

명세서

청구범위

청구항 1

삭제

청구항 2

육면체 형상의 메인 셀과 상기 메인 셀에 연결된 원통 형상의 스템 셀을 포함하고, 원편광된 펄스 빔과 선형 편광된 프로브 빔을 제공받고 알카리 메탈 증기를 포함하는 증기 셀;

상기 증기 셀을 투과한 상기 선형 편광된 프로브 빔을 제공받아 상기 프로브 빔의 편광 상태를 측정하는 감지부; 및

열선에 5 kHz 내지 30 kHz의 교류를 인가하여 상기 증기 셀을 가열하는 가열부를 포함하고,

측정 대상의 측정 자기장은 상기 증기 셀에서 상기 프로브 빔의 광자기 회전을 제공하고,

상기 증기 셀은:

알카리 메탈 증기로써 포타슘 (potassium; K), 헬륨 버퍼 가스, 및 질소 가스를 포함하는 메인 셀; 및

상기 알카리 메탈 증기의 흡착을 방지하는 스템 셀을 포함하는 것을 특징으로 하는 스핀교환이완없는 원자 자력계.

청구항 3

육면체 형상의 메인 셀과 상기 메인 셀에 연결된 원통 형상의 스템 셀을 포함하고, 원편광된 펄스 빔과 선형 편광된 프로브 빔을 제공받고 알카리 메탈 증기를 포함하는 증기 셀;

상기 증기 셀을 투과한 상기 선형 편광된 프로브 빔을 제공받아 상기 프로브 빔의 편광 상태를 측정하는 감지부; 및

열선에 5 kHz 내지 30 kHz의 교류를 인가하여 상기 증기 셀을 가열하는 가열부를 포함하고,

측정 대상의 측정 자기장은 상기 증기 셀에서 상기 프로브 빔의 광자기 회전을 제공하고,

열선에 5 kHz 내지 30 kHz의 교류를 인가하여 상기 증기 셀의 메인 셀을 섭씨 200 도로 가열하는 제1 가열부; 및

열선에 5 kHz 내지 30 kHz의 교류를 인가하여 상기 스템 셀을 섭씨 185도로 가열하는 제2 가열부를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 스핀교환이완없는 원자 자력계.

청구항 4

육면체 형상의 메인 셀과 상기 메인 셀에 연결된 원통 형상의 스템 셀을 포함하고, 원편광된 펄스 빔과 선형 편광된 프로브 빔을 제공받고 알카리 메탈 증기를 포함하는 증기 셀;

상기 증기 셀을 투과한 상기 선형 편광된 프로브 빔을 제공받아 상기 프로브 빔의 편광 상태를 측정하는 감지부; 및

열선에 5 kHz 내지 30 kHz의 교류를 인가하여 상기 증기 셀을 가열하는 가열부를 포함하고,

측정 대상의 측정 자기장은 상기 증기 셀에서 상기 프로브 빔의 광자기 회전을 제공하고,

상기 가열부는:

하부면에 관통홀 및 측면에 투명 창을 포함하고 상기 메인 셀의 주위를 감싸도록 배치된 제1 가열 블록;

상기 제1 가열 블록의 외주면을 감싸도록 배치된 제1 가열 코일;

상기 제1 가열 블록의 상기 관통홀과 정렬되어 상기 스템 셀의 주위를 감싸도록 배치된 제2 가열 블록;

상기 제2 가열 블록을 감싸도록 배치된 제2 가열 코일; 및

상기 제1 가열 블록 및 상기 제2 가열블록을 수납하는 단열 블록을 포함하고,

상기 메인 셀은 상기 제1 가열 블록의 상기 투명 창과 정렬되는 것을 특징으로 하는 스핀교환이완없는 원자 자력계.

청구항 5

육면체 형상의 메인 셀과 상기 메인 셀에 연결된 원통 형상의 스템 셀을 포함하고, 원편광된 펄스 빔과 선형 편광된 프로브 빔을 제공받고 알카리 메탈 증기를 포함하는 증기 셀;

상기 증기 셀을 투과한 상기 선형 편광된 프로브 빔을 제공받아 상기 프로브 빔의 편광 상태를 측정하는 감지부; 및

열선에 5 kHz 내지 30 kHz의 교류를 인가하여 상기 증기 셀을 가열하는 가열부를 포함하고,

측정 대상의 측정 자기장은 상기 증기 셀에서 상기 프로브 빔의 광자기 회전을 제공하고,

상기 프로브 빔과 상기 펄스 빔의 진행 방향에 의하여 정의되는 제1 평면에서 수직으로 이격되어 상기 제1 평면에 수직인 음의 피드백 자기장 신호를 생성하여 상기 증기 셀에 제공하는 피드백 코일; 및

상기 감지부의 출력 신호를 제공받아 상기 측정 대상의 상기 측정 자기장에 비례하는 음의 피드백 자기장을 생성하도록 상기 피드백 코일에 피드백 전류를 제공하는 피드백 증폭부를 포함하는 것을 특징으로 하는 스핀교환이완없는 원자 자력계.

청구항 6

제5 항에 있어서,

상기 피드백 코일과 상기 피드백 증폭부는 상기 원자 자력계의 감지 대역폭(detection bandwidth)을 확장하는 것을 특징으로 하는 원자 자력계.

청구항 7

육면체 형상의 메인 셀과 상기 메인 셀에 연결된 원통 형상의 스템 셀을 포함하고, 원편광된 펄스 빔과 선형 편광된 프로브 빔을 제공받고 알카리 메탈 증기를 포함하는 증기 셀;

상기 증기 셀을 투과한 상기 선형 편광된 프로브 빔을 제공받아 상기 프로브 빔의 편광 상태를 측정하는 감지부; 및

열선에 5 kHz 내지 30 kHz의 교류를 인가하여 상기 증기 셀을 가열하는 가열부를 포함하고,

측정 대상의 측정 자기장은 상기 증기 셀에서 상기 프로브 빔의 광자기 회전을 제공하고,

원자 자력계의 주파수 응답(frequency response)는 영(zero) Hz에서 수백 Hz 까지 플랫(flat)한 것을 특징으로 하는 스핀교환이완없는 원자 자력계.

청구항 8

제5 항에 있어서,

상기 피드백 증폭부의 주파수 응답(frequency response)는 DC에서 20 kHz 까지 플랫한 이득을 가지고 또는 DC 내지 컷오프 주파수를 통과시키고,

상기 컷오프 주파수는 150 내지 220 Hz인 것을 특징으로 하는 스핀교환이완없는 원자 자력계.

청구항 9

육면체 형상의 메인 셀과 상기 메인 셀에 연결된 원통 형상의 스템 셀을 포함하고, 원편광된 펄스 빔과 선형 편광된 프로브 빔을 제공받고 알카리 메탈 증기를 포함하는 증기 셀;

상기 증기 셀을 투과한 상기 선형 편광된 프로브 빔을 제공받아 상기 프로브 빔의 편광 상태를 측정하는 감지부; 및

열선에 5 kHz 내지 30 kHz의 교류를 인가하여 상기 증기 셀을 가열하는 가열부를 포함하고,

측정 대상의 측정 자기장은 상기 증기 셀에서 상기 프로브 빔의 광자기 회전을 제공하고,

상기 증기 셀의 주위에 배치되어 외부 환경 자기장을 제거하도록 외부 자기장을 감소시키는 자성체로 구성된 자기 차폐부를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 원자 자력계.

청구항 10

육면체 형상의 메인 셀과 상기 메인 셀에 연결된 원통 형상의 스템 셀을 포함하고, 원편광된 펄스 빔과 선형 편광된 프로브 빔을 제공받고 알카리 메탈 증기를 포함하는 증기 셀;

상기 증기 셀을 투과한 상기 선형 편광된 프로브 빔을 제공받아 상기 프로브 빔의 편광 상태를 측정하는 감지부; 및

열선에 5 kHz 내지 30 kHz의 교류를 인가하여 상기 증기 셀을 가열하는 가열부를 포함하고,

측정 대상의 측정 자기장은 상기 증기 셀에서 상기 프로브 빔의 광자기 회전을 제공하고,

상기 증기 셀의 주위에 배치되어 외부 환경 자기장을 제거하도록 상쇄 자기장을 생성하는 자기장 상쇄부를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 스핀교환이완없는 원자 자력계.

청구항 11

육면체 형상의 메인 셀과 상기 메인 셀에 연결된 원통 형상의 스템 셀을 포함하고, 원편광된 펄스 빔과 선형 편광된 프로브 빔을 제공받고 알카리 메탈 증기를 포함하는 증기 셀;

상기 증기 셀을 투과한 상기 선형 편광된 프로브 빔을 제공받아 상기 프로브 빔의 편광 상태를 측정하는 감지부; 및

열선에 5 kHz 내지 30 kHz의 교류를 인가하여 상기 증기 셀을 가열하는 가열부를 포함하고,

측정 대상의 측정 자기장은 상기 증기 셀에서 상기 프로브 빔의 광자기 회전을 제공하고,

상기 가열부는 상기 증기 셀을 가열하는 가열 코일, 가열된 증기 셀의 온도를 측정하는 온도 측정부, 상기 가열 코일에 교류 전력을 제공하는 오디오 증폭기, 및 상기 온도 측정부가 측정한 온도를 이용하여 상기 오디오 증폭기를 제어하는 온도 제어부(166)를 포함하고,

상기 온도 제어부는 사인파를 출력하는 함수 발생기, 약1.5 kHz의 컷오프 주파수를 가지는 고주파 통과필터, 케리어 입력 신호를 출력하는 PID 제어부, 및 상기 고주파 통과필터의 출력 및 상기 케리어 입력 신호를 제공받아 곱셈 처리하는 아날로그 배율기(analog multiplier)를 포함하는 것을 특징으로 하는 스핀교환이완없는 원자 자력계.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 스핀교환이완없는 원자 자력계에 관한 것으로, 더 구체적으로, 교류 열선을 이용한 가열부를 포함하는 스핀교환이완없는 원자 자력계에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 초감도의 자기장 센서(자력계)인 광펌핑 원자 자력계 기술에 기반한 , 심자도/뇌자도 등의 생체자기 측정 장치의 개발 및 측정/분석 기술은 21세기의 트렌드인 안전한 삶과 건강한 삶을 추구하는 유헬스(ubiquitous health ; U-Health) 시대의 차세대 초고감도 즉석 진단시스템의 초감도의 자기장 센서(자력계)인 광펌핑 원자 자력계 기술에 기반한 , 심자도/뇌자도 등의 생체자기 측정 장치의 개발 및 측정/분석 기술은 21세기의 트렌드인 안전한 삶과 건강한 삶을 추구하는 유헬스(ubiquitous health ; U-Health) 시대의 차세대 초고감도 즉석 진단시스템의

기술의 핵심이다.

- [0003] 특히, 고감도 자기장 측정 기술은 순수 학문분야에서부터 산업체에 이르기까지 폭넓은 관심을 가지고 연구되고 있는 분야이다. 자기장 측정 기술은 측정 범위에 따라서 응용의 방향이 달라진다. 또한 최근에 초소형 원자 자력계가 NIST의 P. Schwindt에 의해서 개발되어 유비쿼터스 기술과 접목되어 휴대형 자기공명영상, 매설 폭발물 탐지기, 리모트 미네랄 측정기 등에 응용되는 연구가 진행될 수 있을 것으로 예상하고 있다.
- [0004] 최근에 연구된 스핀교환이완없는 (Spin Exchange Relaxation Free : SERF) 방식의 원자 자력계는 SQUID 센서에 필적하는 감도를 보여주면서도 상온에서 냉매 없이 사용할 수 있다. 따라서, SERF 기반 원자 자력계는 기존에 오랜 기간 연구되어온 SQUID 정밀 계측 분야 모두에 대체 활용이 가능하다. 결과적으로 원자자력계 기술의 개발은 우수한 자기측정응용기술을 더욱 널리 심화하여 발전시킬 수 있는 계기가 될 것이다.
- [0005] 특히 SERF 방식의 원자 자력계는 비냉각 뇌자도/심자도 측정 기술개발에 에 널리 응용 될 것이다. SERF 방식 원자자력계 기술과 생체자기계측 기술, 원자시계 기술, 분광학 기술의 결합을 통해 원자자력계 분야에서의 세계 선도적 연구 개발이 예상된다. 이후 연구는 정밀 절대 자기장 측정기술의 발전과 각종 자기장 기반 비파괴 검사 기술 개발에 널리 응용 될 것이다.
- [0006] 기존에 정밀 자기 측정을 위해 이용된 기술은 자기공명(핵자기공명, 광펌핑 등), 홀효과(Hall effect)나 fluxgate 원리를 이용한 자기장측정기(magnetometer) 등 다양한 방법으로 연구되어왔다. 자기장의 측정방법에 따라 각기 다른 장단점을 가지고 있다. fluxgate 자력계는 측정 방법이 단순하기 때문에 간단히 제작이 가능하지만 저자기장 측정에 한계를 가지고 있다.
- [0007] 자기장은 가장 근본적이며 어디에서나 관측 가능한 물리량 중 하나로 모든 전자기적 현상의 정보를 전달한다. 고감도 자기장 측정 기술은 순수 학문분야에서부터 산업체에 이르기까지 폭넓은 관심을 가지고 연구되고 있는 분야이다. 현재 자기장에 가장 민감한 고감도 자기장 측정 장치로는 SQUID를 기반으로 한 센서가 있다. 하지만, 이론적 측정 한계와 초전도 현상을 위한 극저온 냉각에 소용되는 비용과 이를 유지하고 관리하는 비용이 매우 커서 널리 보급되지 못하는 실정이다.
- [0008] 이를 극복하기 위해 빛과 공명하는 원자와의 상호작용을 이용하는 자력계에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 원자 자력계의 민감도는 SQUID 기반 자력계의 민감도를 상회하거나 그 이상이기도 하다. 이를 통해 SQUID 센서로만 측정이 가능했던 생체자기장을 냉각 및 유지가 필요 없는 원자 자력계를 통해 측정이 가능하게 하여 간질, 뇌기능 매핑, 심근경색, 부정맥, 태아 기능 등의 의료진단에서 유용한 생체자기 진단기술이 널리 보급될 수 있다.
- [0009] 고감도 자기장 측정 기술은 최근에 원자와 레이저의 상호작용을 이용한 미소자기장 측정에 관한 연구는 이론과 실험에서 많은 연구가 진행되고 있다.
- [0010] Scully 그룹은 결맞음 원자매질에서의 비선형 광자기 효과에 의한 미소 자기장 측정 한계를 이론적으로 계산하였다. 이 연구에 의하면 Rb원자를 이용했을 때, 자기장 측정 민감도의 한계는 $0.6 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ 로 보고하고 있다.
- [0011] 2003년에 Romalis 그룹은 광펌핑에 의한 Lamor spin precession을 검출하는 방법으로 $0.54 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ 의 감도로 자기장 측정이 가능함을 보였다
- [0012] 또한 2004년에 NIST의 Hollberg 그룹에서는 결맞음 밀도 포획(CPT)현상을 이용하여 높이 3.9 mm , 부피 12 mm^3 를 가진 자기장측정 센서를 개발하였다. 이 센서의 감도는 약 $50 \text{ pT/Hz}^{1/2}$ 로 측정되었다.
- [0013] 2006년에 Budker 그룹에서는 anti-relaxation coating 된 직경 3 mm 의 구형 셀을 제작하여 자기장측정 센서를 개발하였다. 이 센서의 감도는 $4 \text{ pT/Hz}^{1/2}$ 로 측정되었다고 보고하고 있다.
- [0014] 또한 최근에 초소형 원자원자 자력계가 NIST의 P. Schwindt에 의해서 개발되어 유비쿼터스 기술과 접목되어 휴대형 자기공명영상, 매설 폭발물 탐지기, 리모트 미네랄 측정기 등에 응용되는 연구가 진행될 수 있을 것으로 예상하고 있다.
- [0015] 최근에는 Romalis 그룹에서 Potassium 원자에서 SERF(Spin-exchange relaxation free) 영역에서 자기장 측정 감도가 $160 \text{ aT/Hz}^{1/2}$ 인 원자 자력계를 개발하였다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0016] 본 발명의 해결하고자 하는 일 과제는 외부 자기장에 의해 변화하는 원자의 스핀 세차운동을 원자와 빛의 상호 작용을 통하여 외부 자기장의 세기와 방향을 측정하여 작은 금속 물질이나 생체에서 발생하는 미소 자기장을 측정하는 장치를 제공하는 것이다. 안정적인 증기 셀의 가열을 위하여 소정의 주파수 대역의 교류 전원이 가열선에 인가된다. 또한, 줄임 되먹임(negative feedback)을 이용하여, 미소 자기장 측정이 가능하다.

과제의 해결 수단

[0017] 본 발명의 일 실시예에 따른 스핀교환이완없는 원자 자력계는 육면체 형상의 메인 셀과 상기 메인 셀에 연결된 원통 형상의 스템 셀을 포함하고, 원편광된 펌프 빔과 선형 편광된 프로브 빔을 제공받고 알카리 메탈 증기를 포함하는 증기 셀; 상기 증기 셀을 투과한 상기 선형 편광된 프로브 빔을 제공받아 상기 프로브 빔의 편광 상태를 측정하는 감지부; 및 열선에 5 kHz 내지 30 kHz의 교류를 인가하여 상기 증기 셀을 가열하는 가열부를 포함한다. 측정 대상의 상기 측정 자기장은 상기 증기 셀에서 상기 프로브 빔의 광자기 회전을 제공한다.

[0018] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 증기 셀은 알카리 메탈 증기로서 포타슘 (potassium; K), 헬륨 버퍼 가스, 및 질소 가스를 포함하는 메인 셀; 및 상기 알카리 메탈 증기의 흡착을 방지하는 스템 셀을 포함할 수 있다.

[0019] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 열선에 5 kHz 내지 30 kHz의 교류를 인가하여 상기 증기 셀의 메인 셀을 섭씨 200 도로 가열하는 제1 가열부; 및 열선에 5 kHz 내지 30 kHz의 교류를 인가하여 상기 스템 셀을 섭씨 185도로 가열하는 제2 가열부를 더 포함할 수 있다.

[0020] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 가열부는 하부면에 관통홀 및 측면에 투명 창을 포함하고 상기 메인 셀의 주위를 감싸도록 배치된 제1 가열 블록; 상기 제1 가열 블록의 외주면을 감싸도록 배치된 제1 가열 코일; 상기 제1 가열 블록의 상기 관통홀과 정렬되어 상기 스템 셀의 주위를 감싸도록 배치된 제2 가열 블록; 상기 제2 가열 블록을 감싸도록 배치된 제2 가열 코일; 및 상기 제1 가열 블록상기 제1 가열블록을 수납하는 단열 블록을 포함하고, 상기 메인 셀은 상기 제1 가열 블록의 상기 투명 창과 정렬될 수 있다.

[0021] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 프로브 빔과 상기 펌프 빔의 진행 방향에 의하여 정의되는 제1 평면에서 수직으로 이격되어 상기 제1 평면에 수직인 음의 피드백 자기장 신호를 생성하여 상기 증기 셀에 제공하는 피드백 코일; 및 상기 감지부의 출력 신호를 제공받아 상기 측정 자기장에 비례하는 음의 피드백 자기장을 생성하도록 상기 피드백 코일에 피드백 전류를 제공하는 피드백 증폭부를 포함할 수 있다.

[0022] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 피드백 코일과 상기 피드백 증폭부는 상기 원자 자력계의 감지 대역폭 (detection bandwidth)을 확장할 수 있다.

[0023] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 원자 자력계의 주파수 응답(frequency response)은 영(zero) Hz에서 수백 Hz 까지 플랫(flat)할 수 있다.

[0024] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 피드백 증폭부의 주파수 응답(frequency response)은 DC에서 20 kHz 까지 플랫한 이득을 가지고 또는 DC 내지 컷오프 주파수를 통과시키고, 상기 컷오프 주파수는 150 내지 220 Hz일 수 있다.

[0025] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 증기 셀의 주위에 배치되어 외부 환경 자기장을 제거하도록 외부 자기장을 감소시키는 자성체로 구성된 자기 차폐부를 더 포함할 수 있다.

[0026] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 증기 셀의 주위에 배치되어 외부 환경 자기장을 제거하도록 상쇄 자기장을 생성하는 자기장 상쇄부를 더 포함할 수 있다.

[0027] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 가열부는 상기 증기 셀을 가열하는 가열 코일, 가열된 증기 셀의 온도를 측정하는 온도 측정부, 상기 가열 코일에 교류 전력을 제공하는 오피오 증폭기, 및 상기 온도 측정부가 측정된 온도를 이용하여 상기 오디오 증폭기를 제어하는 온도 제어부(166)를 포함할 수 있다. 상기 온도 제어부는 사인 파를 출력하는 함수 발생기, 약1.5 kHz의 컷오프 주파수를 가지는 고주파 통과필터, 캐리어 입력 신호를 출력하는 PID 제어부, 및 상기 고주파 통과필터의 출력 및 상기 캐리어 입력 신호를 제공받아 곱셈 처리하는 아날로그 배율기(analog multiplier)를 포함할 수 있다.

발명의 효과

- [0028] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 소정 대역의 교류를 열선에 제공하여, 측정 신호에 영향을 주지 않고, 안정적으로 원자 자력계를 가열할 수 있다.
- [0029] 본 발명의 일 실시예에 따르면, SERF 영역에서 줄임 되먹임을 사용하여 원자 자력계(atomic magnetometer)의 측정 대역폭(detection bandwidth)을 확장할 수 있다.
- [0030] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 줄임 되먹임의 사용을 사용한 경우, 영에서 190 Hz 까지의 플랫-주파수 응답이 달성되었다. 플랫-주파수 응답(flat-frequency response)은 100 Hz에서 $3 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ 의 민감도를 유지하고, 줄임 되먹임의 사용을 사용하지 않는 경우에 비하여 3배의 증가이다.

도면의 간단한 설명

- [0031] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 원자 자력계를 나타내는 개념도이다.
- 도 2a는 시험 자기장 하에서 도 1의 원자 자력계의 줄임 되먹임을 설명하는 블록도이다.
- 도 2b는 측정 자기장 하에서 도 1의 원자 자력계의 줄임 되먹임을 설명하는 블록도이다.
- 도 3은 도 1의 원자 자력계의 주파수 응답을 나타내는 도면이다.
- 도 4는 본 발명의 다른 실시예에 따른 원자 자력계를 설명하는 사시도이다.
- 도 5는 도 4의 원자 자력계를 설명하는 평면도이다.
- 도 6은 도 4의 원자 자력계의 단열 블록을 설명하는 사시도이다.
- 도 7은 도 6의 단열블록과 그 내부의 가열 블록을 설명하는 분해 사시도이다.
- 도 8은 도 7의 I-I'선을 따라 자른 단면도이다.
- 도 9는 잔류 자기장을 상쇄하는 것을 설명하는 블록도이다.
- 도 10은 측정 대상의 측정 자기장을 측정하는 것을 설명하는 블록도이다.
- 도 11은 본 발명의 일 실시예에 따른 편광 회전각의 측정 방법을 설명하는 도면이다.
- 도 12는 본 발명의 다른 실시예에 따른 편광 회전각의 측정 방법을 설명하는 도면이다.
- 도 13은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 편광 회전각의 측정 방법을 설명하는 도면이다.
- 도 14는 SERF 영역에서 시험 자기장 B_y 의 함수에 따른 광자기 회전 신호를 나타내는 도면이다.
- 도 15는 도 5의 원자 자력계의 주파수 응답을 나타낸다.
- 도 16은 다중 주파수에 대한 600 pT의 진폭을 가진 입력 진동 자기장에 대한 주파수 응답을 나타내는 도면이다.
- 도 17a는 주파수 도메인에서 시험 자기장을 나타내고, 도 17b는 도 17a의 시험 자기장 신호를 측정할 시간 도메인에서 측정 신호를 나타내고, 도 17c는 도 17b의 측정 신호를 확대한 그래프이다.
- 도 18은 본 발명의 일 실시예에 따른 원자 자력계의 노이즈 스펙트럼을 표시하는 도면이다.
- 도 19는 본 발명의 다른 실시예에 따른 원자 자력계를 나타내는 개념도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0032] 광을 이용한 광학자력계(optical magnetometer)에 관한 연구가 SQUIDs의 한계를 극복할 한 방법으로서 활발히 진행되고 있다. 현재까지의 광학자력계 분야의 연구는 크게 두 가지 방향으로 요약할 수 있다. 자기장에 의한 매질의 굴절률 변화 정도를 측정하는 방법과 자기부준위의 이동 정도를 측정하는 방법으로 대별된다. 전자를 광 펌핑 자력계(OPM ; optical pumping magnetometer), 후자를 원자결맞음 밀도포획 자력계(CPTM ; coherent population trapping magnetometer)라고 한다.
- [0033] 기본적인 원자 자력계의 원리는 자기장 하에서 원자 스핀의 Larmor 세차 주파수를 측정함으로써 외부 자기장을 측정하는 것이다.

- [0034] 원자 자력계의 민감도는 측정된 신호의 선폭과 잡음에 의해 결정된다. 원자 자력계의 민감도를 향상시키는 방법은 크게 두 가지가 있다.
- [0035] 첫째가 원자와 원자를 포함하는 증기 셀의 벽면과의 충돌을 막는 방법이다. 이 방법에서는 주로 완충 기체가 포함된 증기 셀과 파라핀이 코팅된 증기 셀을 이용한다. 일반적으로 알칼리 족 원자의 바닥준위 사이의 결맞음 시간에 가장 큰 영향을 주는 요소는 증기 셀 벽면과 원자의 충돌이다. 완충기체에는 주로 He 과 N₂ 과 같이 알칼리족 원자와 충돌하더라도 결맞음 상태 변화에 영향을 주지 않는 분자를 이용한다. 이러한 완충기체는 알칼리족 원자가 증기 셀 벽면으로 확산되는 것을 막아주며 알칼리족 원자와 조사 빔과의 상호작용 시간을 늘려주는 역할을 한다.
- [0036] 두 번째 방법은 원자 밀도를 향상하는 방법이다. 두 번째 방법에서 원자 밀도가 높아지면 알칼리족 원자끼리의 스핀 교환 충돌이 자력계의 민감도를 좌우한다. 이 경우 원자의 스핀은 보존되지만 원자 결맞음은 완화된다.
- [0037] 최근에는 바닥 준위 사이의 스핀 교환 충돌에 의한 완화를 완벽하게 제거하는 스핀교환이완 방법이 알려져 있다. SERF 자기력계는 대표적인 OPM이다. 약한 자기장 하에서 라모어(Larmor) 주파수가 원자간의 스핀 교환 속도보다 훨씬 작다면 스핀 교환에 의한 완화를 줄일 수 있다. 이러한 구도에서 원자는 각각의 원자의 세차 방향과 동일한 방향으로 세차운동 하지만 세차 주파수는 평균적인 주파수로 세차하게 된다. 즉, 원자들의 세차 주파수는 각각의 원자가 갖는 세차 주파수보다 느려지게 되고 원자들은 원자 준위에 더욱 오래 머물게 된다. 이러한 방법을 기반으로 한 자력계는 실험적으로 0.54 fT/Hz^{1/2} 의 민감도를 가지며, 이론적으로 0.01 fT/Hz^{1/2} 의 민감도를 갖는다.
- [0038] 최근에 원자 자기력계는 부피가 약 10 mm³ 인 마이크로 미터 단위의 크기로 제작된 증기셀을 이용하여 개발 되었다. 이러한 장치들은 간편하게 이동이 가능하고 수 mW 의 작은 레이저 파워를 요구한다. 또한 전체 장치의 크기는 10 cm³ 보다 작다.
- [0039] 원자 자력계에서, 펌프 빔에 의해 일정한 방향으로 정렬된 원자의 편극(예컨대, 자기 모멘트)은 외부 자기장에 의해서 그 방향이 변하게 된다. 이 때 원자의 편극 상태를 조사 빔의 편광 회전정도를 측정함으로써 알 수 있다. 즉, 조사 빔의 편광 회전각을 측정하여 자기장에 대한 원자상태를 측정하여 자기장을 측정하는 것이다. 일반적으로 펌프 빔과 조사 빔의 방향은 서로 수직이다. 하지만, CPT 기반 구도에서는 선편광된 빛의 회전방향이 서로 반대인 원형 편광 성분을 펌프빔과 조사빔으로 이용하기 때문에 두 빛의 방향은 동일하다.
- [0040] 외부 자기장에 대한 민감도를 향상하기 위해서는 스핀 완화에 의한 결맞음 완화를 최소화 하여야 한다. 스핀 완화는 스핀-교환 충돌에 의한 완화, 스핀-파괴 완화, 그리고 결맞음 매질을 담고 있고 있는 유리 용기의 벽면과의 충돌에 의한 완화가 있다. 높은 원자 밀도에서 결맞음 밀도간의 스핀-교환 충돌은 스핀 완화에 가장 큰 기여를 한다. 이러한 충돌에서 두 원자의 스핀 방향은 스핀의 구분 가능 여부에 따라 바뀌지만 총 운동량은 보존된다.
- [0041] 이러한 효과는 결맞음 매질로 실험에 사용되는 알칼리-알칼리 금속간의 상호작용이 스핀 싱글렛(singlelet)과 트리플렛(triplet)의 포텐셜을 갖기 때문이다. 싱글렛과 트리플렛 포텐셜간의 아주 큰 에너지 차는 알칼리 금속 원자간의 충돌에 있어서 파동함수의 위상차를 야기하며 결과적으로 전자의 스핀 상태의 교환을 일으킨다. 스핀 교환 충돌은 초미세 원자레벨간의 상호작용에 있어서 아주 빨리 일어나기 때문에 충돌한 원자들의 핵스핀에는 영향을 주지 못한다. 하지만 충돌로 인해 원자들은 초미세 상태를 교환한다. 즉, 스핀 교환 충돌로 인해 지만 자기 부준위 사이에 원자들의 재분배가 일어나게 된다. 원자의 초미세 에너지에서 두 바닥 준위는 주파수는 같지만 방향이 반대로 세차하므로 두 초미세 에너지 사이의 결맞음 완화가 일어난다. 하지만 충분히 작은 자기장하에서 원자의 밀도가 높다면, 즉, 스핀-교환 비가 세차 주파수보다 충분히 크다면 원자들 각각은 아주 작은 각으로 세차운동 할 것이다. 따라서 바닥준위의 지만(Zeeman) 자기부준위(magnetic sublevel)에 있는 모든 원자들은 매우 작은 주기를 가진다. 상대적으로 더 많은 지만 자기부준위(Zeeman sublevel)가 존재하는 F=I+1/2 준위에 원자들이 더욱 긴 시간동안 머물게 된다. 특히 F=I+1/2 준위의 mF=I+1/2 자기 부준위에 원자들이 편극되며 모든 원자들은 같은 방향과 같은 주파수를 갖는 세차 운동을 하게 된다. 이러한 방법을 통해 두 초미세 준위의 원자들은 동일한 세차운동을 하며, 스핀-교환 충돌은 더 이상 스핀완화에 영향을 주지 않는다.
- [0042] 스핀-교환 이완을 제거하기 위해서는 수 nT의 작은 자기장과 매질의 높은 밀도가 필요하다. 뿐만 아니라 증기 셀 주변의 자기장은 측정하고자 하는 자기장 외에는 존재하지 않아야한다. 수 nT의 자기장을 발생하기 위해 레이저의 진행평면과 수직인 방향으로 자기장 상쇄 코일을 만들어 자기장 차폐장치 내에서 매질 주변의 자기장

이 0 T에 가깝도록 조절해야한다. 또한, 수 nT의 자기장을 발생하기 위해 레이저의 진행방향과 수평 방향으로 자기장 상쇄코일을 만들어 자기장 차폐장치 내에서 매질 주변의 자기장이 0 T(Tesla)에 가깝도록 조절해야한다.

- [0043] 증기 상태의 매질의 밀도를 높이기 위해서는 높은 온도가 필요하다. 실험에 사용될 포타슘 원자는 알칼리족 금속 원자로서 대략 섭씨 200 도 에서 스핀-교환 충돌이 충분히 일어난다. 스핀-교환 충돌의 적정 조건은 원자와 원자간의 충돌 단면적과 온도에 따른 원자 밀도에 의해 결정된다. 포타슘 원자의 충돌 단면적은 110^{-18} cm^2 이며 요구되는 밀도는 $10^{14} - 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 이다.
- [0044] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 온도 조절장치의 온도 조절 방법은 저항체에 5 kHz 내지 30 kHz의 교류 전류를 흘려 열을 발생하는 방법을 이용한다. 온도 조절 장치의 전류에 의한 자기장은 5 kHz 내지 30 kHz의 자기장을 생성한다. 그러나, 5 kHz 내지 30 kHz 대역은 증기 셀의 낮은 주파수 응답에 의하여 영향이 거의 없다. 따라서, 교류 전류 저항선 가열 방식은 증래의 가열 유체를 이용한 온도 조절 방법에 비하여 공간을 획기적으로 줄일 수 있다. 또한 온도 유지를 위해 증기 셀을 보온 단열장치가 요구된다. 단열 장치는 PTFE 재질을 이용하여 끼움 결합을 통하여 용이하게 분해 결합할 수 있다.
- [0045] 다양한 원자 자력계 중에서, 생체자기 측정을 위한 가장 가능성 있는 타입은 SERF 원자 자력계(magnetometer)이다. 스핀-교환 충돌에 의한 완화를 완전히 제거하여 SERF 자력계는 $0.1 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ 의 민감도에 도달할 수 있다. 그러나, SERF 자력계의 긴 스핀-결맞음 시간(long spin-coherence time)은 상기 자력계의 대역폭을 한정한다.
- [0046] 원자 자력계의 대역폭을 확장시키는 여러 방법이 보고되고 있다. 자체-오실레이팅 자력계(Self-oscillating magnetometers)는 광원에 변조 전력을 되먹임하여 1 kHz를 초과하는 대역폭을 소유한다. 고 밀도 원자 셀(high density atomic cell)을 가지고, 10 kHz에 도달하는 대역폭이 광 펌핑 레이트(optical pumping rate)를 증가시켜 얻어질 수 있다. 그러나, 이러한 시스템은 $10 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ 의 정도의 낮은 민감도를 가진다. 따라서, 이러한 시스템은 인체 MEG와 같은 약한 생체 자기 신호를 측정할 수 없다.
- [0047] 최근에, 줄임 되먹임 원리가 라디오 주파수 원자 자력계(radio frequency atomic magnetometer; RF atomic magnetometer)에 적용되었다. 대역폭은 423 kHz를 중심으로 1kHz 이상으로 넓어지는 것으로 보고되고 있다.
- [0048] 줄임 되먹임 하에서 스핀 결맞음 시간(spin coherence time)의 억제(suppression)는 스핀 댐핑(spin damping)과 관련이 있다. 스핀 댐핑을 가지는 상기 RF 원자 자력계는 $0.3 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ 의 민감도를 보인다. 그러나, 시변 생체자기장을 감지하는 실제적인 응용을 위하여, 중심 주파수는 직류(direct current;DC)에 접근해야 한다. 그러나, 이러한 구조는 RF 원자 자력계와 양립할 수 없다.
- [0049] 본 발명의 일 실시예에 따르면, SERF 방식의 고감도 원자 자력계가 개시된다. 자기장의 감도를 증가시키고 뇌자도/심자도의 정밀한 측정을 위한 주파수 영역을 확보하기 위해 알칼리 금속 증기가 담겨있는 증기 셀에 줄임 되먹임이 제공된다. 또한, 줄임 되먹임은 신호대노이즈비를 감소시키고 넓은 대역폭을 제공함에 따라, 신호의 크기가 작고 빠르게 변화하는 자기장 신호를 측정할 수 있다.
- [0050] 본 발명의 일 실시예에 따르면, SERF 영역에서 원자 자력계(atomic magnetometer)의 측정 대역폭(detection bandwidth)을 확장할 수 있는 줄임 되먹임의 사용이 제안된다.
- [0051] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 줄임 되먹임의 사용을 사용한 경우, 영에서 190 Hz 까지의 플랫-주파수 응답이 달성되었다. 플랫-주파수 응답(flat-frequency response)은 100 Hz에서 $3 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ 의 잡음 레벨을 유지하고, 줄임 되먹임의 사용을 사용하지 않는 경우에 비하여 3배의 증가를 보인다.
- [0052] 상기 대역폭의 확장에 따라, 측정 신호와 비교를 위하여 합성된 심자도 자기장(magnetocardiographic field) 사이의 선형 상관(linear correlation)은 0.21 부터 0.74 까지 증가되었다. 이 결과는 음의 되먹임 하에서 SERF 원자 자력계를 사용하여 다중 주파수 성분(multiple frequency components)을 포함한 약한 생체자기 신호(biomagnetic signals)의 측정 가능성(feasibility)을 보여준다.
- [0053] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 우리는 줄임 되먹임을 SERF 기반 원자 자력계에 적용하였다. 3 배의 대역폭의 증가는 DC 에서 190 Hz 까지의 주파수 도메인에서 거의 플랫-응답을 야기한다. 노이즈 레벨은 100 Hz에서 $3 \text{ fT/Hz}^{1/2}$

- [0054] 로 측정되었다. 이러한 노이즈 레벨은 DC SQUID의 노이즈 레벨과 유사하다.
- [0055] SERF 원자 자력계의 전체 시스템은 주파수 응답에서 단일 폴(mono pole)을 가지는 증폭기로 가정할 수 있다. 줄임 되먹임 하에서 측정된 신호는 높은 상관 계수(correlation coefficient)를 보였다.
- [0056] 이하, 첨부한 도면들을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예들을 상세히 설명하기로 한다. 그러나, 본 발명은 여기서 설명되어지는 실시예들에 한정되지 않고 다른 형태로 구체화될 수도 있다. 오히려, 여기서 소개되는 실시예는 개시된 내용이 철저하고 완전해질 수 있도록 그리고 당업자에게 본 발명의 사상이 충분히 전달될 수 있도록 하기 위해 제공되어지는 것이다. 도면들에 있어서, 구성요소는 명확성을 기하기 위하여 과장되어진 것이다. 명세서 전체에 걸쳐서 동일한 참조번호로 표시된 부분들은 동일한 구성요소들을 나타낸다.
- [0057] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 원자 자력계를 나타내는 개념도이다.
- [0058] 도 2a는 시험 자기장 하에서 도 1의 원자 자력계의 줄임 되먹임을 설명하는 블록도이다.
- [0059] 도 2b는 측정 자기장 하에서 도 1의 원자 자력계의 줄임 되먹임을 설명하는 블록도이다.
- [0060] 도 3은 도 1의 원자 자력계의 주파수 응답을 나타내는 도면이다.
- [0061] 도 1 내지 도 3을 참조하면, 원자 자력계(100)는 증기 셀(110), 감지부(130), 되먹임 코일(122), 및 되먹임 증폭부(124)를 포함한다.
- [0062] 상기 증기 셀(110)은 원형 편광된 펌프 빔(31)과 선형 편광된 조사 빔(33)을 제공받고 알칼리 메탈 증기를 포함한다. 상기 감지부(130)는 상기 증기 셀(110)을 투과한 상기 조사 빔(33)을 제공받아 상기 조사 빔(33)의 광자기 회전을 측정한다. 상기 되먹임 코일(122)은 상기 조사 빔과 상기 펌프 빔의 진행 방향에 의하여 정의되는 제 1 평면(x-z 평면)에서 수직으로 이격되어 상기 제1 평면에 수직인 줄임 되먹임 자기장 신호(B_{fb})를 생성하여 상기 증기 셀(110)에 제공한다. 상기 되먹임 증폭부(124)는 상기 감지부(130)의 출력 신호를 제공받아 측정 자기장(B_{meas})에 비례하는 상기 줄임 되먹임 자기장(B_{fb})을 생성하도록 상기 되먹임 코일(122)에 되먹임 전류를 제공한다. 측정 대상(20)의 상기 측정 자기장(B_{meas})은 상기 증기 셀(110)에서 상기 조사 빔의 광자기 회전을 제공한다.
- [0063] 측정 대상(20)은 인체 또는 쥐와 같은 소동물의 심장 또는 뇌일 수 있다. 상기 측정 자기장은 뇌자도 신호 또는 심자도 신호일 수 있다. 측정 대상(20)은 자기 차폐부(140) 내부에 배치될 수 있다.
- [0064] 상기 증기 셀(vapour cell, 110)은 포타슘(potassium;K) 증기(vapor), 헬륨 버퍼 가스(He buffer gas), 및 N2 가스를 포함한다. 상기 K 증기의 밀도는 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 이고, 헬륨 버퍼 가스의 밀도는 2.5 amg이고, N2의 증기압은 15 Torr이다. 상기 헬륨 버퍼 가스는 원자가 벽으로 확산하는 비율을 감소시킨다. 상기 N2는 담금질(quenching)에 의하여 광학 펌핑의 효율을 증가시킨다.
- [0065] 상기 증기 셀(110)은 메인 셀(main cell, 112)과 스템 셀(stem cell, 114)의 두 부분으로 구성된다. 상기 메인 셀(112)은 보로실리케이트 유리(borosilicate glass)이고, 상기 스템 셀(114)에 연결되어 있다. 상기 스템 셀(114)은 증기 저장소(vapour reservoir)로 작용한다. 상기 스템 셀(114)은 알루미늄노실리케이트 유리(aluminosilicate glass)로 구성되고, 증기 셀(110)의 내부 표면에 포타슘 증기의 흡착을 방해한다.
- [0066] 가열부(162, 164)는 상기 메인 셀(112)을 가열하는 제1 가열부(162)와 상기 스템 셀을 가열하는 제2 가열부(164)를 포함한다. 상기 가열부(162, 164)는 상기 포타슘 증기의 증착을 억제하기 위하여 사용된다. 상기 메인 셀(112)은 섭씨 200 도로 가열되고, 상기 스템 셀(114)은 섭씨 185도로 가열된다. 상기 스템 셀(114)과 상기 메인 셀(112) 사이의 온도 차이는 PID 제어를 통하여 자동적으로 유지된다. 상기 제1 가열부와 상기 제2 가열부는 저항성 히터를 포함할 수 있다. 상기 가열부(162, 164)는 단열 패널(thermal insulating panel)에 의하여 단열될 수 있다.
- [0067] 펌프 광원은 상기 펌프 빔(31)을 출력할 수 있다. 상기 펌프 광원은 분포 귀환형 레이저(distributed feedback laser; DFB laser)를 포함할 수 있다.
- [0068] 상기 펌프 광원은 단일 모드 TEM₀₀의 편광 유지 파이버(polarization maintaining fiber)에 통하여 원형 편광의 펌프 빔(31)을 상기 증기 셀(110)에 전달할 수 있다. 광학 펌핑의 파장은 K D1 (potassium D1) 라인의 중심에 일치된다. 상기 펌프 빔의 파워는 테이퍼드 증폭기(tapered amplifier)에 의하여 1W 까지 증폭될 수 있다. 상기 펌프 빔의 지름은 한 쌍의 렌즈를 통하여 5 mm 까지 확장될 수 있다. 상기 펌프 빔(31)은 z축 방향으로 진

행할 수 있다.

- [0069] 상기 조사 광원은 상기 조사 빔(33)을 출력할 수 있다. 상기 조사 빔은 단일 모드 DFB 레이저(single mode DFB laser)에 의하여 발생될 수 있다. 상기 조사 빔은 파브리-페로(Fabry-Perot) 간섭계 및 스펙트로미터에 의하여 모니터링될 수 있다. 선형 편광 조사 빔(linearly-polarized probe beam)은 x 축 방향으로 진행하여 상기 증기 셀에 제공될 수 있다. 상기 조사 빔의 파장은 흡수를 최소화하기 위하여 K D1 (potassium D1) 라인에서 수 nm 정도 벗어나 유지된다. 상기 조사 빔은 반파장판(half wave plate) 및 상기 증기 셀(110)을 통과한 후, 상기 감지부(130)에 제공될 수 있다. 상기 감지부(130)는 균형 편광계(balanced polarimeter)를 포함할 수 있다. 상기 균형 편광계(balanced polarimeter)는 편광 빔 분할기(polarization beam splitter)와 한 쌍의 포토다이오드를 포함할 수 있다. 상기 편광 빔 분할기는 상기 조사 빔을 수직 편광(orthogonal polarization)에 따라 두 경로로 분할할 수 있다. 차동 증폭기는 서로 수직 편광 신호들 사이의 차이를 측정한다.
- [0070] 시험 코일(test coil)은 시험 자기장(Bt)를 발생시킨다. 상기 시험 코일(152)은 복수의 권선을 가진 원형 코일일 수 있다. 상기 시험 자기장은 다중 주파수(multiple frequencies)를 가지고 진동하는 신호를 포함한다. 상기 시험 코일(152)은 상기 측정 대상(20)에서 발생하는 측정 자기장을 대신하여 시험 자기장(Bt)을 생성한다. 상기 시험 코일(152)은 측정 대상의 측정 전에 교정 및 시험을 위하여 사용될 수 있다. 상기 시험 코일(152)은 상기 증기 셀(110)의 상부에 y 축 방향으로 배치될 수 있다. 상기 시험 코일(152)은 임의의 파형을 발생시키는 함수 발생기(function generator, 154)에 연결될 수 있다. 상기 함수 발생기는 가상의 MCG 신호를 발생시킬 수 있다.
- [0071] 상기 되먹임 코일(122)은 y축 방향의 헬름홀츠 코일을 포함할 수 있다. 상기 되먹임 코일(122)은 상기 감지부(130)의 출력을 제공받아 측정 자기장(Bmeas)의 방향에 반대 방향의 줄임 되먹임 자기장(Bfb)을 생성할 수 있다. 상기 줄임 되먹임 자기장(Bfb)은 상기 측정 자기장에 역평행(antiparallel)할 수 있다.
- [0072] 되먹임 증폭기(124)는 상기 감지부(130)의 출력 신호를 제공받아 증폭하여 상기 되먹임 코일(122)에 전류를 제공할 수 있다. 상기 되먹임 증폭기(124)는 입력 전압에 비례하는 전류를 출력할 수 있다. 상기 줄임 되먹임 자기장(Bfb)은 상기 되먹임 증폭기(124)의 출력 전류에 비례할 수 있다. 상기 되먹임 증폭기(124)는 50kHz 이하의 대역을 증폭하는 오디오 증폭기일 수 있다. 통상적으로 생체 자기신호의 주파수 대역은 200 Hz 이하이다. 따라서, 상기 되먹임 증폭기(124)는 수 kHz 이하에서 플랫한 주파수 응답을 가질 수 있다.
- [0073] 상기 줄임 되먹임 자기장(negative feedback field) Bfb는 다음과 같이 주어질 수 있다.

수확식 1

$$B_{fb} = \beta V_{out}$$

- [0074]
- [0075] 여기서, β 는 되먹임 이득(feedback gain)이고, V_{out} 은 상기 감지부(130)의 출력단에서 전기 신호이다. 상기 감지부(130)의 출력 신호 V_{out} 은 조사 빔의 편광 회전각에 비례할 수 있다. 또는 상기 조사 빔의 광자기 회전에 비례할 수 있다.
- [0076] 도 3을 참조하면, 상기 원자 자력계(100)가 줄임 되먹임을 가짐에 따라, 상기 원자 자력계(100)의 이득 곡선(gain curve)은 플랫해지고 이득은 감소한다. 이에 따라, 줄임 되먹임 원자 자력계(100)는 출력의 선형성을 증가시킬 수 있다. 즉, 출력의 선형성의 증가는 특성 대역폭(characteristic bandwidth)을 확장할 수 있다. 특성 대역폭(characteristic bandwidth)은 차단 주파수에 비례할 수 있다.
- [0077] 상기 원자 자력계(100)의 출력의 선형성을 증가는 상기 원자 자력계(100)를 단일-폴 증폭기(single-pole amplifier)로 가정하여 해석될 수 있다. 단일-폴 증폭기(single-pole amplifier)로 가정한 경우, 가상 증폭기의 입력은 측정 자기장(Bmeas)이고, 출력은 감지부의 전압 신호(V_{out})일 수 있다. 상기 가상 증폭기의 개방-루프 이득(open-loop gain) G은 V/n 의 단위를 가진다.
- [0078] 공명을 포함하는 다른 시스템과 같이, SERF 원자 자력계는 주파수 도메인에서 로런츠형 응답(Lorentzian-type response)을 보인다. 로런츠형 응답(Lorentzian-type response)은 거의 영(zero) Hz에서 중심 주파수(center frequency)를 가지고, 컷-오프 주파수(cut-off frequency) f_c 를 가진다. 따라서, 개방-루프 이득 G는

다음과 같이 로런츠형(Lorentzian form)로 표시될 수 있다.

수학식 2

$$G = \frac{G_0}{1 + j \frac{f}{f_c}}$$

[0079]

[0080] 여기서, G_0 는 DC 이득이고, f 는 주파수이고, f_c 는 차단 주파수이다.

[0081] 줄임 되먹임 상황 하에서, 되먹임 이득 G_{fb} 은 다음과 같이 표시될 수 있다.

수학식 3

$$G_{fb} = \frac{G_0}{1 + \beta G_0 + \left(1 + j \frac{f}{(1 + \beta G_0)/f_c}\right)}$$

[0082]

[0083] 여기서, β 는 되먹임 이득 파라미터이다. 상기 원자 자력계의 주파수 응답은 $1 + \beta G_0$ 팩터로 대역폭을 확장시키고, 상기 대역폭 확장은 DC 이득을 $1 + \beta G_0$ 팩터로 감소시킨다. 상기 대역폭 확장은 플랫폼 주파수 특성에 기인하여 입력 신호(측정 자기장)를 왜곡없이 측정할 수 있다.

[0084] 측정 자기장의 주파수 대역에 따라, 상기 되먹임 이득 파라미터 β 는 적절히 선택될 수 있다. 상기 되먹임 이득 파라미터 β 는 상기 되먹임 증폭기의 이득을 제어하여 조절될 수 있다.

[0085] 강한 고차-고조파(strong higher-order harmonics)를 보이는 펄스형 자기장을 측정하는 응용에서, 확장된 대역폭은 상기 원자 자력계(100)의 출력 신호의 선형성을 향상시키므로, 감소된 DC 이득은 중요한 단점이 아니다. 시스템의 신호대노이즈 비(signal-to-noise ratio)는 확장 팩터(extension factor) ($1 + \beta G_0$)의 상한(upper limit)을 결정한다.

[0086] 도 4는 본 발명의 다른 실시예에 따른 원자 자력계를 설명하는 사시도이다.

[0087] 도 5는 도 4의 원자 자력계를 설명하는 평면도이다.

[0088] 도 6은 도 4의 원자 자력계의 단열 블록을 설명하는 사시도이다.

[0089] 도 7은 도 6의 단열블록과 그 내부의 가열 블록을 설명하는 분해 사시도이다.

[0090] 도 8은 도 7의 I-I' 선을 따라 자른 단면도이다.

[0091] 도 9는 잔류 자기장을 상쇄하는 것을 설명하는 블록도이다.

[0092] 도 10은 측정 대상의 측정 자기장을 측정하는 것을 설명하는 블록도이다.

[0093] 도 4 내지 도 9를 참조하면, 원자 자력계(200)는 증기 셀(110), 감지부(130), 되먹임 코일(122), 및 되먹임 증폭부(124)를 포함한다. 도 1 내지 도 3에서 설명한 것과 중복되는 설명은 생략한다.

[0094] 상기 증기 셀(100)은 원형 편광된 펌프 빔(31)과 선형 편광된 조사 빔(33)을 제공받고 알칼리 메탈 증기를 포함한다. 상기 감지부(130)는 상기 증기 셀(110)을 투과한 상기 조사 빔을 제공받아 상기 조사 빔의 광자기 회전을

측정한다. 상기 되먹임 코일(122)은 상기 조사 빔과 상기 펄프 빔의 진행 방향에 의하여 정의되는 제1 평면에 수직한 줄임 되먹임 자기장 신호를 생성하여 상기 증기 셀에 제공한다. 상기 되먹임 증폭부(124)는 상기 감지부의 출력 신호를 제공받아 측정 자기장에 비례하는 상기 줄임 되먹임 자기장을 생성하도록 상기 되먹임 코일에 되먹임 전류를 제공한다. 측정 대상(20)의 상기 측정 자기장(Bmeas)은 상기 증기 셀(110)에서 상기 조사 빔의 광자기 회전을 제공한다.

- [0095] 자기 차폐부(240)는 상기 증기 셀(110)의 주위에 배치되어 외부 환경 자기장을 감소시키는 자성체로 구성된다. 상기 자기 차폐부(240)는 상기 증기 셀을 3겹의 실린더 뮤-메탈(-metal) 챔버를 포함할 수 있다. 뮤-메탈(Mu-metal)은 니켈-철 합금(nickel-iron alloy)일 수 있다. 상기 뮤-메탈 챔버는 지구 자기장을 포함하는 외부 자기장의 효과를 최소화시킨다. 상기 뮤-메탈 챔버로 자기 차폐 후에 상기 뮤-메탈 챔버 내의 잔류 자기장은 x 축 방향 및 z 축 방향으로 0.15 nT 정도이고, y축 방향으로 3 nT 정도일 수 있다.
- [0096] 상기 자기 차폐부(240)는 증기 셀(110), 상기 증기 셀(110)을 감싸도록 배치된 가열부(260), 상기 가열부(260)를 감싸도록 배치된 자기장 상쇄 코일(172a, 172b, 172c), 및 되먹임 코일(122)을 감싸도록 배치될 수 있다.
- [0097] 상기 자기 차폐부(240)는 x 축 방향으로 한 쌍의 관통홀을 포함할 수 있다. 상기 펄프 빔이 x 축 방향으로 진행할 수 있다. 상기 x 축 방향의 하나의 관통홀의 후단에는 펄프 빔을 흡수하는 흡수체(152)가 배치될 수 있다.
- [0098] 또한, 상기 자기 차폐부(240)는 z축 방향의 한 쌍의 관통홀을 포함할 수 있다. 상기 조사 빔은 z축 방향으로 진행할 수 있다. 상기 z 축 방향의 하나의 관통홀의 후단에는 펄프 빔을 측정하는 감지부(130)가 배치될 수 있다.
- [0099] 원자 자력계(200)를 이용한 생체자기 측정 기술의 응용은 감도가 높은 원자자력계를 이용하고 있기 때문에 외부 환경 자기장에 의한 잡음을 제거할 필요가 있다. 특히 지구 자기장의 세기가 수 백 밀리가우스 (mG) 정도이기 때문에 원자 자력계를 이용한 자기장 측정에 심각한 영향을 줄 수 있다. 상기 자기 차폐부(240)는 자성체로 된 자기차폐통 구조일 수 있다.
- [0100] 상기 자기차폐통 내부에 잔류 자기장은 존재할 수 있으며, SERF 방식에서는 절대 영 자기장이 요구된다. 따라서 영 자기장 차폐를 위해 차폐통 내부의 여러개의 독립적인 코일로 이루어진 자기장 상쇄 코일 시스템을 구축하여 이를 통해 영 자기장을 형성할 뿐만 아니라 여러 방향의 경사 자기장과 균일한 자기장을 형성할 수 있다.
- [0101] 스핀-교환 이원을 제거하기 위해서는 능동 자기 상쇄 기술(active magnetic shielding technique)이 적용될 수 있다. 자기 상쇄부(magnetic field compensation part, 170)는 상기 증기 셀의 주위에 배치되어 외부 환경 자기장 또는 상기 자기 차폐부에 의하여 제거되고 남은 잔류 자기장을 제거하도록 상쇄 자기장을 생성할 수 있다.
- [0102] 상기 자기장 상쇄부(170)는 x축 상쇄 자기장을 생성하는 x 축 상쇄 코일(172a), 상기 x 축 상쇄 코일(172a)에 전류를 공급하는 x축 상쇄 전원(171a), 상기 x축 상쇄 자기장에 수직한 y축 상쇄 자기장을 생성하는 z축 상쇄 코일(172b), 상기 z축 상쇄 코일(172b)에 전류를 공급하는 z축 상쇄 전원(171b), 상기 제1 평면에 수직한 y축 상쇄 자기장을 생성하는 y축 상쇄 코일(172c), 및 상기 y축 상쇄 코일에 직류 전류를 공급하는 z축 상쇄 전원(171c)을 포함할 수 있다.
- [0103] 상기 자기장 상쇄부(170)는 상기 감지부(130)의 출력신호(Vout)를 입력으로 제공받아 제1 기준 주파수 성분(f1 AM)을 추출하여 출력하는 x축 록인 증폭기(173a), 상기 감지부(130)의 출력신호(Vout)를 입력으로 제공받아 제2 기준 주파수 성분(f2 AM)을 추출하여 출력하는 z축 록인 증폭기(173b), 및 상기 감지부(130)의 출력신호를 입력으로 제공받아 DC 성분을 추출하는 저주파 통과 필터(174) 중에서 적어도 하나를 더 포함할 수 있다.
- [0104] 상기 x축 록인 증폭기(173a)는 제1 기준 주파수 신호(f1 REF)를 상기 x축 상쇄 전원(171a)에 제공할 수 있다. 상기 z축 록인 증폭기(173b)는 상기 제2 기준 주파수 신호(f1 REF)를 상기 z축 상쇄 전원(171b)에 제공할 수 있다.
- [0105] 상기 x축 상쇄 전원부(171a)는 상기 x축 록인 증폭기(173a)의 제1 기준 주파수 신호(f1 REF) 및 상기 z축 록인 증폭기(173b)의 제2 기준 주파수 성분(f2 AM)을 제공받아 상기 제1 기준 주파수 신호(f1 REF)로 변조하여 출력할 수 있다.
- [0106] 상기 z축 상쇄 전원부(171b)는 상기 z축 록인 증폭기(173b)의 제2 기준 주파수 신호(f2 REF) 및 상기 x축 록인 증폭기(173a)의 제1 기준 주파수 성분(f1 AM)을 제공받아 상기 제2 기준 주파수 신호(f2 REF)로 변조하여 출력할 수 있다.
- [0107] 이 경우, 상기 x축 록인 증폭기(173a)의 제1 기준 주파수 성분(f1 AM)은 z 축 잔류 자기장 성분에 비례하고, 상

기 z축 록인 증폭기(173b)의 제2 기준 주파수 성분(f2 AM)은 x축 잔류 자기장 성분(173a)에 비례할 수 있다.

- [0108] 저주파 통과 필터(174)는 상기 감지부(130)의 출력신호(Vout)를 입력으로 제공받아 DC 성분을 추출할 수 있다. 상기 감지부(130)의 출력신호의 DC 성분은 y축 잔류 자기장에 비례할 수 있다. 이에 따라, 상기 y축 잔류 자기장을 상쇄하기 위하여, 상기 감지부(130)의 출력신호의 DC 성분은 상기 y축 상쇄 전원부(171c)에 제공될 수 있다. 상기 y축 상쇄 전원부(171c)는 입력 신호에 비례하는 직류 전류를 출력하여 y축 잔류 자기장을 상쇄할 수 있다.
- [0109] 측정 대상(20)이 발생시키는 측정 자기장(Bmeas)을 측정하기 전에, 상기 y축 잔류 자기장, x축 잔류 자기장, 및 z축 잔류 자기장을 상쇄하도록, 상기 y축 상쇄 전원의 DC 전류(Y DC), 상기 x축 상쇄 전원의 DC 전류(X DC), 및 상기 z축 상쇄 전원의 DC 전류(Z DC)는 설정될 수 있다.
- [0110] 상기 x축 상쇄 코일(171a)은 x축 헬름홀츠 코일일 수 있다. 상기 x축 상쇄 코일(171a)은 x축 방향으로 서로 이격되어 배치된 x축 방향의 자기장 성분을 생성할 수 있다. 상기 y축 상쇄 코일(171c)은 y축 헬름홀츠 코일일 수 있다. 상기 y축 상쇄 코일은 y축 방향으로 서로 이격되어 배치된 y축 방향의 자기장 성분을 생성할 수 있다. 또한, 상기 z축 상쇄 코일(171b)은 z축 헬름홀츠 코일일 수 있다. 상기 z축 상쇄 코일(171b)은 z축 방향으로 서로 이격되어 배치된 z축 방향의 자기장 성분을 생성할 수 있다.
- [0111] 또한, 상기 되먹임 코일(122)은 y축 방향으로 이격되어 배치된 헬름홀츠 코일일 수 있다. 코일 시스템은 3축 헬름홀츠 코일(3-axial Helmholtz coils)로 구성될 수 있다. 상기 코일 시스템은 두 쌍의 y축 코일(y축 상쇄 코일 및 되먹임 코일), 한 쌍의 x축 코일(x축 상쇄 코일), 및 한 쌍의 z축 코일(z축 코일)을 포함한다. 또한, 하나의 원형 코일(시험 코일)은 y축에 배치된다.
- [0112] 상기 자기장 상쇄부(170)는 3축 헬름홀츠 코일(3-axial Helmholtz coils)을 포함하고, 서로 수직인 대칭축(symmetry axes)을 가지고 원형 프레임에 감길 수 있다. 상기 3축 헬름홀츠 코일은 자기 차폐부(240) 내에서 잔류 자기장(residual magnetic fields)을 제거하기 위하여 사용될 수 있다. 상기 자기장 상쇄부(170)는 능동적으로 외부 환경 자기장 또는 잔류 자기장을 상쇄하여 영(zero) 자기장을 생성할 수 있다. 이에 따라, SURF 원자 자력계의 동작 환경이 조성된다.
- [0113] 영(zero) 자기장을 생성하기 위하여 측정 대상(20)의 측정 전에 상기 자기장 상쇄부(170)는 교정된다. 상기 측정 대상(20)으로부터의 측정 자기장(Bmeas)을 측정하는 경우, y축 상쇄 전원(171c)의 출력 전류는 y축 정잔류 자기장(y축 static residual magnetic field)을 상쇄하기 위하여 일정한 값으로 고정된다. 또한, x축 상쇄 전원(171a)의 출력 전류는 x축 정잔류 자기장을 상쇄하기 위하여 일정한 값으로 고정된다. 또한, z축 상쇄 전원(171b)의 출력 전류는 z축 정잔류 자기장을 상쇄하기 위하여 일정한 값으로 고정된다. 이에 따라, 영 자기장의 유지된 상태에서, 측정 대상이 발생시킨 측정 자기장(Bmeas)만이 측정된다.
- [0114] 영(zero) 자기장을 생성하기 위하여 상기 y축 상쇄 코일에 흐르는 y축 상쇄 전류(Y DC), x축 상쇄 코일에 흐르는 x축 상쇄 전류(X DC), 및 z축 상쇄 전류(Z DC)는 측정될 수 있다. 따라서, 역으로, 상기 y축 상쇄 전류(Z DC), x축 상쇄 전류(X DC), 및 z축 상쇄 전류(Z DC)는 각각의 상쇄 자기장 성분을 제공할 수 있다.
- [0115] 측정 대상의 측정 자기장을 측정하는 동안에는, 상기 y축 상쇄 전류(Y DC), x축 상쇄 전류(X DC), 및 z축 상쇄 전류(Z DC)는 각각의 상쇄 자기장 성분이 상기 증기 셀에 제공되어 잔류 자기장을 영으로 만든다.
- [0116] 상기 펌프 광원(190)은 펌프 레이저(181), 상기 펌프 레이저(181)의 펌프 빔을 가이드하는 광섬유(182), 1/4 파장판(183), 및 한 쌍의 볼록 렌즈(184,185)를 포함할 수 있다. 상기 펌프 레이저(181)의 출력광은 상기 광섬유(182)를 통하여 가이드될 수 있다. 상기 광섬유(182)의 출력광은 선편광 상태일 수 있다. 상기 선편광 상태의 펌프 빔은 1/4 파장판(183)에 제공되어 원형 편광으로 변환될 수 있다. 상기 1/4 파장판(183)은 선형 편광을 원형 편광으로 변경할 수 있다. 상기 원형 편광된 펌프 빔은 한 쌍의 볼록 렌즈(184,185)를 통하여 빔의 사이즈가 확대될 수 있다. 확대된 펌프 빔은 x축 방향으로 상기 증기 셀(110)에 제공된다.
- [0117] 상기 조사 광원(190)은 조사 레이저(191), 상기 조사 레이저의 조사 빔을 가이드하는 광섬유(182), 및 1/2 파장판(193)을 포함할 수 있다. 상기 광섬유(192)를 통과한 조사 빔은 선편광일 수 있다. 상기 1/2 파장판(193)은 선편광의 방향을 변경할 수 있다. 상기 1/2 파장판(193)을 통과한 조사 빔은 z축 방향으로 상기 증기 셀(110)에 제공될 수 있다.
- [0118] 상기 감지부(130)는 편광 빔 분할기(131), 제1 포토 다이오드(132), 제2 포토 다이오드(133), 및 차동 증폭기(134)를 포함할 수 있다. 상기 편광 빔 분할기(131)는 편광 상태에 따라 빔을 분리하는 윌라스톤 프리즘

(Wollaston prism)일 수 있다. 상기 편광 빔 분할기(131)는 편광 상태에 따라 조사 빔을 분리할 수 있다. 제1 포토 다이오드(132)는 분할된 제1 조사 빔의 강도를 측정하고, 상기 제2 포토 다이오드(133)는 분할된 제2 조사 빔의 강도를 측정할 수 있다. 상기 차동 증폭기(134)는 상기 제1 포토 다이오드(132)의 출력과 상기 제2 포토 다이오드(133) 출력의 차이를 증폭하여 출력할 수 있다. 조사 빔의 편광 회전각은 상기 차동 증폭기(134)의 출력에 의존할 수 있다.

- [0119] 되먹임 코일(122)은 y축 방향의 줄임 되먹임 자기장(B_{fb})을 생성할 수 있다. 상기 되먹임 코일(122)은 y축 방향으로 이격된 헬름홀츠 코일일 수 있다. 상기 되먹임 코일(122)은 상기 y축 상쇄 코일(171c)의 안쪽에 배치될 수 있다.
- [0120] 시험 코일(152)은 상기 되먹임 코일(122)의 내부에 배치되어 y축 시험 자기장을 생성할 수 있다. 상기 시험 코일(152)은 측정 대상(20)이 생성하는 자기장을 대신하여 임의의 파형을 생성할 수 있다. 상기 시험 코일(152)은 상기 원자 자력계를 시험 또는 교정하기 위하여 장착될 수 있다. 상기 시험 코일(152)은 원형 코일일 수 있다.
- [0121] SERF 방법에서는 높은 원자 밀도를 요구한다. 따라서 포타슘 증기의 적정 온도는 섭씨 200도이며, 이를 위한 가열부 및 단열부를 구성하였다. 가열 방법은 열선을 이용한 옴믹(Ohmic) 가열 방법을 이용하여 저항체에 전류를 인가하여 온도를 조절하였다. 또한 교류 전류에 의한 유도 자기장이 포타슘 원자의 상태에 영향을 주는 것을 피하기 위해 5 kHz 내지 30 kHz의 고주파로 변조되는 전류를 인가하였다. 즉, 상기 줄임 되먹임 SERF 원자 자력계의 컷-오프 주파수(cut-off frequency) f_c 는 수백 Hz이므로, 5 kHz 내지 30 kHz의 고주파 가열 전류는 상기 줄임 되먹임 SERF 원자 자력계에 영향을 거의 주지 않는다.
- [0122] 상기 가열부(260)는 하부면에 관통홀(265b) 및 측면에 투명 창(265a)을 포함하고 상기 메인 셀(112)의 주위를 감싸도록 배치된 제1 가열 블록(265), 상기 제1 가열 블록(265)의 외주면을 감싸도록 배치된 제1 가열 코일(162), 상기 제1 가열 블록(265)의 상기 관통홀(265b)과 정렬되어 상기 스템 셀(114)의 주위를 감싸도록 배치된 제2 가열 블록(268), 상기 제2 가열 블록(268)을 감싸도록 배치된 제2 가열 코일(164), 상기 제1 가열블록(265)을 수납하는 단열 블록(267)을 포함할 수 있다. 상기 메인 셀(112)은 상기 제1 가열 블록(265)의 상기 투명 창(265a)과 정렬될 수 있다. 상기 투명 창(265a)은 유리 재질일 수 있다.
- [0123] 상기 가열부(260)는 제1 가열 코일(162), 제2 가열 코일(164), 온도 측정부(167), 오디오 증폭기(163,165), 및 온도 제어부(166)를 포함할 수 있다. 상기 온도 측정부(167)는 열전대(thermocouple)를 포함할 수 있다. 상기 온도 측정부(167)는 상기 제1 가열블록의 측면의 온도 및 상기 제2 가열 블록의 측면의 온도를 측정할 수 있다. 상기 온도 측정부(167)는 측정된 온도 신호를 상기 온도 제어부(166)에 제공할 수 있다. 상기 온도 제어부(166)는 설정된 온도를 유지하기 위하여 PID 제어를 수행할 수 있다. 상기 오디오 증폭기(163,165)는 각각 제1 가열 코일(162), 제2 가열 코일(164)을 구동할 수 있다. 상기 제1 가열 코일 및 상기 제2 가열 코일에 흐르는 전류는 상기 PID 제어에 의하여 조절될 수 있다.
- [0124] 상기 온도 제어부(166)는 사인파를 출력하는 함수 발생기, 약1.5 kHz의 차단 주파수를 가지는 고주파 통과필터, 아날로그 배율기(analog mutiplier), 및 PID 제어부를 포함할 수 있다. 상기 함수 발생기는 5 kHz 내지 30 kHz의 사인파를 출력할 수 있다. 상기 고주파 통과 필터는 상기 함수 발생기의 출력 신호를 제공받아 저주파 성분을 제거할 수 있다. 상기 아날로그 배율기는 상기 함수 발생기의 사인파와 상기 PID 제어부가 제공하는 캐리어 입력 신호(carrier input signal)를 곱하여 출력할 수 있다. 상기 아날로그 배율기의 출력신호는 상기 오디오 증폭기(163,165)에 의하여 증폭되어 상기 제1 가열 코일(162) 또는 상기 제2 가열 코일(164)에 제공될 수 있다.
- [0125] 제1 가열 블록(265)은 4각판 형상의 베이스부(265d) 상에 적층된 사각통 형태일 수 있다. 상기 제1 가열 블록(265)은 뚜껑(265c)을 포함할 수 있다. 상기 사각통의 4 상부 측면은 모두 모서리 부위를 제외하고 제거될 수 있다. 제거된 부위에는 투명 창(265a)이 배치될 수 있다. 상기 조사 빔 또는 상기 펌프 빔은 상기 투명 창(265a)을 투과할 수 있다. 상기 제1 가열 블록(265)의 내부에는 증기 셀(110)이 배치될 수 있다. 상기 제1 가열 블록(265)은 세라믹 재질일 수 있다. 상기 메인 셀(112)의 하부면의 높이는 상기 제1 가열블록(265)의 하부면의 높이보다 높을 수 있다.
- [0126] 상기 제1 가열 코일(162)은 육면체 형상의 메인 셀(112)을 섭씨 200도를 가열할 수 있다. 상기 제1 가열 코일(162)은 5 kHz 내지 30 kHz의 교류 전류가 흐르는 열선일 수 있다.
- [0127] 제2 가열 블록(268)은 상기 메인 셀의 하부면에서 연장되는 스템 셀(114)을 가열할 수 있다. 상기 제2 가열 블록(268)은 원통 형상일 수 있다. 상기 스템 셀(114)은 원통 형상의 제2 가열 블록(268) 내부에 배치될 수 있다.

상기 제2 가열 블록(268)은 세라믹 재질일 수 있다.

- [0128] 상기 제2 가열 코일(164)은 상기 제2 가열 블록(268)을 감싸도록 배치될 수 있다. 상기 제2 가열 코일(164)은 상기 스템 셀(114)을 섭씨 180도로 가열할 수 있다. 상기 제2 가열 코일(164)은 5 kHz 내지 30 kHz의 교류 전류가 흐르는 열선일 수 있다.
- [0129] 상기 단열 블록(267)은 중심에 관통홀(264a), 상기 관통홀(264a)과 정렬된 함몰부(264b), 상기 함몰부(264b) 외곽에 배치된 돌출부(264c), 및 상기 돌출부(264c)의 상부면에 형성된 상부 정렬 트렌치(264d)를 포함하는 중심 단열 블록(264), 상기 돌출부(264c)의 상부 정렬 트렌치(264d)에 삽입되고 측면에 형성된 관통홀(266a)을 포함하는 상부 단열 블록(266), 및 상기 돌출부(264c)의 하부면에 형성된 하부 정렬 트렌치(264e)에 삽입되는 하부 단열 블록(263)을 할 수 있다. 상기 단열 블록(267)은 폴리테트라 플루오로에틸렌 (Polytetrafluoroethylene; PTFE) 재질일 수 있다.
- [0130] 상기 중심 단열 블록(264)은 바닥면에 관통홀(264a)을 가지는 사각통 형상일 수 있다. 상기 중심 단열 블록(264)의 상부면 및 하부면에서는 각각 상부 정렬 트렌치(264d)와 하부 정렬 트렌치(264e)가 형성될 수 있다. 상기 상부 단열 블록(266)은 상기 상부 정렬 트렌치(264d)에 삽입되어 정렬될 수 있다. 또한, 상기 하부 단열 블록(264)은 상기 하부 정렬 트렌치(264e)에 삽입되어 정렬될 수 있다.
- [0131] 상기 상부 단열 블록(266)은 닫힌 상부면을 가진 사각통 형상일 수 있다. 상기 상부 단열 블록(266)의 4 측면에서 각각 관통홀(266a)이 형성될 수 있다. 상기 펌프 빔 또는 상기 조사 빔은 상기 관통홀(266a)을 통과할 수 있다. 상기 하부 단열 블록(263)은 사각통 형상일 수 있다. 상기 중심 단열 블록(264)의 함몰부(264b)는 상기 제1 가열 블록(265)의 하부면과 끼움 결합할 수 있다.
- [0132] 지지 블록(261)의 상부면은 상기 하부 단열 블록(263)의 상부면과 끼움 결합할 수 있다. 또한, 상기 지지 블록(261)의 상부면은 외부 단열 블록(262)의 하부면과 끼움결합할 수 있다. 외부 단열 블록(262)은 상기 단열 블록(267)을 감싸도록 배치될 수 있다. 상기 지지 블록(261)은 4 개의 다리를 가진 의자 형상일 수 있다.
- [0133] 상기 외부 단열 블록(262)은 외측면 및 상부면에 냉매가 흐를 수 있는 유체 통로를 형성하는 구불구불한 트렌치(262a, 262b)가 형성될 수 있다. 상기 외부 단열 블록(262)은 상기 단열 블록(267)을 감싸도록 배치될 수 있다. 상기 트렌치(262a, 262b)는 외부 단열판에 의하여 냉매 통로를 제공할 수 있다. 상기 외부 단열 블록의 4 측면에는 서로 마주 보는 관통홀(262c)이 형성될 수 있다. 상기 관통홀(262c)을 통하여 펌프 빔 또는 조사 빔이 통과할 수 있다.
- [0134] 본 발명의 일 실시예에 따른 원자 자력계는 육면체 형상의 메인 셀과 상기 메인 셀에 연결된 원통 형상의 스템 셀을 포함하고, 원형 편광된 펌프 빔과 선형 편광된 조사 빔을 제공받고 알칼리 메탈 증기를 포함하는 증기 셀; 상기 증기 셀을 투과한 상기 선형 편광된 조사 빔을 제공받아 상기 조사 빔의 편광 상태를 측정하는 감지부; 및 열선에 5 kHz 내지 30 kHz의 교류를 인가하여 상기 증기 셀을 가열하는 가열부를 포함한다. 측정 대상의 상기 측정 자기장은 상기 증기 셀에서 상기 조사 빔의 광자기 회전을 제공한다.
- [0135] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 증기 셀은 알칼리 메탈 증기로써 포타슘 (potassium; K), 헬륨 버퍼 가스, 및 질소 가스를 포함하는 메인 셀; 및 상기 알칼리 메탈 증기의 흡착을 방지하는 스템 셀을 포함할 수 있다.
- [0136] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 열선에 5 kHz 내지 30 kHz의 교류를 인가하여 상기 증기 셀의 메인 셀을 섭씨 200 도로 가열하는 제1 가열부; 및 열선에 5 kHz 내지 30 kHz의 교류를 인가하여 상기 스템 셀을 섭씨 185도로 가열하는 제2 가열부를 더 포함할 수 있다.
- [0137] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 가열부는 하부면에 관통홀 및 측면에 투명 창을 포함하고 상기 메인 셀의 주위를 감싸도록 배치된 제1 가열 블록; 상기 제1 가열 블록의 외주면을 감싸도록 배치된 제1 가열 코일; 상기 제1 가열 블록의 상기 관통홀과 정렬되어 상기 스템 셀의 주위를 감싸도록 배치된 제2 가열 블록; 상기 제2 가열 블록을 감싸도록 배치된 제2 가열 코일; 및 상기 제1 가열 블록상기 제1 가열블록을 수납하는 단열 블록을 포함할 수 있다. 상기 메인 셀은 상기 제1 가열 블록의 상기 투명 창과 정렬될 수 있다.
- [0138] 미소 자기장 측정 장치로서의 응용에 있어서, 편광 회전각의 측정 능력은 매우 중요하다.
- [0139] 도 11은 본 발명의 일 실시예에 따른 편광 회전각의 측정 방법을 설명하는 도면이다.
- [0140] 도 11을 참조하면, 상기 원자 자력계(400)의 편광 회전각을 측정하기 위하여, 감지부(130)로서 균형 편광계

(balanced polarimeter)가 사용된다. 원자 자력계(400)는 원형 편광된 펄스 빔과 선형 편광된 조사 빔을 제공받고 알칼리 메탈 증기를 포함하는 증기 셀(110), 상기 증기 셀을 투과한 상기 조사 빔을 제공받아 상기 조사 빔의 광자기 회전을 측정하는 감지부(130), 상기 조사 빔과 상기 펄스 빔의 진행 방향에 의하여 정의되는 제1 평면에 수직한 줄임 되먹임 자기장 신호를 생성하여 상기 증기 셀에 제공하는 되먹임 코일(122), 및 상기 감지부의 출력 신호를 제공받아 측정 자기장에 비례하는 상기 줄임 되먹임 자기장을 생성하도록 상기 되먹임 코일에 되먹임 전류를 제공하는 되먹임 증폭부(124)를 포함한다. 측정 대상의 상기 측정 자기장은 상기 증기 셀에서 상기 조사 빔의 광자기 회전을 제공한다.

[0141] 상기 감지부(130)는 편광 빔 분할기(131), 제1 포토 다이오드(132), 제2 포토 다이오드(133), 및 차동 증폭기(134)를 포함할 수 있다.

[0142] 상기 편광 빔 분할기(131)는 조사 빔의 초기 편광 방향에 대하여 45도로 기울어지도록 배치된다. 상기 편광 빔 분할기(131)를 통과한 광은 2 개의 빔(I₁, I₂)으로 다음과 같이 분리된다.

수학식 4

$$I_1 = I_0 \sin^2\left(\theta - \frac{\pi}{4}\right)$$

$$I_2 = I_0 \cos^2\left(\theta - \frac{\pi}{4}\right)$$

[0143]

[0144] 여기서, I₁ + I₂ = I₀ 이고, θ는 상기 편광 회전각이다. 작은 편광 회전각의 경우 (θ << 1), 편광 회전각은 두 광의 세기 차이로 주어질 수 있다.

수학식 5

$$\theta \approx \frac{(I_1 - I_2)}{2(I_1 + I_2)}$$

[0145]

[0146] 제1 포토다이오드(132)의 출력과 제2 포토 다이오드(133)의 출력은 차동 증폭기(133)에 제공된다. 이에 따라, 상기 차동 증폭기(134)의 출력은 편광 회전각에 비례할 수 있다.

[0147] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 줄임 되먹임을 위하여, 상기 차동 증폭기(134)의 출력은 되먹임 증폭기(124)에 제공되어 증폭된다. 되먹임 증폭기(124)는 오디오 증폭기일 수 있다. 상기 증폭된 오디오 증폭기의 출력 전류는 상기 되먹임 코일(122)에 제공된다. 상기 되먹임 코일에 흐르는 전류는 줄임 되먹임 자기장을 생성한다. 상기 줄임 되먹임 자기장은 상기 측정 대상의 측정 자기장과 반대 방향이다.

[0148] 본 발명의 일 실시예에 따른 원자 자력계의 동작 방법은 측정 대상(20)이 생성한 측정 자기장 하에서 원형 편광된 펄스 빔과 선형 편광된 조사 빔을 알칼리 메탈 증기를 포함하는 증기 셀(110)에 제공하는 단계, 상기 증기 셀(110)을 투과한 상기 선형 편광된 조사 빔으로부터 상기 조사 빔의 편광 상태에 따라 감지부(130)를 이용하여 편광 회전 신호를 검출하는 단계; 및 상기 편광 회전 신호를 증폭하여 상기 측정 자기장과 반대 방향의 줄임 되먹임 자기장을 생성하여 상기 증기 셀(110)에 제공하는 단계를 포함한다.

[0149] 상기 편광 회전 신호를 검출하는 단계는 상기 증기 셀을 투과한 조사 빔을 서로 편광 방향이 다른 제1 편광 빔과 제2 편광 빔으로 분할하는 단계, 상기 제1 편광 빔의 세기를 측정하고 상기 제2 편광 빔의 세기를 측정하는 단계, 및 상기 제1 편광 빔의 제1 측정 신호와 상기 제2 편광 빔의 제2 측정 신호의 차이를 이용하여 편광 회전 각 신호를 추출하는 단계를 포함할 수 있다.

[0150] 원자 자력계의 동작 방법은 상기 측정 대상(20)이 제거된 상태에서 상기 증기 셀(110)에 영향을 미치는 외부 환

경 자기장을 제거하도록 상쇄 자기장을 생성하는 단계를 더 포함할 수 있다. 상쇄 자기장은 펌프 빔과 조사 빔이 진행되는 제1 평면에 수직인 y축 상쇄 자기장, 및 상기 제1 평면에 나란한 x축 상쇄 자기장, 및 상기 x축 상쇄 자기장에 수직인 z축 상쇄 자기장을 포함할 수 있다. 상기 y축 상쇄 자기장은 상기 외부 환경 자기장 하에서 상기 편광 회전각이 영이 되도록 y축 DC 값으로 설정될 수 있다. 상기 x축 상쇄 자기장은 상기 외부 환경 자기장 하에서 상기 편광 회전각이 영이 되도록 x축 DC 값으로 설정될 수 있다. 상기 z축 상쇄 자기장은 상기 외부 환경 자기장 하에서 상기 편광 회전각이 영이 되도록 z축 DC 값으로 설정될 수 있다.

[0151] 도 12는 본 발명의 다른 실시예에 따른 편광 회전각의 측정 방법을 설명하는 도면이다.

[0152] 도 12를 참조하면, 원자 자력계(500)는 원형 편광된 펌프 빔과 선형 편광된 조사 빔을 제공받고 알칼리 메탈 증기를 포함하는 증기 셀(110), 상기 증기 셀을 투과한 상기 조사 빔을 제공받아 상기 조사 빔의 광자기 회전을 측정하는 감지부(533), 상기 조사 빔과 상기 펌프 빔의 진행 방향에 의하여 정의되는 상기 제1 평면에 수직인 줄임 되먹임 자기장 신호를 생성하여 상기 증기 셀에 제공하는 되먹임 코일(122), 및 상기 감지부의 출력 신호를 제공받아 측정 자기장에 비례하는 상기 줄임 되먹임 자기장을 생성하도록 상기 되먹임 코일(122)에 되먹임 전류를 제공하는 되먹임 증폭부(124)를 포함한다. 측정 대상의 상기 측정 자기장은 상기 증기 셀(110)에서 상기 조사 빔의 광자기 회전을 제공한다.

[0153] 상기 원자 자력계(500)는 상기 펌프 빔을 제공하는 펌프 광원(180), 상기 조사 빔을 제공하는 조사 광원(190), 상기 조사 광원(190)과 상기 증기 셀(110) 사이에 배치되어 상기 조사 빔의 편광 회전각을 소정의 변조 주파수로 변조하는 변조부(532), 및 상기 변조 주파수의 기준 변조 주파수 신호를 상기 변조부(532)에 제공하고 상기 감지부(533)의 출력 신호를 제공받아 상기 변조 주파수 성분 또는 그 고조파 성분을 추출하는 록인 증폭기(531)를 더 포함할 수 있다.

[0154] 상기 증기 셀(110) 앞에 상기 변조부(532)가 배치된다. 상기 변조부는 패러데이 변조기일 수 있다. 또한, 상기 패러데이 변조기(532)는 조사 빔을 편광 변조하여 상기 증기 셀(110)에 제공하고, 편광 변조된 조사 빔은 원자의 상호작용을 한다.

[0155] 수 kHz의 변조 각주파수(ω_{mod})로 진동하는 자기장은 패러데이 회전 효과에 의하여 조사광의 편광 방향을 매우 작은 각도로 변조할 수 있다. 이후, 변조된 광은 상기 증기 셀(110)을 통과하면서 의 각도 만큼 광자기 회전을 한다. 이렇게 회전한 광은 초기 광의 편광 방향에 대하여 90도로 설치된 선형 편광자(534)를 통과한다. 이 때 상기 선형 편광자(534)를 통과한 빛은 감지부에 의하여 측정된다. 상기 선형 편광자(534)를 통과한 빛의 세기는 다음과 같이 주어진다.

수학식 6

$$I = I_0 \sin^2(\theta + \alpha \sin(\omega_{mod} t))$$

$$\approx I_0 [\theta + 2\theta\alpha \sin(\omega_{mod} t) + \alpha^2 \sin^2(\omega_{mod} t)]$$

[0156]

[0157] I_0 는 상기 증기 셀(110)을 투과한 빛의 세기이다. 변조 각주파수 ω_{mod} 에서 검출된 빛의 푸리에 성분은 광 회전각 θ 에 비례한다. α 는 변조 진폭이다. 상기 감지부의 출력 신호에서 상기 각주파수 ω_{mod} 성분은 록인 증폭기를 통하여 검출된다.

수학식 7

$$I_{\omega_{\text{mod}}} \approx 2I_0 \theta \alpha$$

- [0158]
- [0159] 상기 록인 증폭기(531)는 변조 각주파수 ω_{mod} 의 기준 주파수 신호(REF)를 출력하여 상기 파라데이 변조부의 변조 신호로 제공될 수 있다.
- [0160] 상기 감지부(533)는 포토다이오드일 수 있다. 상기 감지부(533)의 출력은 상기 록인 증폭기(531)의 입력으로 제공될 수 있다.
- [0161] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 줄임 되먹임을 위하여, 상기 감지부(533)의 출력은 되먹임 증폭기(124)에 제공되어 증폭된다. 상기 증폭된 상기 되먹임 증폭기(124)의 출력 전류는 상기 되먹임 코일(122)에 제공된다. 상기 되먹임 코일(124)에 흐르는 전류는 줄임 되먹임 자기장을 생성한다. 상기 줄임 되먹임 자기장은 상기 측정 대상의 측정 자기장과 반대 방향이다.
- [0162] 본 발명의 일 실시예에 따른 원자 자력계의 동작 방법은 측정 대상이 생성한 측정 자기장 하에서 원형 편광된 펌프 빔과 선형 편광된 조사 빔을 알칼리 메탈 증기를 포함하는 증기 셀(110)에 제공하는 단계; 상기 증기 셀을 투과한 상기 선형 편광된 조사 빔으로부터 상기 조사 빔의 편광 상태에 따라 감지부(533)를 이용하여 편광 회전 신호를 검출하는 단계; 및 상기 편광 회전 신호를 증폭하여 상기 측정 자기장과 반대 방향의 줄임 되먹임 자기장을 생성하여 상기 증기 셀에 제공하는 단계를 포함한다.
- [0163] 상기 편광 회전 신호를 검출하는 단계는 상기 증기 셀(110) 전단에서 상기 조사 빔의 편광 회전각을 소정의 변조 주파수로 변조하는 단계, 상기 증기 셀 (110) 및 선형 편광자(534)를 투과시켜 초기 편광 상태에서 90도 회전한 조사 빔의 세기를 측정하는 단계, 및 상기 측정된 조사 빔의 세기에서 변조 주파수 성분 또는 그 고조파 성분으로 상기 조사 빔의 편광 회전각을 추출하는 단계를 포함한다.
- [0164] 도 13은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 편광 회전각의 측정 방법을 설명하는 도면이다.
- [0165] 도 13을 참조하면, 원자 자력계(600)는 원형 편광된 펌프 빔과 선형 편광된 조사 빔을 제공받고 알칼리 메탈 증기를 포함하는 증기 셀(110), 상기 증기 셀을 투과한 상기 조사 빔을 제공받아 상기 조사 빔의 광자기 회전을 측정하는 감지부(633), 상기 조사 빔과 상기 펌프 빔의 진행 방향에 의하여 정의되는 제1 평면에 수직한 줄임 되먹임 자기장 신호를 생성하여 상기 증기 셀에 제공하는 되먹임 코일(122), 및 상기 감지부(633)의 출력 신호를 제공받아 측정 자기장에 비례하는 상기 줄임 되먹임 자기장을 생성하도록 상기 되먹임 코일에 되먹임 전류를 제공하는 되먹임 증폭부(124)를 포함한다. 측정 대상(20)의 상기 측정 자기장은 상기 증기 셀에서 상기 조사 빔의 광자기 회전을 제공한다.
- [0166] 상기 원자 자력계(600)는 상기 펌프 빔을 제공하는 펌프 광원(180), 상기 조사 빔을 제공하는 조사 광원(190), 상기 감지부(633)과 상기 증기 셀(110) 사이에 배치되어 상기 조사 빔의 편광 회전각을 소정의 변조 주파수로 변조하는 변조부(632), 및 상기 변조 주파수의 기준 변조 신호(REF)를 상기 변조부(632)에 제공하고 상기 감지부(633)의 출력 신호를 제공받아 상기 변조 주파수 성분 또는 그 고조파 성분을 추출하는 록인 증폭(631)를 더 포함할 수 있다.
- [0167] 상기 원자 자력계의 편광 회전각을 측정하기 위하여, 상기 변조부(632)로 광탄성 변조기(photoelastic modulator)가 사용된다. 선형 편광된 조사 빔은 증기 셀(110)을 통과 후 1/4 파장판(635)을 지나 광탄성 변조기(photoelastic modulator)를 통과한다. 상기 조사 빔은 상기 광탄성 변조기의 복굴절로 인해 변조 각주파수 ω_{mod} 로 진동한다. 이 경우, 상기 변조 각주파수 ω_{mod} 는 일반적으로 10~100 kHz 이다. 상기 1/4 파장판(635)의 광축은 상기 조사 빔의 초기 편광에 평행하게 배치되고, 상기 광탄성 변조기의 광축은 45도로 고정되어 있다.
- [0168] 만약 상기 증기 셀(110)을 통과한 빛이 광 회전되지 않는다면 상기 조사 빔의 편광은 소정의 진폭으로 대칭적으로 변조된다. 그러나, 광회전이 있다면, 우원형 편광과 좌원형 편광의 흡수 차이에 의해 빛의 편광은 비대칭적으로 변조된다.
- [0169] 이 빛이 초기의 조사 빔의 편광 방향에 대해 90도로 고정된 선형 편광자(634)를 통과하면, 빛의 세기는 다음과

같이 주어진다.

수학식 8

$$I = I_0 \sin^2(\theta + \alpha \sin(\omega_{\text{mod}}))$$

[0170]

[0171]

I_0 는 증기 셀(110)을 투과한 빛의 세기이다. ω_{mod} 는 변조 각주파수 ω_{mod} 이고, α 는 변조 진폭이다. 상기 빛의 세기의 상기 변조 주파수 성분(일차 조화 신호)는 회전각 θ 에 비례하고 다음과 같이 주어진다.

수학식 9

$$I_{\omega_{\text{mod}}} \approx 2I_0 \theta \alpha$$

[0172]

[0173]

상기 록인 증폭기(631)는 상기 빛의 세기의 상기 변조 주파수 성분(일차 조화 신호)을 추출할 수 있다. 상기 록인 증폭기(631)는 변조 각주파수 ω_{mod} 의 기준 변조 신호(REF)를 출력하여 상기 변조부(632)에 제공할 수 있다.

[0174]

본 발명의 일 실시예에 따른 원자 자력계의 동작 방법은 측정 대상이 생성한 측정 자기장 하에서 원형 편광된 펌프 빔과 선형 편광된 조사 빔을 알칼리 메탈 증기를 포함하는 증기 셀(110)에 제공하는 단계, 상기 증기 셀(110)을 투과한 상기 선형 편광된 조사 빔으로부터 상기 조사 빔의 편광 상태에 따라 감지부(633)를 이용하여 편광 회전 신호를 검출하는 단계, 및 상기 편광 회전 신호를 증폭하여 상기 측정 자기장과 반대 방향의 줄임 되먹임 자기장을 생성하여 상기 증기 셀(110)에 제공하는 단계를 포함한다.

[0175]

상기 편광 회전 신호를 검출하는 단계는 상기 증기 셀(110) 후단에서 1/4 파장판(635) 및 변조부(632)를 투과시켜 상기 조사 빔의 편광 회전각을 소정의 변조 주파수로 변조하는 단계, 선형 편광자(634)를 투과시켜 조사 빔의 세기를 측정하는 단계, 및 상기 측정된 조사 빔의 세기에서 변조 주파수 성분 또는 그 고조파 성분으로 상기 조사 빔의 편광 회전각을 추출하는 단계를 포함할 수 있다.

[0176]

도 14는 SERF 영역에서 시험 자기장 B_y 의 함수에 따른 광자기 회전 신호를 나타내는 도면이다.

[0177]

도 14를 참조하면, 상기 광자기 회전 신호는 균형 편광계(balanced polarimeter)를 사용하는 경우 광 회전각에 비례할 수 있다. 실선은 블록 방정식(Block equation)의 정상 상태 해(steady state solution)에 의하여 주어지는 이론적 결과이다. 원형은 측정 결과를 나타낸다.

[0178]

도 15는 도 5의 원자 자력계의 주파수 응답을 나타낸다.

[0179]

도 15를 참조하면, 상기 원자 자력계(200)는 가상의 증폭기로 가정할 수 있고, 상기 가상의 증폭기의 이득(G)에 따라, 균형 편광계(balanced polarimeter)를 사용하는 경우 주파수 응답이 표시된다.

[0180]

분산 타입(disperse type)의 공명 커브는 수직 자기장 (transverse magnetic field B_y)에 대한 조사 빔의 편광 회전을 나타낸다. 상기 원자 자력계(200)의 민감도는 영 자기장 근처에서 상기 분산 신호의 기울기에 비례한다. 최고의 민감도를 유지하기 위하여, 실험하는 동안 상기 분산 커브 경사(dispersion curve slope)를 최대화하도록 상기 실험 장치의 가변 파라미터를 조절하여 상기 편광 회전 신호의 피크-투-피크 진폭과 스펙트럴 폭이 관측되었다.

[0181]

우리의 실험 조건에서, 펌프 빔과 조사 빔의 레이저 강도는 33 mW/cm^2 , 5 mW/cm^2 로 각각 측정되었다.

[0182]

DC B_y 자기장에서, 신호의 기울기는 G_0 를 결정한다. 측정 결과, G_0 는 0.6 V/nT 이다. 되먹임 이득 파라미터 β 를 추정하기 위하여, 상기 되먹임 코일(122)에 연결된 되먹임 증폭기(124)의 입력으로 350 mVpp의 사인파 전기 신호가 제공된다. 이 경우, 상기 되먹임 코일(122)에 의하여 발생된 되먹임 자기장은 15 Hz에서 1kHz까지 주파수 범위에서 상기 원자 자력계에 의하여 감지되었다. 측정된 감지부의 출력 전압 V_{out} 은 G_0 를 사용하여 자기장으로

변환되었다. 상기 되먹임 증폭기(124)의 전력 대역폭(power bandwidth)은 10 Hz에서 40 kHz의 제한 범위를 가진다. 따라서, 로런츠형 함수로 피팅된 데이터는 영 Hz에서 출력 전압을 얻기 위하여 0 Hz에서 중심 맞춤되었다. 따라서, -25, -15, 및 -8 dB의 상기 가상 증폭기의 이득은 0.5, 0.2, 및 3.5 nT/V로 각각 변환되었다.

- [0183] 도 16은 다중 주파수에 대한 600 pT의 진폭을 가진 입력 진동 자기장에 대한 주파수 응답을 나타내는 도면이다.
- [0184] 도 16을 참조하면, 펄스 빔과 조사 빔의 입사 빔 세기는 각각 33 mV/cm^2 및 5 mW/cm^2 이다. 측정된 데이터는 로런츠형으로 피팅되었다. f_c 는 상기 피팅된 로런츠형의 반치폭(half width at half maximum)을 나타낸다. 상기 반치폭을 상기 단일 폴 증폭기의 컷-오프 주파수(차단 주파수)로 취급할 수 있다. 개방-루프의 경우, f_c 는 72 Hz 이다. 줄임 되먹임을 가진 폐-루프의 경우, f_c 는 195 Hz 까지 증가할 수 있다.
- [0185] 줄임 되먹임 하에서 상기 원자 자력계(200)의 주파수 응답을 조사하기 위하여, 주파수에 따른 개방 루프 신호가 0.5, 0.2, 및 3.5 nT/V의 되먹임 이득 파라미터 β 에 대하여 측정되었다. 측정된 데이터는 로런츠형으로 피팅된다. 이에 따라, f_c 및 $G_{fb}(0)$ 의 산정(estimation)된다.
- [0186] 줄임 되먹임을 사용하지 않는 경우, 50 Hz 이하의 주파수에 대한 데이터는 포토다이오드 출력 포화(photodiode output saturation)에 의하여 측정될 수 없다.
- [0187] $\beta = 3.5 \text{ nT/V}$ 인 경우, 주파수 응답의 커브는 반치폭인 195 Hz 까지 거의 플랫폼이다. 수학적 3에 따르면, f_c 는 $(1 + \beta G_0)$ 팩터로 곱해지고, G_{fb} 은 $(1 + \beta G_0)$ 팩터로 나누어져야 한다. 0.5, 0.2, 및 3.5 nT/V의 β 에 대한, 계산된 f_c 는 각각 93.6, 158, 및 223 Hz로 주어진다.
- [0188] 실험적으로 얻은 차단 주파수 (f_c)는 0.5, 0.2, 및 3.5 nT/V의 β 에 대하여, 각각 80, 110, 및 195 Hz로 주어진다. 그러나, 실험 값(80, 110, 및 195)과 계산값(93.6, 158, 및 223)은 거의 유사하다.
- [0189] 상기 되먹임 시스템의 성능은 측정 신호와 시험 자기장 사이의 상관(correlation)에 의하여 평가될 수 있다. 상기 시험 자기장은 쥐(rat)의 MCG 신호를 모사하도록 시험 코일에 의하여 생성될 수 있다.
- [0190] 도 17a은 주파수 도메인에서 시험 자기장을 나타내고, 도 17b는 도 17a의 시험 자기장 신호를 측정된 시간 도메인에서 측정 신호를 나타내고, 도 17c는 도 17b의 측정 신호를 확대한 그래프이다.
- [0191] 도 17을 참조하면, 시험 자기장은 MCG-모방 신호(MCG-like signal)이다. 상기 시험 자기장은 500 pT의 피크-대-피크 진폭(peak-to-peak amplitude)을 가지고, R 피크들 사이에 0.1 초의 주기를 가진다. 상기 시험 자기장은 다중 주파수 성분(multiple frequency component)으로 구성된다. $\beta = 0$ 인 경우, 개방루프를 형성하고, 낮은 주파수 응답은 왜곡(distortion)을 유발하고, 반치폭보다 높은 주파수는 신호 지연(signal delay)을 유발한다. β 가 3.5 nT/V 까지 증가함에 따라, 신호의 왜곡은 감소하고, 신호 지연은 감소한다.
- [0192] 상기 MCG-모방 신호의 FT (Fourier Transformation) 스펙트럼은 0 Hz 에서 200 Hz 까지의 다중 주파수 성분으로 구성된다.
- [0193] 상기 시험 자기장을 생성하는 시험 코일은 상기 증기 셀로브터 25 mm 떨어져 배치되고, 5 mm의 지름을 가진다. 상기 시험 코일은 원형 코일이고 y 축 방향의 자기장을 생성한다.
- [0194] 상기 시험 코일은 0, 0.5, 1.0, 2.0, 및 3.5 nT/V의 β 에 대하여 시간 영역에서 시험 자기장을 생성한다.
- [0195] 높은 되먹임 이득은 높은 상관 계수(correlation coefficient)를 나타낸다. 높은 상관 계수는 적은 왜곡을 나타낸다.
- [0196] $\beta = 3.5 \text{ nT/V}$ 인 경우, 195 Hz의 대역폭은 전체 스펙트럼의 대략 70 퍼센트를 커버한다. 0.75의 계산된 상관 계수는 확장된 대역폭의 결과로 설명된다.
- [0197] 측정된 신호의 진폭은 자기장의 스케일로 보정(calibration)된다. β 가 증가함에 따라, 반치폭을 초과하여 뒤떨어진(lagging) 신호 때문에 저주파 성분으로부터의 왜곡이 감소하고, 위상 차이가 감소한다.
- [0198] 우리는 시험 자기장과 측정 신호 사이의 선형 상관을 계산하였다. 상기 선형 상관은 측정된 신호에서 왜곡의 정도를 평가할 수 있다. $\beta = 3.5 \text{ nT/V}$ 인 경우, 상관 계수는 왜곡없이 출력의 이상적인 경우에 근접하는 0.76이다.
- [0199] 원자 자력계 시스템의 노이즈 레벨은 확장 팩터 $(1 + \beta G_0)$ 의 상한을 결정하는 중요한 인자이다. 원자 자력계 시스템의 노이즈 레벨이 증가함에 따라, 측정된 신호는 노이즈에 묻힐 것이다. 상기 원자 자력계의 노이즈 레벨을 평가하기 위하여, 작은 진동 자기장(small oscillating magnetic field)의 보정 피크(calibration peaks)를 사

용한다. 총 노이즈는 환경 자기장 노이즈(environmental magnetic noise), 광 시프트 노이즈(light shift noise), 스핀-프로젝션 노이즈(spin-projection noise) 및 포톤-샷 노이즈(photon shot-noise)으로 고려될 수 있다. 상기 환경 자기장 노이즈(environmental magnetic noise) 및 광 시프트 노이즈(light shift noise)는 상기 줄임 되먹임에 의하여 감소될 수 있다.

- [0200] 도 18은 본 발명의 일 실시예에 따른 원자 자력계의 노이즈 스펙트럼을 표시하는 도면이다.
- [0201] 도 18을 참조하면, 줄임 되먹임을 가진 경우와 없는 경우에 대한 노이즈 스펙트랄 밀도(noise spectral density)가 표시된다. $\beta=3.5$ nT/V인 경우, 저주파에서 상기 노이즈 레벨은 줄임 되먹임이 없는 경우에 비하여 감소되었다. 영에서 190 Hz의 범위에서, 우리는 노이즈 레벨을 약 10배 감소시킬 수 있다. 따라서, 줄임 되먹임 구조는 저주파 범위에서 신호대잡음비를 희생하지 않고 측정 대역폭을 넓힐 수 있다.
- [0202] 도 19는 본 발명의 다른 실시예에 따른 원자 자력계를 나타내는 개념도이다.
- [0203] 도 5 및 앞에서 설명한 것과 중복되는 설명은 생략한다.
- [0204] 도 19를 참조하면, 줄임 되먹임은 신호대노이즈비를 감소시키고 넓은 대역폭을 제공함에 따라, 신호의 크기가 작고 빠르게 변화하는 자기장 신호를 측정할 수 있다. 자기장의 감도를 증가시키고 너자도/심자도의 정밀한 측정을 위한 주파수 영역을 확보하기 위해 알칼리 금속 증기가 담겨있는 증기 셀에 줄임 되먹임이 제공된다. 또한, 줄임 되먹임은 신호대노이즈비를 감소시키고 넓은 대역폭을 제공함에 따라, 신호의 크기가 작고 빠르게 변화하는 자기장 신호를 측정할 수 있다. 상기 줄임 되먹임은 펌프 광원의 출력을 조절하여 수행될 수 있다.
- [0205] 구체적으로, 원자 자력계(700)의 주파수 응답 범위를 확장하기 위하여, 펌프광의 광량 줄임 되먹임이 사용될 수 있다. 함할 수 있다. 광량 줄임 되먹임은 조사 빔의 광자기 회전 신호를 펌프 빔에 되먹임할 수 있다.
- [0206] 펌프 빔의 광량을 조절하기 위하여, 펌프 광원(790)은 펌프 빔 광량 변조부(790)를 포함할 수 있다. 상기 펌프 빔 광량 변조부(790)는 펌프 레이저(181)의 출력단에 배치될 수 있다. 상기 펌프 빔 광량 변조부(790)는 전기 광학 변조기 구동부(791), 전기 광학 변조기(792) 및 편광 빔 분리기(793)를 포함할 수 있다. 전기 광학 변조기 구동부(791)는 감지부(130)의 출력단에서 전기 신호(Vout)을 제공받아 상기 전기 신호(Vout)에 비례하는 구동 전압(V)을 출력할 수 있다.
- [0207] 상기 전기광학 변조기(792)는 상기 변조 광학 변조 구동부(791)의 구동 전압(V)에 비례하여 편광 방향(polarization direction)을 회전시키거나 위상 지연을 제공할 수 있다. 상기 편광 방향의 회전각은 상기 구동 전압(V)의 함수일 수 있다. 예를 들어, 상기 전기광학 변조기(792)는 포켈스 셀(Pockels cell), 파라데이 회전기(Faraday Rotator), 또는 액정 디스플레이 소자(liquid crystal display device)일 수 있다. 이에 따라, 상기 전기광학 변조기(792)에 입사하는 선형 편광된 빔의 편광 방향은 상기 구동 전압(V)에 비례하여 회전할 수 있다.
- [0208] 상기 편광 빔 분리기(793)는 편광 상태에 따라 입사 빔을 분리할 수 있다. 이에 따라, 소정의 선형 편광된 빔만이 상기 증기 셀에 1/4 파장판(183)에 제공된다.
- [0209] 상기 구동 전압(V)은 감지부(130)의 출력단에서 전기 신호(Vout)에 비례할 수 있다. 또는 상기 구동 전압(V)은 상기 조사 빔의 광자기 회전에 비례할 수 있다. 한편, 상기 광자기 회전은 측정 자기장의 세기에 비례할 수 있다. 즉, 한편, 측정 자기장의 세기가 작은 경우, 상기 펌프 빔 광량 변조부는 펌프 빔의 세기를 설정값으로 유지할 수 있다. 한편, 측정 자기장의 세기가 큰 경우, 상기 펌프 빔 광량 변조부는 설정치보다 작은 값의 펌프 빔을 제공할 수 있다.
- [0210] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 되먹임 코일(122)을 대신하여, 상기 펌프 빔 광량 변조부(790)는 상기 원자 자력계의 주파수 응답 범위를 확장할 수 있다.
- [0211] 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.

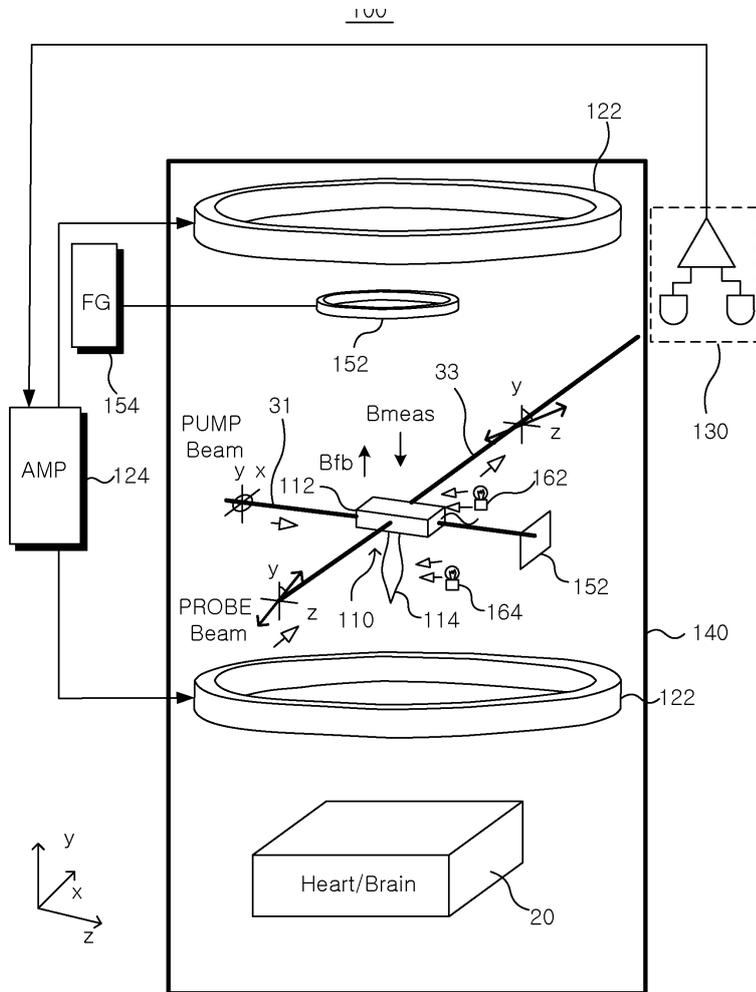
부호의 설명

- [0212] 20: 측정 대상 110: 증기 셀
- 122: 되먹임 코일 124: 되먹임 증폭기

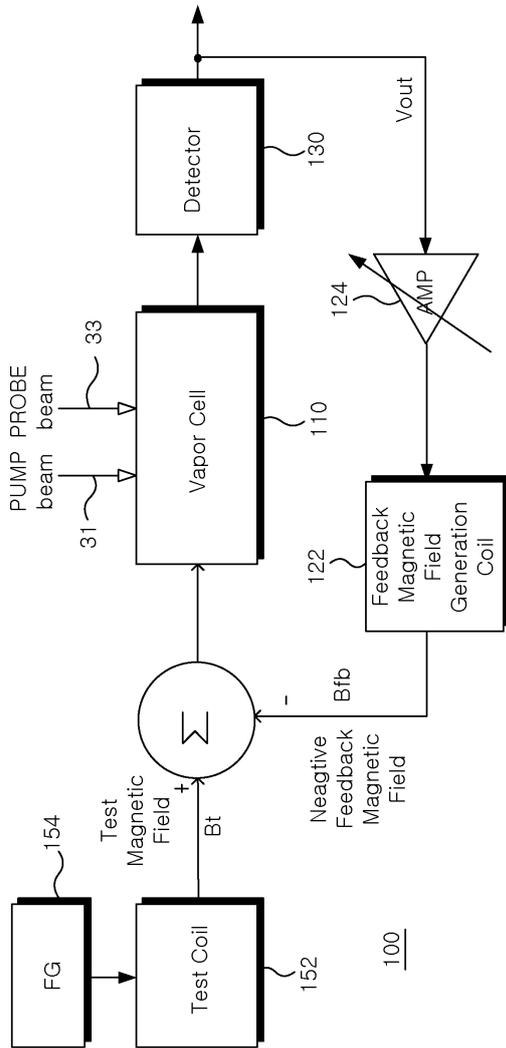
130: 감지부 162: 제1 가열부
 164: 제2 가열부

도면

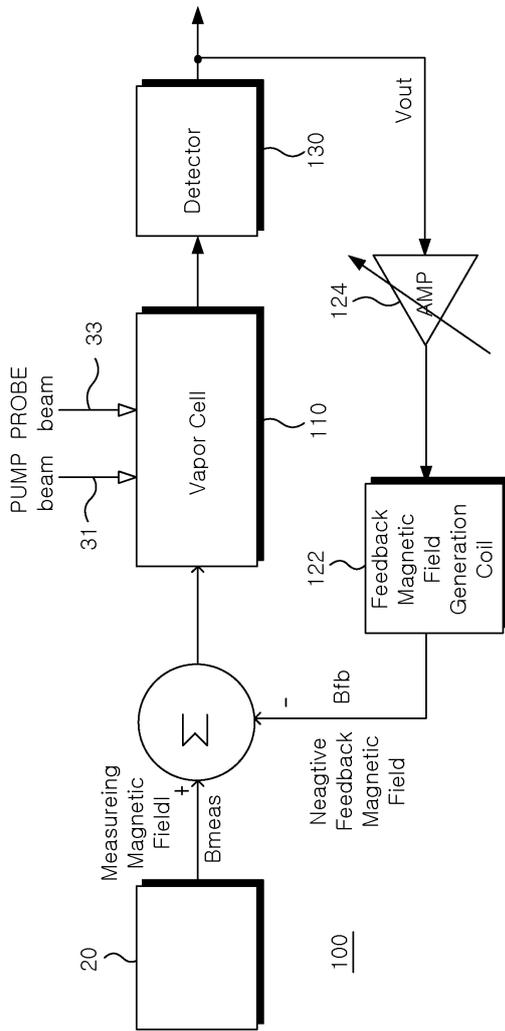
도면1



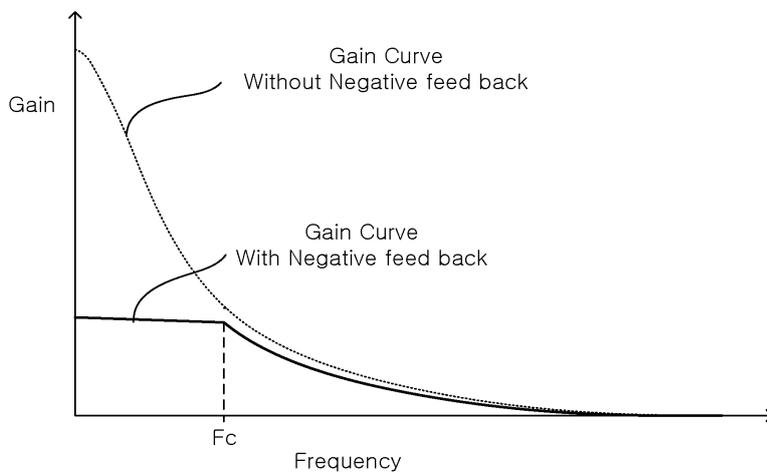
도면2a



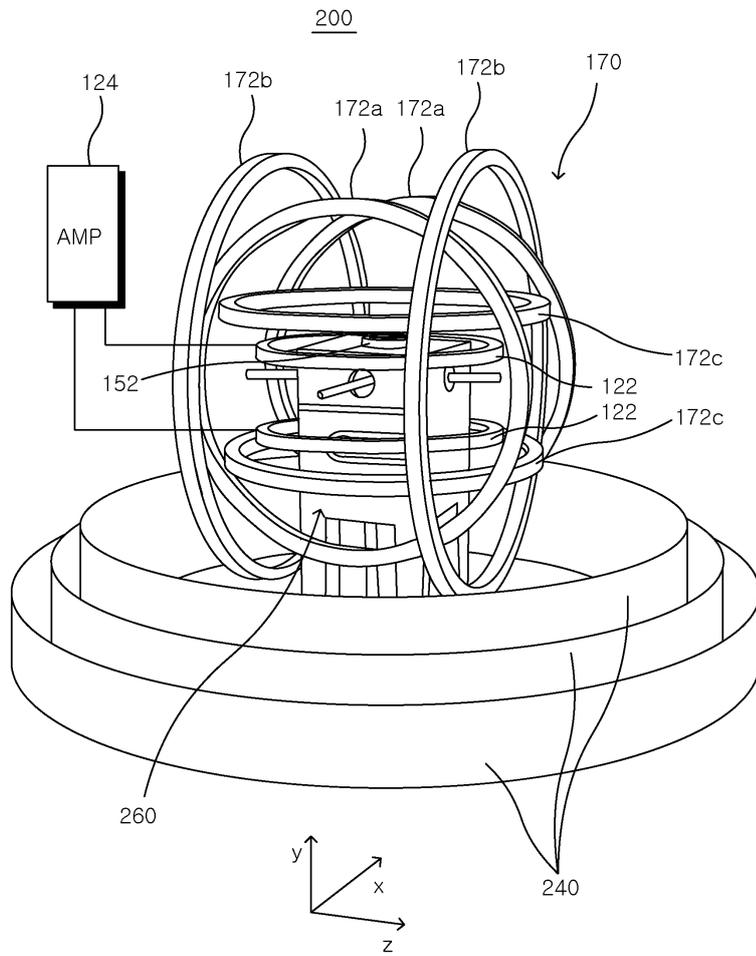
도면2b



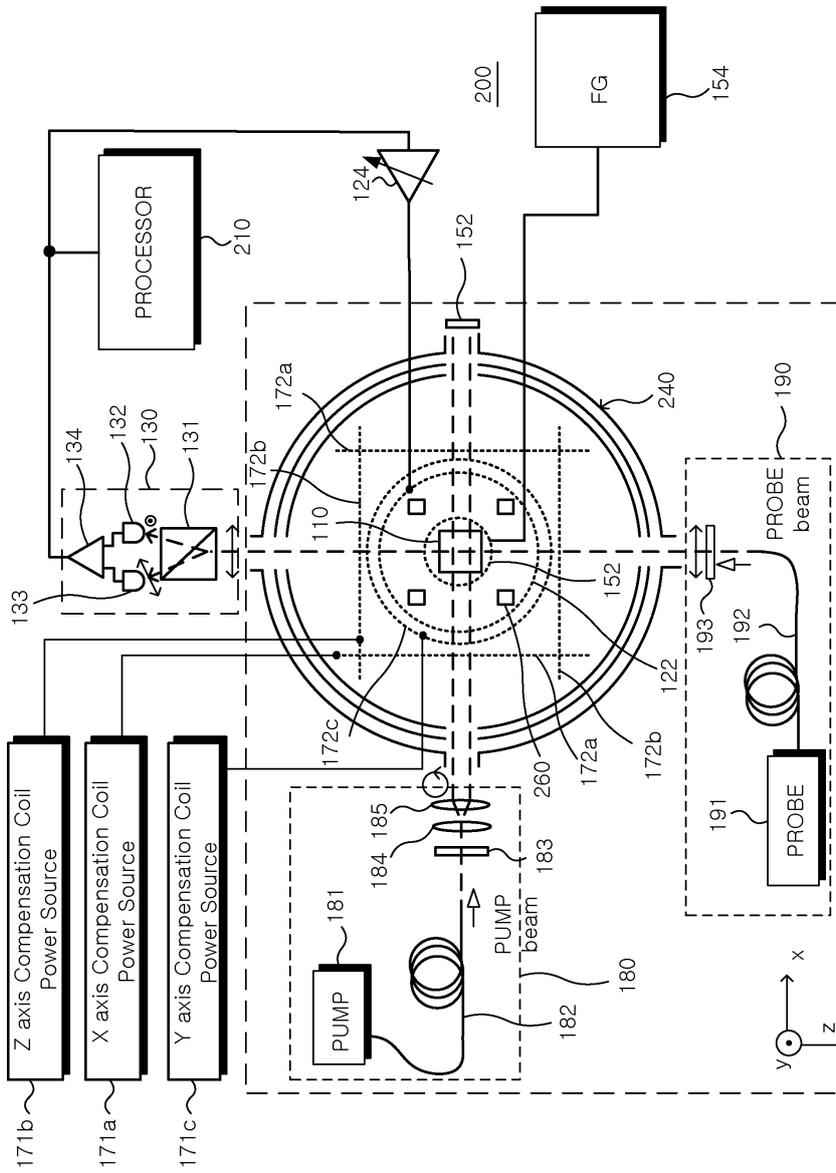
도면3



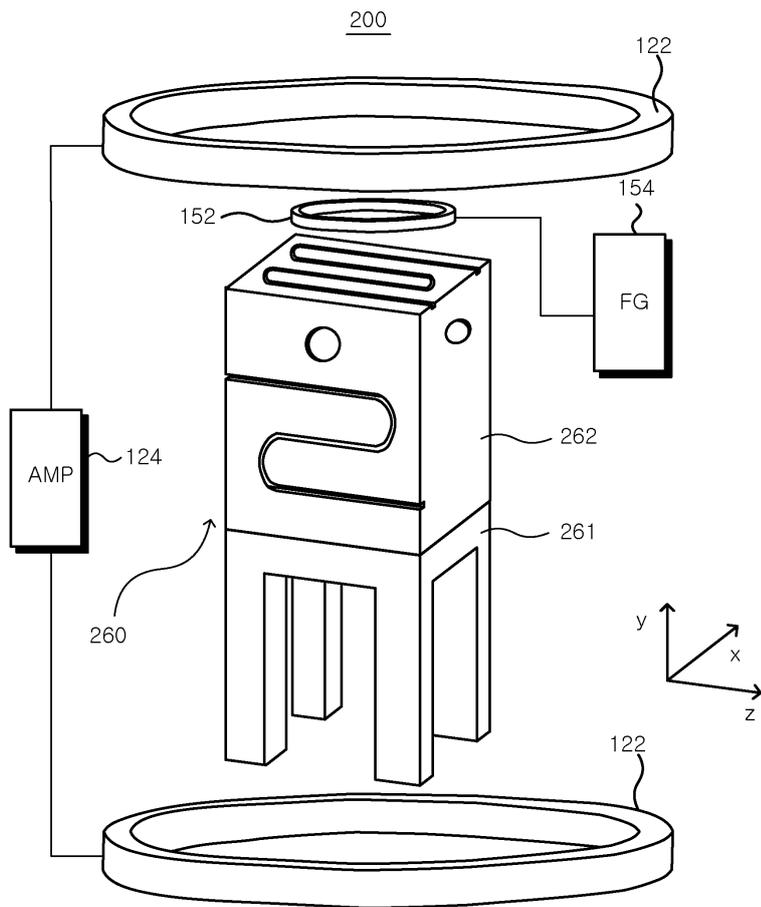
도면4



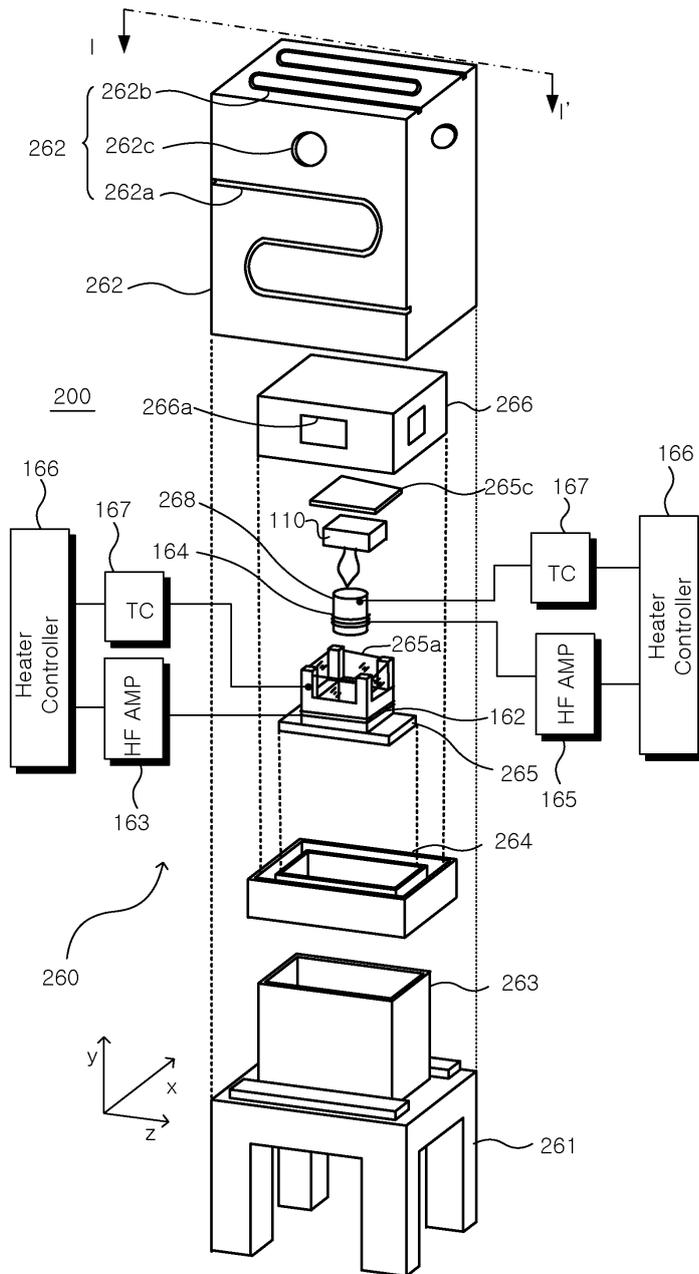
도면5



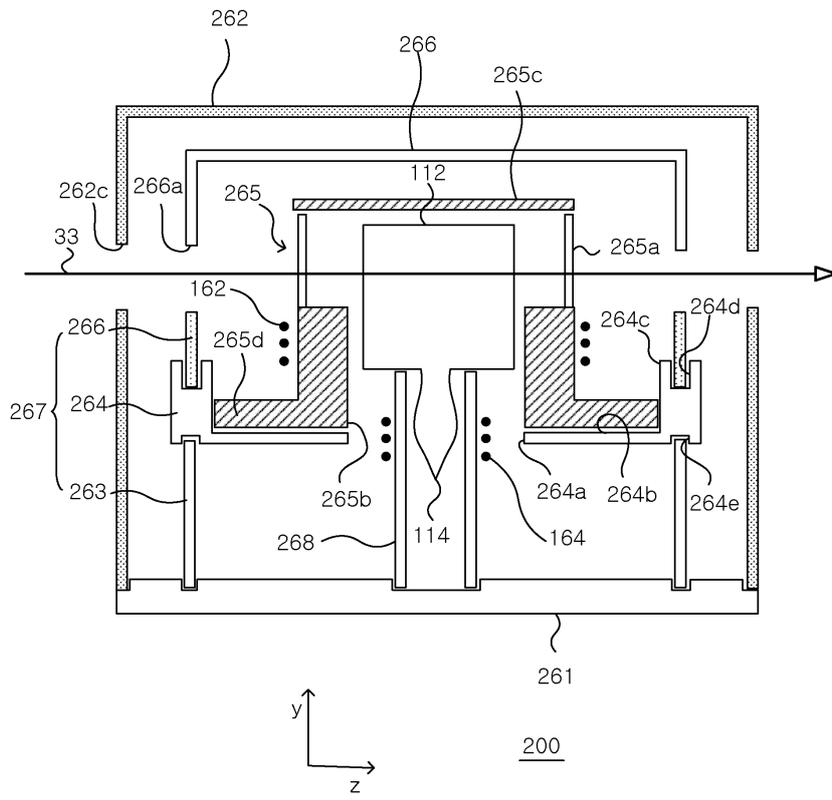
도면6



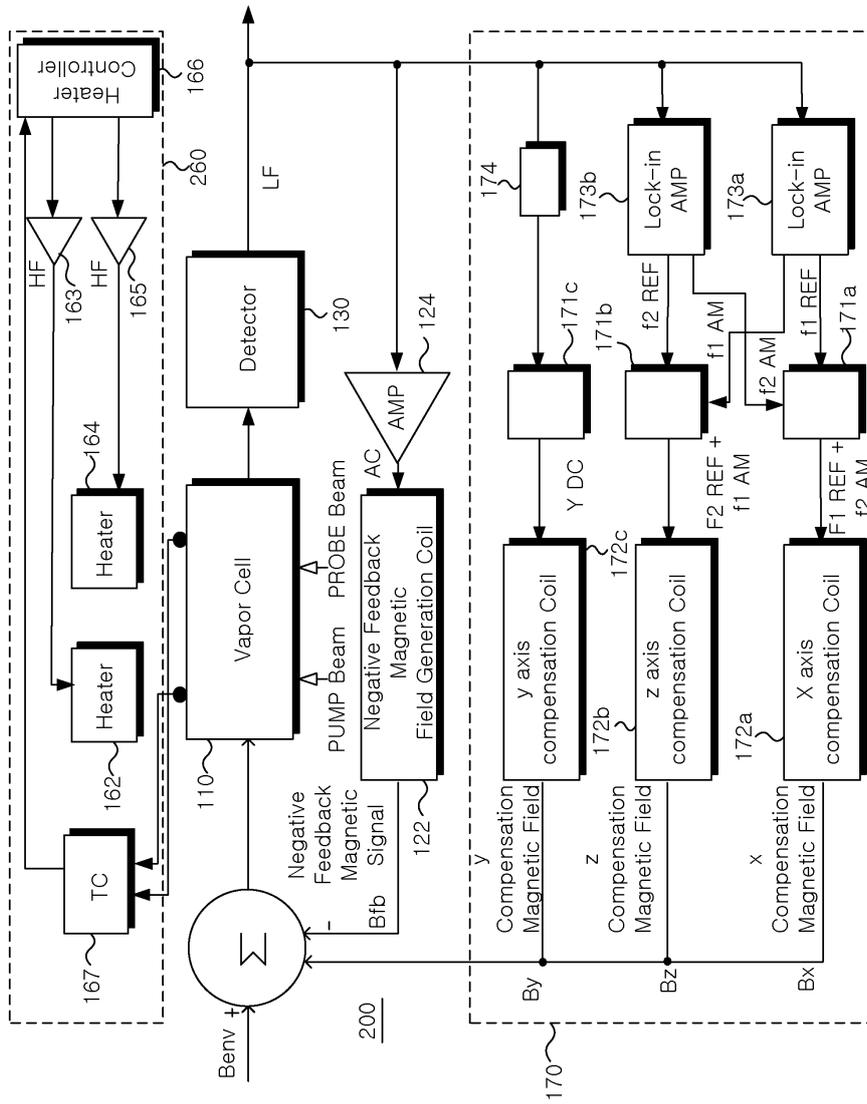
도면7



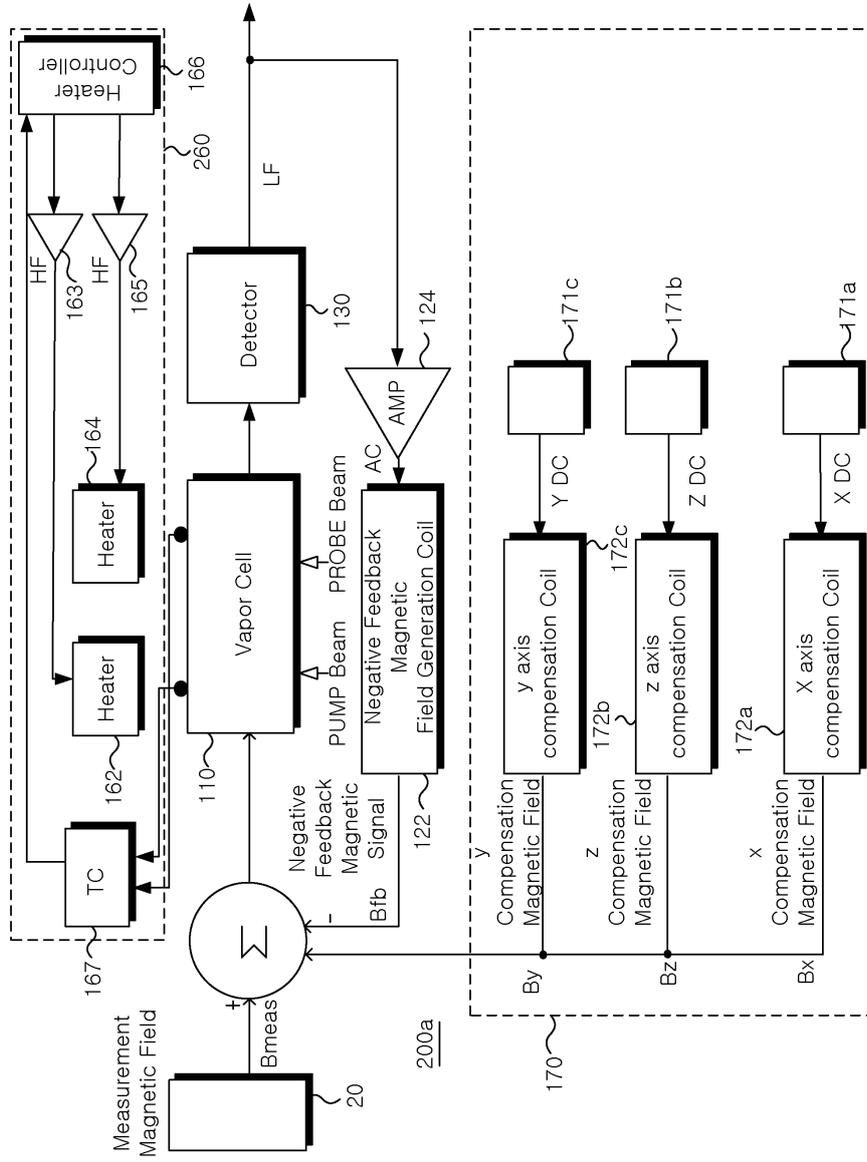
도면8



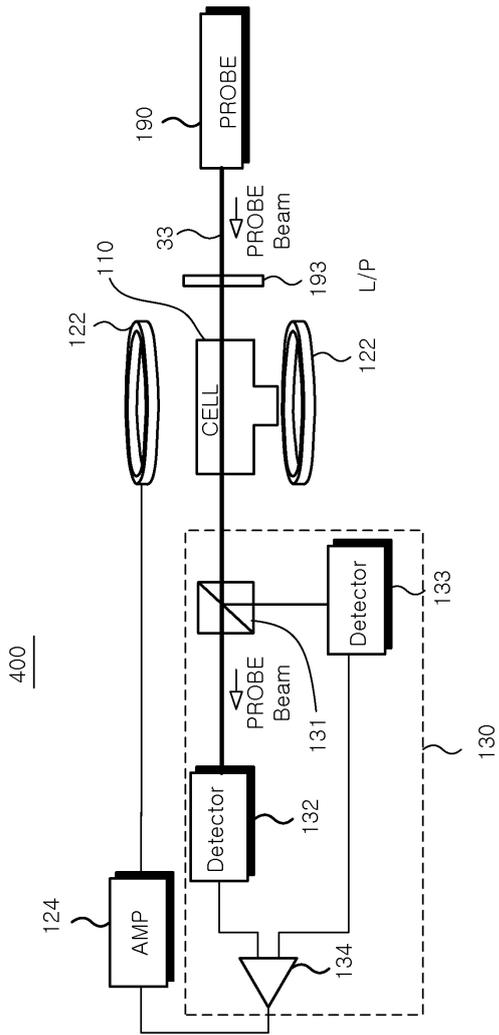
도면9



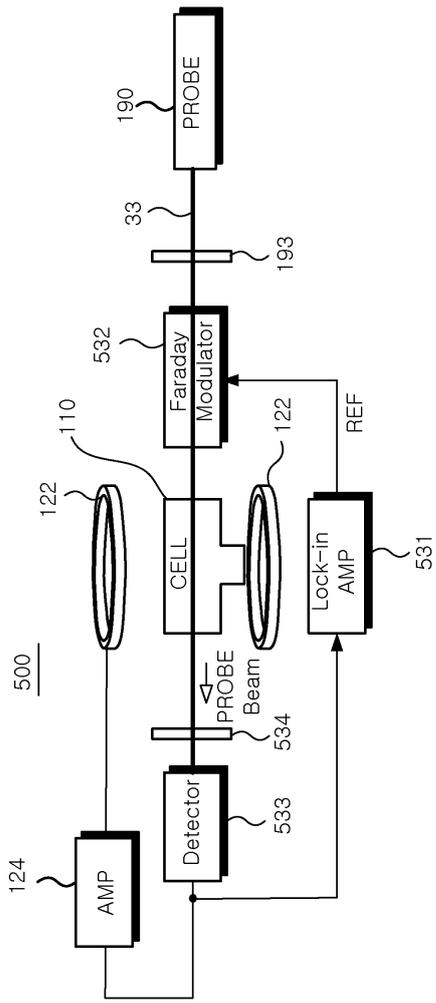
도면10



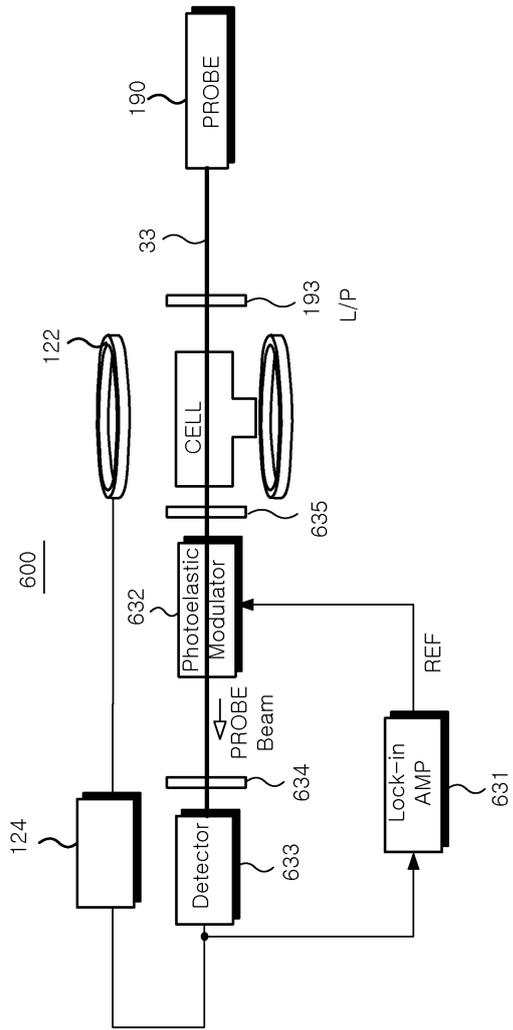
도면11



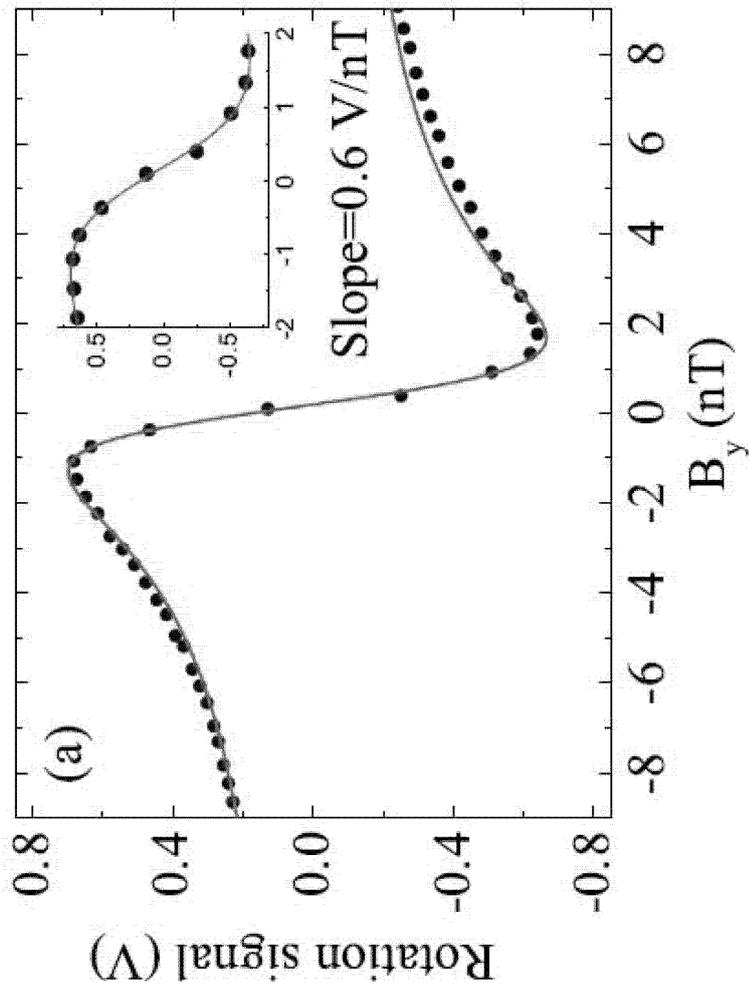
도면12



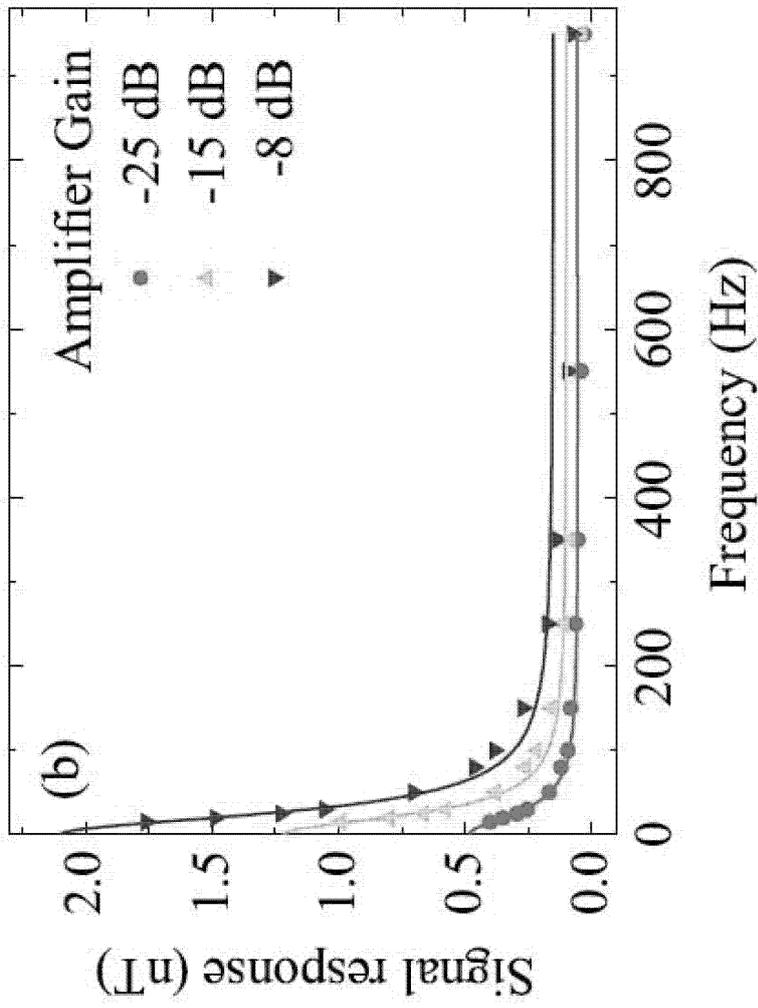
도면13



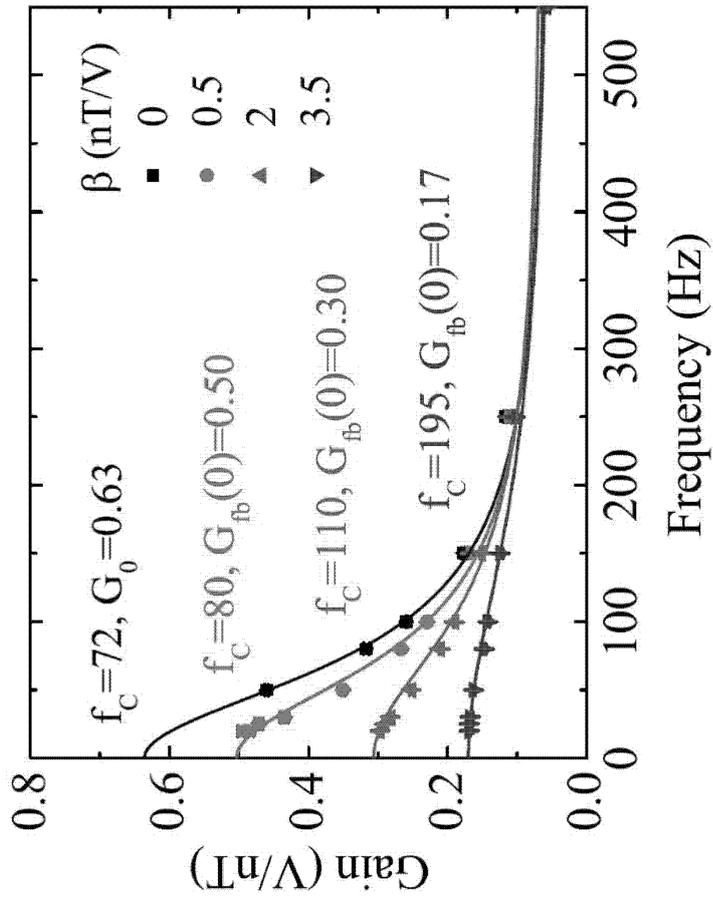
도면14



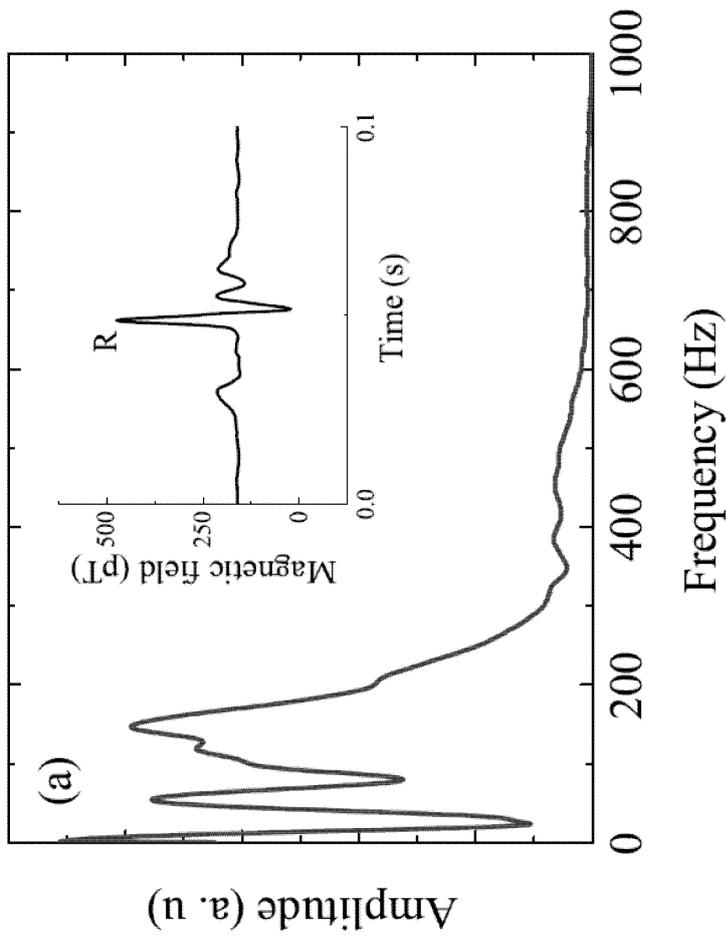
도면15



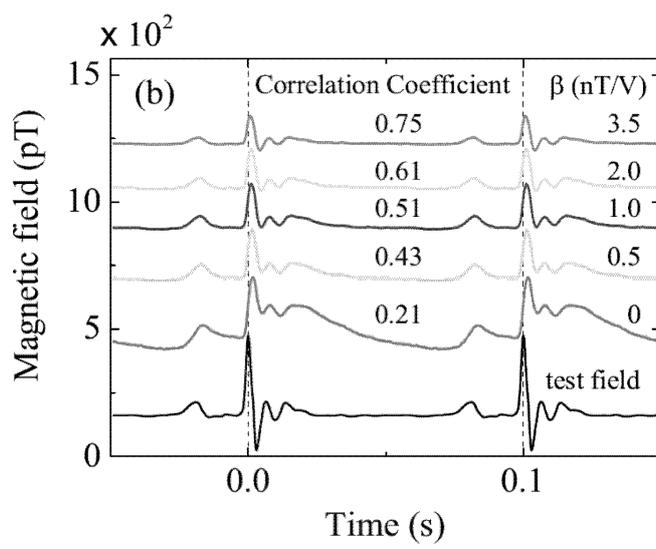
도면16



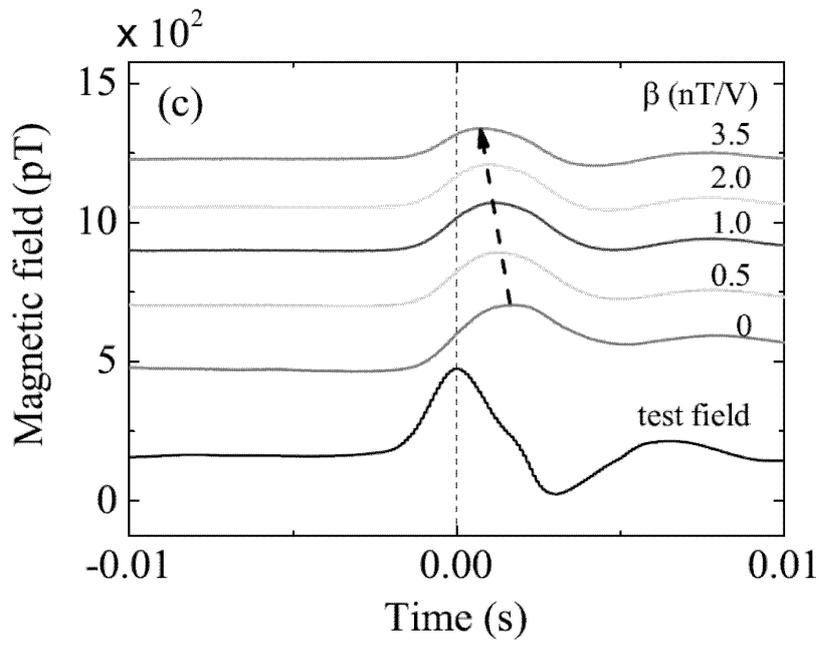
도면17a



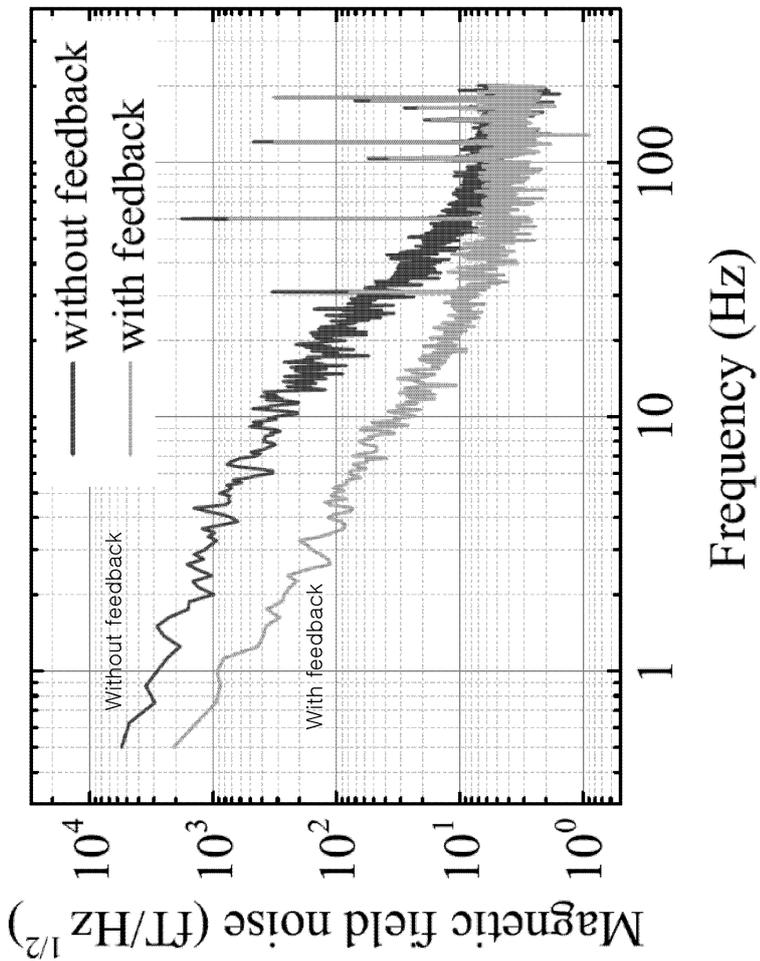
도면17b



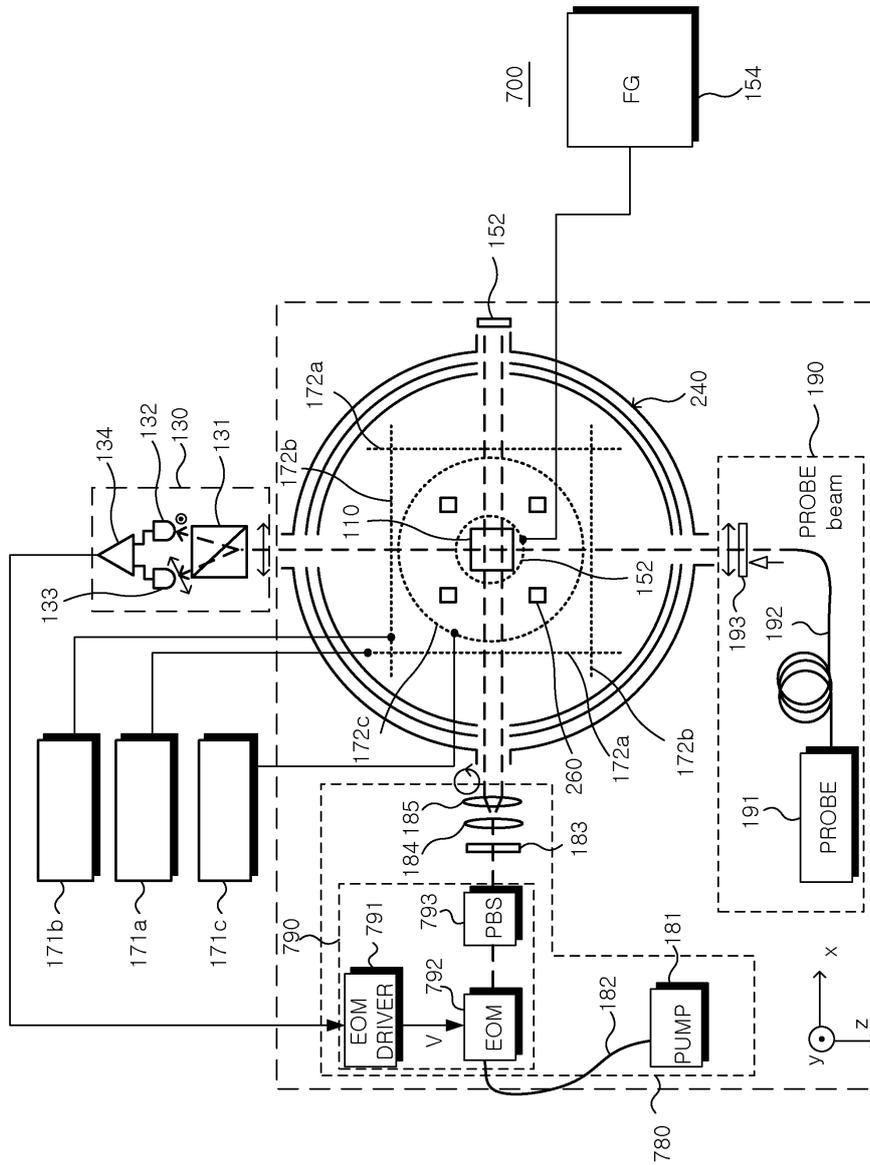
도면17c



도면18



도면19



【심사관 직권보정사항】

【직권보정 1】

【보정항목】 청구범위

【보정세부항목】 청구항 11

【변경전】

오피오 증폭기

【변경후】

오디오 증폭기

【직권보정 2】

【보정항목】 청구범위

【보정세부항목】 청구항 7

【변경전】

상기 원자 자력계의

【변경후】

원자 자력계의