

반도체 레이저로 펄핑하는 Nd:YAG 레이저의 내부 발생형 제2차 고조파의 On-Off 간헐성

김규욱¹ · 추한태

금오공과대학교 자연과학부

Ⓣ 730-701 경북 구미시 신평동 188

김동익 · 박영재

서강대학교 물리학과

Ⓣ 121-742 서울시 마포구 신수동 1번지

김철민

백제대학교 물리학과, 광혼돈현상제어연구단

Ⓣ 302-735 대전시 서구 도마동 439-6

(2001년 11월 23일 받음, 2002년 1월 28일 수정본 받음)

반도체 레이저로 펄핑하는 Nd:YAG 레이저의 내부 발생형 제2차 고조파 발진 문턱 근처에서의 출력 특성을 조사하였다. 라미나 상태에 대한 분석을 통하여 제2차 고조파가 on-off 간헐성을 통하여 발진한다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 간헐적인 특성은 비유 방정식을 이용한 수치해석에서도 볼 수 있었다.

주제어 : laser diode, laser principles, solid-state laser, nonlinear optics.

I. 서 론

어떤 동역학계의 상태가 안정한 상태에서 혼돈으로 전이할 때 알려진 과정 중의 하나가 간헐성(intermittency)이다. 이 간헐성에는 Pomeau와 Manneville에 의해 소개된 type-I, type-II, 그리고 type-III가 있고,¹⁻³⁾ 그 외에 위기 유도 간헐성(crisis induced intermittency)이 있다.^{4,5)} 그런데 최근에 간헐성의 다른 한 종류인 on-off 간헐적 현상이 소개되었다.⁶⁾ 이 현상은 간헐적인 신호의 두 가지 독특한 상태적인 특성에서 그 이름이 유래되었다. 라미나 위상(laminar phase)이라 불리는 “off-상태”는 거의 일정하게 오랜 시간 동안 지속되고 “on-상태”인 burst는 off-상태로부터 급속하게 출몰하여 다시 빠르게 원 상태로 되돌아오는 것을 말한다. On-off 간헐성은 이러한 on-off의 두 상태가 불규칙적으로 반복되는 현상을 말한다. Platt 등⁶⁾은 이러한 현상을 다섯 개가 결합된 상미분 방정식과 선형 분브기(map)로 설명하였다. 또한 이들은 다른 알려진 간헐성 현상들과 확연히 구분되는 on-off 간헐적 현상에 관한 기하학적인 동작 원리(mechanism)를 소개하였다.

어떤 계의 동력학적인 변수(dynamical parameter)를 강제적으로 갈래질 점(bifurcation point) 근처에서 임의적으로(randomly) 혹은 혼돈스럽게(chaotically) 변화하게 하면, on-off 간헐성이 나타난다는 것이 알려져 있다.^{6,9)} 이때 on-off 간헐성은 그것이 시작되는 점(onset point) 근처에서 라미나 위

상에 대한 두 가지의 특별한 지수법칙(power laws)이 있는 것이 특징이다. 첫째, 라미나 위상의 확률 분포 Λ_n 은 $n^{-3/2}$ 에 비례한다. 여기서 n 은 라미나 위상의 길이이다. 외부에서 잡음이 가해질 경우 라미나 위상 분포는 라미나 위상이 짧은 경우에는 변화하지 않는다. 그러나 라미나 위상이 긴 경우에는 라미나 위상 분포는 지수 함수적으로 줄어들고, 이들 두 부분의 곡선 중간 부분에 등성이(shoulder)가 나타난다. 둘째, 라미나 위상의 평균 길이 $\langle n \rangle$ 은 $\delta^{-1} = |V - V_c|^{-1}$ 에 비례한다. 이때 V 는 동력학적 변수이고, V_c 는 간헐성이 시작되는 점 근처에서의 동력학적 변수이다.

레이저 시스템은 여러 가지 혼돈 현상을 보여주는 혼돈계 중의 하나이다. 레이저에서의 혼돈에 대한 연구는 레이저 동력학 자체에 대한 이해 뿐 아니라 이론적으로 예측한 혼돈의 특성을 실험적으로 검증하는데 있어서 매우 중요하다. 따라서 연속 발진 Nd:YAG 레이저,¹⁰⁾ Q-스위칭된 CO₂ 레이저,¹¹⁾ 모드록킹된 Nd:YAG 레이저,¹²⁾ 및 Nd:YAG 레이저의 제2차 고조파¹³⁻¹⁶⁾ 등 여러 가지 레이저 시스템에서의 혼돈 특성이 실험적으로 많이 조사되었다. 또한 혼돈 특성을 이론적으로 분석하는 연구도 많이 보고되었다.^{6,9)}

그러나 이들 연구에 사용한 레이저의 대부분은 발진 문턱 이상에서 동작하는 경우에 대한 것이고, 발진 문턱 근처에서 혼돈 특성을 조사한 것은 거의 없다. 레이저 발진 문턱 근처에서 특성을 조사하면 레이저가 발진하는 원리와 출력의 불규칙한 요동의 원인 등을 이해할 수 있기 때문에 중요한 의미를 지니고 있다. 최근 여러 가지 레이저 시스템의 발진 문턱 근

¹⁾E-mail: gukim@knut.kumoh.ac.kr

처에서 발진에 이르는 천이 과정에 대한 새로운 견해가 제시되었다.^[17,18] 즉, 발진 문턱 근처에서 출력이 혼돈스럽게 변화하는 레이저는 on-off 간헐성 과정을 통하여 레이저-off 상태에서 레이저-on 상태로 발진한다는 것이다. 이러한 새로운 견해는 연속 발진 Nd:YAG 레이저,^[17] 광음향 Q-스위칭된 Nd:YAG,^[18] 그리고 모드록킹된 Nd:YAG 레이저와 같이 동작 방법이 서로 다른 손실 변조된(loss modulated) Nd:YAG 레이저 시스템에서 실험적으로 확인한 바 있다.

본 연구의 목적은 이득 변조된(gain modulated) Nd:YAG 레이저(1064 nm)의 내부 발생형 제2차 고조파(532 nm)도 역시 발진 문턱 근처에서 on-off 간헐성 현상을 보임을 확인하는 것이다. 제2차 고조파 발생은 연속 발진, Q-스위칭, 모드록킹 등과 함께 레이저를 동작시키는 방법 중의 하나이다. 따라서 제2차 고조파 발생에 대한 발진 문턱 근처에서의 천이 과정을 조사하는 것은 on-off 간헐성이 레이저의 발진 과정 중의 하나임을 증명하는데 매우 중요하다.

본 연구에서 조사한 천이 과정이 바로 on-off 간헐성임을 밝히기 위하여 라미나 위상의 분포와 평균 라미나 길이(average laminar length)의 특성 등을 분석하였다. 또한 이러한 간헐성이 레이저 자체의 고유한(intrinsic) 것에 의한 것임을 밝히기 위하여 비을 방정식을 이용한 수치해석을 하였다.

II. 반도체 레이저로 펄핑하는 Nd:YAG 레이저와 내부 발생형 제2차 고조파 발생 장치

그림 1은 반도체 레이저로 펄핑하는 Nd:YAG 레이저 공진기와 KTP 비선형 결정을 이용하여 제2차 고조파를 공진기 내부에서 발생시키는 실험 장치를 보여 주고 있다. 그림 1에서 Nd:YAG 결정을 펄핑하는 반도체 레이저(Polaroid, POL-4100BW)는 최대 출력이 1 W이고, 동작 온도가 30°C일 때 중심 파장은 808 nm이다. 반도체 레이저를 동작시키는 장치는 국내에서 제작한 것(M-Tech, MSLD-10)으로 최대 1 A의 전류를 공급할 수 있으며, 10~50°C의 온도 범위에서 0.01°C의 정확도로 조절할 수 있다. Nd:YAG 결정은 직경이 3 mm, 길이가 5 mm이고, 한쪽 면은 곡률 반경이 5 cm이다. 다른 한쪽 면은 평면이다. 곡률이 있는 쪽에 초점거리가 3 mm인 렌즈계(원통형 렌즈+구면 렌즈)를 사용하여 반도체 레이저 빔을 집속하였다. 이때 이 면은 808 nm를 잘 통과하고, Nd:YAG 레이저의 제2차 고조파는 전부 반사하도록 유전체 코팅되어 있어서 Nd:YAG 레이저 공진기의 전반사 거울로 작용한다. 평면인 쪽은 1064 nm와 532 nm가 잘 통과하도록 코팅되어 있다. 한편 출력 거울은 곡률 반경이 1 m이고, 1064 nm에서의 투과율은 5%보다 작고, 532 nm에서의 투과율은 99.5%보다 크도록 되어 있고, Nd:YAG 레이저 공진기의 길이는 7.5 cm이다. Nd:YAG 레이저의 제2차 고조파를 발생시키기 위한 KTP 결정(CASIX Inc.)은 면적이 3×3 mm²이고, 길이가 5 mm이며 양면은 532 nm에 대하여 무반사 코팅이 되어 있다. 이때 type II의 조건에서 제2차 고조파를 발생시키도록 하였다.

Nd:YAG 레이저와 제2차 고조파는 같은 방향으로 출력되는 데, 이것을 프리즘을 이용하여 분리한 다음 Si PIN 광다이오

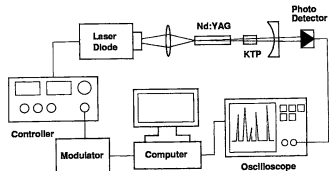


그림 1. 반도체 레이저로 펄핑하는 Nd:YAG 레이저와 제2차 고조파를 발생시키기 위한 장치도.

드(Electro-Optics, ET-2010)를 사용하여 검출하였다. 이때 제2차 고조파를 검출하기 위한 광다이오드 앞에는 대역 통과 여파기(band pass filter)를 두어서 532 nm만이 통과하도록 하였다. 검출한 신호들은 디지털 오실로스코프로 관찰한 후 A/D 변환기(A/D converter, National Instruments Inc.)를 통하여 PC에 저장하고 분석하였다. 그리고, 합성 발생기(SONY/TeK, AFG310)를 사용하여 반도체 레이저 구동 장치에 약간의 직류 전류(DC offset)와 주기적으로 변조된 교류 전류(modulated AC)를 가하여 반도체 레이저 및 Nd:YAG 레이저가 변조된 주파수로 동작하도록 하였다. 이때 실험 결과를 분석하기 위하여 전류를 변조하는 신호를 기준 신호로 저장하였다.

III. 제2차 고조파 출력의 On-Off 간헐성

그림 2는 반도체 레이저 (a), Nd:YAG 레이저 (b)와 내부 발생형 제2차 고조파 (c) 출력의 시간적 변화를 실험적으로 조사한 결과의 한 예이다. 이러한 결과를 얻기 위하여 제2차 고조파가 발진 문턱 근처에 있도록 반도체 레이저에 걸리는 전류를 조절하였다. 이때 반도체 레이저를 동작시키는 변조 전류의 주파수는 800 Hz이고, 직류와 교류 성분의 진폭은 각각 0.46 V와 1.225 V이고, 반도체 레이저에 흐르는 전류는 51.7 mA이다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 반도체 레이저와 Nd:YAG 레이저의 출력은 매우 안정되어 있다. 그리고, 그들의 주파수는 반도체 레이저를 동작시키는 전류를 변조하는 주파수와 같음을 볼 수 있다. 그러나 제2차 고조파의 출력은 혼돈스러운 모양을 가지고 변화하며, 그 주파수도 전류의 변조 주파수와 다르게 나타났다. 여기에서 변조 전류의 주파수를 따라서 제2차 고조파의 출력이 나오는 것 on-상태, 출력이 나오지 않는 것을 off-상태라고 한다. 이때 그림 2(c)에서 보이는 것과 같이 제2차 고조파 출력은 off-상태가 매우 길고, on-상태는 드물게 나타나고 있다.

그림 3은 반도체 레이저로 펄핑하는 Nd:YAG 레이저의 제2차 고조파 발진 문턱 근처에서 출력 변화를 실험적으로 조사한 것이다. 이때 반도체 레이저를 동작시키는 변조 전류의 주파수는 800 Hz, 직류 전압은 0.465 V이고, 교류 성분의 진폭은 각각 1.225 V (a), 1.240 V, 그리고 1.250 V (c)이다. 그림 3(a)는 제2차 고조파의 발진 문턱 바로 위에 해당하고, 이

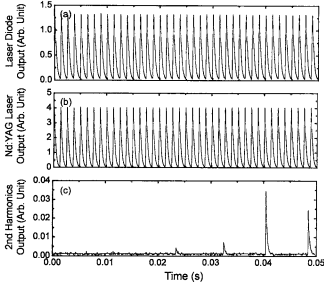


그림 2. 주기적으로 변조한 전류로 반도체 레이저를 동작시키고, 실험적으로 조사한 반도체 레이저 (a), Nd:YAG 레이저 (b), 그리고 발진 문턱 근처에서의 제2차 고조파 출력 (c). 이 경우 반도체 레이저와 Nd:YAG 레이저의 출력은 전류의 변조 주파수와 같지만, 제2차 고조파 출력은 간헐적으로 나오고 있음을 알 수 있다.

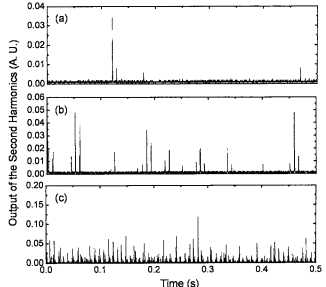


그림 3. Nd:YAG 레이저 제2차 고조파의 발진 문턱 근처에서의 출력 변화. 이때 반도체 레이저를 동작시키는 변조된 전류는 주파수가 800 Hz이고, 교류 진폭은 각각 (a) 1.225 V, (b) 1.240 V, (c) 1.250 V이다.

때 제2차 고조파가 나오지 않는 긴 off-상태가 가끔씩 나오는 on-상태에 의하여 불규칙적으로 깨지고 있음을 알 수 있다. 그림 3(c)에서 볼 수 있듯이 변조 전류의 진폭이 충분히 커서 레이저가 발진 문턱보다 위에 있을 경우에는 off 상태가 매우 짧아지고 있다. 그림 3의 결과는 제2차 고조파가 간헐적인 위상의 변화를 통하여 off-상태에서 on-상태로 천이하고 있음을 보여주고 있다. 그림 3의 전체에서 제2차 고조파 출력의 세기는 매우 혼돈스럽게 변화하고 있는 것을 알 수 있다.

위와 같은 실험결과가 on-off 간헐성임을 확인하기 위하여 라미나 위상 분포에 대한 지수법칙을 조사하였다. 우선, 반도체 레이저를 동작시키는 변조 전류의 주어진 진폭에 대하여 그림 3과 같은 제2차 고조파의 시계열(time series)을 많이 구한다. 그 다음 구한 시계열에서 같은 라미나 길이를 갖는 라미나 위상의 갯수를 구한다.

그림 4는 변조 주파수가 10.0 kHz일 때 전류의 변조 진폭 변화에 따른 라미나 길이에 대한 라미나 위상의 확률 분포를 그린 것이다. 곡선 A와 B는 변조 진폭이 각각 0.68 V와 1.0 V일 때의 실험 결과이고, 굵은 실선의 기울기는 $-3/2$ 이다. 곡선 A는 변조 진폭이 제2차 고조파의 발진 문턱 근처인 경우로, 라미나 위상 분포의 라미나 길이가 짧은 때에는 $-3/2$ 의 기울기로 변화하지만, 라미나 길이가 길 때에는 급격히 줄어들며, 넓은 동성이가 이를 두 부분을 이어주고 있다. 곡선 B는 발진 문턱보다 높은 변조 진폭의 경우로 동성이가 나타나지 않고 라미나 위상의 분포는 급격히 줄어든다. 그러나 이때에도 라미나 길이가 짧은 경우 그 분포는 $-3/2$ 의 기울기를 가지고 변하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 곡선 B는 A보다 짧은 라미나 길이를 갖는다.

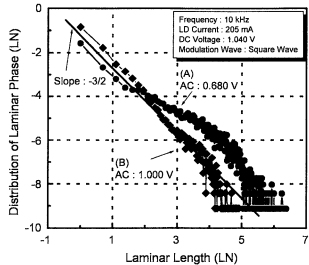


그림 4. 반도체 레이저를 동작시키는 전류의 변조 진폭 변화에 따른 라미나 상태의 확률 분포를 자연로그-자연로그로 나타낸 그림. 이때 변조 진폭은 0.68 V(A)와 1.0 V(B)이고, 실선은 이론적인 것으로 기울기는 $-3/2$ 이다.

라미나 위상 분포 이외에 임의의 고정된 변조 진폭 V 에 대한 평균 라미나 길이 $\langle n \rangle$ 를 실험적으로 구하였다. 변조 진폭 V 를 on-off 간헐성이 나타나기 시작하는 점인 $V_c = 4.01$ V(실험적으로 구한 것임)에서 시작하여 0.01 V씩 증가시키면서 조사하였다. 그림 5는 변조 진폭의 차이 $\delta = IV - V_c$ 에 따른 평균 라미나 길이 $\langle n \rangle$ 를 조사한 것이고, 굵은 직선의 기울기는 -1 이다.

그림 4와 그림 5와 같은 실험 결과들은 on-off 간헐성에 대한 이론적인 예측과 잘 일치한다. 그림 4에서 두 가지 실험

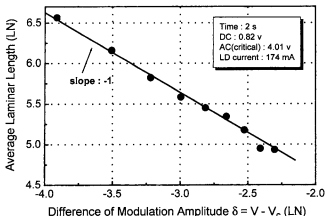


그림 5. 반도체 레이저를 동작시키는 전류의 변조 진폭의 차이 $\delta = |V - V_c|$ 에 따른 평균 라미나 길이의 변화를 자연로그-자연로그로 나타낸 그림. 이때 V는 변조 진폭이고, V_c 는 간헐성이 시작될 때의 변조진폭이다. 그림에서 \bullet 는 실험 결과이고, 실선은 이론적인 것으로 기울기는 -1이다. 이때 변조 진폭은 0.68 V (A)와 1.0 V (B)이고, 실선의 기울기는 이론적인 -1이다.

결과 모두 라미나 위상 분포는 라미나 길이가 짧을 때 $-3/2$ 의 기울기를 가지며, 이것은 $A_n \sim n^{-3/2}$ 의 지수법칙과 정확하게 일치한다. 라미나 길이가 긴 경우에는 두 경우 모두 지수 함수적으로 감소한다. 특히 곡선 A의 경우에는 중간 영역에서 등성이를 볼 수 있다. 라미나 위상의 분포에 등성이가 나타나는 것은 잡음(noise)에 의한 것임이 알려져 있다.^[8,9] 레이저 시스템의 경우에 잡음은 펄핑, 냉각 계통 등에 의한 것과 양자 잡음과 같이 여러 가지 원인이 있다. 그림 5와 같은 평균 라미나 길이에 대한 실험 결과는 이론적인 예상인 $\langle n \rangle \sim \delta^{-1}$ 을 잘 만족한다. 이상과 같은 이론적 일치는 본 연구에서 실험적으로 조사한 제2차 고조파 출력이 바로 on-off 간헐성을 입증한다.

IV. 비율 방정식을 이용한 수치 해석

이제 위의 실험결과와 같은 간헐성이 수치해석에서도 나타날 수 있음을 보인다. Nd:YAG 레이저의 제2차 고조파 출력을 이론적으로 계산하기 위하여 비율 방정식을 수치 해석하였다. Nd:YAG 레이저 및 제2차 고조파 출력은 아래와 같은 비율 방정식으로 표현된다.^[15,16]

$$\tau_c \frac{dI_j}{dt} = \left[G_j - \alpha_j - \epsilon I_j - 2\epsilon \sum_{k=1}^N I_k \right] I_j, \quad (1)$$

$$\tau_f \frac{dG_j}{dt} = G_j^0 - G_j \left[1 + \beta_j I_j + \sum_{k=1}^N \beta_{jk} I_k \right]. \quad (2)$$

여기에서 τ_c 는 공진기 왕복 시간(cavity round trip time), τ_f

는 형광 수명 시간(fluorescence life time)이다. N 은 레이저 공진기 안에 있는 종모드(longitudinal mode)의 수이고, I_j 와 G_j 는 각각 j -번째 모드의 세기와 이득이다. α_j 는 j -번째 모드의 공진기 손실(cavity loss), G_j^0 는 소신호 이득(small signal gain), β_j 는 자체포화(self saturation)를 나타내는 변수, β_k 는 상호 포화(cross saturation)를 나타내는 변수, ϵ 는 결정의 내부에서 발생하는 제2차 고조파에 기인하는 비선형 결합 계수(nonlinear coupling coefficient)이다. 그리고, ϵI_j^2 는 제2차 고조파 발생 과정 중의 기본파 세기의 손실, $\epsilon I_j I_k$ 는 합주파수 발생 과정 중의 기본파 세기의 손실을 의미한다.

위의 방정식들과 같은 다중 모드 레이저 모델에서 공진기 내부에서 기본파의 세기 I_{fund} 는 아래 식과 같이 각 모드의 합으로 주어진다.

$$I_{fund} = \sum_{k=1}^N I_k \quad (3)$$

그리고, 공진기 내부에서 발생하는 제2차 고조파의 세기 I_{second} 는 주파수 배가와 합주파수 발생이 결합된 효과로 나타나며

$$I_{second} = \epsilon \left[\sum_{j=1}^N I_j^2 + 4 \sum_{\substack{j,k \\ k \neq j}}^N \beta_{jk} I_j I_k \right] \quad (4)$$

로 주어진다.

본 연구에서는 그림 1과 같이 구성한 반도체 레이저로 펄핑하는 Nd:YAG 레이저 공진기 내부에 KTP 비선형 결정을 넣어 발생시키는 제2차 고조파 신호의 출력을 위해서 설명한 모델을 이용하여 수치 해석하였다. 위에서 설명한 모델은 공진기 내부에 모든 양과 여러 개 있는 다중 모드에 대한 것이지만 모드가 많이 있다고 가정하면 그에 따른 비율 방정식의 수도 많아지고 계산 시간도 길어진다. 그러나 3개의 모드만을 가정하고 수치 해석하여도 제2차 고조파 출력의 혼돈 특성이 잘 나타난다고 알려져 있다.^[15] 따라서 본 연구에서는 3개의 모드를 가정하여 수치 해석하였다. 그리고 여러 변수들의 값은 Nd:YAG 레이저 및 KTP 결정의 특성에 따른 값을 주어서, $\tau_c = 0.5$ ns, $\tau_f = 0.24$ ms, $\epsilon = 5.0 \times 10^{-5}$ 로 두었다. 그리고, 각 모드에 따른 영향은 없다고 가정하여 $\alpha_j = \alpha = 0.015$, $\beta_j = 1$, $\beta_k = \beta = 0.291$ 로 두었다.^[15,16]

본 연구의 실험에서와 같이 반도체를 동작시키는 전류를 외부에서 변조하면 Nd:YAG 레이저의 소신호 이득이 변조된다. 이러한 영향은 수치 해석에서는 비율 방정식 (1)과 (2)에서 $G_j^0 = \gamma$ 을

$$\gamma = DC + AC \times \sin(2\pi f t) \quad (5)$$

와 같이 바꾸어서 고려할 수 있다. 이때 DC는 직류 성분, AC는 교류 성분, f 는 변조 주파수이며, 수치 해석을 할 때 이들 변수의 변화에 따른 영향을 조사하였다.

그림 6은 수치 해석 결과 중의 하나이다. 다른 변수는 변화

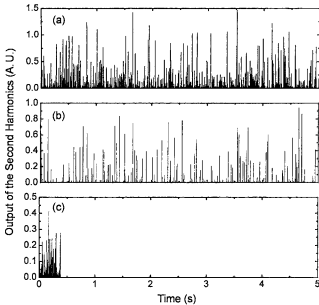


그림 6. 비율 방정식을 이용하여 Nd:YAG 레이저의 내부 발생형 제2차 고조파의 출력률 수치 해석적으로 구한 결과로 실험과 마찬가지로 간헐적인 현상을 보이고 있다. 이때 변조 진폭은 각각 0.02 (a), 0.01 (b), 0.004 (c)이다.

시키지 않고, 변조 진폭만을 변화시키면서, 제2차 고조파 출력의 변화를 계산하였다. 변조 진폭이 0.004로 가장 낮은 값을 갖는 그림 6(c)의 경우, 제2차 고조파 신호는 계산의 시작 부분에서만 보이고, 곧 나오지 않는다. 실제로 실험에서도 특정한 조건(이러한 것을 찾기는 쉽지 않지만)에 대하여 제2차 고조파가 처음에만 발생하다가 곧 없어지는 것을 볼 수 있었다. 진폭의 변조 진폭을 증가시키면 제2차 고조파 신호는 점점 자주 나와서 off-상태가 줄어들는 것을 볼 수 있다. 이러한 수치 해석의 결과는 실험에서 보여준 간헐적인 현상과 비슷한 모양이다.

V. 토의 및 결론

본 연구에서는 반도체 레이저로 펄핑하는 Nd:YAG 레이저의 내부 발생형 제2차 고조파의 발진 문턱 근처에서의 간헐적인 출력 특성을 실험적으로 조사하였다. 그리고, 제2차 고조파의 라미나 위상을 분석하여 지수법칙을 구하고, 그 결과 본 연구에서 조사한 제2차 고조파 출력은 on-off 간헐성을 나타내는 것을 알 수 있었다. 한편 비율 방정식을 이용한 수치 해석을 통하여 이론적으로도 간헐적인 현상이 보여질 수 있음을 확인하였다.

이러한 on-off 간헐성이 발생하는 원인에 대하여 고찰하여 보자. 본 연구팀은 연속 발진^[17] 및 손실 변조된 Nd:YAG 레이저^[18] 뿐 아니라 이득 변조된 CO₂ 레이저에서도 on-off 간헐성을 관찰한 바 있다. 그런데 이들은 모두 아르등으로 펄핑하는 레이저이다. 이러한 사실로부터 아르등의 방전 불안정에 의한 동력학적인 변수가 변조되고, 이것이 on-off 간헐성을 발생시키는 외부 잡음(external noise) 역할을 하는 것으로 생각

할 수 있다. 그러나 이번 연구는 반도체 레이저로 펄핑하는 Nd:YAG 레이저의 내부 발생형 제2차 고조파의 경우로, 아르등으로 펄핑하는 것에 비하여 매우 안정적인 반도체 레이저로 펄핑하고 있다. 따라서 위에서 언급한 것과 같은 펄핑에 의한 외부 잡음 효과를 기대하기는 어렵다. 이 경우에는 동력학적 변수의 변조는 레이저 시스템 내부적(intrinsic) 요인에 의한 것으로 생각할 수 있으며, 레이저 공진기 안에 분포하는 모드 결합에 의한 효과를 들 수 있다. 이러한 추측은 위에서 설명한 비율 방정식을 이용한 수치 해석한 결과가 뒷받침한다. 수치 해석에서는 3개의 모드를 가정하였고, 외부 잡음에 의한 효과는 고려하지 않았으며, Nd:YAG 레이저의 이득 변조만을 고려하였다.

본 연구의 결과 및 이전의 결과들로부터 on-off 간헐성이 일반적인 레이저의 발진 문턱 근처에서 나타나는 현상으로 레이저-off에서 레이저-on으로의 천이과정 중 하나라고 생각할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 금오공과대학교 교내 연구비의 지원을 받아 수행한 것으로 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Y. Pomeau and P. Manneville, "Intermittent transition to turbulence in dissipative dynamical systems," *Commun. Math. Phys.*, vol. 74, pp. 189-197, 1980.
- [2] J. E. Hirsch, B. A. Huberman, and D. J. Scalapino, "Theory of intermittency," *Phys. Rev. A*, vol. 25, no. 1, pp. 519-532, 1982.
- [3] B. Hu and J. Rudnick, "Exact solutions to the Feigenbaum Renormalization-Group Equations for Intermittency," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 48, no. 24, pp. 1645-1648, 1982.
- [4] C. Grebogi, E. Ott, J. A. Yorke, "Chaotic attractors in crisis," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 48, no. 22, pp. 1507-1510, 1982.
- [5] C. Grebogi, E. Ott, F. J. Romeiras, and J. A. Yorke, "Critical exponents for crisis-induced intermittency," *Phys. Rev. A*, vol. 36, no. 11, pp. 5365-5380, 1987.
- [6] N. Platt, E. A. Spiegel, and C. Tresser, "On-off intermittency: a mechanism for bursting," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 70, no. 3, pp. 279-282, 1993.
- [7] J. F. Heagy, N. Platt, and S. M. Hammel, "Characterization of on-off intermittency," *Phys. Rev. E*, vol. 49, no. 2, pp. 1140-1150, 1994.
- [8] N. Platt, S. M. Hammel, and J. F. Heagy, "Effects of additive noise on on-off intermittency," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 72, no. 2, pp. 3498-3501, 1994.
- [9] P. W. Hammer, N. Platt, S. M. Hammel, J. F. Heagy, and B. D. Lee, "Experimental observation of on-off intermittent," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 73, no. 8, pp. 1095-1098, 1994.
- [10] F. Hollinger and C. Jung, "Single-longitudinal-mode laser as a discrete dynamical system," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 2, no. 1, pp. 218-221, 1985.

- [11] D. Dangoisse, P. Glorieux, and D. Hennequin, "Chaos in a CO₂ laser with modulated parameters : Experiments and numerical simulations," *Phys. Rev. A*, vol. 36, no. 10, pp. 4775-4791, 1987.
- [12] U. Morgner and F. Mitschke, "Drift instabilities in the pulses from cw mode-locked lasers," *Phys. Rev. E*, vol. 58, no. 1, pp. 187-192, 1998.
- [13] C. J. Kennedy and J. D. Barry, "Stability of an intracavity frequency-doubled Nd:YAG laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-10, no. 8, pp. 596-599, 1974.
- [14] T. Baer, "Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG lasers," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 3, no. 9, pp. 1175-1180, 1986.
- [15] G. E. James, E. M. Harrell II, and R. Roy, "Intermittency and chaos in intracavity doubled lasers. II," *Phys. Rev. A*, vol. 41, no. 5, pp. 2778-2790, 1990.
- [16] C. Bracicowski and R. Roy, "Chaos in a multimode solid-state laser system," *Chaos*, vol. 1, no. 1, pp. 49-64, 1991.
- [17] S. H. Gong and C.-M. Kim, "On-off intermittency in the threshold of a continuous-wave Nd:YAG laser," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 18, no. 9, pp. 1285-1287, 2001.
- [18] S. H. Gong, S. Rim, G. U. Kim, and C.-M. Kim, "On-off Intermittency in the threshold of a Q-switched Nd:YAG Laser," *submitted to Opt. Comm.* (2001).

On-off intermittency in an intracavity frequency doubled Nd:YAG laser pumped by a laser diode

Gyu Ug Kim[†] and Han Tae Choo

School of Natural Science, Kumoh National University of Technology, Kyungbuk 730-701, KOREA

[†]*E-mail: gukim@knut.kumoh.ac.kr*

Dong Ik Kim and Young-Jai Park

Department of Physics, Sogang University, Seoul 121-742, KOREA

Chil-Min Kim

National Creative Research Initiative Center for Controlling Optical Chaos,

Department of Physics, Pai-Chai University, Daejeon 302-735, KOREA

(Received November 23, 2001 ; revised manuscript received January 28, 2002)

We have investigated the lasing characteristics of intracavity second harmonics of a Nd:YAG laser pumped by a laser diode. Through the analysis of the scalings of laminar phases, we verify that the second harmonics are generated through on-off intermittency. The intermittent behavior can be reproduced by a numerical simulation with rate equations.

Classification codes : LO.060, LO.070, LO.080, NL.010.