

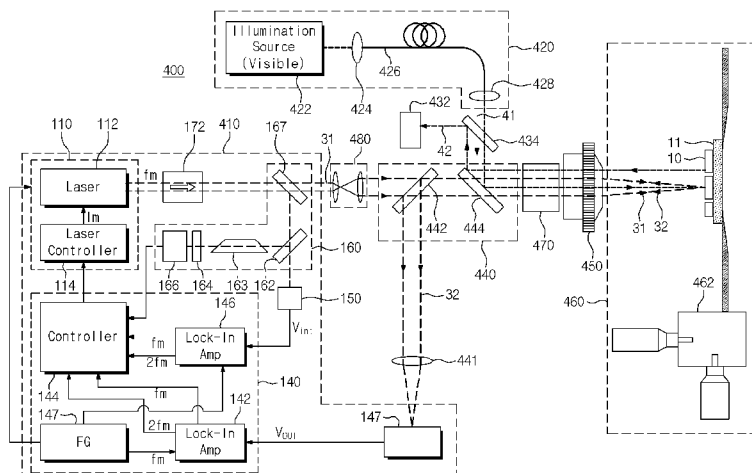


- | | | |
|---|--|---|
| (51) 국제특허분류: | 미분류 | (74) 대리인: 특허법인 누리 (NURY PATENT LAW FIRM); 135-910 서울시 강남구 테헤란로 25길 15-5, 4층, Seoul (KR). |
| (21) 국제출원번호: | PCT/KR2015/010538 | |
| (22) 국제출원일: | 2015년 10월 6일 (06.10.2015) | (81) 지정국 (별도의 표시가 없는 한, 가능한 모든 종류의 국내 권리의 보호를 위하여): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW. |
| (25) 출원언어: | 한국어 | |
| (26) 공개언어: | 한국어 | |
| (30) 우선권정보: | 10-2015-0008870 2015년 1월 19일 (19.01.2015) KR | |
| (71) 출원인: 한국표준과학연구원 (KOREA RESEARCH INSTITUTE OF STANDARDS AND SCIENCE) [KR/KR]; 305-340 대전시 유성구 가정로 267, Daejeon (KR). | | (84) 지정국 (별도의 표시가 없는 한, 가능한 모든 종류의 역내 권리의 보호를 위하여): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 유라시아 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 유럽 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR). |
| (72) 발명자: 이재용 (LEE, Jae-Yong); 360-789 충청북도 청주시 상당구 호미로 330, 101-1102, Chungcheongbuk-do (KR). 김재완 (KIM, Jae-Wan); 305-755 대전시 유성구 어은로 57, 102-506, Daejeon (KR). 박정재 (PARK, Jungjae); 305-752 대전시 유성구 송강로 42번길 61, 308-901, Daejeon (KR). 우제훈 (WOO, Jae-Heun); 302-740 대전시 서구 만년로 45, 109-604, Daejeon (KR). | | |

[다음 쪽 계속]

(54) Title: OPTICAL FREQUENCY AND INTENSITY MODULATION LASER ABSORPTION SPECTROSCOPY APPARATUS AND OPTICAL FREQUENCY AND INTENSITY MODULATION LASER ABSORPTION SPECTROSCOPY METHOD

(54) 발명의 명칭 : 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치 및 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 방법



(57) Abstract: The present invention provides an optical frequency and intensity modulation laser absorption spectroscopy apparatus, and an optical frequency and intensity modulation laser absorption spectroscopy method. The optical frequency and intensity modulation laser absorption spectroscopy apparatus comprises: a full-field light source for outputting a field-of-view beam of visible ray bandwidth; a frequency and intensity modulation spectroscopy processing unit for frequency-modulating the optical frequency of a laser beam into a modulation frequency (f_m) and intensity-modulating the intensity of the laser beam into a modulation frequency (f_m) to thus output a probe beam, converting, into an electrical signal, a laser absorption signal produced by means of resonance absorption by a measurement object which receives the probe beam, and extracting a first harmonic component and a second harmonic component of the modulation frequency (f_m) from the converted laser absorption signal; a beam processing unit for providing the field-of-view beam and the probe beam to an objective lens; and an objective lens for providing the field-of-view beam to the measurement object in a full-field light, and focusing the probe beam on the focal point thereof to thus provide the probe beam at a measurement position of the measurement object.

(57) 요약서:

[다음 쪽 계속]



OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

공개:
— 국제조사보고서 없이 공개하며 보고서 접수 후 이를
별도 공개함 (규칙 48.2(g))

본 발명은 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치 및 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 방법을 제공한 다. 이 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치는 가시광선 대역의 시야 빔을 출력하는 전시야 광원; 레이저 빔의 광주파수를 변조 주파수(f_m)로 주파수 변조하고, 상기 레이저 빔의 강도를 변조 주파수(f_m)로 강도 변조하여 프로브 빔을 출력하고, 상기 프로브 빔을 제공받은 측정 대상이 공명 흡수에 의하여 생성하는 레이저 흡수 신호를 전기 신호로 변환하고, 변환된 레이저 흡수 신호로부터 상기 변조 주파수(f_m)의 제 1 고조파 성분 및 제 2 고조파 성분을 추출하는 주파수 및 강도 변조 분광 처리부; 상기 시야 빔 및 상기 프로브 빔을 대물 렌즈에 제공하는 빔 처리부; 상기 시야 빔을 상기 측정 대상에 전시야 광으로 제공하고, 상기 프로브 빔을 그 초점에 집속하여 상기 측정 대상의 측정 위치에 제공하는 대물렌즈를 포함한다.

명세서

발명의 명칭: 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치 및 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 방법

기술분야

- [1] 본 발명은 레이저 분광(laser spectroscopy) 기술에 관한 것으로, 더 구체적으로 검출하고자 하는 특정 물질의 공명 흡수선 주파수(resonant absorption frequency)를 중심으로 주파수 변조 (frequency modulation)되는 레이저를 이용한 고감도 흡수 분광 장치 및 그 측정 방법에 관한 것이다.

배경기술

- [2] 현미경은 주로 미세 크기의 측정 대상의 상을 확대시키는 기구이다. 현미경은 측정 대상을 주로 육안으로 보거나 카메라와 같은 촬상 수단을 통하여 화면에 표시한다. 상기 현미경은 특정 물질을 검출하고, 상기 특정 물질의 두께, 농도, 또는 흡수도 등을 검출할 필요가 있다.
- [3] 한국 공개특허 2007-0089962는 CARS 현미경을 이용한 유기 박막의 화학종 및 두께동시 광학분석장치를 개시하고 있다. 구체적으로, 한국 공개특허 2007-0089962는 높은 공간 정밀도하에서 유기 박막의 화학종 및 두께를 비파괴적인 방법으로 동시에 분석하는 장치를 제시한다. 이러한 CARS 현미경은 기구적으로 복잡하고 노이즈에 취약하다.
- [4] 고분자 및 유기 단분자 박막은 최근 산업적인 측면에서 그 중요성이 매우 커지고 있다. 특히 집적회로소자 등 반도체 산업 및 다양한 형태의 모바일 제품의 다중형 기관의 사용 및 이의 패키징, 고분자 혹은 비교적 적은 분자량의 유기분자의 박막을 이용하여 개발-생산되는 display 소자뿐만 아니라 자동차의 외장이나 그리고 소형 모바일폰의 외형 형태를 생산하는 분야에서 고분자 박막의 고품질의 코팅 및 두께의 정밀 조절은 생산품의 성능 및 외향을 결정하는 중요한 요소기술로써 이해될 수 있다. 또한 최근의 바이오 및 메디칼 분야에서의 생물학적인 특성을 갖는 단백질을 포함하는 다양한 형태의 고분자의 유용성 증가에 따라 그 중요성이 날로 증가하고 있다. 예를 들어 재생의학적인 측면에서 중요한 피부 등 조직공학적인 재생에서 사용되는 template에서의 생물학적으로 유용한 고분자 및 다양한 형태의 임플란트의 표면을 처리하는데 있어 고분자 및 분자소재의 박막의 두께 등 그 특성은 전체 개발 및 생산물의 성능을 좌우한다고 알려져 있다.
- [5] 현재 이러한 중요성을 갖는 고분자 박막에 대한 측정 및 성능평가는 주로 프리에 트랜스폼 적외선 분광법 (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) 및 혹은 선형적인 라만 분광법 등 직접적인 분자의 진동모드를 측정하는 방법이나 흡수 혹은 광발광과 같은 분자내 전자전이를 이용하여 측정하는 방법, 광학적으로 대상 박막에 의한 굴절률과 위상차의 변화에 근거하는

- 광-간섭현상이나 에립소메트리(ellipsometry) 방법 등이 알려져 있다.
- [6] 그 중 적외선 분광법은 전통적으로 가장 광범위하게 잘 알려져 있는 방법으로 유기분자 내 진동에 의한 적외선 영역에서의 전자기파(광)의 흡수 현상에 기인한 것으로서 분자의 화학적 구조 변화에 매우 민감하나 적외선 사용으로써 공간적인 분해능을 마이크론 사이즈로 향상하거나 매우 얇은 박막을 측정하기에는 부적절하다.
- [7] 전자 전이에 의한 흡수나 광발광 현상에 의거하는 측정방법은 공간적인 분해능 및 두께 변이에 대한 측정법으로써 매우 뛰어나나 유기분자 특히 고분자의 화학구조변화에 대한 변화가 매우 떨어진다. 따라서 고분자의 화학구조를 알고 있는 경우 혹은 단일 화학종으로 형성된 고분자 박막의 경우에는 매우 유용하게 사용될 수 있으나 그렇지 않은 경우에는 그 적용성이 제한적이다. 광 굴절률에 의거하여 개발된 측정기술 (광 간섭법과 ellipsometry)은 화학종이 하나이며 굴절률이 정밀하게 알려져 있는 경우에는 이제까지 알려져 있는 측정기술 중 가장 좋은 정밀도를 갖는 박막 두께 결정 기술이나 그렇지 않은 경우 특히 유기분자의 종에 대하여 자체적으로 분석할 수 없으므로 두 종류이상의 화학종으로 구성되는 박막의 경우에는 적용할 수 없다.
- [8] 한편 선형적인 라만(RAMAN) 분광기술 (FT 혹은 cw, continuos wave)은 공간적인 분해능은 광 회절 한계에 도달할 수 있으며 화학종을 분석할 수 있는 등 그 장점이 있으나 감도의 문제점과 두께에 대한 신호의 세기가 매우 복잡하게 의존함으로 매우 얇은 박막의 경우 그 적용성이 제한적이다. 이러한 감도 문제점을 극복하기 위하여 최근 SERS (Surface Enhanced RAMAN Spectroscopy)와 같은 기술의 진보를 이루기 위한 시도를 활발하게 이루고 있으나 신호의 세기가 고분자의 박막의 두께에 대한 의존성이 시료별로 달라지는 특성에 의하여 그 응용성에 제한적이다.
- [9] 분자의 화학적 구조 변화에 매우 민감하고, 공간적인 분해능이 높고, 매우 얇은 박막을 선택적으로 측정할 수 있는 흡수 분광 방법이 요구된다.

발명의 상세한 설명

기술적 과제

- [10] 본 발명의 해결하고자 하는 일 기술적 과제는 특정 물질을 선택적으로 검출하는 고감도 레이저 흡수분광 장치 및 방법을 제공하는 것이다.
- [11] 본 발명의 해결하고자 하는 일 기술적 과제는 레이저 주파수/강도 변조(FM/IM) 흡수분광 장치 및 방법을 제공하는 것이다. 이 방법은, 주파수와 강도를 동시에 변조시키는 레이저 광원을 채용하여 생성한 시료의 흡수분광 신호를 취득/처리/계산함으로써, 주파수 변조(FM) 흡수분광 기술에 비해 (i) 신호 규격화 과정의 신호대잡음비 특성과 신뢰도를 향상시키고, (ii) 레이저 출력광의 강도 변조(IM) 및 요동이 존재하는 상황에서도 신호 처리하여, 측정 대상의 흡수도(absorbance)를 우수한 측정 감도와 정확도로 정량화할 수 있다.

과제 해결 수단

- [12] 본 발명의 일 실시예에 따른 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치는 가시광선 대역의 시야 빔을 출력하는 전시야 광원; 레이저 빔의 광주파수를 변조 주파수(f_m)로 주파수 변조하고, 상기 레이저 빔의 강도를 변조 주파수(f_m)로 강도 변조하여 프로브 빔을 출력하고, 상기 프로브 빔을 제공받은 측정 대상이 공명 흡수에 의하여 생성하는 레이저 흡수 신호를 전기 신호로 변환하고, 변환된 레이저 흡수 신호로부터 상기 변조 주파수(f_m)의 제1 고조파 성분 및 제2 고조파 성분을 추출하는 주파수 및 강도 변조 분광 처리부; 상기 시야 빔 및 상기 프로브 빔을 대물 렌즈에 제공하는 빔 처리부; 상기 시야 빔을 상기 측정 대상에 전시야 광으로 제공하고, 상기 프로브 빔을 그 초점에 집속하여 상기 측정 대상의 측정 위치에 제공하는 대물렌즈를 포함한다.
- [13] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 주파수 및 강도 변조 분광 처리부는 소정의 주파수 대역에서 변조 주파수(f_m)로 상기 레이저 빔의 광주파수를 변조하고 상기 변조 주파수(f_m)로 상기 레이저 빔의 강도를 변조하는 레이저 광원부; 상기 레이저 흡수 신호를 전기 신호로 변환하는 광감지부; 및 상기 광감지부의 출력 신호인 상기 변환된 레이저 흡수 신호를 처리하여 상기 변조 주파수(f_m)의 1차 고조파 성분(M_{1f}) 및 상기 변조 주파수(f_m)의 2차 고조파 성분(M_{2f})을 추출하고 상기 변조 주파수(f_m)의 1차 고조파 성분(M_{1f})과 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분(M_{2f})의 비(M_{1f}/M_{2f})를 이용하여 상기 측정 대상에 의한 상기 프로브 빔의 흡수도를 산출하는 처리부를 포함할 수 있다.
- [14] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 레이저 광원부는 양자 캐스케이드 레이저(quantum cascade laser)일 수 있다.
- [15] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 레이저 광원부는 레이저 전류 구동부; 및 상기 레이저 구동부로부터 전류를 제공받아 상기 프로브 빔을 생성하는 레이저를 포함할 수 있다. 상기 변조 주파수로 상기 전류를 변조함에 따라 상기 광주파수가 소정의 주파수 대역에서 변조되고 동시에 상기 프로브 빔의 강도가 상기 변조 주파수로 변조될 수 있다.
- [16] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 처리부는 상기 광감지부의 레이저 흡수 신호를 이용하여 상기 변조 주파수의 1차 고조파 성분(M_{1f}) 및 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분(M_{2f})을 추출하는 록인 증폭기; 및 상기 변조 주파수의 1차 고조파 성분(M_{1f})과 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분(M_{2f})의 비(M_{1f}/M_{2f})를 이용하여 상기 측정 대상에 의한 상기 프로브 빔의 흡수도를 산출하는 연산 처리부를 포함할 수 있다.
- [17] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 주파수 및 강도 변조 분광 처리부는 상기 프로브 빔의 일부를 제공받아 전기신호로 변환하여 광원 강도 신호를 생성하는 광원 출력 감지부를 더 포함할 수 있다. 상기 처리부는 상기 광원 강도 신호로부터 상기 변조 주파수의 1차 고조파 성분의 강도 변조 진폭(Δ_{1f}) 및 상기

변조 주파수의 2차 고조파 성분의 강도 변조 진폭(Δ_{2f})를 추출하는 보조 록인 증폭기; 상기 광감지부의 상기 레이저 흡수 신호로부터 상기 변조 주파수의 1차 고조파 성분 및 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분을 추출하는 록인 증폭기; 및 상기 레이저 흡수 신호의 상기 변조 주파수의 제1 고조파 성분(M1) 및 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분(M2), 및 상기 광원 강도 신호의 상기 변조 주파수의 1차 고조파 성분 및 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분을 이용하여 상기 측정 대상에 의한 상기 프로브 빔의 흡수도를 산출하는 연산 처리부를 포함할 수 있다.

- [18] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 레이저 광원부에 제어신호를 제공하는 광주파수 안정화부를 더 포함할 수 있다. 상기 광주파수 안정화부는 소정의 주파수 대역에서 주파수 변조되는 상기 프로브 빔의 중심 광주파수를 상기 측정 물질의 특정 흡수 스펙트럼의 중심에 일치시키기 위하여 상기 측정 대상을 구성하는 물질로 구성된 기준 셀; 상기 기준 셀에 상기 프로브 빔의 일부를 제공하도록 상기 프로브 빔을 분할하는 빔 분할기; 상기 기준 셀을 통과한 기준 프로브 빔을 측정하여 전기 신호로 변환하는 기준 셀 광감지부; 및 상기 기준 셀 광감지부와 상기 기준 셀 사이에 배치되어 상기 프로브 빔을 통과시키고 외부 노이즈 광을 제거하는 대역 통과 필터를 포함할 수 있다. 상기 처리부는 상기 기준셀 광감지부의 출력 신호를 제공받아 상기 프로브 빔의 중심 광주파수를 상기 측정 물질의 특정 흡수 스펙트럼의 중심에 일치시키기 위하여 상기 레이저 광원부에 제어 신호를 제공할 수 있다.
- [19] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 빔 처리부는 상기 주파수 및 강도 변조 분광 처리부가 출력하는 상기 프로브를 제공받아 투과시키고, 상기 측정 대상으로부터 진행하는 레이저 흡수 신호를 반사시키는 측정 빔 분할기; 및 상기 시야 빔을 반사시키고 상기 프로브를 투과시켜 상기 대물 렌즈에 제공하는 이색성 거울;을 포함할 수 있다.
- [20] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 프로브 빔을 제공받아 소정으로 방향으로 편광된 프로브 빔을 출력하는 편광판을 더 포함할 수 있다. 상기 빔 처리부는 상기 편광된 프로브를 제공받아 투과시키고, 상기 측정 대상으로부터 진행하는 레이저 흡수 신호를 반사시키는 편광 빔 분할기; 상기 편광 빔 분할기의 후단에 배치된 1/4 파장판; 및 상기 시야 빔을 반사시키고 상기 편광된 프로브를 투과시켜 상기 대물 렌즈에 제공하는 이색성 거울;을 포함할 수 있다.
- [21] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 보조 빔 분할기; 및 카메라를 더 포함할 수 있다. 상기 시야 빔은 상기 측정 대상에서 반사되어 반사 시야 빔을 생성하고, 상기 반사 시야 빔은 상기 대물렌즈를 투과하여 상기 빔 처리부에서 반사되어 상기 보조 빔 분할기에 제공될 수 있다. 상기 보조 빔 분할기는 상기 반사 시야 빔을 반사시켜 상기 카메라에 제공될 수 있다. 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 대물 렌즈와 상기 빔 처리부 사이에 배치되어 상기 프로브 빔을 주사하는 2D 빔 스캐너를 더 포함할 수 있다.

- [22] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 빔 처리부는 상기 시야 빔을 반사시키고 상기 프로빔을 투과시켜 상기 대물 렌즈에 제공하는 이색성 거울; 상기 측정 대상을 투과한 상기 레이저 흡수 신호를 집속하는 보조 렌즈를 더 포함할 수 있다. 상기 보조 렌즈는 상기 집속된 레이저 흡수 신호를 상기 주파수 및 강도 변조 분광 처리부에 제공할 수 있다.
- [23] 본 발명의 일 실시예에 따른 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 방법은 소정의 주파수 대역에서 변조 주파수(f_m)로 프로브 빔의 광주파수를 변조하고 상기 변조 주파수(f_m)로 상기 프로브 빔의 강도를 변조하는 단계; 주파수 및 강도 변조된 프로브 빔을 대물 렌즈를 사용하여 측정 대상의 측정 위치에 제공하는 단계; 가시광선 대역의 시야 빔을 상기 대물 렌즈를 사용하여 상기 측정 대상의 상기 측정 위치에 제공하는 단계; 및 상기 프로브 빔을 제공받은 측정 대상이 공명 흡수에 의하여 생성하는 레이저 흡수 신호를 전기 신호로 변환하고, 변환된 레이저 흡수 신호로부터 상기 변조 주파수(f_m)의 제1 고조파 성분 및 제2 고조파 성분을 추출하는 단계;를 포함한다.
- [24] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 프로브 빔을 제공받은 측정 대상이 공명 흡수에 의하여 생성하는 레이저 흡수 신호를 전기 신호로 변환하고, 변환된 레이저 흡수 신호로부터 상기 변조 주파수(f_m)의 제1 고조파 성분 및 제2 고조파 성분을 추출하는 단계는 파장 가변 반도체 레이저를 이용하여 상기 프로브 빔의 광주파수를 상기 변조 주파수로 변조하면서 동시에 상기 파장 가변 반도체 레이저의 상기 프로브 빔의 강도를 상기 변조 주파수로 변조하는 단계; 상기 측정 대상이 공명 흡수에 의하여 생성하는 레이저 흡수 신호를 전기 신호로 변환하는 단계; 상기 변환된 레이저 흡수 신호로부터 상기 변조 주파수(f_m)의 제1 고조파 성분 및 제2 고조파 성분을 추출하는 단계; 및 상기 변조 주파수(f_m)의 제1 고조파 성분 및 제2 고조파 성분을 이용하여 상기 측정 대상의 흡수도를 산출하는 단계를 포함할 수 있다.
- [25] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 대물 렌즈에 입사하는 상기 프로브 빔을 2차원적으로 주사하는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [26] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 프로브 빔의 사이즈를 상기 대물 렌즈의 구경에 맞도록 상기 프로브 빔의 사이즈를 조절하는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [27] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 측정 대상에서 반사된 시야 빔을 영상화하는 단계를 더 포함할 수 있다.

발명의 효과

- [28] 본 발명의 일 실시예에 따른 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치 및 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 방법은 주파수와 강도를 동시에 변조시키는 레이저 광원을 채용하여 전기신호로 변환된 레이저 흡수 신호를 취득 및 처리 및 계산한다.
- [29] 상기 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치 및 광주파수 및 강도 변조

레이저 흡수 분광 방법은 종래의 주파수 변조(FM) 흡수분광 측정법에 비해 검출 신호에 대한 규격화 처리 과정이 우수한 신호대잡음비 특성과 신뢰도를 향상시킨다. 또한 상기 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치 및 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 방법은 레이저 출력광의 강도 변조(IM) 및 요동이 존재하는 상황에서도 신호처리하여, 검출하고자 하는 화학종의 흡수도(absorbance)를 우수한 측정 감도와 정확도로 정량화할 수 있다.

- [30] 본 발명의 일 실시예에 따른 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치는 측정 대상을 현미경을 적용하여 육안으로 보거나 카메라와 같은 촬상 수단을 통하여 화면에 표시한다. 상기 장치는 특정 물질을 검출하고 특정 물질의 두께, 농도, 또는 흡수도 등을 높은 감도와 공간 분해능으로 영상화할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [31] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 물질의 투과 스펙트럼을 나타내는 도면이다.
- [32] 도 2는 도 1의 특정한 단일 흡수선(E)의 스펙트럼을 나타내는 도면이다.
- [33] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 주파수 변조를 설명하는 도면이다.
- [34] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 광주파수/강도 변조 레이저 흡수 분광 장치를 설명하는 개념도이다.
- [35] 도 5는 도 4의 레이저 흡수 분광 장치가 주파수 변조만을 수행하는 경우 신호를 나타내는 도면이다.
- [36] 도 6은 도 4의 레이저 흡수 분광 장치가 주파수 변조 및 강도 변조를 수행하는 경우 신호를 나타내는 도면이다.
- [37] 도 7은 도 4의 레이저 흡수 분광 장치의 레이저 흡수 신호를 주파수 도메인에서 표시한 도면이다.
- [38] 도 8은 도 4의 레이저 흡수 분광 장치의 레이저 흡수 신호에서 변조 주파수의 제1 고조파 성분과 제2 고조파 성분을 샘플의 흡수도에 따라 표시한 도면이다.
- [39] 도 9은 본 발명의 일 실시예에 따른 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 방법을 설명하는 흐름도이다.
- [40] 도 10은 본 발명의 다른 실시예에 따른 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치를 설명하는 도면이다.
- [41] 도 11은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치를 설명하는 도면이다.

발명의 실시를 위한 형태

- [42] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 분자의 화학적 구조 변화에 매우 민감하고, 공간적인 분해능이 높고, 매우 얇은 박막의 측정하는 흡수 분광 방법이 제공된다.
- [43] 이를 위해, 고감도/저잡음 레이저 FM 흡수 분광 기법은 특정 화학종에만 선택적으로 흡수되는 흡수선 광주파수를 중심으로 주파수 변조(FM: frequency

modulation)된 레이저를 이용할 수 있다. 간단히 원리를 설명하면, 측정 대상의 흡수선의 광 주파수(absorption line optical frequency)를 중심으로 소정의 선폭을 가지고 변조 주파수로 주파수 변조된 레이저 광이 상기 측정 대상에 조사되면, 상기 변조 주파수가 2배로 배가된 레이저 흡수 강도 변조 신호가 얻어진다. 레이저 흡수 강도 변조 신호를 전기신호로 변환하여 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분을 록인 증폭검출(lock-in detection)하면, 측정 대상의 흡수량에 비례하는 변조 주파수의 2차 고조파 성분 또는 변조 신호 진폭(modulation signal amplitude)이 얻어질 수 있다.

- [44] FM(Frequency Modulation) 레이저 흡수 분광법은 조사하는 레이저의 광 주파수가 고정된 DC 레이저 흡수 분광법과 비교할 때, 검출 대상 기체에 의한 레이저 흡수신호 성분만을 검출한다. 따라서, FM(Frequency Modulation) 레이저 흡수 분광법은 배경 신호(background signal)를 용이하게 제거하고 측정의 신호대잡음비를 높일 수 있는 장점을 가진다. 이 때, FM 레이저 흡수 분광법에서 전제되어야 할 기술적 요건은 다음과 같다. (i) FM 레이저의 출력 강도가 시간적으로 일정하게 유지되고, (ii) 레이저 출력 강도(intensity), 측정 레이저 경로 상에서의 광 감쇠(attenuation), 및 측정 대상의 측정 위치에서 측정 대상 표면의 공간적으로 균일하지 않은 후방산란 효율(backscattering efficiency) 등을 고려하여 측정 신호광의 강도는 규격화(normalization)되어야 한다.
- [45] 측정 대상을 검출을 위한 레이저 주파수 변조(FM) 흡수분광 측정법은 다음과 같은 문제점을 가진다. (i) 주파수 변조(FM) 레이저 광원은 실제로 출력 강도의 시간적 진폭 변조(AM: amplitude modulation) 또는 강도 변조(Intensity modulation)를 수반한다. 이에 따라, 이러한 광원은 측정 신호광의 파형 왜곡을 초래하여, 주파수 변조(FM) 흡수분광 이론에 기반한 흡수도(absorbance) 정량화를 불가능하게 한다. 따라서, 특정 물질의 공간 분포가 필요한 경우, 주파수 변조(FM) 흡수분광 측정법은 적용되기 어렵다. (ii) 일반적으로 검출되는 레이저 광은 강도가 미약하기 때문에, 측정 대상 표면에서의 후방산란 효율 불균일성을 규격화하기 위한 흡수신호 처리에서 낮은 신호대잡음비의 DC 레이저 검출 신호를 직접 이용할 경우, 과도한 측정 오차 및 감도 저하가 발생한다.
- [46] 즉, 레이저 광원이 변조 주파수로 주파수 변조(FM)를 수행하는 단계에서 임의의 강도 변조(IM)를 동반하는 경우, 레이저 흡수분광 신호는 상기 변조 주파수의 2차 고조파로 표시되는 이상적인 변조 파형에서 벗어나 시간적으로 왜곡된 파형을 갖는다. 따라서, 일반적으로 변조 주파수의 고조파 성분들을 포함한다. 이 때, 왜곡된 레이저 흡수분광 신호에 내포된 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분은 측정하고자 하는 흡수도(absorbance)에 선형적으로 비례하지 않는다. 또한, 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분은 강도 변조(IM)의 진폭 및 위상 특성에도 의존할 수 있다. 따라서, 우리는 레이저 흡수분광 신호로부터 기존의 주파수 변조(FM) 흡수분광 이론을 적용해 측정결과를 해석할 수 없다.

- [47] 또한, 통상적인 주파수 변조(FM) 흡수분광 장치를 이용해 시료의 흡수도를 정량화하려면, 레이저 흡수분광 신호에 포함된 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분을 레이저 신호 전체의 DC 레벨로 규격화하는 과정이 반드시 요구된다. 측정하고자 하는 시료의 흡수도가 매우 작은 경우, 잡음 레벨이 상당히 높은 레이저 흡수분광 신호의 DC 레벨의 측정 상 오차는 흡수도 측정의 감도와 정확도에 결정적인 한계로 작용한다.
- [48] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 레이저 주파수 변조(FM) 흡수분광 측정에 있어서, 앞에 서술한 (i) 주파수 변조(FM) 레이저 광원의 강도 변조(IM) 문제를 해결하고, (ii) 검출 신호에 대한 규격화 처리 과정이 우수한 신호대잡음비 특성을 가지도록 고안된 레이저 주파수/강도 변조 분광 장치와 흡수도 정량화 방법이 개시된다.
- [49] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 검출하고자 하는 화학종 (chemical species) 고유의 공명 흡수선(resonant absorption line)을 중심으로 광주파수와 출력 강도가 동시에 변조되는 레이저 빔은 측정 대상에 제공되고, 공간적으로 스캔(scan)할 수 있다. 측정 대상 표면으로부터 후방산란되거나 투과되는 레이저 흡수 신호는 수집되고, 2-채널 록인 증폭(2-channel lock-in detection)될 수 있다. 신호 처리/계산 과정을 통해서 특정 대상의 화학종에 의존하는 광 흡수도(absorbance)는 높은 측정 감도와 신호대잡음비로 정량화될 수 있다.
- [50] 보다 자세하게, FM/IM 레이저 광원의 구현 방법으로는 (i) 파장가변 레이저 광원의 주파수 변조(FM) 과정에서 동시에 수반되는 강도 변조(IM) 양상을 이용하는 방법과 (ii) 출력 강도의 변화 없이 순수하게 광주파수의 변조만 이루어지는 이상적인 FM 레이저 광원에 별도의 강도 변조(IM) 장치를 추가하는 방법이 있을 수 있다. 이 때, 레이저 자체 또는 별도 장치에 의한 강도 변조(IM)의 변조 주파수(modulation frequency)는 주파수 변조(FM)의 변조 주파수(modulation frequency)와 같도록 설정될 수 있다. 또한, 강도 변조(IM)에 의한 레이저 출력 강도 파형은, 실제 구현 과정에서 미세한 왜곡이 일어나기 때문에 기본 주파수(fundamental frequency) 성분 (이하, "1f-성분"이라고 칭함.) 외에도 잔류 2차 고조파(residual 2nd harmonics) 성분(이하, "2f-성분"이라고 칭함.)을 포함할 수 있다.
- [51] 상기 신호 처리/계산 과정은, FM/IM 레이저 빔이 조사된 측정 대상으로부터 검출되는 레이저 흡수 신호의 2-채널 록인 증폭(2-channel lock-in detection)을 통하여 얻은 1f-성분 및 2f-성분의 측정치를 이용하여 레이저 흡수분광 신호를 규격화하고, FM/IM 레이저 광원의 작동 변수(operation parameters)와 연관된 방정식(equation)을 기반으로 누설 기체 흡수도(absorbance) 대한 수학적 해(solution)를 찾을 수 있다.
- [52] 이 때, 상기 방정식에 포함되는 FM/IM 레이저 광원의 작동 변수는 임의로 설정할 수 있는 값이지만, 실제 레이저 광원의 운용 상 작동 변수가 특정 설정치에 고정되지 않고 시간적으로 변동할 수 있다. 따라서, 본 발명의 일

실시예에 따르면, 상기 신호 처리/계산 과정의 신호대잡음비와 신뢰도를 향상할 목적으로 레이저 광원의 작동 변수(상기 변조 주파수의 제1 고조파 성분의 강도 변조 진폭, 상기 변조 주파수의 제2 고조파 성분의 강도 변조 진폭)는 실시간으로 측정되어 이용될 수 있다.

- [53] 이하, 첨부된 도면을 참조로 본 발명의 바람직한 실시예들에 대하여 보다 상세히 설명한다. 이하의 도면들에서 동일한 참조부호는 동일한 구성요소를 지칭하며, 도면상에서 각 구성요소의 크기는 설명의 명료성과 편의상 과장되어 있을 수 있다.
- [54] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 물질의 투과 스펙트럼을 나타내는 도면이다.
- [55] 도 2는 도 1의 특정한 단일 흡수선(E)의 스펙트럼을 나타내는 도면이다.
- [56] 도 1 및 도 2를 참조하면, 물질은 N_2O 이다. 상기 N_2O 의 투과 스펙트럼(또는 흡수 스펙트럼)은 복수의 흡수선들을 포함한다. 이들 중에서 관심있는 하나의 흡수선(E)이 선택될 수 있다. 상기 흡수선(E)은 특정 물질을 검출하기 위하여 사용될 수 있다.
- [57] 흡수선을 정의하는 세가지 파라미터는 흡수선의 중심 주파수, 흡수선의 강도, 그리고 흡수선의 형태일 수 있다. 각각의 흡수선은 내츨 브로드닝(natural broadening)에 의하여 일정한 크기의 선폭을 가진다. 상기 흡수선의 형태는 로렌츠 프로파일(Lorentz profile)일 수 있다.
- [58] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 주파수 변조를 설명하는 도면이다.
- [59] 도 3을 참조하면, 흡수선은 로렌츠 프로파일을 가질 경우, 일정한 세기의 레이저의 광주파수는 변조 주파수(f_m)를 가지고 특정한 물질의 흡수 스펙트럼에 안정화된 사인 함수일 수 있다. 구체적으로 상기 레이저의 광주파수(f_{cm})는 다음과 같이 주어질 수 있다. 상기 레이저의 광 주파수(ν)는 $\nu_0 + \Delta\nu_{mod} \cos(2\pi f_m t)$ 일 수 있다.
- [60] 여기서, f_m 은 변조 주파수이고, ν_0 는 흡수선의 중심 광주파수이고, $\Delta\nu_{mod}$ 는 변조진폭이고, t 는 시간이다.
- [61] 상기 레이저의 광주파수는 시간에 따라 사인파의 형태를 가지는 경우, 누설 물질을 투과한 광은 상기 측정 대상의 상기 흡수선에 의하여 변형되어 변조 주파수(f_m)의 2차 고조파 성분을 포함한다. 따라서, 변조 주파수(f_m)의 2차 고조파 성분은 상기 측정 대상의 농도에 의존할 수 있다.
- [62] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 광주파수/강도 변조 레이저 흡수 분광 장치를 설명하는 개념도이다.
- [63] 도 5는 도 4의 레이저 흡수 분광 장치가 주파수 변조만을 수행하는 경우 신호를 나타내는 도면이다.
- [64] 도 6은 도 4의 레이저 흡수 분광 장치가 주파수 변조 및 강도 변조를 수행하는 경우 신호를 나타내는 도면이다.
- [65] 도 7은 도 4의 레이저 흡수 분광 장치의 레이저 흡수 신호를 주파수 도메인에서

표시한 도면이다.

- [66] 도 8은 도 4의 레이저 흡수 분광 장치의 레이저 흡수 신호에서 변조 주파수의 제1 고조파 성분과 제2 고조파 성분을 샘플의 흡수도에 따라 표시한 도면이다.
- [67] 도 4 내지 도 8을 참조하면, 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치(400)는 전시야 광원(420), 주파수 및 강도 변조 분광 처리부(410), 빔 처리부(440), 및 대물렌즈(450)를 포함한다. 상기 전시야 광원(420)은 가시광선 대역의 시야 빔(41)을 출력한다. 상기 주파수 및 강도 변조 분광 처리부(410)는 레이저 빔의 광주파수를 변조 주파수(f_m)로 주파수 변조하고, 상기 레이저 빔의 강도를 변조 주파수(f_m)로 강도 변조하여 프로브 빔(31)을 출력하고, 상기 프로브 빔(31)을 제공받은 측정 대상(10)이 공명 흡수에 의하여 생성하는 레이저 흡수 신호를 전기 신호로 변환하고, 변환된 레이저 흡수 신호로부터 상기 변조 주파수(f_m)의 제1 고조파 성분 및 제2 고조파 성분을 추출한다. 상기 빔 처리부(440)는 상기 시야 빔 및 상기 프로브 빔(31)을 대물 렌즈에 제공한다. 상기 대물렌즈(450)는 상기 시야 빔을 상기 측정 대상(10)에 전시야 광으로 제공하고, 상기 프로브 빔(31)을 그 초점에 집속하여 상기 측정 대상(10)의 측정 위치에 제공하는 대물렌즈를 포함한다.
- [68] 상기 주파수 및 강도 변조 분광 처리부(410)는 소정의 주파수 대역에서 변조 주파수(f_m)로 상기 레이저 빔의 광주파수를 변조하고 상기 변조 주파수(f_m)로 상기 레이저 빔의 강도를 변조하는 레이저 광원부(110), 상기 레이저 흡수 신호를 전기 신호로 변환하는 광감지부(130), 및 처리부(140)를 포함한다. 상기 처리부(140)는 상기 광감지부(130)의 출력 신호인 상기 변환된 레이저 흡수 신호를 처리하여 상기 변조 주파수(f_m)의 1차 고조파 성분(M_{1f}) 및 상기 변조 주파수(f_m)의 2차 고조파 성분(M_{2f})을 추출하고 상기 변조 주파수(f_m)의 1차 고조파 성분(M_{1f})과 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분(M_{2f})의 비(M_{1f}/M_{2f})를 이용하여 상기 측정 대상(10)에 의한 상기 프로브 빔(31)의 흡수도를 산출한다.
- [69] 도 4 및 도 5를 참조하면, 상기 레이저 광원부(110)가 통상적으로 변조 주파수(f_m)로 주파수 변조만을 수행하는 경우, 상기 레이저 빔의 광 주파수가 시간에 따라 표시된다. 상기 레이저 광원부(110)의 중심 광주파수는 상기 측정 대상(10)의 특정 흡수 스펙트럼의 중심 광주파수와 일치할 수 있다.
- [70] 상기 공명 흡수도(A_0) 또는 흡수도는 상기 측정 대상(10)에 의하여 흡수되는 빛의 세기에 의존할 수 있다. 상기 측정 대상(10)에서 반사되거나, 후방 산란되거나, 투과된 레이저 흡수 신호(32)에서 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분은 상기 흡수도와 상기 흡수선 변조 폭의 곱에 의존할 수 있다.
- [71] 상기 레이저 광원부(110)의 광주파수가 상기 측정 대상(10)의 특정 흡수 스펙트럼의 중심 광주파수와 일치할 경우, 상기 흡광도는 최대일 수 있다. 이에 따라, 상기 프로브 빔(31)은 상기 측정 대상(10)에서 반사, 투과, 또는 산란되어 상기 레이저 흡수 신호로 변환될 수 있다. 상기 레이저 광원부(110)의 광주파수는 상기 측정 대상(10)의 특정 흡수 스펙트럼의 중심 광주파수와 일치할 경우, 상기

레이저 흡수 신호는 최소의 세기를 가질 수 있다. 또한, 상기 레이저 광원부(110)의 광주파수가 상기 측정 대상(10)의 특정 흡수 스펙트럼의 중심 광주파수에서 가장 떨어진 경우, 상기 레이저 흡수 신호는 최대의 세기를 가질 수 있다. 상기 프로브 빔(31)의 주파수 변조에 의하여, 상기 레이저 흡수 신호(32)는 주로 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분을 포함할 수 있다.

- [72] 레이저 (프로브 빔)의 중심 광주파수는 화학종 선택적 공명 흡수선의 중심 광주파수(ν_0)에 맞추질 수 있다. 화학종 선택적 공명 흡수선의 폭은 $\Delta\nu_{\text{abs}}$ 일 수 있다. 레이저의 변조 주파수는 f_m 일 수 있다. 레이저의 변조 주파수의 변조 폭은 $\Delta\nu_{\text{mod}}$ 일 수 있다. 상기 레이저의 광 주파수는 $\nu_0 + \Delta\nu_{\text{mod}} \cos(2\pi f_m t)$ 일 수 있다.
- [73] 도 6을 참조하면, 상기 레이저 광원부(110)가 변조 주파수(f_m)로 주파수 변조(FM) 및 강도 변조(IM)를 수행하는 경우, 상기 프로브 빔(31)의 광주파수가 시간에 따라 표시된다. 상기 프로브 빔(31)은 특정한 주파수 대역($2\Delta\nu_{\text{mod}}$)의 범위 내에서 변조 주파수(f_m)로 주파수 변조될 수 있다. 상기 레이저 광원부(110)의 프로브 빔(31)은 상기 변조 주파수(f_m)으로 강도 변조되고, 기생적으로, 상기 레이저 광원부(110)의 프로브 빔(31)은 상기 변조 주파수(f_m)의 2차 고조파 성분으로 추가적으로 강도 변조될 수 있다. 상기 변조 주파수(f_m)의 1차 고조파 성분과 제2차 고조파 성분의 상기 강도 변조 진폭의 비는 10 배 이상일 수 있다. 바람직하게는, 상기 변조 주파수(f_m)의 2차 고조파 성분으로 강도 변조는 제거되는 것이 바람직할 수 있다.
- [74] 상기 프로브 빔(31)은 상기 측정 대상(10)에서 반사, 투과, 또는 산란되어 상기 레이저 흡수 신호(32)로 변환될 수 있다. 상기 레이저 광원부(110)의 광주파수는 상기 측정 대상(10)의 특정 흡수 스펙트럼의 중심 광주파수와 일치할 경우, 상기 레이저 흡수 신호(32)는 최소의 세기를 가질 수 있다. 또한, 상기 레이저 광원부의 광주파수가 상기 측정 대상(10)의 특정 흡수 스펙트럼의 중심 광주파수에서 가장 떨어진 경우, 상기 레이저 흡수 신호(32)는 최대의 세기를 가질 수 있다. 한편, 상기 레이저 광원부(110)는 강도 변조를 동반하기 때문에, 상기 레이저 흡수 신호(32)는 상기 변조 주파수의 1차 고조파 성분 및 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분을 포함할 수 있다.
- [75] 상기 레이저 광원부(110)가 상기 변조 주파수로 주파수 변조를 수행하는 경우, 기생적으로, 상기 레이저 광원부는 상기 변조 주파수로 강도 변조를 수행할 수 있다. 또한, 강도 변조는 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분을 포함할 수 있다.
- [76] 이하, 상기 레이저 광원부(110)가 주파수 변조 및 강도 변조를 수반하는 경우, 상기 레이저 흡수 신호(32)의 파형이 이론적으로 설명된다.
- [77] 상기 프로브 빔(31)은 강도 변조에 의하여 상기 변조 주파수의 1차 고조파 성분($\Delta\nu_{1f}$) 및 2차 고조파 성분($\Delta\nu_{2f}$)을 포함하는 경우, 상기 프로브 빔(31)의 파워는 다음과 표시된다.

[78] [수식1]

$$P_L(t) = P_0 \times \{1 - \Delta_{1f} [1 + \cos(\omega_m t + \phi_{1f})] - 2\Delta_{2f} [1 + \cos(\omega_m t + 2\phi_{2f})]\}$$

[79] 여기서, P_L 은 상기 프로브 빔(31)의 파워이고, P_0 는 DC 파워이고, Δ_{1f} 는 상기 변조 주파수의 제1 고조파 성분의 강도 변조 진폭이고, Δ_{2f} 는 상기 변조 주파수의 제2 고조파 성분의 강도 변조 진폭이다. ω_m 은 변조 각주파수($\omega_m = 2\pi f_m$)이고, ϕ_{1f} 는 상기 변조 주파수의 제1 고조파 성분의 강도 변조 위상이고, ϕ_{2f} 는 상기 변조 주파수의 제2 고조파 성분의 강도 변조 위상이다. 한편, 상기 측정 대상의 흡수 변조는 다음과 같이 표현된다.

[80] [수식2]

$$A_{\text{mod}}(t) = A_0 \times \{1 - \Delta_{\text{abs}} [1 + \cos(2\omega_m t + \phi_{\text{abs}})]\}$$

[81] 여기서, A_{mod} 은 상기 측정 대상의 흡수 변조이고, A_0 는 상기 측정 대상의 공명 흡수도이고, Δ_{abs} 는 흡수선 변조 폭이고, ϕ_{abs} 는 주파수 흡수 변조 위상이고, $2\omega_m$ 은 주파수 변조 흡수 변조 주파수이다.

[82] 상기 레이저 흡수 신호(32)는 전기신호(V_{sig})로 변환될 수 있다. 상기 흡수 변조와 상기 프로브 빔(31)의 파워의 곱으로 다음과 같이 표시될 수 있다. 상기 레이저 흡수 신호(V_{sig})는 광감지부에 의하여 전기 신호로 표시될 수 있다.

[83] [수식3]

$$V_{\text{sig}}(t) = P_L(t) \times (1 - A_{\text{mod}}(t))$$

[84] 상기 레이저 흡수 신호(V_{sig})는 DC 성분, 상기 변조 주파수의 1차 고조파 성분(M_{1f}), 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분(M_{2f}), 상기 변조 주파수의 3차 고조파 성분(M_{3f}), 및 상기 변조 주파수의 4차 고조파 성분(M_{4f})을 포함할 수 있다.

[85] 상기 레이저 흡수 신호의 상기 변조 주파수의 1차 고조파 성분(M_{1f})과 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분(M_{2f})은 충분한 크기를 가질 수 있다. 따라서, 상기 레이저 흡수 신호의 상기 변조 주파수의 1차 고조파 성분(M_{1f})과 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분(M_{2f})의 계수 비($S = M_{2f}/M_{1f}$)는 노이즈(noise)에 강한 특성을 보일 수 있다.

[86] 또한, 상기 공명 흡수도(A_0)는 $S (= M_{2f}/M_{1f})$ 와 설정값들($\Delta_{1f}, \Delta_{2f}, \dots$)의 함수로 표시될 수 있다. 이에 따라, 상기 공명 흡수도(A_0)가 산출될 수 있다. 상기 공명 흡수도는 상기 측정 대상이 박막인 경우, 상기 박막의 두께 및 특정 화학종의 밀도에 의존할 수 있다. 따라서, 상기 특정 화학종의 준부 및 상기 특정 화학종의 밀도가 확인될 수 있다. 또한, 상기 특정 화학종의 밀도가 알려진 경우, 상기 박막의 두께가 산출될 수 있다. 상기 프로브 빔이 공간적으로 주사되는 경우, 공명 흡수도 영상(밀도 영상 또는 두께 영상)이 얻어질 수 있다.

[87] 상기 계수 비($S = M_{2f}/M_{1f}$)는 측정 대상의 흡수도(A_0)를 산출하기 위하여 이용된다. 이 때, 상기 계수 비($S = M_{2f}/M_{1f}$)는 레이저의 불규칙한 강도 변동과 측정

대상의 불균일한 반사율이 신호 해석에 미치는 영향을 원리적으로 제거한 규격화된 신호이다.

- [88] 상기 계수 비($S=M_{2f}/M_{1f}$)는 구하고자 하는 흡수도(A_0)에 대한 방정식을 구성할 수 있다. 따라서, FM/AM 레이저 흡수 신호의 2-채널 복인 증폭 검출 결과를 이용하여 상기 계수 비($S=M_{2f}/M_{1f}$)를 계산하고, FM/IM 레이저 광원의 동작 변수 설정치 또는 측정치를 구해 상기 방정식의 계수를 결정하면, 측정 대상의 흡수도(A_0)를 얻을 수 있다.
- [89] 측정 대상의 흡수도(A_0)에 대한 방정식은 FM/IM 레이저 광원의 동작 변수값에 의존할 수 있다. 주파수 변조(FM)의 변조 주파수 또는 흡수선 변조 폭과 같은 설정 물리량과 달리 레이저 강도 변조(IM)와 연관된 1f 및 2f 강도 변조 진폭(Δ_{1f} , Δ_{2f}) 및 위상(Φ_{1f} , Φ_{2f})은 사용하는 레이저의 특성 및 환경 변화에 따라 시간적으로 요동하는 물리량들이다.
- [90] 도 8을 참조하면, 상기 공명 흡수도(A_0)에 따른 상기 레이저 흡수 신호의 상기 변조 주파수의 1차 고조파 성분(M_{1f}), 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분(M_{2f}), 및 이들의 비($S=M_{2f}/M_{1f}$)가 표시된다. x축은 상기 측정 대상의 공명 흡수도(A_0)를 나타낸다. 실선은 상기 변조 주파수의 제2 고조파 성분의 강도 변조 진폭(Δ_{2f})이 없는 경우이고, 점선은 상기 변조 주파수의 제2 고조파 성분의 강도 변조 진폭(Δ_{2f})이 있는 경우이다. 흡수도가 대략 0.1 이하인 경우, 상기 변조 주파수의 1차 고조파 성분의 세기는 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분보다 증가한다. 이에 따라, 상기 강도 변조에 의한 변조 주파수의 1차 고조파 성분을 이용하면, 우리는 미세한 흡수도를 검출할 수 있다. 구체적으로, 상기 측정 대상이 유리 기판 상에 코팅된 박막인 경우, 수 nm 이하의 두께에 기인한 특정 화학종이 검출될 수 있다.
- [91] 다시, 도 4를 참조하면, 측정 대상(10)은 액체, 기체, 또는 고체일 수 있다. 상기 측정 대상(10)은 벌크 형태 또는 박막의 형태일 수 있다.
- [92] 예를 들어, 특정 물질(또는 특정 화학종)을 검출을 위하여, 검출용 광주파수/강도 변조 레이저 흡수 분광 장치는 물질 별로 중심 광주파수를 변경할 수 있다. 검출용 광주파수/강도 변조 레이저 흡수 분광 장치는 복수의 물질을 순차적으로 검출할 수 있다.
- [93] 상기 레이저 광원부(110)는 양자 캐스케이드 레이저(quantum cascade laser)일 수 있다. 구체적으로, 상기 레이저 광원부(110)는 분자지문 분광대역인 중적외선(mid-infrared light)을 발생시킬 수 있다. 상기 레이저 광원부(110)는 가변 파장 레이저 광원(tunable wavelength laser source)일 수 있다. 상기 레이저 광원부(110)은 특정한 물질의 흡수 스펙트럼 중에서 특정한 단일 흡수선의 선폭의 범위에서 변조 주파수를 가지고 시간에 따라 레이저 주파수를 연속적으로 변경할 수 있다. 상기 레이저 광원부(110)는 색소 레이저, 파라메트릭 발진 레이저, 스핀 플립 라만 레이저, 또는 반도체 레이저일 수 있다.
- [94] 상기 레이저 광원부(110)는 레이저 전류 구동부(114) 및 상기 레이저 전류 구동부(114)로부터 전류를 제공받아 상기 프로브 빔(31)을 생성하는

레이저(112)를 포함할 수 있다. 상기 변조 주파수(f_m)로 상기 전류를 변조함에 따라 상기 광주파수가 소정의 주파수 대역에서 변조되고 동시에 상기 프로브의 강도가 상기 변조 주파수로 변조될 수 있다. 상기 레이저 전류 구동부(114)는 레이저에 흐르는 전류를 변조 주파수로 시간에 따라 변조할 수 있다. 이에 따라, 상기 레이저 광원부(110)의 출력광의 광주파수는 사인함수로 변조되고, 동시에 상기 프로브 빔(31)의 강도는 상기 변조 주파수로 변조될 수 있다. 상기 프로브 빔(31)의 강도 변조는 상기 변조 주파수의 1차 고조파 성분만을 포함하는 것이 바람직하나, 상기 변조 주파수의 1차 고조파 성분을 포함할 수 있다.

- [95] 함수 발생기(147)는 변조 주파수를 가지는 사인 함수 또는 기준 신호를 생성할 수 있다. 함수 발생기는 록인 증폭기(lock-in amplifier)에 록인 감지를 위하여 기준 신호를 제공할 수 있다. 상기 기준 신호는 상기 변조 주파수를 가진 사인 신호 또는 펄스 신호일 수 있다. 상기 함수 발생기(147)는 기준 신호를 생성하여 상기 레이저 광원부(110)에 제공할 수 있다. 이에 따라, 상기 레이저 광원부(110)는 상기 기준 신호에 동기화되어 상기 변조 주파수로 상기 주파수 변조 및 강도 변조를 수행할 수 있다. 또한, 상기 함수 발생기(147)의 기준 신호는 광주파수 안정화부(160), 록인 증폭기(142), 및 보조 록인 증폭기(146)에 제공될 수 있다. 이에 따라, 상기 광주파수 안정화부(160)는 상기 레이저 광원부(110)의 중심 광주파수를 상기 흡수선의 중심 광주파수에 동기화시킬 수 있다. 또한, 상기 록인 증폭기(142)는 상기 레이저 흡수 신호(32)로부터 상기 변조 주파수의 1차 고조파 성분 및 2차 고조파 성분을 추출할 수 있다. 또한, 상기 보조 록인 증폭기(146)는 상기 프로브 빔(31)의 강도 신호(Vint)로부터 상기 변조 주파수의 1차 고조파 성분 및 2차 고조파 성분을 추출하여, 강도 변조 진폭을 추출할 수 있다.
- [96] 상기 레이저 광원부(110)의 후단에는 아이솔레이터(isolator, 172)가 배치될 수 있다. 상기 아이솔레이터(172)는 상기 레이저 광원부(110)에 재입사하는 반사파를 제거할 수 있다.
- [97] 상기 아이솔레이터(172)의 후단에는 제1 빔 분할기(167)가 배치될 수 있다. 상기 제1 빔 분할기(167)는 상기 프로브 빔(31)의 일부를 반사시켜 광주파수 안정화부(160)에 제공할 수 있다.
- [98] 상기 광주파수 안정화부(160)는 상기 레이저 광원부(110)의 중심 광주파수를 안정화시킬 수 있다. 상기 광주파수 안정화부(160)는 소정의 주파수 대역에서 주파수 변조되는 상기 프로브 빔(31)의 중심 광주파수를 상기 측정 물질의 특정 흡수 스펙트럼의 중심에 일치시키기 위하여 상기 측정 대상(10)을 구성하는 물질로 채워진 기준 셀(163), 상기 기준 셀(163)에 상기 프로브 빔(31)의 일부를 제공하도록 상기 프로브 빔(31)을 분할하는 빔 분할기(167, 162), 상기 기준 셀(163)을 통과한 기준 프로브 빔(31)을 측정하여 전기 신호로 변환하는 기준셀 광감지부(166), 및 상기 기준셀 광감지부(166)와 상기 기준 셀(163) 사이에 배치되어 상기 프로브 빔(31)을 통과시키고 외부 노이즈 광을 제거하는 대역

통과 필터(164)를 포함할 수 있다. 상기 처리부(140)는 상기 기준셀 광감지부(166)의 출력 신호를 제공받아 상기 프로브 빔(31)의 중심 광주파수를 상기 측정 물질의 특정 흡수 스펙트럼의 중심에 일치시키기 위하여 상기 레이저 광원부(110)에 제어 신호를 제공할 수 있다.

[99] 상기 빔 분할기(167,162)는 제1 빔 분할기(167)와 제2 빔 분할기(162)를 포함할 수 있다. 상기 제1 빔 분할기(167)는 상기 아이솔레이터(172)의 후단에 배치되어, 상기 프로브 빔(31)의 일부를 분할할 수 있다. 상기 제1 빔 분할기(167)의 분할 비율은 100:1 수준일 수 있다. 상기 분할된 프로브 빔(31)은 제2 빔 분할기(162)를 통하여 다시 분할될 수 있다. 상기 제2 빔 분할기(162)의 분할 비율은 50: 50 일 수 있다. 상기 제2 빔 분할기(162)를 통하여 분할된 빔은 상기 기준 셀(163)에 제공될 수 있다. 한편, 상기 제2 빔 분할기(162)를 통하여 분할된 다른 빔은 광원 출력 감지부(150)에 제공될 수 있다.

[100] 상기 제2 빔 분할기(162)는 상기 프로브 빔(31)의 일부를 상기 기준 셀(163)에 제공할 수 있다. 상기 기준 셀(163)은 측정하고자 하는 물질을 밀봉한 투명한 셀일 수 있다. 이에 따라, 주파수 가변 레이저 빔이 상기 기준 셀(163)을 투과하는 경우, 투과 스펙트럼(또는 흡수 스펙트럼)이 나타날 수 있다. 상기 물질은 N₂O, He, CH₄, 등일 수 있다. 상기 기준 셀(163)을 투과한 레이저 광은 대역 통과 필터(164)에 제공될 수 있다. 상기 대역 통과 필터(164)는 상기 물질의 소정의 흡수선 대역 이외에 다른 파장을 가진 노이즈 성분을 제거할 수 있다. 상기 대역 통과 필터(164)는 프로브 빔(31)의 변조 주파수 대역을 통과시키는 밴드 패스 필터일 수 있다. 상기 대역 통과 필터(164)를 통과한 광은 기준셀 광감지부(166)에 제공된다.

[101] 상기 기준셀 광감지부(166)는 광 신호를 전기 신호로 변경할 수 있다. 상기 기준셀 광 검출기는 포토 다이오드일 수 있다. 상기 기준셀 광감지부(166)의 주파수 안정화 검출 신호는 상기 중심 광 광주파수에서 피크를 보일 수 있다. 상기 기준셀 광감지부(166)의 주파수 안정화 검출 신호는 주파수 안정화 제어를 위하여 처리부(140)에 제공될 수 있다. 상기 처리부(140)는 상기 함수 발생기(147)를 포함할 수 있다. 이에 따라, 상기 주파수 안정화 검출 신호의 피크 위치에 상기 레이저 광원(110)의 중심 광주파수를 일치하도록 제어할 수 있다.

[102] 상기 제2 빔 분할기(162)는 프로브 빔(31)을 분할하고, 상기 광원 출력 감지부(150)에 제공할 수 있다. 상기 광원 출력 감지부(150)는 강도 변조 및 주파수 변조된 프로브 빔(31)을 측정할 수 있다. 상기 광원 출력 감지부(150)의 출력 신호는 흡수 스펙트럼에 의한 영향이 없어, 상기 레이저 광원의 강도 변조의 결과만을 표시할 수 있다. 상기 광원 출력 감지부(150)의 출력 신호(Vint)는 보조 록인 증폭기(146)에 제공될 수 있다. 상기 보조 록인 증폭기(146)는 상기 프로브 빔(31)의 강도 변조 진폭을 측정할 수 있다. 구체적으로, 상기 보조 록인 증폭기(146)는 상기 함수 발생기(147)로부터 상기 변조 주파수의 기준 신호를 제공받아, 상기 변조 주파수의 제1 고조파 성분의

강도 변조 진폭(Δ_{lf})을 추출할 수 있다. 또한, 추가적으로, 상기 보조 록인 증폭기는 상기 변조 주파수의 제2 고조파 성분의 강도 변조 진폭(Δ_{2f})을 추출할 수 있다.

- [103] 상기 변조 주파수의 제1 고조파 성분의 강도 변조 진폭(Δ_{lf}) 및 상기 변조 주파수의 제2 고조파 성분의 강도 변조 진폭(Δ_{2f})은 상기 연산 처리부(144)에 제공되고, 상기 연산 처리부(144)는 상기 측정 대상(10)의 흡수도를 산출하기 위한 초기 설정 변수값으로 사용할 수 있다.
- [104] 만약, 상기 레이저 광원부(110)가 일정한 강도 변조 특성을 가지고 있는 경우, 상기 변조 주파수의 제1 고조파 성분의 강도 변조 진폭(Δ_{lf}) 및 상기 변조 주파수의 제2 고조파 성분의 강도 변조 진폭(Δ_{2f})은 측정되지 않고 설정값으로 대체될 수 있다.
- [105] 상기 보조 록인 증폭기(146)는 초기 동작 상태에서 1회에 한하여 상기 광원 출력 감지부(150)의 출력 신호 또는 상기 광원 강도 신호로부터 상기 변조 주파수의 1차 고조파 성분의 강도 변조 진폭(Δ_{lf}) 및 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분의 강도 변조 진폭(Δ_{2f})을 추출할 수 있다.
- [106] 상기 아이솔레이터(172)의 후단 또는 상기 제1 빔 분할기(167)의 후단에 빔 확장부가 배치될 수 있다. 상기 빔 확장부는 상기 프로브 빔(31)의 빔 사이즈를 확대하여 상기 대물 렌즈의 구경보다 작은 평행광을 생성할 수 있다.
- [107] 상기 제1 빔 분할기(167)의 후단 또는 상기 빔 확장부(480)의 후단에는 빔 처리부(440)가 배치될 수 있다. 상기 빔 처리부(440)는 상기 시야 빔 및 상기 프로브 빔(31)을 대물 렌즈에 제공할 수 있다.
- [108] 상기 빔 처리부(440)는 측정 빔 분할기(442) 및 이색성 거울(444)을 포함할 수 있다. 상기 측정 빔 분할기(442)는 상기 주파수 및 강도 변조 분광 처리부(410)가 출력하는 상기 프로브빔을 제공받아 투과시키고, 상기 측정 대상(10)으로부터 진행하는 레이저 흡수 신호(32)를 반사시킬 수 있다. 상기 이색성 거울(444)은 입사하는 상기 시야 빔을 반사시키고 상기 프로브빔을 투과시켜 상기 대물 렌즈(450)에 제공할 수 있다. 상기 프로브 빔(31)의 파장은 중-적외선 대역이고, 상기 시야 빔의 파장은 가시 광선 대역일 수 있다. 상기 이색성 거울(444)은 시야 빔(41)과 상기 프로브 빔(31)을 결합하여 상기 대물 렌즈에 제공할 수 있다.
- [109] 상기 전시야 광원(420)은 가시 광선 대역의 시야 빔을 출력할 수 있다. 상기 시야 빔은 단색 광원 또는 다색 광원일 수 있다. 상기 시야 빔은 통상의 조명용 광원일 수 있다. 상기 시야 빔은 상기 측정 대상(10)에 조사되어, 상기 측정 대상(10)의 이미지를 얻기 위하여 사용될 수 있다.
- [110] 상기 전 시야 광원(420)은 LED와 같은 광대역 광원일 수 있다. 상기 전시야 광원(420)은 전시야 발광부(422), 상기 전시야 발광부(422)의 시야 빔을 집속하여 광섬유(426)에 제공하는 제1 렌즈(424), 및 상기 광섬유(426)의 출력광을 집속하는 제2 렌즈(428)를 포함할 수 있다.
- [111] 상기 이색성 거울(444)은 상기 시야 빔(41)과 상기 프로브 빔(31)을 결합하여

동일한 광 경로를 제공할 수 있다. 예를 들어, 상기 이색성 거울(444)은 상기 프로브 빔(31)을 투과시키고, 상기 시야 빔을 반사시켜 동일한 광 경로를 제공할 수 있다. 상기 시야 빔과 상기 프로브 빔(31)은 선택적으로 상기 측정 대상(10)에 제공될 수 있다. 측정 시, 상기 시야 빔은 제거되고, 상기 프로브 빔(31)이 상기 측정 대상(10)을 주사할 수 있다. 또는, 측정 시, 상기 시야 빔과 상기 프로브 빔(31)은 상기 측정 대상(10)에 동시에 조사될 수 있다.

[112] 상기 대물 렌즈는 상기 프로브 빔(31)을 그 초점에 집속할 수 있다. 상기 대물 렌즈의 초점에 배치된 측정 대상(10)의 측정 위치는 상기 집속된 프로브 빔에 의하여 레이저 흡수 신호를 생성할 수 있다. 한편, 상기 시야 빔은 상기 대물 렌즈에 평행광으로 입사하지 않는다. 따라서, 상기 시야 빔은 상기 대물 렌즈의 초점 주위에서 넓게 퍼져서 조사된다. 상기 측정 대상(10)에서 반사된 반사 시야 빔은 다시 대물 렌즈를 통하여 상기 이색성 미러에서 반사된다.

[113] 상기 프로브 빔(31)은 상기 측정 대상(10)에 조사된다. 상기 측정 대상(10)은 상기 프로브 빔(31)을 흡수하여 변조된 레이저 흡수 신호(32)를 생성할 수 있다. 상기 프로브 빔(31)은 상기 측정 대상(10)에서 반사, 투과, 또는 산란될 수 있다. 반사식 현미경에 적용된 경우, 상기 프로브 빔(31)은 후방 산란되거나 반사되어 레이저 흡수 신호로 변환될 수 있다. 상기 레이저 흡수 신호는 상기 대물 렌즈(450)를 통하여 평행광으로 변환되고, 상기 이색성 미러(444)를 투과하고 상기 측정 빔 분할기(442)에서 반사된다. 상기 측정 빔 분할기(442)에서 반사된 레이저 흡수 신호는 상기 집속 렌즈(441)를 통하여 광감지부(130)에 제공된다.

[114] 상기 광감지부(130)는 포토다이오드일 수 있다. 상기 광감지부(130)는 적외선 영역에서 반응하는 반도체 광소자일 수 있다. 상기 광감지부(130)는 HgCdZnTe 계열의 물질을 사용할 수 있다. 상기 광감지부(130)는 레이저 흡수 신호를 제공받을 수 있다. 상기 광감지부(130)의 출력 신호는 전기신호인 레이저 흡수 신호(V_{sig})로 변환될 수 있다. 상기 레이저 흡수 신호(32)는 상기 레이저 광원의 주파수 변조 및 강도 변조에 의하여, 상기 변조 주파수의 1차 및 2차 고조파 성분을 포함할 수 있다. 상기 1차 고조파 성분은 상기 강도 변조에 주로 기인하고, 상기 제2차 고조파 성분은 상기 변조 주파수의 제2 고조파 성분의 강도 변조 진폭(Δ_{2f})과 상기 변조 주파수의 제2 고조파 성분의 흡수선 변조 폭에 주로 의존할 수 있다.

[115] 상기 처리부(140)는 상기 광감지부(130)의 레이저 흡수 신호를 이용하여 상기 변조 주파수의 1차 고조파 성분(M_{1f}) 및 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분(M_{2f})을 추출하는 록인 증폭기(142), 및 상기 변조 주파수의 1차 고조파 성분(M_1)과 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분(M_2)의 비(M_{1f}/M_{2f})를 이용하여 상기 측정 대상(10)에 의한 상기 프로브 빔(31)의 흡수도를 산출하는 연산 처리부(144)를 포함할 수 있다.

[116] 상기 록인 증폭기(142)는 2 채널-록인 증폭기이고, 상기 레이저 흡수 신호로부터 상기 변조 주파수의 1차 및 2차 고조파 성분(M_{1f} , M_{2f})을 동시에

- 추출할 수 있다. 상기 록인 증폭기(142)는 상기 함수 발생기(147)로부터 상기 변조 주파수의 기준 신호를 제공받을 수 있다.
- [117] 상기 레이저 흡수 신호의 상기 변조 주파수의 1차 및 2차 고조파 성분(M_{1f}, M_{2f})은 연산 처리부(144)에 제공되고, 상기 연산 처리부(144)는 상기 측정 대상(10)의 흡수도(A₀)를 산출할 수 있다. 상기 연산 처리부(144)는 컴퓨터일 수 있다.
- [118] 본 발명의 변형된 실시예에 따르면, 상기 연산 처리부(144)는 상기 록인 증폭기를 대신하여 실시간으로 상기 레이저 흡수 신호를 제공받아 푸리에 변환하고, 상기 변조 주파수의 1차 고조파 성분(M_{1f}) 및 2차 고조파 성분(M_{2f})을 추출할 수 있다.
- [119] 2D 빔 스캐너는 상기 대물 렌즈와 상기 빔 처리부(440) 사이에 배치되어 상기 프로브 빔(31)을 주사할 수 있다. 상기 2D 빔 스캐너는 한 쌍의 스캐닝 거울과 릴레이 광학계를 포함할 수 있다. 상기 한 쌍의 스캐닝 거울은 갈바노 스캐너(galvano scanner)일 수 있다. 상기 릴레이 광학계는 상기 갈바노 스캐너에 의하여 스캐닝된 빔을 상기 대물 렌즈에 입사시킬 수 있다.
- [120] 상기 이색성 거울에서 반사된 반사 시야 빔은 상기 측정 대상(10)의 측정 위치에 대한 이미지를 포함할 수 있다. 상기 반사 시야 빔은 상기 대물 렌즈(450)를 투과하여 상기 빔 처리부(440) 또는 상기 이색성 미러(444)에서 반사되어 상기 보조 빔 분할기(434)에 제공될 수 있다. 상기 보조 빔 분할기는 시야 빔은 투과시키고, 반사 시야 빔은 반사시킬 수 있다. 상기 카메라는 상기 측정 대상(10)의 이미지를 측정 영상으로 변환할 수 있다. 상기 측정 영상은 디스플레이에 표시되거나 메모리에 저장될 수 있다.
- [121] 상기 측정 대상(10)은 이동 스테이지(460)에 장착될 수 있다. 상기 이동 스테이지는 2축 스테이지(462)일 수 있다. 상기 이동 스테이지(460)의 중심에는 관통홀이 배치되고, 상기 관통홀 상에 측정 대상(10)이 배치될 수 있다. 상기 측정 대상(10)은 기관(11) 상에 박막의 형태로 코팅될 수 있다. 상기 기관(11)은 유리 기관 또는 플라스틱 기관일 수 있다. 상기 측정 대상(10)은 유기물 또는 무기물일 수 있다. 상기 측정 대상(10)의 화학종은 적외선 범위에서 흡수선을 가지는 한 다양하게 선택될 수 있다.
- [122] 도 9은 본 발명의 일 실시예에 따른 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 방법을 설명하는 흐름도이다.
- [123] 도 4 및 도 9를 참조하면, 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 방법은
- [124] 소정의 주파수 대역에서 변조 주파수(f_m)로 프로브 빔의 광주파수를 변조하고 상기 변조 주파수(f_m)로 상기 프로브 빔의 강도를 변조하는 단계(S110); 주파수 및 강도 변조된 프로브 빔을 대물 렌즈를 사용하여 측정 대상의 측정 위치에 제공하는 단계(S120); 가시광선 대역의 시야 빔을 상기 대물 렌즈를 사용하여 상기 측정 대상의 상기 측정 위치에 제공하는 단계(S130); 및 상기 프로브 빔을 제공받은 측정 대상이 공명 흡수에 의하여 생성하는 레이저 흡수 신호를 전기

신호로 변환하고, 변환된 레이저 흡수 신호로부터 상기 변조 주파수(f_m)의 제1 고조파 성분 및 제2 고조파 성분을 추출하는 단계(S140);를 포함한다.

- [125] 상기 변환된 레이저 흡수 신호로부터 상기 변조 주파수(f_m)의 제1 고조파 성분 및 제2 고조파 성분을 추출하는 단계(S140)는 파장 가변 반도체 레이저를 이용하여 상기 프로브 빔의 광주파수를 상기 변조 주파수로 변조하면서 동시에 상기 파장 가변 반도체 레이저의 상기 프로브 빔의 강도를 상기 변조 주파수로 변조하는 단계; 상기 측정 대상이 공명 흡수에 의하여 생성하는 레이저 흡수 신호를 전기 신호로 변환하는 단계; 상기 변환된 레이저 흡수 신호로부터 상기 변조 주파수(f_m)의 제1 고조파 성분 및 제2 고조파 성분을 추출하는 단계; 및 상기 변조 주파수(f_m)의 제1 고조파 성분 및 제2 고조파 성분을 이용하여 상기 측정 대상의 흡수도를 산출하는 단계를 포함한다. 상기 흡수도를 이용하여, 측정 대상의 두께, 농도, 밀도, 및 화학종의 준부를 측정할 수 있다.
- [126] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 2D 빔 스캐너(470)는 상기 대물 렌즈(450)에 입사하는 상기 프로브 빔을 2차원적으로 주사할 수 있다.
- [127] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 빔 확장부(480)는 상기 프로브 빔(31)의 사이즈를 상기 대물 렌즈(450)의 구경에 맞도록 상기 프로브 빔(31)의 사이즈를 조절할 수 있다.
- [128] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 보조 빔 분할기(434)와 카메라(432)는 상기 측정 대상(10)에서 반사된 시야 빔을 영상화할 수 있다.
- [129] 도 10은 본 발명의 다른 실시예에 따른 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치를 설명하는 도면이다. 도 1 내지 도 9에서 설명한 것과 중복되는 설명은 생략한다.
- [130] 도 4 및 도 10을 참조하면, 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치(500)는 전시야 광원(420), 주파수 및 강도 변조 분광 처리부(410), 빔 처리부(540), 및 대물렌즈(450)를 포함한다. 상기 전시야 광원(420)은 가시광선 대역의 시야 빔을 출력한다. 상기 주파수 및 강도 변조 분광 처리부(410)는 레이저 빔의 광주파수를 변조 주파수(f_m)로 주파수 변조하고, 상기 레이저 빔의 강도를 변조 주파수(f_m)로 강도 변조하여 프로브 빔(31)을 출력하고, 상기 프로브 빔(31)을 제공받은 측정 대상(10)이 공명 흡수에 의하여 생성하는 레이저 흡수 신호를 전기 신호로 변환하고, 변환된 레이저 흡수 신호로부터 상기 변조 주파수(f_m)의 제1 고조파 성분 및 제2 고조파 성분을 추출한다. 상기 빔 처리부(540)는 상기 시야 빔 및 상기 프로브 빔(31)을 대물 렌즈에 제공한다. 상기 대물렌즈(450)는 상기 시야 빔을 상기 측정 대상(10)에 전시야 광으로 제공하고, 상기 프로브 빔(31)을 그 초점에 집속하여 상기 측정 대상(10)의 측정 위치에 제공하는 대물렌즈를 포함한다.
- [131] 상기 주파수 및 강도 변조 분광 처리부(510)는 아이솔레이터(172)와 빔 분할기(167,162)에 배치된 편광판(179)을 포함할 수 있다. 상기 편광판(179)은 레이저 광원부가 제공하는 레이저 빔을 특정한 편광을 가지는 프로브 빔(31)으로

변환할 수 있다.

- [132] 상기 빔 처리부(540)는 상기 편광된 프로브 빔(31)을 제공받아 투과시키고, 상기 측정 대상(10)으로부터 진행하는 레이저 흡수 신호(32)를 반사시키는 편광 빔 분할기(542). 상기 편광 빔 분할기의 후단에 배치된 1/4 파장판(543), 및 상기 시야 빔을 반사시키고 상기 편광된 프로브 빔을 투과시키어 상기 대물 렌즈(450)에 제공하는 이색성 거울(544)을 포함할 수 있다.
- [133] 상기 편광 빔 분할기(542)는 상기 편광된 프로브 빔(31)을 투과시키고, 레이저 흡수 신호(32)를 반사시키어 상기 광 감지부(130)에 제공할 수 있다.
- [134] 상기 1/4 파장판(543)은 편광된 성분들 사이에 90도 위상차를 제공할 수 있다. 이에 따라, 상기 1/4 파장판(543)은 빔이 상기 1/4 파장판을 왕복하는 경우, 1/2 파장판으로 기능할 수 있다. 이에 따라, 상기 1/4 파장판에 입사하는 특정 방향으로 선형 편광된 빔은 왕복한 후에 90도 회전한 편광된 빔으로 변환될 수 있다. 이에 따라, 상기 편광 빔 분할기(542)는 90도 회전한 편광된 빔을 반사시킬 수 있다.
- [135] 상기 이색성 거울(544)은 상기 편광된 프로브 빔(31)을 투과시키고 상기 시야 빔(41)을 반사시키어 상기 대물 렌즈(450)에 제공할 수 있다. 또한, 상기 이색성 거울(544)은 측정 대상(10)에서 진행하는 레이저 흡수 신호(32)를 투과시키고, 반사 시야 빔(42)을 반사시킬 수 있다.
- [136] 도 11은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치를 설명하는 도면이다. 도 1 내지 도 9에서 설명한 것과 중복되는 설명은 생략한다.
- [137] 도 4 및 도 11을 참조하면, 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치(600)는 전시야 광원(420), 주파수 및 강도 변조 분광 처리부(410), 빔 처리부(640), 및 대물렌즈(450)를 포함한다. 상기 전시야 광원(420)은 가시광선 대역의 시야 빔(41)을 출력한다. 상기 주파수 및 강도 변조 분광 처리부(410)는 레이저 빔의 광주파수를 변조 주파수(f_m)로 주파수 변조하고, 상기 레이저 빔의 강도를 변조 주파수(f_m)로 강도 변조하여 프로브 빔(31)을 출력하고, 상기 프로브 빔(31)을 제공받은 측정 대상(10)이 공명 흡수에 의하여 생성하는 레이저 흡수 신호(32)를 전기 신호로 변환하고, 변환된 레이저 흡수 신호로부터 상기 변조 주파수(f_m)의 제1 고조파 성분 및 제2 고조파 성분을 추출한다. 상기 빔 처리부(640)는 상기 시야 빔(41) 및 상기 프로브 빔(31)을 대물 렌즈(450)에 제공한다. 상기 대물렌즈(450)는 상기 시야 빔(41)을 상기 측정 대상(10)에 전시야 광으로 제공하고, 상기 프로브 빔(31)을 그 초점에 집속하여 상기 측정 대상(10)의 측정 위치에 제공하는 대물렌즈(450)를 포함한다.
- [138] 상기 빔 처리부(640)는 이색성 거울을 포함할 수 있다. 상기 이색성 거울은 프로브 빔(31)을 투과시키고, 시야 빔(41)을 반사시킬 수 있다.
- [139] 상기 대물 렌즈(450)는 상기 프로브 빔(31)을 집속하여 상기 측정 대상(10)에 제공할 수 있다. 또한, 상기 대물렌즈(450)는 상기 조사 빔을 측정 대상(10)에

제공할 수 있다. 상기 측정 대상(10)에서 반사된 시야 빔(41)은 상기 대물 렌즈(450)에 제공되고, 상기 대물 렌즈를 투과한 상기 반사된 시야 빔은 상기 빔 처리부(640)에 의하여 상기 보조 빔 분할기(434)에 제공될 수 있다.

[140] 상기 프로브 빔(31)은 상기 측정 대상(10)을 투과하여 레이저 흡수 신호(32)를 생성할 수 있다. 보조 렌즈(692)는 상기 측정 대상(10)의 후단에 배치되고, 상기 보조 렌즈(692)는 상기 측정 대상(10)을 투과한 상기 레이저 흡수 신호(32)를 집속할 수 있다. 상기 보조 렌즈(692)의 후단에는 광필터(694)가 배치될 수 있다. 상기 광필터(694)는 상기 프로브 빔(31)의 파장 대역만을 선택적으로 투과시키는 대역 통과 필터일 수 있다. 상기 광 필터를 통과한 상기 레이저 흡수 신호(32)는 광감지부(130)에 제공될 수 있다. 상기 광감지부(130)는 전기 신호로 레이저 흡수 신호를 변환할 수 있다.

[141] 이상에서는 본 발명을 특정의 바람직한 실시예에 대하여 도시하고 설명하였으나, 본 발명은 이러한 실시예에 한정되지 않으며, 당해 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 특허청구범위에서 청구하는 본 발명의 기술적 사상을 벗어나지 않는 범위 내에서 실시할 수 있는 다양한 형태의 실시예들을 모두 포함한다.

[142]

청구범위

- [청구항 1] 가시광선 대역의 시야 빔을 출력하는 전시야 광원;
레이저 빔의 광주파수를 변조 주파수(f_m)로 주파수 변조하고, 상기 레이저 빔의 강도를 변조 주파수(f_m)로 강도 변조하여 프로브 빔을 출력하고,
상기 프로브 빔을 제공받은 측정 대상이 공명 흡수에 의하여 생성하는 레이저 흡수 신호를 전기 신호로 변환하고, 변환된 레이저 흡수 신호로부터 상기 변조 주파수(f_m)의 제1 고조파 성분 및 제2 고조파 성분을 추출하는 주파수 및 강도 변조 분광 처리부;
상기 시야 빔 및 상기 프로브 빔을 대물 렌즈에 제공하는 빔 처리부;
상기 시야 빔을 상기 측정 대상에 전시야 광으로 제공하고, 상기 프로브 빔을 그 초점에 집속하여 상기 측정 대상의 측정 위치에 제공하는 대물렌즈를 포함하는 것을 특징으로 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치.
- [청구항 2] 제1 항에 있어서,
상기 주파수 및 강도 변조 분광 처리부는:
소정의 주파수 대역에서 변조 주파수(f_m)로 상기 레이저 빔의 광주파수를 변조하고 상기 변조 주파수(f_m)로 상기 레이저 빔의 강도를 변조하는 레이저 광원부;
상기 레이저 흡수 신호를 전기 신호로 변환하는 광감지부; 및
상기 광감지부의 출력 신호인 상기 변환된 레이저 흡수 신호를 처리하여 상기 변조 주파수(f_m)의 1차 고조파 성분(M_{1f}) 및 상기 변조 주파수(f_m)의 2차 고조파 성분(M_{2f})을 추출하고 상기 변조 주파수(f_m)의 1차 고조파 성분(M_{1f})과 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분(M_{2f})의 비(M_{1f}/M_{2f})를 이용하여 상기 측정 대상에 의한 상기 프로브 빔의 흡수도를 산출하는 처리부를 포함하는 것을 특징으로 하는 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치.
- [청구항 3] 제2 항에 있어서,
상기 레이저 광원부는 양자 캐스케이드 레이저(quantum cascade laser)인 것을 특징으로 하는 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치.
- [청구항 4] 제2 항에 있어서,
상기 레이저 광원부는:
레이저 전류 구동부; 및
상기 레이저 구동부로부터 전류를 제공받아 상기 프로브 빔을 생성하는 레이저를 포함하고,
상기 변조 주파수로 상기 전류를 변조함에 따라 상기 광주파수가 소정의 주파수 대역에서 변조되고 동시에 상기 프로브 빔의 강도가 상기 변조 주파수로 변조되는 것을 특징으로 하는 광주파수 및 강도 변조 레이저

- 흡수 분광 장치.
- [청구항 5] 제2 항에 있어서,
 상기 처리부는:
 상기 광감지부의 레이저 흡수 신호를 이용하여 상기 변조 주파수의 1차 고조파 성분(M_{1f}) 및 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분(M_{2f})을 추출하는
 록인 증폭기; 및
 상기 변조 주파수의 1차 고조파 성분(M_{1f})과 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분(M_{2f})의 비(M_{1f}/M_{2f})를 이용하여 상기 측정 대상에 의한 상기 프로브 빔의 흡수도를 산출하는 연산 처리부를 포함하는 것을 특징으로 하는 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치.
- [청구항 6] 제2 항에 있어서,
 상기 주파수 및 강도 변조 분광 처리부는 상기 프로브 빔의 일부를 제공받아 전기신호로 변환하여 광원 강도 신호를 생성하는 광원 출력 감지부를 더 포함하고,
 상기 처리부는:
 상기 광원 강도 신호로부터 상기 변조 주파수의 1차 고조파 성분의 강도 변조 진폭(Δ_{1f}) 및 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분의 강도 변조 진폭(Δ_{2f})을 추출하는 보조 록인 증폭기;
 상기 광감지부의 상기 레이저 흡수 신호로부터 상기 변조 주파수의 1차 고조파 성분 및 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분을 추출하는 록인 증폭기; 및
 상기 레이저 흡수 신호의 상기 변조 주파수의 제1 고조파 성분(M_1) 및 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분(M_2), 및 상기 광원 강도 신호의 상기 변조 주파수의 1차 고조파 성분 및 상기 변조 주파수의 2차 고조파 성분을 이용하여 상기 측정 대상에 의한 상기 프로브 빔의 흡수도를 산출하는 연산 처리부를 포함하는 것을 특징으로 하는 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치.
- [청구항 7] 제2 항에 있어서,
 상기 레이저 광원부에 제어신호를 제공하는 광주파수 안정화부를 더 포함하고,
 상기 광주파수 안정화부는:
 소정의 주파수 대역에서 주파수 변조되는 상기 프로브 빔의 중심 광주파수를 상기 측정 물질의 특정 흡수 스펙트럼의 중심에 일치시키기 위하여 상기 측정 대상을 구성하는 물질로 구성된 기준 셀;
 상기 기준 셀에 상기 프로브 빔의 일부를 제공하도록 상기 프로브 빔을 분할하는 빔 분할기;
 상기 기준 셀을 통과한 기준 프로브 빔을 측정하여 전기 신호로 변환하는 기준 셀 광감지부; 및

상기 기준 셀 광감지부와 상기 기준 셀 사이에 배치되어 상기 프로브 빔을 통과시키고 외부 노이즈 광을 제거하는 대역 통과 필터를 포함하고, 상기 처리부는 상기 기준셀 광감지부의 출력 신호를 제공받아 상기 프로브 빔의 중심 광주파수를 상기 측정 물질의 특정 흡수 스펙트럼의 중심에 일치시키기 위하여 상기 레이저 광원부에 제어 신호를 제공하는 것을 특징으로 하는 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치.

[청구항 8]

제1 항에 있어서,
상기 빔 처리부는:
상기 주파수 및 강도 변조 분광 처리부가 출력하는 상기 프로브빔을 제공받아 투과시키고, 상기 측정 대상으로부터 진행하는 레이저 흡수 신호를 반사시키는 측정 빔 분할기; 및
상기 시야 빔을 반사시키고 상기 프로브빔을 투과시켜 상기 대물 렌즈에 제공하는 이색성 거울;을 포함하는 것을 특징으로 하는 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치.

[청구항 9]

제1 항에 있어서,
상기 프로브 빔을 제공받아 소정으로 방향으로 편광된 프로브 빔을 출력하는 편광판을 더 포함하고,
상기 빔 처리부는:
상기 편광된 프로브빔을 제공받아 투과시키고, 상기 측정 대상으로부터 진행하는 레이저 흡수 신호를 반사시키는 편광 빔 분할기;
상기 편광 빔 분할기의 후단에 배치된 1/4 파장판; 및
상기 시야 빔을 반사시키고 상기 편광된 프로브빔을 투과시켜 상기 대물 렌즈에 제공하는 이색성 거울;을 포함하는 것을 특징으로 하는 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치.

[청구항 10]

제8 항 또는 제9 항에 있어서,
보조 빔 분할기; 및
카메라를 더 포함하고,
상기 시야 빔은 상기 측정 대상에서 반사되어 반사 시야 빔을 생성하고, 상기 반사 시야 빔은 상기 대물렌즈를 투과하여 상기 빔 처리부에서 반사되어 상기 보조 빔 분할기에 제공되고,
상기 보조 빔 분할기는 상기 반사 시야 빔을 반사시켜 상기 카메라에 제공하는 것을 특징으로 하는 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치.

[청구항 11]

제1 항에 있어서,
상기 대물 렌즈와 상기 빔 처리부 사이에 배치되어 상기 프로브 빔을 주사하는 2D 빔 스캐너를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 장치.

[청구항 12]

제1 항에 있어서,

상기 빔 처리부는 상기 시야 빔을 반사시키고 상기 프로브빔을 투과시키어
상기 대물 렌즈에 제공하는 이색성 거울을 포함하고,
상기 측정 대상을 투과한 상기 레이저 흡수 신호를 집속하는 보조 렌즈를
더 포함하고,
상기 보조 렌즈는 상기 집속된 레이저 흡수 신호를 상기 주파수 및 강도
변조 분광 처리부에 제공하는 것을 특징으로 하는 광주파수 및 강도 변조
레이저 흡수 분광 장치.

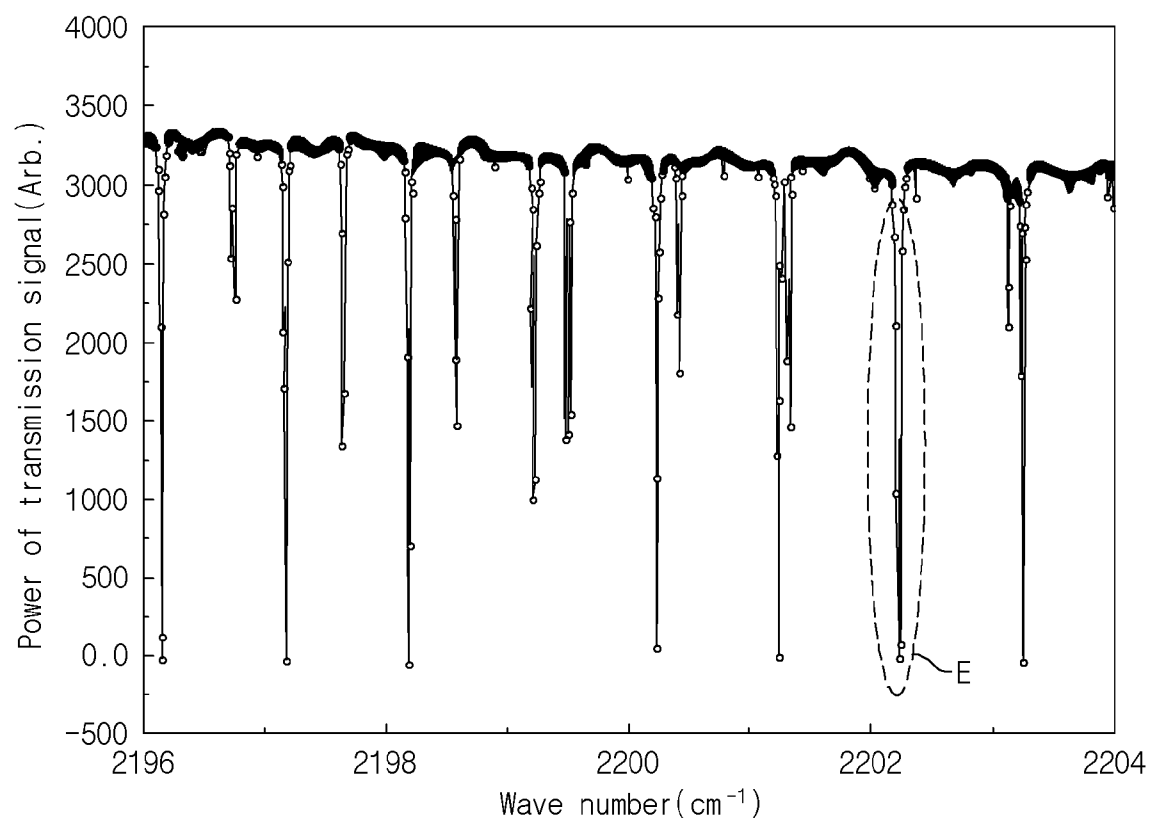
- [청구항 13] 소정의 주파수 대역에서 변조 주파수(f_m)로 프로브 빔의 광주파수를
변조하고 상기 변조 주파수(f_m)로 상기 프로브 빔의 강도를 변조하는
단계;
주파수 및 강도 변조된 프로브 빔을 대물 렌즈를 사용하여 측정 대상의
측정 위치에 제공하는 단계;
가시광선 대역의 시야 빔을 상기 대물 렌즈를 사용하여 상기 측정 대상의
상기 측정 위치에 제공하는 단계; 및
상기 프로브 빔을 제공받은 측정 대상이 공명 흡수에 의하여 생성하는
레이저 흡수 신호를 전기 신호로 변환하고, 변환된 레이저 흡수
신호로부터 상기 변조 주파수(f_m)의 제1 고조파 성분 및 제2 고주파
성분을 추출하는 단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 광주파수 및 강도
변조 레이저 흡수 분광 방법.

- [청구항 14] 제13 항에 있어서,
상기 프로브 빔을 제공받은 측정 대상이 공명 흡수에 의하여 생성하는
레이저 흡수 신호를 전기 신호로 변환하고, 변환된 레이저 흡수
신호로부터 상기 변조 주파수(f_m)의 제1 고조파 성분 및 제2 고주파
성분을 추출하는 단계는:
파장 가변 반도체 레이저를 이용하여 상기 프로브 빔의 광주파수를 상기
변조 주파수로 변조하면서 동시에 상기 파장 가변 반도체 레이저의 상기
프로브 빔의 강도를 상기 변조 주파수로 변조하는 단계;
상기 측정 대상이 공명 흡수에 의하여 생성하는 레이저 흡수 신호를 전기
신호로 변환하는 단계;
상기 변환된 레이저 흡수 신호로부터 상기 변조 주파수(f_m)의 제1 고조파
성분 및 제2 고주파 성분을 추출하는 단계; 및
상기 변조 주파수(f_m)의 제1 고조파 성분 및 제2 고주파 성분을 이용하여
상기 측정 대상의 흡수도를 산출하는 단계를 포함하는 것을 특징으로
하는 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 방법.

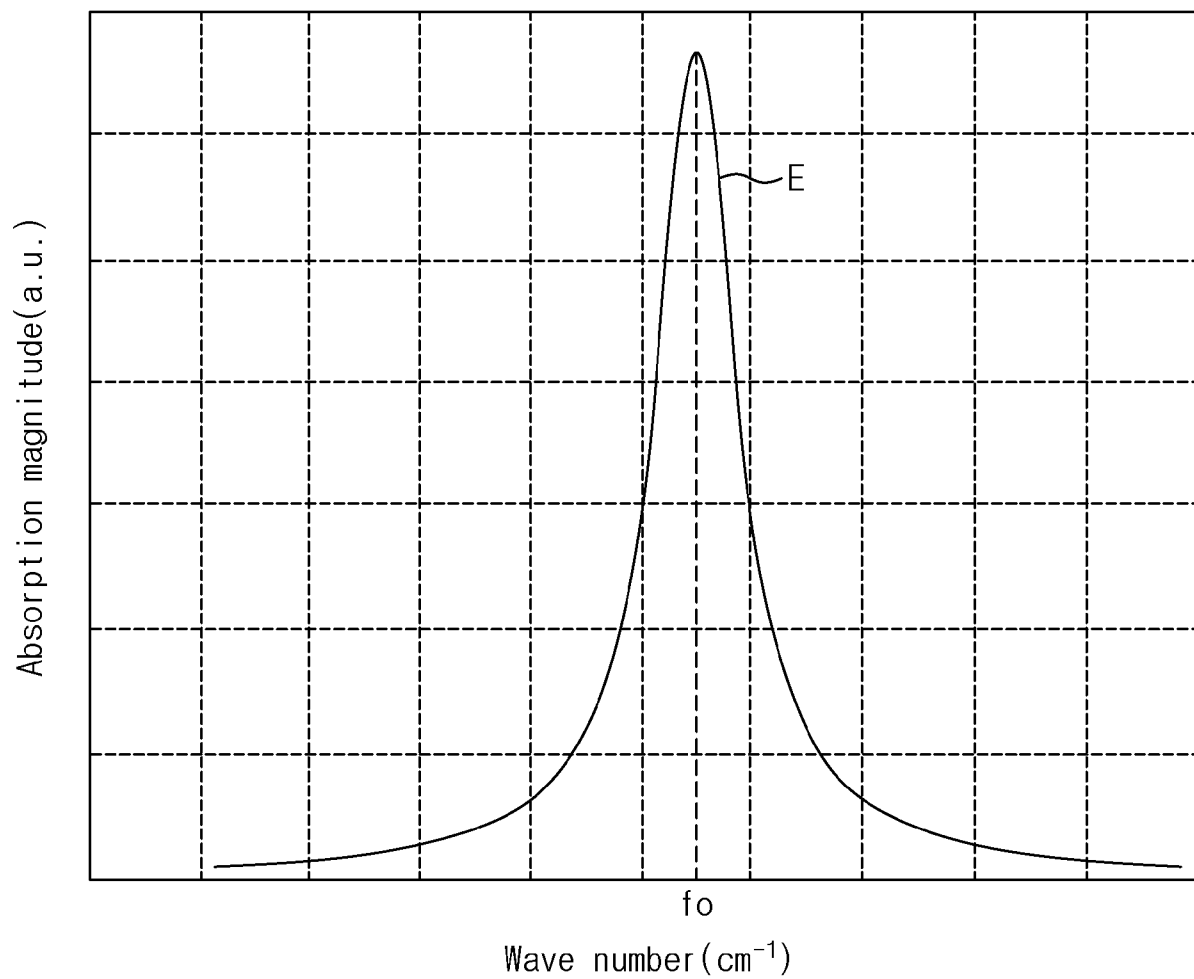
- [청구항 15] 제13 항에 있어서,
상기 대물 렌즈에 입사하는 상기 프로브 빔을 2차원적으로 주사하는
단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 광주파수 및 강도 변조 레이저
흡수 분광 방법.

- [청구항 16] 제13 항에 있어서,
상기 프로브 빔의 사이즈를 상기 대물 렌즈의 구경에 맞도록 상기 프로브
빔의 사이즈를 조절하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는
광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 방법.
- [청구항 17] 제13 항에 있어서,
상기 측정 대상에서 반사된 시야 빔을 영상화하는 단계를 더 포함하는
것을 특징으로 하는 광주파수 및 강도 변조 레이저 흡수 분광 방법.

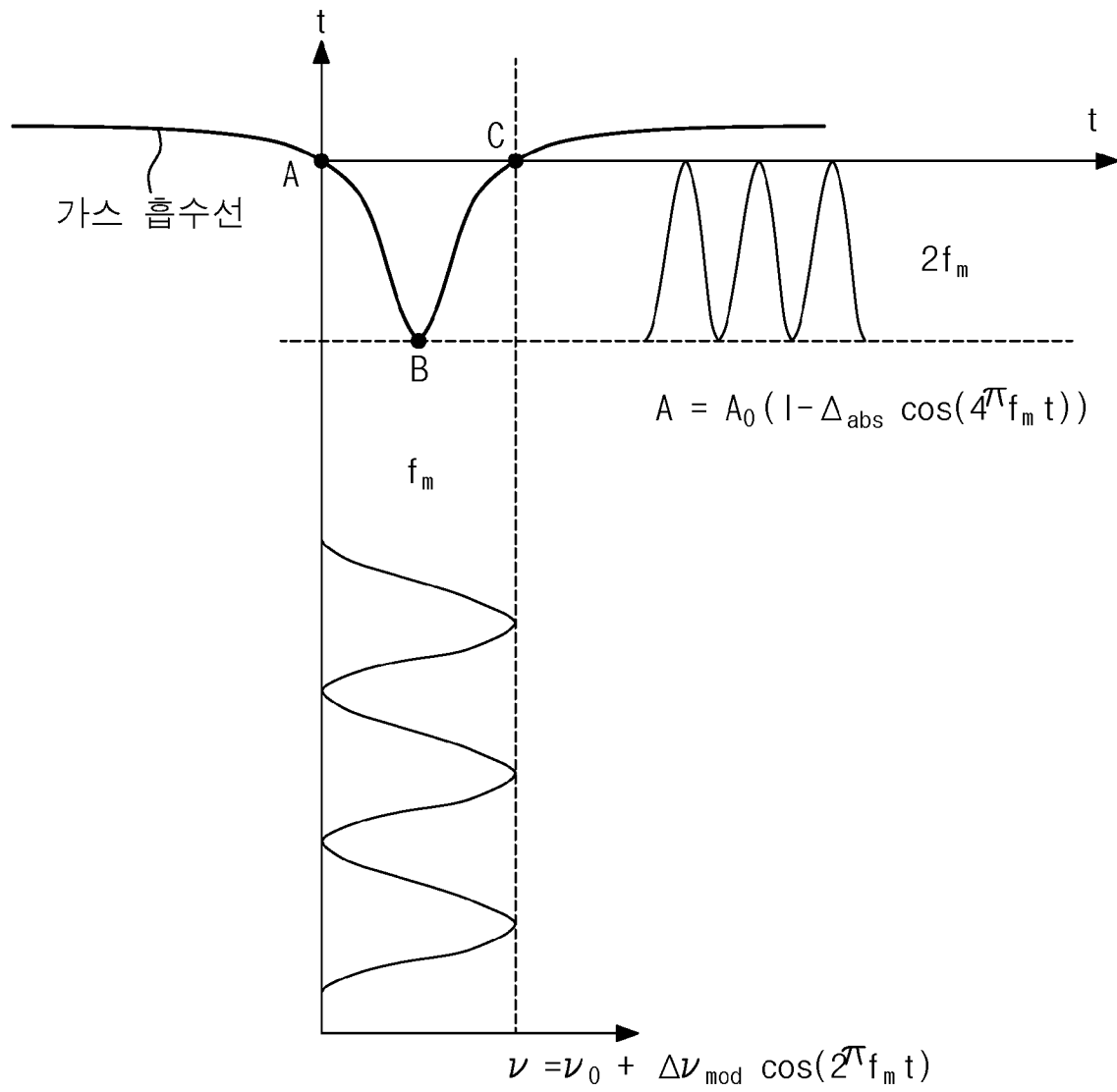
[도1]



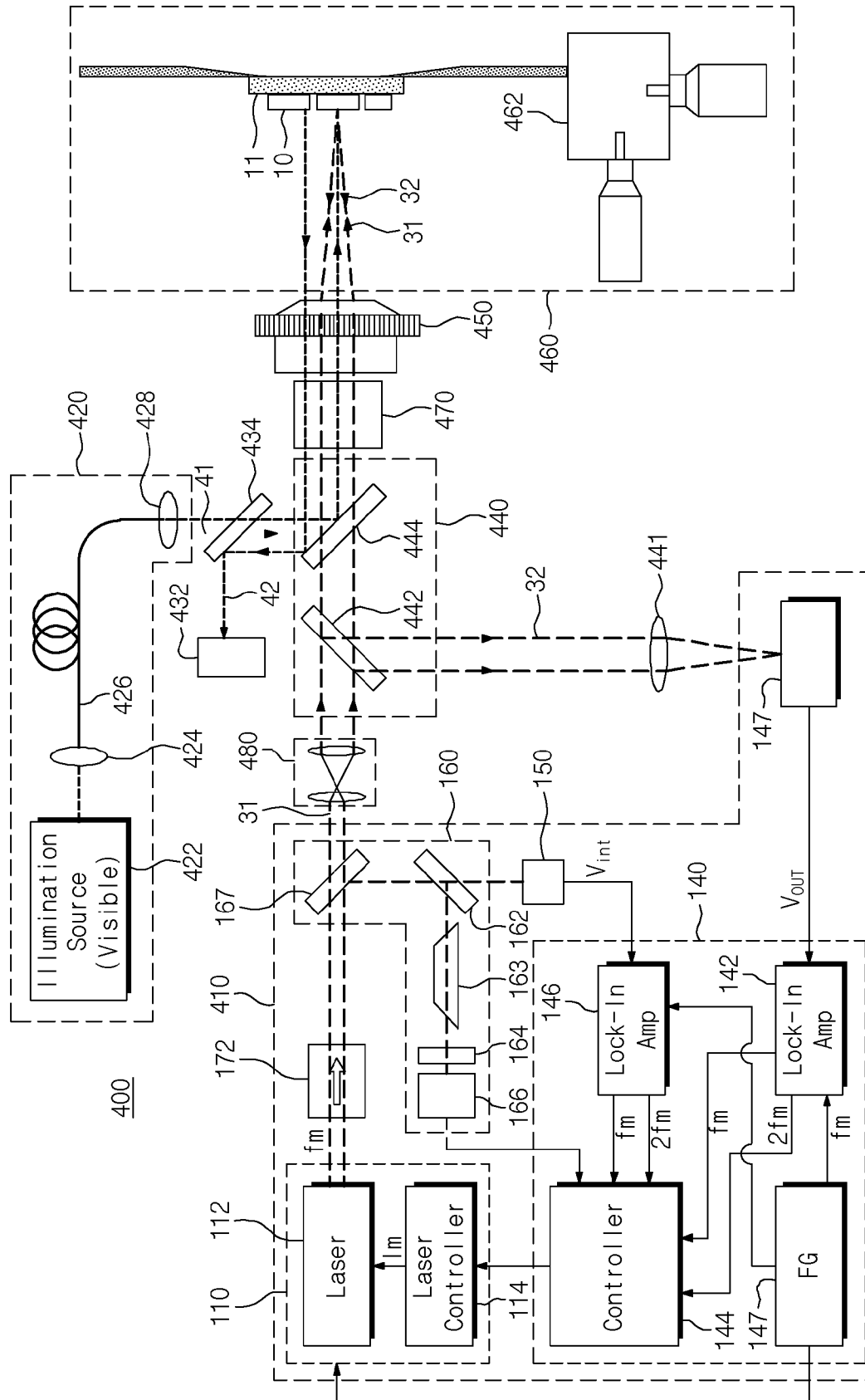
[도2]



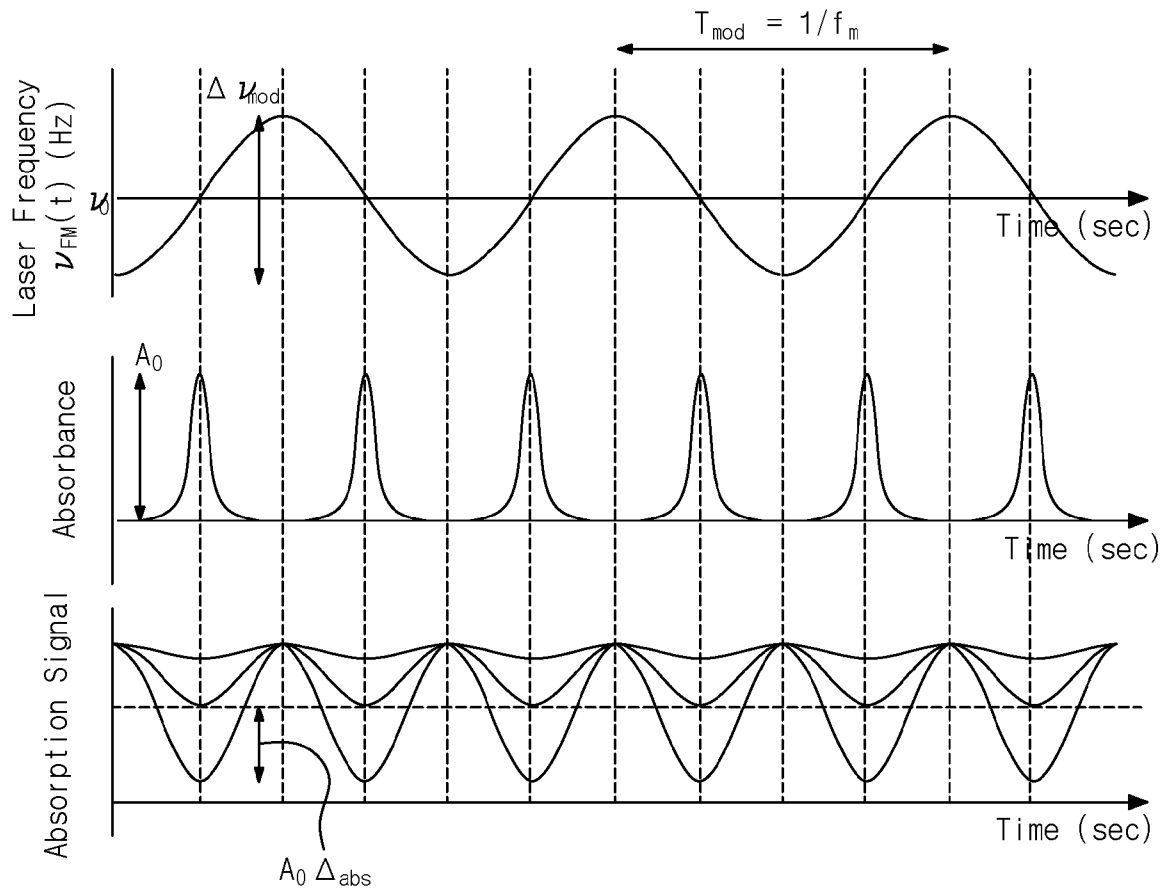
[도3]



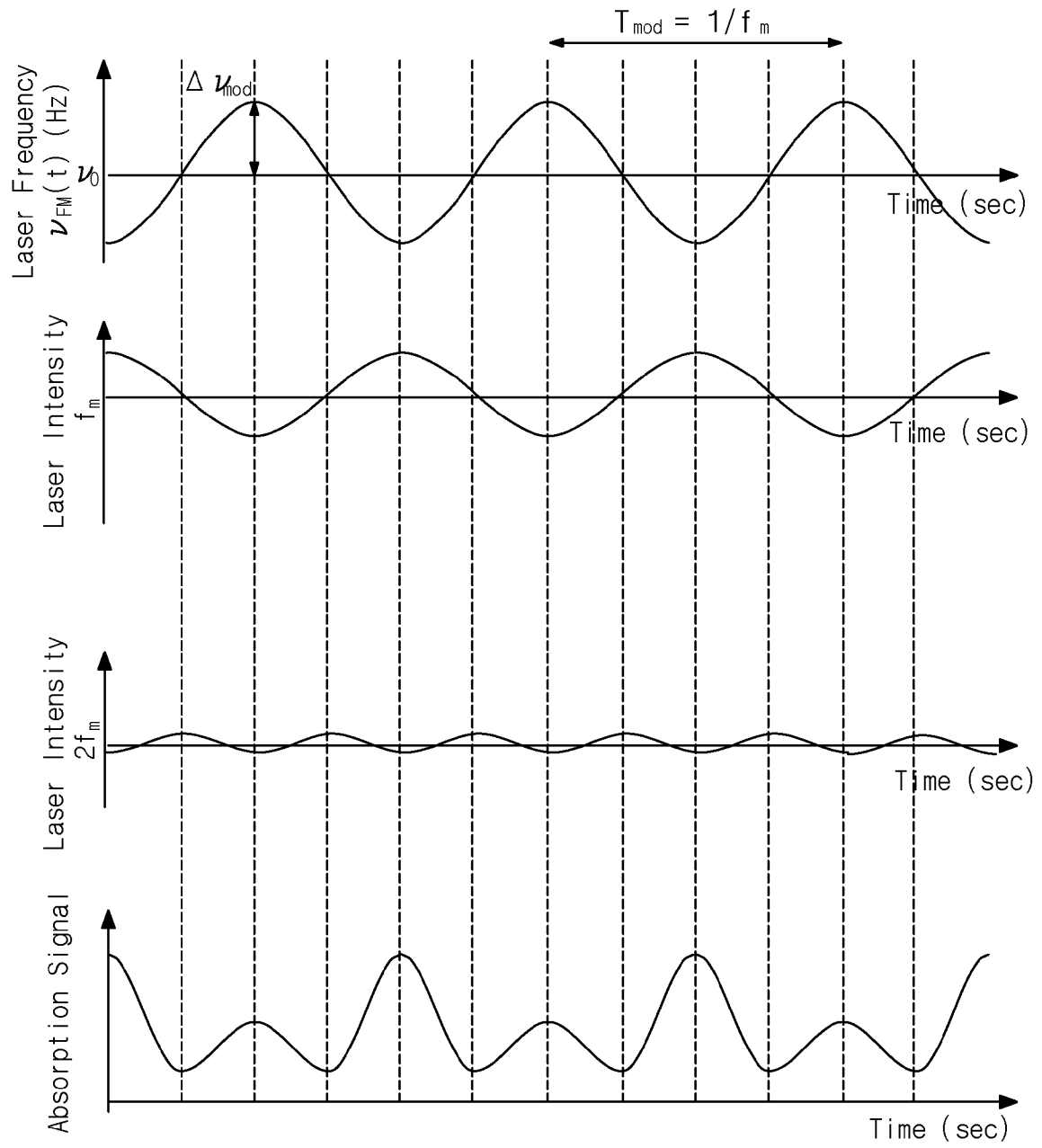
[도4]



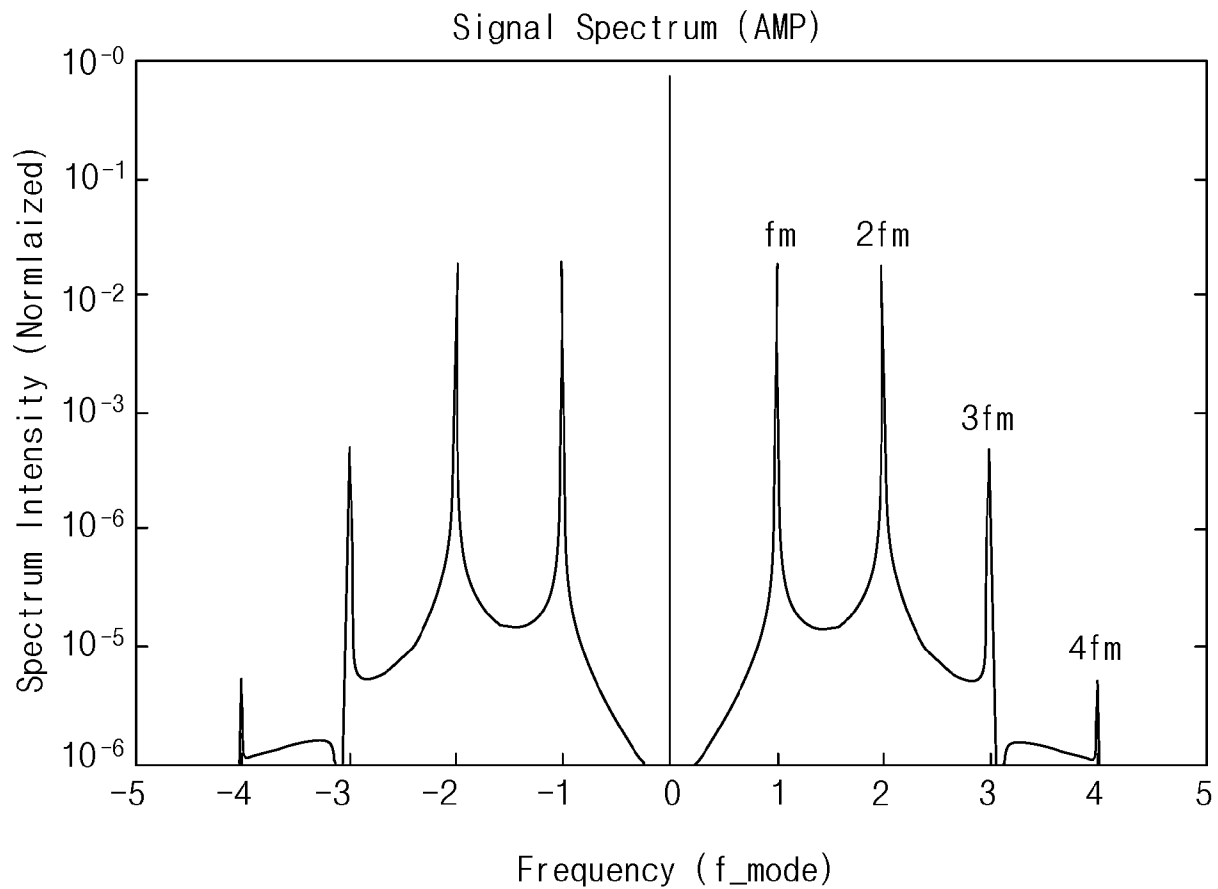
[도5]



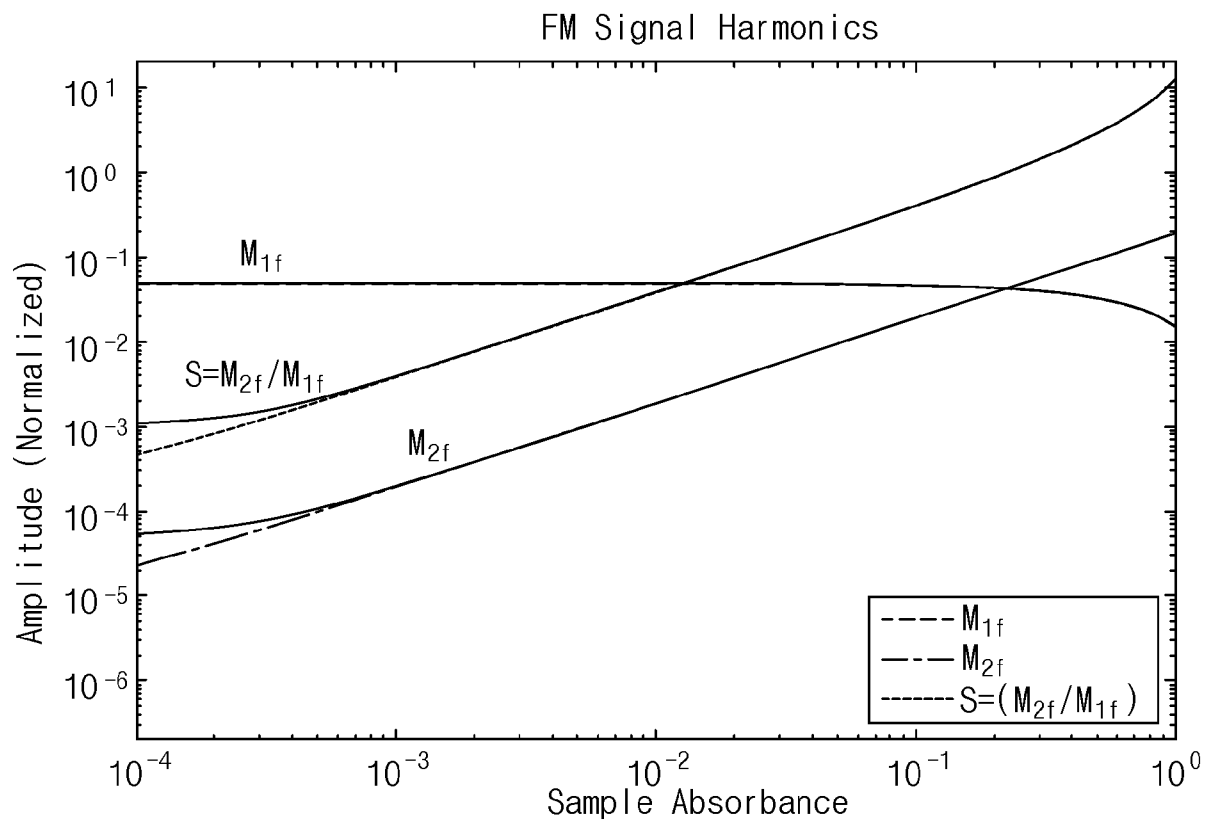
[도6]



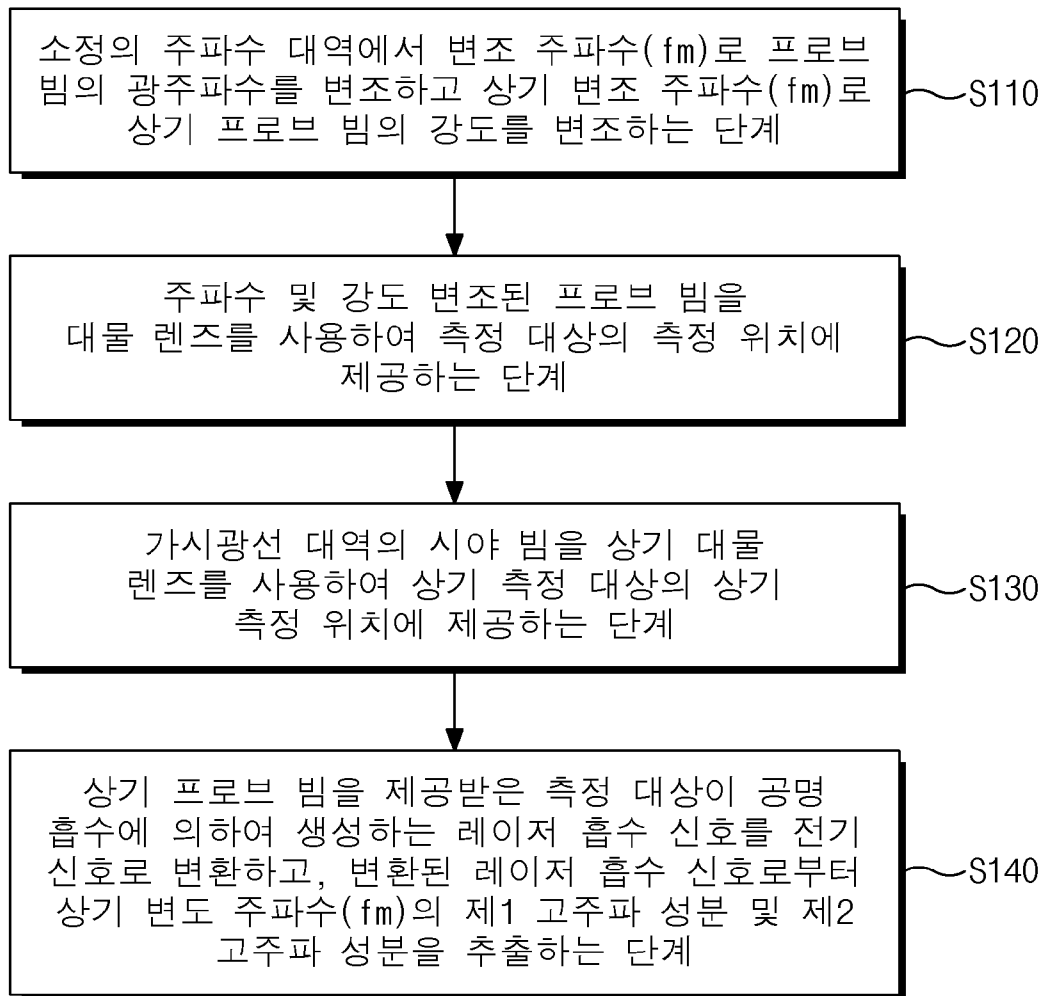
[도7]



[도8]



[도9]



[도10]

