

다이오드 레이저로 들뜨운 Nd:YAG 레이저의 제2차 고조파 발진 문턱에서 on-off 간헐성 현상

김동익, 김규욱, 고명석*, 김철민*

금오공과대학교 자연과학부 물리학과, *배재대학교 물리학과

gukim@knut.kumoh.ac.kr

레이저 시스템에서의 혼돈에 관한 연구는 Q-스위칭 레이저⁽¹⁾, 모드록킹 레이저⁽²⁾ 그리고 Nd:YAG 레이저의 제2차 고조파에서⁽³⁾ 실험적으로 수행되었다. 또한 이러한 실험적인 결과들을 레이저 비율 방정식을 사용하여 이론적으로 분석하고자 하는 방법들이 보고되었다.⁽⁴⁻⁶⁾ 그러나 이러한 노력에도 불구하고 여전히 비율 방정식만으로는 만족스럽게 설명하지 못하는 레이저 혼돈 현상들이 많이 존재한다. 레이저 시스템에서 알려지지 않은 현상들 중 하나가 발진 문턱 근처에서의 행동이다. 레이저 시스템은 양자 잡음, 펄핑 잡음 등에 의한 잡음 현상들을 나타내는데, 이것들은 때때로 특히 발진 문턱에서의 레이저 동작에 중요한 역할을 한다. 그러한 경우 잡음에 관한 정확한 정보를 가지고 있지 않는 한 비율 방정식만으로 혼돈 현상들을 설명하기란 매우 어려운 일이다. 발진 문턱 근처에서의 레이저 출력에 관한 혼돈 현상은 최근에 수행된 연속 발진 Nd:YAG 레이저와⁽⁷⁾ Q-스위칭 Nd:YAG 레이저를⁽⁸⁾ 제외하면 보고된 것이 거의 없다. 본 논문에서는 작은 주기적인 변조가 가해진 다이오드 레이저로 들뜨운 Nd:YAG 레이저의 내부 발생형 제2차 고조파의 출력이 나타내는 혼돈 현상이 바로 on-off 간헐성을 보여주는 실험 결과를 보고하고자 한다.

다이오드 레이저로 펄핑한 Nd:YAG 레이저의 제2차 고조파의 혼돈 현상을 관찰하기 위해 다이오드 레이저를 주기적으로 변조한 전류를 가하여 발진 문턱 근처에서 동작시켰다. 그 결과 다이오드 레이저와 다이오드 레이저로 펄핑한 Nd:YAG 레이저의 출력은 변조된 전류의 주파수와 같은 주파수를 가지고 있지만, 제2차 고조파는 변조 주파수와 달리 많은 펄스가 펄스 열에서 빠진 상태로 발진하는 것을 관찰할 수 있었다.

그림 1은 변조 진폭의 증가에 따라 보다 빈번히 나타나는 제2차 고조파의 출력 신호들을 보여주고 있다. 제2차 고조파의 출력이 있을 경우를 "on", 없을 경우를 "of" 상태(laminar 위상)라고 한다. 그림 1(a)에서 볼 수 있듯이 변조 진폭이 낮을 때 on 상태는 거의 없고 off 상태만 지속되는 것처럼 보인다. 그림 1(c)에서와 같이 변조 진폭이 임계점을 초과하면 더 이상 off 상태는 볼 수 없다. 이러한 상태에서 제2차 고조파는 펄스 열에서 거의 빠짐 없이 안정하게 발생한다. 그림 1은 제2차 고조파가 간헐적 위상을 지나 off 상태에서부터 on 상태로 천이하고 있음을 명백하게 보여준다. 즉, on 상태는 거의 일정하고 긴 시간 주기인 off 상태를 불규칙적으로 가로질러 나타난다. 이러한 간헐성 현상은 Platt 등이⁽⁴⁻⁶⁾ 이론적으로 연구한 "on-off 간헐성" 처럼 보인다. 그들의 이론에 의하면 특히 간헐성의 시작점 근처에서 laminar 위상 L_n 의 확률 분포는 $n^{-3/2}$ 에 비례한다는 것이다. 여기에서 n 은 laminar 위상의 길이이다.

본 연구에서 실험적으로 관찰한 현상이 on-off 간헐성을 확인하기 위하여 off 상태들에 대한 지수 법칙을 조사하였다. 이를 위하여 먼저 주어진 변조 진폭에서 제2차 고조파에 대한 시계열을 측정하고, 그 시계열로부터 동일한 길이를 가지는 laminar 위상의 수를 헤아렸다. 여기에서 laminar 위상의 길이는 Nd:YAG 레이저의 펄스 열과 제2차 고조파의 펄스 열을 비교하여, 제2차 고조파의 두 on 상태 사이에서 나타나지 않는 Nd:YAG 레이저의 펄스의 개수와 같다.

그림 2는 실험 결과들에 대한 laminar 위상의 확률 분포를 나타낸 것이다. Laminar 위상과 laminar

길이에 대한 확률 분포는 두 좌표축을 로그 스케일로 그렸다. 두 선 A와 B는 각각 0.68V와 1.00V의 변조 진폭에 대한 실험 결과들이다. 이론적인 점선은 $-3/2$ 의 기울기를 보여준다. 선 A는 변조 진폭이 발진 문턱에 가까울 때 보다 짧은 위상에 대하여 $-3/2$ 의 기울기를 가지고 있고, 보다 긴 위상에서는 급격하게 떨어지고 있음을 보여준다. 그리고 넓은 "shoulder"라 불리는 부분이 이들 두 선을 연결해 주고 있다. 발진 문턱 근처에서 보다 큰 변조 진폭을 가지는 선 B를 보면 거의 shoulder를 찾을 수 없는데, 이것은 변조 진폭이 외부 잡음의 영향 보다 크기 때문으로 여겨진다. 비록 선 B가 shoulder를 가지고 있지 않으나 laminar 길이가 짧은 영역에서는 $-3/2$ 의 기울기를 잘 따르고, laminar 길이가 긴 영역에서는 지수적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 전체적으로 선 B는 선 A보다 짧은 laminar 위상을 가지고 있음을 볼 수 있다.

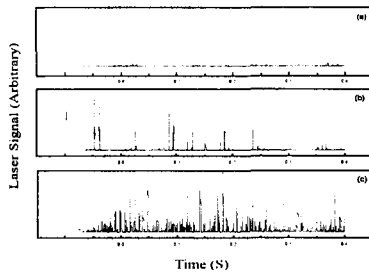


그림 1. Nd:YAG 레이저의 제2차 고조파의 발진 문턱 근처에서의 레이저 출력. 변조 주파수는 800 Hz, 진폭은 각각 1.225 V(a), 1.240 V(b), 1.250 V(c).

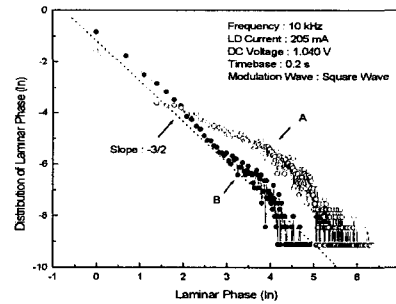


그림 2. Laminar 위상에 따른 laminar 위상 확률 분포. 변조 진폭은 각각 0.68 V(a), 1.00 V (b). 점선은 이론적인 것으로 기울기는 $-3/2$ 이다.

결론적으로 작은 주기적 변조가 가해진 다이오드 레이저 펌핑 Nd:YAG 레이저의 제2차 고조파가 발진 문턱에서 on-off 간헐성을 보여주고 있음을 실험적으로 확인하였다. 제2차 고조파의 출력 신호에 대한 간헐적인 행동은 펌핑 출력 즉, 변조 진폭에 의존한다. 간헐적인 레이저 출력이 on-off 간헐성을 확인하기 위해 지수법칙으로 분석한 결과 on-off 간헐성의 이론적인 기대치와 잘 일치하는 것을 보았다. 이러한 사실은 레이저 동작에서 관찰된 on-off 간헐성이 위상 천이의 한 종류임을 시사하고 있다.

참고문헌

- (1) D. Danoisse, P. Glorieux, and D. Hennequin, Phys. Rev. **A36**, 4775 (1987).
- (2) F. X. Kaertner, D.M. Zumbuehl, and N. Matuschda, Phys. Rev. Lett. **82**, 4428 (1999).
- (3) T. Baer, J. Opt. Soc. Am. **B3**, 1175 (1986); G.E. James, E.M. Harrell II, and R. Roy. Phys. Rev. **A41**, 2778 (1990); C. Bracikowski and R. Roy. Chaos **1**, 49 (1991).
- (4) N. Platt, E.A. Spiegel, and C. Tresser, Phys. Rev. Lett **70**, 279 (1993).
- (5) J.F. Heagy, N. Platt, and S.M. Hammel, Phys. Rev. **E49**, 1140 (1994).
- (6) N. Platt, S.M. Hammel, and J.F. Heagy, Phys. Rev. Lett. **72**, 3498 (1994).
- (7) S.H. Gong and C.M. Kim, submitted to Phys. Rev. Lett.
- (8) S.H. Gong, C.M. Kim, D.I. Kim, and G.U. Kim, in preparation to submit.