



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2009-0051031
(43) 공개일자 2009년05월20일

(51) Int. Cl.

G12B 21/06 (2006.01) G01N 13/14 (2006.01)

G01N 21/65 (2006.01) G02B 27/56 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2009-7001267

(22) 출원일자 2009년01월21일

심사청구일자 없음

번역문제출일자 2009년01월21일

(86) 국제출원번호 PCT/US2007/014480

국제출원일자 2007년06월21일

(87) 국제공개번호 WO 2007/149534

국제공개일자 2007년12월27일

(30) 우선권주장

60/805,370 2006년06월21일 미국(US)

(71) 출원인

유니버시티 오브 데이턴

미합중국, 오하이오 45469-0101, 데이턴, 칼리지 파크 300

(72) 발명자

짚, 키웬

미합중국, 오하이오 45040, 메이슨, 젠트리 레인 6821

(74) 대리인

김성규, 김태규

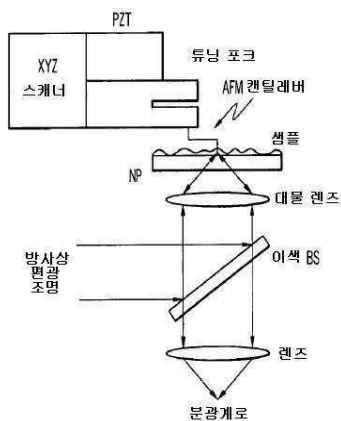
전체 청구항 수 : 총 35 항

(54) 편광 제어 방법 및 그의 응용

(57) 요약

매우 강력한 종방향 장을 생성하기 위하여 사용될 수도 있는 독특한 포커싱 특성을 갖는 특수 편광 상태가 발생하게 된다. 표면 플라즈몬 여자와 조합되면, 이들 편광 상태는 애퍼처리스 근거리 장 스캐닝 광학 현미경 시스템에서 사용될 수 있다. 금속으로 코팅된 테이퍼 형상의 애퍼처리스 팁을 포함하는 플라즈몬 발생 광섬유 내로 방사상 편광 빔이 안내된다. 애퍼처리스 팁은 표면 플라즈몬 파를 여자하고, 방사상 편광 빔이 플라즈몬 발생 광섬유를 따라 전파될 때, 표면 플라즈몬 파는 팁으로 안내된다. 대물 렌즈는 애퍼처리스 팁에 인접하게 배치된 샘플로부터 근거리 장 광학 신호를 수집한다. 애퍼처리스 NSOM의 잠재적인 공간 해상도는 10 nm를 초과할 수 있다. 이러한 강력한 장 강화에 의해, 10 nm를 초과하는 해상도로 샘플의 화학적 조성은 물론 기계적 조성을 측정할 수 있는 신뢰할 수 있는 나노-라만 시스템을 개발할 수 있다.

대표도 - 도17



특허청구의 범위

청구항 1

빔 발생 어셈블리와, 광학 현미경 어셈블리와, 신호 검출 어셈블리를 포함하여 구성된 광학 시스템으로서,

빔 발생 어셈블리는 레이저 소스를 포함하며, 빔 발생 어셈블리는 레이저 소스로부터의 레이저 출력을 광학 현미경 어셈블리로의 입력으로서의 방사상 편광 빔으로 변환하도록 구성되어 있고,

광학 현미경 어셈블리는 플라즈몬 발생 광섬유와 대물 렌즈를 포함하며, 빔 발생 어셈블리는 방사상 편광 빔을 광학 현미경 어셈블리의 플라즈몬 발생 광섬유 내로 안내하도록 구성되어 있고,

플라즈몬 발생 광섬유는, 정점을 한정하는, 금속 코팅된 테이퍼 형상의 애퍼처리스 팁을 포함하며,

애퍼처리스 팁은 표면 플라즈몬 파를 여자하고, 방사상 편광 빔이 빔 발생 어셈블리로부터 팁의 정점 방향으로 플라즈몬 발생 광섬유를 따라 전파될 때, 표면 플라즈몬 파를 팁의 정점으로 안내하도록 구성되어 있고,

대물 렌즈는 애퍼처리스 팁의 정점에 인접하게 위치하는 샘플로부터 근거리 장 광학 신호들을 수집하고 근거리 장 광학 신호들을 신호 검출 어셈블리로 안내하도록 구성되어 있는 것을 특징으로 하는 광학 시스템.

청구항 2

제 1 항에 있어서, 신호 검출 어셈블리는 검출기 장치, 영상 분광계, 광자 카운팅 시스템, 또는 이들의 조합을 포함하는 것을 특징으로 하는 광학 시스템.

청구항 3

제 2 항에 있어서,

영상 처리 및 표시를 위한 장치를 또한 포함하며,

신호 검출 어셈블리는 검출기 장치, 영상 분광계, 및 광자 카운팅 시스템의 출력을 영상 처리 및 표시를 위한 장치로 전송할 수 있도록 구성되어 있는 것을 특징으로 하는 광학 시스템.

청구항 4

제 2 항에 있어서, 신호 검출 어셈블리의 검출기는 광전자 증배관, 단일 광자 카운팅 아발란치 포토다이오드, 전하 결합 소자 어레이 검출기, 또는 이들의 조합을 포함하는 것을 특징으로 하는 광학 시스템.

청구항 5

제 1 항에 있어서, 신호 검출 어셈블리는 신속한 스펙트럼 획득 및 영상 처리를 위한 전하 결합 소자를 또한 포함하는 것을 특징으로 하는 광학 시스템.

청구항 6

제 1 항에 있어서, 광학 현미경 어셈블리는 할로겐 전구 소스와 큰 시계를 갖는 관찰 및 기록을 위한 전하 결합 소자 카메라를 또한 포함하는 것을 특징으로 하는 광학 시스템.

청구항 7

제 1 항에 있어서, 금속 코팅된 테이퍼 형상의 애퍼처리스 팁은 두께가 약 30 nm 내지 약 100 nm 인 실버 층으로 코팅된 것을 특징으로 하는 광학 시스템.

청구항 8

제 1 항에 있어서, 금속 코팅된 테이퍼 형상의 애퍼처리스 팁의 기하학은 광학 시스템의 장 강화 계수에 영향을 미치도록 구성되어 있는 것을 특징으로 하는 광학 시스템.

청구항 9

제 1 항에 있어서, 금속 코팅된 테이퍼 형상의 애퍼처리스 팁은 튜닝 포크 상에 장착되도록 구성되어 있는 특징

으로 하는 광학 시스템.

청구항 10

제 9 항에 있어서, 튜닝 포크는 디더링 피에조에 의해 기계적으로 구동되도록 구성되어 있는 것을 특징으로 하는 광학 시스템.

청구항 11

제 9 항에 있어서, 광학 현미경 어셈블리는 전단력 튜닝 포크 피드백을 이용하여 샘플에 접근하도록 구성되어 있는 것을 특징으로 하는 광학 시스템.

청구항 12

제 11 항에 있어서, 샘플의 토포그래프 정보는 z -피에조 전압과 튜닝 포크 피드백으로부터 획득될 수 있도록 구성되어 있는 것을 특징으로 하는 광학 시스템.

청구항 13

제 9 항에 있어서, 금속 코팅된 테이퍼 형상의 애퍼처리스 팁은 원자력 현미경 프로브인 것을 특징으로 하는 광학 시스템.

청구항 14

제 13 항에 있어서, 금속 코팅된 테이퍼 형상의 애퍼처리스 팁과 샘플 간의 거리는 튜닝 포크 피드백의 진폭을 관측함으로써 조절되도록 구성되어 있는 것을 특징으로 하는 광학 시스템.

청구항 15

제 1 항에 있어서, 광학 현미경 어셈블리는 샘플 스캐닝을 위한 낮은 프로파일의 나노 위치 선정 장치를 또한 포함하는 것을 특징으로 하는 광학 시스템.

청구항 16

제 1 항에 있어서, 광학 현미경 어셈블리는 반사 모드에서 투과된 신호들을 수집하도록 구성되어 있는 것을 특징으로 하는 광학 시스템.

청구항 17

제 1 항에 있어서, 광학 현미경 어셈블리는 투과 모드에서 투과된 신호들을 수집하도록 구성되어 있는 것을 특징으로 하는 광학 시스템.

청구항 18

제 1 항에 있어서, 대물 렌즈는 무한 교정 오일 침지 렌즈인 것을 특징으로 하는 광학 시스템.

청구항 19

제 1 항에 있어서, 광학 현미경 어셈블리는 라만 분광 시스템을 또한 포함하는 것을 특징으로 하는 광학 시스템.

청구항 20

제 19 항에 있어서, 광학 현미경 어셈블리는 투과 모드에서 투과된 라만 분광 신호들을 수집하도록 구성되어 있는 것을 특징으로 하는 광학 시스템.

청구항 21

제 19 항에 있어서, 신호 검출 어셈블리는 라만 분광 데이터를 처리하도록 구성되어 있는 것을 특징으로 하는 광학 시스템.

청구항 22

빔 발생 어셈블리와, 광학 현미경 어셈블리와, 신호 검출 어셈블리를 포함하여 구성된 광학 시스템으로서,

빔 발생 어셈블리는 레이저 소스를 포함하며, 빔 발생 어셈블리는 레이저 소스로부터의 레이저 출력을 광학 현미경 어셈블리로의 입력으로서의 원형 편광 소용돌이 빔으로 변환하도록 구성되어 있고,

광학 현미경 어셈블리는 플라즈몬 발생 광섬유와 대물 렌즈를 포함하며, 빔 발생 어셈블리는 원형 편광 소용돌이 빔을 광학 현미경 어셈블리의 플라즈몬 발생 광섬유 내로 안내하도록 구성되어 있고,

플라즈몬 발생 광섬유는, 정점을 한정하는, 금속 코팅된 테이퍼 형상의 애퍼처리스 팁을 포함하며,

애퍼처리스 팁은 표면 플라즈몬 파를 여자하고, 원형 편광 소용돌이 빔이 빔 발생 어셈블리로부터 팁의 정점 방향으로 플라즈몬 발생 광섬유를 따라 전파될 때, 표면 플라즈몬 파를 팁의 정점으로 안내하도록 구성되어 있고,

대물 렌즈는 애퍼처리스 팁의 정점에 인접하게 위치하는 샘플로부터 근거리 장 광학 신호들을 수집하고 근거리 장 광학 신호들을 신호 검출 어셈블리로 안내하도록 구성되어 있는 것을 특징으로 하는 광학 시스템.

청구항 23

빔 발생 어셈블리와, 구면 수차가 없는 렌즈와, 유전체/금속 기관과, 인텍스 매칭 재료와, 금속 박막을 포함하여 구성된 소산 베셀 빔 발생 시스템으로서,

빔 발생 어셈블리는 레이저 소스를 포함하며, 빔 발생 어셈블리는 레이저 소스로부터의 레이저 출력을 방사상 편광 빔으로 변환하고 방사상 편광 빔을 구면 수차가 없는 렌즈의 동공 평면에 조사하도록 구성되어 있고,

구면 수차가 없는 렌즈는 방사상 편광 빔을 수렴 구면파 출력으로 변환하고 수렴 구면파 출력을 표면 플라즈몬 파를 여자하는 유전체/금속 기관의 인터페이스 상에 포커싱 하도록 구성되어 있고, 유전체/금속 기관의 인터페이스는 구면 수차가 없는 렌즈의 초점에 위치하며,

유전체/금속 기관의 하면은 금속 박막으로 코팅되어 있고, 소산 베셀 빔은 금속 박막을 통과한 후에 발생되며,

인텍스 매칭 재료는 구면 수차가 없는 렌즈와 유전체/금속 기관 사이의 공간을 채우도록 구성되어 있고, 인텍스 매칭 재료의 굴절률은 유전체/금속 기관의 굴절률과 대등한 것을 특징으로 하는 소산 베셀 빔 발생 시스템.

청구항 24

제 23 항에 있어서, 금속 박막은 50 nm 의 실버 층을 포함하고 있는 것을 특징으로 하는 소산 베셀 빔 발생 시스템.

청구항 25

제 23 항에 있어서, 방사상 편광 빔은 도넛 형상의 소산 베셀 빔을 발생시키기 위하여 방위적으로 편광된 조명인 것을 특징으로 하는 소산 베셀 빔 발생 시스템.

청구항 26

레이저 빔 소스와, 방사상 분석기와, e-빔 기록 나선형 위상 요소와, 이중 반파장판 편광 회전자를 포함하여 구성된 원통형 벡터 빔 발생 시스템으로서,

레이저 빔 소스는 레이저 빔 출력을 방사상 분석기 내로의 입력으로서 생성하도록 구성되어 있고, 방사상 분석기의 출력은 위상에 있어서의 레이저 빔의 원통형 대칭을 파괴하도록 구성되어 있고,

e-빔 기록 나선형 위상 요소는 위상 지연을 도입함으로써 방사상 분석기로부터의 출력의 베리 위상을 보상하도록 구성되어 있고,

이중 반파장판 편광 회전자는 원통형 벡터 빔을 생성하기 위하여 e-빔 기록 나선형 위상 요소의 출력의 편광을 소정의 원통형 대칭 패턴으로 회전시키도록 구성되어 있는 것을 특징으로 하는 원통형 벡터 빔 발생 시스템.

청구항 27

제 26 항에 있어서, 레이저 빔 출력은 방사상 편광 빔인 것을 특징으로 하는 원통형 벡터 빔 발생 시스템.

청구항 28

제 26 항에 있어서, 레이저 빔 출력은 원형 편광 소용돌이 빔인 것을 특징으로 하는 원통형 벡터 빔 발생 시스템.

청구항 29

제 26 항에 있어서, e-빔 기록 나선형 위상 요소는 근거리 인덱스 매칭 유동체 내에 침지되어 있는 것을 특징으로 하는 원통형 벡터 빔 발생 시스템.

청구항 30

제 26 항에 있어서, e-빔 기록 나선형 위상 요소의 위상 지연은 완전한 1 회전에 360도에 이르도록 구성되어 있는 것을 특징으로 하는 원통형 벡터 빔 발생 시스템.

청구항 31

제 26 항에 있어서, 렌즈의 초점을 향하는 수렴 구면파를 생성하기 위하여 원통형 벡터 빔은 구면 수차가 없는 렌즈로 포커싱될 수 있고, 포획될 입자들은 구면 수차가 없는 렌즈의 초점에 놓이는 것을 특징으로 하는 원통형 벡터 빔 발생 시스템.

청구항 32

제 31 항에 있어서, 플랫폼 초점은 구면 수차가 없는 렌즈의 조명 동공 개구를 조정함으로써 달성되는 것을 특징으로 하는 원통형 벡터 빔 발생 시스템.

청구항 33

제 26 항에 있어서, 원형 편광 빔이 나선형 위상 요소를 통과하게 함으로써 원형 편광 소용돌이 빔을 또한 발생시키는 것을 특징으로 하는 원통형 벡터 빔 발생 시스템.

청구항 34

레이저 빔 소스와, 방사상 분석기와, e-빔 기록 나선형 위상 요소와, 렌즈와, 광섬유를 포함하여 구성되어 원통형 벡터 빔을 광섬유 안으로 발사하는 원통형 벡터 빔 발사 시스템으로서,

레이저 빔 소스는 원형 편광 레이저 빔을 방사상 분석기 내로의 입력으로서 생성하도록 구성되어 있고, 방사상 분석기의 출력은 위상에 있어서의 원형 편광 레이저 빔의 원통형 대칭을 파괴하도록 구성되어 있고,

e-빔 기록 나선형 위상 요소는 위상 지연을 도입함으로써 방사상 분석기로부터의 출력의 베리 위상을 보상하도록 구성되어 있고,

렌즈는 e-빔 기록 나선형 위상 요소로부터의 편광 출력을 광섬유 상에 포커싱하도록 구성되어 있는 것을 특징으로 하는 원통형 벡터 빔 발사 시스템.

청구항 35

제 34 항에 있어서, 영상 렌즈와 전하 결합 소자를 또한 포함하며, 영상 렌즈는 광섬유로부터의 편광 출력을 수용하고 표시를 위해 편광 출력을 전하 결합 소자 상에 포커싱하도록 구성되어 있는 것을 특징으로 하는 원통형 벡터 빔 발사 시스템.

명세서

기술 분야

<1> 본 발명은 편광 제어 방법 및 광학 근거리 장 영상 처리 분야에서의 그의 응용에 관한 것이다.

배경 기술

<2> 편광은 광선의 흥미진진한 특성들 중의 하나이다. 광선의 벡터 속성 및 물질과의 상호 작용은 많은 광학 장치의 사용을 가능케 하며, 광학 시스템 설계에 있어서 더 큰 자유도를 제공한다. 편광 전파 및 물질과의 상호 작

용은 생물학적인 연구는 물론 광학 검사 및 도량학, 디스플레이 기술, 데이터 저장, 광 통신, 천문학에 있어서 광범위하게 연구되었다. 과거의 대부분의 연구는 편광의 공간적으로 균질한 상태를 다루었다.

- <3> 특수한 편광 상태는 매우 강력한 종방향 장을 생성하기 위하여 사용될 수도 있는 독특한 포커싱 특성을 갖는다. 광선 빔의 편광을 의도적으로 그리고 주의 깊게 공간적으로 배열함으로써, 기능성을 확장할 수 있고 광학 시스템의 능력을 강화할 수 있는 새로운 효과를 기대할 수 있다. 이러한 유형의 편광은 공간 비균질 편광 또는 공간 변형 편광으로 불릴 수도 있다.
- <4> 공간 비균질 편광의 일례는 도 1a 내지 도 1c에 도시된 바와 같은 원통형 편광 대칭을 갖는 광선이다. 이러한 소위 원통형 벡터(CV) 빔은 진폭 및 위상 양쪽에 있어서 원통형 대칭을 따르는 맥스웰(Maxwell) 방정식의 해결책들이다. 도 1a는 방사상 편광을 보여주고 있고, 도 1b는 방위상 편광을 보여주고 있고, 도 1c는 일반화된 원통형 편광을 보여주고 있다.
- <5> 베셀(Bessel) 빔은 회절 분산을 겪지 않는 맥스웰 방정식에 대한 다른 해결책들이다. 이들 비회절 빔은 더닌(Durnin) 등에 의해 최초로 제안되었다. 이들 개념이 도입된 이래로, 베셀 빔은 계속적으로 매력적인 관심을 불러일으키고 있다. 대부분의 작업은 전파 스칼라 베셀 빔을 다루었다. 더닌 등이 지적하였던 바와 같이, 진폭 $U(r, z) = \exp(ik_z z) J_0(k_r r)$ 을 갖는 파가 헬름홀츠(Helmholtz) 식의 해결책이다. 상기에서, $J_0(k_r r)$ 는 첫 번째 종류의 영차 베셀 함수이다. 조건 $k_r < nk_0$ 이 충족될 때, 전파 z-축을 따라 모든 횡방향 평면에서 그 강도 분포 $J_0^2(k_r r)$ 를 유지하는 비회절 빔이 획득될 수 있다. 전파 베셀 빔은, 액시콘(axicon) 타입 장치에 의해 실현될 수 있는, 원뿔 표면 상에 놓이는 웨이브 벡터를 갖는 한 세트의 평면파의 중첩에 의해 설명될 수 있다. ($k_r > nk_0$ 인 경우) 맥스웰 방정식의 소산 베셀 빔 해결책이 또한 최근에 제안되었고 연구된 바 있다. 요구되는 종방향 대칭 덕분에, 방사상 편광을 갖는 전파 베셀 빔은 전형적으로 그러한 소산 비회절 빔을 발생시키기 위하여 전반사와 조합되어 사용된다. 팁과 샘플 간의 엄격한 근접 요건을 회피하기 위하여, 근거리 장 광학 현미경에서의 가상 팁으로서의 적용이 연구되어 왔다. 그러나, 제안되는 기하학은 오히려 더 복잡하고 실현하기 어렵다.
- <6> 따라서, 표면 플라즈몬 여자를 통해 소산 베셀 빔의 발생을 위한 간단한 장비를 제공할 필요가 있다. 이러한 방법은 표면 플라즈몬 공명(SPR)의 각 선택성은 물론 방사상 편광 대칭을 활용한다. SPR에 의해 제공되는 감도 및 장 강화에 의해, 이러한 기술은 근거리 장 광학 영상 처리 및 감지 분야에서 가상 프로브로서 사용될 수 있는 소산 베셀 빔을 발생시키기 위한 흥미 있는 방법이 된다.
- <7> 구조물의 나노미터 규모의 조립, 측정 및 조작을 허용하는 새로운 기구들의 발명에 의해 나노 과학 및 나노 기술이 최근에 매우 빠른 진전을 보여왔다. 광학 기술은 본질적으로 비파괴적이어서, 재료 진단 및 특성화 분야에서 광범위하게 사용되어 왔다. 회절 때문에, 통상적인 광학 영상 시스템은 하위 파장 폭방향 치수를 포함하는 특징을 해결하는데 어려움이 있다. 근거리 장 스캐닝 광학 현미경 검사(NSOM) 등의 근거리 장 광학 기술은 이러한 제한을 극복하기 위하여 연구되었다. NSOM은 하위 파장 해상력을 제공할 수 있는 광학 기술로서, 나노 광자학, 생물 광자학 및 재료 진단 분야에서 많은 응용을 가치를 발견하였다. 이러한 기술의 가장 일반적인 실시는 나노 개구를 갖는, 금속으로 피복된 테이퍼 형상의 섬유 팁을 사용하는 것이다. 광선은 이 나노 개구를 통과하여 샘플을 국부적으로 여자한다. 나노 개구는 회절 범위를 훨씬 벗어난 해상력을 제공한다는 제한을 갖는다. 그러나, 나노 개구는, 이러한 기술의 현저한 한가지 결함을 나타내는, 매우 낮은 광 처리량($\sim 10^{-6}$)을 또한 초래한다. 팁 상에 나노 개구를 형성하고 처리량을 향상시키기 위해서는 세심한 주의를 요하는 조립 공정이 필요하다. 이들 결점은 나노 개구 NSOM의 달성 가능한 공간 해상도를 현실적으로 대략 100 nm로 제한한다.
- <8> 따라서, 이들 결점을 극복할 수 있는 에퍼처리스 NSOM 기술이 요구된다. 에퍼처리스 NSOM에 있어서는, 매우 날카로운 유전체, 반도체, 또는 금속 팁이 레일리(Rayleigh) 산란으로서 사용된다. 이 에퍼처리스 프로브의 반경은 에퍼처리 프로브의 반경보다 훨씬 작게 구성될 수 있어서, 우수한 공간 해상도를 제공하게 된다. 1 nm의 공간 해상도를 획득할 수 있다. 이에 더하여, 금속 프로브가 사용되는 경우, 프로브 팁에서의 표면 플라즈몬의 국부적인 여자는 현저한 국부 장 강화를 제공한다. 이러한 국부 장 강화 효과는 단분자 검출, 2-광자 현미경 사경 검사, 라만 분광 기술 등등의 많은 분야에서 활용될 수 있다.
- <9> 수년간 라만 분광 기술은 분자 진동 및 회전의 연구를 위한 강력한 도구로서의 역할을 해왔다. 라만 산란은 재료의 분자에 대한 입사 광선의 비탄력적인 충돌로서 간주될 수도 있다. 입사 광선과 분자의 진동/회전 에너지

간의 상호 작용은 산란 광선의 스펙트럼 시프트를 야기한다. 특정 분자들은 스펙트럼 시프트에 있어서 그들만의 독특한 특징 또는 "지문"을 갖는다. 라만 시프트를 연구함으로써, 샘플의 화학적 조성에 대한 정보를 확인할 수 있다. 재료의 미소기계 특성 및 국부 변형 또한 시프트에 영향을 미친다. 따라서, 라만 시프트 영상을 측정하게 되면, 샘플 내의 응력/변형 분포의 맵핑을 제공할 수가 있다. 전통적인 라만 분광 기술은, 달성 가능한 공간 해상도를 제한하는, 커다란 죽문을 갖는 레이저 빔을 사용한다.

<10> 공간적으로 분해된 재료 특성을 획득하기 위해서는, 재료 진단에서의 응용을 위한 높은 개구수의 대물 렌즈를 사용하는 마이크로 라만 기술이 필요하다. 수 미크론 정도의 전형적인 공간 해상도는 마이크로 라만 기술로 달성될 수 있다. 그러나, 현재의 나노 재료의 감소하는 크기 특징 및 나노 조립 기술에 의해 제시되는 도전에 응하기 위해서는 더욱 높은 해상도가 요구된다. 신뢰할 수 있는 나노 라만 측정 기술의 실현은 라만 분광 기술 분야에서 "성배"로서 고려된다. 애퍼처리스 NSOM의 강력한 장 강화에 의해, 라만 신호는 현저히 증강되고, 따라서, 나노 재료의 신뢰할 수 있는 포괄적인 특성화가 가능해진다.

발명의 상세한 설명

<11> 본 발명에 따라, 빔 발생 어셈블리와, 광학 현미경 어셈블리와, 신호 검출 어셈블리를 포함하여 구성된 광학 시스템이 제공된다. 빔 발생 어셈블리는 레이저 소스를 포함한다. 빔 발생 어셈블리는 레이저 소스로부터의 레이저 출력을 광학 현미경 어셈블리로의 입력으로서의 방사상 편광 빔으로 변환하도록 구성된다. 광학 현미경 어셈블리는 플라즈몬 발생 광섬유와 대물 렌즈를 포함한다. 빔 발생 어셈블리는 방사상 편광 빔을 광학 현미경 어셈블리의 플라즈몬 발생 광섬유 내로 안내하도록 구성된다. 플라즈몬 발생 광섬유는, 정점을 한정하는, 금속 코팅된 테이퍼 형상의 애퍼처리스 팁을 포함한다. 애퍼처리스 팁은 표면 플라즈몬 파를 여차하고, 방사상 편광 빔이 빔 발생 어셈블리로부터 팁의 정점 방향으로 플라즈몬 발생 광섬유를 따라 전파될 때, 표면 플라즈몬 파를 팁의 정점으로 안내하도록 구성된다. 대물 렌즈는 애퍼처리스 팁의 정점에 인접하게 위치하는 샘플로부터 근거리 장 광학 신호들을 수집하고 근거리 장 광학 신호들을 신호 검출 어셈블리로 안내하도록 구성된다.

<12> 본 발명의 일 실시예에 따라, 포커싱된 편광 빔이 금속으로 코팅된 광섬유 내로 도입되어 광원을 생성한다. 이 광원은 애퍼처리스 근거리 장 스캐닝 광학 현미경 검사(NSOM) 및 라만 분광 기술 분야에서 활용될 수도 있다.

<13> 본 발명의 또 다른 실시예에 따라, 소산 베셀 빔이 표면 플라즈몬 여차를 통해 발생되고, 근거리 장 광학 영상 처리 및 감지 분야에서 가상 프로브로서 사용된다.

<14> 본 발명의 또 다른 실시예에 따라, 원형형 벡터 및 원형 편광 소용돌이 빔이 발생되고 포커싱된다.

<15> 따라서, 본 발명의 실시예들의 특징은 애퍼처리스 근거리 장 스캐닝 광학 현미경 검사(NSOM) 및 라만 분광 기술에서 사용하기 위한 광원을 갖는 것이다.

<16> 본 발명의 실시예들의 또 다른 특징은 원통형 벡터(CV) 빔을 발생시키고 포커싱하는 것이다.

<17> 본 발명의 실시예들의 또 다른 특징은 원형 편광 소용돌이(CPV) 빔을 발생시키고 포커싱하는 것이다.

<18> 본 발명의 실시예들의 또 다른 특징은 소산 베셀 빔을 발생시키는 것이다. 본 발명의 실시예들의 다른 특징들은 이하의 실시예의 상세한 설명을 통해 명백히 밝혀진다.

실시예

<40> 이하, 본 출원서의 일부를 구성하며, 본 발명을 구현하는 특정 실시예들이 예시적으로 그리고 한정적으로 도시된 첨부도면을 참조하여 본 발명의 실시예들을 상세히 설명하기로 한다. 다른 실시예들이 또한 이용 가능하며, 본 발명의 정신 및 범주를 벗어나지 않는 한 논리적, 기계적, 전기적 변경이 가능하다는 점이 이해되리라 본다.

<41> **원통형 편광의 발생**

<42> 도 2a를 먼저 참조하면, 원형 편광 레이저 빔(210)이 방사상 분석기(220)의 입력으로서 사용된다. 단순 원통형 벡터(CV) 빔 발생 및 조작 기술은 방사상 분석기(220)를 사용하여 실험적으로 증명될 수 있다. 방사상 분석기(220)는 방사상 방향을 따라 정렬된 편광 투과 축을 갖는 편광 장치이다. 방사상 분석기(220) 이후의 장 ($E_{out} = e^{i\phi} e_r$) 은 추가 나선형 베리(Berry) 위상으로 방사상으로 편광된다. 이 헬리시티는 상의 원통형 대칭을 파괴하며 장비 내에 역 헬리시티를 갖는 e-빔 기록 나선형 위상 요소(SPE)(230)를 삽입함으로써 보상될 필요가 있다. 이러한 나선형 위상 요소(230)는, 예를 들어, 그레이 스케일 석판 인쇄술 또는 멀티톤 중합 공정 등의 다른 마이크로-제조 기술로 또한 제조될 수 있다. 공간 광선 변조기(SLM)로 또한 실현될 수도 있다. 나선형

위상 요소(230)의 위상 지연은 방위각으로 선형적으로 성장하여야 한다. CV 빔을 발생시키기 위하여, 한 번의 완전한 회전 시에 위상 지연은 360도에 도달하여야 한다. 공기 중에서 사용되도록 의도되고 그 주변에서 단일 파장 위상 변화를 갖는 높은 표면 품질을 갖춘 이러한 유형의 광학 구조를 제조하는 것이 매우 요구된다. 더욱이, 이러한 광학 구조는 단일 파장에서 단일 파장 위상 변화만을 갖게 된다. 따라서, 나선형 위상 요소(230)는 근거리 인텍스 매칭 (NIM) 유동체 내에 침지될 수 있도록 제조될 수 있다.

<43> 굴절률이 n_1 인 매체 내에 침지된, 굴절률이 n_2 인 물질로 이루어져 있고 총 두께가 d 인 나선형 위상 요소(230)를 고려해 보자. 이 두께가 완전 파 지연을 나타내기 위해서는, $\Delta n = n_2 - n_1 = \lambda/d$ 가 충족되어야 한다. 여기서, λ 는 채용되는 광선의 파장이다. 다시 말해서, $d = \lambda/\Delta n$ 이 충족되어야 한다. 따라서, 예를 들어, $\Delta n = 0.01$ 인 경우, d 는 100λ 가 될 수 있고, 5λ 의 표면 거칠기는 공기 중에서 사용될 수 있는 광학 구조에서의 $\lambda/20$ 의 표면 거칠기에 상당한다. 따라서, 이러한 광학 구조는 공기 중에서 사용되도록 의도된 것보다 더욱 쉽게 제조될 수 있다. 근거리 인텍스 매칭 유동체의 구성을 변경함으로써 주어진 파장에 대해 Δn 이 쉽게 튜닝 될 수 있음에 주목할 필요가 있다. 더욱이, 넓은 파장 영역에서 $d = \lambda/\Delta n(\lambda)$ 이 충족되도록 근거리 인텍스 매칭 유동체의 분산이 선택될 수 있다면, 광학 구조는 효과적으로 무색을 띄게 된다. 초고속 레이저 펄스의 대역에 걸쳐 이러한 목적을 달성하는 것이 가능함은 틀림없다. 그리고, 잘 선택된 근거리 인텍스 매칭 유동체를 사용함으로써 동작 범위를 고려할 정도로 멀리 확장하는 것이 가능하게 된다.

<44> 나선형 위상 요소(230)는 방사상 분석기(220) 이후의 베리 위상을 보상하기 위하여 적절히 배치되어야 한다. 이러한 베리 위상은 입사하는 원형 편광의 손대칭성(왼손잡이성 또는 오른손잡이성)에 따라 다른 부호("+" 또는 "-")의 위상 전하를 가질 수도 있다. 단순히 나선형 위상 요소(230)를 플립핑 하게 되면, 나선형 위상 요소(230)에 의해 도입된 위상 전하의 부호가 바뀌게 된다. 따라서, 베리 위상의 보상은 나선형 위상 요소(230)를 정확히 배향시킴으로써 이루어질 수 있다. 파라데이(Faraday) 회전자의 기능을 에몰레이션하는, 이중 반파장판 편광 회전자(240)는 원하는 원통형 대칭 패턴으로 편광을 회전시킨다. 편광 패턴은 다른 배향에서의 선형 편광자 이후의 강도 패턴을 관찰함으로써 확인되었다. 원거리 장 패턴은 그러한 CV 빔을 발생시키는 것을 입증하기 위하여 관찰되었다. 편광에서의 원통형 대칭으로 인하여, 근거리 장은 어두운 중공 중심을 갖는다. 도 2a의 삽입 도면에 도시되어 있는 실험 결과는 이러한 방법을 사용하여 원통형 빔을 발생시킬 수 있음을 입증한다.

<45> 원통형 편광 모드는 광섬유 안으로 또한 향할 수 있다. 다중 모드 스텝 인텍스 광섬유는 원통형 편광 대칭을 갖는 횡방향-전기(TE_{01}) 및 횡방향-자기(TM_{01}) 환상 모드를 지원할 수 있다는 사실이 알려져 있다. TE_{01} 모드는 방위상으로 편광된 것을 가리키고, TM_{01} 모드는 방사상으로 편광된 것을 가리킨다. 약도와 근사에 따르면, 이들 모드는, 기본 모드인 HE_{11} 모드를 제외하면, 다른 모든 모드보다 낮은 동일한 컷오프 파라미터를 갖는다. 일반적으로, 섬유 내에서 기본 모드를 먼저 여차 하지 않고 이들 모드를 여차 하는 것은 어렵다. 강력한 기본 모드의 존재는 원통형 편광 순도를 손상시킬 수 있다.

<46> 도 2b에 도시한 바와 같다. 앞서 발생된 CV 빔은 광섬유(260) 내에서 이들 모드를 여차 하는데 사용될 수 있다. 오직 기본 모드와 환상 모드들 만을 지원할 수 있도록, 길이가 대략 1 미터 정도인 광섬유(260)가 주의 깊게 선택되었다. 입력 편광을 수행함으로써, 기본 모드로의 커플링이 최소화되었고, 고효율의 이차 환상 모드들이 발생 될 수 있다. 방사상 편광 모드가 도 2b의 첨부 도면에 도시되어 있다. 편광 대칭은 광섬유(260) 및 영상 렌즈(270) 사이에 편광자(265)를 삽입함으로써 관찰될 수 있다. 각기 다른 편광자 배향에서의 강도 패턴들이 기록되고 입증되었으며, 광섬유(260) 내에서 방사상 편광 모드가 성공적으로 발사되었다. 현재, 효율은 대략 10% 이다. 나선형 위상 요소(230)의 위상 불연속으로 인한 회절 손실을 감소시키고 효율을 더욱 향상시키기 위하여 열적 리플로우 공정이 사용될 수 있다. 방위상으로 편광된 모드 및 하이브리드 모드 또한 광섬유(260)를 비틀림으로써 여차 되었다. 광섬유(260)의 비틀림은 광섬유 내에서 복굴절을 야기한다. 균일하게 비틀림 광섬유는 회절력을 갖는 매체와 같이 거동함을 또한 보여줄 수 있다. 따라서, 편광 제어의 편리한 수단을 제공한다.

<47> **원형 편광 소용돌이 빔의 발생**

<48> CV 빔의 발생 및 조작 이외에, CV 빔과 원형 편광 소용돌이(CPV) 빔 사이의 연결을 보여줄 수 있다. 광학적 단일성은 최근 많은 관심을 끌고 있다. 이들 단일성은 장의 위상 또는 진폭이 명확하지 않거나 급격히 변화되는 점 또는 선에서 발생한다. 대부분의 지난 연구는 균질 하게 편광된 광선 파에서의 위상 단일성(스칼라 단일성)에 집중하였다. 스칼라 단일성의 한가지 등급은 스칼라 소용돌이이다. 스칼라 소용돌이는 위상이 명확하지

많은 단일성 지점 부분의 나선상 위상 파면을 갖는다. 위상 전하 $l = \frac{1}{2\pi} \oint \nabla \phi \cdot d\vec{s}$ 는 스칼라 소용돌이를 묘사하는데 사용된다. 최근에, 비균질적으로 편광된 파와 관련하여 회위를 포함하는 벡터 소용돌이에 대한 연구가 행해져 왔다. 회위는 횡방향 벡터 장의 패턴 또는 방향에 있어서 단일성을 갖는 점들 또는 선들이다. 그러한 한가지 예는, 빔의 중심에서 편광 단일성을 갖는, CV 빔의 벡터 소용돌이이다.

<49> CPV 빔은 나선형 위상 파면을 갖는 원형 편광 빔이다. 이러한 유형의 빔은 원형 편광 광선이 앞서 설명한 바와 같은 나선형 위상 요소를 통과하도록 함으로써 발생될 수 있다. 원통형 좌표 시스템에서, 평면 파면을 갖는 원손 원형(LHC) 편광 빔은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{E}_{LHC} &= P(r)(\vec{e}_x + j\vec{e}_y)/\sqrt{2} = P(r)[(\cos\phi_r - \sin\phi_r) + j(\sin\phi_r + \cos\phi_r)]/\sqrt{2} \\ &= P(r)e^{j\phi}(\vec{e}_r + j\vec{e}_\phi)/\sqrt{2} \end{aligned} \quad (1)$$

<51> 여기서, P(r)은 빔의 축 방향 대칭 진폭 분포를 가리킨다. 단순히 나타내기 위하여, 빔의 경우 단일 진폭을 갖는 것으로 가정한다. 즉, P(r) = 1. 이와 유사하게, 오른손 원형(RHC) 편광의 경우에는,

$$\vec{E}_{RHC} = P(r)(\vec{e}_x - j\vec{e}_y)/\sqrt{2} = P(r)e^{-j\phi}(\vec{e}_r - j\vec{e}_\phi)/\sqrt{2} \quad \text{이다.}$$

전하가 m인 LHC 소용돌이 빔이 고려되는 경우, 장은 $\vec{E} = e^{j(m+1)\phi}(\vec{e}_r + j\vec{e}_\phi)/\sqrt{2}$ 이다. 스칼라 소용돌이는 원통형 편광 기반에서의 두 벡터 소용돌이의 선형 중첩으로

분해됨을 알 수 있다. 위상 판차라트남(Pancharatnam) 전하는 $l_{p,r} = \frac{1}{2\pi} \oint \nabla \phi_{p,r} \cdot d\vec{s} - 1$ 로 정의된다. 여기서,

방사상 편광 성분의 판차라트남 위상은 $\phi_{p,r} = \arg \langle E(r, \phi), E(r, 0) \rangle = \arg[\cos\phi \cdot e^{j\phi}]$ 로 주어지며, $l_{p,r}$ 은 위상 판차라트

남 전하를 나타낸다. 위상 판차라트남 위상 $\phi_{p,a}$ 및 방위상 편광 $l_{p,a}$ 은 유사하게 유도될 수 있다. 따라서, 단위 에너지당 전파 방향의 전체 각운동량은 다음과 같이 주어진다.

$$J_z = \left[\frac{1}{2} (l_{p,r} + l_{p,a}) \right] / \omega \quad (2)$$

<53> 단위 에너지당 전파 방향의 전체 각운동량은 선형 편광 기반에서는 얻을 수 없는, 원통형 편광 성분의 위상 전하의 합에 의해 주어지는 것으로 보인다. 또 다른 중요한 점은 헬리시티 (원형 편광의 경우에는 ± 1) 가 위상 전하로 분해된다는 것이다. 이것은 전하 m = 0의 원손 원형 편광에 의해 가장 명확히 나타난다. 따라서, 원통형 기반 분해를 통해, 헬리시티(스핀 형상 광자 특성)와 궤도 각운동량 사이의 연결이 설정되었다. 원통형 편광 분해와 관련하여, 단지 빔 단면적의 일부하고만 상호작용이 이루어지지 않는 한, 헬리시티는 궤도 각운동량 기여와는 다르다. 광학 빔의 전체 각운동량은, 전자의 각운동량 특성과는 명백히 다른, 방사상 및 방위상 성분의 위상 판차라트남 전하의 간단한 대수적인 덧셈 및 뺄셈을 사용하여 계산될 수 있다.

<54> 매우 강력한 종방향 장의 발생

<55> CV 빔은 그 포커싱 특성과 관련하여 광범위하게 연구된다. 레이저 빔의 초점을 최적의 스폿에 맞추는 것은 많은 응용분야를 갖는 흥미있는 연구 주제이다. 극도로 작은 초점 스폿, 초점의 깊이가 연장된 초점, 플랫폼 프로파일을 갖는 초점, 원통형 편광의 특별한 한가지인, 방사상 편광을 사용하는 광학 체인을 생성할 수 있음이 알려졌다. 이들 많은 응용분야에서, 매우 강력한 종방향 장 성분(즉, 전파 방향을 따라 향하는 전기장)이 요구되며 중대한 역할을 한다. 이전 섹션에서 발생된 CV 빔에 있어서의 그러한 강력한 종방향 장의 발생이 보여질 수 있다. 원형 편광 소용돌이 빔의 포커싱 특성이 연구되고 있으며, 이는 원형 편광의 손대칭성과 위상 단일성의 전하의 적절한 조합을 통해, 방사상 편광과 유사한 포커싱 특성을 달성할 수 있음을 보여준다.

<56> CV 빔의 포커싱 특성

<57> 방사상 편광을 갖는 레이저 빔에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히 이들 빔의 높은 개구수(NA) 포커싱 특성과 고해상도 프로브로서의 응용에 관심이 집중되어 왔다. 편광 대칭으로 인해, 방사상 편광 빔의 초점에서의 전기장은 매우 강력한 축방향 성분을 가지며, 축방향 성분의 횡방향 크기는 횡방향 성분의 횡방향 크기보다 훨씬 작다. 이러한 특성으로 인하여, 고해상도 현미경 검사, 마이크로 석판 인쇄술, 도량 및 비선형 광학 등등에서의 응용을 발견할 수도 있다.

<58> 고도로 포커싱된 편광 빔의 초점 부근에서의 장 분포는 리차드스-울프(Richards-Wolf) 벡터 회절 방법으로 분석

된다. 문제의 기하학이 도 3에 도시되어 있다. 예시된 것은 동공 위에서 평면 파면을 갖는 방사상 편향 빔 (300)이다. 구면 수차가 없는 렌즈(310)는 렌즈의 초점을 향하여 수렴 구면파를 생성한다. 포획될 입자는 굴절률이 n_1 인 분위기 내에 침지될 수 있는 것으로 추정된다. 간략하게 나타내기 위하여, 대물 렌즈 쪽에서의 굴절률은 분위기와 동일한 것으로 추정된다. 초점 장은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\vec{E}(r, \varphi, z) = E_r \vec{e}_r + E_z \vec{e}_z \quad (3)$$

여기서, $\vec{e}_r, \vec{e}_z$ 은 방사상 방향 및 축방향 단위 벡터를 가리킨다. 두 직교 성분 E_r, E_z 의 크기는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$E_r(r, \varphi, z) = 2A \int_0^{\theta_{\max}} \cos^{1/2}(\theta) P(\theta) \sin \theta \cos \theta J_1(kr \sin \theta) e^{ik_z \cos \theta} d\theta \quad (4)$$

$$E_z(r, \varphi, z) = i2A \int_0^{\theta_{\max}} \cos^{1/2}(\theta) P(\theta) \sin^2 \theta J_0(kr \sin \theta) e^{ik_z \cos \theta} d\theta \quad (5)$$

여기서, $\theta_{\max}$ 는 대물 렌즈의 개구수(NA)에 의해 주어지는 최대 각을 나타내고, $P(\theta)$ 는 동공 아포디제이션(apodization) 함수를 나타내고, k_1 은 주변 매체 파수를 나타내고, $J_n(x)$ 는 차수 n 을 갖는 첫 번째 종류의 베셀

함수를 나타내며, $A = n_1 \pi f / \lambda$ (f 는 초점 거리)이다. 고해상도 영상 처리 등의 많은 응용 분야에 있어서는, 단순히 각각의 장 성분의 상대 강도를 계산하는 것으로 충분하다. 그러나, 복사력의 양적 계산은 주어진 빔 파라미터를 갖는 절대 장 강도의 계산을 필요로 한다. 계산에서는, $\lambda = 1.047 \mu\text{m}$ 이었고, $n_1 = 1.33$ 이었고, 단순 환형 동공 아포디제이션 함수는 다음과 같이 선택되었다.

$$P(\theta) = \begin{cases} P_0 & \text{if } \sin^{-1}(NA_1) \leq \theta \leq \sin^{-1}(NA/n_1) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

여기서, P_0 는 일정 진폭 계수를 나타내고, NA 는 환형의 외측 반경과 n_1 에 의해 결정되는 렌즈 개구수를 나타낸다. NA 는 $0.95n_1$ 이 되도록 선택된다. NA_1 은 가변적인 환형의 내측 반경에 대응한다. 레이저 빔 파워는 100 mW인 것으로 추정된다. NA_1 이 변경됨에 따라, 진폭 P_0 는 그에 따라 조정되어 파워 레벨을 유지한다. 일례로서, $NA_1 = 0.6$ 인 장 분포가 도 4에 도시되어 있다. 도 4는 고도로 포커싱된 방사상 편광에 있어서의 계산된 초점 평면 에너지 분포의 라인 스캔을 보인 것이다.

도 4로부터, 더욱 콤팩트한 초점이 주어지는 경우, 장 강도의 전반적인 분포는 축방향 성분에 의해 좌우된다. 비교를 위하여, 선형 편광 입사의 결과가 또한 도시되어 있다. 따라서, 포커싱된 방사상 편광은 금속 입자들을 초점의 중심을 향해 끌어당기는 더욱 강력한 구배력을 제공한다. 그러한 초점 장의 또 다른 중요한 특징은 강력한 축 성분이 비 전파 장이며, 전파 방향을 따라 에너지가 흐르는데 기여를 하지 않는다는 점이다. 따라서,

광축에 따른 시간 평균 포인팅(Poynting) 벡터 $\langle S \rangle_z = \text{Re}(\langle \vec{E} \times \vec{H}^* \rangle_z) / 2 = \text{Re}(E_z H_z^*) / 2$ 는 중심에서 널(null)을 갖는다. 이를 입증하기 위하여, 대응하는 시간 평균 포인팅 벡터가 계산되었고, 그 축방향 성분이 도 5에 도시되어 있다. 도 5a는 초점 부근에서의 이차원 분포를 보여주고 있고, 도 5b는 초점에서의 (a)의 라인 스캔을 보여주고 있다. 공동 평면에서의 자기장이 방위 방향을 따라 정렬된다고 가정하면, 자기장은 전기장의 계산과 유사한 방식으로 계산된다. 도 5로부터, 광축 부근에서의 축방향 포인팅 벡터가 사실상 0임을 명백히 알 수 있다. 이것은 광학 핀셋으로 금속 입자를 포획할 때 중요한 의미를 갖는다.

<67> 원형 편광 소용돌이 빔의 포커싱

<68> 동일한 포커싱 장비를 사용하는 원형 편광 소용돌이 빔의 포커싱 특성에 대한 조사가 이루어진다. 예를 들어, 전하 m 을 갖는 왼손 원형 편광 소용돌이 빔의 초점 장 분포는 리처드스-울프 벡터 회절 모델 및 베셀 항등식을 사용하여 유도될 수 있다.

<69>

$$E_r(\rho, \phi, z) = A e^{i(m+1)\theta} \int_0^a \cos^{1/2}(\theta) \sin \theta \cos \theta P_0(\theta) [J_{m+2}(k\rho, \sin \theta) + j^{-2(m+1)} J_{-m}(k\rho, \sin \theta)] e^{jk_z \cos \theta} d\theta \quad (7)$$

<70>

$$E_z(\rho, \phi, z) = A e^{i(m+1)\theta} \int_0^a \cos^{1/2}(\theta) \sin^2 \theta P_0(\theta) [J_{m+1}(k\rho, \sin \theta) + j^{-2(m+1)} J_{-(m+1)}(k\rho, \sin \theta)] e^{jk_z \cos \theta} d\theta \quad (8)$$

<71>

$$E_\phi(\rho, \phi, z) = -A e^{i(m+1)\theta} \int_0^a \cos^{1/2}(\theta) \sin \theta P_0(\theta) [J_{m+2}(k\rho, \sin \theta) + j^{-2(m+1)} J_{-m}(k\rho, \sin \theta)] e^{jk_z \cos \theta} d\theta \quad (9)$$

<72>

여기서, a 는 $NA = \sin a$ 에 의해 주어지며, A 는 초점 거리 및 파장과 관련된 상수이고, $J_m(x)$ 는 차수 m 을 갖는 첫 번째 종류의 베셀 함수를 나타낸다. 편광을 무시하는 스칼라 소용돌이의 경우, 위상 전하 $m \neq 0$ 인 한, 장은 초점 중심에서 항상 0이다. 원형 편광 소용돌이 빔의 경우에는 다르다. 초점 평면에서 0이 아닌 축상(on-axis) 장 강도를 가지기 위해서는, 식 (7) 내지 (9)에서의 베셀 함수들 중 적어도 하나가 제 0 차수가 될 필요가 있다. 그렇지 않으면, 전체 장은 초점의 중심에서 0이 되어 버린다. 식 (7) 내지 (9)로부터, $m = 0, -1, -2$ 일 때 그러한 상황이 발생함을 명백히 알 수 있다. $m = 0$ 일 때, 이것은 원형 편광에 있어서의 하참은 경우이다. 초점 장의 식들은 데비(Debye) 적분 결과로 환산된다. 그러한 예의 한가지가 도 6a 내지 도 6d에 도시되어 있다. 도 6a 내지 도 6d는 전하 $m = 0$ 을 갖는 고도로 포커싱된 왼손 원형 편광 소용돌이 빔에 있어서 $|E|^2$ 의 계산된 이차원 분포를 예시하고 있다. 도 6a는 전체 장을 보여주고 있고, 도 6b는 종방향 성분 $|E_z|^2$ 을 보여주고 있고, 도 6c는 횡방향 성분 $|E_d|^2$ 을 보여주고 있고, 도 6d는 초점의 라인 스캔을 보여주고 있다. 도 6a 내지 도 6d에 도시한 바와 같이, 초점은 횡방향 장에 의해 좌우된다. 예상되는 바와 같이, 왼손 원형 편광의 초점은 횡방향 장 성분으로 인해 0이 아닌 축상 장을 갖는다.

<73>

빔이 전하 $m = -1$ 을 갖는 LHC 스칼라 소용돌이 빔이라면, 왼손 원형 편광 소용돌이 빔의 식은 $\vec{E} = (\vec{e}_r + j\vec{e}_\phi)/\sqrt{2}$ 이 되는데, 이는 단순히 방사상 및 방위상 편광의 선형 중첩이다. 입증된 독특한 포커싱 특성으로 인하여, 방사상 편광 성분에 대해 특별히 관심이 높다. 높은 NA의 대물 렌즈로 포커싱을 수행하였을 때, 방사상 성분은 강력한 종방향 초점 장에 기여를 하며, 주변의 도넛 초점 장은 방위상 성분에 의해 생성된다(도 7a 내지 도 7d 참조). 도 7a 내지 도 7d는 전하 $m = -1$ 을 갖는 고도로 포커싱된 왼손 원형 편광 소용돌이 빔에 있어서 $|E|^2$ 의 계산된 이차원 분포를 예시하고 있다. 도 7a는 전체 장을 보여주고 있고, 도 7b는 종방향 성분 $|E_z|^2$ 을 보여주고 있고, 도 7c는 횡방향 성분 $|E_d|^2$ 을 보여주고 있고, 도 7d는 초점의 라인 스캔을 보여주고 있다. 도 7a 내지 도 7d에 도시한 바와 같이, 강력한 종방향 장은 소용돌이 빔의 방사상 성분에 의해 발생한다. 그러한 독특한 종방향 장이 발생되도록 하기 위해서는, 원형 편광의 순방향성과 전하가 주의 깊게 선택되어야 한다.

<74>

오른손 원형 편광이 사용될 경우, 이러한 강력한 종방향 장을 달성하기 위하여 $m = +1$ 의 전하가 필요하게 된다. 더욱 흥미로운 것은, $m = -1$ 인 경우의 플랫폼 초점은 단순히 조사 동공 개구를 조정함으로써 달성될 수 있다. 그러한 결과들 중 하나가 도 8a 내지 도 8d에 도시되어 있다. 도 8a 내지 도 8d는 전하 $m = -1$ 을 갖는 고도로 포커싱된 왼손 원형 편광 소용돌이 빔의 플랫폼 포커싱을 예시하고 있다. 도 8a는 전체 장을 보여주고 있고, 도 8b는 종방향 성분 $|E_z|^2$ 을 보여주고 있고, 도 8c는 횡방향 성분 $|E_d|^2$ 을 보여주고 있고, 도 8d는 플랫폼 초점을 획득할 수 있음을 보여주는 초점의 라인 스캔을 도시하고 있다. 이 플랫폼 조건은 대물 렌즈 동공 개구의 중심의 75.6%를 차단함으로써 달성된다.

<75>

전하 $m = -2$ 를 갖는 LHC 스칼라 소용돌이 빔의 경우, 장은 $\vec{E} = e^{-j\theta}(\vec{e}_r + j\vec{e}_\phi)/\sqrt{2}$ 이 된다. 이는, 방위상 성분이 π 역위상인 것을 제외하면, 원통형 편광 기반에서의 RHC의 식과 거의 동일하다. 따라서, 초점 장 강도는, 도 6a 내지 도 6d에 도시되어 있는 LHC에서의 결과와 또한 동일하여야 하는, 포커싱된 RHC의 초점 장 강도와 동일하여야 한다는 것을 명백히 알 수 있다. 도 9a 내지 도 9d는 전하 $m = -2$ 를 갖는 고도로 포커싱된 왼손 원형 편광 소용돌이 빔에 있어서 $|E|^2$ 의 계산된 이차원 분포를 예시하고 있다. 도 9a는 전체 장을 보여주고 있고,

도 9b는 종방향 성분 $|E_z|^2$ 을 보여주고 있고, 도 9c는 횡방향 성분 $|E_t|^2$ 을 보여주고 있고, 도 9d는 초점의 라인 스캔을 보여주고 있다. 도 9a 내지 도 9d에서의 장 강도 분포는 도 6a 내지 도 6d의 경우와 동일하다. 이 빔과 RHC 사이의 또 다른 유사성은, 광자 당 $-\hbar$ 인, 동일한 전체 각운동량 밀도를 갖고 있다는 점이다. 이것은 광학 빔의 각운동량인 또 다른 중요한 점에 도달한다.

<76> 이들 빔의 포커싱 특성은 고도의 공간 해상도 영상 처리, 광 석판 인쇄술, 재료 처리 및 특성화, 광학 편광 등의 다양한 응용분야를 가질 수 있다. 특히, 강력한 종방향 성분을 활용하는 응용분야의 경우, 원형 편광 소용돌이 빔은 더욱 간단한 대안으로서 사용될 수 있다.

<77> 가상 텅에의 응용

<78> 소산 베셀 빔 발생을 위하여 제안된 장비가 도 10에 도시되어 있다. 구면 수차가 없는 렌즈(1020)(NA = 0.95)의 동공 평면을 조사하는 방사상 편광 빔(1010)은 초점 평면에 위치한 유전체/금속 기관(1040) 인터페이스를 향하는 수렴 구면파(1025)를 생성한다. 유전체 기관(1040)의 굴절률에 맞는 고체 또는 액체 침지 재료(1030)가 사용된다. 일 실시예에 있어서, 침지 재료(1030) 및 기관(1040)의 굴절률은 $n_1 = 1.5$ 가 되도록 선택된다. $\lambda_0 = 488 \text{ nm}$ 의 파장이 처음부터 끝까지 사용된다. 50 nm 의 실버(488 nm에서 $\epsilon = -7.9 + 0.736i$)로 된 금속 박막(1050)이 유전체 기관(1040)의 바닥에 증착된다. 실버 층 아래의 매체로는 $n_2 = 1$ 인 공기가 선택된다. 강력하게 포커싱된 방사상 편광 조사를 위하여, 전체 빔은 이 다층 인터페이스에 대해 p-편광된다.

<79> 도 11a 및 도 11b에 도시한 바와 같이, 유전체/금속 인터페이스 상에 입사되는 p-편광 광선의 반사(도 11a) 및 투과(도 11b) 계수 곡선 대 입사각이 이 인터페이스에 대해 계산되어 있다. 표면 플라즈몬 공명(SPR) 조건은 $\theta_{sp} = 45.45^\circ$ 에서 충족됨을 알 수 있다. 도 12는 반사 이후의 대물 렌즈의 후방 초점 평면에서의 시뮬레이션된 강도 분포를 예시한 도면이다. 이 장치에 있어서의 방사상 대칭으로 인하여, SPR 여자는 대물 렌즈의 후방 초점 평면에서의 다크 링에 대응한다.

<80> 초점 부근에서의 전기장은 리처드스-울프 벡터 회절 이론으로 계산될 수 있다. 실버 층 아래의 매체에서의 장 성분은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$E_r(r, \varphi, z) = 2A \int_0^{\theta_{\max}} \cos^{1/2}(\theta) P(\theta) t_p(\theta) \sin \theta \cos \theta J_1(k_1 r \sin \theta) e^{iz \sqrt{k_2^2 - k_1^2 \sin^2 \theta}} d\theta \quad (10)$$

$$E_z(r, \varphi, z) = i2A \int_0^{\theta_{\max}} \cos^{1/2}(\theta) P(\theta) t_p(\theta) \sin^2 \theta J_0(k_1 r \sin \theta) e^{iz \sqrt{k_2^2 - k_1^2 \sin^2 \theta}} d\theta \quad (11)$$

<83> 여기서, $t_p(\theta)$ 는 θ 의 입사각에서의 p-편광의 투과 계수를 나타내고, A는 상수를 나타내고, P(θ)는 동공 아포

디제이션 함수를 나타내고, $J_m(x)$ 는 첫 번째 종류의 m번째 베셀 함수를 나타내고, $\theta_{\max} = \sin^{-1}(NA)$ 는 대물 렌즈의 개구수(NA)에 의해 주어지며, k_1 및 k_2 는 각각 실버 층의 위 및 아래에 있는 매체 내의 파 벡터를 나타낸다. 도 12에 도시한 결과로부터, SPR 여자는 액시콘(axicon)과 유사한 투과 장에서 각 필터 기능을 수행함을 알 수 있다. 이러한 각 필터의 효과를 입증하기 위하여, SPR 여자의 각 폭이 매우 좁은 경우, 투과 곡선은 델타 함수 $t_p(\theta) = t_p(\theta_{sp})\delta(\theta - \theta_{sp})$ 로 개산된다. 따라서, 식 (1) 및 (2)는 다음과 같이 환산된다.

$$E_r(r, \varphi, z) = 2A \cos^{1/2}(\theta_{sp}) P(\theta_{sp}) t_p(\theta_{sp}) \sin(\theta_{sp}) \cos(\theta_{sp}) J_1(k_1 r \sin \theta_{sp}) e^{iz \sqrt{k_2^2 - k_1^2 \sin^2 \theta_{sp}}} \quad (12)$$

$$E_z(r, \varphi, z) = i2A \cos^{1/2}(\theta_{sp}) P(\theta_{sp}) t_p(\theta_{sp}) \sin^2(\theta_{sp}) J_0(k_1 r \sin \theta_{sp}) e^{iz \sqrt{k_2^2 - k_1^2 \sin^2 \theta_{sp}}} \quad (13)$$

<86> SPR 조건 하에서는, $k_2^2 - k_1^2 \sin^2 \theta_{sp} < 0$ 이다. 따라서, 명백히 방사상 및 종방향 성분 모두 z-방향으로 소산된다. 또한, 이들 두 성분은 횡방향 프로파일을 유지한다. 종방향 성분의 경우, 이는 제 0 차수의 소산 베셀 빔이다. 반면에, 횡방향 성분은 제 1 차수의 소산 베셀 빔 파(도넛 형상)이다. 따라서, 소산 베셀 빔은 이 다소

간단한 장비로 발생될 수 있다.

<87> 식 (10) 및 (11)에 의해 주어지는 벡터 회절 모델을 사용하는 수치 시뮬레이션이 도 13a 내지 도 13d에 도시되어 있다. 소산 성질을 강조하기 위하여, 임계각 $\theta_c = \sin^{-1}(n_2/n_1) \approx 41.8^\circ$ 미만의 각 부분에 대응하는 조명의 중앙부가 차단된다. 도 13a는 실버 층 바닥에서 발생하는 소산 베셀 빔의 장 강도 $|E|^2$ 을 보여주고 있다. 방사상 편광 조명으로 정확하고 균질한 스폿이 발생된다. 대조적으로, (도 13b에 도시된) 선형 편광 조명이 사용된다면, 동일한 장 분포는 불균질해지고 더욱 약해질 수 있어서, 영상 처리 및 감지 분야에 부적합하게 된다. 장 강도 횡방향 프로파일이 도 13c에 도시되어 있다. 전체 장에 기여하는 두 개의 장, 즉 방사상 성분 및 종방향 성분이 존재함을 알 수 있다. 종방향 성분은 더욱 강력하며, 전체 장 분포를 좌우한다. 횡방향 프로파일로부터, 메인 로브의 반치폭(full-width-half-maximum; FWHM) 스폿 크기가 대략 $0.343 \lambda_0$ 가 되도록 계산된다. 종방향 성분의 경우, FWHM은 약 $0.303 \lambda_0$ 이다. 빔의 소산 지연 성질이 도 13d에 도시되어 있다. z-축을 따라 $1/e^2$ 점을 발견함으로써 약 $0.285 \lambda_0$ 에서 전파 거리를 계산할 수 있다. 실버 층으로부터 다른 거리에 있는 장 강도 횡방향 프로파일들이 도 14a에 도시되어 있다. 비회절 특성을 예측하기 위하여, 이들 거리에서 정상화된 횡방향 프로파일들이 도 14b에 도시되어 있다. 모든 메인 로브는 거의 상호 중첩되어 있음을 알 수 있으며, 이는 소산 베셀 빔이 정말로 제안된 간단한 장비로 발생될 수 있음을 나타낸다. 메인 로브 형상에 있어서의 약간의 편차는 SPR 여자의 유한한 각 폭에 기인하는 것으로 생각된다.

<88> SPR 여자가 그 주변 환경에 대해 매우 민감하며, 강력한 장 강화(field enhancement)를 제공할 수도 있어서, 근거리 장 광학 영상 처리 및 감지 분야에서는 매력적이라는 것은 잘 알려져 있다. SPR을 사용하는 가상 프로브가 제안되었고 연구되었다. 제안된 방법으로 발생하는 소산 베셀 빔은, 특히 장 강화 특성이 비선형 근거리 장 광학 영상 처리에서 활용될 때, 합당한 공간 해상도를 제공하면서 많은 다른 근거리 장 광학 프로브의 (전형적으로 수십 나노미터 이내의) 근접 조건을 완화할 수 있는 가상 프로브의 뛰어난 후보이다. 예를 들어, 2-광자 영상 처리가 고려된다면, FWHM은 $0.219 \lambda_0$ 이 된다. 실버 박막의 경우에 300 nm 파장의 조명이 사용된다면, 이는 대략 66 nm의 공간 해상도를 제공할 수 있으며, 이는 많은 생의학 영상 처리 및 반도체 도량 분야에서는 충분하다.

<89> 따라서, 소산 베셀 빔의 발생을 위한 간단한 방법이 제시된다. 방사상 편광 빔이 유전체/금속 인터페이스 상에 강력하게 포커싱될 때, 표면 플라즈몬이 여자된다. SPR 여자는 엑시온의 기능을 흉내 낸다. 따라서, 소산 베셀 빔은 금속 박막 이후에 발생된다. SPR의 감도 및 장 강화는 비회절 소산파를 근거리 장 광학 영상 처리 및 감지를 위한 이상적인 가상 팁으로 만든다. 방사상 편광 대신에, 순방향성과 위상 전하의 적절한 조합을 갖는 원형 편광 소용돌이 빔이 조명을 위한 더욱 간단한 대안으로 또한 사용될 수 있음을 지적할 수 있다.

<90> 일반적으로, 이러한 장비로 발생하는 가상 팁의 유효 NA는, 표면 플라즈몬 공명 조건으로 인해, 1보다 약간 더 크다. 이는 가장 작게 달성될 수 있는 스폿 크기(공간 해상도)를 제한한다. 더 작은 스폿 크기를 발생시키기 위하여, 금속 층을 다층 유전체 재료 적층체로 대체할 수도 있다. 이러한 적층체의 예로서, 하우스 (Haus) 등에 의해 기술된 1D 포토닉 밴드 갭 구조(PBG)를 들 수 있다. 적절한 입사 및 출사 매체와 함께 이러한 유형의 1D PBG 적층체를 사용하면, TM 편광 광선에 있어서 매우 큰 장 강화 효과를 달성할 수 있으며, 출사 매체에서의 장이 소산 되도록 할 수 있다. 유효 NA는 1보다 더욱 높게 증가할 수 있다. 방사상 편광 조명과의 조합을 통해, 극도로 한정되고 향상된 소산 베셀 빔이 발생될 수 있다. 또한, SPR 방법과는 반대로, 1D PBG 구조는 TE 편광 광선과 또한 협조한다. 방위상 편광 조명을 사용할 경우, 도넛 형상을 갖는 한정되고 향상된 소산 베셀 빔을 발생시킬 수 있다. 이러한 유형의 빔은 입자 포획 및 조작 등의 응용분야를 가질 수 있다.

<91> **애퍼처리스 근거리 장 스캐닝 광학 현미경 검사(NSOM)에의 응용**

<92> 장 강화의 시뮬레이션

<93> 섬유 내에서의 원통형 편광 모드를 여자하는 능력으로 인해, 개구를 없애면서 종래의 NSOM의 구조를 유지하는 애퍼처리스 NSOM이 제조될 수 있다. 한편, 이 애퍼처리스 NSOM은 애퍼처리스 금속 팁 NSOM과 유사한 고도의 공간 해상도는 물론 강력한 장 강화를 제공한다. 방사상 편광 TM_{01} 모드가 섬유 내에서 전파되어 테이퍼 형상의 팁 단부에 접근함에 따라, 모드는 컷오프 포인트를 지나서 소산 된다. 표면 플라즈몬 파가 여자되고, 팁 단부로 전파된다. 표면 플라즈몬의 한가지 흥미를 끄는 특성은 그 강력한 장 강화 효과이다. 표면 플라즈몬의 여자는 입사 평면 내에 놓이는 전기장을 갖는 TM 편광 광선과 결합한다. 방사상 편광 모드가 금속으로 코팅된 광

섬유 팁 안으로 발사되면, 전체 빔은 섬유의 유전체/금속 인터페이스에 대해 TM 편광됨으로써, 표면 플라즈몬을 발생시키는 매우 효율적인 방법을 제공한다. 구성의 방사상 대칭은 이들 표면 플라즈몬의 구조적인 간섭에 이르게 되어, 팁 부근에서 극도로 강력한 국부 장을 생성하게 된다. 이 강력한 국부 장은 고도의 공간 해상도 프로브로서 사용된다.

<94> 이러한 장 강화 효과는 COMSOL 다중 물리 해석 프로그램, 유한 요소 방법(FEM) 소프트웨어를 이용한 수치적인 모델링을 통해 검증되었다. 도 15는 방사상 편광 조명 하에서의 하나의 완전하게 금속화된 팁의 FEM 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 상부 플롯은 장 분포의 이차원 단면적, 삼차원 슬라이스, 및 삼차원 메시 플롯을 보여주고 있다. 강력하고 국부적인 장이 팁의 정점에서 나타나고 있음을 알 수 있다. 하부 플롯은 팁의 정점에서 10 nm 떨어진 위치에서의 라인 스캔을 보여주고 있다. 10 nm 미만의 FWHM을 획득할 수 있다. 팁의 중심은 1.5의 굴절률을 갖는 실리카인 것으로 추정된다. 팁은 40 nm의 실버 코팅으로 전체적으로 금속화될 수 있다. 팁 상의 실버 코팅은 대략 30 nm 내지 대략 100 nm의 두께를 가질 수 있다. 팁의 단부는 5 nm의 반경을 갖는다. 633 nm의 파장을 갖는 방사상 편광 빔이 시뮬레이션을 위해 사용된다. 250을 초과하는 장 강화 계수가 그러한 팁의 설계를 통해 획득될 수 있음이 발견되었다. 강도는 62500 배 강화된다. 팁의 정점에서 10 nm 떨어진 위치에서의 장 분포는 10 nm의 반치폭(FWHM)을 갖는다. 시뮬레이션으로부터, 강화 계수는 팁의 기하학 및 조명에 크게 의존한다는 것을 발견하였다. 예를 들어, 강화는 팁의 꼭지각, 팁의 길이, 팁의 입구에서의 방사상 편광 빔의 크기에 의존한다. 몇몇 경우에 있어서는, 수백의 장 강화를 획득할 수 있다. 반면에, 다른 경우에 있어서는, 단지 대략 1의 장 강화를 얻을 수 있다. 그러나, 방사상 편광의 경우, 항상 장 강화가 존재한다. 강화를 최적화하는 간단한 방법은 팁의 입구에서의 조명 크기를 조정하는 것이다. 이것은 조명 내에 조리개를 삽입하고 조명 광학 기구의 유효 NA를 조정함으로써 달성된다.

<95> 상기한 시뮬레이션에서는, 방사상 편광이 사용되었다. 또 다른 실시예에서는, 동일 표면 플라즈몬과 장 강화 효과를 발생시키는 더욱 간단한 대안으로서, 손방향성 및 위상 전하의 적절한 조합을 갖는 원형 편광 소용돌이 빔이 사용될 수 있다. 올바른 조합은 선형 편광자 후방의 1/4 파판을 회전시키거나 SPE 방위를 플립핑함으로써 달성될 수 있다. 이 경우에, 장 강화 계수는 방사상 편광이 사용되는 경우의 대략 50%에相当하게 된다. 그러나, 원형 편광 소용돌이 빔을 사용하는 장비는 더욱 간단하고 작동이 쉽다.

<96> 튜닝 포크에 기반하는 애퍼처리스 NSOM 시스템

<97> 표준 튜닝 포크 전단력 피드백을 이용하는 애퍼처리스 NSOM을 구성할 수 있다. 애퍼처리스 NSOM 구조가 도 16에 예시되어 있다. 큰 시계를 갖는 영상 처리를 위하여 할로겐 전구와 CCD 카메라가 부착되어 있다. 애퍼처리스 NSOM 팁이 도면에 삽입 도시되어 있다. 금속 코팅의 개방은 필요하지 않다. 투과 모드가 예시되었지만, 반사 모드 역시 쉽게 실현될 수 있다. 장비는 CV 빔 발생 블록과, 독립형 광학 현미경 블록과, 신호 검출 블록으로 분류되어 있다. CV 빔 발생 블록은 레이저 출력을 방사상 편광으로 변환한다. 애퍼처리스 NSOM 블록은 광섬유 내의 방사상 편광 빔을 금속으로 코팅된 테이퍼 형상의 애퍼처리스 팁과 결합시킨다. 팁은 전단력 튜닝 포크 피드백을 이용하여 샘플에 접근한다. 전달된 신호는 독립형 현미경의 무한 교정 오일 침지 대물 렌즈에 의해 수집되고 검출 블록으로 보내어진다. 독립형 현미경 블록은 샘플의 위치 선정, 다중 광선 경로 조명 및 검출을 돕는데 필요하다. 튜닝 포크 및 애퍼처리스 팁은 XYZ 피에조 스캐너 및 디더링 피에조를 구비한 스캐닝 헤드 상에 장착되어 있다 (도 16 참조). 토포그래프 정보는 z-피에조 전압 및 튜닝 포크 피드백으로부터 획득된다. 고해상도 영상이 래스터 스캐닝을 통해 획득된다. 낮은 프로파일의 나노 위치 선정 장치가 샘플 스캐닝을 위한 독립형 현미경의 스테이지 상에 장착되어 있다. 샘플 스캐닝을 위하여, XYZ 스캔이 상호 분리될 수 있다. z-피에조를 갖춘 스캐닝 헤드는 토포그래프를 발생시키는데 책임이 있다. 샘플은 이차원 맵핑에 책임이 있는 XY 스캐너 상에 장착된다. CV 빔 발생 블록의 출력은 또한 독립형 현미경의 하나의 조명 포트 내로 결합되고, 오일 침지 렌즈에 의해 다른 응용을 위한 샘플 내로 포커싱될 수 있다. TE 냉각 전하 결합 소자(CCD) 어레이 검출기는 물론 광전자 증배관(PMT)과 단일 광자 카운팅 아발란치 포토다이오드 검출기(APD)를 포함하는 여러 가지 유형의 검출기들이 영상 분광계와 조합되어 사용된다. PMT/APD로부터의 출력은 광자 카운팅 시스템에 연결된다. CCD 어레이는 빠른 스펙트럼 획득 및 영상 처리를 위해 사용된다. 노이즈 배제하기 위하여, 레이저 빔은 절단될 수도 있으며 고정(lock-in) 검출이 사용될 수 있다. 할로겐 전구 소스 및 CCD 카메라 또한 큰 시계를 갖는 관찰 및 기록을 위하여 독립형 현미경에 부착되어 있다.

<98> 금속으로 코팅된 애퍼처리스 섬유가 튜닝 포크에 장착될 수 있다. 튜닝 포크를 기계적으로 구동하기 위하여 디더링 피에조가 사용된다. 튜닝 포크의 운동은 석영 내에서 유도되는 응력에 의해 발생하는 압전 전류에 의해 관측된다. 팁과 샘플 간의 거리는 공명 위상을 관측하거나 팁과 샘플 간의 상호작용에 의해 유도되는 진폭 변화를 관측함으로써 조절된다. 튜닝 포크에 의한 법선력 및 전단력의 검출은 보고된 바 있다. 이러한 애퍼처리

스 NSOM에 있어서는, 전단력 모드가 사용된다. 힘의 검출을 위한 튜닝 포크의 사용은 여분의 레이저 소스 및 영상을 얻기 이전의 지루한 정렬 절차의 필요성을 제거한다. 신호는 반사 모드 (수집 광학 구조가 샘플에 대하여 조명과 동일한 쪽에 놓인다) 또는 투과 모드 (샘플이 원하는 신호에 대해 빛을 통과시키는 경우)에서 수집될 수 있다. 샘플의 위치 선정 및 광학 신호 수집을 위하여 도립형 현미경이 사용될 수 있다. 이 도립형 현미경은 다른 레이저 소스 및 검출을 수월하게 하기 위한 다중 광학 입/출력 포트를 구비한다. 또한, 이 도립형 현미경은 NSOM의 높은 신호-대-잡음비 하위 50nm 해상도를 달성하는데 있어서 결정적인, 떠돌이 광선 거절 광학 설계 및 무진동 기계 설계의 특징을 갖는다.

<99> 그러나, 팁 상에 국부적인 모드를 여자하기 위해서는 정교한 조명 기하학이 필요하다. 효율은 조명의 편광에 크게 의존하며, 따라서, 조명의 극히 주의 깊은 정렬이 요구된다. 기존의 NSOM 기술과 비교하면, 제안되는 애퍼처리스 NSOM은 다음의 장점을 갖는다. 1) 애퍼처 NSOM의 간단한 구조를 유지한다. 2) 세심한 애퍼처 개구 요건을 제거한다. 3) 대략 크기 만큼 NSOM의 공간 해상도를 향상시킨다. 4) 금속 팁 애퍼처리스 NSOM에 필적하는 국부 장 강화를 제공한다. 5) 애퍼처리스 금속 팁 NSOM에서 요구되는 복잡한 정렬을 피한다.

<100> 캔틸레버/튜닝 포크 하이브리드 애퍼처리스 NSOM

<101> 섬유 팁 기반 NSOM의 폭넓은 응용을 제한하는 결점 중 한가지는 광섬유 팁 자체의 예민함과 허약함이다. 따라서, 숙련된 기술자와 극도로 주의 깊은 취급을 필요로 한다. 대조적으로, 원자력 현미경(ATM) 프로브는 더욱 단단하고, 팁의 반경은 매우 작게 만들 수 있다. 금속 ATM 팁을 이용하는 애퍼처리스 NSOM은 입증된 우수한 공간 해상도와 양호한 장 강화 효과를 갖는다. 그러나, 최적의 장 강화를 달성하기 위해서는, 포커싱된 레이저 빔의 편광은 팁에 대해 평행할 필요가 있다. 이것은 측방향 조명 또는 초점의 중심으로부터 팁의 약간의 변위를 필요로 한다. 포커싱된 레이저 스폿 및 팁의 극도로 주의 깊은 정렬이 요구된다. 이에 더하여, 팁과 샘플 간의 거리를 조절하고 토포그래프 영상을 발생시키기 위해서는, 전형적으로 레이저 빔이 캔틸레버 상에 정렬되고, 위치 감지 검출기 상에서 반사된다. 레이저 빔의 정렬은 종종 매우 지루하며 영상의 감도 및 품질에 현저한 영향을 미친다. 따라서, 이들 애퍼처리스 NSOM의 동작은 매우 시간 소모적이고, 그 결과는 경험에 크게 의존한다.

<102> 이러한 난문을 해결하기 위하여 고도로 포커싱된 방사상 편광을 사용하는 캔틸레버 기반 튜닝 포크 법선력 애퍼처리스 NSOM이 제시된다. 그 구조가 도 17에 예시되어 있다. 금속으로 코팅된 AFM 프로브가 100 kHz 튜닝 포크 센서의 한쪽 단부에 단단히 부착되어 있다. AFM 프로브의 부착은 원하는 비대칭 공명 모드에 필요한 두 단부 사이의 질량 비대칭을 생성한다. 팁과 샘플 간의 거리는 진폭을 관측하거나 튜닝 포크 피드백 신호의 위상 지연을 관측함으로써 조절된다. 튜닝 포크 피드백은 지루한 레이저 다이오드와 캔틸레버의 정렬을 배제함으로써, 더욱 사용자 친화적이고 경험과는 관계가 없는 동작을 가능하게 한다. 금속화된 AFM 프로브의 팁은 도립형 현미경(도 16)으로부터 강력하게 포커싱된 방사상 편광에 의해 조명된다. 방사상 편광의 사용은 애퍼처리스 NSOM에서의 장 강화에 결정적인, 팁에 평행한 극도로 강력한 종방향 장을 생성한다. 비교로서, 포커싱된 선형 편광 및 방사상 편광의 종방향 성분들이 계산되고 비교된다. 이들 편광은 동일한 파워를 전달하며, 동일한 조건 하에서 포커싱된다. 방사상 편광은 장 강화 효과에 책임이 있는 종방향 성분의 적어도 4배 더 강력한 종방향 성분을 제공한다. 매우 높은 신호-대-잡음비(SNR) 향상은 비선형 광학 분광 기술에서 획득될 수 있다. 선형 편광과는 대조적으로, 포커싱된 방사상 편광의 종방향 성분은 초점의 중심에서 최고에 달한다. 따라서, 팁을 여자 장과 정렬하는 것이 이전의 팁-강화 애퍼처리스 NSOM보다 더욱 쉬워진다.

<103> 또 다른 동작 모드에 있어서는, 강력하게 포커싱된 방사상 편광이 상부로부터 금속화된 AFM 프로브를 조명할 수 있다. 대부분의 Si 또는 SiN 계열의 AFM 프로브의 경우, 빛을 통과시킬 수 있는 파장을 선택할 필요가 있다. 이들 파장은 근적외선 내에 놓인다. 시장에서 구입할 수 있는 AFM 프로브들 (은, 금 또는 알루미늄 등의) SPR을 지지할 수 있는 금속으로 간단히 코팅할 수 있다. 방사상 편광이 팁 안으로 결합될 때, 애퍼처리스 NSOM 프로브로서 사용될 수 있는 팁 정점에서 강력한 장이 발생된다. 이것은 애퍼처리스 NSOM 프로브를 제조하는 간단한 방법을 제공한다. 이에 더하여, 결합 효율을 향상시키기 위하여 AFM 프로브 캔틸레버 상에 마이크로 렌즈를 조립하는 것이 가능하다 (도 18).

<104> 기존의 NSOM 기술과 비교하여, 제안되는 애퍼처리스 NSOM은 다음과 같은 현저한 장점을 갖는다. 1) 더욱 단단한 팁. 2) 복잡한 정렬 요건을 제거함으로써 사용자 친화적이고 쉬운 동작. 3) NSOM의 공간 해상도를 10 nm보다 더 좋게 향상시킴. 4) 가장 높은 국부 장 강도를 제공함으로써, 더욱 빠른 영상 획득이 가능해 짐.

<105> 캔틸레버 기반 애퍼처리스 NSOM 시스템

- <106> 낮은 처리량의 결점을 극복하기 위하여, NSOM을 위한 캔틸레버 기반 나노-애퍼처 프로브가 개발되었다. 전형적으로, 이들 프로브는 AFM/스캐닝 프로브 현미경(SPM) 플랫폼과 호환된다. 이들 캔틸레버 기반 애퍼처 NSOM은 방사상 편광을 사용하는 애퍼처리스 NSOM으로 변환될 수 있다. 이들 애퍼처 NSOM을 변형하기 위해서는, 방사상 편광(또는 원형 편광 소용돌이 빔)에 대한 조명을 변경할 필요가 있고, 프로브를 완전히 금속화된 애퍼처리스 프로브로 변경할 필요가 있다. 애퍼처리스 프로브는 완전한 금속화에 의해 이들 캔틸레버 기반 애퍼처 프로브로부터 만들어질 수 있다. 또는, 이전의 섹션에서 설명한 애퍼처리스 프로브를 사용할 수 있다. 이것은 애퍼처 NSOM 및/또는 AFM으로서의 원래의 기능을 유지하면서 애퍼처리스 NSOM을 개발하는 경제적인 방법을 제공하며, 따라서, 참으로 다재다능하고 다기능의 도구를 만들 수 있다.
- <107> **애퍼처리스 NSOM을 사용하는 나노-라만**
- <108> 나노-라만(nano-Raman) 시스템은 이전 섹션에서 설명된 애퍼처리스 NSOM과 라만 분광 기술을 조합함으로써 구성할 수 있다. 강력한 장 강도 및 극도로 높은 해상도로 인하여, 매우 국부적인 영역으로부터 신뢰할 수 있는 라만 스펙트럼을 획득할 수 있다. 그러한 나노-라만 시스템의 일례가 도 19에 도시되어 있다. 라만 분광 시스템은 애퍼처리스 NSOM 시스템에 부착되며, 샘플의 화학적 조성은 물론 구조적인 특성에 대한 정보가 라만 스펙트럼의 특징을 연구함으로써 분석될 수 있다. 애퍼처리스 NSOM 기술과 조합됨으로써, 샘플의 극도로 국한된 영역으로부터의 라만 스펙트럼이 획득되고 분석될 수 있다. 이 나노-라만 프로브는 재료의 공간적으로 분해된 미소기계 특성과 화학적 조성을 확인하고 분석하는 전도 유망한 도구이며, 따라서, 10 nm 미만의 공간 해상도로 재료의 토폰그래프 특성, 미소기계 특성, 미소화학 특성의 포괄적인 나노특성화를 제공할 수 있다.
- <109> 공간 해상도를 나노미터 범위로까지 더욱 향상시키기 위하여, AFM 및 NSOM 등의 스캐닝 프로브 현미경(SPM)이 라만 분광 기술과 조합되어 사용될 수 있다. 더욱 높은 공간 해상도 외에, 나노-라만 분광 기술은 마이크로-라만 및 종래의 라만 분광 기술과 비교하여 기본적인 차이가 있다. 스캐닝 프로브 부근에서의 큰 장 기울기로 인하여, 나노-라만 분광 기술은 마이크로-라만 기술보다 더욱 많은 정보를 제공한다.
- <110> 이에 더하여, 라만 신호가 전송 모드를 통해 수집되는 경우, 라만 신호는 더욱 향상될 수 있다. 라만 신호가 쌍극자 복사 에너지로부터 나온다고 가정하면, 인터페이스 부근 또는 인터페이스에서의 쌍극자 복사 에너지가 높은 굴절률의 기관에 강력하게 결합된다는 것은 잘 알려져 있다. 따라서, 라만 신호의 대부분은 수집되지 않고 반사 모드 검출로 검출된다. 이들 광자는 내부 전반사각을 벗어나 있고, 변형 없이는 후방 쪽으로부터 방출되지 않기 때문에, 이 신호 부분은 단순히 투과 모드로는 검출될 수 없다. 그러나, 이들 "잃어버린" 광자들을 수집하기 위하여 고체 침지 렌즈 및 표면 아래 영상 처리를 위하여 개발된 기술들이 사용될 수 있다. 이들 기술을 사용하면, 라만 신호 강도 및 수집 효율이 현저하게 향상된다. 본질적으로, 기관의 굴절률과 부합되는 렌즈 캡을 사용할 수 있다. 렌즈 캡은, 렌즈 캡과 기관이 반구형 렌즈 또는 수퍼 SIL을 구성하도록, 설계된다. 그러면, 이들 "잃어버린" 광자들은 기관에 결합되어 검출기에 도달할 수 있게 된다. 그러한 구조의 일례가 도 19에 예시되어 있다. 도 19에서는, 여자되고 강력하게 국부화된 표면 플라즈몬에 대한 조명으로서 원형 편광 소용돌이(CPV) 빔이 사용된다. 나선형 위상 요소(SPE), 1/4 파 판, 편광자가 회전 스테이지 상에 장착되어 있다. 편광자 및 1/4 파 판의 방위는 원형 편광을 발생시킬 수 있도록 설정되어 있다. 나선형 위상 요소는, CPV 빔이 포커싱될 때 강력한 종방향 성분이 발생될 수 있도록, 그 방위가 정해진다. 투과 모드가 예시되어 있다. 반사 모드 또한 도면 내에서 단속선으로 예시되어 있다. 신호 처리 유닛은 전자 제어 피드백과 라만 분광 데이터를 모두 처리한다. 조명 경로 내의 조리개는 팁 정점에서 최적화된 강화 효과를 얻기 위하여 조정될 수 있다. 프로브는, 레이저 파장에 따라 그리고 반사 모드가 사용되는지 아니면 투과 모드가 사용되는지에 따라, 다른 재료로 만들어질 수 있다. 프로브 재료는 조명 파장에 대해 빛을 통과시킬 수 있어야 한다. 프로브는 금속(은, 금, 또는 알루미늄 등등) 박막으로 완전하게 코팅된다. 신호 강도와 수집 효율을 더욱 향상시키기 위하여 샘플 기관의 굴절률과 부합되는 고체 침지 렌즈 캡이 또한 단속선으로 도시되어 있다. 이것은 신뢰할 수 있는 분광 분석을 위한 나노-라만의 또 다른 현저한 개량이다. 그러한 응용의 일례는 실리콘 기관을 갖는 샘플이다. 이 경우, 1.06 미크론 파장의 근적외선(NIR) 여자를 사용할 수도 있다. 그러면, 라만 대역은 기관에 대해서 빛을 통과시키게 되고, 신호를 향상시키는 제안된 렌즈 캡 기술을 이용하여 수집될 수 있다. 관심의 대상이 되는 라만 대역이 샘플에 대해서 빛을 통과시킬 수 있는 한, 다른 파장이 또한 사용될 수 있다.
- <111> 위에서 설명한 애퍼처리스 NSOM 및 나노-라만 시스템은 반도체 제조, 재료의 연구 및 개발, 생물과학 등의 수많은 응용분야 및 고해상도 광학 영상 처리를 필요로 하는 많은 다른 연구 영역을 갖는다. 방사상 편광 대칭 및 표면 플라즈몬 여자로부터 기인하는 강력한 장 강화는 나노 규모의 해상도를 갖는 많은 선형 및 비선형 광학 영상 처리(이차 고조파 영상 처리, 삼차 고조파 영상 처리 등등)에 대해 더욱 문을 열어 놓는다. 이들 새로운 영상 처리 능력은 틀림없이 위에서 언급한 범위 밖에 있는 기타 많은 연구 영역 및 분야에 이익을 준다. 이에 더

하여, 원형 편광 소용돌이 빔은 물론 CV 빔의 포커싱 특성은 고해상도 영상 처리는 물론 나노-입자 포획 및 조작과 연관된 많은 응용분야를 갖는다. 이하에서는, 위에서 설명한 도구의 잠재적인 응용분야의 예들의 일부를 설명하기로 한다.

<112> 시력 검사를 위한 광학 현미경으로부터, 표면 분석을 위한 백색광선 간섭계 및 복잡한 박막 특성화를 위한 분광 타원계에 이르기까지, 광학 도량 기술은 강력한 도구이고 반도체 조립 라인에서 광범위하게 사용되어 왔다. 그러나, 나노 석판 인쇄술 및 미소 조립의 엄청난 발전은 광학 도량 기술의 능력을 크게 확장하였다. 반도체를 위한 국제 기술 로드맵(ITRS)에 따르면, 향후 수년 안에 해결책을 긴급히 요하는 45 nm 노드 및 그 이상의 키 도량 영역 중 하나는 장치 치수의 구조적이고 기본적인 분석이다. "재료 특성화 및 도량 방법은 장치 치수와 관련된 인터페이스 층, 불순물 위치, 및 원자 농도의 제어를 위해 필요하다." 이전 섹션에서 설명된 나노-라만 시스템은 이들 기술적인 도전에 대한 매우 진도 유망한 해결책이다. 재료 미소기계 특성, 국부적인 변형, 및 조성은 라만 시프트에 영향을 미친다. 따라서, 라만 시프트 영상의 측정은 샘플에 대한 구조적인(응력/변형) 및 기본적인 정보를 제공할 수 있다. 10 nm 보다 높은 해상도를 가질 경우, 나노-라만 시스템은 반도체 산업에 있어서 장치 레벨의 구조적이고 기본적인 도량에 대한 발전 가능한 해결책을 제공할 수도 있다. 충분히 발달한 NSOM 기술을 사용할 경우, 인-라인 도량을 위하여 그리고 산출량을 증가시키기 위하여, 애퍼처리스 NSOM 및 나노-라만이 반도체 조립 라인에 통합될 수도 있다.

<113> 독특한 기계적, 열적, 전기적, 광학적 특성 및 양자 제한 효과로 인하여, 1990년대 초에 발견된 이래로 카본 나노 튜브(CNT)에 대해 집중적으로 연구가 이루어져 왔다. 광학 특성들 중에서, 라만 "시그너처"가 단일 월 카본 나노 튜브(SWCNT)를 특성화하기 위하여 종종 사용된다. 라만 분광 기술은 분자 진동 및 회전의 연구를 위한 강력한 도구로서의 역할을 수행하여 왔다. 특정 분자들은 스펙트럼 시프트에 있어서 그들만의 독특한 특징 또는 "지문"을 가지고 있다. 라만 시프트의 연구를 통해, 샘플에 대한 풍부한 정보를 얻을 수 있다. SWCNT의 경우, 라만 스펙트럼의 여러 가지 다른 모드가 확인되었고 다른 특성들과 결합되었다. 예를 들어, 튜브 직경, 키랄성(chirality), 구조 및 전도성(금속 또는 반전도성)을 특성화하기 위하여 이른바 방사상 호흡 모드(RBM, ~100 - 300 파수)가 사용될 수 있고, 결합을 특성화하기 위하여 D 대역(~1300 파수)이 사용될 수 있다. SWCNT에 대한 대부분의 분광 연구는 해상력의 결여로 인하여 함께 평균화된 측정을 보여준다. 최근에, 팁-강화 NSOM을 갖는 개별적인 SWCNT의 성공적인 나노 규모의 라만이 보고된 바 있다 [35]. 신뢰할 수 있는 나노-라만 측정의 실현은 라만 분광 분야에서 "성배"로서 고려된다. 새로운 애퍼처리스 NSOM의 강력한 장 강화로 인하여, 라만 신호는 현저히 증강되었고, 따라서 SWCNT의 신뢰할 수 있는 포괄적인 특성화가 가능해진다. 이러한 연구의 주된 목표 중의 하나는 합성된 SWCNT를 특성화하고 그들의 성장 과정을 완전하게 하는 것이다. 이에 더하여, 근거리 장 라만 분광 기술은 원거리 장 라만 분광 기술과는 현저히 다른 특징을 가질 수 있는 것으로 보고된 바 있다 [36]. 이는 팁 정점 부근에서의 강력한 장 기술기에 의해 야기되는 선택 규칙 변경에 기인한다. 그러나, 그러한 차이는 라만의 SWCNT 연구에서는 관찰되지 않았다. 이는 아마도 이전의 연구에서의 더 낮은 이용가능한 신호 레벨에 기인하는 것일지도 모른다. 본 발명자들은 이러한 차이를 입증하고, SWCNT에서의 응용과 다른 나노 재료의 특성화를 연구할 것이다. 지금까지 연구되지 않은 CNT의 한가지 특성은 플라즈몬 특성이다. 일련의 나노 금속 입자들을 사용하는 플라즈몬 안내가 보고되었으며, 강력한 광자 구속과 관련된 많은 응용분야가 개발되고 있다. SWCNT 및 CNT 번들이 고도로 전도될 있음이 알려져 있다. SWCNT 번들의 SWCNT 내에서 플라즈몬을 여자하고 전파하는 것이 가능한가? 플라즈몬이 얼마나 강력하게 안내될 수 있는가? 전파 손실은 무엇인가? 이들은 대답이 필요한 흥미를 자아내는 기본적인 질문들 중 단지 몇몇에 불과하다. 본 발명자들은 새로운 애퍼처리스 NSOM과 관련하여 보고된 실험과 유사한 실험을 설계할 것이며, CNT의 플라즈몬 특성을 연구할 것이다. 성공적이라면, 이는 센서 및 광자/플라즈몬 회로에 있어서 CNT의 많은 잠재적인 응용을 위한 기회를 제공하게 될 것이다.

<114> 셀을 구획하는 기능에 더하여, 셀 멤브레인은 물질 대사, 신호화, 및 셀 트래피킹(trafficking) 등의 많은 중대한 처리에 또한 포함된다. 그에 더하여, 많은 지질 대사 산물들이 염증, 번식, 수면-각성 주기의 조절, 노화와 관련된 생리학적인 이벤트의 국부적인 매개자로서 작용함을 발견하였다. 이들 셀 처리에 포함되는 멤브레인 내 상호작용에 대한 이해를 통해, 다양한 인간 질병과 싸울 수 있는 기본적으로 새로운 기회들을 갖게 된다. 많은 주목을 받은 멤브레인 생물학의 특별한 양상은 아라키돈(arachidonic) 산 캐스케이드이다. 다중 불포화 아라키돈 산(3)의 물질 대사의 결과로서 광범위한 생리학적 효과를 갖는 많은 잠재적인 국부 매개자가 생성된다. 이들 많은 대사 산물들은 염증 반응 내에 포함되는 것으로 알려져 있다. 그러나, 멤브레인에 구속된 아라키돈 산의 비효소 촉매 산화를 통해 생성되는 이소프로스탄에 대해서는 별로 알려져 있지 않다. 옥시던트 스트레스의 신뢰할 수 있는 지표로서의 기능을 수행하는 것 외에, 많은 이소프로스탄은 염증 이벤트와 관련된 강력한 생물학적 활동을 나타내었다. 제안된 편광 강화 현미경 기술은 전례 없는 공간 해상도 및 감도를 갖는 이들 지질

산화 산물의 상호 작용 및 기능을 확인하고 연구하는 새로운 분광 기술을 가져오는 엄청난 기회를 제공한다. 이들 기술은 멤브레인 및 멤브레인 내 연구에는 이상적으로 적합하다. Cy5 및 BODIPY R6G 석시니미딜(succinimidyl) 에스테르 등의 전성기 라벨이 이들 지질 대사 산물의 멤브레인 상호 작용을 정밀 조사하는데 사용될 수 있다. 이들 상호 작용의 라벨 프리 검출을 위하여 금 나노 입자 및 라만 분광 기술이 또한 적용될 수도 있다. 활성 라벨 이소프로스탄 인 지질이, 셀 멤브레인의 이차원 구속 내에서의 결합은 물론, 대사 산물의 위치, 수명, 분포를 정밀 조사하는데 사용될 수 있다. 잠재적으로, 단일 분자 라벨에 대한 정보가 레이저 트래핑 NSOM은 물론 애퍼처리스 NSOM, 표면 플라즈몬 현미경으로 달성될 수도 있다. 이에 더하여, 멤브레인의 생물 물리화학적 특성의 변경에 대한 통찰이 이들 기술로 또한 드러날 수도 있다. 지질 산화는 셀 멤브레인의 물리 화학적 특성을 현저히 변경할 수 있음은 이미 알려져 있는 사실이다. 새로운 기술은 셀 멤브레인 내에서의 산화된 인 지질의 집합 상태 및 위치를 포함하는 지질 분포의 더욱 정밀한 평가를 허용한다. 이들 지질 산화 부산물의 수명, 분포, 상호 작용 및 물리적 효과에 대한 현저한 통찰은 제안되는 연구를 통해 이용가능해 질 것으로 기대된다. 이들 연구는 당뇨병의 산화 손상을 포함하는 다른 질병 및 상태는 물론, 산화 스트레스의 기본적인 기제에 관계되는 유용한 정보를 또한 제공할 수도 있다.

<115> "바람직하게는", "일반적으로는", "전형적으로는"이라는 용어는 청구되는 발명의 범위를 제한하거나 어떤 특징들이 청구되는 발명의 구조 또는 기능에 결정적이거나, 필수적이거나, 중요하다는 것을 암시하기 위하여 본 명세서에서 사용되고 있지 않음에 주목할 필요가 있다. 오히려, 이들 용어의 사용 의도는 단지 본 발명의 특정 실시예에서 활용되거나 활용되지 않을 수도 있는 대안적이거나 추가적인 특징을 강조하기 위한 것이다.

<116> 본 발명을 설명하고 정의하기 위하여, "사실상"이라는 용어가 양적인 비교, 값, 측정, 또는 다른 표현에 기인할 수도 있는 고유의 불명확한 정도를 나타내기 위하여 본 명세서에서 사용되고 있음에 주목할 필요가 있다. "사실상"이라는 용어는 논의되는 주제의 기본적인 기능의 변화를 도출함이 없이 상태 참조로부터 양적 표시가 변동될 수도 있는 정도를 나타내기 위하여 본 명세서에서 또한 사용된다.

<117> 특정한 방법으로 또는 기능의 특별한 특성을 구현하기 위하여 "구성된다"라는 본 발명의 성분의 상세한 설명은 의도된 사용의 설명과는 대립되는 구조적인 설명이다. 예를 들어, 레이저 빔을 특정 방식으로 변환하기 위하여 "구성된다"라는 빔 발생 어셈블리와 도립형 광학 현미경 어셈블리에 대한 설명은 빔 발생 어셈블리와 도립형 광학 현미경 어셈블리의 기존의 물리적 조건을 나타내며, 그 자체로서 구조적인 특징의 명확한 설명으로서 취급된다.

<118> 이상과 같이, 특정 실시예를 참조하여 본 발명이 상세히 설명되었지만, 이하의 청구범위에서 한정되는 발명의 범위를 벗어나지 않는 한 본 발명에 대해 변형 및 변경이 가능함이 명백하다. 특히, 본 명세서를 통해 본 발명의 몇몇 양상이 바람직하거나 특히 유리한 것으로 확인되지만, 본 발명은 발명의 바람직한 양상에 제한되는 것은 아님이 예상된다.

도면의 간단한 설명

<19> 이하, 본 발명의 특정 실시예들을 첨부 도면을 참조하여 상세히 설명하기로 한다. 도면에서, 동일한 구조에 대해서는 동일한 참조번호를 부여한다.

<20> 도 1a 내지 도 1c는 원통형 벡터 빔의 예들을 예시한 도면이다.

<21> 도 2a는 본 발명의 일 실시예에 따른 원통형 빔 발생 방법을 예시한 도면이다.

<22> 도 2b는 본 발명의 일 실시예에 따라 광섬유 안으로 원통형 벡터 빔을 실험적으로 발사하는 방법을 예시한 도면이다.

<23> 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 방사상 편광을 생성하기 위한 기하학을 예시한 도면이다.

<24> 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 특정 개구수에서의 장 분포를 보인 그래프이다.

<25> 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 고도로 포커싱된 방사상 편광의 축방향 성분을 보인 그래프이다.

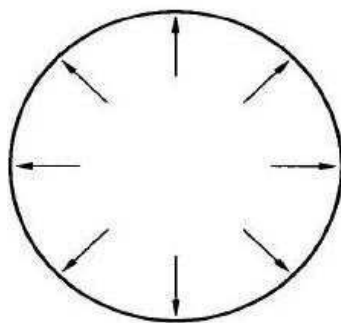
<26> 도 6a 내지 도 6d는 본 발명의 일 실시예에 따른 전하 $m = 0$ 을 갖는 고도로 포커싱된 왼손 원형 편광 소용돌이 빔의 이차원 장 분포를 예시한 도면이다.

<27> 도 7a 내지 도 7d는 본 발명의 일 실시예에 따른 전하 $m = -1$ 을 갖는 고도로 포커싱된 왼손 원형 편광 소용돌이 빔의 이차원 장 분포를 예시한 도면이다.

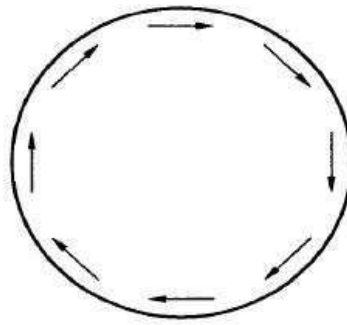
- <28> 도 8a 내지 도 8d는 본 발명의 일 실시예에 따른 전하 $m = -1$ 을 갖는 고도로 포커싱된 왼손 원형 편광 소용돌이 빔을 갖는 플랫탑 (flat-top) 포커싱을 예시한 도면이다.
- <29> 도 9a 내지 도 9d는 본 발명의 일 실시예에 따른 전하 $m = -2$ 를 갖는 고도로 포커싱된 왼손 원형 편광 소용돌이 빔의 이차원 장 분포를 예시한 도면이다.
- <30> 도 10은 본 발명의 일 실시예에 따른 소산 베셀(Bessel) 빔 발생을 위한 장비를 예시한 도면이다.
- <31> 도 11a 및 도 11b는 본 발명의 일 실시예에 따른 유전체/금속 인터페이스 상에 입사되는 p-편광 광선의 반사 및 투과 계수의 계산된 크기와 입사각의 관계를 예시한 도면이다.
- <32> 도 12는 본 발명의 일 실시예에 따른 반사 이후의 대물 렌즈의 후방 초점 평면에서의 시뮬레이션된 강도 분포를 예시한 도면이다.
- <33> 도 13a 내지 도 13d는 본 발명의 일 실시예에 따른 벡터 회절 이론을 이용한 수치 시뮬레이션 결과를 예시한 도면이다.
- <34> 도 14a 및 도 14b는 본 발명의 일 실시예에 따른 거의 일정하게 유지되는 빔의 메인 로브(lobe) 형상을 예시한 도면이다.
- <35> 도 15는 본 발명의 일 실시예에 따른 유한 요소 방법의 시뮬레이션 결과를 예시한 도면이다.
- <36> 도 16은 본 발명의 일 실시예에 따른 튜닝 포크 전단력 애퍼처리스(apertureless) 근거리 장 스캐닝 광학 현미경 검사를 예시한 도면이다.
- <37> 도 17은 본 발명의 일 실시예에 따른 방사상 편광 여자(excitation)를 갖는 법선력 튜닝 포크 애퍼처리스 근거리 장 스캐닝 광학 현미경 검사를 예시한 도면이다.
- <38> 도 18은 본 발명의 일 실시예에 따른 마이크로렌즈를 갖는 애퍼처리스 근거리 장 스캐닝 광학 현미경 검사 프로브를 예시한 도면이다.
- <39> 도 19는 본 발명의 일 실시예에 따른 애퍼처리스 근거리 장 스캐닝 광학 현미경 검사에 기초하는 나노-라만(Raman) 시스템의 구체적인 일례를 예시한 선도이다.

도면

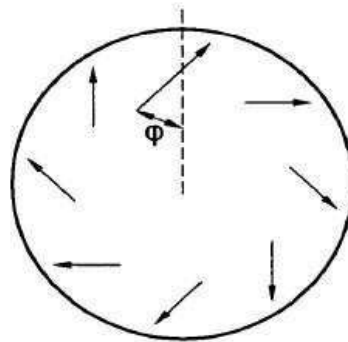
도면1a



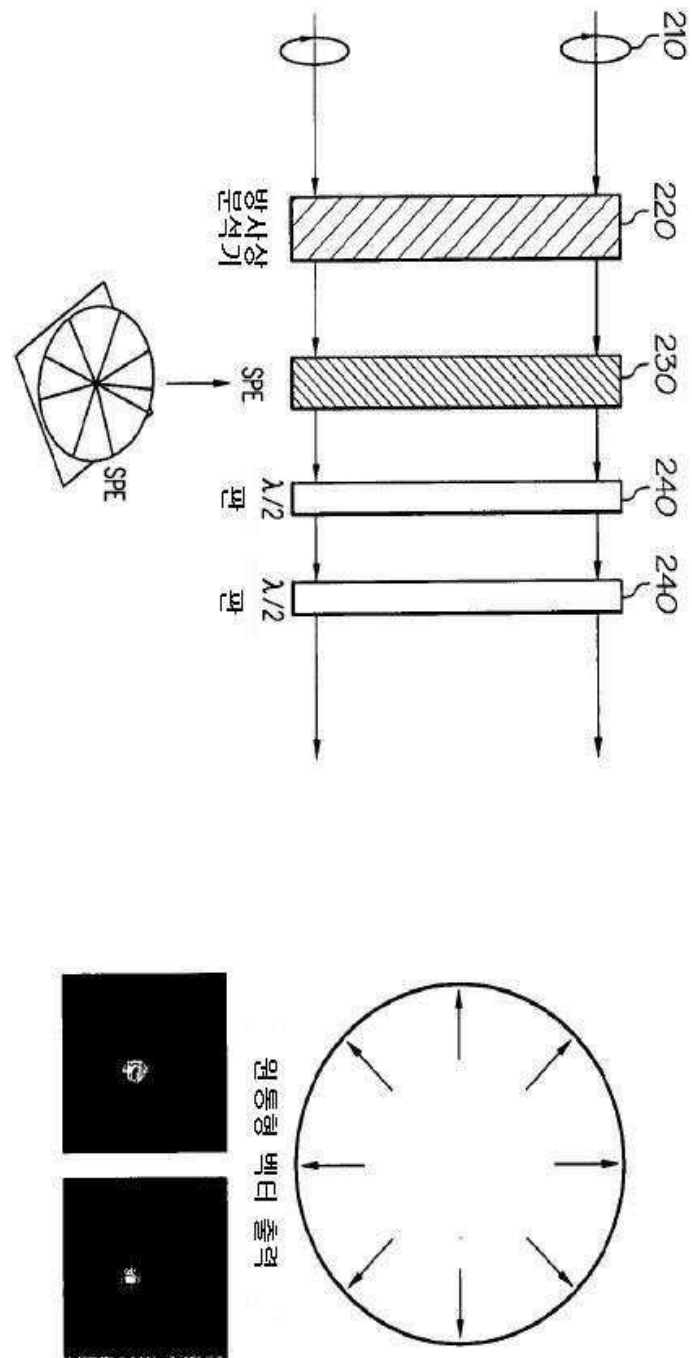
도면1b



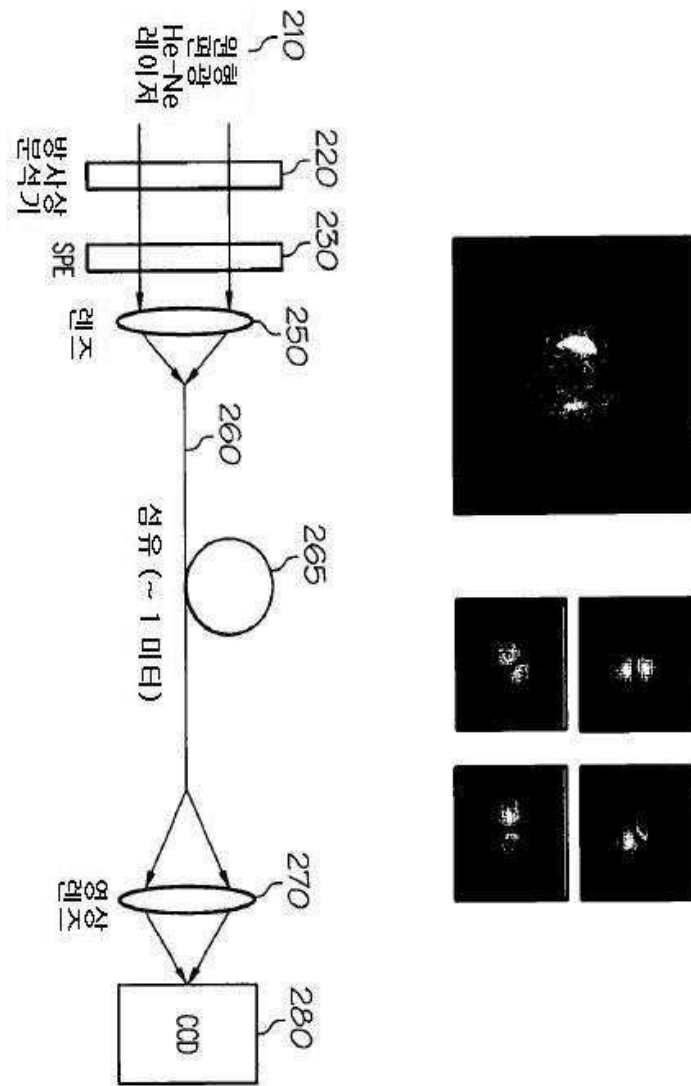
도면1c



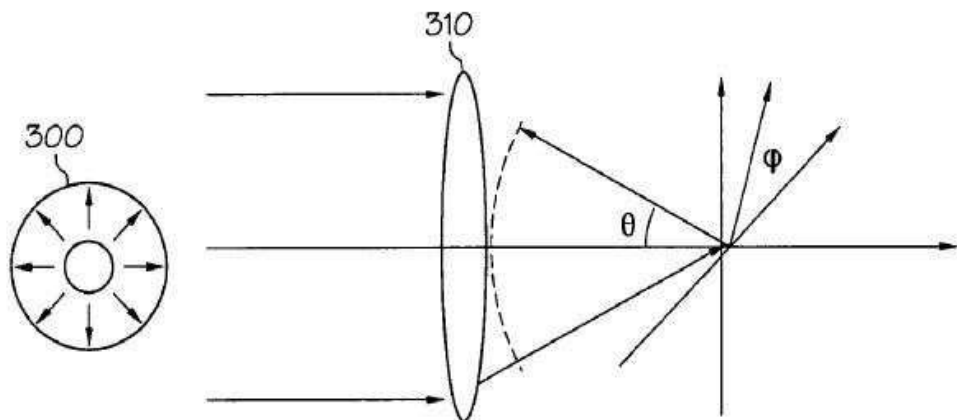
도면2a



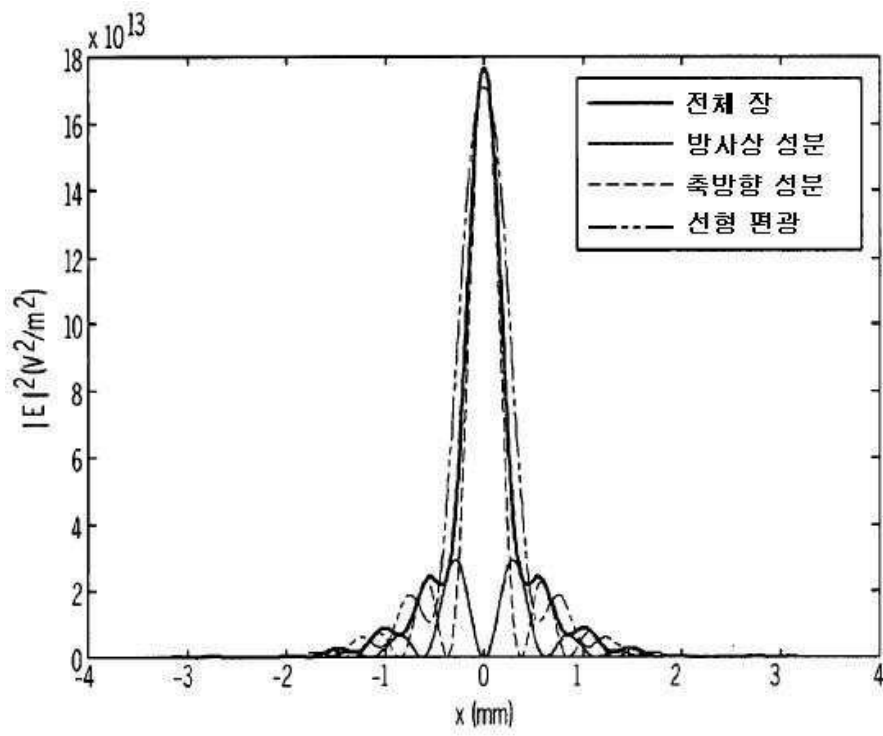
도면2b



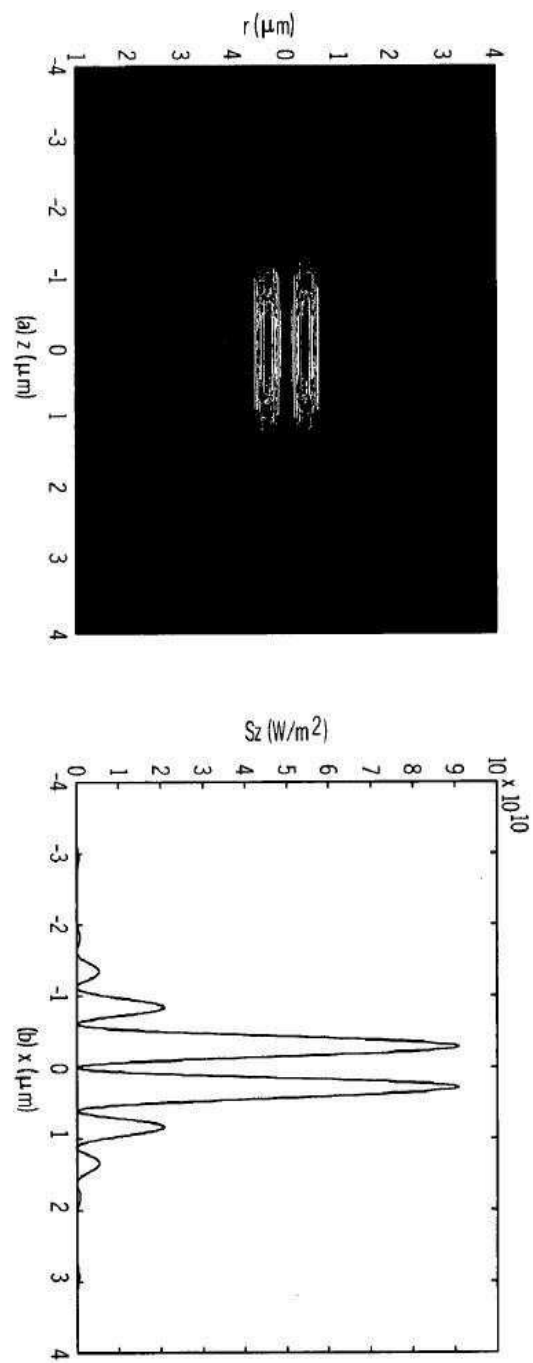
도면3



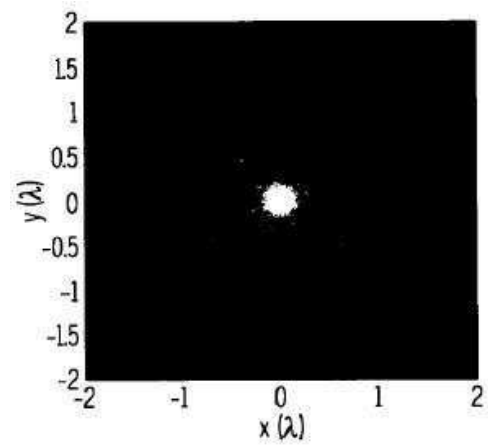
도면4



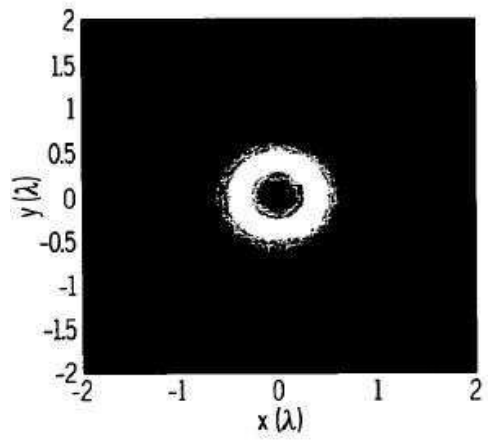
도면5



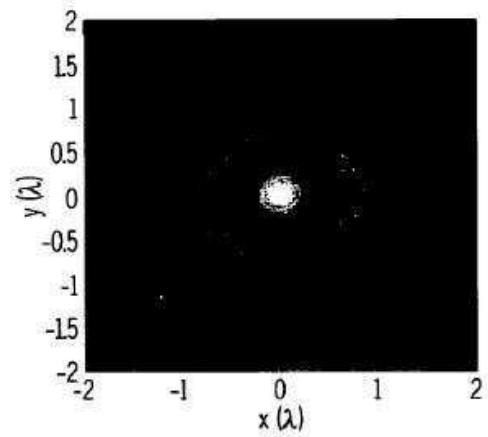
도면6a



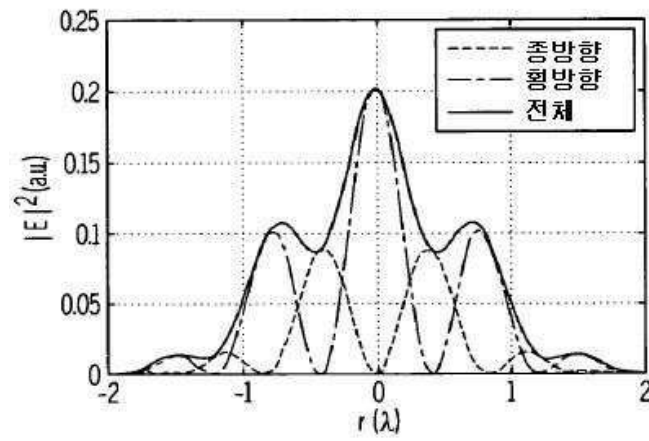
도면6b



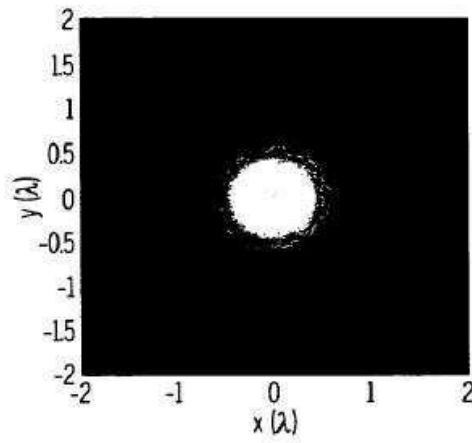
도면6c



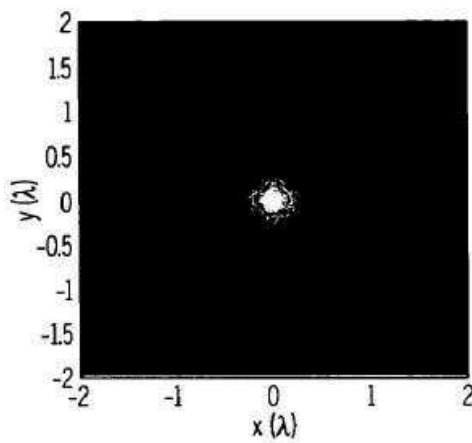
도면6d



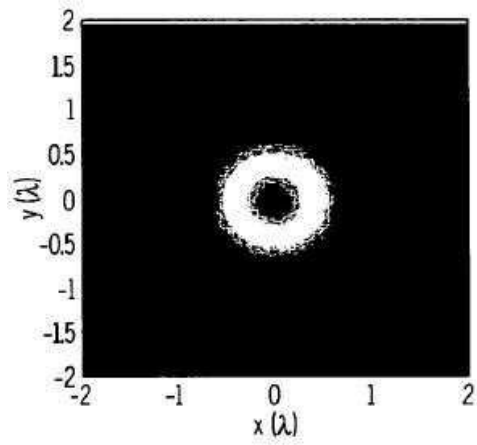
도면7a



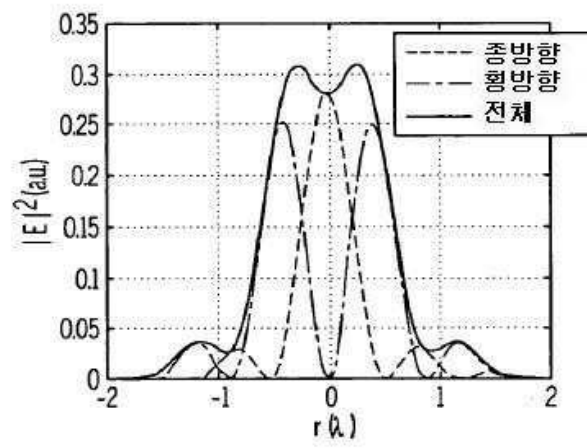
도면7b



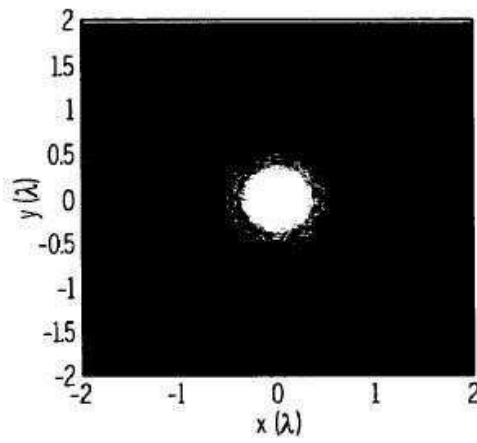
도면7c



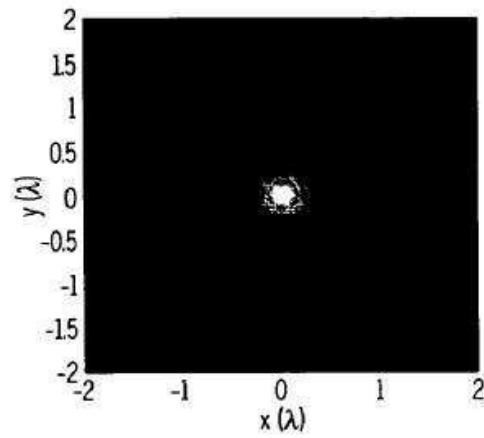
도면7d



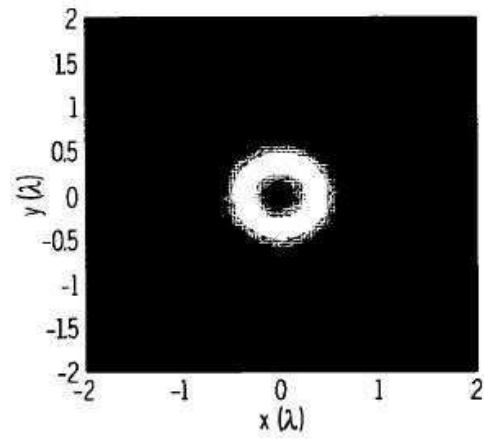
도면8a



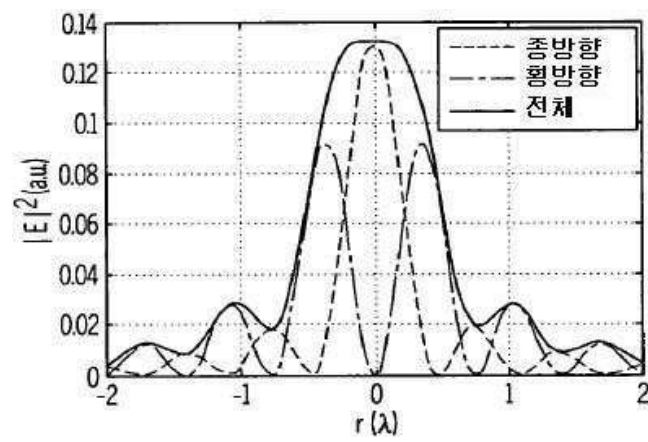
도면8b



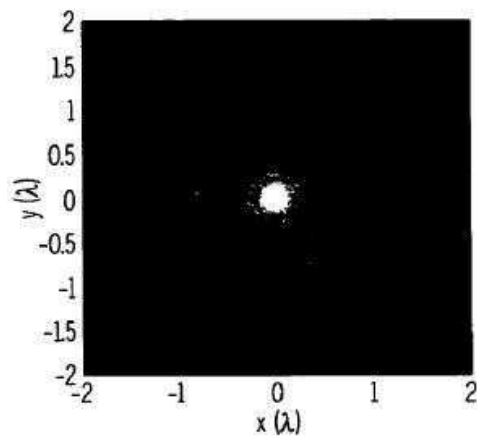
도면8c



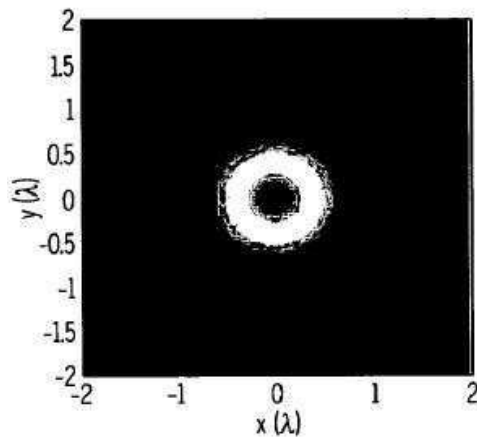
도면8d



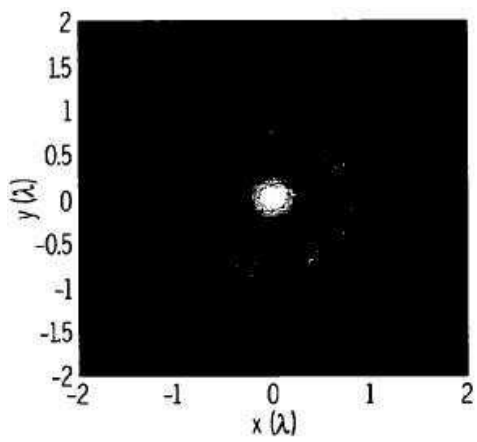
도면9a



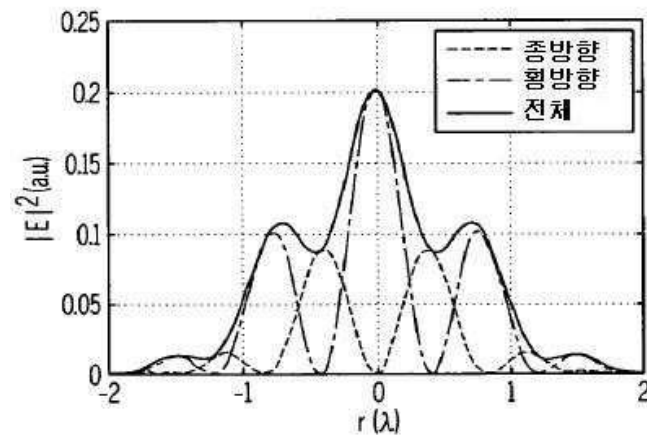
도면9b



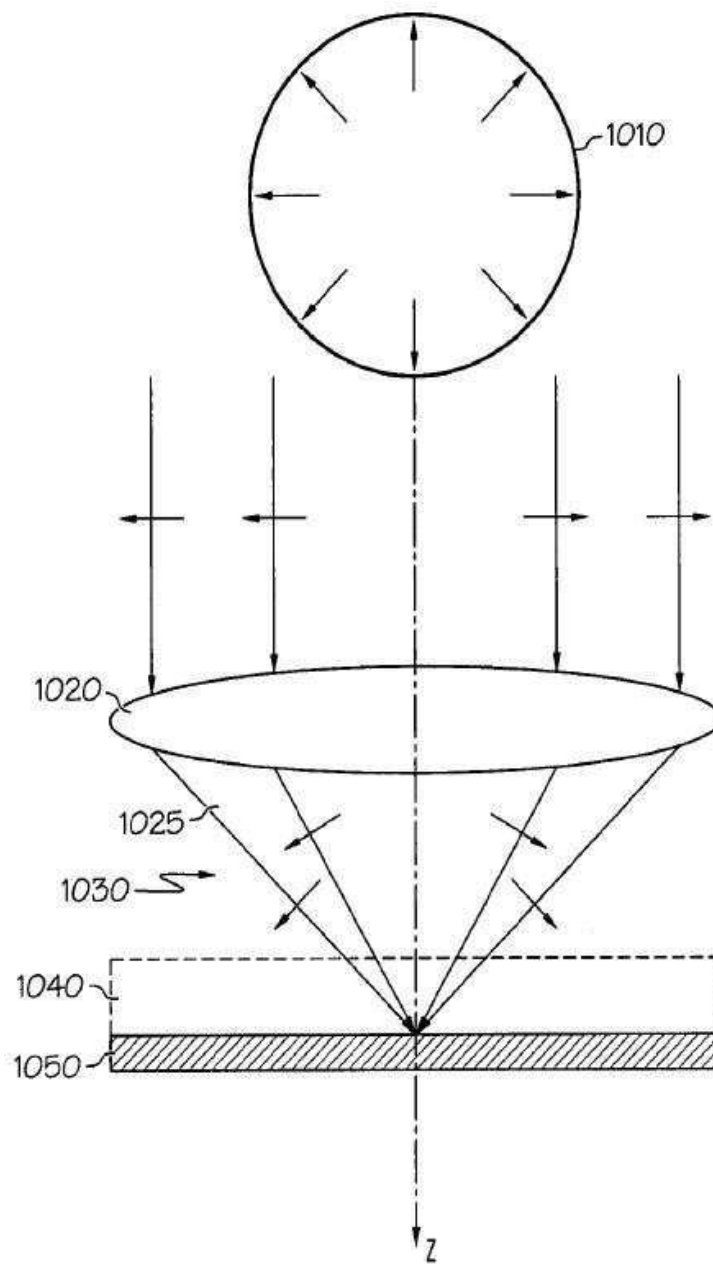
도면9c



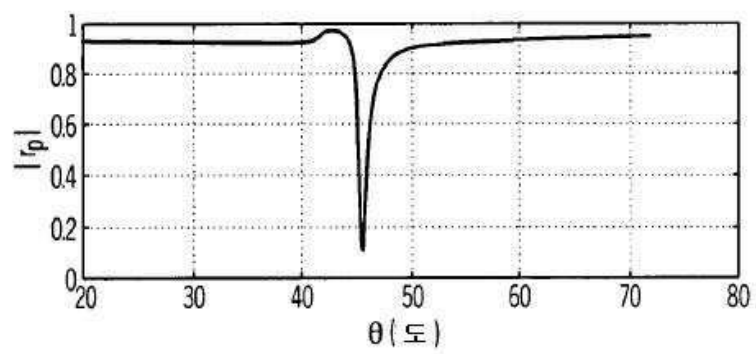
도면9d



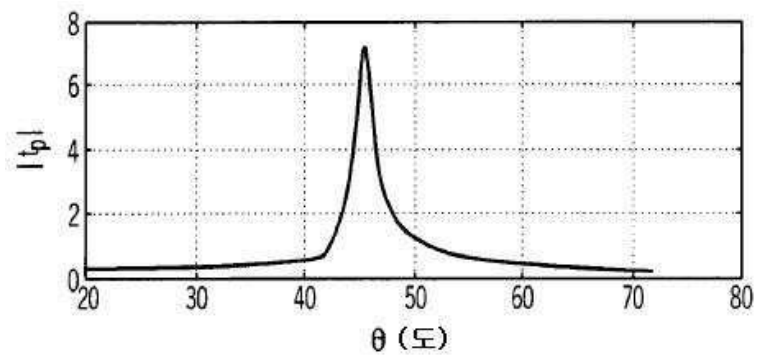
도면10



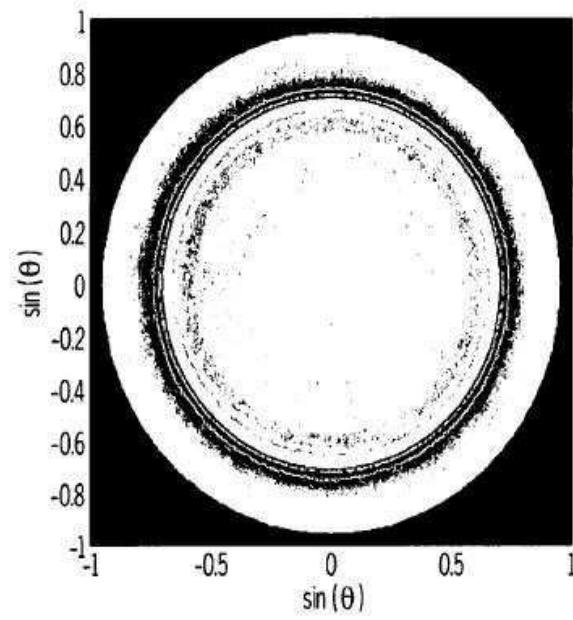
도면11a



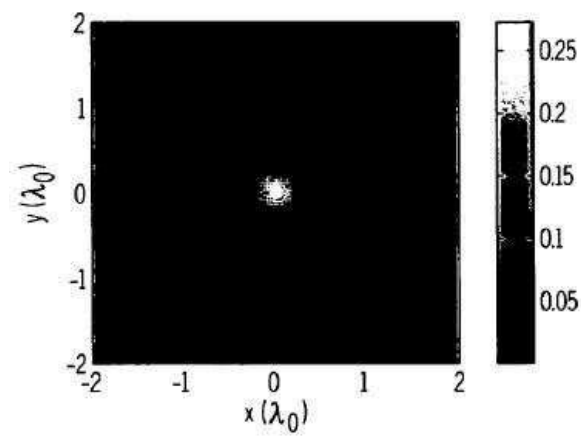
도면11b



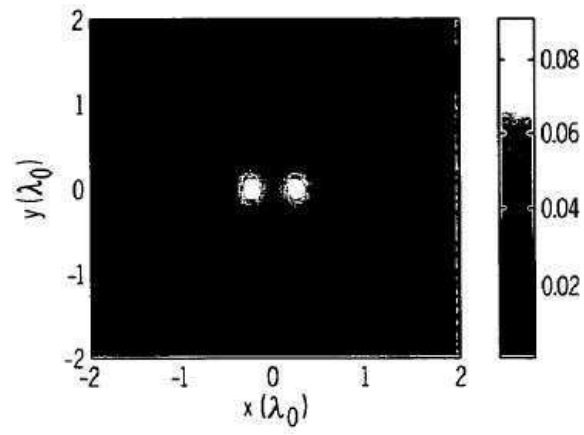
도면12



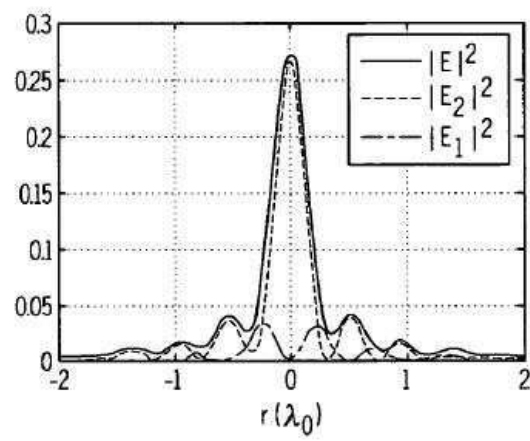
도면13a



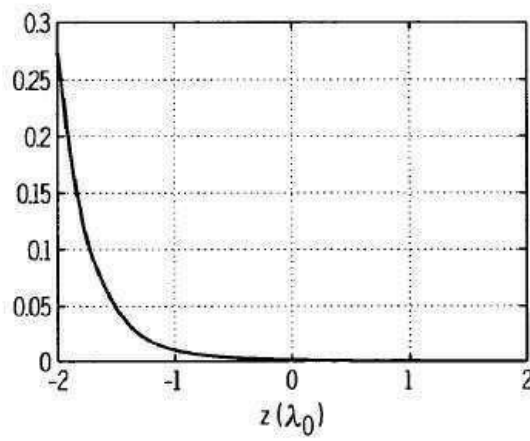
도면13b



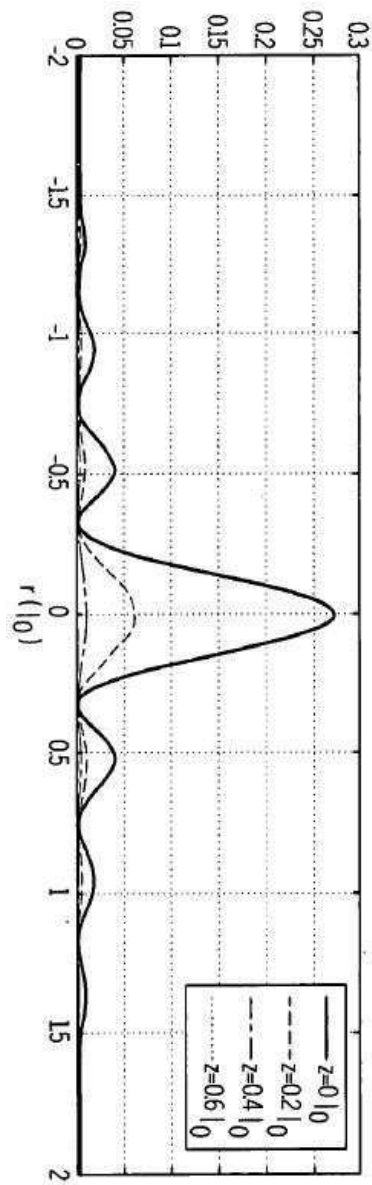
도면13c



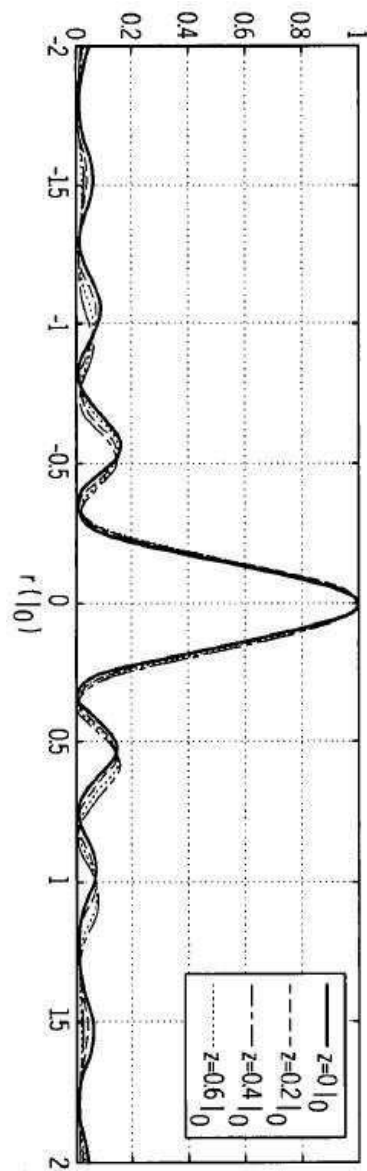
도면13d



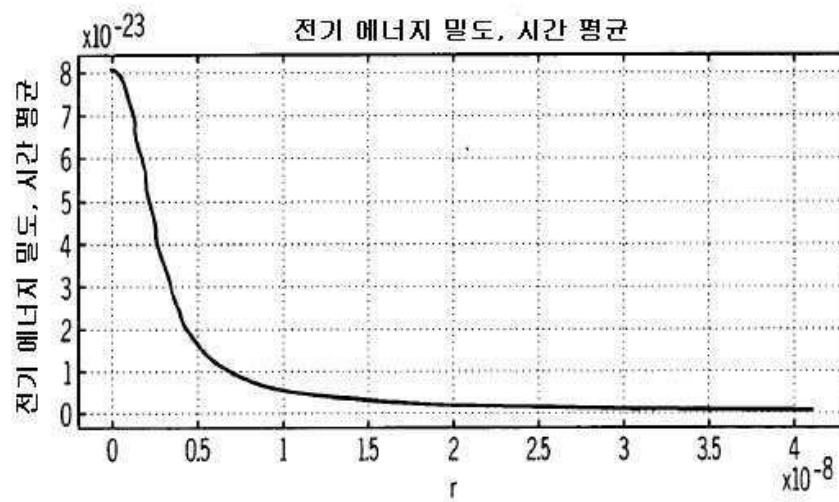
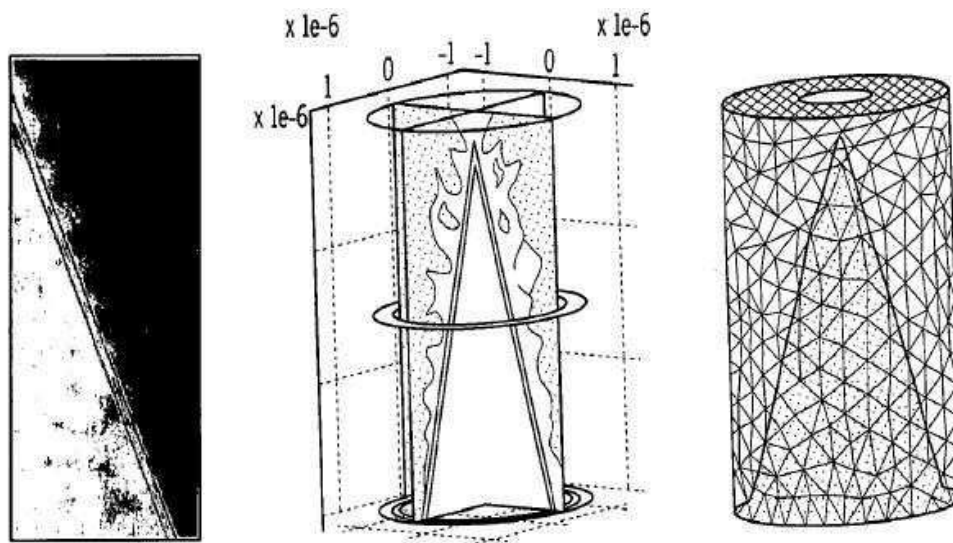
도면14a



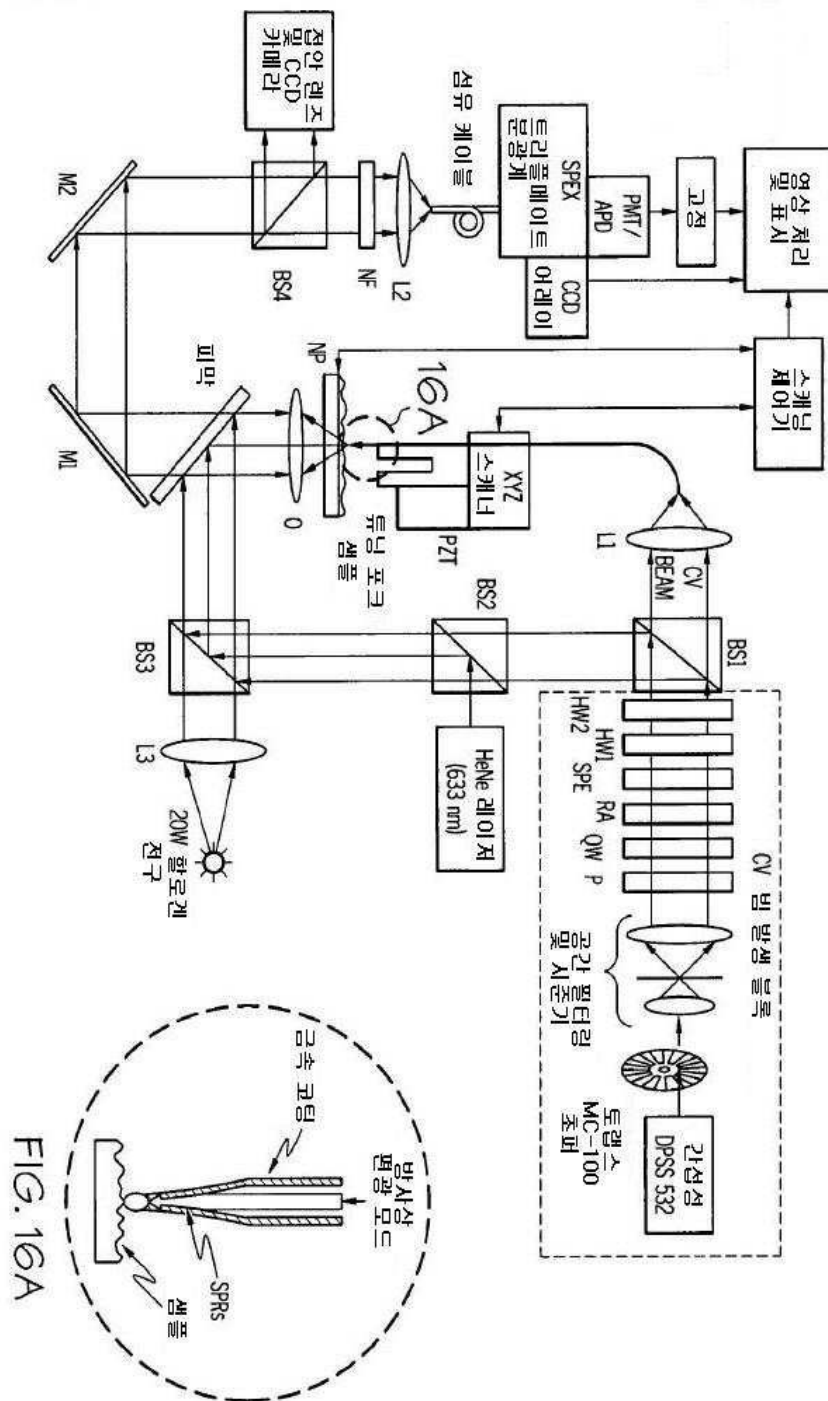
도면14b



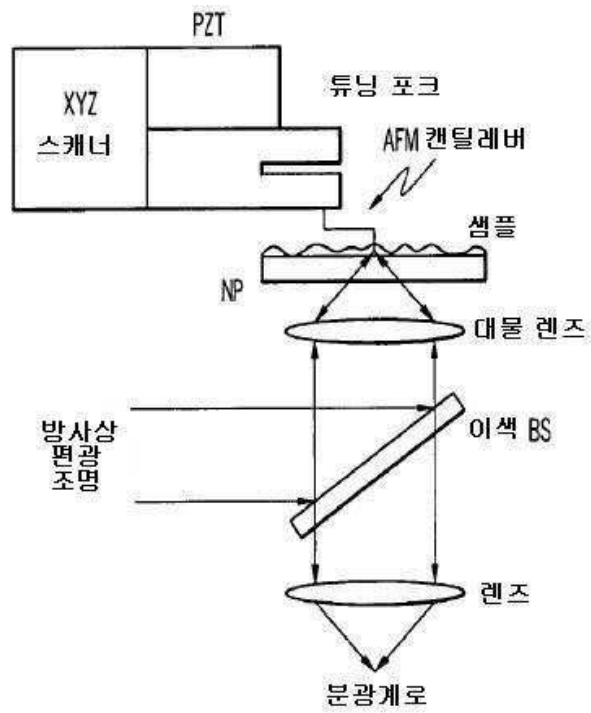
도면15



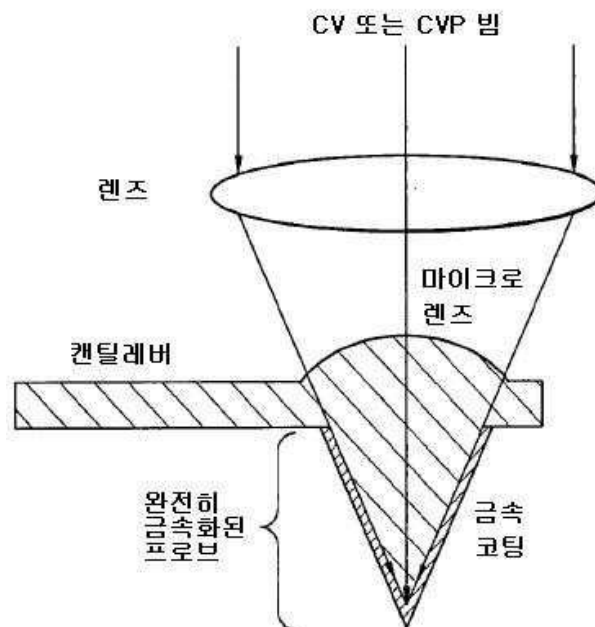
도면16



도면17



도면18



도면19

