

## Simulation of Manipulating Various Pulsed Laser Operations Through Tuning the Modulation Depth of a Saturable Absorber

Jinhwa Gene<sup>1†</sup>, Dong-Il Yeom<sup>2</sup>, and Byoung Yoon Kim<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Division of Physical Metrology, Center for Optical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science, 267, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea*

<sup>2</sup>*Department of Physics and Department of Energy Systems Research, Ajou University, 206, World cup-ro, Yeongtong-gu, Suwon 16499, Korea*

<sup>3</sup>*Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 291, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Korea*

(Received July 21, 2017; Revised October 10, 2017; Accepted October 10, 2017)

In this paper, we conduct a simulation of manipulating various pulsed laser operations through tuning the modulation depth of the saturable absorber in a laser cavity. The research, showing that various pulsed operations could be manipulated from  $Q$ -switching through  $Q$ -switched mode locking to mode locking by tuning the modulation depth of the saturable absorber in a cavity, has been studied by experimental means. We conduct a simulation with the Haus master equation to verify that these experimental results are consistent with expectations from theory. The time dependence of the gain was considered to express  $Q$ -switching fluctuation through applying a rate equation with the Haus master equation. Laser operation was manipulated from mode locking through  $Q$ -switched mode locking to  $Q$ -switching as modulation depth was increased, and this result agreed well with the theoretical expectation.

Keywords: Mode-locked lasers,  $Q$ -switched mode-locked lasers,  $Q$ -switched lasers, Saturable absorbers, Modulation depth  
OCIS codes: (140.3538) Lasers, pulsed; (140.3540) Lasers,  $Q$ -switched; (140.4050) Mode-locked lasers; (140.3430) Laser theory

## 포화 흡수체의 투과변조깊이 조절을 통한 다양한 펄스상태 조작 방법에 관한 전산 모사

진진화<sup>1†</sup> · 염동일<sup>2</sup> · 김병윤<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국표준과학연구원 광학표준센터 물리표준본부  
Ⓣ 34113 대전시 유성구 가정로 267

<sup>2</sup>아주대학교 물리학과, 에너지시스템학과  
Ⓣ 16499 경기도 수원시 영통구 월드컵로 206

<sup>3</sup>한국과학기술원 물리학과  
Ⓣ 34141 대전광역시 유성구 대학로 291

(2017년 7월 21일 받음, 2017년 10월 10일 수정본 받음, 2017년 10월 10일 게재 확정)

본 논문에서는 포화흡수체의 투과변조깊이 조절을 통해 다양한 펄스 상태를 한 공진기 안에서 구현하는 방법에 관한 전산 모사를 진행하였다. 포화흡수체의 투과변조깊이의 크기 변화만으로 큐스위치드 레이저, 큐스위치드 모드 잠금 레이저, 모드 잠금 레이저 등 원하는 펄스 레이저 상태로 전환이 가능하다는 실험적 연구가 있어 왔으며, 이러한 연구가 이론적으로 부합하는 내용임을 확인하기 위해 Haus master 식을 사용하여 전산 모사를 진행하였다. 큐스위칭된 광 파워를 모사하기 위해 이득 값은 시간 의존성을 가지도록 반응속도식을 적용하였다. 그 결과 투과변조깊이가 증가함에 따라 모드 잠금 레이저에서부터, 큐스위치드 레이저, 큐스위치드 레이저로 동작함을 확인하였고, 이는 이론적으로 예측된 경향성과 일치하였다.

Keywords: 모드 잠금 레이저, 큐스위치드 모드 잠금 레이저, 큐스위치드 레이저, 포화흡수체, 투과변조 깊이  
OCIS codes: (140.3538) Lasers, pulsed; (140.3540) Lasers,  $Q$ -switched; (140.4050) Mode-locked lasers; (140.3430) Laser theory

<sup>†</sup>E-mail: [genejh@gmail.com](mailto:genejh@gmail.com), ORCID: 0000-0003-4867-543X

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

## I. 서 론

펄스 레이저는 가공, 의료, 광통신, 거리와 속도 측정 등 다양한 분야에서 사용되고 있다<sup>1-5</sup>. 펄스레이저의 종류에 따라 사용되는 분야가 다른데, 펄스 레이저의 종류로는 모드 잠금 레이저, 큐스위치드 모드 잠금 레이저, 큐스위치드 레이저 등이 있다. 모드 잠금레이저의 경우 반복률이 높고, 펄스 길이가 짧아, 광통신, Frequency comb, 비선형 바이오이미징 등의 광원으로 사용이 되고 있다. 큐스위치드 모드 잠금 레이저는 모드 잠금레이저와 같이 짧은 펄스 길이를 가지고, 높은 peak power를 가진다. 높은 peak power를 필요로 하는 분야로는 비선형 주파수 전환, 조직을 절단하기 위한 의료용 그리고 미세구조 공작 등이 있다. 큐스위치드 레이저의 경우, 펄스 에너지가 크고 반복률이 낮다는 특징을 가지고 있어서, 금속가공, 원거리 거리 측정을 위한 광원으로 사용이 되고 있다. 이러한 레이저들을 수동 소자를 이용하여 제작하고자 한다면, 각각의 레이저 상태에 적합하게 필요로 하는 레이저 출력에서 적절한 변수를 가지는 포화흡수체를 제작하여 한 가지의 펄스 상태를 구현할 수 있다. 이러한 레이저 동작의 제약을 제거하고 활용성을 높이기 위해 포화흡수체의 특성이 변형 가능하도록 하여, 하나의 레이저 공진기에서 다양한 펄스 상태를 구현하기 위한 연구가 진행되어 왔다. 펄스 상태를 결정하는 중요한 변수 중 하나인 투과변조깊이의 크기를 조절하여 펄스 상태를 조작할 수 있다<sup>6-12</sup>. 그 방법 중 하나로 편광 의존성을 가지는 포화흡수체를 제작하고 레이저 공진기에 삽입한 뒤, 공진기의 복굴절을 조절하여 포화흡수체로 입사하는 편광을 조절함으로써 투과변조깊이를 조작하는 방법이 있다<sup>7</sup>. 또 다른 방법으로는 그래핀의 흡수 변조 특성을 이용하여, 직접적으로 포화흡수체의 투과변조깊이를 조절해줌으로써 펄스 상태를 조작해왔다<sup>6-12</sup>. 이러한 연구들이 이론적으로 잘 부합하는 내용인지 확인하고, 레이저의 동작 특성을 이해하기 위해서는 전산 모사를 이용한 연구가 중요하다.

본 연구에서는 포화흡수체의 투과변조깊이의 크기에 따라 펄스 상태가 변화 가능한지 확인하고, 이론적으로 일치하는 경향성을 가지는지 확인해보았다. 다양한 펄스 상태를 모사할 수 있는 Haus master 식을 이용하였고, 여기에 이득 값이 시간 의존성을 가지도록 반응속도식을 적용하여 모사하였다. 전산 모사에 사용된 레이저의 변수들은 실험의 변수 값들과 동일하거나 가까운 값을 가지도록 하였다. 그 결과 포화흡수체의 투과변조깊이가 커질수록 차례로 모드 잠금 레이저, 큐스위치드 모드 잠금 레이저, 큐스위치드 레이저로 동작하는 것을 전산 모사를 통해 확인하였다. 이는 이론에서 예측한 경향성과 일치하며, 실험적으로 얻어진 결과와도 부합한다<sup>13-16</sup>.

## II. 투과변조 깊이에 따른 다양한 펄스 레이저동작

수동형 펄스 레이저는 모드 잠금 조건을 만족시킬 경우, 모드 잠금레이저로 동작하고, 큐스위칭 조건을 만족할 경우,

큐스위치드 레이저로 동작하며, 두 조건을 동시에 충족할 때 큐스위치드 모드 잠금 레이저로 동작한다. 각 펄스 레이저 상태의 변수 조건을 알기 위해선, 모드 잠금 조건과 큐스위칭 조건을 알아야한다.

먼저 모드 잠금 레이저의 변수 조건을 알기 위해선 Haus master 식을 이용하여 얻을 수 있다. Haus master 식은 공진기를 n번 왕복한 빛의 전기장과 n+1번 왕복한 전기장 사이의 관계를 나타내는 식으로 아래와 같다<sup>13</sup>.

$$E_{n+1}(t) = E_n(t - T_R) - \frac{\omega_0 T_R}{2Q} \left[ 1 + \frac{Q}{Q_A(t)} - g \left( 1 + \frac{1}{\omega_L^2} \frac{d^2}{dt^2} \right) + \frac{g}{\omega_L} \frac{d}{dt} \right] E_n(t - T_R) \quad (1)$$

$E_n, E_{n+1}$ 은 각각 공진기 내부를 n번, n+1 왕복한 빛의 전기장을 나타내고,  $\omega_0$ 는 이득 물질의 최대 이득 값을 가지는 빛의 angular frequency,  $T_R$ 은 빛이 공진기를 한번 왕복하는데 걸리는 시간, Q는 공진기의 Q-factor값을 나타낸다. 다음 값들의 조합인  $\omega_0 T_R / 2Q$ 는 빛이 공진기를 한번 왕복할 때의 손실을 나타낸다.  $Q_A$ 는 포화흡수체의 흡수율을 공진기의 손실에 대한 비율로 나타낸값으로  $Q/Q_A$ 는 빛이 공진기 안을 한번 왕복하는 동안 포화흡수체의 흡수를 의미한다. 대괄호 안의 나머지 항은 빛이 공진기 안을 한번 왕복하는 동안 이득 값을 의미하는데 시간미분항들은 이득물질의 주파수 의존성을 표현하고있다. 여기에 주파수 의존성은 Lorentzian 형태를 따른다고 가정하여 식으로 표현하였다<sup>13</sup>. 안정적인 모드 잠금 조건을 얻기 위해  $E_n$ 과  $E_{n+1}$ 이 동일하다는 경계조건을 위 식에 적용하여, 모드 잠금 조건을 만족하는 변수 범위를 얻을 수 있다. 여기서 얻어지는 조건 중 포화흡수체의 투과변조깊이의 값은 일정한 범위 내에서 모드 잠금 조건을 만족시킬 수 있다는 사실을 알 수 있다. 다시 말하면, 모드 잠금 조건을 만족 시키기 위해선 투과변조깊이의 값이 너무 크지 않고 너무 작지도 않은 일정 범위가 존재한다<sup>14</sup>.

큐스위칭의 변수 조건을 알기 위해선 공진기 내부를 왕복하는 광 에너지의 반응속도식을 이용하여 얻을 수 있다. 큐스위칭은 빛의 세기와 이득 값이 포화흡수체의 흡수율과 함께 요동치며 나타나는 현상으로, 이득 값 또한 시간의존성을 고려하기 위해 반응속도식을 적용했다. 앞서 말한 두 반응속도식은 아래와 같다.

$$T_R \frac{dE_{cavity}}{dt} = [g - l - q_{cw}(E_{cavity}, T_R)] E_{cavity} \quad (2)$$

$$\frac{dg}{dt} = -\frac{g - g_0}{\tau_L} - \frac{E_{cavity}}{E_{sat,L,CW} T_R} g \quad (3)$$

식 (2)는 공진기 내부 광 에너지의 반응속도식이다.  $E_{cavity}$ 는 공진기 내부의 지속 광 에너지,  $T_R$ 은 빛이 공진기 내부를 한번 왕복하는 시간,  $g, l, q_{CW}$ 은 각각 빛이 한번 왕복하는 동안 얻은 이득과 손실 그리고 포화흡수체의 흡수율을 의미한다. 식 (3)은 이득의 시간의존성을 표현하는 반응속도식이다.  $g_0, \tau_L, E_{sat,L}, CW$ 는 각각 최대 이득, 이득의 회복시간, 이득 포화 광 에너지를 의미한다.

식 (2)와 (3)에 섭동 이론을 이용하여, 광 에너지의 요동이 증가할 조건을 찾음으로써 큐스위칭의 변수 조건을 유도할 수 있다. 큐스위칭을 위한 변수 조건은 아래와 같다<sup>[15]</sup>.

$$E_{cavity} \left| \frac{dq_{CW}}{dE_{cavity}} \right| > \frac{T_R}{\tau_L} + \frac{E_{cavity}}{E_{sat,L,CW}} \quad (4)$$

식의 왼쪽 미분항은 포화흡수체의 투과변조깊이와 직접적인 관련이 있는 값이다. 투과변조깊이가 임계값보다 클 때 큐스위칭 조건을 만족한다는 의미를 담고 있다.

큐스위치드 모드 잠금의 경우엔, 모드 잠금 펄스들이 큐스위칭 요동을 만들 조건을 위와 동일한 방법으로 유도할 수 있다. 하지만 지속광이 아닌, 모드 잠금 펄스열의 요동이기 때문에 반응속도식에서 이득 포화 광 에너지 값과 포화흡수체의 흡수율이 모드 잠금 펄스열에 해당하는 변수 값으로 달리 고려 되어야 한다. 모드 잠금 펄스열의 큐스위칭을 위한 변수 조건은 아래와 같다.

$$E_p \left| \frac{dq_p}{dE_p} \right|_{E_p} > \frac{T_R}{\tau_L} + \frac{E_p}{E_{sat,L}} \quad (5)$$

모드 잠금 펄스열의 큐스위칭 조건 또한 식 (4)와 동일한 의미를 가진다. 투과변조깊이가 임계값보다 클때 큐스위칭 조건을 만족한다. 다만, 이득 포화 광 에너지와 포화흡수체의 흡수율이 지속광과 다르기때문에, 두 임계값은 차이가 존재할 수 있다.

투과변조깊이의 크기에 따른 레이저 동작 상태를 그림으로 나타내면 그림 1과 같다. 투과변조깊이가 0에 가까우면 레이저는 지속광 레이저로 동작한다. 투과변조깊이가 모드 잠금 조건을 만족할 수 있도록 증가하면, 레이저는 모드 잠금 레이저로 동작한다. 투과변조깊이가 큐스위칭을 위한 임계값보다 커지면 모드 잠금 펄스열이 큐스위칭 요동을 만들며, 큐

스위치드 모드 잠금 레이저로 동작한다. 투과변조깊이가 더 커지면, 더이상 모드 잠금 조건을 만족할 수 없게 되고, 큐스위칭 조건만 만족하게 되므로, 큐스위치드 레이저로 동작한다. 덧붙여, 투과변조깊이의 조절만으로 모드 잠금을 포함한 다양한 펄스 레이저 상태를 구현하는 것은 모드 잠금 조건을 만족하도록 이득 값, 포화 광 세기, 공진기 손실이 적절히 조절됐다는 전제가 필요하다.

### III. 전산 모사와 결과

전산 모사에 사용된 Haus master 식은 모드 잠금 조건을 유도할 때 사용된 식이 지수를 1차 테일러 전개하여 사용한 것과 달리 지수 항을 그대로 계산하였다. 전산 모사에 사용된 Haus master 식과 반응속도식은 아래와 같다<sup>[13,15]</sup>.

$$E_{n+1}(t) = \exp(-Loss) \exp[G(\omega, t, E_n)] \exp[-L(t, E_n)] E_n(t) \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} L(t, E) = -\frac{L(t) - L_0}{T_A} - L(t) \frac{(E(t))^2}{E_A} \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} g(\omega_0, t, E) = -\frac{g(\omega_0, t) - g_0}{T_L} - g(\omega_0, t) \frac{(E(t))^2}{E_L} \quad (8)$$

$$G(\omega, t) = g(\omega_0, t, E) \left( 1 + i \frac{\omega - \omega_0}{\omega_L} \right)^{-1} \quad (9)$$

식 (6)은 지수를 전개하지 않은 Haus master 식이다. 오른쪽의 첫 지수항은 빛이 공진기를 한번 왕복하는 동안 얻은 공진기 손실, 두번째 지수항은 이득, 세번째 지수항은 포화흡수체의 흡수율을 의미한다. 식 (7)과 (8)은 시간 의존성을 가지는 포화흡수체의 흡수율과 이득을 나타내는 반응속도식이다. 식 (9)는 파장의존성을 가지는 이득을 표현하는 식이다. 이득은 균질(homogeneous)한 특징을 가지고, 이득 스펙트럼은 로렌츠 형태를 가진다고 가정하였다. 이득을 포함하는 지수항에는 스펙트럼축에서의 계산과 시간축에서의 계산을 포함하고 있어서, 7차항까지 테일러 전개하여 전산 모사를 진행하였다.

전산 모사에 사용된 레이저 변수들은 표 1과 같다.

표 1에 나타난 변수들은 Haus master 식에서 사용된 변수들로 모두 레이저 상태를 결정하는데 중요한 역할을 하는 변수들이며 그 외 레이저의 빔 크기, 펄스 파워 등과 같은 실험적 변수들의 함수이기도 하다. 광섬유 레이저 혹은 크리스탈 레이저 등 실험에서 얻어진 실험적 변수들을 레이저 동작을 표현하기에 적합한 표의 변수들로 변환하여 사용함으로써 실제 레이저의 형태에 상관없이 레이저의 동작을 연구할 수 있다. 위 변수들 중 한가지라도 적절한 범위에 있지 않을 경우 모드 잠금을 포함한 다양한 펄스 상태를 만족시키지 못할 수 있다. 본 연구에서 사용된 표 1의 변수들은 실험

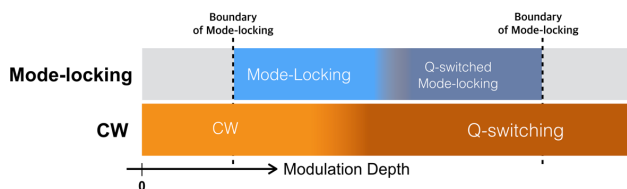
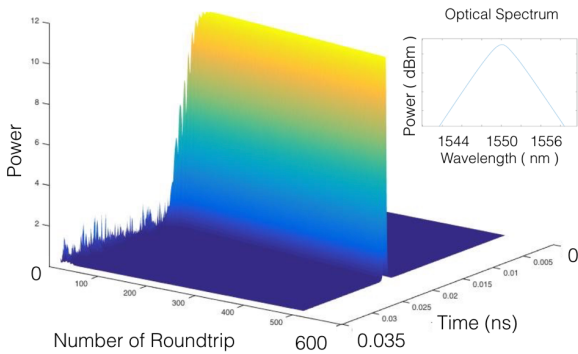


Fig. 1. Various pulsed laser operation with respect to modulation depth of saturable absorber.

**Table 1.** Parameters of the laser in simulation of Haus master equation

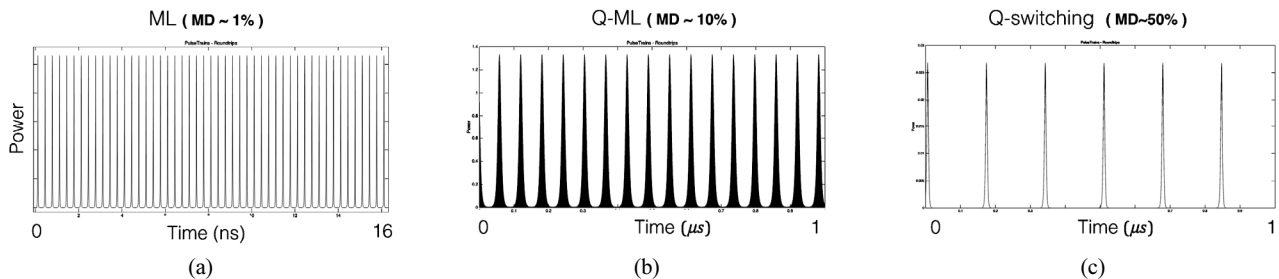
Parameters	Value
Center wavelength	1550 nm
Cavity length	15 cm
Number of roundtrip	100,000~1,000,000
Small signal gain	15 dB
Gain spectral bandwidth	25 nm
Cavity loss	5.6 dB
Saturation energy of gain ( $E_L$ )	50 pJ
Saturation energy of saturable absorber ( $E_A$ )	8.8 pJ
Recovery time of gain ( $T_L$ )	0.1 ms
Relaxation time of saturable absorber ( $T_A$ )	5 ps



**Fig. 2.** Time evolution of optical power in a cavity. Shape of initial optical power was set to be like that of noisy ASE. Inset shows optical spectrum of light after 600 roundtrips.

적으로 얻어진 변수들과 최대한 비슷한 값을 가지도록 선택되었고, 전산 모사를 통해 모드 잠금 조건을 만족하는 범위임을 확인하고 연구를 진행하였다.

그림 2는 공진기 내부의 광 출력 공진기를 왕복함에 따라 모드 잠금 펄스로 변화하는 과정을 나타낸 것이다. 최초 광 출력은 증폭된 자발 방출광과 같이 노이즈를 담은 형태에서 시작한다. 공진기를 왕복하며 포화흡수체에 의해 펄스 형태로 변화하며 이득과 손실에 의해 안정된 출력을 가지는 것을 확인하였다. 포화흡수체의 투과변조깊이는 1%이다.



**Fig. 3.** Optical power profile in time domain operating in (a) mode-locking with modulation depth of 1%, (b) Q-switched mode-locking with modulation depth of 10%, (c) Q-switching with modulation depth of 50%.

그림 3(a)는 투과변조깊이가 1%일 때 16 ns 동안 레이저의 광 출력을 나타낸 그래프이다. 안정적인 모드 잠금 펄스열이 관측되었다. 투과 변조깊이를 증가시키기에 따라 모드잠금 펄스열에 큐스위치드 요동이 나타나기 시작하면서 그 진동 폭이 점점 커진다. 그림 3(b)는 투과변조깊이가 10%일 때 레이저의 광 출력을 나타낸 그래프이며, 큐스위치드 모드 잠금 레이저로 동작하는 것을 확인하였다. 투과변조깊이를 10%부터 5%간격으로 증가 시켰을 때 45%의 투과변조깊이에서부터 모드 잠금 조건을 더 이상 만족 시키지 못하고 큐스위치드 레이저로만 동작을 하였다. 그림 3(c)는 투과변조깊이가 50%일 때 레이저의 광 출력을 나타낸 그래프이다. 이 결과는 그림 1과 같이 이론적으로 예측한 경향성과 일치하는 것을 확인하였다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 포화흡수체의 투과변조깊이를 조절함에 따라 모드 잠금 레이저에서부터 큐스위치드 모드 잠금, 큐스위치드 레이저까지 레이저 동작을 조작 할 수 있음을 Haus master 식과 반응속도식을 이용하여 전산 모사를 통해 확인하였다. 이론적으로 예측했던 경향성과 전산 모사를 통해 얻은 결과가 잘 일치함을 확인하였고, 이는 이전 연구의 실험적으로 얻어진 다양한 펄스 레이저 동작을 이해하는데, 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

#### References

- U. Keller, "Recent developments in compact ultrafast lasers," *Nat.* **424**(6950), 831-838 (2003).
- R. M. Sova, M. E. Thomas, D. Tobin, D. Byrum, and L. L. Strow, "Characterization of candidate DIAL lidar water-vapor and carbon dioxide absorption lines in the 2-um region," *Proc. SPIE* **2366**, 383-393 (1995).
- Y. You, L. Yan, W. Huang, C. Tang, E. Physics, J. Urakawa, H. Shimizu, K. E. K. High, and E. Accelerator, "Gaussian spectrum fiber laser pulses generated in an all-normal-dispersion cavity," *IPAC* **2013**, 2983-2985 (2013).
- S. Y. Choi, H. Jeong, B. H. Hong, F. Rotermund, and D.-I. Yeom, "All-fiber dissipative soliton laser with 10.2 nJ pulse

- energy using an evanescent field interaction with graphene saturable absorber,” *Laser Phys. Lett.* **11**(1), 15101 (2014).
5. H. Zhang, D. Tang, R. J. Knize, L. Zhao, Q. Bao, and K. P. Loh, “Graphene mode locked, wavelength-tunable, dissipative soliton fiber laser,” *Appl. Phys. Lett.* **96**(11), 111112 (2010).
  6. E. J. Lee, S. Y. Choi, H. Jeong, N. H. Park, W. Yim, M. H. Kim, J.-K. Park, S. Son, S. Bae, S. J. Kim, K. Lee, Y. H. Ahn, K. J. Ahn, B. H. Hong, J.-Y. Park, F. Rotermund, and D.-I. Yeom, “Active control of all-fibre graphene devices with electrical gating,” *Nat. Commun.* **6**, 6851 (2015).
  7. J. H. Lee, J. Koo, P. Debnath, and Y. W. Song, “A Q-switched, mode-locked fiber laser using a graphene oxide-based polarization sensitive saturable absorber,” *Laser Phys. Lett.* **10**(3), 35103 (2013).
  8. F. Wang, Y. Zhang, C. Tian, C. Girit, A. Zettl, M. Crommie, and Y. R. Shen, “Gate-variable optical transitions in graphene,” *Sci.* **320**(5873), 206-209 (2008).
  9. M. Mittendorff, F. Wendler, E. Malic, A. Knorr, M. Orlita, M. Potemski, C. Berger, W. A. de Heer, H. Schneider, M. Helm, and S. Winnerl, “Carrier dynamics in Landau-quantized graphene featuring strong Auger scattering,” *Nat. Phys.* **11**(1), 75-81 (2014).
  10. F. Kadi, T. Winzer, A. Knorr, and E. Malic, “Impact of doping on the carrier dynamics in graphene,” *Sci. Rep.* **5**, 16841 (2015).
  11. F. Wendler, A. Knorr, and E. Malic, “Ultrafast carrier dynamics in Landau-quantized graphene,” *Nanophotonics* **4**(1), 224-249 (2015).
  12. J. Gene, N. H. Park, H. Jeong, S. Y. Choi, F. Rotermund, D.-I. Yeom, and B. Y. Kim, “Optically controlled in-line graphene saturable absorber for the manipulation of pulsed fiber laser operation,” *Opt. Express* **24**(19), 21301 (2016).
  13. H. A. Haus, “Mode-locking of lasers,” *Sel. Topics Quantum Electron.* **6**(6), 1173-1185 (2000).
  14. H. A. Haus, “Parameter ranges for CW passive mode locking,” *IEEE J. Quantum Electron.* **12**(3), 169-176 (1976).
  15. C. Hönninger, R. Paschotta, F. Morier-Genoud, M. Moser, and U. Keller, “Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking,” *J. Opt. Soc. Am. B* **16**(1), 46-56 (1999).
  16. A. E. Siegman, *Lasers university science books* (Mill Valley, 1986).