 광 단면적비
 R_{out} : 출력경의 반사율
 $Loss$: 공진기 왕복 손실
 γ : 반전감소인자(1 : 4 준위계, 2 : 3 준위계)

이 때 출력 에너지는 다음과 같이 표현될 수 있다.^[14]

$$E_{out} = \frac{h\nu_l A_l c \ln(1/R_{out})}{2l_c} \int_0^\infty \phi(t) dt \quad (5)$$

수동형 큐 스위칭 레이저에서 활성매질의 초기 밀도 n_i 는 포화 흡수체의 초기 투과도(T_0)와 출력경의 반사율(R_{out})에 의하여 결정된다. 그러므로 수동형 큐



[그림 3] 단면여기 수동형 큐 스위칭 레이저 구조

스위칭레이저의 출력 에너지를 T_0 와 R_{out} 의 함수로 모델링하는 것이 현실적으로 도움이 된다.

따라서 수식 (5)를 잘 알고 있는 분광변수와 공진기 파라미터로 수식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$E_{out} = \frac{h\nu_l A}{2\sigma_l \gamma} \ln\left(\frac{1}{R_{out}}\right) \cdot X \quad (6)$$

여기에서 X 는 다음 방정식의 해이다.

$$1 - e^{-X} - \frac{(1 - \beta) \ln(T_0^{-2})}{\ln(T_0^{-2}) + \ln(R_{out}^{-1}) + Loss} \cdot \frac{1 - e^{-\alpha X}}{\alpha} \quad (7)$$

$$\cdot \frac{\beta \ln(T_0^{-2}) + \ln(R_{out}^{-1}) + Loss}{\ln(T_0^{-2}) + \ln(R_{out}^{-1}) + Loss} \cdot X = 0$$

$$\alpha = \frac{1}{\gamma} \frac{\sigma_q A}{\sigma_l A_s}, \quad \beta = \frac{\sigma_q^{ESA}}{\sigma_q} \quad (8)$$

식 (6)과 식 (7)을 통해서 주어진 초기값을 통해서 수치적으로 펄스 에너지를 계산할 수 있게 된다. 일반적인 밀도변화 방정식(rate equation)에서와 같이 다음과 같은 가정을 한다.

- 가. 여기영역에서 활성매질은 균일하게 여기된다.
- 나. 공진기 내의 광세기는 축 방향으로 균일하다.
- 다. 다음 펄스 동작이 발생하기 전에 흡수체는 완전히 복원된다.

위와 같은 가정 하에 $Co^{2+}:MgAl_2O_4$ 를 포화 흡수체로 사용한 단면여기 구조의 Er,Yb:phosphate glass 레이저에 대한 큐 스위칭 동작을 해석하고 이에 대한 파라미터를 구하였다. 이 때 활성 매질과 포화 흡수

체의 레이저 광 단면적 비(A/A_s)는 1로 가정하였다. 또한 $Co^{2+}:MgAl_2O_4$ 의 여기 준위의 재흡수 단면적(σ_q^{ESA})은 $1 \cdot 10^{-20} cm^2$ 의 값을 사용하였다.

본 연구에서 설계한 단면여기 공진기 구조를 그림 3에 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 소형화와 고효율 발전을 위해서 단면여기 구조를 적용하였다. 여기광은 980nm의 다이오드 레이저이며, 적절한 전달 광학계를 통과하여 Er,Yb:phosphate glass 레이저로 입사하게 된다. 활성매질 내에서 빔의 크기는 균일하게 유지되도록 가정하였으며 레이저 매질의 양면에는 2 파장 박막(dichroic coating)을 하도록 하였다.

여기에서 Er^{3+} 과 Yb^{3+} 이온의 농도는 각각 $[Er] = 8 \cdot 10^{19} cm^{-3}$, $[Yb] = 2 \cdot 10^{21} cm^{-3}$ 을 적용하였으며, 여기 파장에서의 흡수계수는 $k = 5 cm^{-1}$ 을 적용하였다.

해석결과를 표 4~표 6에 나타내었다. 여기조건은 각각 30W에서 70W까지 20W 간격으로 설정하였으며, 여기 펄스의 펄스 폭은 1ms로 가정하였다.

[표 4] $P_{pump}=30W, \tau_p=1ms$ 일 때

Loss	E_{out}, mJ	$R_{out}, \%$	$T_0, \%$	L, mm	A, mm^2
0.01	1.2	96	94	2.6	~0.3
0.02	0.95	96	94	2.6	~0.3

[표 5] $P_{pump}=50W, \tau_p=1ms$ 일 때

Loss	E_{out}, mJ	$R_{out}, \%$	$T_0, \%$	L, mm	A, mm^2
0.01	2.2	94	93	3.0	~0.4
0.02	1.9	95	92	3.0	~0.4

[표 6] $P_{pump}=70W, \tau_p=1ms$ 일 때

Loss	E_{out}, mJ	$R_{out}, \%$	$T_0, \%$	L, mm	A, mm^2
0.01	3.2	94	92	3.2	~0.5
0.02	2.7	94	91	3.1	~0.5

6. 맺음말

1.5 μ m 대역에서 발진하는 눈에 안전한 소형경량 다 이오드 레이저 여기 고체레이저용 레이저 매질을 비교분석하였다. 분광특성과 레이저 발진 특성 만을 두고 볼 때 현 단계에서 저반복 소형경량에 적합한 레이저 매질로 Er,Yb:phosphate glass를 선정하게 되었다.

고속 펄스 발진을 위해서 사용할 수 있는 큐 스위칭 결정들에 대해서도 지금까지 연구되고 있는 결정들을 대상으로 분광 특성과 포화 흡수체의 조건 등을 비교분석한 결과 활성매질로서 Er,Yb:phosphate glass와 포화 흡수체로서 Co²⁺:MgAl₂O₄의 조합이 수동형 큐 스위칭 레이저 동작을 위해서 가장 효율적 선택임을 확인할 수 있었다.

마지막으로 Er,Yb:phosphate glass와 Co²⁺:MgAl₂O₄의 큐 스위칭 동작 특성에 대한 해석을 통하여 다양한 큐 스위칭 파라미터에 대한 출력 특성을 예측할 수 있었다. 해석결과에 의하여 단면여기 구조를 사용하여도 근거리 레이저 거리 측정기용 광원의 성능을 구현할 수 있는 가능성을 확인하였으며 향후 이와 같은 해석결과를 바탕으로 실험값과 비교연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 민군겸용기술사업 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] J. K. Franks, "What is Eyesafe?", SPIE vol. 1419, 1991, pp.2~8.
 [2] V. J. Corcoran, "High-repetition-rate eyesafe rangefinders", SPIE vol. 1419, 1991, pp.160~163.
 [3] S. T. Durmanov, O. V. Kuzmin, G. M. Kuzmicheva, S. A. Kutovoi, A. A. Martynov,

E. K. Nesynov, V. L. Panyutin, Yu. P. Rudnitsky, G. V. Smirnov, V. L. Hait and V. I. Chietzhikov, "Binary rare-earth scandium borates for diode-pumped lasers", Opt. Mater. vol. 18, 2001, pp.243~284.
 [4] T. Schweizer, T. Jensen, F. Heumann, and G. Huber, "Spectroscopic properties and diode pumped 1.6 μ m laser performance in Yb-codoped Er:Y₃Al₅O₁₂ and Er:Y₂SiO₅", Opt. Commun. vol. 118, 1995, pp.557~561.
 [5] B. Simondi-Tesseire, B. Viana, A. Lejus, J. Benitez et al. "Room-temperature CW laser operation at ~1.55 μ m (eye-safe range) of Yb:Er and Yb:Er:Ce:Ca₂Al₂SiO₇ crystals", IEEE J. Quantum Electron. vol. 32, 1996, pp.2004~2009.
 [6] V. A. Lebedev, V. F. Pisarenko, N. V. Selina, A. A. Perfilin and M. G. Brik, "Spectroscopic and luminescent properties of Yb,Er:LaSc₃(BO₃)₄ crystals", Opt. mater. vol. 14, 2000, pp.121~126.
 [7] C. Svelto, S. Taccheo, E. Bava, P. Iaporta, "Characterization of Yb-Er:glass lasers at 1.5 μ m wavelength in terms of amplitude and frequency stability", Measurement vol. 26, 1999, pp.119~128.
 [8] Z. Liu, C. Qi, S. Dai, Y. Jiang, L. Hu, "Spectra and laser properties of Er³⁺, Yb³⁺:phosphate glasses", Opt. mater. vol. 21, 2003, pp.789~794.
 [9] Z. Cai, A. Chardon, H. Xu, P. Feron, "Laser characteristics at 1535 nm and thermal effects of an Er:Yb phosphate glass microchip pumped by Ti:sapphire laser", Opt. Commun. vol. 203, 2002, pp.301~313.
 [10] E. Dening, E. Henmann, A. Huber, O. Kuzmin. CLEO/USA 98, 1998, CWM5, p.299.
 [11] K. V. Yumashev et al., "Nonlinear absorption properties of Co²⁺:MgAl₂O₄ crystal", Appl. Phys. B vol. 70, 1994, pp.179~184.

- [12] W. Koechner, Solid-State-Laser Engineering, 5th ed. Springer-Verlag, Berlin, 1999.
- [13] F. D. Patel and R. J. Beach "New Formalism for the Analysis of Passively Q-switched Laser System", IEEE J. Quantum Electron. vol. 37, 2001, pp.707~715.
- [14] J. J. Dagnan "Theory of the optimally coupled Q-switched laser", IEEE J. Quantum Electron. vol. 25, 1989, pp.214~220.