단일벽 탄소나노튜브 포화흡수체를 이용한 수동 모드잠금 자동발진 Cr:forsterite 레이저

Passively mode-locked self-starting Cr:forsterite laser based on single-walled carbon nanotube saturable absorbers

조원배, 임종혁, 최선영, 안영환, 이순일, 김기홍, 임한조[1], 이상민*
아주대학교 에너지시스템학부
아주대학교 전자공학부[1]
*rotermun@ajou.ac.kr

기초 과학 분야에서부터 의료 및 산업 분야에 이르기까지 광범위한 영역에서 순간 고출력과 높은 시간 분해율을 가지는 극초단 펄스 레이저의 활용가치는 급격히 증가하고 있다. 제작된 레이저 시스템에서 펄스를 생성할 수 있는 다양한 방법 중에서도 레이저 공진기 내부에 삽입함으로써 손쉽게 수동 모드잠금을 유발하여 펄스를 생성할 수 있는 포화흡수체(saturable absorber)가 유용한 도구 중 하나로 자리 잡게 되면서, 포화 흡수 색소(saturable absorbing dyes) 기반의 포화흡수체부터 SESAM(semiconductor saturable absorber mirror)에 이르기까지 다양한 형태의 포화흡수체가 개발되었다. 그중에서도 기존에 많이 활용되던 반도체 물질을 기반으로 한 SESAM의 경우 제작 공정의 복잡성과 공정 과정에서 발생하는 높은 비용, 그리고 회복 시간(recovery time)을 더 줄여야 하는 등의 문제점들이 있어 이를 보완할 수 있는 새로운 형태의 포화흡수체가 필요하다. 2003년, 처음으로 탄소나노튜브를 이용한 새로운 형태의 포화흡수체가 제작되었고, 이를 활용하여 Er 광섬유 레이저에서 최초로 성공적인 모드잠금 현상이 확인됨에 따라 현재 광섬유 레이저를 중심으로 SWCNT SA(single-walled carbon nanotube saturable absorber)에 대한 연구가 진행되고 있다. 광섬유 레이저 분야에서의 활발한 연구와는 달리 고체 레이저 영역에서는 현재 Er:Yb:glass 레이저에 대한 연구 결과만이 보고되고 있다[(1-2)].

본 연구에서는 HiPco(High Pressure CO Decomposition) 합성법 등을 통해 생성된, 단일벽 탄소나노튜브를 기반으로 한 포화흡수체를 제작하고, 이를 활용하여 1.2-1.3 μm 대역의 고체 레이저인 Cr:forsterite 레이저 시스템에서 최초로 성공적인 모드잠금 현상을 확인하였다.

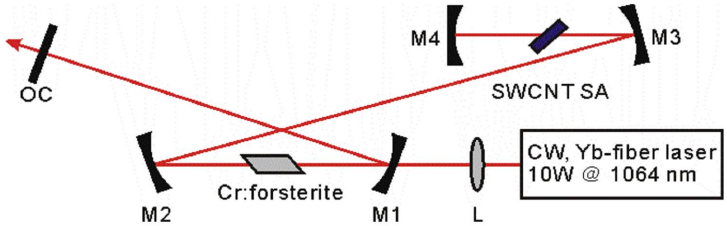

그림 1. SWCNT SA가 삽입된 Cr:forsterite 레이저 개략도

포화흡수체를 제작하기 위하여 상용화된 HiPco SWCNT에 DCB (dichlorobenzene)을 첨가하고, 용액 상태에서 초음파 분해(ultrasonication) 과정을 거쳐 PMMA (Polymethyl methacrylate) 고분자와의 합성 후 Spin 코팅 방법으로 quartz 위에 얇은 박막 형태의 투과형 포화흡수체를 제작하였다. 제작된 포화흡수체는 그림 1과 같이 Cr:forsterite 레이저 공진기 내부에 삽입하였다. 포화흡수체의 동작 특성을 확인하기 위하여 제작된 레이저 시스템은 그림 1과 같다. 이득매질로는 길이 11 mm의 Cr:forsterite가 사용되었으며, 이득매질을 광펌핑하기 위하여 파장대가 1064 nm인 다이오드 펌핑된 Yb:fiber 레이저가 사용되었다. M1-M4는 1125 - 1400 nm 영역에서 전반사 코팅되고 곡률반경이 100 mm인 오목거울이다. 출력경(OC)의 투과율에 따른 레이저 발진특성을 비교 분석하기 위하여 1125-1400 nm 영역에서 각각 1%, 3.3%, 5% OC를 사용하였다. 공진기는 비점수차가 보정된 비대칭 X 형태로 제작하였다.

본 연구에서는 최적화 작업을 통해 HiPco SWCNT의 농도가 다른 두개의 포화흡수체를 제작하였으며, 공진기 내부 손실을 최소화하기 위해 브루스터 각으로 삽입하였다. 제작된 두가지 형태의 포화흡수체를 공진기 내부에 삽입하였을 때, 두 경우 모두 안정적인 Cr:forsterite 레이저 모드잠금 현상을 확인하였으며, 그림 2는 모드잠금 되었을 때 디지털 GHz 오실로스코프로 측정한 펄스열의 예를 보여준다. 5% 출력경을 사용하였을 때 안정적으로 자동발진 되는 모드잠금 레이저의 최대 출력은 190 mW 이였으며, 지속적인 최적화 작업은 현재 진행 중에 있다.

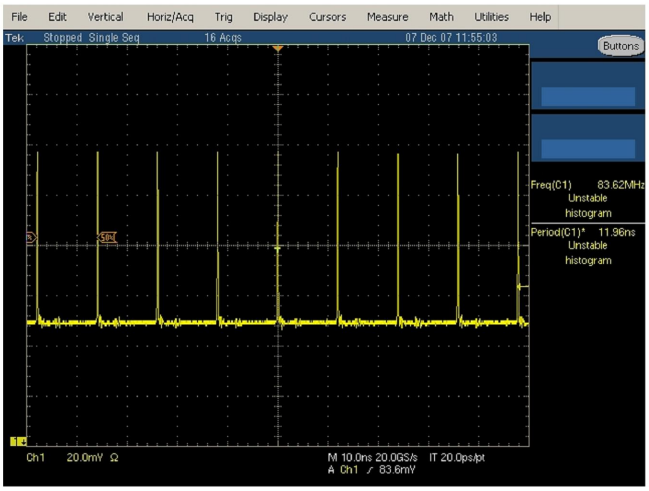

그림 2. 수동 모드잠금 되었을 때 디지털 GHz 오실로스코프로 측정한 펄스열 @ 83.6 MHz

참고문헌

1. T. R. Schibli, K. Minoshima, H. Kataura, E. Itoga, N. Minami, S. Kazaoui, K. Miyashita, M. Tokumoto, and Y. Sakakibara, "Ultrashort pulse-generation by saturable absorber mirrors based on polymer-embedded carbon nanotubes", Opt. Exp. **13**, 8025-8031 (2005).
2. K. H. Fong, K. Kikuchi, C. S. Goh, S. Y. Set, R. Grange, M. Haiml, A. Schlatter, U. Keller, "Solid-state Er:Yb:glass laser mode-locked by using single-wall carbon nanotube thin film", Opt. Lett. **32**, 38-40 (2007).