

탄소나노튜브 포화흡수체 기반의 네오디뮴이 첨가된 glass 레이저 모드 잠금

Mode-locking of Nd-doped glass lasers based on carbon nanotube saturable absorber

최선영, Antonio Agnesi¹, Valentin Petrov², 이상민*

아주대학교 에너지시스템학부,

¹Dipartimento di Elettronica dell'Universita di Pavia, Italy, ²Max Born Institute Berlin, Germany

*rotermun@ajou.ac.kr

1 μm 에서 동작하는 레이저 다이오드로 펌핑된 펨토초 레이저는 비용 효율이 좋아 다양한 분야에서 응용되고 있다. 광간섭 단층촬영(OCT, optical coherence tomography)이나 비선형 마이크로스코피, 테라파의 발생 및 탐지, 그리고 고출력 극초단 증폭기의 초기 광 등 수십 mW의 출력을 필요로 하는 다양한 분야에서 저비용 솔루션으로 각광받고 있다. 펌프 광으로서의 단일 모드 레이저 다이오드는 값이 저렴하고 비교적 손쉽게 구입이 가능하며, 간단한 구성으로 이득 매질에 펌프 광을 효과적으로 집속할 수 있다는 장점이 있다. 레이저 다이오드를 펌프로 하는 이터븀(ytterbium)과 네오디뮴(neodymium)이 도핑된 이득매질 기반의 펨토초 레이저에 대한 결과가 보고된 바 있으며,⁽¹⁻²⁾ 특히 4-준위를 가지는 네오디뮴 이온이 도핑된 glass는 발진 문턱 값이 매우 낮아 적은 파워로도 효율적인 광펌핑이 가능하다. Nd:glass 레이저에서의 펨토초 펄스 방출에 대한 가장 최근 보고된 결과는 반도체 기반의 포화흡수체 거울(semiconductor saturable absorber mirror, SESAM)을 이용한 것이 있다.⁽³⁾ SESAM은 레이저 모드 잠금과 안정적인 펄스 발생을 위해 사용되는 수동 광소자이지만 고비용의 복잡한 제작 방법으로 인해 레이저를 구성하는 요소 중 가장 고가이다. 본 연구팀에서는 이를 대체할 광소자로 최근까지 활발하게 연구되고 있는 탄소나노튜브 기반의 포화흡수체를 제작하여 Nd:glass 레이저의 모드 잠금 현상을 확인하였다. 탄소나노튜브 기반의 포화흡수체는 회복 시간이 짧은 등 기존의 SESAM보다 우월한 광 특성을 지니면서도 스프레이나 스핀 코팅 등의 비교적 저렴하고 쉬운 방법으로 제작이 가능하며, 반사 형태로만 제작되고 있는 SESAM과 달리 반사형 및 투과형으로 제작이 가능해 레이저 구성을 더욱 용이하게 하는 등 SESAM을 대체할 수 있는 차세대 포화흡수체로 각광받고 있다. 또한, SESAM의 동작 파장 영역이 100 nm 미만인데 비해 탄소나노튜브 기반의 포화흡수체는 어떤 종류의 나노튜브를 선택하느냐에 따라 500 nm 이상의 넓은 동작 대역폭을 지녀⁽⁴⁾ 하나의 소자로 다양한 파장에서 발진하는 레이저에 응용이 가능하다는 장점이 있다. 본 연구에서는 탄소나노튜브 기반의 반사형 포화흡수체(single-walled carbon nanotube saturable absorber mirror, SWCNT-SAM)를 제작하고, 이를 이용하여 100 fs 미만의 펄스가 발생되는 낮은 파워의 레이저 다이오드로 펌핑된 효율적인 Nd:glass 레이저를 구성하였다.

SWCNT-SAM은 1 과 1.9 μm 파장 대역에서 넓은 흡수 특성을 보이는 상용화된 Arc 방전법으로 합성된 단일벽 탄소나노튜브를 유기용매에 초음파 분산하여 PMMA와 섞은 후 1 μm 영역에서 99.9 % 이상의 반사율을 가지는 고반사 거울에 스핀 코팅 법으로 코팅하여 제작되었으며, 이를 레이저 공진기 내부에 삽입, 설치하였을 때 총 손실(포화 및 비포화 손실)은 약 1.5 %이다.

그림 1-(a)는 Nd:glass를 이득 매질로 하는 레이저의 구성도이다. Nd:silicate와 Nd:phosphate glass 등의 두 가지 이득 매질을 기반으로 레이저가 제작되었으며, 이를 805 nm 중심 파장을 가지는 최대 출력 200 mW의 단일 모드 레이저 다이오드로 광펌핑 하였다.

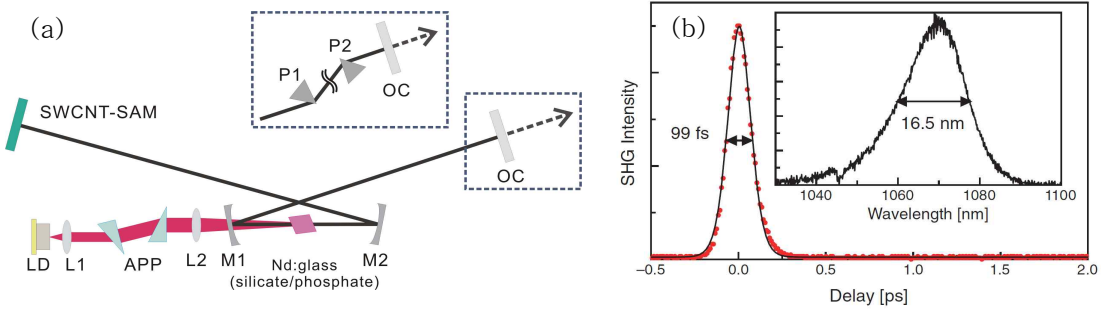


그림 1. (a) SWCNT-SAM이 삽입된 Nd:glass 레이저의 구성도, (b) SWCNT-SAM이 삽입된 Nd:silicate 레이저에서 발견되는 펄스의 길이와 스펙트럼

레이저 다이오드에서 방출되는 타원형의 빔 모양을 보정하고, 이득 매질로부터 발생하는 공진 모드와 효과적인 오버랩을 위해 아나모픽 프리즘 쌍(anamorphic prism pair)을 사용하였다. 이득 매질로 입사되는 펌프 광의 최대 출력 약 160 mW이며, 이득 매질은 펌프 광의 90 % 이상의 흡수를 가지는 4 mm 두께의 Nd 이온이 3 % 도핑된 silicate와 phosphate glass가 사용되었다. SWCNT-SAM을 삽입하기 전 출력 확인을 위해, cw 동작할 때 5 % 투과율을 가지는 출력경을 사용하여 레이저 출력을 측정할 결과, phosphate와 silicate glass의 기울기 효율(slope efficiency)은 각각 58.2 과 46.5 %이고, 이때의 최대 출력은 각각 68 mW 과 48 mW로 측정되었다.

Nd:glass 레이저 공진기 내부에 제작된 SWCNT-SAM을 삽입하여 안정적으로 모드 잠금이 되는 것을 확인하였고, 공진기 내부에서 생기는 군속도 분산(group velocity dispersion)을 보정하기 위하여 한 쪽 팔에 프리즘 쌍을 삽입하였다. 분산 보정된 펄스 레이저가 가장 안정적으로 동작할 때의 평균 출력은 10 mW이며, 이 때 발생된 펄스의 길이를 자체상관계를 이용하여 측정할 결과 99 fs였다. 발생된 펄스의 중심파장은 1070 nm이고, 스펙트럼의 반치폭은 16.5 nm로, sech^2 펄스 모양을 가정하였을 때 time-bandwidth product는 0.43 이다.

참고문헌

1. A. A. Lagatasky, C. T. A. Brown, and W. Sibbet, "Highly efficient and low threshold diode-pumped Kerr-lens mode-locked Yb:KYW laser," *Opt. Express* 12, 3928 (2004).
2. A. Agnesi, F. Pirzio, and G. Reali. "Low-threshold femtosecond Nd:glass laser," *Opt. Express* 17, 9171 (2009).
3. A. Agnesi, A. Greborio, F. Pirzio, and G. Reali, "80-fs Nd:silicate glass laser pumped by a single-mode 200-mW diode," *Opt. Express* 18, 10098 (2010).
4. W. B. Cho, J. H. Yim, S. Y. Choi, S. Lee, A. Schmidt, G. Steinmeyer, U. Griebner, V. Petrov, D.-I. Yeom, K. Kim, and F. Rotermund, "Boosting the nonlinear optical response of carbon nanotube saturable absorbers for broadband mode-locking of bulk lasers," *Adv. Funct. Mater.* 20, 1937 (2010).