



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2009-0082934
(43) 공개일자 2009년07월31일

(51) Int. Cl.

G01N 21/27 (2006.01) G01B 7/00 (2006.01)
G01N 13/12 (2006.01) G01N 21/39 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2009-7012899

(22) 출원일자 2007년11월28일

심사청구일자 2009년06월19일

(85) 번역문제출일자 2009년06월19일

(86) 국제출원번호 PCT/JP2007/072988

(87) 국제공개번호 WO 2008/066090

국제공개일자 2008년06월05일

(30) 우선권주장

JP-P-2006-322662 2006년11월29일 일본(JP)

(71) 출원인

도꾸리쓰교세이호징 가가꾸 기쥬쯔 신키꼬 기꼬
일본 사이따마켄 가와구찌시 혼쇼 4쵸메 1방 8코

(72) 발명자

시게카와 히데미
일본 이바라키켄 쓰쿠바시 센겐 2-3-14

다케우치 오사무

일본 이바라키켄 쓰쿠바시 아즈마 3-17-14 세주르
아즈마 208

(74) 대리인

유미특허법인

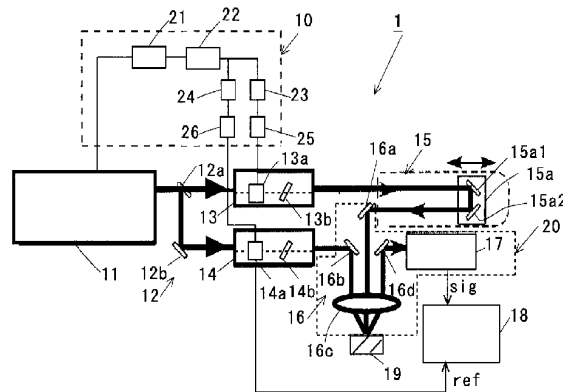
전체 청구항 수 : 총 11 항

(54) 펌프 프로브 측정 장치 및 이것을 사용한 주사 프로브 현미경 장치

(57) 요약

펌프 프로브 측정 장치(1)는, 펌프 광이 되는 제1 초단광 펄스열 및 프로브 광이 되는 제2 초단광 펄스열을 발생시키는 초단광 펄스 레이저 발생부(11)와, 초단광 펄스열의 지연 시간을 조정하는 지연 시간 조정부(15)와, 제1 초단광 펄스열 및 제2 초단광 펄스열 각각을 입사시켜서 임의의 반복 주파수로 1 펄스를 통과시켜서 광 펄스의 실효적인 반복 주파수를 저감시키는 제1 펄스 픽커 및 제2 펄스 픽커(13 및 14)와, 제1 펄스 픽커 및 제2 펄스 픽커(13 및 14)로부터 통과시키는 펄스의 선택 개소를 주기적으로 변경하는 지연 시간 변조부(10)와, 펌프 광 및 프로브 광을 시료(19)에 조사하는 조사 광학계(16)와, 시료(19)로부터의 프로브 신호를 검출하는 측정부(20)와, 라인 검출부(18)를 구비한다.

도 1



특허청구의 범위

청구항 1

펄프 광이 되는 제1 초단광(超短光) 펄스열(列) 및 프로브 광이 되는 제2 초단광 펄스열을 발생시키는 초단광 펄스 레이저 발생부;

상기 제1 초단광 펄스열 및 상기 제2 초단광 펄스열의 지연 시간을 조정하는 지연 시간 조정부;

상기 제1 초단광 펄스열 및 상기 제2 초단광 펄스열 각각을 입사시켜서 임의의 반복 주파수로 1 펄스를 투과시킴으로써 광 펄스의 실효적인 반복 주파수를 저감시키는 제1 펄스 픽커 및 제2 펄스 픽커;

상기 제1 펄스 픽커 및 상기 제2 펄스 픽커에 의해 통과시키는 광 펄스의 선택 개소를 주기적으로 변경하는 지연 시간 변조부;

상기 펄프 광 및 상기 프로브 광을 시료에 조사하는 조사 광학계를 가지고, 상기 시료로부터의 프로브 신호를 검출하는 측정부; 및

상기 시료로부터의 상기 프로브 신호를 상기 지연 시간 변조부에서의 변조 주파수로 위상 민감 검출(phase sensitive detection)하는 락인(lock-in) 검출부

를 구비하고,

상기 제1 펄스 픽커 또는 상기 제2 펄스 픽커가, 투과시킬 광 펄스의 선택 개소를 변경함으로써 상기 제2 펄스 픽커 또는 상기 제1 펄스 픽커를 투과한 광 펄스 사이의 지연 시간을 변조시키는, 펄프 프로브 측정 장치.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 펄스 픽커가 포켈스 셀(Pockels cell)과 편광자를 포함하고, 임의의 광 펄스를 투과 또는 차단하는, 펄프 프로브 측정 장치.

청구항 3

제1항 또는 제2항에 있어서,

상기 지연 시간 변조부가, 상기 초단광 펄스 레이저 발생부로부터 발생한 광 펄스를 검출하는 광 검출기, 상기 광 검출기로부터의 펄스 신호를 카운트하는 카운트 수단, 상기 카운트 수단에 접속되는 지연 수단 및 상기 펄스 픽커의 구동 수단으로 구성되어 있는, 펄프 프로브 측정 장치.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 초단광 펄스 레이저 발생부가 티탄 사파이어 레이저 발진기로 이루어지는 레이저 광원을 포함하여 구성되는, 펄프 프로브 측정 장치.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 지연 시간 조정부가 가동 미러에 의한 광로 길이의 조정을 이용한 광학계에 의해 구성되어 있는, 펄프 프로브 측정 장치.

청구항 6

제1항 또는 제4항에 있어서,

상기 초단광 펄스 레이저 발생부가,

1개의 초단광 펄스 레이저 광원과, 상기 초단광 펄스 레이저 광원에서 발생하는 초단광 펄스를 2개로 분할하여 펄프 광과 프로브 광을 형성하는 광학 부재를 포함하는, 펄프 프로브 측정 장치.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 초단광 펄스 레이저 발생부가 2개의 초단광 펄스 레이저 광원을 포함하고, 각각의 초단광 펄스 레이저 광원에서 발생하는 초단광 펄스를 각각 펌프 광 및 프로브 광으로서 대응하는 펄스 픽커에 입사시키는, 펌프 프로브 측정 장치.

청구항 8

제6항 또는 제7항에 있어서,

상기 초단광 펄스 레이저 광원이 캐비티 댐퍼(cavity damper)를 포함하는, 펌프 프로브 측정 장치.

청구항 9

제1항에 있어서,

상기 측정부가 펌프 광과 프로브 광을 시료 표면 상에 조사하는 광학계와 상기 프로브 광의 반사 광 강도를 측정하는 광학계를 포함하여 구성되며, 상기 프로브 광의 반사 광 강도를 프로브 신호로서 출력하는, 펌프 프로브 측정 장치.

청구항 10

제 1항 내지 제 9항 중 어느 한 항에 기재된 펌프 프로브 측정 장치를 포함하고,

상기 측정부가, 펌프 광과 프로브 광이 조사된 위치의 국소적인 물성을 측정하는 주사 터널 현미경을 더 포함하고, 상기 주사 터널 현미경에 의해 얻어진 프로브 신호를 출력하는, 주사 프로브 현미경 장치.

청구항 11

제 1항 내지 제 9항 중 어느 한 항에 기재된 펌프 프로브 측정 장치를 구성 요소의 하나로서 포함하는 각종 측정 장치.

명세서

기술분야

<1> 본 발명은, 초고속 물리 현상을 계측하고 해석하기 위한 펌프 프로브 측정 장치 및 이 측정 장치를 이용한 주사 프로브 현미경 장치에 관한 것이며, 보다 상세하게는, 펄스 픽커(pulse picker)를 사용한 직사각형파적인 지연 시간 변조에 의한 펌프 프로브 측정 장치 및 이 측정 장치를 이용한 주사 프로브 현미경 장치에 관한 것이다.

배경기술

<2> 종래, 피코 세컨드(ps)나 펨토 세컨드(fs)의 매우 짧은 시간 영역의 현상을 측정하기 위해서는, 거의 유일한 수단으로서, 극단 펄스 레이저 광을 사용한 펌프 프로브법이 알려져 있다. 이와 같은 펌프 프로브법에는 다양한 실현 형태가 있지만, 어느 경우에도, 펌프 광이 시료를 여기(勵起)시킨 후 프로브 광이 시료 상태를 검출할 때 까지의 시각의 차이를 지연 시간으로 하고, 프로브 광에 의해 얻어지는 신호를 지연 시간의 함수로서 측정함으로써 광 여기에 대한 시료의 초고속 응답을 펨토 세컨드 영역의 높은 시간 분해능으로 측정하도록 되어 있다.

<3> 그러나, 일반적으로 이와 같은 측정 방법으로 얻어지는 신호 강도는 미약하므로, 원하는 신호를 노이즈 중에서 추출하기 위해서는 변조 측정을 행할 필요가 있다. 여기서, 변조 측정으로서 가장 일반적인 것은, 펌프 광 강도를 변조하는 방법이 있으며, 프로브 광의 반사율을 시간 분해 측정하는 연구에 있어서 많은 성과를 거두고 있다.

<4> 그런데, 측정 환경에 따라서는, 고회도의 펌프 광의 강도를 변조함으로써 시료 온도가 상승과 하강을 반복하게 되며, 이와 같은 온도 변화가 측정에 악 영향을 미칠 수 있다. 특히, 펌프 프로브법과 주사 프로브 현미경을 조합시켜서 시간 및 공간의 양 영역에서 극한의 분해능을 가지는, 이른바 시간 분해형의 주사 프로브 현미경 장치를 구성하고자하는 일련의 연구에서 이 점이 문제로 되어 있다.

- <5> 이에 비해, 광 강도를 변조하지 않는 방법으로서 지연 시간 변조 방식이 알려져 있다. 종래형의 지연 시간 변조 방식에서는, 펄프 광의 광로 도중에 놓여진 미러의 위치를 물리적으로 이동시킴으로써 광로 길이를 변경하여, 프로브 광 사이의 지연 시간을 조절한다. 그러므로, 지연 시간 변조 방식에서는, 미러를 물리적으로 움직이기 위한 구동 기구의 제한에 의해, 미러 위치의 이동이 한정되므로, 지연 시간의 설정 범위가 예를 들면 1 나노 세컨드 이하로 한정되며, 지연 시간의 변동 폭이, 예를 들면 100 피코 세컨드 이하로 한정된다. 또한, 대진 폭에서의 고주파수의 변조를 할 수 없어서, 예를 들면 20Hz 이하로 한정된다. 따라서, 예를 들면 수백 피코 세컨드 이상의 완화 시간을 가지는 현상을 측정하기는 곤란하다. 또한, 미러 위치의 기계적 이동이 광학대(光學臺)에 대해서 진동을 부여함으로써, 광축이 어긋나는 등에 의해 측정 정밀도가 저하된다.
- <6> 특히, 이 지연 시간 변조 방식에서는 신호 강도가 변조 진폭에 비례하기 때문에, 미소하면서 완전한 완화 과정을 측정하기 위해서는, 변조 진폭을 크게 할 필요가 있다.
- <7> 그러나, 변조 진폭의 증대는, 변조 주파수의 저하에 의한 노이즈 진폭의 증대에 더하여, 출력 신호가 변조 진폭 구간에 걸친 평균값이 되므로 시간 분해능의 저하를 초래하게 된다. 또한, 이 지연 시간 변조 방식에서는, 기본적으로 미분 신호를 측정하게 되어, 신호의 절대값을 알지 못하며, 물리적 해석이 난해해지는 경향이 있다.
- <8> 한편, 시료나 측정계 온도의 상승이나 하강을 일으키지 않는 이점을 살려서, 이 종래형의 지연 시간 변조 방식과 주사 프로브 현미경을 조합한 지연 시간 변조형의 주사 프로브 현미경이 개발되고, 일정한 성과를 올려왔다.
- <9> 또한, 최근 고안된 새로운 지연 시간 변조 방법으로서, 2개의 레이저 발진기를 정확하게 미소량 만큼 상이한 반복 주파수로 발진시켜서, 각각의 레이저를 펄프 광, 프로브 광으로서 사용하는 방법이 고안되었다. 이 때, 반복 주파수의 차분에 해당하는 주파수로 지연 시간이 제로(0)로부터 반복 주기까지 고속으로 스캐닝되고, 프로브 신호를 상기 반복 주파수의 차분에 해당하는 주파수에 동기하여 기록하고, 평균함으로써, 기계적인 미러 위치의 변경을 행하지 않고 큰 지연 시간 영역까지 용이하게 측정할 수 있고, 신호의 절대값을 측정할 수 있게 되었다. 또한, 이 방법에서는 변조 주파수도 높게 할 수 있으므로, 전술한 각종 다른 방법에 비해 우수하다.
- <10> [비특허 문헌 1]: A.Bartels, Appl. Phys. Lett. 88, 041117(2006)

발명의 상세한 설명

- <11> [발명이 해결하려고 하는 과제]
- <12> 그러나, 이 새로운 지연 시간 변조 방식의 장점을 살리기 위해서는, 비교적 광 대역의 프로브 신호 검출기가 필요하게 된다. 프로브 신호 검출기의 대역이 좁은 경우에는, 2개의 레이저의 반복 주파수의 차이인 변조 주파수를 극단적으로 저감시킬 필요가 있고, 노이즈 강도의 증대를 초래한다. 또한, 이 새로운 지연 시간 변조 방식에 있어서는, 고가의 레이저 발진기가 반드시 2대 필요하고, 또한 이들 2대의 레이저 발진기를 서로 동기시켜서 발진시킬 필요가 있으므로, 장치 전체의 가격이 매우 고가로 된다.
- <13> 이와 같은 사정에 의해, 보다 염가로, 넓은 측정 영역 및 높은 검출 감도를 가지고, 주사 프로브 현미경과의 연계를 포함하는 특수한 측정 환경에 대한 적응력을 가진 펄프 프로브 측정 장치를 필요로 하고 있다.
- <14> 전술한 과제를 해결하기 위해, 본 발명의 목적은, 펄스 레이저를 사용한 펨토 세컨드 영역을 포함하는 시간 분해 측정에 있어서, 조사광 강도를 변조하지 않고, 즉 열의 영향을 받지 않고, 완화 시간이 짧은 현상부터 긴 현상까지의 넓은 측정 범위에 걸쳐, 미약한 신호를 고 정밀도로 안정적으로 계측할 수 있도록 한, 초고속 물리 현상을 계측하고 해석하기 위한 펄프 프로브 측정 장치 및 이 측정 장치를 사용한 시간 분해형의 주사 프로브 현미경 장치를 제공하는 것에 있다.
- <15> [문제점을 해결하기 위한 수단]
- <16> 전술한 목적을 달성하기 위해, 본 발명의 펄프 프로브 측정 장치는, 펄프 광이 되는 제1 초단광(超短光) 펄스열(列) 및 프로브 광이 되는 제2 초단광 펄스열을 발생시키는 초단광 펄스 레이저 발생부와, 제1 초단광 펄스열 및 제2 초단광 펄스열의 지연 시간을 조정하는 지연 시간 조정부와, 제1 초단광 펄스열 및 제2 초단광 펄스열 각각을 입사시켜서 임의의 반복 주파수로 1 펄스를 투과시킴으로써 광 펄스의 실질적인 반복 주파수를 저감시키는 제1 펄스 픽커 및 제2 펄스 픽커와, 펄스 픽커에 의해 통과시키는 광 펄스의 선택 개소를 주기적으로 변경하는 지연 시간 변조부와, 펄프 광 및 프로브 광을 시료에 조사하는 조사 광학계를 가지고, 시료로부터의 프로브 신호를 검출하는 측정부와, 시료로부터의 프로브 신호를 지연 시간 변조부에서의 변조 주파수로 위상 민감 검출

(phase sensitive detection)하는 락인(lock-in) 검출부를 구비하고, 제1 펄스 픽커 또는 제2 펄스 픽커가, 통과시킬 펄스의 선택 개소를 변경함으로써 제2 펄스 픽커 또는 제1 펄스 픽커를 통과한 광 펄스 사이의 지연 시간을 변조시킨다.

- <17> 전술한 구성에 의하면, 초단광 펄스 레이저 장치에 의해 연속적으로 발생하는 레이저 펄스로부터, 각각 펄스 픽커에 의해 펄프 광 및 프로브 광의 펄스를 통과하고, 차단하는 타이밍을 주기적으로 변화시킴으로써 고속이면서 큰 지연 시간 변화를 얻을 수 있다.
- <18> 본 발명에서는 펄프 광 강도를 변조하는 방식을 이용하고 있지 않으므로, 측정 중의 온도 변화에 민감한 시료라도, 시료 온도가 상승이나 하강을 반복하지 않고, 시료에 악 영향을 미치지 않는다. 이로써, 광범위한 분야에서의 시료의 측정을 행할 수 있게 된다.
- <19> 본 발명에 의하면, 레이저 장치로부터 발생하는 광 펄스를, 펄스 픽커에 의해 통과 및 차단하여, 비교적 긴 반복 주기로 광 펄스를 통과시킴으로써, 레이저 장치의 반복 주기보다 긴, 예를 들면 1 μ s 정도까지의 완화 시간을 가지는 물리 현상을 용이하게 측정할 수 있다. 광 펄스의 반복 주파수를 넘어 매우 큰 지연 시간 영역까지 측정이 가능하므로, 여기 상태의 프로브 신호와 시료가 완전히 완화된 후의 프로브 신호를 비교할 수 있다. 결과적으로 신호의 미분값 뿐만 아니라, 신호의 절대값을 얻을 수 있으므로, 물리적 해석이 용이하게 된다. 또한, 장거리에 걸친 미러 위치의 이동이 불필요하므로 출력 레이저의 광축이 어긋나지 않고, 높은 측정 정밀도를 얻을 수 있다.
- <20> 본 발명에 의하면, 변조 진폭을 크게 할 수 있으므로, 신호 강도가 종래형의 지연 시간 변조 방식에 비해 수배 내지 수십배까지 증대한다. 또한, 본 발명에 따르면, 변조 주파수의 고주파수화(高周波數化)에 의해, 수십 피코 세컨드 이상의 낮은 완화 과정을 측정할 경우의 노이즈 강도가, 예를 들면 1/2 내지 1/10 정도까지 저하되므로, 이른바 S/N비가, 예를 들면 50 내지 100배 정도로 향상된다.
- <21> 전술한 구성에 있어서, 펄스 픽커는, 바람직하게는 포켈스 셀(Pockels cell)과 편광자로 구성되어 있고, 임의의 광 펄스를 통과 또는 차단하도록 구성되어 있다. 지연 시간 변조부는, 바람직하게는, 초단광 펄스 레이저 발생부로부터 발생한 광 펄스를 검출하는 광 검출기와, 광 검출기로부터의 펄스 신호를 카운트하는 카운트 수단과, 카운트 수단에 접속되는 지연 수단과, 펄스 픽커의 구동 수단으로 구성되어 있다.
- <22> 이 구성에 의하면, 임의의 펄스를 용이하게 통과 또는 차단할 수 있다.
- <23> 전술한 구성에 있어서, 초단광 펄스 레이저 발생부는, 티탄 사파이어 레이저 발진기로 이루어지는 레이저 광원을 포함하여 구성된다. 이 구성에 의하면, 예를 들면 파장 800nm이며 펄스 폭 25fs인 레이저 펄스를, 100MHz 정도의 반복 주파수로 발생시킬 수 있으므로, 용이하게 초단광 펄스 레이저를 얻을 수 있다.
- <24> 지연 시간 조정부가 가동 미러에 의한 광로 길이의 조정을 이용한 광학계에 의해 구성되어 있으면, 종래와 동일한 지연 시간 조정부를 사용하여, 지연 시간의 조정을 행할 수 있고, 장거리의 미러 이동이 불필요하므로, 시료에 조사되는 펄스 광의 광축으로부터의 어긋남이 실질적으로 발생하지 않고, 측정 정밀도가 향상된다.
- <25> 초단광 펄스 레이저 발생부가, 1개의 초단광 펄스 레이저 광원과, 이 초단광 펄스 레이저 광원에서 발생하는 초단광 펄스를 2개로 분할하여 펄프 광과 프로브 광을 형성하는 광학 부재를 구비하고 있는 경우는, 광원으로서 1개의 초단광 펄스 레이저 장치만 필요하므로, 구성이 간단해져서 장치 전체의 비용이 저감된다.
- <26> 초단광 펄스 레이저 발생부가, 2개의 초단광 펄스 레이저 광원을 구비하고 있고, 각 초단광 펄스 레이저 광원에서 발생하는 초단광 펄스를 각각 펄프 광 및 프로브 광으로 하여 대응하는 펄스 픽커에 입사시키는 구성인 경우는, 같은 주기로 발생하는 2개의 초단광 펄스 레이저 광원을 이용하면, 각 펄스 픽커에 입사되는 광을 분할할 필요가 없기 때문에, 시료에 조사되는 광 펄스의 강도를 높이고, 펄프 광과 프로브 광의 위상을 용이하게 시프트시킬 수 있다. 2개의 초단광 펄스 레이저 광원의 파장이 상이한 경우에는, 펄프 광과 프로브 광을 서로 상이한 파장으로 할 수 있다. 또한, 2개의 레이저 장치의 동기 발진 제어 기구를 구비하고 있는 경우에는, 펄프 광과 프로브 광의 발진하는 위상을 적절하게 설정함으로써, 반복 주기까지의 지연 시간을 용이하게 설정할 수 있다. 따라서, 이와 같은 2개의 초단광 펄스 레이저 광원과 펄스 픽커에 의해 지연 시간을 조절할 수 있으므로, 초단광 펄스 레이저 광원이 1개인 경우에 필요한 지연 시간 조정부를 생략할 수도 있다.
- <27> 초단광 펄스 레이저 광원에 캐비티 댐퍼(cavity damper)를 사용하는 경우는, 초단광 펄스 레이저 광원으로부터의 광 펄스의 반복 주파수를 저하시킴으로써, 각각의 광 펄스의 강도를 높일 수 있다. 이로써, 평균 강도를 대폭 저하시키지 않고, 반복 주파수를 저하시킬 수 있다. 펄스 픽커의 동작 주파수가 1MHz 정도로 제한될 경우에

는, 펄프 광 및 프로브 광의 광 강도를 높일 수 있다.

- <28> 상기 측정부는, 바람직하게는, 펄프 광과 프로브 광을 시료 표면 상에 조사하는 광학계와, 프로브 광의 반사 광 강도를 측정하는 광학계를 포함하여 구성되며, 프로브 광의 반사 강도를 프로브 신호로서 출력한다. 전술한 구성에 의하면, 펄프 광에 의해 여기된 시료 표면이 완화되어 갈 때의 시료 표면의 반사율 변화를, 프로브 광의 반사 광 강도의 변화로서 관측할 수 있다.
- <29> 본 발명의 주사 프로브 현미경 장치는, 전술한 어느 하나의 펄프 프로브 측정 장치를 구비하고, 측정부는, 또한 펄프 광과 프로브 광이 조사된 위치의 국소적인 물성을 측정하는 주사 터널 현미경을 구비하고 있고, 주사 터널 현미경에 의해 얻어진 프로브 신호를 출력한다.
- <30> 본 발명의 측정 장치는, 전술한 어느 하나의 펄프 프로브 측정 장치를 구성 요소의 하나로서 구비하고 있다.
- <31> 전술한 구성에 의하면, 펄프 광에 의해 여기되고 시료 표면이 완화되어 갈 때의 시료 표면의 여기 과정이나 완화 과정 등을, 옴스트롬(A) 내지 나노 미터 정도의 높은 공간 분해능으로 관측할 수 있는, 지연 시간 변조형이며, 펨토 세컨드 오더의 시간 분해능을 가지는 주사 프로브 현미경 장치를 실현할 수 있다. 또한, 본 발명의 펄프 프로브 측정 장치를 구비한 측정 장치를 실현할 수 있다.
- <32> [발명의 효과]
- <33> 본 발명에 의하면, 펄스 레이저를 사용한 펨토 세컨드 영역을 포함하는 시간 분해 측정에 있어서, 조사광 강도를 변조하지 않고, 완화 시간이 짧은 현상으로부터 긴 현상까지의 넓은 측정 범위에 걸쳐, 미약한 신호를 고정밀도로 안정적으로 측정할 수 있도록 한, 초고속 물리 현상을 측정하고 해석하기 위한 펄프 프로브 측정 장치 및 이 측정 장치를 이용한 시간 분해형의 주사 프로브 현미경 장치가 제공된다.

실시예

- <62> 이하, 도면에 나타난 실시형태에 기초하여 본 발명을 상세하게 설명한다. 각 도면에서 동일 또는 대응하는 부재에는 동일한 부호를 사용한다.
- <63> 처음에, 본 발명의 제1 실시형태에 따른 지연 시간 변조식 펄프 프로브 측정 장치에 대하여 설명한다.
- <64> 도 1은, 본 발명에 따른 지연 시간 변조식 펄프 프로브 측정 장치의 제1 실시형태의 구성을 나타내고 있다. 도 1에서, 지연 시간 변조식 펄프 프로브 측정 장치(1)는, 펄프 광이 되는 제1 초단광 펄스열(列) 및 프로브 광이 되는 제2 초단광 펄스열을 발생시키기 위한 레이저 광원(11)을 포함하는 초단광 펄스 레이저 발생부와, 분기 광학계(12)와, 제1 펄스 픽커(13)와 제2 펄스 픽커(14)로 이루어지는(2)의 펄스 픽커와, 이들 펄스 픽커(13, 14)에 의해 통과시키는 광 펄스의 선택 개소를 주기적으로 변경하는 지연 시간 변조부(10)와, 지연 시간 조정부(15)와, 조사 광학계(16)를 가지고, 피 측정물이 되는 시료(19)로부터의 프로브 신호를 검출하는 측정부(20)와, 이 측정부(20)에 접속되는 락인 검출부(18)를 포함하여 구성되어 있다.
- <65> 레이저 광원(11)은, 예를 들면 펨토 세컨드 펄스의 레이저 광원이다. 구체적으로는, 예를 들면 파장 800nm, 시간 폭 25fs 정도의 레이저 펄스를 100MHz 정도의 반복 주파수로 발생시키고, 평균 휘도 1W 정도의 티탄 사파이어 레이저 발진기를 사용할 수 있다.
- <66> 분기 광학계(12)는, 레이저 광원(11)의 레이저 펄스의 출사 광로 중에 경사지게 배치된 하프 미러(12a)를 포함하고 있고, 레이저 광원(11)으로부터의 레이저 펄스가, 이 하프 미러(12a)의 투과 광 및 반사 광으로 분기될 수 있도록 되어 있다.
- <67> 여기서, 하프 미러(12a)에 의한 투과 광은 펄프 광으로서, 또한 반사 광은 프로브 광으로서 이용되도록 되어 있지만, 이와 반대라도 된다. 하기의 설명에서는, 투과 광을 펄프 광, 반사 광을 프로브 광으로서 설명한다.
- <68> 도시의 경우, 분기 광학계(12)는, 반사 광의 광로 중에 배치된 반사 미러(12b)를 포함하고 있고, 상기 반사 광을 제2 펄스 픽커(14)에 안내하도록 구성되어 있다.
- <69> 펄스 픽커(13, 14)는, 분기 광학계(12)로부터의 펄프 광이 도입되는 제1 펄스 픽커(13)와 분기 광학계(12)로부터의 프로브 광이 도입되는 제2 펄스 픽커(14)로 이루어지고, 예를 들면 100MHz의 높은 반복 주파수로 입사하는 레이저 펄스열로부터 임의의 주기로 1 펄스만을 선택적으로 투과시키고, 나머지를 차단시키도록 구성되어 있다. 이 때 차단되는 광과 투과하는 광의 강도 비는 300:1 ~ 1000:1 정도로 충분히 높은 것이 바람직하다.
- <70> 제1 펄스 픽커(13)와 제2 펄스 픽커(14)는 동일한 구성이며 되고, 각각 단일 광 펄스를 추출할 수 있으면 다양

하게 구성할 수 있다. 도시한 경우에는, 펄스 픽커(13, 14)는, 각각 인가 전압에 의해 광 펄스의 편광을 회전시키는 전기 광학 소자(13a, 14a)와 전기 광학 소자(13a, 14a)의 출력 측에 배치되는 편광자(13b, 14b)로 구성되어 있다. 도시한 경우에는, 1개의 편광자(13b)를 출력 측에 설치하고 있지만, 편광자를 전기 광학 소자(13a)의 광의 입력 측과 출력 측에 각각 설치해도 된다. 전기 광학 소자(13a, 14a) 대신 음향 광학 소자로 펄스 픽커(13, 14)를 구성하는 경우에는 편광자(13b, 14b)는 불필요하게 된다. 전기 광학 소자(13a, 14a)는, 후술하는 지연 시간 변조부(10)에 의해 각각 구동되고, 나노 세컨드 정도의 고속의 스위칭을 행한다. 충분히 높은 반복 주파수로 1 펄스씩 투과시키기 위해, 예를 들면, 1MHz 정도까지의 동작 주파수를 선택 가능한 것이 바람직하다. 따라서, 각 펄스 픽커(13, 14)는, 예를 들면 포켈스 셀을 사용할 수 있고, 예를 들면 100 펄스 중 99 펄스를 차단하고, 1 펄스를 투과하도록 동작할 수 있도록 되어 있다.

- <71> 이로써, 레이저 광원(11)의 실효적인 펄스의 반복 주파수가 펄스 픽커(13, 14)에 의해 100MHz에서 1MHz로, 그 평균적인 레이저광 강도가 1W에서 10mW로 저하된다. 그리고, 펄스 픽커(13, 14)에 의한 광 펄스의 통과 타이밍에 대해서는, 도 2를 참조하여 후술한다.
- <72> 지연 시간 변조부(10)는, 펄스 픽커(13, 14)를 통과하는 광 펄스의 선택 개소를 주기적으로 변경한다. 예를 들면, 도 1에 나타난 지연 시간 변조부(10)는, 초단광 펄스 레이저 발생부(11)로부터 발생한 광 펄스를 검출하는 광 검출기(21)와, 이 광 검출기(21)로부터의 펄스 신호를 카운트하는 카운트 수단(22)과, 카운트 수단(22)에 접속되는 제1 및 제2 지연 수단(23 및 24)과, 펄스 픽커(13, 14)를 구동하는 구동 수단(25, 26)으로 구성되어 있다. 제1 및 제2 지연 수단(23 및 24)은 어느 한쪽만 설치해도 된다. 펄스 픽커(13, 14)가 포켈스 셀인 경우, 구동 수단(25, 26)은 고압 전원 장치로 이루어진다.
- <73> 광 검출기(21)로서는, 초단광 펄스 레이저 발생부로부터의 광 펄스에 응답하도록 고속 응답이 가능한 pin 포토 다이오드, 애벌란시 포토 다이오드(avalanche photo diode), 포토 멀티 플레이어 등을 사용할 수 있다. 카운트 수단(22)과 제1 및 제2 지연 수단(23 및 24)은, 트랜지스터, 집적 회로, 마이크로 컴퓨터 등을 사용한 펄스 회로에 의해 구성할 수 있고, 펄스 픽커(13, 14)에 의해 통과시키는 광 펄스의 선택 개소를 주기적으로 변경할 수 있으면 된다. 고속 광 검출기(21)로부터의 신호를 클럭 신호로 하여, 마이크로 컴퓨터나 프로그램이 가능한 집적 회로인 PLD(Complex Programmable Logic Device)를 사용하여 카운트 수단(22)과 제1 및 제2 지연 수단(23 및 24)을 구성하여, 펄스 픽커(13, 14)에 사용하는 전기 광학 소자 등의 광학 서터를 구동해도 된다.
- <74> 지연 시간 조정부(15)는, 도시의 경우, 고정된 구성의 가동 미러(15a)에 의한 광로 길이의 조정을 이용한 광학계에 의해 구성되어 있다. 가동 미러(15a)는, 입사 광축에 대하여 45° 각도로 경사지게 배치된 한쌍의 반사 미러에 의해 구성되어 있고, 입사 광축을 따라 입사한 광이 한쪽 반사 미러(15a1)에서 입사 광축에 대하여 수직으로 반사되어 다른 쪽 반사 미러(15a2)에 입사하고, 다른 쪽 반사 미러(15a2)에서 입사 광축을 따라 입사된 광의 입사 방향에 대하여 평행하게 반사되도록 되어 있다.
- <75> 이로써, 가동 미러(15a)가, 제1 펄스 픽커(13)를 투과한 펄프 광의 펄스(펄프 펄스 광)의 광축 방향으로 이동 조정되면, 가동 미러(15a)가 우측으로 이동할 때 광로 길이가 길어지고, 반대로 좌측 방향으로 이동할 때 광로 길이가 짧아진다.
- <76> 따라서, 가동 미러(15a)의 이동에 의해, 펄프 펄스 광의 프로브 광의 펄스(프로브 펄스 광)에 대한 지연 시간을 적절하게 설정할 수 있다. 예를 들면, 광로 길이의 가변 범위가 30cm 정도인 경우에는, 프로브 펄스 광과 펄프 펄스 광의 지연 시간이 예를 들면, 0~1ns의 범위로 설정될 수 있다.
- <77> 도시의 경우에는, 측정부(20)는, 조사 광학계(16)와 시료(19)로부터의 프로브 신호를 검출하는 광 검출기(17)로 구성되어 있다. 조사 광학계(16)는, 시료(19)의 표면 근방에 배치되는 대물 렌즈(16c)와, 지연 시간 조정부(15)로부터의 펄프 펄스 광을 시료(19)의 표면으로 안내하는 반사 미러(16a)와, 제2 펄스 픽커(14)로부터의 프로브 펄스 광을 시료(19)의 표면으로 안내하는 반사 미러(16b)와, 시료(19)의 표면에서 반사된 프로브 펄스 광을 광 검출기(17)에 안내하는 반사 미러(16d)에 의해 구성되어 있다. 이로써, 펄프 펄스 광 및 프로브 펄스 광이 시료(19)의 표면에 집광된다. 이 때, 펄프 펄스 광이 먼저 시료(19)에 도달하고, 그 직후에 프로브 펄스 광이 시료(19)의 표면에서 반사된다.
- <78> 광 검출기(17)에는, 시료(19)의 표면에서 반사된 프로브 신호가 반사 미러(16d)를 통하여 입사됨으로써, 펄프 펄스 광 조사 후, 정확한 지연 시간에서의 시료(19)의 표면의 반사율을 측정할 수 있게 된다. 광 검출기(17)에는, 예를 들면 Si로 만든 pin 포토 다이오드를 사용할 수 있다.
- <79> 락인 검출 수단은, 락인 앰프(18)를 사용하여 구성할 수 있다. 락인 검출 수단은, 광 검출기(17)에 의해 측정

되는 반사 광 강도의 지연 시간 의존 성분(도 1의 sig 참조)이, 레이저 광원(11)의 광량의 요동에 비해서도 매우 작으므로, 정확한 측정을 위해 변조 측정을 행한다. 락인 앰프(18)는, 도 2를 사용하여 후술하는 제1 펄스 픽커 및 제2 펄스 픽커(13 및 14)를 사용한 지연 시간 변조의 변조 주파수를 참조 신호(도 1의 ref 참조)로서 사용하고, 광 검출기(17)의 측정 신호를 위상 민감 검출함으로써, 측정 정밀도를 높이기도 되어 있다.

- <80> 본 발명의 특징 중 하나는, 펄스 픽커(13, 14)와, 이들 펄스 픽커(13, 14)에 의해 통과시키는 광 펄스의 선택 개소를 주기적으로 변경하는 지연 시간 변조부(10)에 있으며, 지연 시간 변조부(10)의 동작을 도 2를 참조하여 설명한다.
- <81> 도 2는, 시료(19)의 표면에 도달하는 단계에서의 펌프 펄스 광(P1)과 프로브 펄스 광(P2)의 광 강도를 나타낸 그래프이며, 그래프의 가로 축은 시간, 세로 축은 광 강도이다. 펌프 펄스 광(P1) 및 프로브 펄스 광(P2)은, 레이저 광원(11)에 의한 약 100MHz의 반복 주파수의 레이저 펄스이므로, 레이저 강도는 대부분의 시간 동안 제로(0)이며, 예를 들면 25fs의 매우 짧은 시간 동안만 매우 고강도를 부여한다.
- <82> 따라서, 도 2의 그래프에서는, 이들의 펌프 펄스 광(P1) 및 프로브 펄스 광(P2)은 빗 모양의 그래프가 된다.
- <83> 레이저 광원(11)으로부터 출력되는 레이저 펄스의 반복 주파수가 100MHz인 경우, 펌프 펄스 광(P1)도 프로브 펄스 광(P2)도, 펄스 사이의 시간 간격은 10ns이며, 도 2의 점선과 점선 사이가 전술한 시간 간격이다. 펄스 픽커(13, 14)에 의해, 이 중 100 펄스 중 1개만 투과하고, 나머지는 차단된다. 그리고, 도 2에서는 보기 쉽게 편의상 6 펄스 중 1개가 투과하고, 나머지 5개가 차단되는 상황을 도시하고 있고, 투과한 광 펄스를 실선으로, 차단된 광 펄스를 점선으로 각각 나타내고 있다.
- <84> 그리고, 지연 시간 조정부(15)에 의한 지연 시간을 $-\Delta t$ 라 하면, 프로브 펄스 광(P2)은, 펌프 펄스 광(P1)에 대해서 지연 시간 Δt 만큼 지연된다. 이 때, 광 검출기(17)로 측정되는 광 강도는, 펌프 펄스 광(P1)에 의한 여기의 정확하게 Δt 후의 시료의 반사율 $R(\Delta t)$ 에 비례한다.
- <85> 여기서, 제2 펄스 픽커(14)가 펄스를 통과시키는 타이밍을, 도 2의 P3로 나타낸 바와 같이 3 펄스 분만큼 지연시키면, 실질적인 지연 시간은 $\Delta t' = \Delta t + 3 \times 10(\text{ns})$ 로 되고, 지연 시간을 순간적으로 매우 큰 값으로 할 수 있다. 이 때, 광 검출기(17)로 측정되는 광 강도는 시료의 반사율 $R(\Delta t')$ 에 비례하는 값이 된다. 제2 펄스 픽커(14)를 제어하여, 프로브 펄스 광의 통과 위치를 변경함으로써, 도 2의 P2와 P3의 상황을 도 3에 나타낸 바와 같이 주기적으로 반복하면, 광 검출기(17)에 의해 측정되는 신호는, $R(\Delta t)$ 와 $R(\Delta t')$ 사이에서 주기적으로 진동한다. 이 신호를, 락인 앰프(18)에 있어서, 변조 주파수를 참조 신호로 하여 위상 민감 검출함으로써, $R(\Delta t)$ 와 $R(\Delta t')$ 의 차이를 측정할 수 있게 된다.
- <86> 종래의 지연 시간 변조 방법에서는, 지연 시간은 정현파적으로 변조되어 있었기 때문에, 변조 측정으로 얻어지는 신호는 변조 진폭 구간(Δt 와 $\Delta t'$ 사이)에 걸친 R의 평균적인 경사(기울기)이다. 이에 비해, 본 발명의 지연 시간 변조 방법에서는, 지연 시간을 완전히 직사각형파적으로 변조할 수 있으므로, 얻어지는 신호가 $R(\Delta t)$ 와 $R(\Delta t')$ 의 차이 $[R(\Delta t) - R(\Delta t')]$ 와 정확하게 비례한다.
- <87> 이는, 하기에 나타낸 바와 같이 매우 중요한 장점을 가진다.
- <88> 일반적으로, 펌프 광에 의한 시료의 여기 후 상태는, 도 4에 나타낸 바와 같이, 수 피코 세컨드 내지 수 나노 세컨드의 단시간의 완화 과정을 거쳐 일정값에 가까워진다. 초고속 측정에 있어서는, 이 완화 과정의 진폭이나 완화 시간이 측정 대상이 된다.
- <89> 도 2에 나타낸 바와 같이, 본 실시예에서는 지연 시간 $\Delta t'$ 로서 슈아넨 후의 펄스 반복 주기의 절반 정도의 값을 취하면, $\Delta t'$ 는 시료(19)의 완화 시간에 비해 매우 큰 값으로 할 수 있다. $\Delta t'$ 는, 예를 들면 0.5 μs 정도이다. 그러므로, $R(\Delta t')$ 를 실질적으로 완전히 완화시킨 후의 시료(19)의 상태로 생각할 수 있으며, 즉 이를 신호의 제로 포인트로 생각할 수 있다. 이 때, 본 실시형태에서 측정되는 $R(\Delta t)$ 와 $R(\Delta t')$ 의 차이 $[R(\Delta t) - R(\Delta t')]$ 는, 즉 $R(\Delta t)$ 그 자체이며, 반사율의 지연 시간 의존 성분의 절대값을 얻을 수 있다.
- <90> 또한, 도 1의 지연 시간 조정부(15)에서, 펌프 펄스 광(P1)과 프로브 펄스 광(P2) 사이의 지연 시간을 변화시키면, Δt 뿐만 아니라 $\Delta t'$ 도 변화한다. 그러나, 앞서 설명한 바와 같이, $\Delta t'$ 를 충분히 크게 취한 경우에는, $R(\Delta t)$ 가 시료 여기 직후의 고속의 완화 과정을 반영하는 데 비해, $R(\Delta t')$ 는 상수로 볼 수 있다. 따라서, $R(\Delta t)$ 와 $R(\Delta t')$ 와의 차분은, 완화 후의 측정 신호 레벨을 기준으로 하여 시료(19)의 완화 과정을 정확하게 나타내게 된다.

- <91> 다음으로, 본 발명의 제2 실시형태에 따른 지연 시간 변조식 펄프 프로브 측정 장치에 대하여 설명한다.
- <92> 도 5는, 본 발명에 따른 지연 시간 변조식 펄프 프로브 측정 장치의 제2 실시형태의 구성을 나타내고 있다. 도 5에 있어서, 지연 시간 변조식 펄프 프로브 측정 장치(30)는, 레이저 광원(11) 대신, 펄프 광 및 프로브 광에 대해서 각각 레이저 광원(31, 32)을 설치하여, 분기 광학계(12) 및 지연 시간 조정부(15)를 생략한 집과, 제1 펄스 픽커(13)가 제1 지연 시간 변조부(10A)에 의해 구동되고, 제2 펄스 픽커(14)가 제2 지연 시간 변조부(10B)에 의해 구동되는 점이, 도 1에 나타난 펄프 프로브 측정 장치(1)의 구성과 상이하다.
- <93> 레이저 광원(31, 32)은, 각각 도 1의 펄프 프로브 측정 장치(1)에 있어서의 레이저 광원(11)과 동일한 구성이며, 동기 발진 제어부(33)에 의해 정확하게 동일한 주기로 발진하도록 제어되어 있고, 각 펄스 픽커(13, 14)에 입사하는 광을 분할할 필요가 없기 때문에 시료(19)에 조사되는 펄스 광의 강도를 높이고, 광 펄스의 출력되는 위상을 임의로 선택함으로써, 2개의 레이저 펄스의 지연 시간을 자유롭게 설정할 수 있도록 되어 있다. 2개의 초단광 펄스 레이저 광원(31, 32)은 동일한 파장으로 할 수 있다. 또한, 파장이 상이한 경우에는, 펄프 광과 프로브 광을 서로 상이한 파장으로 할 수 있다. 또한, 2개의 레이저 장치의 동기 발진 제어부(33)를 사용하여 펄프 광과 프로브 광의 발진하는 위상을 적절하게 설정함으로써, 반복 주기까지의 지연 시간을 용이하게 설정할 수 있다. 따라서, 이와 같은 2개의 초단광 펄스 레이저 광원(31, 32)과 펄스 픽커(13, 14)에 의해 지연 시간을 조정할 수 있으므로, 초단광 펄스 레이저 광원이 1개인 경우에 필요한 지연 시간 조정부(15)를 생략할 수도 있다. 예를 들면, 레이저 광원(31, 32)으로서, 반복 주파수 100MHz 정도의 티탄 사파이어 발진기를 사용한 경우, 동기 발진 제어부(33)에 의해 펄프 펄스 광(P1)과 프로브 펄스 광(P2)를 200fs 정도의 지터(jitter)로, 펄스의 반복 주기까지의 범위의 임의의 지연 시간을 가지고 발진시킬 수 있다
- <94> 펄프 펄스 광(P1)과 프로브 펄스 광(P2) 사이의 지연 시간을 동기 발진 제어부(33)에 의해 임의로 설정할 수 있으므로, 도 1에 나타난 지연 시간 조정부(15)를 생략할 수도 있다. 도 1의 펄프 프로브 측정 장치(1)에 있어서는, 최대 1ns 정도 만 취할 수 있었던 지연 시간의 설정 범위를 펄스 사이의 반복 주기까지 길게 설정할 수 있게 되고, 큰 진폭의 미러 위치 변경에 의한 광축의 미소한 어긋남 등의 악 영향을 제거할 수 있다. 제2 펄스 픽커(14)의 광 펄스 투과 타이밍을 조정함으로써, 지연 시간의 설정 범위는, 레이저 광원(31, 32)의 반복 주파수를 초과하여, 펄스 픽커(14)로 광 펄스를 슈아낸 후의 실효적인 펄스 반복 주기의 범위에서 임의로 설정 가능하게 된다. 이로써, 레이저 광원(31, 32)으로서, 예를 들면 100MHz의 반복 주파수의 레이저를 사용한 경우에도, 수백 나노 세컨드 정도까지 비교적 낮은 완화 과정까지 측정할 수 있게 된다.
- <95> 제1 지연 시간 변조부(10A)는, 초단광 펄스 레이저 발생부의 제1 레이저 광원(31)으로부터 발생한 광 펄스를 검출하는 광 검출기(21)와, 이 광 검출기(21)로부터의 펄스 신호를 카운트하는 카운트 수단(22)과, 카운트 수단(22)에 접속되는 제1 지연 수단(23)과, 펄스 픽커(13)의 구동 수단(25)에 의해 구성되어 있다. 마찬가지로, 제2 지연 시간 변조부(10B)도, 제1 지연 시간 변조부(10A)와 같은 구성이며, 초단광 펄스 레이저 발생부의 제2의 레이저 광원(32)으로부터 발생한 광 펄스를 검출하는 광 검출기(21)와, 카운트 수단(22)과, 제2 지연 수단(24)과, 제2 펄스 픽커(14)의 구동 수단(26)으로 구성되어 있다. 광 검출기(21)와 카운트 수단(22)과 제1 및 제2 지연 수단(23 및 24)과, 펄스 픽커(13, 14)의 구동 수단(25, 26)은, 도 1에서 설명한 지연 시간 변조부(10)과 동일한 구성으로 할 수 있으므로, 설명은 생략한다. 여기서, 제1 지연 수단(23) 및 제2 지연 수단(24)은, 어느 한쪽만 설치해도 된다.
- <96> 제1 및 제2 지연 시간 변조부(10A 및 10B)에 의하면, 도 1에 나타난 지연 시간 변조부(10)와 마찬가지로 펄스 픽커(13, 14)에 의해 통과시키는 펄스의 선택 개소를 주기적으로 변경시킬 수 있다.
- <97> 이와 같은 구성의 측정 장치(30)에 의하면, 도 1에 나타난 측정 장치(1)와 마찬가지로 작용한다. 이 경우, 2대의 레이저 광원(31, 32)을 사용하므로, 설비 비용이 증대하고, 동기 발진 제어부(33)의 제약에 의해 지연 시간의 설정 정밀도가, 도 1의 측정 장치(1)와 비교하여 뒤떨어지는 경향이 있지만, 지연 시간의 설정을 동기 발진 제어부(33) 만으로 행할 수 있으므로, 도 1의 지연 시간 조정부(15)의 가동 미러(15a)의 위치를 기계적으로 많이 이동시키는 기구가 불필요가 된다. 따라서, 측정계의 신뢰성의 향상과 시료(19) 상에서의 초점 위치의 안정성이 대폭 높아지는 장점을 얻을 수 있다.
- <98> 다음으로, 본 발명의 제3 실시형태에 따른 지연 시간 변조식 펄프 프로브 측정 장치에 대하여 설명한다.
- <99> 도 6은, 본 발명에 따른 지연 시간 변조식 펄프 프로브 측정 장치에서의 제3 실시형태의 구성을 나타내고 있다. 도 6에 있어서, 지연 시간 변조식 펄프 프로브 측정 장치(40)는, 도 1의 측정 장치(1)에 있어서, 레이저 광원(11) 대신 캐비티 댐퍼(41)를 부가한 레이저 광원(11)이 사용되고 있는 점에서 구성이 상이하다.

- <100> 이 캐비티 댐퍼를 구비한 레이저 광원(11, 41)은 공지된 구성으로서, 예를 들면 티탄 사파이어 레이저 발진기의 캐비티 내에 음향 광학 변조기(AO 변조기)를 삽입하고, 레이저 펄스가 캐비티 내를 수십 내지 수백 회 왕복할 때마다 1회만 캐비티를 개방하고, 캐비티 내부에 저장된 매우 고강도의 레이저 펄스를 추출함으로써, 평균 강도를 통상의 티탄 사파이어 레이저 발진기와 동일한 정도로 유지한 채, 낮은 반복 주파수로 높은 강도의 광 펄스를 출력하는 레이저 발진기를 사용할 수 있다. 이와 같은 구성에 의해, 예를 들면, 평균 강도 수백 mW 정도, 반복 주파수 2MHz 정도의 레이저 발진기를 실현할 수 있다.
- <101> 2개의 펄스 픽커(13, 14)를, 예를 들면 최대 동작 주파수 1MHz의 포켈스 셀로 구성된 경우, 도 1 및 도 5에 나타난 제1 실시형태 및 제 2 실시형태에서는, 레이저 발진기로부터의 광 펄스 중 100개 중 1개 정도만 투과시킬 수 있고, 레이저 강도가 100분의 1이 된다. 따라서, 레이저 광원(11, 31, 32)으로부터의 레이저 강도가 1W 정도라고 해도, 펄스 픽커(13, 14)를 통과한 후의 평균 강도는 10mW 정도로 된다.
- <102> 이에 비해, 도 6에 나타난 실시형태에서는, 레이저 광원(11, 41)이, 예를 들면 2MHz의 반복 주파수를 가지므로, 펄스 픽커(13, 14)는, 레이저 광원(41)으로부터 출력되는 광 펄스에 대하여, 2 펄스 중 1 펄스를 투과시킴으로써, 반복 주기를 2MHz에서 1MHz로 저하시키고, 주기적으로 투과시키는 광 펄스를 변경함으로써, 도 1과 마찬가지로 지연 시간을 직사각형과적으로 변조한다.
- <103> 이와 같은 구성의 측정 장치(40)에 의하면, 도 1의 측정 장치(1)와 마찬가지로 작용하고, 펄스 픽커(13, 14)에서의 평균 강도의 저하는 50%정도이며, 도 1의 실시형태와 비교하여 매우 강한 프로브 광의 신호 강도를 얻을 수 있게 된다.
- <104> 전술한 각 실시형태에 있어서는, 예를 들면, 직사각형과 변조 펄프 프로브법에 의해 시료의 반사율을 측정하는 경우에 대하여 설명하였으나, 이에 한정되지 않고, 임의의 시간 분해 펄프 프로브 측정 방법과 펄스 픽커를 사용한 지연 시간의 직사각형과 변조 방식을 조합시켜 사용할 수 있다. 따라서, 펄프 프로브 광 강도를 변조하지 않고, 긴 지연 시간 범위에 걸쳐 측정이 가능한 본 발명의 특징을 살려, 예를 들면 주사 터널 현미경과 조합시켜, 극 미소 공간에서 일어나는 초고속 현상을 측정 가능한 현미경 장치를 구성할 수도 있다.
- <105> 여기서, 본 발명의 제4 실시형태로서, 지연 시간 변조식 펄프 프로브 측정 장치를 사용한 주사 프로브 현미경 장치에 대하여 설명한다.
- <106> 도 7은, 본 발명에 따른 지연 시간 변조형의 펄프 프로브의 시간 분해능을 가지는 주사 프로브 현미경 장치의 일실시형태의 구성을 나타낸 도면이다. 도 7에 있어서, 주사 프로브 현미경 장치(50)는, 2개의 레이저 광원(31, 32)과, 동기 발진 제어부(33)와, 지연 시간 변조부(10)와, 제1 펄스 픽커 및 제2 펄스 픽커(13 및 14)와, 조사 광학계(51)와, 주사 터널 현미경(52)과, 락인 앰프(18)에 의해 구성되어 있다.
- <107> 도 7에 나타난 바와 같이, 제4 실시형태에 따른 지연 시간 변조식 주사 프로브 현미경 장치(50)가, 도 5에 나타난 본 발명의 제2 실시형태에 따른 펄프 프로브 측정 장치와 상이한 점은, 측정부(20)가 조사 광학계(51)와 주사 터널 현미경(52)을 구비하여 구성되어 있는 점이며, 다른 구성은 동일하다.
- <108> 조사 광학계(51)는, 하프 미러(51a), 2개의 반사 미러(51b, 51c) 및 대물 렌즈(51d)에 의해 구성되어 있다. 제 1 펄스 픽커(13)로부터의 펄프 펄스 광은, 반사 미러(51b)에서 반사된 후, 하프 미러(51a)를 투과하고, 반사 미러(51c)에서 더 반사되어 대물 렌즈(51d)를 통하여 주사 터널 현미경(52) 내의 시료(53)의 표면에 집광된다. 제2 펄스 픽커(14)로부터의 프로브 펄스 광은, 하프 미러(51a)에서 반사되어, 펄프 펄스와 동일한 광축 상에 중첩되고, 또한 반사 미러(51c)에서 반사되어 대물 렌즈(51d)를 통하여 주사 터널 현미경(52) 내의 시료(53)의 표면에 집광된다.
- <109> 주사 터널 현미경(52)은 공지된 구성이며, 시료(53)의 바로 위에서, 그 선단과 시료(53) 사이에 터널 접합이 형성되도록 탐침(52a)을 배치하고, 시료(53)의 표면 상에서 탐침(52a)을 주사하도록 구성되어 있고, 시료(53)의 표면 상에 대한 레이저 펄스의 조사에 의해, 탐침(52a)의 선단과 시료(53) 사이의 터널 전류의 변조에 의한 프로브 신호를 전류 검출용 프리 앰프(52b)에 의해 검출하고, 락인 앰프(18)에 출력하도록 되어 있다.
- <110> 전술한 구성의 현미경 장치(50)에 의하면, 레이저 광원(31, 32)으로부터 레이저 펄스가, 각각 펄프 펄스 광으로서, 프로브 펄스 광으로서 펄스 픽커(13, 14)를 통하여, 그리고 조사 광학계(51)를 통하여, 주사 터널 현미경(52)에서의 탐침(52a)의 바로 아래의 시료(53)의 표면에 조사된다. 여기서, 레이저 펄스는, 동기 발진 제어부(33)와 펄스 픽커(13, 14)에 의해 설정된 지연 시간을 가지고 2 펄스씩 쌍으로 하여 시료(53)의 표면을 여기한다. 이 때, 주사 터널 현미경(52)은, 탐침(52a)과 시료(53) 사이의 터널 전류를 일정하게 유지하기 위하여, 탐

침(52a)과 시료(53)의 간격을 낮은 차단 주파수를 가지는 피드백 제어에 의해 조정한다.

- <111> 펄스 픽커(13, 14)를 구동 수단(25, 26)으로 구동시키고, 지연 시간을 변조할 때, 그 변조 주파수를 주사 터널 현미경(52)의 피드백 제어의 차단 주파수보다 펄프 펄스 광을 충분히 높게 함으로써, 피드백 회로에 의해 측정 대상의 신호가 감쇄되지 않도록 배려한다. 이 상태에서, 주사 터널 현미경(52)의 전류 검출용 프리 앰프(52b)로부터의 출력 신호를, 락인 앰프(18)를 사용하여, 제2 펄스 픽커(14)의 변조 주파수를 기준으로 위상 민감 검출함으로써, 그 출력으로서 탐침(52a) 바로 아래에서의 시료(53)의 표면의 극 미소 공간에서 생기는 초고속 물리 현상을 관찰할 수 있게 된다.
- <112> [실시예]
- <113> 이하, 본 발명에 따른 지연 시간 변조식 펄프 프로브 측정 장치의 실시예를 설명한다.
- <114> 본 발명에 따른 지연 시간 변조식 펄프 프로브 측정 장치에서의 측정 방법의 기본 원리는, 지금까지 일반적으로 널리 이용되어 온 지연 시간 변조형 펄프 프로브 측정 방법과 동일하지만, 그 변조 방법에 대하여 획기적인 개량을 행하였으며, 지연 시간 변조 방식의 이와 같은 개량에 의해서도, 종래형과 동일한 기본 원리에 의해 장치는 정상적으로 동작한다.
- <115> 지금까지 나타난 실시형태 중, 도 7에 나타난 주사 프로브 현미경 장치(50)를 구체적으로 실시하기 위한 장치 구성을 이하에서 상세하게 설명한다.
- <116> 본 발명의 주요 부분이 되는 펄스 픽커에 의한 직사각형파적인 지연 시간 변조계와 종래의 주사 터널 현미경을 조합시켜서, 초고속 시간 분해의 주사 터널 현미경 장치(50)를 구성한다.
- <117> 처음에, 이와 동일한 목적을 위해 사용되는 종래형의 장치 구성을 설명한다. 종래형의 장치도, 도 7의 측정부(20)와 마찬가지로, 펄프 펄스 광과 프로브 펄스 광은 통상적으로 동일 광축 상에 위치하여 시료에 조사되므로, 시료는 펄프와 프로브의 2개의 광 펄스로 이루어지는 펄스 쌍에 의해 반복적으로 여기되는 형태를 가진다. 그러므로, 이 타입의 현미경은, 펄스쌍 여기형의 시간 분해 주사 터널 현미경으로 불리운다. 종래형의 장치로서는, 지연 시간 설정 광학계에 포함되는 미러 위치를 기계적으로 진동시켜서 지연 시간 변조를 행하는 지연 시간 변조형 광 펄스쌍 여기 주사 터널 현미경 장치가 알려져 있다. 이 종래형의 장치에서는 미러의 진동에 의해 지연 시간이 변조된 펄스쌍에 의해 주사 터널 현미경 바로 아래의 시료를 여기시킴으로써, 나노 미터 정도의 미소 영역에서 일어나는 서브 피코 세컨드~수십 피코 세컨드 정도의 초고속 현상을 측정할 수 있다. 그러나, 종래형의 장치에서는, 지연 시간의 변조 진폭이 작으며 변조 주파수가 낮으므로 신호 대비 노이즈 비율이 낮아지는 경향이 있고, 그러므로 하나의 측정에 수 시간 내지 수십 시간의 매우 긴 시간을 필요로 하는 결점이 있다.
- <118> 도 7에 나타난 본 발명의 실시형태에 의한 현미경 장치(50)에 있어서는, 종래형의 장치와 마찬가지로 광 펄스쌍 여기 주사 터널 현미경 장치의 구성을 채용하고 있지만, 전술한 바와 같이, 지연 시간 변조 방식의 개량에 의해, 변조 진폭의 증대에 의한 신호 강도가 증가하고, 변조 주파수의 향상에 의해 노이즈 강도가 저하되며, 변조 진폭에 의한 시간 분해능이 저하하지 않고, 미러의 장거리 이동에 의한 레이저 초점 위치와 주사 터널 현미경 탐침 위치의 어긋남을 회피할 수 있다.
- <119> 도 7의 레이저 광원(31)으로서 코히런트(Coherent)사의 CHAMELEON를 사용하고, 레이저 광원(32)으로서 동일하게 코히런트사의 MIRA를 사용한다. 이들 2개의 레이저 광원(31, 32)은, 각각 독립적으로 750nm~950nm 정도의 임의의 파장에 대하여, 150fs 정도의 레이저 펄스를 90MHz의 반복 주파수, 0.3W~1.5W의 평균 출력으로 발진시킬 수 있다. 동기 발진 제어부(33)로서 동일하게 코히런트사의 싱크로 록 제어 장치를 사용함으로써, 레이저 광원(31, 32)을 500fs 정도의 지터로 동기 발진시킬 수 있게 된다. 또한, 발진 주기를 완전히 맞춘 후, 발진 위상에 대하여 임의의 타이밍을 선택할 수 있으므로, 장거리의 가동 미러의 이동에 의한 지연 시간 조정부(15)를 외부에 설치하지 않고, 펄스의 반복 주기 전역에 걸쳐서 임의의 지연 시간을 설정할 수 있다.
- <120> 제1 펄스 픽커 및 제2 펄스 픽커(13 및 14)로서 각각, 포켈스 셀(Laysop Ltd.사 제품, RTP-3-20)(13a, 14a)을 사용하였다. 이들 펄스 픽커(13, 14)의 스위칭 시간은 1ns 정도, 최대 반복 주파수는 1.5MHz이며, 레이저 광원(31, 32)으로부터의 90MHz의 반복 주파수의 펄스 레이저로부터 약 100 펄스 중 1 펄스 정도를 추출할 수 있다. 이 포켈스 셀(13a, 14a)을 구동하는 구동원으로서, ME사 제품인 포켈스 셀 드라이버(High Repition-Rate Pockels Cell Driver)(25, 26)를 사용하였다. 이 포켈스 셀 드라이버(25, 26)와 포켈스 셀(RTP-3-20)(13a, 14a)과의 조합에 의해, 1MHz의 반복 주파수가 보장되며, 본 발명의 실시예 적합하다고 할 수 있다.
- <121> 펄스 픽커(13, 14)의 구동 타이밍을 결정하기 위해, 펄스 픽커(13, 14)에 입사하기 직전의 레이저광 강도를

1GHz 정도의 대역을 가지는 고속 포토 다이오드(21)로 검출하고, 이를 클럭 신호로 하여, 프로그램이 가능한 집적 회로인 CPLD를 포함하여 구성된 지연 시간 변조부(10)를 동작시켜, 펄스 픽커(13, 14)의 포켓스 셀(13a, 14a)의 구동 수단으로 되는 포켓스 셀 드라이버(25, 26)의 제어 신호를 생성한다. 실제로는, 90 펄스 중 1 펄스를 투과시킴으로써, 투과 후의 레이저 펄스의 반복 주파수를 1MHz로 하고, 여기에 1~2kHz 정도의 변조 주파수로 제2 펄스 픽커(14)의 구동 타이밍만을 반 주기분인 0.5 μ s 만큼 변조하게 된다.

<122> 여기서, 변조 주파수는, 후단의 주사 터널 현미경(52)의 전류 검출 프리 앰프(52b)의 대역(~수십 kHz)보다 충분히 낮을 필요가 있고, 또한 주사 터널 현미경(52)의 탐침(52a)과 시료(53) 사이의 거리에 가해지는 약한 피드백의 대역(~10Hz 정도)보다 충분히 높을 필요가 있으므로, 1~2kHz 정도의 변조 주파수가 적절하다. 일반적으로, 주사 터널 현미경의 터널 전류 신호를 위상 민감 검출할 때는 기계적인 진동에 의한 노이즈를 피하기 위해 변조 주파수를 높게 하는 편이 유리하지만, 여기서 선택한 변조 주파수(1~2kHz)는, 예를 들면 종래형의 측정 장치에서의 미러 위치의 이동에 의한 지연 시간 변조 방식의 경우의 20Hz 정도와 비교하여 약 50 내지 100배 높고, 이에 의해 노이즈 레벨을 5분의 1 내지 10분의 1로 기대할 수다. 또한, 지금까지 0.5~1ps 정도인 변조 진폭을 0.5 μ s 정도까지 크게 함으로써, 신호 레벨이 10배 이상 커지는 것이 기대되어, 양 자를 합치면 수십 내지 수백배의 신호 대비 노이즈 비율의 향상이 기대된다.

<123> 펄스 픽커(13, 14)를 통과한 펄프 펄스 광 및 프로브 펄스 광은, 조사 광학계(51)의 하프 미러(51a)와 반사 미러(51b, 51c)에 의해 동일 광축 상에 중첩되고, 대물 렌즈(51d)를 통해 주사 터널 현미경(52)에 도입된다. 대물 렌즈(51d)로서 복수의 렌즈를 조합한 복합 광학계를 사용함으로써, 대물 렌즈(51d)로부터 시료(53)의 표면상의 초점 위치까지의 거리를 길게 취하고, 또한 초점의 직경을 작게 할 수 있도록 배려한다. 구체적으로는, 일단 오목 렌즈에 의해 빔 직경을 3~5cm까지 넓힌 후, 볼록 렌즈로 좁히는 형태가 단순하면서도 양호한 결과를 가져온다.

<124> 이로써, 대물 렌즈(51d)로부터 시료(51)까지의 거리를 300mm 정도까지 크게 해도, 초점 직경이 수 마이크로 미터 정도로 작아지도록 설계한다. 이는, 주사 터널 현미경(52)과 대물 렌즈(51d)와의 물리적인 간섭을 피하면서, 초점 위치에서 충분한 광 강도를 얻고, 또한 탐침(52a)에 해당되는 광 강도를 작게 함으로써, 탐침(52a)의 열 팽창이나 열 수축에 의한 측정에 대한 교란을 최소한으로 하기 위하여, 특히 진공 환경 하에서 측정 가능한 현미경과 조합시키는 경우에 필요하다.

<125> 주사 터널 현미경(52)으로서, 반도체 표면 등을 관측 대상으로 하기 위하여 초고진공 환경 하에서 측정할 수 있는 타입이 사용된다. 통상적으로, 초고진공 타입의 주사 터널 현미경은, 바닥면으로부터의 미약한 진동을 측정 장치에 전달하지 않도록 진공 내부에서 검출기 부분을 부드러운 스프링으로 매달아서, 체진 기구로 하고 있다.

<126> 그러나, 본 발명을 실시하기 위해서는 지연 시간이 변조된 펄스 쌍을 발생하기 위한 레이저 광학계와 주사 터널 현미경의 검출기 부분과의 위치 관계가 크게 어긋나면, 시료(53)나 탐침(52a)의 위치와 대물 렌즈(51d)의 초점 위치, 즉 여기광 광원의 조사 위치가 어긋나서, 측정에 악 영향을 미치므로, 레이저 광학계와 주사 터널 현미경을 단일한 큰 체진대 상에 구성하고, 바닥면으로부터의 진동을 경감하면서 양 자의 기계적인 위치 관계를 유지할 수 있도록 연구해야 한다.

<127> 상기 실시예에 의한 주사 프로브 현미경 장치(50)를 사용한 측정 결과에 대하여 설명한다.

<128> 측정 대상이 되는 시료(53)로서는, GaAs 웨이퍼 상에 분자선 에피택시법(MBE)에 의해 저온으로 성장한 Ga_xAs_{1-x}(여기서, 조성 x는 0.36%임)로 이루어지는 박막 시료를 (110)면에서 벽개하고, 그 단면을 사용하였다. 이 시료는, 성장 온도가 낮으므로 결함 밀도가 높고, 이 결함이 포토 캐리어의 재결합 중심으로 기능하므로, 수십 내지 수백 피코 세컨드 정도의 고속의 포토 캐리어 완화 과정이 기대된다.

<129> 도 8은, 도 7의 구성을 가지는 실시예의 주사 프로브 현미경 장치(50)에서의 주사 터널 현미경(52)의 전류 전압 변환 프리 앰프(52b)에 의해 측정된 터널 전류 신호의 노이즈 스펙트럼을 나타낸 도면이다. 도 8에서, 가로 축은 주파수(Hz)를 나타내고, 세로 축은 노이즈 스펙트럼(A/Hz^{1/2})을 나타내고 있다.

<130> 도 8로부터 명백한 바와 같이, 종래형의 미러를 기계적으로 진동시키는 지연 시간 변조 주사 터널 현미경(52)에서 사용되는 변조 주파수 20Hz 부근의 노이즈 밀도에 비하여, 실시예의 주사 프로브 현미경 장치(50)에서, 펄스 픽커를 사용한 지연 시간 변조로 사용되는 변조 주파수 1kHz 부근의 노이즈 밀도는 약 10분의 1이며, 변조 주파수를 향상시킨 결과, 노이즈 레벨을 대폭 개선할 수 있는 것이 확인되었다.

<131> 도 9는, 실시예의 주사 프로브 현미경 장치(50)로 측정된 저온 성장 GaN_xAs_{1-x} 박막 시료의 시간 분해 터널 전류를 나타낸 도면이다. 도 9에서는, 락인 앰프(18)로부터의 출력을 도 2의 Δt(ps)의 함수로서 표시하고 있고, 세로 축은 시간 분해 터널 전류(fA)를 나타내고 있다. 이 때 도 2의 Δt'는 약 0.5μs로 하였다.

<132> 전술한 바와 같이, 락인 앰프(18)의 출력 신호는, 충분히 큰 Δt'에 대하여, 터널 전류값의 지연 시간 의존 성분 I(Δt) 그 자체를 나타내기 위해, 시료(53) 상에서의 주사 터널 현미경(52)의 탐침(52a) 바로 아래의 나노미터 정도의 미소 영역의 초고속 응답, 주로 광 캐리어의 완화 과정을 반영한 것이 된다. 도 9로부터 명백한 바와 같이, 수십 피코 세컨드 내지 수백 피코 세컨드 정도로 일어나는 초고속 완화 과정이, 펨토 암페어 정도의 터널 전류의 변화로서 검출할 수 있음을 알 수 있다. 이 때의 신호 대비 노이즈 비율은, 종래형의 장치와 비교하여 100배 정도 개선되는 것이 판명되었다.

산업상 이용 가능성

<133> 본 발명은, 지금까지 폭 넓게 사용되어 온 지연 시간 변조법에 의한 펄프 프로브 측정법의 지연 시간 변조 방법을 비약적으로 개선하는 것이며, 향후, 초고속 현상의 이용이 중요하게 될 것을 생각하면, 그 적용 범위는 매우 넓으며 큰 의의를 가진다. 예를 들면, 펄프 광 강도의 변조에서는 시료 온도가 크게 변화하며, 이는 측정 결과에 영향을 미치는 것이 염려되지만, 본 발명에서 얻어진 방법을 이용함으로써 시료 온도를 실질적으로 일정하게 유지한 채 측정을 행할 수 있게 된다.

<134> 본 발명을 사용한 펨토 세컨드 시간 분해 주사 프로브 현미경은, 종래형의 현미경에 비해 100배 정도의 신호 대비 노이즈 비율의 향상을 기대할 수 있고, 시료 온도를 실질적으로 일정하게 유지한 채 측정을 행할 수 있으므로, 비약적인 전개가 전망된다. 예를 들면, 반도체 나노 디바이스 내부에서의 피코 세컨드 영역의 캐리어 수명이나 이동을 측정할 수 있고, 지금까지 입수할 수 없었던 측정 수단을 제공할 수 있고, 새로운 물리 현상을 깊이 이해함으로써, 신규 기능 디바이스의 연구 단계에서 많은 공헌이 가능해진 점 외에, 작성 디바이스의 평가 등 현장에서의 활용을 포함하여 폭 넓은 응용이 기대된다.

<135> 그리고, 본 발명의 펄프 프로브 장치는, 주사형 전자 현미경이나 투과형 전자 현미경 등의 측정 장치에 부가하여 각종 측정 장치로서도 사용할 수 있다.

도면의 간단한 설명

<34> 도 1은 본 발명에 따른 지연 시간 변조식 펄프 프로브 측정 장치의 제1 실시형태의 구성을 나타낸 블록도이다.

<35> 도 2는 도 1의 측정 장치에서의 시료 표면에 도달하는 펄프 펄스 광 및 프로브 펄스 광의 광 강도의 시간 변화를 나타낸 그래프이다.

<36> 도 3은 도 2의 펄프 펄스 광 및 프로브 펄스 광의 펄스 픽커에 의한 지연 시간의 변형을 나타낸 그래프이다.

<37> 도 4는 도 1의 측정 장치를 사용하여, 펄프 펄스 광으로 여기시킨 후, 시료의 측정 신호의 완화 과정을 나타낸 그래프이다.

<38> 도 5는 본 발명에 따른 지연 시간 변조식 펄프 프로브 측정 장치의 제2 실시형태의 구성을 나타낸 블록도이다.

<39> 도 6은 본 발명에 따른 지연 시간 변조식 펄프 프로브 측정 장치의 제3 실시형태의 구성을 나타낸 블록도이다.

<40> 도 7은 본 발명에 따른 지연 시간 변조형의 펨토 세컨드의 시간 분해능을 가지는 주사 프로브 현미경 장치의 일 실시형태의 구성을 나타낸 블록도이다.

<41> 도 8은 도 7의 구성을 가지는 실시예의 주사 프로브 현미경 장치에서의 주사 터널 현미경의 전류 전압 변환 프리 앰프에 의해 측정된 터널 전류 신호의 노이즈 스펙트럼을 나타낸 도면이다.

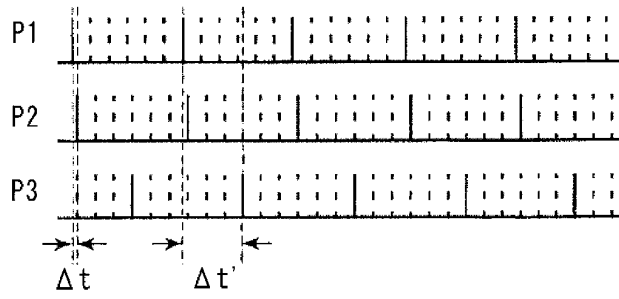
<42> 도 9는 실시예의 주사 프로브 현미경 장치에서 측정된 저온 성장 GaN_xAs_{1-x} 박막 시료의 시간 분해 터널 전류를 나타낸 그래프이다.

<43> [부호의 설명]

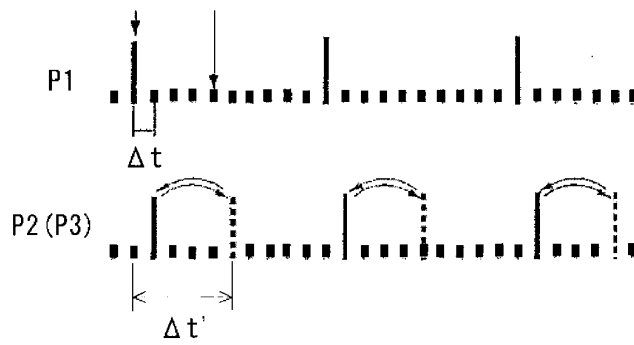
<44> 1, 30, 40: 펄프 프로브 측정 장치 10, 10A, 10B: 지연 시간 변조부

<45> 11, 31, 32: 레이저 광원 12: 분기(分岐) 광학계

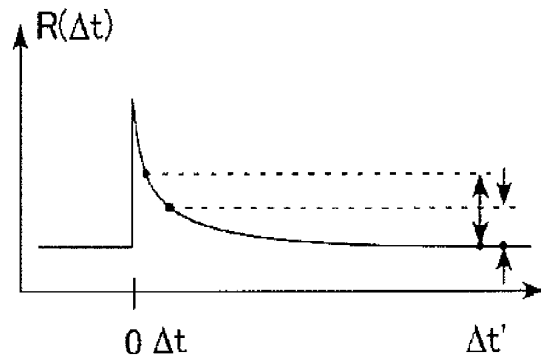
도면2



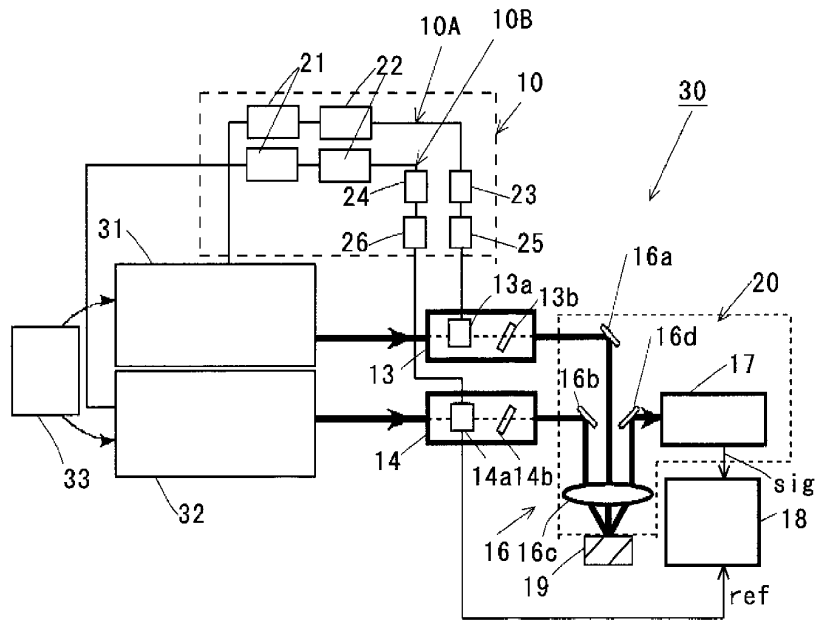
도면3



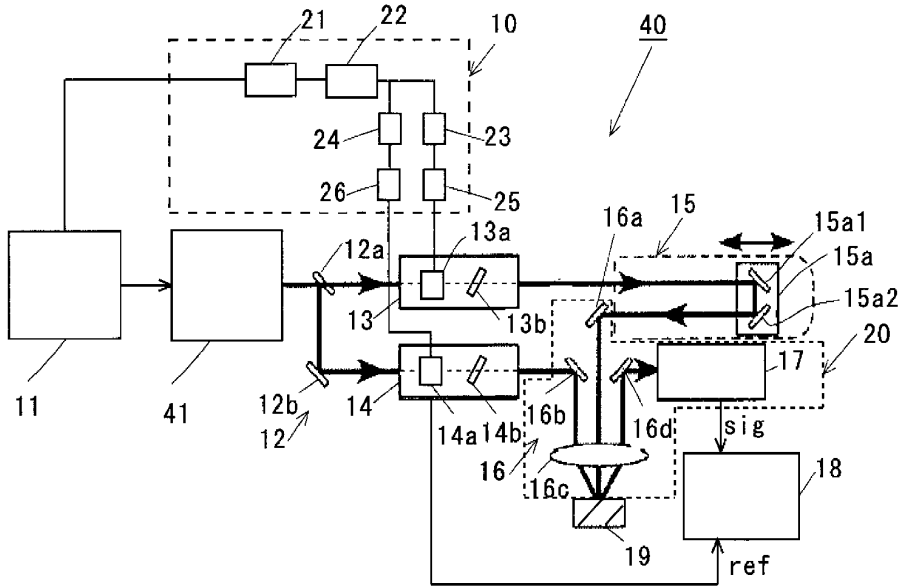
도면4



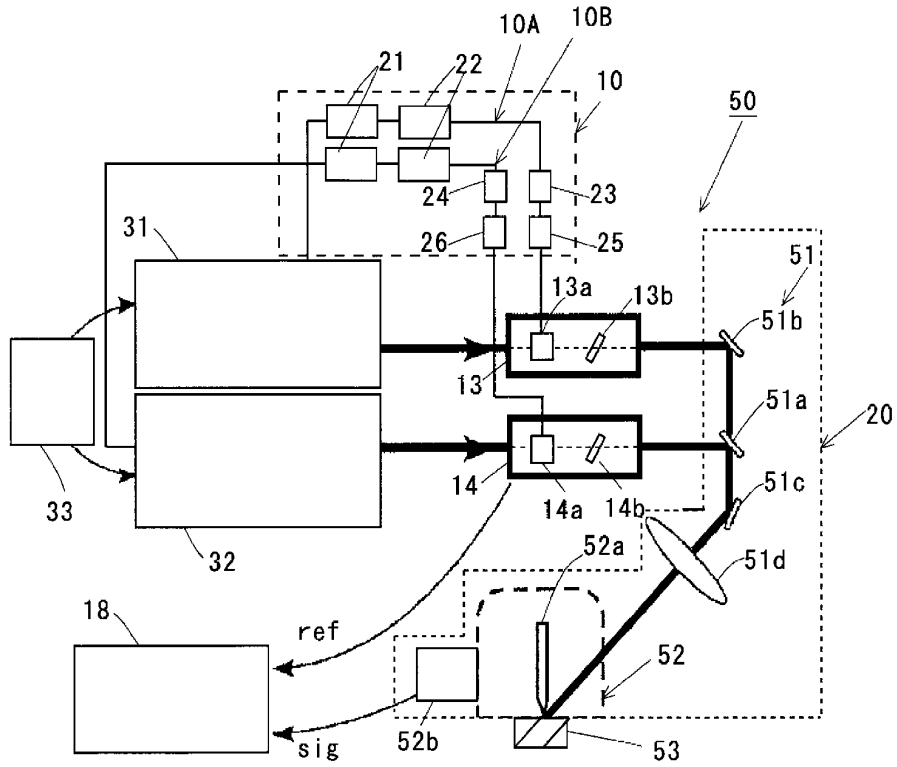
도면5



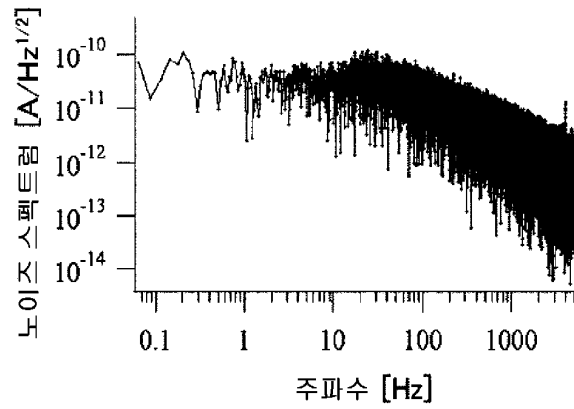
도면6



도면7



도면8



도면9

