

반도체레이저 단면여기 고체레이저에서의 최적 공진조건에 관한 해석*

김병태 · 김태석

청주대학교 광학공학과

(1997년 5월 9일 받음)

반도체레이저로 여기되는 Nd : S-VAP 레이저에서 에너지 변환상태를 PZT를 검출기로 이용한 광음향 분광법으로 측정하였다. 광음향 분광법이 레이저 공진기 내부에서의 에너지 변환과정을 이해하고 공진기에서 출력거울의 최적화를 비교적 간단하게 실현시킬 수 있는 효과적인 측정방법임을 제시하였다.

I. 서 론

최근 고출력, 고효율의 반도체레이저 개발은 고체레이저에서 선택적 여기를 유도하여 열부하를 최소화시키고, 고품질의 빔과 높은 주파수 안정성 등의 특성을 지닌 반도체레이저 여기 고체레이저의 개발을 급격히 신장시키며, 그 응용성도 한층 부각시키고 있다.

반도체레이저를 여기원으로 사용하는 고체레이저는 이득 매질에서의 에너지 축적 능력이 우수하며, 단일 주파수 발진이 가능한데다 반도체레이저 자체 특성인 고효율, 장수명, 소형, 경량 및 주파수 안정성 등도 갖추고 있어 반도체레이저를 단독으로 사용하는 것보다 배가된 특성을 발휘할 수 있다. 반도체레이저 여기 고체레이저^[1-3]는 상준위 수명이 비교적 긴 것을 이용한다면 이득매질에 많은 에너지를 축적할 수 있어 Q-스위치를 이용하여 높은 첨두출력을 갖는 고출력용으로도 효과적으로 사용할 수 있다. 첨두출력이 크기 때문에 KTP 및 BBO 등의 비선형결정을 이용한 제 2고조파 발생으로 단파장화도 효율 좋게 행할 수 있고, 광파라미터릭 발진기와 유도 라만산란 등의 비선형광학 효과를 이용한 파장가변 결맞음 광을 발생시킬 수도 있다. 이러한 장점을 두루 갖추고 있는 반도체레이저 여기 고체레이저는 고밀도의 데이터 저장, 검색 등의 광정보처리 분야는 물론 각 분야에서 다양하게 응용되고 있으며^[4,5], 그 필요성에서도 공감대를 형성시키고 있다.

일반적으로 분광법은 물질의 방사천이 과정을 측정하는 반면, 광음향 분광법은 물질의 비방사천이를 다루며, 물질의 분광측정, 표면과 내부의 특성 측정에 응용되는 계측기술이다.^[6,8] 광음향 분광법의 장점은 광음향 신호가 물질내에 축적되는 열에 의한 것이므로 물질 표면의 산란이나 반사된 빛의 영향을 받지 않는다는 것이다. 이런 이유로 광음향 분광법은 물질의 흡수스펙트럼에 대해서도 분석할 수 있다. 따라서 광음향 분광측정은 물질내에서 방사와 비방사천이 사이의 관계를 알 수 있게 한다. 광음향 분광의 흡수스펙트럼 측정은 고체, 액체 및 기체의 분광학적 연구 등에 걸쳐 응용 범위가 넓다. 광음향 신

호를 검출하는 방법에는 크게 마이크로폰과 트랜스듀서를 이용하는 것으로 나눌 수 있다.^[6] 트랜스듀서법은 감도가 좋고 배치가 용이하며, 응답 속도가 빠른 PZT 등을 이용하여 고체 내부에서의 에너지 변환상태를 측정할 수 있다. 이를 응용하면 레이저 공진기내에서의 에너지 변환관계도 규명할 수 있게 된다. 따라서 공진조건에 따른 반도체레이저 여기 고체레이저에서 공진기 내부 에너지 변환관계를 이해하고, 레이저 공진기의 최적화에 대하여 해석이 가능하게 된다.

본 논문에서는 2 W급 GaAlAs계 반도체레이저를 여기원으로 하는 단면여기 Nd : S-VAP 레이저에서 광음향 분광법을 이용하여 공진기 내부의 에너지 변환관계를 조사하고, 이를 토대로 해석한 공진조건 최적화에 대하여 기술한다.

II. 광음향 분광측정

매질에서 상준위로 여기된 원자가 하준위로 천이될 때는 방사천이, 광화학적 반응, 내부에서의 에너지 전이 및 비방사천이 등이 일어나게 되는데 이들 가운데 비방사천이의 해석에 광음향 분광측정이 이용된다. 광음향 발생은 일반적으로 매질에 흡수된 광에너지에 대해 음파로 발생된 에너지의 비로 광음향 발생효율을 나타내게 되며, 이 비율은 열탄성 팽창, 광화학에 의한 체적변화, 가스 방출 및 유전체 파괴 등에 기인한다. 광에너지 흡수에 의한 열탄성 팽창은 광음향 분광측정에서 사용되는 가장 기본적인 과정이다.^[6,9]

고체 매질에 광에너지를 조사시키면 매질은 흡수계수에 비례하여 광에너지를 흡수하고 확산시킨다. 매질에서 흡수된 광에너지는 열로 변환되고, 매질의 온도를 올린다. 이와 같은 과정에 따라 주기성을 갖고 입사하는 광은 매질내에서 주기적인 응력변화 즉, 음파를 발생시킨다. 이 음파를 매질에 밀착시킨 감도가 예민한 검출기로 검출하고, lock-in 증폭기 등을 이용하여 신호처리하는 것이 광음향 분광측정의 기본적인 원리이다. 일반적으로 광음향 분광측정에서는 파장가변레이저나 플래시램프 등을 광원으로 사용하고, 이를 주기적으로 변조시켜 광음향 셀이나 고체 매질 등에 입사시킨다. 주기적으로 발생하는 열에 의한 광음향 신호를 트랜스듀서나 마이크로폰, 하이드로폰 등의 검출기를 이용하여 검출하게 된다. 검출된

*이 논문은 1997학년도 청주대학교의 학술연구조성비에 의해 연구되었음.

광음향 신호를 lock-in 증폭기, boxcar averager 및 오실로스코프 등의 광음향 신호처리 장치로 보내어 기록한다. 광음향 분광측정은 광 파장의 변화에 따른 출력을 기록함으로써 물질의 흡수스펙트럼도 구할 수가 있다. 이 방법은 분말, 기체, 액체 및 고체의 분광측정 그리고 매질의 표면과 내부 흡수특성에 널리 응용할 수 있다.^[10,11]

광음향 분광법에서 에너지 변환에 대한 측정은 광에너지→열→음파→신호의 과정을 거치게 된다. 이와 같은 변환과정 중에서 열은 확산하여 전달되기 때문에 열→음파의 변환과정은 다른 과정에 비교하여 느리지만 가장 중요한 과정이고 그만큼 복잡하다. 측정에서는 매질에서 발생한 열을 정량적으로 해석하기 위해 음파를 전기신호로 바꾸어 검출할 수 있는 방법을 사용한다. 이 검출법에는 마이크로폰을 이용하는 간접적인 것과 PZT, ZnO 및 TiBaO₃ 등의 트랜스듀서를 검출소자로 이용하는 직접적인 것이 있다.^[6] 간접적인 방법은 매질 표면과 접해 있는 기체의 열팽창에 의한 압력 변화를 매질로부터 떨어진 곳에서 측정하는 것이다. 직접적인 방법에서는 매질내에서 발생한 열에 의해 왜곡되는 것을 매질에 밀착시킨 검출기로 측정하게 된다. 검출기로 마이크로폰을 사용할 때의 장점은 표면으로부터의 열 전달과정을 결정하는 열전달율, 밀도 및 비열 등의 물성계수와 입사광의 주기성을 안다면, 데이터의 정량적인 해석이 가능하고 물질 표면까지의 반사광과 산란광의 영향도 제거할 수 있다는 것이다. 그 반면, 검출기의 감도가 낮고, 응답 속도를 어느 정도 이상 빠르게 할 수 없으며, 진공에서는 측정이 불가능하다는 단점이 있다. 트랜스듀서법의 장점은 감도가 높고, 응답 속도가 빠르며, 진공 중에서의 측정이 가능하지만, 신호가 물질의 형태와 트랜스듀서의 배치에 의존하기 때문에 정량적인 해석이 어렵고, 입사광의 산란에 의한 영향을 받기 쉽다는 등의 문제가 있다. 광조사에 의해서 매질이 흡수한 에너지가 열로 변환되는 경우 광음향 신호는 흡수스펙트럼에 따라 대응하게 된다. 발광재료의 경우에는 일반적으로 루미네선스와 광음향 신호와는 상보적인 관계가 성립한다. 양자를 비교하는 과정에서 비방사천이 혹은 발광효율 등을 조사하는 것이 가능하다.

III. 실험장치

반도체레이저 단면여기 고체레이저 공진기 내부에서의 에너지 변환관계를 측정하기 위해서 그림 1과 같은 공진기를 구성하였다.

여기방법은 가장 간단하면서도 여기효율을 높일 수 있는 단면여기를 사용하였다. 단면여기법은 단일 반도체레이저나 반도체레이저 어레이로부터 발광되는 여기광을 레이저매질의 끝단에 집속·조사시키는 형태이다. 집속광학계의 알맞은 선택에 의해 여기광을 레이저 발진모드 체적안에 효율적으로 집속·조사시키게 된다.

여기원으로 사용된 반도체레이저는 양자우물 구조의 quasi-cw용 GaAlAs계 반도체레이저(SDL-2272-P1)로 2 W(1 J/500 ms)까지 출력을 낼 수 있다. 실험에 사용한 반도체레이저의 수직, 수평 발산각은 각각 28°, 10°이다. 측정된 발광스펙트럼

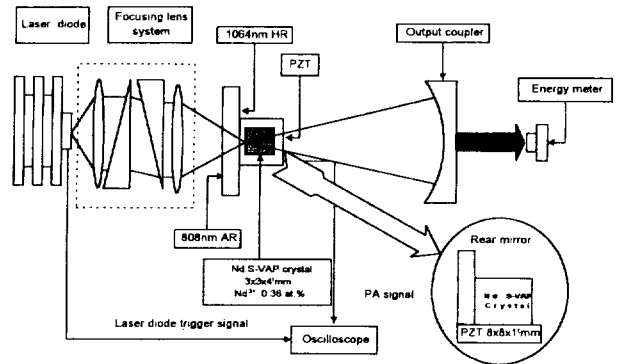


그림 1. 광음향 실험을 위해 구성된 반도체레이저 단면여기 Nd : S-VAP 레이저의 개략도.

의 반치폭은 1.4 nm이고, 스펙트럼의 온도의존성은 0.24 nm/°C이며, 전류의존성은 1.19 nm/A이다.

반도체레이저의 광은 수직, 수평 발산각의 차이가 있어 타원형태가 된다. 방출되는 타원형의 광선을 콜리메이터 렌즈를 사용하여 평행광으로 만들고, 정형 프리즘쌍으로 단축방향의 광속을 확대시켜 원형으로 만든다. 비점수차를 줄이기 위한 비구면렌즈인 집속렌즈를 사용하여 효율적으로 이득매질 끝단에 집광시킬 수 있는 집속광학계를 제작하였다. 실험에 사용된 콜리메이터 렌즈는 초점거리 6 mm, F/1.5(Melles Griot : 01LPX427)의 평볼록 단일렌즈이다. 정형 프리즘쌍(06GPA004)은 중심파장 830 nm에서 3배의 배율을 갖는 것을 선택하였다. 집속렌즈로는 초점거리 8.5 mm, F/0.71(01LAG 000)인 비구면렌즈를 사용하였다.

레이저매질로 사용된 Nd³⁺이 첨가된 Sr₂(VO₄)₃F [strontium fluorvanadate : S-VAP] 결정^[12,13]은 580 nm와 809 nm를 중심으로 하는 폭이 넓은 흡수스펙트럼을 갖고 있어 여기원으로 GaAlAs계 반도체레이저를 효과적으로 사용할 수 있는 것이다. Nd : S-VAP 결정은 주 발진파장인 1065 nm에서 좁은 스펙트럼선폭을 가지며, 5×10⁻¹⁹ cm²의 큰 유도방출 단면적과 230 μs의 형광수명을 가진다. Nd : S-VAP 결정은 단축결정으로 굴절율은 1.824(n_o), 1.810(n_c)이다. 온도변화에 따른 굴절율의 변화(dn/dT)는 결정축(n_o, n_c)에 따라 각기 -11×10⁻⁶/°C, -8×10⁻⁶/°C로 음(陰)의 값을 갖고 있어 열렌즈 효과를 경감시킬 수 있다. 열도전율은 1.7 W/m·K로서 반도체레이저 여기용 이득매질로 주로 사용되고 있는 Nd : YVO₄나 Nd : YAG에 비해 낮은 단점도 있다. Nd : S-VAP 결정은 아퍼타이트 구조 화합물로서 성장시키기가 쉽고, 비교적 저렴한 가격에 우수한 물리·광학적 특성을 보이고 있어 고효율의 콤팩트한 고체레이저를 개발하는데 이상적인 이득매질로 평가받고 있다.

공진기는 모드 정렬의 어려움이 거의 없는 안정된 공진기 형태로 808 nm에서 무반사, 1064 nm에서 전반사하는 이색성 코팅을 한 10×10×2' mm인 평면거울, 곡률반경이 120 mm인 출력거울과 두 거울 사이에 Nd³⁺이 0.38 at.% 첨가된 3×3×4' mm 크기의 Nd : S-VAP 결정이 삽입된 반구면(hemispherical) 형태로 설계하였다. 반구면형의 공진기는 구면거울과 구면의 곡률 중심에 위치한 평면거울로 구성되며, 모드는 구면거울에 상대적으로 큰 직경을 가지고 평면거울에

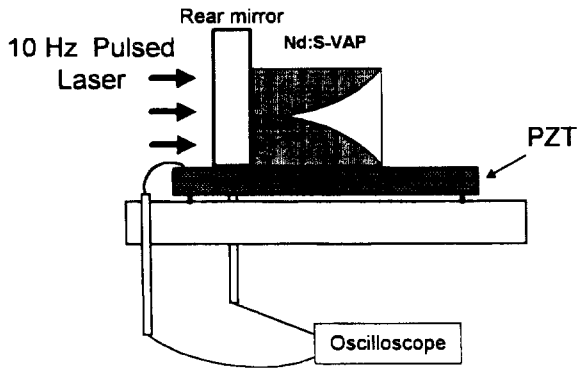


그림 2. 광음향 계측을 위한 Nd : S-VAP 결정과 PZT의 구성도.

서 회절 한계점까지 집속된다. 반구면형 공진기는 일반적으로 저출력 레이저에서 사용되는 안정된 공진기 형태이다.

PZT는 그림 2와 같이 가능한한 여기광의 영향을 받지 않도록 Nd : S-VAP 결정의 아래쪽에 부착하여 직접 광음향 신호를 검출할 수 있도록 구성하였다. PZT 위의 Nd : S-VAP 결정은 PZT에 압력이 가해지지 않는 한도내에서 밀착되게 하였다. 여기원인 10 Hz로 동작하는 반도체레이저 광을 Nd : S-VAP에 조사시켰다. 흡수된 광에너지에 의해 매질 내부에서 열이 발생하고, 이 열에 의해 발생된 광음향 신호 즉, 음파를 민감하고 응답속도가 빠른 PZT로 검출한다. 여기에 사용된 PZT는 8×8×1 mm의 크기로 초음파 검측기에서 사용하는 것이다. 매질 내부에서의 열침투는 거리의 지수함수로 감소한다. PZT에서 검출된 광음향 신호는 오실로스코프를 이용해 형상화하여 측정하게 된다.

IV. 실험결과 및 토의

PZT에서 검출되는 광음향 신호는 입력에너지와 온도를 변화시키면서 조사하여 선형적인 비례관계를 갖고 있음을 확인할 수 있었다. 그림 3은 PZT에서 검출된 광음향 신호를 오실로스코프로 잡은 것이다. 그림의 윗쪽이 반도체레이저의 트리거 신호이고, 아래쪽이 PZT에서 검출된 수 ms의 펄스폭을 가진 광음

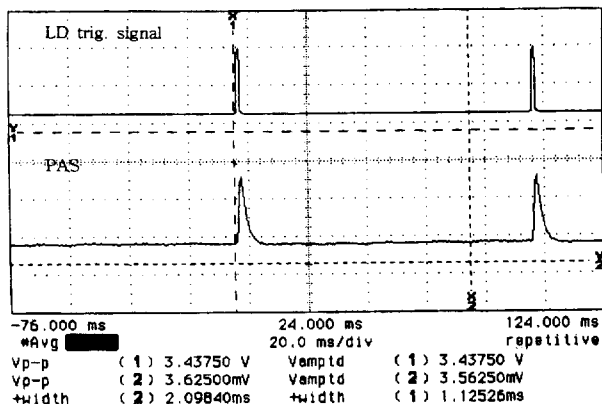


그림 3. 오실로스코프에 출력된 반도체레이저의 트리거 신호와 PZT의 광음향 신호.

향 신호로 잡음을 제거하기 위해서 샘플링하여 평균한 것이다.

공진기내에서의 에너지 변환관계는 공진조건이 성립되지 않았을 경우와 성립되었을 경우로 나누어 계측하였다. 공진기가 구성되지 않은 상황에서 여기광이 집속광학계를 통과한 후의 에너지 1123 μJ을 100%로 볼 때 Nd : S-VAP 결정을 통과한 에너지는 여기에너지의 3.5% 정도인 39 μJ이었고, 평면 거울에서의 손실을 무시한다면 여기에너지에서 투과된 에너지를 뺀 나머지 에너지가 매질내에서 흡수되었다고 볼 수 있다. 흡수된 에너지는 PZT에서 검출된 광음향 신호의 크기에 비례하게 된다. PZT 위에 놓여 있는 거울의 여기광 흡수에 의한 영향은 미약하다고 판단되어 고려하지 않았다. 이득매질에서 흡수된 에너지와 검출된 광음향 신호의 정량적인 환산은 공진기 내부의 에너지 변환관계를 해석하는 데 가장 기본적인 인자가 된다. 공진조건이 성립되면 여기에너지가 레이저 매질에서 흡수되어 주 발진파장인 1065 nm의 에너지로 변환되는 것이 생길 것이며, 공진기 내부에는 손실도 발생하게 된다. 결국 PZT에서 검출된 광음향 신호의 크기로 나타낼 수 있는, 매질에서 흡수되어 열로 변환되는, 에너지는 공진조건이 성립되지 않았을 때 검출된 광음향 신호에 비해 상대적으로 줄어들게 된다. 그렇게 줄어든 에너지는 양자화된 에너지로 변환되었다고 보아야 할 것이며, 다른 파장영역에서는 발진조건이 성립되지 않기 때문에 1065 nm로 발진되는 것으로 판단된다. 출력거울의 반사율을 73%, 82% 및 90%로 바꾸어 가며 측정했을 때, 매질에서 흡수된 에너지는 각각 450 μJ, 453 μJ 및 453 μJ로 반사율에 관계없이 거의 같게 측정되었다. 공진기 내부의 손실에너지는 출력거울의 반사율이 73%에서 90%로 커질수록 276 μJ, 300 μJ 및 389 μJ로 증가하고, 반대로 반사율이 90%에서 73%로 낮아질수록 레이저 에너지는 281 μJ, 370 μJ 및 397 μJ로 증가하는 경향을 나타내었다. 이 결과는 반도체레이저 여기 Nd : S-VAP 레이저의 출력특성과도 일치하는 것이다. 이와 같은 과정에서 측정된 광음향 신호를 상대값으로 환산해 그림 4에 나타내었다. 그림에서 윗쪽에

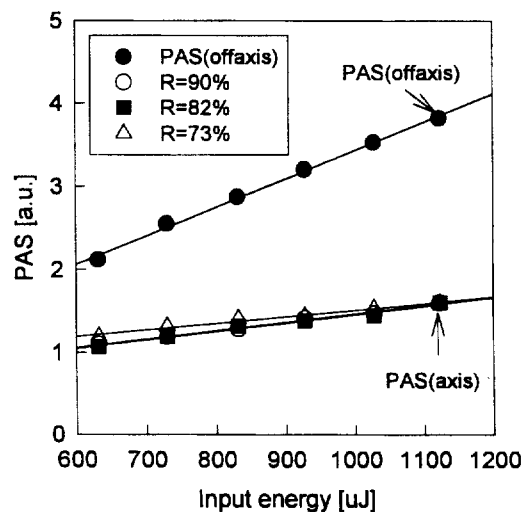


그림 4. 레이저매질에 입력되는 에너지에 대해 공진기 구성 여부에 따른 광음향 신호의 상대적인 크기.

●으로 나타낸 것이 공진조건이 성립하지 않았을 경우에 측정된 광음향 신호의 크기이며, 아래쪽에 ○, ■ 및 △으로 표시한 것이 공진조건이 성립되었을 때 출력거울의 반사율에 따라 검출된 광음향 신호의 크기이다. 측정된 광음향 신호간의 차이는 1065 nm에서 레이저 에너지로 변환되었다고 판단된다. 그 중의 일부가 공진조건에 따라 출력거울을 통해 레이저광으로 발진되는 것이다. 이것은 양자화된 에너지가 증가함에 따라 광음향 신호 즉, 열로 변환되는 손실에너지가 감소되는 것을 의미하기도 한다.

레이저 공진기의 최적화는 레이저 출력, 발진문턱값 그리고 발진효율 등과 같은 외부적으로 측정할 수 있는 것과 공진기 내부에서 이득매질의 매개변수에 의해 발생하는 에너지관계로 해석할 수 있다. 레이저에서 최고 효율을 얻기 위해서는 최적화된 출력거울의 반사율을 결정해야 한다. 광음향 신호로 공진기 내부의 에너지 변환관계를 이용하여 출력거울의 반사율 변화에 따라 1065 nm에서 발진되는 에너지와 손실되는 에너지의 비를 그림 5에 나타내었다. 이 그림에서 출력거울의 반사율이 73%로 낮아질수록 레이저 발진에너지는 증가하고, 공진기의 손실에너지가 감소하는 것을 알 수 있다. 또, 반사율이 73%로 갈수록 발진되는 레이저 에너지도 포화되고 있는 것을 알 수 있다.

레이저 공진기내에서 출력조건을 이용하면 이론적으로도 공진기 최적화를 확인할 수 있다. 공진기내의 총손실은 레이저 매질과 공진기를 구성하고 있는 거울에서의 산란, 흡수 및 회절에 의한 피할수 없는 잔류손실과 출력거울의 투과율에 따른 외부손실로 나누어질 수 있다.^[14]

$$L = L_i + T \quad (1)$$

여기서 L_i 는 공진기 내부의 잔류손실이고, T 는 출력거울의 투과율이다. 유도방출에 의해 방출된 총출력 P_e 는

$$P_e = P_s \left(\frac{g_o}{L} - 1 \right) \quad (2)$$

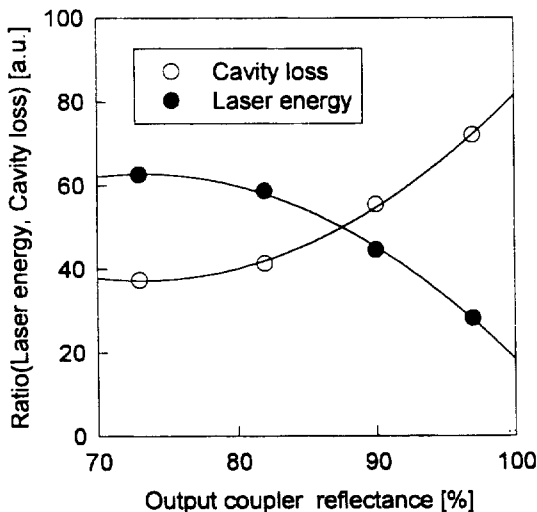


그림 5. 공진기 내부에서 손실된 에너지와 레이저 에너지의 상관관계.

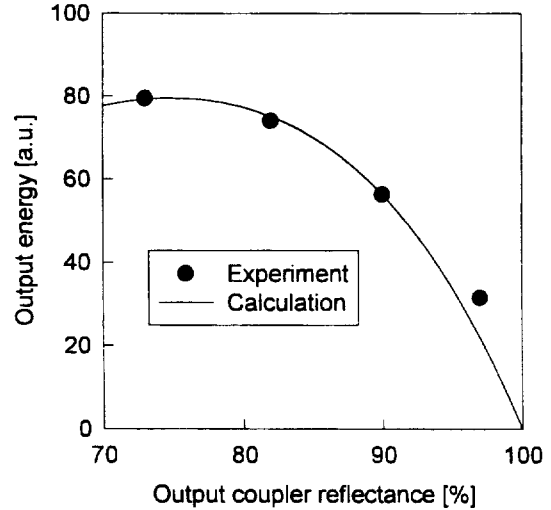


그림 6. 공진기에서 출력거울의 반사율에 따른 출력에너지.

로 표현된다. 여기서 P_s 는 포화된 출력이고, 유용한 출력은 총출력 P_e 에서 $T/(T+L_i)$ 에 비례하게 된다. 즉, 유효출력 P_{out} 은

$$P_{out} = P_s \left(\frac{g_o}{L} - 1 \right) \frac{T}{T + L_i} \quad (3)$$

이고, 이 식을 다시 표현하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{out} = \frac{8 \pi n^2 h \nu \Delta \nu A}{\lambda^2 (t_z / t_{spont})} T \left(\frac{g_o}{L_i + T} - 1 \right) = I_s A T \left(\frac{g_o}{L_i + T} - 1 \right) \quad (4)$$

여기서 I_s 는 포화강도, A 는 모드의 단면적을 의미한다. 포화강도나 모드의 단면적은 측정이나 계산에 의해 구할 수 있지만, 불포화이득 g_o 와 공진기 내부의 잔류손실 L_i 는 구할 수가 없다. 그러나 본 실험을 통해 공진기 내부의 에너지 변환과정에서 공진기 손실 L_i 를 구할 수 있었고, 식 (4)를 이용하여 역으로 유도방출 단면적과 반전분포량에 비례하는 g_o 를 계산할 수 있었다. 계산과 실험에서 구한 레이저 공진기내에서의 에너지 상관관계를 그림 6에 나타내었다. 그림에서의 실선은 이론에 의한 계산값이고, ●으로 표시한 것은 레이저 출력특성 실험에 의한 실험값이다. 이것으로부터 공진기 내부에서의 에너지 변환관계를 이용하여 반도체레이저 단면여기 Nd : S-VAP 레이저의 출력특성 실험에서 얻은 공진기 최적화 상황을 확인하고 해석할 수 있었다.

V. 결 론

레이저매질내에서의 광음향 분광법으로 비방사천이를 해석하기 위해 PZT를 사용하여 매질내에서 변환된 광음향 신호를 검출하였다. 검출된 광음향 신호를 이용하여 공진기 내부에서의 에너지 변환관계를 해석할 수 있었고, 이 에너지 흐름을 이용하여 반도체레이저 여기 Nd : S-VAP 레이저의 공진

조건의 최적상태를 해석할 수 있었다. 공진기 내부에서의 발진 및 손실되는 에너지의 관계를 이용하여 출력거울의 최적 반사율을 구할 수 있었고, 설계 제작된 반도체레이저 단면여기 Nd : S-VAP 레이저가 효과적인 공진기를 구성하고 있음을 확인할 수 있었다.

광음향 분광법은 레이저 공진기 내부의 에너지 변환관계를 이해하고, 출력거울의 최적화를 비교적 간단하게 실현시킬 수 있는 효과적인 측정방법임을 알 수 있었다.

감사의 글

끝으로 본 실험에 사용된 Nd : S-VAP 결정을 제공해주신 오사카대학 레이저핵융합연구소의 M. Nakatsuka 교수와 본 실험의 전과정을 의논해주신 정치섭 교수에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] T. Y. Fan and R. L. Byer, IEEE J. Quantum Electron. **QE-24**, 895 (1988).
 [2] S. Basu and R. L. Byer, Appl. Opt. **29**, 1765 (1990).
 [3] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering* (Springer-

Verlag, Berlin, 1996).
 [4] Kate Leggett, Photonics Spectra, pp. 80, August 1996.
 [5] Geddfrey Randolph, Laser Focus World, pp. 121, April 1995.
 [6] 國府田隆夫 · 終元 宏, 光物性測定技術 (東京大學出版會, 1988).
 [7] W. Demtröder, *Laser Spectroscopy* (Springer-Verlag, Berlin, 1982).
 [8] M. F. Cox and G. N. Coleman, Anal. Chem. **53**, 2034 (1981).
 [9] X. X. Zhang, P. Hong, G. B. Loutts, J. Lefaucheur, M. Bass and B. H. T. Chai Appl. phys. Lett. **64**, 3205 (1994).
 [10] C. K. N. Patel and A. C. Tam, Appl. Phys. Lett. **34**, 467 (1979).
 [11] J. F. McClelland and R. N. Kniseley, Appl. Phys. Lett. **28**, 467 (1976).
 [12] D. K. Sardar and P. D. Bella, J. Appl. Phys. **76**, 1 (1994).
 [13] L. D. DeLoach, S. A. Payne, B. H. T. Chai and G. Loutts, J. Appl. Phys. **65**, 1208 (1994).
 [14] A. Yariv, *Optical Electronics* (Saunder Collage Publishing, 1991).

Analysis of the oscillation condition optimized at laser-diode end-pumped solid-state laser

Byung-Tai Kim and Tae-Seok Kim

Department of Optical Engineering, Chongju University, Chongju 360-764, Korea

(Received : May 9, 1997)

The energy transfer of a laser-diode-pumped Nd : S-VAP laser was detected by the photoacoustic technique using a PZT detector. The photoacoustic method suggests an effective approach to understand the energy transfer mechanism of the laser cavity, and to find out the optimum output coupler of the oscillator with comparative ease.