(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0101949
(43) 공개일자 2024년07월02일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01S 3/10 (2023.01) *H01S 3/106* (2023.01)
H01S 3/1123 (2023.01) *H01S 3/117* (2023.01)
H01S 3/13 (2023.01) *H01S 3/136* (2023.01)
H01S 3/223 (2006.01) *H01S 3/23* (2006.01)
(52) CPC특허분류
H01S 3/10046 (2013.01)
H01S 3/10069 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2024-7019485
(22) 출원일자(국제) 2022년10월27일
심사청구일자 없음
(85) 번역문제출일자 2024년06월11일
(86) 국제출원번호 PCT/US2022/078772
(87) 국제공개번호 WO 2023/091849
국제공개일자 2023년05월25일
(30) 우선권주장
63/281,044 2021년11월18일 미국(US)

(71) 출원인
코히어런트, 인크.
미국 95054 캘리포니아주 산타 클라라 패트릭 헨리 드라이브 5100
(72) 발명자
세겐 버논 에이.
미국 캘리포니아 95054 산타클라라 패트릭 헨리 드라이브 5100 코히어런트, 인크. 특허부 내
슈멜처 데이비드 피.
미국 코네티컷 06117 웨스트 하트퍼드 파이오니어 드라이브 74
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
특허법인와이에스장

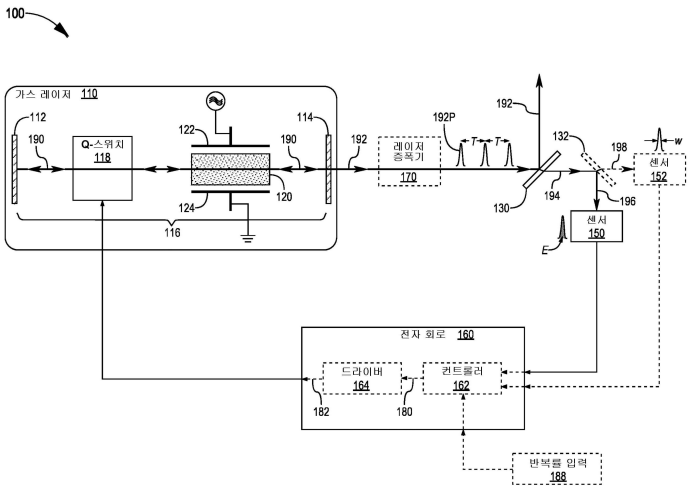
전체 청구항 수 : 총 19 항

(54) 발명의 명칭 **Q-스위치 가스 레이저의 펄스 등화**

(57) 요 약

이변량 펄스 등화 기능을 갖춘 Q-스위치 가스 레이저 장치는 가스 레이저, 센서 및 전자 회로를 포함한다. 레이저 공진기를 고손실 상태와 저손실 상태 사이에서 스위칭하여 펄스 레이저 빔을 생성하는 Q-스위치이다. 센서는 레이저 펄스 에너지를 나타내는 펄스 레이저 빔의 측정값을 얻는다. 전자 회로는 Q-스위치를 작동시켜 (a) 레이저 공진기를 고손실 상태와 저손실 상태 사이에서 반복적으로 스위칭시켜 펄스 레이저 빔의 레이저 펄스의 반복률을 설정하고, (b) 타겟 레이저 펄스 에너지를 달성하기 위해 펄스 에너지 측정값을 기반으로 저손실 상태의 손실 수준을 조정하고, 그리고 (c) 타겟 레이저 펄스 지속 시간을 달성하기 위해 저손실 상태의 지속 시간을 조정하도록 한다. 펄스 에너지와 지속 시간을 모두 조정함으로써, 원하는 경우, 광범위한 반복률에 걸쳐 균일한 펄스 에너지 및 균일한 펄스 지속 시간이 달성된다.

대 표 도



(52) CPC특허분류
H01S 3/1068 (2013.01)
H01S 3/1123 (2024.01)
H01S 3/117 (2023.01)
H01S 3/1305 (2013.01)
H01S 3/1306 (2013.01)
H01S 3/136 (2023.01)
H01S 3/2232 (2013.01)
H01S 3/2308 (2013.01)
H01S 2301/08 (2013.01)
(72) 발명자
폰타넬라 조엘
미국 코네티컷 06084 톨랜드 안토니 로드 14
로젠탈 피터
미국 코네티컷 06092 웨스트 심스베리 팜스테드 레인 10

명 세 서

청구범위

청구항 1

펄스 등화(equalization) 기능을 갖춘 Q-스위치 가스 레이저 장치로서,

레이저 공진기를 고손실 상태와 저손실 상태 사이에서 스위칭하여 펄스 레이저 빔을 생성하도록 동작가능한 Q-스위치를 갖는 상기 레이저 공진기를 포함하는 가스 레이저;

레이저 펄스 에너지를 나타내는 상기 펄스 레이저 빔의 제1 측정값을 획득하기 위한 제1 센서; 및

상기 Q-스위치와 상기 제1 센서 사이에 통신 가능하게 결합되고, (a) 상기 레이저 공진기를 상기 고손실 상태와 상기 저손실 상태 사이에서 반복적으로 스위칭하여 상기 펄스 레이저 빔의 레이저 펄스의 반복률을 설정하고, (b) 타겟 레이저 펄스 에너지를 달성하기 위해 상기 제1 측정값에 기초하여 상기 저손실 상태의 손실 수준을 조정하고, (c) 타겟 레이저 펄스 지속 시간을 달성하도록 상기 저손실 상태의 지속 시간을 조정하기 위해, 상기 Q-스위치를 작동시키도록 구성되는 전자 회로;

를 포함하는 것을 특징으로 하는 Q-스위치 가스 레이저 장치.

청구항 2

제1항에 있어서, 레이저 펄스 지속 시간을 나타내는 상기 펄스 레이저 빔의 제2 측정값을 획득하기 위한 제2 센서를 더 포함하고, 상기 전자 회로는 상기 제2 측정값에 기초하여 상기 타겟 레이저 펄스 지속 시간을 달성하기 위해 상기 저손실 상태의 상기 지속 시간을 조정하도록 구성되는 것을 특징으로 하는 Q-스위치 가스 레이저 장치.

청구항 3

제2항에 있어서, 상기 제1 및 제2 센서는 상기 레이저 공진기 외부에서 상기 펄스 레이저 빔을 샘플링하도록 배열되는 것을 특징으로 하는 Q-스위치 가스 레이저 장치.

청구항 4

제2항에 있어서, 상기 전자 회로는 상기 제1 센서와 상기 Q-스위치 사이의 펄스 에너지 피드백 루프와, 상기 제2 센서와 상기 Q-스위치 사이의 펄스 지속 시간 피드백 루프를 완성하는 것을 특징으로 하는 Q-스위치 가스 레이저 장치.

청구항 5

제4항에 있어서, 상기 펄스 지속 시간 피드백 루프는 상기 펄스 에너지 피드백 루프보다 빠른 장치인 것을 특징으로 하는 Q-스위치 가스 레이저 장치.

청구항 6

제4항에 있어서, 상기 제1 센서는 복수의 상기 레이저 펄스에 대한 평균으로서 상기 제1 측정값을 획득하도록 구성된 감광성 검출기이고, 상기 제2 센서는 개별 레이저 펄스의 파형으로서 상기 제2 측정값을 획득하도록 구성된 광학 검출기인 것을 특징으로 하는 Q-스위치 가스 레이저 장치.

청구항 7

제1항에 있어서, 상기 Q-스위치는 상기 레이저 공진기에 배치된 음향 광학 변조기를 포함하는 것을 특징으로 하는 Q-스위치 가스 레이저 장치.

청구항 8

제7항에 있어서, 상기 전자 회로는:

진폭이 0이 아닌 경우 상기 음향 광학 변조기가 회절에 의해 상기 공진기에 손실을 도입하게 하는 무선 주파수 신호를 생성하여 상기 음향 광학 변조기에 공급하기 위한 RF 드라이버; 및

각각의 리딩 에지(leading edge), 트레일링 에지(trailing edge) 및 신호 값을 갖는 일련의 명령 펄스를 포함하는 명령 신호를 생성하여 상기 RF 드라이버에 전송하기 위한 컨트롤러로서, 각각의 리딩 에지는 상기 레이저 공진기를 상기 저손실 상태로 만드는 더 낮은 진폭을 가진 상기 무선 주파수 신호를 상기 RF 드라이버로 하여금 생성하도록 하고, 각각의 트레일링 에지는 상기 레이저 공진기를 상기 고손실 상태로 만드는 더 높은 진폭을 가진 상기 무선 주파수 신호를 상기 RF 드라이버로 하여금 생성하도록 하고, 각 신호 값은 상기 더 낮은 진폭의 값을 설정하는 상기 컨트롤러;

를 포함하고,

상기 컨트롤러는 (a) 타겟 반복률의 역수와 일치하도록 연속적인 리딩 에지 사이의 주기를 설정함으로써 상기 반복률을 설정하고, (b) 상기 타겟 레이저 펄스 에너지를 달성하기 위해 상기 제1 측정값에 기초하여 상기 신호 값을 조정하고, (c) 상기 타겟 레이저 펄스 지속 시간을 달성하기 위해 상기 리딩 에지에서 대응하는 상기 트레일링 에지까지의 지속 시간을 조정하도록, 구성되는 것을 특징으로 하는 Q-스위치 가스 레이저 장치.

청구항 9

제1항에 있어서, 상기 펄스 레이저 빔을 증폭하기 위한 레이저 파워 증폭기를 더 포함하고, 상기 제1 센서는 상기 레이저 파워 증폭기에 의한 증폭 후에 상기 펄스 레이저 빔으로부터 상기 제1 측정값을 획득하도록 배열되는 것을 특징으로 하는 Q-스위치 가스 레이저 장치.

청구항 10

Q-스위치 가스 레이저에 의해 생성된 레이저 펄스를 등화하는 방법으로서:

펄스 레이저 빔을 생성하기 위해 고손실 상태와 저손실 상태 사이에서 상기 Q-스위치 가스 레이저의 레이저 공진기를 반복적으로 스위칭하도록 상기 Q-스위치 가스 레이저의 Q-스위치를 동작하는 단계; 및

레이저 펄스 에너지와 상기 펄스 레이저 빔의 레이저 펄스의 레이저 펄스 지속 시간을 등화하는 단계로서,

상기 레이저 펄스 에너지를 나타내는 제1 측정값을 획득하기 위해 상기 펄스 레이저 빔을 샘플링하는 단계,

상기 제1 측정값을 기초로하여 타겟 레이저 펄스 에너지에 근접하도록 상기 저손실 상태의 손실 수준을 조정하는 단계, 및

타겟 레이저 펄스 지속 시간에 근접하도록 상기 저손실 상태의 지속 시간을 조정하는 단계,

를 반복하는 것을 통해 상기 레이저 펄스 에너지와 상기 펄스 레이저 빔의 상기 레이저 펄스의 상기 레이저 펄스 지속 시간을 등화하는 단계;

를 포함하는 것을 특징으로 하는 레이저 펄스를 등화하는 방법.

청구항 11

제10항에 있어서, 상기 샘플링하는 단계는 상기 레이저 펄스 지속 시간을 나타내는 상기 레이저 빔의 제2 측정값을 획득하는 단계를 더 포함하고, 상기 지속 시간을 조정하는 단계는 상기 제2 측정값에 기초하는 것을 특징으로 하는 레이저 펄스를 등화하는 방법.

청구항 12

제11항에 있어서, 상기 제1 측정값의 각 인스턴스는 복수의 상기 레이저 펄스에 대한 평균으로서 획득되고, 상기 제2 측정값의 각 인스턴스는 개별 레이저 펄스로부터 획득되는 것을 특징으로 하는 레이저 펄스를 등화하는 방법.

청구항 13

제10항에 있어서,

상기 동작하는 단계는 상기 레이저 펄스의 반복률을 제1 값에서 상기 제1 값과 상이한 제2 값으로 변경하는 단

계를 포함하고;

상기 등화하는 단계는 상기 변경하는 단계에 의해 야기되는 상기 레이저 펄스 에너지 및 레이저 펄스 지속시간의 변화를 최소화하기 위해 상기 변경하는 단계에 응답하여 상기 조정하는 단계들을 수행하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 레이저 펄스를 등화하는 방법.

청구항 14

제13항에 있어서, 상기 등화하는 단계는,

상기 반복률의 상기 제1 값에서와 동일한 개별 또는 평균 레이저 펄스 에너지를 상기 반복률의 상기 제2 값에서 10% 이내로 유지하는 단계; 및

상기 반복률의 상기 제1 값에서와 동일한 레이저 펄스 지속 시간을 상기 반복률의 상기 제2 값에서 10% 이내로 유지하는 단계;

를 포함하는 것을 특징으로 하는 레이저 펄스를 등화하는 방법.

청구항 15

제10항에 있어서,

상기 동작하는 단계는:

각각의 리딩 에지, 트레일링 에지, 및 신호 값을 갖는 일련의 명령 펄스를 포함하는 명령 신호를 생성하는 단계로서, 각 리딩 에지는 상기 레이저 공진기의 상기 저손실 상태로의 트랜지션을 시작하고, 각 트레일링 에지는 상기 레이저 공진기의 상기 고손실 상태로의 트잰지션을 시작하고, 각 신호 값은 상기 저손실 상태 동안 상기 레이저 공진기의 손실 수준을 정의하는 상기 생성하는 단계; 및

타겟 반복률의 역수와 일치하도록 연속적인 리딩 에지 사이의 주기를 설정함으로써 상기 레이저 펄스의 반복률을 설정하는 단계;

를 포함하고,

상기 손실 수준을 조정하는 단계는 상기 제1 측정값에 기초하여 상기 신호 값을 조정하는 단계를 포함하고;

상기 지속 시간을 조정하는 단계는 상기 제2 측정값에 기초하여 상기 리딩 에지로부터 대응하는 상기 트레일링 에지까지의 지속시간을 조정하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 레이저 펄스를 등화하는 방법.

청구항 16

제10항에 있어서,

상기 펄스 레이저 빔을 증폭시키는 단계를 더 포함하고;

상기 샘플링하는 단계는 증폭 후에 상기 펄스 레이저 빔에 대해 수행되는 것을 특징으로 하는 레이저 펄스를 등화하는 방법.

청구항 17

제10항에 있어서, 상기 Q-스위치는 음향 광학 변조기인 것을 특징으로 하는 레이저 펄스를 등화하는 방법.

청구항 18

제17항에 있어서, 상기 동작하는 단계는 상기 레이저 공진기로부터 레이저 광을 회절시키도록 상기 음향 광학 변조기를 구동하는 단계를 포함하고, 그로부터 발생하는 상기 손실 수준은 상기 저손실 상태에서 0이 아닌 것을 특징으로 하는 레이저 펄스를 등화하는 방법.

청구항 19

제10항에 있어서, 상기 샘플링하는 단계는 상기 레이저 공진기 외부에서 수행되는 것을 특징으로 하는 레이저 펄스를 등화하는 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] (우선권)

[0002] 본 출원은 2021년 11월 18일에 출원된 미국 가출원 번호 63/281,044에 대한 우선권을 주장하며, 그 개시 내용은 그 전체가 참조로 본 명세서에 포함된다.

[0003] (기술 분야)

[0004] 본 발명은 Q-스위치 이산화탄소(CO_2) 및 일산화탄소(CO) 레이저와 같은 Q-스위치 가스 레이저에 관한 것이다. 본 발명은 특히 펄스 반복률의 변경시 Q-스위치 가스 레이저 출력의 레이저 펄스 에너지 및 레이저 펄스 지속 시간의 변화에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0005] 가스 레이저의 레이저 이득 매체는 가스 혼합물이다. 레이저 작용을 제공하는 광학 활성 개체(entity)는 원자, 이온 또는 분자이다. 이러한 광학 활성 개체는 일반적으로 고주파(RF) 또는 직류(DC)와 같은 고전압 전기장에 의해 에너지를 공급받으며, 이는 가스 방전을 생성하여 광학 활성 개체에 개체수 역전(population inversiion)을 생성한다. 다수의 가스 레이저는 일반적으로 더 높은 효율성, 더 작은 크기, 더 낮은 비용 및 더 간단한 작동으로 인해 상업용 응용 분야에서 고체 상태 레이저로 대체되었다. 그러나 특정 유형의 가스 레이저는 여전히 인기가 있으며 일부 레이저 응용 분야에서는 선호되는 솔루션이다. 예를 들어, CO_2 레이저와 CO 레이저는 적외선(IR) 파장과 높은 평균 파워가 유리한 레이저 가공과 같은 산업 공정에서 실질적으로 사용된다.

[0006] CO_2 레이저는 약 9마이크로미터(㎛) 내지 약 11㎛의 파장 범위 내에서 IR 레이저 방사선을 전달할 수 있는 반면, CO 레이저는 약 4.5㎛ 내지 약 6.0㎛의 파장 범위 내에서 IR 레이저 방사선을 전달할 수 있다. CO_2 레이저와 CO 레이저를 사용하면 약 8kW에 달하는 평균 파워를 얻을 수 있다.

[0007] 다수의 레이저 가공 응용 분야에서는 레이저 방사선이 펄싱되는 것이 요구된다. CO_2 및 CO 레이저의 경우, 이득 매질에서 가스 방전을 켜고 끄면 펄스 레이저 빔이 생성될 수 있다. 그러나 이 기술에 의해 생성된 레이저 펄스의 상승 및 하강 시간은 가스 혼합물의 에너지 전달 프로세스의 동역학에 의해 결정되며 일반적으로 10~200 마이크로초(㎲) 정도이다. 이러한 상승 및 하강 시간으로 인해 전체 레이저 펄스 지속 시간이 수십에서 수백 마이크로초에 이르게 되는데, 이는 특정 응용 분야에서는 너무 길다. 특히, 이러한 레이저 펄스 지속 시간은 조사된 재료의 열 영향 영역이 작아야 하는 다수의 레이저 가공 응용 분야에서 너무 길다. 레이저 펄스 지속 시간이 수십 마이크로초 이상이면, 단일 레이저 펄스 동안 조사된 재료의 열 확산으로 인해 열 영향 영역이 조사된 위치에서 멀어지는 방향으로 현저하게 성장한다. 더 짧은 레이저 펄스가 필요하지 않은 응용 분야에서도, 가스 방전 변조에는 연관된 열 변화로 인해 광학적 불안정이 발생한다는 추가적인 단점이 있다.

[0008] Q-스위칭은 레이저 공진기의 공동내(intracavity) 손실을 변조하여 레이저 펄스를 생성하는 기술이다. Q-스위칭은 레이저 이득 매질의 꾸준한 펌핑을 유지하면서 레이저 공진기를 고손실 상태(낮은 Q-인자)와 저손실 상태(높은 Q-인자) 사이에서 스위칭한다. 레이저 작용을 방지하기 위해 먼저 고손실 상태에서 레이저 공진기를 작동시켜 레이저 펄스를 생성한다. 레이저 작용이 없을 때, 이득 매질을 펌핑하면 레이저 이득 매질에 많은 양의 에너지가 축적된다. 다음으로 공진기 손실은 레이저 작용이 가능한 낮은 값으로 갑자기 떨어진다. 축적 시간이 지난 후, 순환하는 레이저 파워는 이러한 저손실 상태에서 빠르게 증가하고 저장된 에너지는 빠르게 고갈된다. 그 결과 일반적으로 나노초 범위의 지속 시간을 갖는 레이저 펄스가 생성된다. 가장 일반적으로, Q-스위칭은 펄스 반복률을 특징으로 하는 일련의 레이저 펄스를 생성하기 위해 주기적으로 수행된다.

[0009] Q-스위칭은 능동 또는 수동일 수 있다. 능동 Q-스위칭에서, 레이저 공진기는 고손실 상태와 저손실 상태 사이에서 레이저 공진기를 스위칭하기 위해 공진기로부터의 방사선을 전환(divert)하거나 전환하지 않도록 제어되는 음향 광학 변조기(AOM) 또는 전기 광학 변조기(EOM)와 같은 능동 손실 엘리먼트를 포함한다. 능동 Q-스위칭은 일반적으로 수백 킬로헤르츠(kHz)에서 1kHz 이하 범위의 펄스 반복률을 갖는 레이저 펄스를 생성하는 데 사용된다. 능동 Q-스위칭은 요청 시 단일 레이저 펄스를 생성하는 데 사용될 수 있다.

[0010] 펄스 레이저 빔으로 수행되는 레이저 공정은 일반적으로 최적의 펄스 반복률을 갖는다. 최적의 펄스 반복률은

공정에 따라 다르다. 따라서 가장 다용도 펄스 레이저 시스템은 때로는 단발에서 수백 킬로헤르츠에 이르는 다양한 범위의 펄스 반복률 범위에서 작동할 수 있다. 레이저 가공 공정은 각 단일 부품을 가공하는 동안 펄스 반복률을 변경하는 것이 수반되어, 펄스 반복률을 즉각적으로 조정해야 하는 것이 특이한 것은 아니다. Q-스위치 레이저의 경우, 펄스 반복률을 조정하면 레이저 공진기의 고손실 상태의 지속 시간이 변경된다. 적어도 상대적으로 높은 펄스 반복률의 경우 이러한 변화는 저손실 상태로 스위칭하기 전에 이득 매질에 축적된 에너지의 양에 영향을 미칠 수 있다. 결과적으로, 펄스 반복률의 조정은 레이저 펄스 에너지의 변화를 수반할 수 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

과제의 해결 수단

[0011] 여기에는 Q-스위치 가스 레이저 장치 및 레이저 펄스 에너지와 레이저 펄스 지속 시간 모두의 이변량(bivariate) 펄스 등화를 가진 관련 방법이 개시되어 있다. 본 장치 및 방법은 능동 Q-스위칭을 활용하고 광범위한 펄스 반복률에 걸쳐 레이저 펄스 에너지와 지속 시간을 등화하도록 구성된다. 한 가지 등화 메커니즘은 레이저 펄스 에너지에 직접적인 영향을 미치는 반면 다른 등화 메커니즘은 레이저 펄스 지속 시간에 직접적인 영향을 미친다. 상기 펄스 에너지 등화 메커니즘은 레이저 공진기의 저손실 상태의 손실을 조정하는 반면, 상기 펄스 지속 시간 등화 메커니즘은 저손실 상태의 상기 지속 시간을 조정한다. 예를 들어, 상기 Q-스위치가 AOM인 경우, 상기 펄스 지속 시간 등화 메커니즘은 저손실 상태에서도 일정량의 회절을 유지하고 이 회절량을 조정하여 원하는 펄스 에너지를 달성하는 것을 기반으로 한다. 비교를 위해 기존 Q-스위치는 저손실 상태 동안 완전히 꺼져 상기 레이저 공진기의 손실을 최소화한다.

[0012] 우리는 펄스 에너지와 지속 시간 모두의 균등화가 균일한 펄스 에너지가 달성될 수 있는 펄스 반복률 범위를 확장한다는 것을 깨달았다. 상기 펄스 에너지 등화 메커니즘만을 사용하여 상대적으로 높은 펄스 반복률의 제한된 범위에서 균일한 펄스 에너지를 달성하는 것이 가능할 수 있지만, 상기 펄스 지속 시간 등화 메커니즘은 이 범위를 더 낮은 펄스 반복률로 확장하는 것을 용이하게 한다. 따라서 현재의 이변량 펄스 등화는 단순히 상기 레이저 펄스 지속 시간에 관계없이 광범위한 펄스 반복률에 걸쳐 균일한 레이저 펄스 에너지를 유지하는 것이 목적인 경우에도 유용하다. 상기 펄스 지속 시간 등화 메커니즘을 통해 추가적으로 광범위한 펄스 반복률에 걸쳐 원하는 레이저 펄스 지속 시간을 달성할 수 있으므로 궁극적인 레이저 펄스 제어가 가능해진다.

[0013] 일 측면에서, 펄스 등화 기능을 갖춘 Q-스위치 가스 레이저 장치는 가스 레이저, 센서 및 전자 회로를 포함한다. 상기 가스 레이저는 펄스 레이저 빔을 생성하기 위해 레이저 공진기를 고손실 상태와 저손실 상태 사이에서 스위칭하도록 작동 가능한 Q-스위치를 갖는 상기 레이저 공진기를 포함한다. 상기 센서는 레이저 펄스 에너지를 나타내는 상기 펄스 레이저 빔의 측정값을 얻도록 구성된다. 상기 전자 회로는 상기 Q-스위치와 상기 센서 사이에 통신 가능하게 결합되며, 상기 Q-스위치를 작동하여 (a) 상기 펄스 레이저 빔의 레이저 펄스의 반복률을 설정하기 위해 상기 레이저 공진기를 상기 고손실 상태와 상기 저손실 상태 사이에서 반복적으로 스위칭하고, (b) 타겟 레이저 펄스 에너지를 달성하기 위해, 상기 센서에서 얻은 상기 측정값을 기반으로 상기 저손실 상태의 손실 수준을 조정하고, (c) 타겟 레이저 펄스 지속 시간을 달성하기 위해 상기 저손실 상태의 지속 시간을 조정하도록, 구성된다.

[0014] 다른 측면에서, Q-스위치 가스 레이저에 의해 생성된 레이저 펄스를 등화하는 방법은 펄스 레이저 빔을 생성하기 위해 상기 Q-스위치 가스 레이저의 레이저 공진기를 고손실 상태과 저손실 상태 사이에서 반복적으로 스위칭하도록 상기 Q-스위치 가스 레이저의 Q-스위치를 작동하는 단계를 포함한다. 상기 방법은 (a) 상기 레이저 펄스 에너지를 나타내는 측정값을 얻기 위해 펄스 레이저 빔을 샘플링하는 단계, (b) 타겟 레이저 펄스 에너지에 근접하도록, 상기 레이저 펄스 에너지를 나타내는 상기 측정값에 기초하여 상기 저손실 상태의 손실 수준을 조정하는 단계, 및 (c) 타겟 레이저 펄스 지속 시간에 근접하도록 상기 저손실 상태의 지속 시간을 조정하는 단계를 반복하여 레이저 펄스 에너지와 상기 펄스 레이저 빔의 상기 레이저 펄스의 레이저 펄스 지속 시간을 등화하는 단계를 더 포함한다.

도면의 간단한 설명

[0015] 명세서에 포함되고 명세서의 일부를 구성하는 첨부 도면은 본 발명의 바람직한 실시예를 개략적으로 도시하며,

위에 주어진 일반적인 설명 및 아래에 주어진 바람직한 실시예의 상세한 설명과 함께 본 발명의 원리를 설명하는 역할을 한다.

도 1은 실시예에 따라 레이저 펄스 에너지와 레이저 펄스 지속 시간 모두의 등화를 갖는 Q-스위치 가스 레이저 장치를 도시한다.

도 2는 AOM Q-스위치가 장착된 레이저 공진기를 Q-스위칭하기 위한 종래 기술 방식의 타이밍도이다.

도 3은 AOM Q-스위치를 구현하고 도 2의 종래 기술 방식에 따라 동작하는 도 1의 장치의 실시예에 의해 생성된 예시적인 레이저 펄스 세트를 도시한다.

도 4는 도 3의 장치와 같은, 그러나 도 2의 종래 기술 방식과는 다르게 펄스 트리밍을 구현하는 도 1의 장치의 동일한 실시예에 의해 생성된 예시적인 레이저 펄스의 다른 세트를 도시한다.

도 5는 Q-스위치를 제어하는, 명령 펄스 지속 시간이 레이저 펄스 에너지 및 고정 펄스 반복률에서의 지속 시간에 미치는 영향을 추가로 탐색하는 데이터를 표시한다.

도 6은 실시예에 따른 Q-스위치 가스 레이저에 의해 생성된 레이저 펄스의 이변량 등화 방법에 대한 흐름도이다.

도 7은 실시예에 따른 이변량 펄스 등화를 사용하여 가스 레이저를 Q-스위칭하는 도 6의 방법에 의해 활용되는 방식의 타이밍도이다.

도 8은 도 7의 방식에 따른 이변량 펄스 등화를 사용하여 도 1의 장치를 작동시키고, 실시예에 따라 각 센서로부터의 측정값을 기반으로 레이저 펄스 에너지와 레이저 펄스 지속 시간 모두의 동적 조정을 구현할 때 생성되는 레이저 펄스의 예시를 도시한다. 비교를 위해, 도 8은 또한 펄스 등화 없이 생성된 레이저 펄스의 예를 보여준다.

도 9a 및 9b는 이변량 펄스 등화 유무에 따른 3가지 서로 다른 펄스 반복률에 대한 레이저 펄스 에너지 및 레이저 펄스 지속 시간의 예를 각각 보여준다.

도 10a는 실시예에 따라 Q-스위치가 AOM인 도 1의 장치의 실시예에서 구현될 수 있는 RF 드라이버를 예시한다. 도 10b는 이 RF 드라이버를 제어하기 위한 예시적인 명령 신호를 도시한다.

도 11a는 실시예에 따라 Q-스위치가 AOM인 도 1의 장치의 실시예에서 구현될 수 있는 다른 RF 드라이버를 예시한다. 이 RF 드라이버는 별도의 타이밍 및 전압 입력을 수신하도록 구성된다. 도 11b는 도 11a의 RF 드라이버의 타이밍 측면을 제어하기 위한 예시적인 타이밍 명령 신호를 도시한다.

도 12는 실시예에 따라, 레이저 펄스 에너지 및 레이저 펄스 지속 시간 모두의 서보 제어를 이용한 이변량 펄스 등화를 위한 컨트롤러를 예시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0016] 이제 도면을 참조하며, 여기서 유사한 구성요소는 유사한 숫자로 지정된다. 도 1은 이변량 펄스 등화를 갖는 하나의 Q-스위치 가스 레이저 장치(100)를 도시한다. 장치(100)는 가스 레이저(110), 센서(150) 및 전자 회로(160)를 포함한다. 가스 레이저(110)는 Q-스위치(118)를 갖는 레이저 공진기(116)를 포함한다. Q-스위치(118)는 예를 들어 AOM 또는 EOM이다.

[0017] 본질적으로, 가스 레이저(110)는 또한 가스 이득 매질(120)을 포함한다. 일 실시예에서, 가스 레이저(110)는 CO_2 또는 CO 레이저이고 이득 매질(120)은 이에 상응하여 CO_2 또는 CO를 포함한다. 적어도 가스 레이저(110)가 CO_2 또는 CO 레이저인 경우, 가스 레이저(110)는 내부의 CO_2 또는 CO 분자를 펌핑(에너지 공급)하기 위해 이득 매질(120)을 통해 고전압 전기장을 인가하는 하나 이상의 전극을 추가로 포함한다. 다른 실시예에서, 가스 레이저(110)는 상부 상태 수명이 긴 다른 유형의 가스 레이저일 수 있다. 가스 레이저(110)는 가스상 이득 매질(120)에서 방전을 생성하기 위해 이득 매질(120)의 대향 측면에 위치된 전극(122 및 124)을 포함할 수 있다. 전극(122)은 고전압 RF 소스에 결합되고, 전극(124)은 접지된다.

[0018] 도 1에 도시된 예에서. 공진기(116)는 레이저 방사선(190)이 그 사이에서 앞뒤로 전파되는 2개의 엔드 미러(112, 114)를 갖는 선형 공진기이다. 엔드 미러(114)는 부분 반사율, 예를 들어 10%와 90% 사이의 범위를 갖는 출력 커플러이다. 엔드 미러(112)는 적어도 99% 반사율을 갖는 고반사체일 수 있다. 장치(100)의 다른

예에서, 공진기(116)는 레이저 방사선(190)의 전파 경로가 접혀 있는 2개 이상의 미러에 의해 정의된 선형 공진기이다. 또 다른 예에서, 공진기(116)는 링 공진기이다.

[0019] Q-스위치(118)는 순환하는 레이저 방사선(190)의 전파 경로에 배치된다. 전자 회로(160)는 펄스 레이저 방사선(190)에 대한 Q-스위치(118)의 동작을 제어하여, 가스 레이저(110)가 펄스 레이저 빔(192)을 출력하도록 한다. 보다 구체적으로, 전자 회로(160)는 Q-스위치(118)를 작동시켜 공진기(116)를 고손실 상태와 저손실 상태 사이에서 반복적으로 스위칭하여 레이저 빔(192)의 레이저 펄스(192P)의 반복률을 설정하도록 한다. 전자 회로(160)는 Q-스위치(118)가 공진기(116)를 고손실 상태와 저손실 상태 사이에서 스위칭하는 레이트를 변화시킴으로써 레이저 빔(192)의 펄스 반복률을 변경할 수 있다. 즉, 전자 회로(160)는 Q-스위치(118)를 제어하여 레이저 펄스(192P) 사이의 주기 T의 값의 범위를 달성할 수 있다. 전자 회로(160)는 레이저 펄스(192P)의 원하는 반복률을 나타내는 반복률 입력(188)을 수신할 수 있다. 전자 회로(160)는 외부 제어 시스템 또는 사용자로부터 반복률 입력(188)을 수신할 수 있다.

[0020] 전자 회로(160)는 또한 공진기(116)의 저손실 상태에서 Q-스위치(118)에 의해 부과되는 손실을 제어하고 변경하여 레이저 펄스(192P)의 타겟 에너지를 달성하도록 구성된다. Q-스위치(118), 센서(150) 및 전자 회로(160)는 레이저 펄스(192P)의 에너지에 대한 서보 제어를 발휘하기 위해 능동 피드백 루프로 배열된다. 장치(100)는 레이저 빔(192)의 일 부분(196)을 분할하고 레이저 빔의 일 부분(196)을 센서(150)로 보낸다. 센서(150)는 레이저 빔의 일 부분(196)의 레이저 펄스의 펄스 에너지 E(또는 관련 매개변수)를 측정하여 레이저 펄스(192P)(또는 이를 나타내는 다른 매개변수)의 에너지 측정치를 획득한다. 센서(150)는 이러한 펄스 에너지 측정값을 전자 회로(160)에 전달하고, 전자 회로(160)는 이에 따라 Q-스위치(118)의 동작을 조정하여 적어도 어느 정도의 허용 오차 내에서 타겟 펄스 에너지를 달성한다.

[0021] 센서(150)에 의해 측정된 특성은 레이저 빔 일 부분(196)의 평균 에너지일 수 있고 여러 또는 다수의 레이저 펄스(192P)에 대한 평균으로서 획득될 수 있다. 일 구현에서, 센서(150)는 열전퇴 센서, 광전도성 또는 광기전 반도체 센서, 또는 볼로메트릭 센서이다. 대안적으로, 센서(150)는 레이저 빔 일부분(196)의 개별 펄스의 에너지를 측정하기에 충분히 빠를 수 있다. 장치(100)는 레이저 빔(192)으로부터 레이저 빔 일 부분(196)을 얻기 위해 하나 이상의 빔 스플리터를 포함할 수 있다.

[0022] 전자 회로(160)는 레이저 펄스(192P)의 지속 시간을 조정하는 데 필요한 Q-스위치(118)에 의해 정의된 공진기(116)의 저손실 상태 지속 시간을 제어하도록 추가로 구성된다. 전자 회로(160)는 (a) 레이저 펄스(192P)의 지속 시간의 측정값, 또는 (b) 펄스 반복률, 타겟 펄스 에너지, 센서(150)로부터 획득된 펄스 에너지 측정값, 및 타겟 펄스 지속 시간 중 하나 이상 사이의 사전 교정된 관계,에 기초하여 이 조정을 수행할 수 있다.

[0023] 도 1에 도시되지는 않았지만, 전자 회로(160)는 외부 시스템 또는 사용자로부터 타겟 펄스 에너지 및 타겟 펄스 지속 시간을 수신할 수 있다. 전자 회로(160)는 개별 전자 구성요소, 집적 회로, 마이크로프로세서 및 소프트웨어 탑재 컴퓨터 중 하나 이상을 포함할 수 있다.

[0024] 특정 실시예의 장치(100)는 센서(152)를 포함하고 레이저 빔(192)의 일부분(198)을 센서(152)로 지향시킨다. 센서(152)는 레이저 빔의 일부분(198)으로부터 레이저 펄스(192P)의 지속 시간(w)의 측정값을 획득하고 이 펄스 지속 시간 측정값을 전자 회로(160)에 전달한다. 그런 다음, 전자 회로(160)는 펄스 지속 시간 측정값에 기초하여 Q-스위치(118)의 동작을 조정할 수 있다. 센서(152)는 적어도 어느 정도 허용오차 내에서 타겟 펄스 지속 시간을 달성하기 위해 레이저 펄스(192P)의 지속 시간의 서보 제어를 허용하는 능동 피드백 루프를 완료할 수 있다. 센서(152)는 예를 들어 개별 레이저 펄스(192P)의 파형을 기록하는 고속 광학 검출기이다.

[0025] 장치(100)는 레이저 빔(192)의 일 부분을 센서(150)로 그리고 선택적으로 센서(152)로 분할하는 하나 이상의 빔 스플리터를 포함할 수 있다. 도 1에 도시된 예시에서, 장치(100)는 (a) 센서(150 및 152)를 향해 레이저 빔(192)의 일부분(194)을 분할하는 빔 스플리터(130), 및 (b) 일부분(194)을 레이저 빔 일부분(196 및 198)으로 분할하는 빔 스플리터(132)를 포함한다. 센서(152)를 포함하지 않는 실시예에서는 빔 스플리터(132)는 생략된다. 본 발명의 범위를 벗어나지 않고, 장치(100)는 레이저 빔(192)으로부터 레이저 빔의 일부분(196) 및 선택적으로 레이저 빔의 일부분(198)을 얻기 위해 다른 방식을 구현할 수 있다.

[0026] 전자 회로(160)는 컨트롤러(162) 및 드라이버(164)를 포함할 수 있다. 드라이버(164)는 전기 구동 신호(182)를 생성하고 공진기 손실을 변조하기 위해 Q-스위치(118)에 구동 신호(182)를 공급한다. 예를 들어, Q-스위치(118)가 AOM인 경우, 드라이버(164)는 RF 드라이버이고 드라이브 신호(182)는 고전압 RF 신호이다. 드라이버(164)에 의한 구동 신호(182)의 생성은 컨트롤러(162)로부터 수신된 명령 신호(180)에 의해 지시된다. 명령 신

호(180)는 레이저 펄스(192P)의 반복률, 저손실 상태에서 공진기(116)의 손실, 및 저손실 상태의 지속 시간을 정의한다. 임의의 주어진 펄스 반복률에 대해, 컨트롤러(162)는 센서(150)로부터 얻은 펄스 에너지 측정값에 적어도 부분적으로 기초하고 또한 선택적으로 센서(152)로부터 얻은 펄스 지속 시간 측정값에 기초하여 명령 신호(180)를 생성한다. 컨트롤러(162)에 의한 명령 신호(180)의 생성은 또한 예를 들어 반복률 입력(188)에 의해 정의된 바와 같은 원하는 펄스 반복률에 더 기초한다.

[0027] 일 실시예에서, 장치(100)는 마스터 발진기 파워 증폭기(MOPA)로서 구성된다. 이 MOPA 실시예에서, 가스 레이저(110)는 마스터 발진기이고 장치(100)는 레이저 빔(192)을 증폭하는 레이저 증폭기(170)를 더 포함한다. MOPA 실시예에서, 센서(150) 및 센서(152)(포함된 경우)는 증폭기(170)에 의한 증폭 전후에 레이저 빔(192)을 샘플링하기 위해 배열될 수 있다. 일반적으로 도 1에 도시된 바와 같이 증폭 후에 레이저 빔(192)을 샘플링하는 것이 유리하다. 센서(들)를 향해 분할되는 레이저 빔(192)의 일부분은 증폭 후에 분리가 이루어질 때 중요하지 않을 수 있다. 증폭 전에 분할이 완료되면, 레이저 빔(192)의 더 큰 일부분이 분할되어야 하며, 애플리케이션(예를 들어, 레이저 가공)에 전달되는 레이저 빔(192)의 최종 파워에 대한 영향이 클 수 있다. 추가적으로, 증폭된 레이저 빔(192)은 MOPA의 출력이기 때문에, 증폭된 레이저 빔(192)의 샘플링은 실제 출력의 보다 직접적인 평가를 제공하고, 전자 회로(160)에 의해 가해지는 제어는 증폭기(170)에서 유도된 효과를 보상할 수 있다.

[0028] 도 2는 AOM Q-스위치가 장착된 레이저 공진기를 Q-스위칭하기 위한 종래 기술 방식(200)의 타이밍도이다. 도 2는 레이저 펄스(232)의 생성에 관한 3개의 그래프(210, 220, 230)를 도시한다. 그래프(210)는 AOM을 구동하기 위해 RF 드라이버에 공급되는 명령 신호(212)의 시간적 전개를 도시한다. 그래프(220)는 RF 드라이버에 의해 AOM에 공급되는 RF 구동 신호(222)의 시간적 전개를 도시한다. RF 구동 신호(222)는 명령 신호(212)에 의해 정의된다. 명령 신호(212)의 값 V_C는 두 값, V_{high}와 0 사이에서 스위칭된다. $V_C=V_{high}$일 때, 구동 신호(222)의 RF 전압 V_{RF}는 진폭 ΔV_{high}를 갖고, AOM에 의한 관련 회절은 레이저 공진기가 고손실 상태가 되도록 공진기 손실을 부여한다. V_C가 0이면 V_{RF}는 AOM이 꺼지도록 0이 되어 레이저 공진기를 저손실 상태로 만든다.

[0029] 그래프(230)는 레이저 공진기에서 순환하는 레이저 파워 P_L의 시간적 전개를 도시한다. 방식(200)에서, 명령 신호(212)의 명령 펄스(214)가 $V_C=0$으로 떨어지는 것에 의해 레이저 펄스(232)가 생성된다. 명령 펄스(214)는 시간 t_1의 리딩 에지(leading edge)와 시간 t_2의 트레일링 에지(trailing edge) 사이의 지속 시간 Δt를 갖는다. 명령 펄스(214)의 지속 시간 Δt는 레이저 공진기의 저손실 상태의 지속 시간을 정의한다. 음향 및 광학 지연은 시간 t_1에서 레이저 펄스(232)까지 지연 T_{delay}를 부과한다. 음향 지연은 AOM 광학의 음향 파동에 해당하며, 이는 시간 t_1까지 생성되어 변환기에서 레이저 방사선(190) 경로를 완전히 통과하여 전파된다. 광학 지연은 에너지가 공급된 공진기를 통해 여러 번 왕복하는 동안 유도 방출에 의해 "구축(building up)"되는 자연 발생적인 방출에 의해 시작된 레이저 방사선에 해당한다. 도 2에 도시된 시나리오에서, 음향 지연이 광학 지연보다 길기 때문에 시간 t_2 이후에 레이저 펄스(232)가 생성된다.

[0030] 전자 회로(160)는 종래 기술 방식(200)에 따라 Q-스위치(118)를 동작시킬 수 있다. 그러나, 종래 기술 방식(200)은 펄스 등화를 제공하지 않으며, 레이저 펄스(192P)의 에너지 및 지속 시간은 펄스 반복률에 따라 변할 것이다.

[0031] 도 3은 Q-스위치(118)를 AOM으로서 구현하고 종래 기술 방식(200)에 따라 동작하도록 제한되는 장치(100)의 실시예에 의해 생성된 예시적인 레이저 펄스 세트를 도시한다. 레이저 펄스 파형은 순간적인 레이저 파워를 시간의 함수로서 검출하고 기록하는 고속 광학 검출기로서 구현되는 센서(152)에 의해 기록된다. 도 3의 예시에서, 명령 펄스(214)의 지속 시간 Δt는 1.0μs이다. 도 3은 펄스 반복률 1kHz, 5kHz, 10kHz, 25kHz, 50kHz, 75kHz, 100kHz 각각에서 기록된 결과적인 레이저 펄스 파형을 보여준다. 레이저 펄스 파형은 1kHz ~ 25kHz 범위의 펄스 반복률에서 대부분 변하지 않지만, 펄스 반복률이 25kHz 이상으로 증가하면 상당한 변화가 발생한다. 특히, 펄스 에너지는 25kHz 이상의 펄스 반복률에 대해 펄스 반복률에 따라 큰 감소를 나타낸다. 또한 펄스 반복률이 25kHz 이상으로 증가하면 레이저 펄스의 형상과 지속 시간이 변경된다. 1~25kHz 범위의 펄스 반복률에서 생성된 레이저 펄스는 주요 펄스와 그 뒤를 잇는 현저한 테일(310)로 구성된다. 펄스 반복률이 25kHz 이상으로 증가하면 테일(310)이 점차 사라지고 이에 따라 레이저 펄스 지속 시간이 감소한다.

[0032] 도 4는 도 3의 장치와 동일한 장치(100)의 실시예에 의해 생성된 예시적인 레이저 펄스의 다른 세트를 도시한다. 그러나 더 짧은 명령 펄스(214)를 사용하는 것은 종래 기술 방식(200)과의 차이이다. 이 기술은 이

하에서 "펄스 트리밍"으로 지칭된다. 도 4의 예에서, 명령 펄스(214)의 지속 시간 Δt는 0.8㎲이다. 도 4는 펄스 반복률 1kHz, 5kHz, 10kHz, 25kHz, 50kHz, 75kHz, 및 100kHz 각각에서 기록된 결과적인 레이저 펄스 파형을 보여준다. 명령 펄스(214)를 1.0㎲에서 0.8㎲로 감소시키면 측정된 모든 펄스 반복률에서 테일(310)이 본질적으로 제거된다. 그러나 펄스 반복률이 25kHz 이상으로 증가하면 레이저 펄스 에너지는 여전히 극적으로 감소한다. 따라서 펄스 트리밍은 다양한 펄스 반복률에 걸쳐 보다 균일한 레이저 펄스 지속 시간과 모양을 달성하는 데 도움이 될 수 있지만, 펄스 트리밍은 레이저 펄스 에너지를 균등화하지 않는다.

[0033] 도 5는 레이저 펄스 에너지와 고정 펄스 반복률에서의 지속 시간에 대한 명령 펄스 지속 시간의 효과를 추가로 탐색한다. 도 5는 고정 펄스 반복률에서 서로 다른 명령 펄스 지속 시간으로 얻은 레이저 펄스 파형을 보여준다. 도 5의 각 레이저 펄스 파형에는 명령 펄스(214)의 해당 지속 시간 Δt가 표시되어 있다. 1.1㎲의 가장 긴 명령 펄스 지속 시간으로 시작하여, 레이저 펄스 파형은 실질적인 받침대 모양의 테일을 나타낸다. 메인 펄스의 폭은 약 0.2㎲이며 받침대 모양의 테일은 전체 레이저 펄스 지속 시간을 최대 약 0.5㎲까지 연장한다. 명령 펄스 지속 시간이 1.1㎲에서 감소함에 따라 이 테일은 잘리고(truncated) 명령 펄스 지속 시간이 0.7㎲에 도달하면 기본적으로 제거된다. 명령 펄스 지속 시간이 0.7㎲ 미만으로 줄어들면 레이저 펄스 지속 시간은 이제 메인 펄스 폭이 감소한 결과로서 더 감소한다. 또한 레이저 펄스의 피크 파워가 감소한다.

[0034] 도 5 데이터는 적어도 특정 펄스 반복률 영역에서 레이저 펄스 에너지가 저손실 상태의 지속 시간에 민감하다는 것을 보여준다. 도 5의 데이터는 또한 적어도 특정 펄스 반복률 영역에서는 상당히 좁은 범위의 명령 펄스 지속 시간만이 메인 펄스의 전체 에너지를 유지하면서 깨끗한 테일 없는 펄스를 제공한다는 것을 보여준다. 즉, "최적의" 명령 펄스 지속 시간이 있으며, 이 최적의 명령 펄스 지속 시간에서 상대적으로 작은 편차라도 상당한 영향을 미친다. 우리는 적어도 특정 임계률 이상의 펄스 반복률에 대해 최적의 명령 펄스 지속 시간이 펄스 반복률에 따라 증가한다는 것을 발견했다.

[0035] 함께, 도 3, 4 및 5의 데이터는 가스 레이저(110)와 같은 Q-스위치 가스 레이저에 의해 생성된 레이저 펄스의 반복률, 에너지 및 지속 시간 사이의 강력하게 결합된 관계를 보여준다. 이러한 관계의 특성은 펄스 반복률, 에너지 및 지속 시간에 걸쳐있는 3차원 매개변수 공간의 위치에 따른다. 또한, 관계는 공진기(116), 이득 매질(120) 및 이득 매질(120)의 펌핑의 특성들을 포함하는 다른 매개변수에 민감하다.

[0036] 도 6은 Q-스위치 가스 레이저에 의해 생성된 레이저 펄스의 이변량 등화를 위한 한 방법(600)의 흐름도이다. 방법(600)은 장치(100)에 적용될 수 있고 도 3 내지 5의 데이터에 의해 예시된 문제를 극복하여 광범위한 펄스 반복률에 걸쳐 균일한 레이저 펄스 에너지와 지속 시간을 제공할 수 있다. 방법(600)은 종래 기술 방식(200)보다 더 발전된 방식에 따라 Q-스위치를 동작시키는 것을 수반한다. 이하에서, 방법(600)은 장치(100)의 맥락 내에서 논의된다. 방법(600)은 병렬로 수행되는 단계(610 및 620)를 포함한다.

[0037] 단계(610)에서, 도 1을 참조하여 상술한 바와 같이, 전자 회로(160)는 Q-스위치(118)를 동작시켜 공진기(116)를 고손실 상태와 저손실 상태 사이에서 반복적으로 스위칭하여 펄스 레이저 빔(192)을 생성한다. 단계(620)에서, 전자 회로(160)는 센서(150) 및 선택적으로 센서(152)와 협력하여 펄스 반복률 범위에 걸쳐 레이저 펄스(192P)의 에너지 및 지속 시간을 등화한다.

[0038] 단계(620)는 단계(630 및 632)를 포함한다. 단계(630)에서, 센서(150)는 도 1을 참조하여 상술한 바와 같이 레이저 펄스(192P)의 에너지를 나타내는 측정값을 얻기 위해 레이저 빔(192)을 샘플링한다. 단계(630)는 복수의 레이저 펄스(192P)에 대한 평균으로서 이 펄스 에너지 측정값을 획득하는 단계(634)를 구현할 수 있다. 단계(632)에서, 전자 회로(160)는 단계(630)에서 획득된 펄스 에너지 측정값에 기초하여 공진기(116)의 저손실 상태의 손실 수준을 조정하여 타겟 펄스 에너지를 달성하거나 적어도 이에 근접한다. 단계(630 및 632)는 타겟 펄스 에너지를 달성하기 위해 능동 피드백 루프에서 반복적으로 수행될 수 있다. 예시적인 시나리오에서, 단계(620)는 타겟 펄스 에너지의 10% 내에 있는 레이저 펄스 에너지를 달성하며, 레이저 펄스 에너지는 단일 레이저 펄스의 에너지 또는 복수의 레이저 펄스의 평균 에너지로서 평가된다.

[0039] 도 7은 방법(600)에 의해 Q-스위치 가스 레이저(110)에 대해 활용되는 하나의 방식(700)의 타이밍도이다. 방식(700)은 펄스 에너지 등화 및 펄스 지속 시간 등화를 모두 가능하게 하는 방식(200)의 변형이다. 도 7은 Q-스위칭이 AOM으로 수행되는 실시예에 대한 방식(700)을 도시한다. 방식(700)은 다른 유형의 Q-스위치, 예를 들어 EOM에 쉽게 적용된다. 도 7의 그래프(720, 730)는 단계(632)의 보다 상세한 예를 제공한다. 그래프(720)는 전자 회로(160)에 의해 AOM에 공급되는 RF 구동 신호(722)의 시간적 전개를 도시한다. 방식(200)의 RF 구동 신호(222)와 비교할 때, RF 구동 신호(722)는 공진기(116)의 저손실 상태 동안 반드시 0일 필요는 없다. 대신, RF 구동 신호(722)는 일반적으로 저손실 상태 동안 0이 아닌 진폭 ΔV_{low}를 가지며, 전자 회로(160)는 단계(630)에

서 센서(150)에 의해 획득된 펄스 에너지 측정값에 기초하여 ΔV_{low}의 값을 조정한다.

[0040] 그래프(730)는 공진기(116)에서 순환하는 레이저 파워 P_L의 시간적 전개를 도시한다. AOM이 RF 구동 신호(722)에 의해 구동될 때, RF 구동 신호(722)의 진폭 ΔV_{high}에서 0이 아닌 진폭 ΔV_{low}로의 하락은 레이저 펄스(732)의 생성을 초래한다. RF 구동 신호를 모두 0까지 떨어뜨릴 때 생성된 레이저 펄스(232)(도 2 참조)와 비교할 때, 레이저 펄스(732)는 더 낮은 피크 파워(P_{peak}) 및 더 낮은 펄스 에너지 E를 갖는다. 펄스 에너지 E(및 피크 파워 P_{peak})의 감소는 공진기(116)의 저손실 상태 동안 0이 아닌 회절 손실을 부여하는 AOM의 결과이다. 단계(632)에서 전자 회로(160)는 타겟 펄스 에너지를 달성하기 위해 필요에 따라 ΔV_{low}를 조정한다. 예를 들어, 센서(150)로부터 얻은 펄스 에너지 측정값이 레이저 펄스(192P)의 에너지가 타겟 펄스 에너지를 초과한다는 것을 나타낼 때, 전자 회로(160)는 공진기(116)의 저손실 상태의 손실을 증가시키기 위해 ΔV_{low}를 증가시킬 수 있다. 반대로, 센서(150)로부터 얻은 펄스-에너지 측정값이 레이저 펄스(192P)의 에너지가 타겟 펄스 에너지보다 낮다는 것을 나타낼 때, 전자 회로(160)는 ΔV_{low}를 감소시킬 수 있다.

[0041] 방법(600)의 단계(620)에는 단계(642)도 포함되는데, 여기서 전자 회로(160)는 공진기(116)의 저손실 상태의 지속 시간을 조정하여 타겟 펄스 지속 시간을 달성하거나 적어도 이에 접근한다. 도 7의 그래프(720, 730)는 단계(642)의 보다 상세한 예를 제공한다. 이 예에서, 전자 회로(160)는 진폭 ΔV_{low}를 갖는 RF 구동 신호(722)의 지속 시간 Δt를 조정한다. 다른 예에서, 전자 회로(160)는 레이저 펄스(732)가 테일을 갖는 것을 방지하기 위해 지속 시간 Δt를 감소시키거나, 레이저 펄스(732)의 메인 펄스의 에너지를 최대화하기 위해 지속 시간 Δt를 증가시킨다. 또 다른 예에서, 전자 회로(160)는 특정 FWHM(full-width at half-maximum) 펄스 지속 시간과 같은 타겟 펄스 지속 시간을 달성하기 위해 지속 시간 Δt를 조정한다.

[0042] 단계(620)의 일 실시예에서, 단계(642)는 단계(640A)에 선행하며, 여기서 센서(152)는 도 1을 참조하여 상술한 바와 같이 레이저 펄스(192P)의 지속 시간을 나타내는 측정값을 얻기 위해 레이저 빔(192)을 샘플링한다. 단계(640A)는 단일 레이저 펄스(192P)로부터 또는 다수의 단일 펄스 지속 시간의 평균으로서 이러한 펄스 지속 시간 측정값을 획득하는 단계(644)를 구현할 수 있다. 단계(620)가 단계(640A)를 포함하는 경우, 단계(642)는 단계(640A)에서 획득된 펄스 지속 시간 측정값에 기초한다. 이 실시예는 능동 피드백 루프에서 단계(640A 및 642)를 반복적으로 수행할 수 있다. 단계(640A 및 642)에 의해 수행되는 펄스 지속 시간 피드백 루프는 단계(630 및 632)에 의해 수행된 펄스 에너지 피드백 루프보다 빠를 수 있으며, 특히 레이저 펄스 지속 시간이 단일 또는 단지 몇 개의 레이저 펄스(192P)의 측정값으로부터 얻어지는 경우 더욱 그렇다. 예시적인 시나리오에서, 단계(620)는 타겟 펄스 지속 시간의 10% 이내인 레이저 펄스 지속 시간을 달성한다.

[0043] 단계(620)의 다른 실시예에서, 단계(642)는 단계(640B) 이전에 이루어지며, 여기서 전자 회로(160)는 공진기(116)의 저손실 상태의 원하는 지속 시간(Δt)을 계산하거나 검색 테이블에서 원하는 지속 시간(Δt)을 검색한다. 전자 회로(160)는 (a) 타겟 펄스 지속 시간과 (b) 지속 시간 Δt와 펄스 반복률, 그리고 선택적으로 가스 레이저(110) 및/또는 타겟 펄스 에너지의 하나 이상의 다른 매개 변수 사이의 미리 교정된 함수 관계로부터 원하는 지속 시간 Δt를 계산할 수 있다. 예를 들어, 레이저 펄스(192P) 사이의 주기 T(펄스 반복률의 역수와 동일함)에 선형적으로 의존하는 방식으로 지속 시간 Δt를 조정함으로써 펄스 반복률 범위에 걸쳐 일정한 레이저 펄스 지속 시간을 달성하는 것이 가능할 수 있다. 대안적으로, 타겟 펄스 지속 시간, 펄스 반복률 및 선택적으로 가스 레이저(110) 및/또는 타겟 펄스 에너지의 하나 이상의 다른 매개변수의 함수로서 미리 교정된 지속 시간 Δt가 전자 회로(160)에 포함된 검색 테이블에 나열될 수 있다.

[0044] 일 시나리오에서, 단계(610)는 레이저 펄스(192P)의 반복률을 변경하는 단계(612)를 포함한다. 이 시나리오에서, 방법(600)은 단계(612)에서 이루어진 반복률 변화에 응답하여 단계(632) 및 선택적으로 단계(642)를 수행하여 반복률 변화에 의해 야기된 레이저 펄스 에너지 및 레이저 펄스 지속 시간의 변화를 최소화하도록 한다.

[0045] 전자 회로(160)가 컨트롤러(162) 및 드라이버(164)를 포함하는 실시예에서, 방식(700)의 실행은 드라이버(164)가 RF 구동 신호(722)(구동 신호(182)의 예)를 생성하는 것을 수반한다. 드라이버(164)는 컨트롤러(162)에 의해 생성된 명령 신호(180)에 따라 RF 구동 신호(722)를 생성한다. 도 7의 그래프는 명령 신호(712)의 시간적 전개를 도시한다. 명령 신호(712)는 드라이버(164)가 RF 구동 신호(722)를 생성하게 할 수 있는 명령 신호의 한 예이다. 명령 신호(712)는 높은 값(V_{high})과 낮은 값(V_{low}) 사이를 교번하는 전압(V_C)이다. $V_C = V_{high}$일 때 V_{RF}는 진폭 ΔV_{high}를 갖는다. $V_C = V_{low}$일 때 V_{RF}는 진폭 ΔV_{low}를 갖는다. V_{low} 값은 ΔV_{low} 값을 지시하는

신호값이다. 각 레이저 펄스(192P)는 신호 값 V_{low}를 특징으로 하는 명령 펄스(714) 후에 생성된다. V_{low}의 값은 ΔV_{low}의 값을 제어하여 레이저 펄스(192P)의 에너지를 제어한다.

[0046] 컨트롤러(162)는 연속적인 명령 펄스(714)의 리딩 에지(714L) 사이의 기간을 원하는 펄스 반복률의 역으로 설정함으로써 레이저 펄스(192P)의 반복률을 설정할 수 있다. 이 경우, 컨트롤러(162)는 명령 펄스(714)의 트레일링 에지(714T)의 시간적 위치를 조정함으로써 공진기(116)의 저손실 상태의 지속 시간 Δt를 조정한다.

[0047] 명령 신호(712)는 타이밍 정보(시간 t_1 및 t_2)와 가변 전압 V_{low}를 모두 포함한다. 대안적으로, 컨트롤러(162)는 타이밍 신호 및 가변 DC 전압이라는 2개의 개별 구성요소로서 명령 신호를 생성할 수 있다. 타이밍 신호는 명령 펄스(714)와 유사하지만 일정한 신호 값 V_{low}를 갖는 TTL 펄스를 포함하는 TTL(트랜지스터-트랜지스터 논리) 신호일 수 있다. 가변 DC 전압은 진폭 ΔV_{low} 또는 RF 구동 신호(722)를 지시하는 V_{low} 값의 DC 전압과 같은 아날로그 신호일 수 있다. 종종 상용 RF 드라이버는 아날로그 제어보다는 디지털 제어를 위해 구성된다. 명령 신호는 디지털로 인코딩된 시간 t_1, 지연 Δt, 전압 값 ΔV_{high} 및 전압 값 ΔV_{low}를 포함하는 디지털 신호일 수 있다.

[0048] 도 8은 방식(700)에 따른 이변량 펄스 등화로 장치(100)를 작동하고 센서(150 및 152)로부터의 측정값에 기초하여 레이저 펄스 에너지 및 레이저 펄스 지속 시간 모두의 동적 조정을 구현할 때 생성된 레이저 펄스(192P)의 예를 도시한다. 비교를 위해, 도 8은 또한 펄스 등화 없이 종래 기술 방식(200)에 따라 장치(100)를 작동할 때 생성된 레이저 펄스의 예를 도시한다. 도 8은 센서(152)에 의해 측정된 6개의 레이저 펄스 파형의 오실로스코프 트레이스를 도시한다. 트레이스(810, 820, 830)는 종래 기술 방식(200)을 사용하여 각각의 펄스 반복률 10kHz, 50kHz 및 100kHz에서 획득된다. 따라서, 트레이스(810, 820 및 830)에 대해, V_{low}는 0으로 유지되고 지속 시간 Δt는 일정하게 유지된다. 트레이스(812, 822, 832)도 각각의 펄스 반복률 10kHz, 50kHz 및 100kHz에서 획득되지만 신호 값 V_{low} 및 지속 시간 Δt 모두를 동적으로 조정하는 방식(700)에 따른 펄스 등화를 사용한다.

[0049] 트레이스(810, 820 및 830)에 대해 측정된 펄스 에너지는 각각 704마이크로줄(μJ), 542μJ 및 355μJ이며 해당 FWHM 펄스 지속 시간은 105나노초(ns), 118ns 및 117ns이다. 펄스 등화 없이 펄스 반복률이 10kHz에서 100kHz로 증가하면 펄스 에너지가 극적으로 변하는 것이 분명하다. 대조적으로, 방식(700)에 따라 펄스 등화를 구현할 때, 트레이스(812, 822 및 832)에서 알 수 있듯이 본질적으로 동일한 레이저 펄스 파형은 3가지 펄스 반복률 모두에 대해 얻어진다. 펄스 등화를 사용하면 10kHz, 50kHz, 및 100kHz에서 측정된 펄스 에너지는 각각 250μJ, 254μJ 및 262μJ이다. 또한 3개의 펄스 각각은 99ns의 FWHM 펄스 지속 시간을 갖는다.

[0050] 도 9a 및 9b는 이변량 펄스 등화 유무에 따른 3가지 다른 펄스 반복률(10kHz, 50kHz 및 100kHz)에 대한 레이저 펄스 에너지 및 레이저 펄스 지속 시간의 예를 각각 보여준다. 데이터 세트(910)는 펄스 균등화 없이, 즉 $\Delta V_{low}=0$ 및 Δt 상수를 사용하여 획득된다. 데이터 세트(920 및 930)는 방식(700)에 따른 이변량 펄스 등화를 사용하여 얻어지며, ΔV_{low} 및 Δt는 모두 센서(150 및 152)로부터 얻은 측정값에 기초하여 동적으로 조정된다. 데이터 세트(920)의 경우, 타겟 펄스 에너지 E_{target}은 340μJ이고 타겟 펄스 지속 시간 w_{target}은 99ns였다. 데이터 세트(930)의 경우, 타겟 펄스 에너지 E_{target}은 250μJ이고 타겟 펄스 지속 시간 w_{target}은 117ns였다.

[0051] 데이터 세트(910)는 펄스 등화 없이 레이저 펄스 에너지가 펄스 반복률에 따라 급격히 감소하여 10kHz에서 100kHz로 2x 감소함을 보여준다. 또한 레이저 펄스 지속 시간은 분명하지 않은 방식으로 펄스 반복률에 매우 민감하다. 대조적으로, 데이터 세트(920 및 930)에서 볼 수 있듯이, 이변량 펄스 등화는 매우 효과적이다. 타겟 펄스 지속 시간은 3가지 펄스 반복률 모두에서 달성되며 펄스 에너지 변화는 작다. 2가지 서로 다른 타겟 펄스 에너지인 340 및 250μJ 각각에 대해. 측정된 각 레이저 펄스 에너지는 타겟 펄스 에너지의 5% 내에 있다.

[0052] 도 10a는 Q-스위치(118)가 AOM인 장치(100)의 실시예에서 드라이버(164)로서 구현될 수 있는 하나의 RF 드라이버(1000)를 예시한다. 도 10b는 RF 드라이버(1000)를 제어하는 예시적인 명령 신호(1080)를 도시한다. RF 드라이버(1000)는 RF 발진기(1010), 혼합기(1020) 및 증폭기(1040)를 포함한다. RF 발진기(1010)는 RF 신호를 생성한다. 믹서(1020)는 이 RF 신호를 수신하고 믹서(1020)의 "IF" 포트에서 명령 신호(1080)를 추가로 수신한다. 명령 신호(1080)는 레이저 펄스(192P), V_{low}, 및 지속시간 Δt(도 7 참조)의 반복률을 정의하기 위한 명령 신호(712)의 연속 인스턴스로 구성된 가변 아날로그 전압 V_{VA}이다. 명령 신호(1080)는 컨트롤러(162)의 예에 의

해 생성된다. 혼합기(1020)는 명령 신호(1080)에 따라 RF 발진기(1010)로부터의 RF 신호를 변조한다. 증폭기(1040)는 이 변조된 RF 신호를 증폭하여 AOM Q-스위치를 구동하기 위한 RF 구동 신호(1082)를 생성한다. RF 구동 신호(1082)는 RF 구동 신호(722)의 연속 인스턴스와 동일하다. RF 드라이버(1000)는 혼합기(1020)에 의해 생성된 바람직하지 않은 고조파를 필터링하는 저역 통과 필터(1030)를 더 포함할 수 있다.

[0053] 도 11a는 별도의 타이밍 및 전압 입력을 수신하도록 구성된 다른 RF 드라이버(1100)를 예시한다. 도 11b는 RF 드라이버(1100)의 타이밍 측면을 제어하는 예시적인 타이밍 명령 신호(1180)를 도시한다. RF 드라이버(1100)는 혼합기(1020)의 IF 포트에 연결된 디지털 제어 아날로그 스위치(1150)를 더 포함하는 것을 제외하고는 RF 드라이버(1000)와 유사하다. 아날로그 스위치(1150)는 2개의 아날로그 전압 입력 포트를 갖는다. 한 포트는 전압 V_{high}로 유지되고, 다른 포트는 컨트롤러(162)의 예로부터 V_{low}를 수신한다. 아날로그 스위치(1150)는 또한 컨트롤러(162)로부터 별도의 타이밍 명령 신호(1180)를 수신한다. 타이밍 명령 신호(1180)는 V_{low}에 대한 정보를 전달하지 않고 로우와 하이의 두 값만 얻는 디지털 신호인 것을 제외하고는 명령 신호(1080)와 유사하다. 아날로그 스위치(1150)는 타이밍 명령 신호(1180)에 따라 V_{high}와 V_{low} 사이에서 스위칭하여 명령 신호(1080)를 생성한다.

[0054] 도 12는 레이저 펄스 에너지 및 레이저 펄스 지속 시간 모두의 서보 제어를 이용한 이변량 펄스 균등화를 위한 하나의 컨트롤러(1200)를 예시한다. 컨트롤러(1200)는 컨트롤러(162)의 실시예이고 RF 드라이버(1100)와 함께 전자 회로(160)에서 구현될 수 있다. 컨트롤러(1200)는 센서(150)로부터 레이저 빔(192)의 평균 파워 측정값 P_{AVE}를 수신하고 센서(152)로부터 레이저 펄스(192P)의 레이저 펄스 파형을 수신한다. 레이저 펄스 파형은 시간의 함수로서, 순간 레이저 파워 $P_{INST}(t)$이다. 컨트롤러(1200)는 P_{AVE} 및 $P_{INST}(t)$를 처리하여 V_{low} 및 타이밍 명령 신호(1180)를 각각 생성하고, 그런 다음 V_{low} 및 타이밍 명령 신호(1180)를 RF 드라이버(1100)에 전달한다. P_{AVE}의 처리는 타겟 펄스 에너지 E_{target}을 달성하는 기능을 하고, $P_{INST}(t)$의 처리는 타겟 펄스 지속 시간 w_{target}을 달성하는 기능을 한다.(도 3-5를 참조하여 위에서 설명한 것처럼 레이저 펄스 에너지와 레이저 펄스 지속 시간 사이에 어느 정도 결합이 있을 수 있다.)

[0055] 펄스 에너지 등화를 위해, 컨트롤러(1200)는 펄스 에너지 계산기(1210), 합산 노드(1220) 및 비례-적분-미분(PID) 컨트롤러(1230)를 포함한다. 펄스 에너지 계산기(1210)는 평균 파워 측정값 P_{AVE} 및 펄스 반복률 f_{rep}로부터 펄스 에너지 E를 계산한다. 펄스 반복률 f_{rep}는 외부 소스/신호로부터 수신되거나 컨트롤러(1200)에서 내부적으로 정의될 수 있다. 합산 노드(1220)는 계산된 펄스 에너지 E와 타겟 펄스 에너지 E_{target} 사이의 차이 ΔE를 평가하고 ΔE의 오류 신호 표시를 생성한다. 그런 다음 PID 컨트롤러(1230)는 ΔE를 줄이기 위해 새로운 V_{low}를 판정하고 출력한다.

[0056] PID 제어는 장치(100) 및 방법(600)에 의해 채용될 수 있는 피드백 알고리즘의 일례일 뿐이다. 대안적으로, 장치(100) 및 방법(600)은 종래 기술 분야에 공지된 다른 피드백 알고리즘을 채용할 수 있다. 따라서, PID 컨트롤러(1230)는 오류 신호를 최소화하기 위해 상이한 원리를 사용하는 다른 형태의 서보 컨트롤러로 대체될 수 있다.

[0057] 펄스 지속 시간 등화를 위해, 컨트롤러(1200)는 파형 분석기(1250) 및 타이밍 신호 생성기(1260)를 포함한다. 파형 분석기(1250)는 레이저 펄스 지속 시간 w를 도출하기 위해 레이저 펄스 파형 $P_{INST}(t)$를 분석한다. 그런 다음 타이밍 신호 생성기(1260)는 이 측정된 레이저 펄스 지속 시간 w를 타겟 펄스 지속 시간 w_{target}과 비교하고, 타이밍 명령 신호(1180)를 조정하여 그 사이의 차이를 최소화한다. 구체적으로, 타이밍 신호 생성기(1260)는 도 6 및 도 7을 참조하여 상술한 바와 같이 지속 시간 Δt를 조정한다. 그런 다음, 타이밍 신호 생성기(1260)는 타이밍 명령 신호(1180)를 RF 드라이버(1100)에 전달한다.

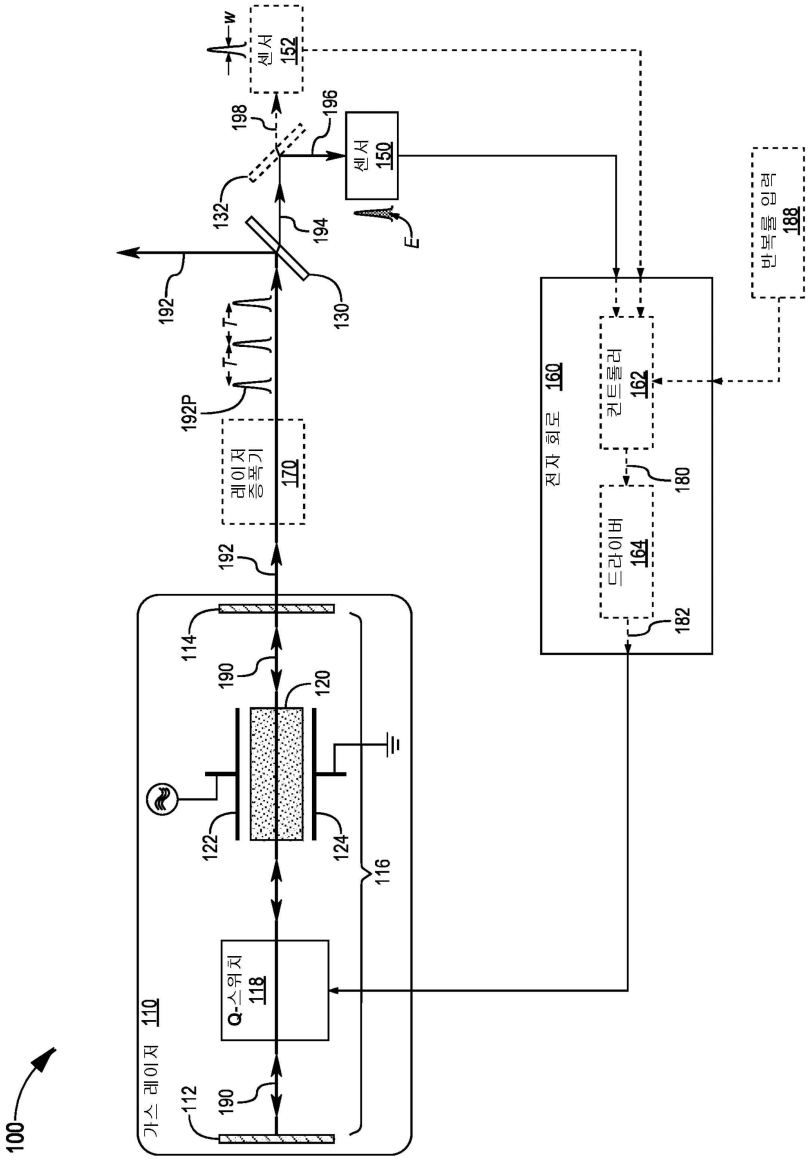
[0058] V_{low} 조정의 각각의 반복은 일련의 레이저 펄스(192P)의 샘플링에 기초하는 반면, 타이밍 명령 신호(1180)의 조정의 각각의 반복은 단일 레이저 펄스(192P)에 기초할 수 있고 따라서 훨씬 더 짧은 시간 규모로 수행될 수 있다.

[0059] 도 7, 10a, 10b, 11a, 11b 및 12에 기초한 상기 논의는 AOM 기반 Q 스위칭과 관련된다. 이러한 실시예는 Q-스위치에 대한 구동 신호를 적절하게 변경함으로써 다른 유형의 Q-스위칭에 대해 수정될 수 있다. 예를 들어, Q-스위치(118)가 EOM인 경우, 위에서 논의된 RF 구동 신호는 DC 구동 신호로 대체된다.

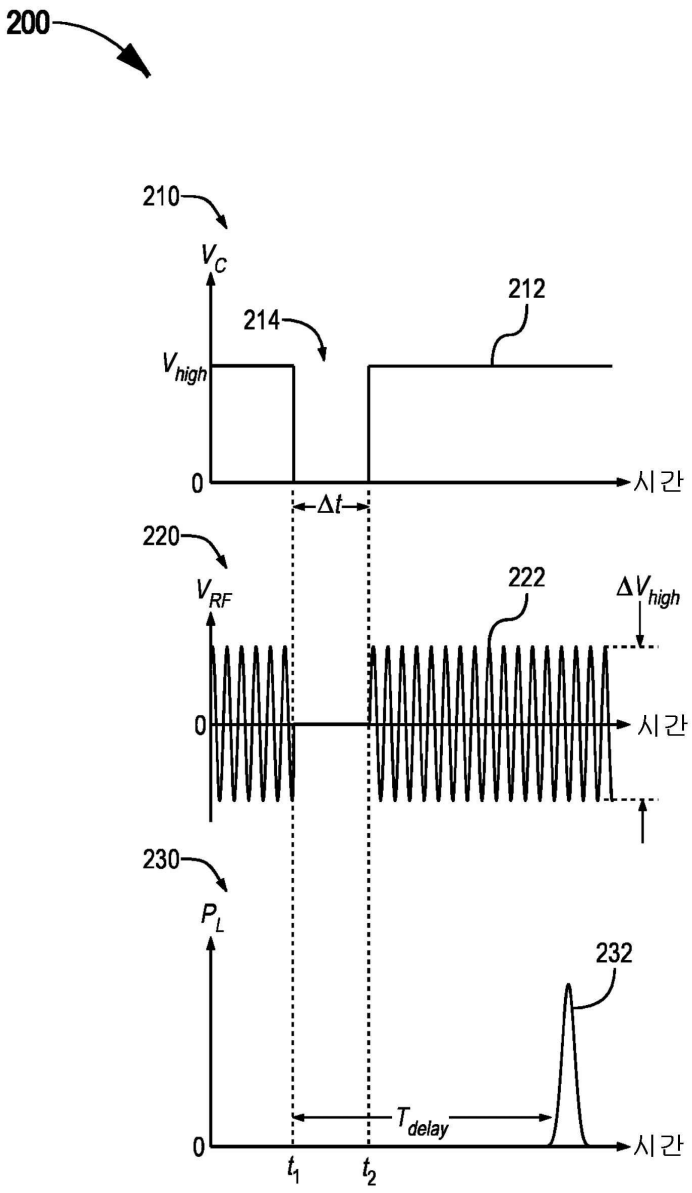
[0060] 본 발명은 바람직한 실시예 및 다른 실시예의 관점에서 위에서 설명되었다. 그러나 본 발명은 본 명세서에 기술되고 도시된 실시예에 제한되지 않는다. 오히려, 본 발명은 여기에 첨부된 청구범위에 의해서만 제한된다.

도면

도면1

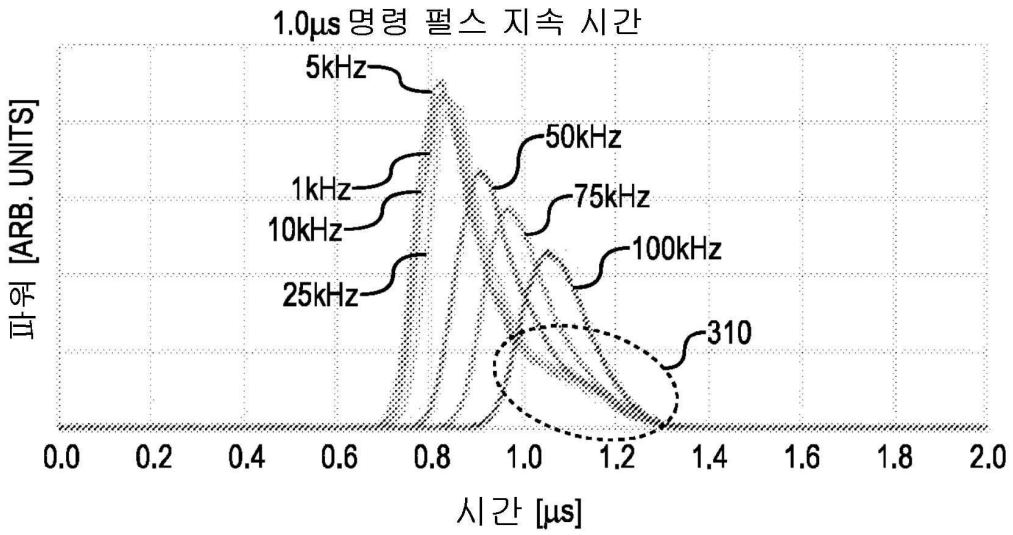


도면2

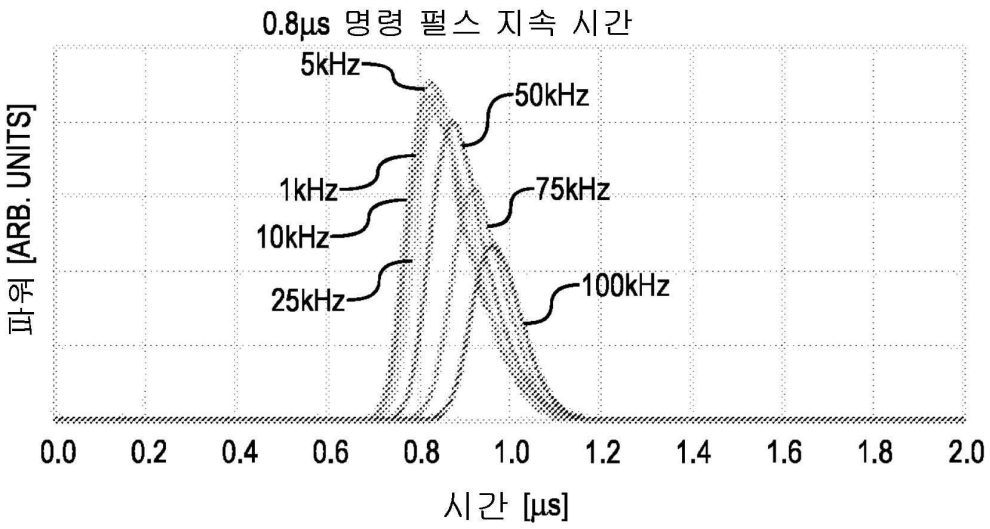

200
210
V_C
214
212
V_{high}
0
시간
Δt
220
V_{RF}
222
ΔV_{high}
0
시간
230
P_L
232
T_{delay}
0
시간
t_1
t_2

(종래 기술)

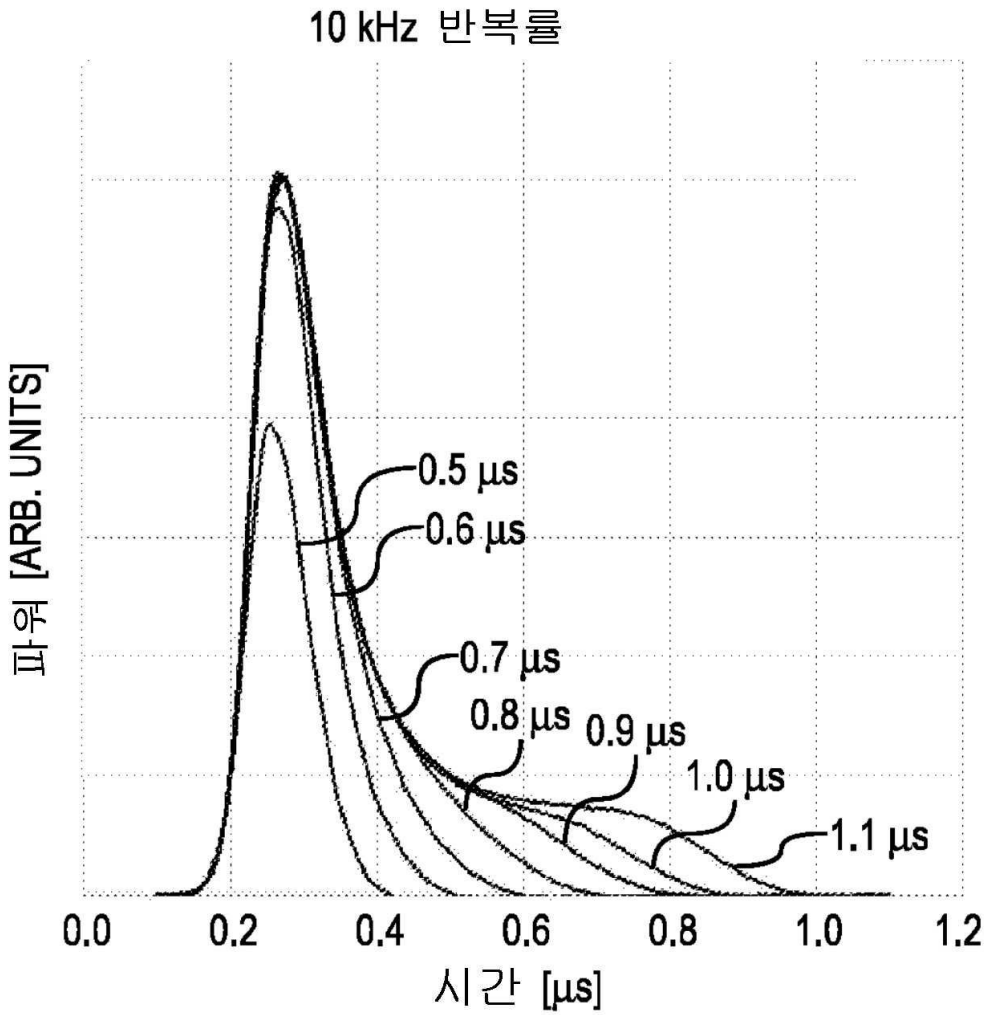
도면3


1.0μs 명령 펄스 지속 시간
5kHz
50kHz
1kHz
75kHz
10kHz
100kHz
25kHz
310
파워 [ARB. UNITS]
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
1.6
1.8
2.0
시간 [μs]

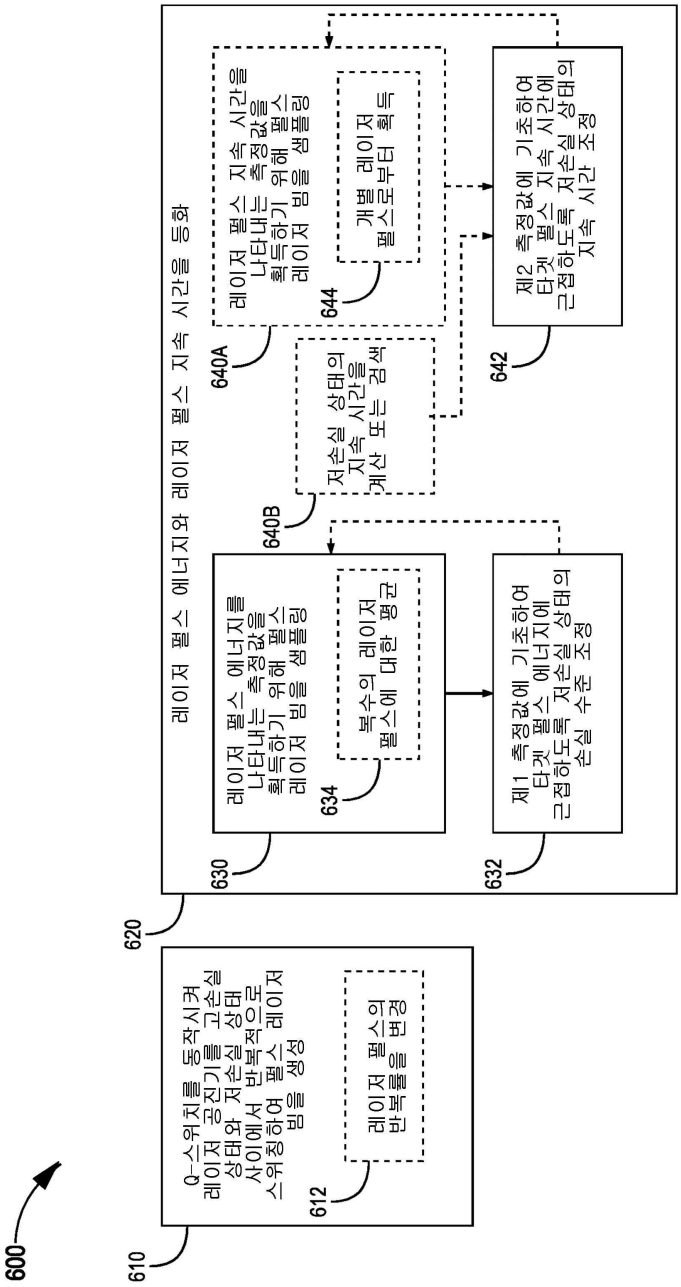
도면4


0.8μs 명령 펄스 지속 시간
5kHz
50kHz
1kHz
75kHz
10kHz
100kHz
25kHz
파워 [ARB. UNITS]
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
1.6
1.8
2.0
시간 [μs]

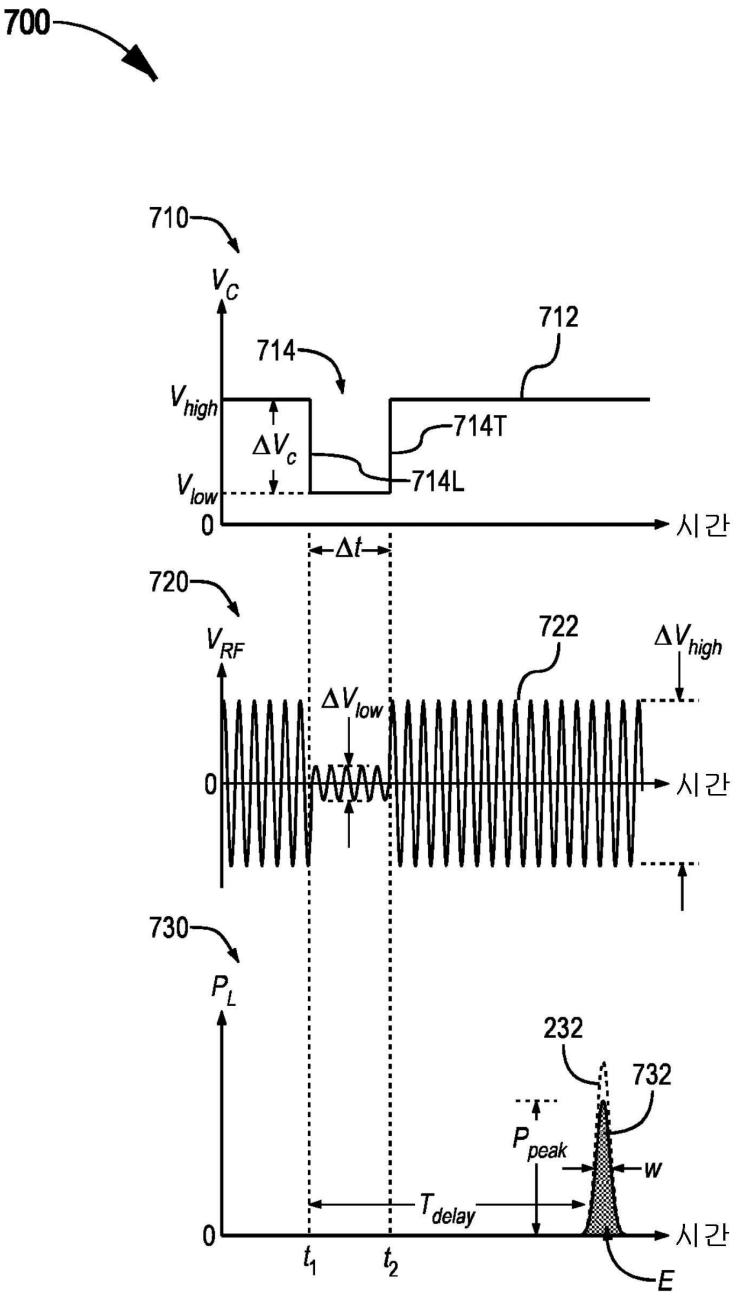
도면5


10 kHz 반복률
파워 [ARB. UNITS]
0.5 μs
0.6 μs
0.7 μs
0.8 μs
0.9 μs
1.0 μs
1.1 μs
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
시간 [μs]

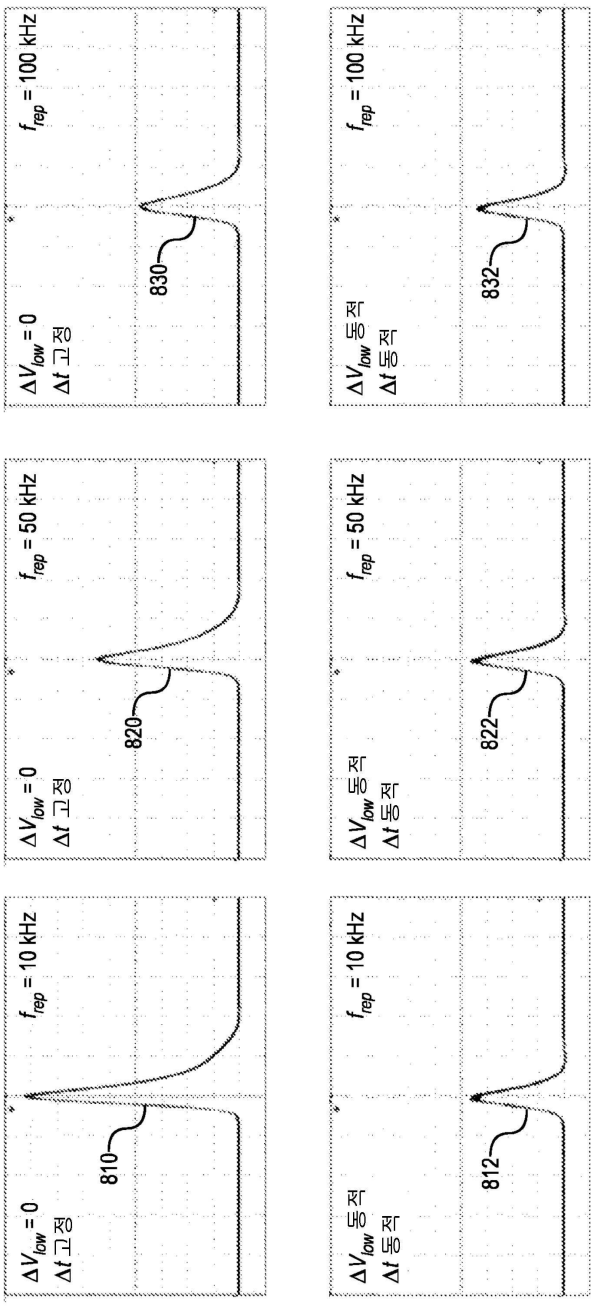
도면6


600
610
Q-스위치를 동작시켜
레이저 공진기를 고손실
상태와 저손실 상태
사이에서 반복적으로
스위칭하여 펄스 레이저
빔을 생성
612
레이저 펄스의
반복률을 변경
620
레이저 펄스 에너지와 레이저 펄스 지속 시간을 등화
630
레이저 펄스 에너지를
나타내는 측정값을
획득하기 위해 펄스
레이저 빔을 샘플링
634
복수의 레이저
펄스에 대한 평균
632
제1 측정값에 기초하여
타겟 펄스 에너지에
근접하도록 저손실 상태의
손실 수준 조정
640B
저손실 상태의
지속 시간을
계산 또는 검색
640A
레이저 펄스 지속 시간을
나타내는 측정값을
획득하기 위해 펄스
레이저 빔을 샘플링
644
개별 레이저
펄스로부터 획득
642
제2 측정값에 기초하여
타겟 펄스 지속 시간에
근접하도록 저손실 상태의
지속 시간 조정

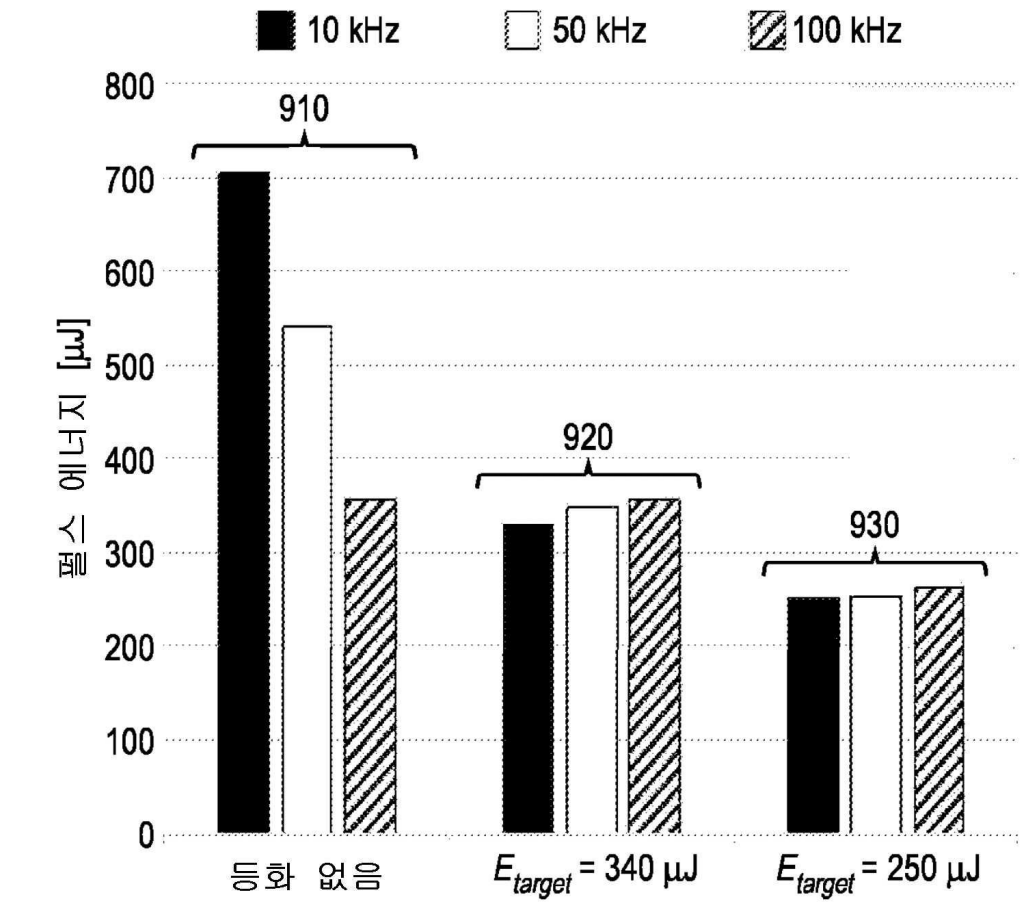
도면7


700
710
V_C
712
714
V_{high}
ΔV_c
714T
714L
V_{low}
0
시간
Δt
720
V_{RF}
722
ΔV_{high}
ΔV_{low}
0
시간
730
P_L
232
732
P_{peak}
w
T_{delay}
0
시간
t_1
t_2
E

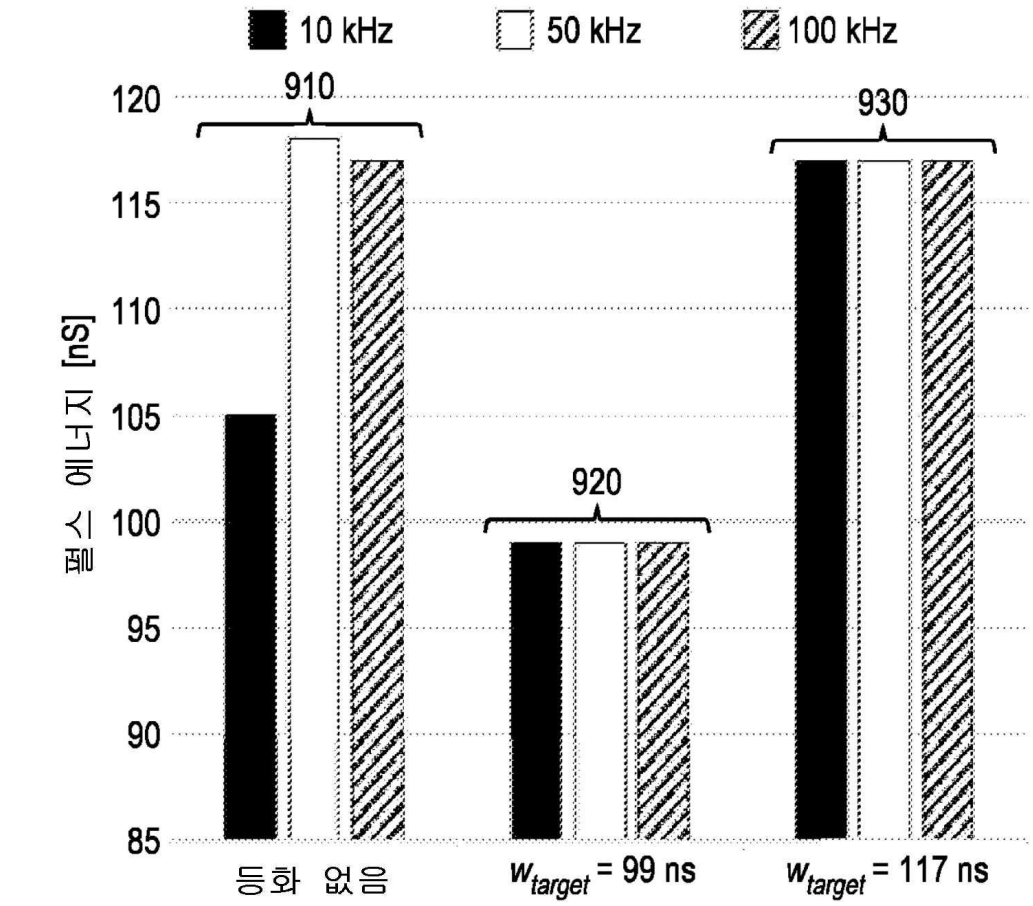
도면8


f_{rep} = 100 kHz
ΔV_{low} = 0
Δt 고정
830
f_{rep} = 100 kHz
ΔV_{low} 동적
Δt 동적
832
f_{rep} = 50 kHz
ΔV_{low} = 0
Δt 고정
820
f_{rep} = 50 kHz
ΔV_{low} 동적
Δt 동적
822
f_{rep} = 10 kHz
ΔV_{low} = 0
Δt 고정
810
f_{rep} = 10 kHz
ΔV_{low} 동적
Δt 동적
812

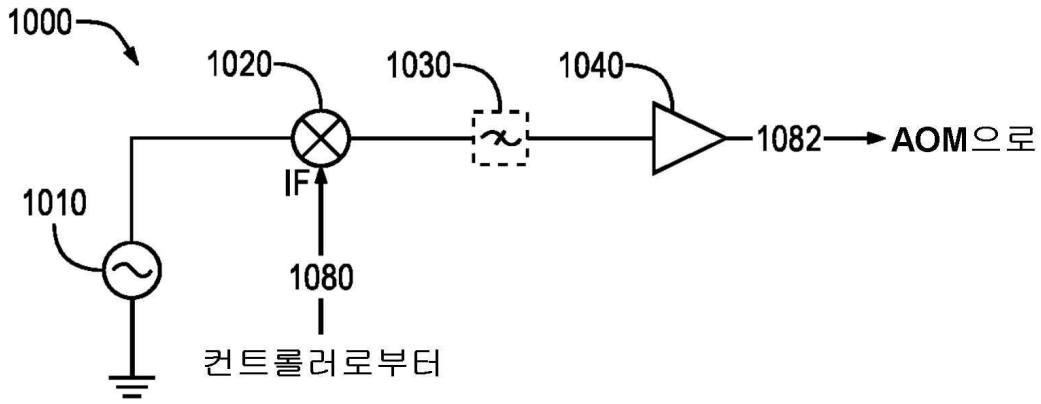
도면9a


10 kHz
50 kHz
100 kHz
800
700
600
500
400
300
200
100
0
펄스 에너지 [μJ]
910
920
930
등화 없음
E_{target} = 340 μJ
E_{target} = 250 μJ

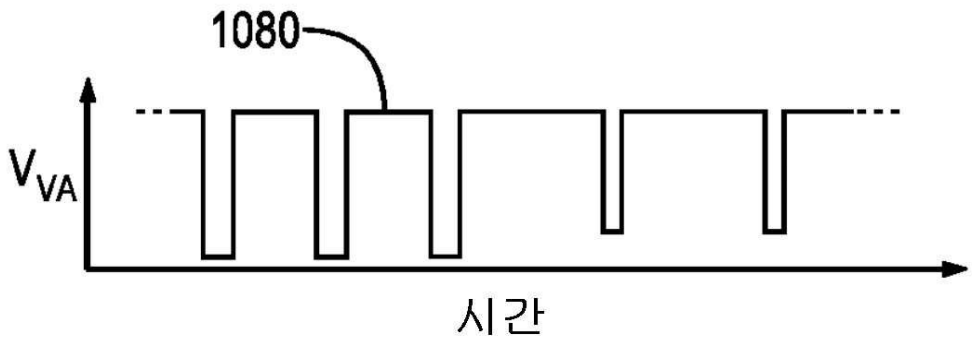
도면9b


10 kHz
50 kHz
100 kHz
910
920
930
120
115
110
105
100
95
90
85
펄스 에너지 [nS]
등화 없음
w_{target} = 99 ns
w_{target} = 117 ns

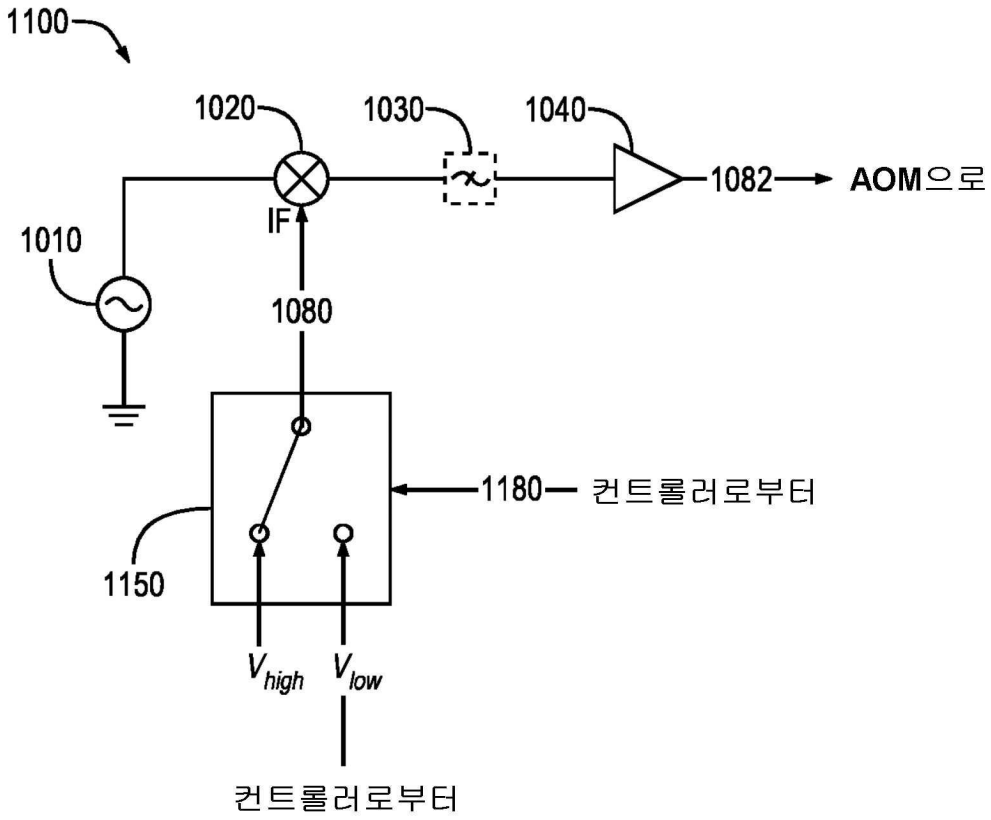
도면10a


1000
1020
1030
1040
1082
AOM으로
IF
1010
1080
컨트롤러로부터

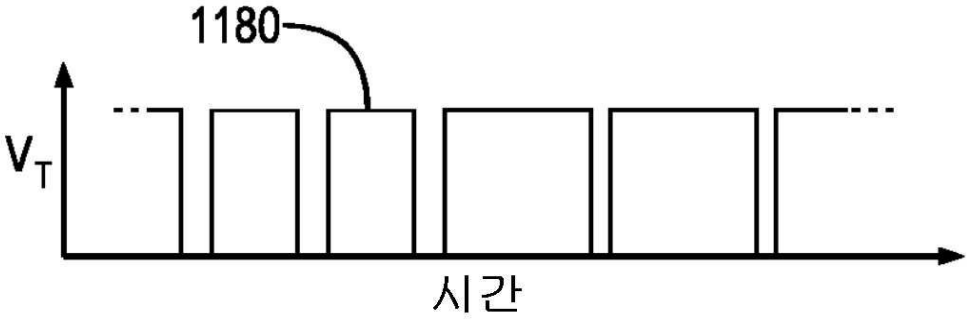
도면10b



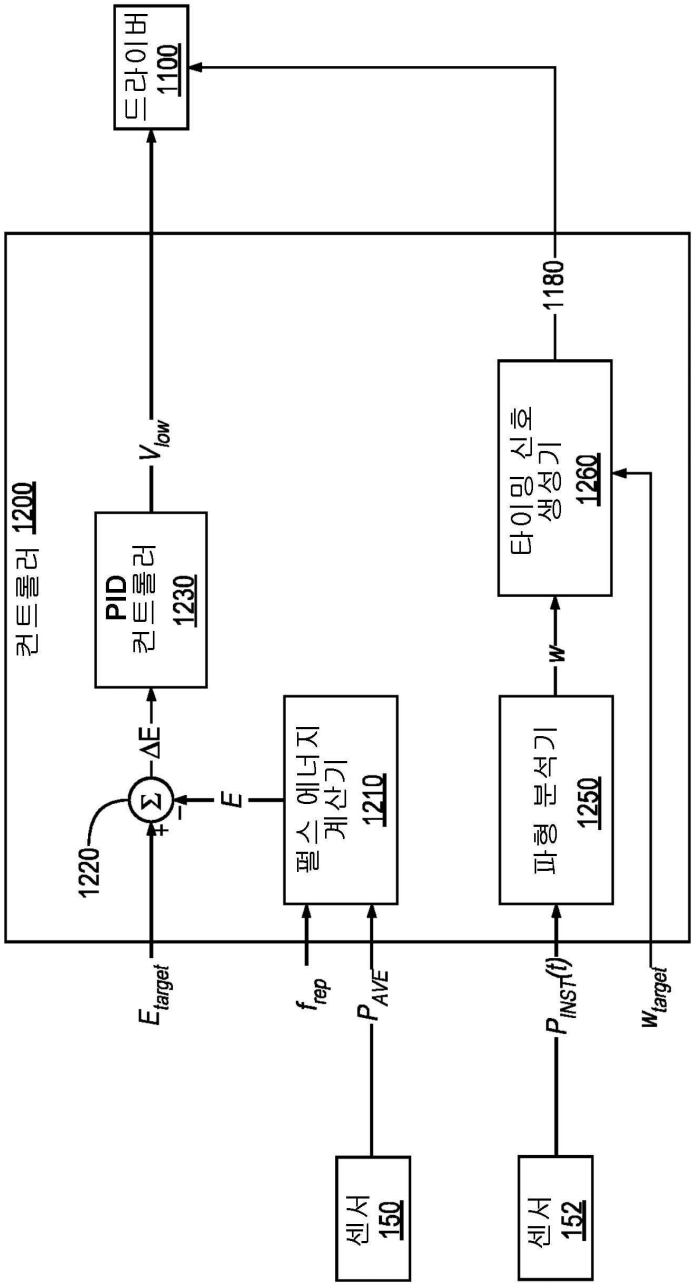
도면11a



도면11b



도면12


드라이버
1100
컨트롤러 1200
PID
컨트롤러
1230
펄스 에너지
계산기
1210
파형 분석기
1250
타이밍 신호
생성기
1260
1180
1220
Σ
+
−
E
ΔE
V_{low}
E_{target}
f_{rep}
P_{AVE}
$P_{INST}(t)$
W_{target}
W
센서
150
센서
152