



(19) 대한민국특허청(KR)
 (12) 등록특허공보(B1)

(51) Int. Cl.

H01L 21/26 (2006.01)

(45) 공고일자

2007년03월27일

(11) 등록번호

10-0699211

(24) 등록일자

2007년03월19일

(21) 출원번호 10-2005-0005988
 (22) 출원일자 2005년01월21일
 심사청구일자 2005년06월29일

(65) 공개번호 10-2005-0076768
 (43) 공개일자 2005년07월27일

(30) 우선권주장 10/762,861 2004년01월22일 미국(US)

(73) 특허권자 울트라테크 인크.
 미국 캘리포니아 95134 산 호세 장키로드 3050

(72) 발명자 탈워소미트
 미국 95032 캘리포니아주 로스 게토스 아드리안 플레이스 116

마클 데이비드 에이
 미국 95070 캘리포니아주 세라토가 리타나 코트 20690

(74) 대리인 특허법인코리아나

심사관 : 이시근

전체 청구항 수 : 총 18 항

(54) 저농도로 도핑된 실리콘 기판의 레이저 열 어닐링

(57) 요약

상온에서 실질적으로 기판에 흡수되지 않는 어닐링 방사 빔을 이용하여 기판의 레이저 열 어닐링 (LTA) 을 수행하는 장치 및 방법에 관한 것이다. 본 발명의 방법은, 도핑되지 않은 실리콘 (silicon) 기판과 같은 일정 기판의 (1 미크론 이상의) 장파 방사의 흡수는 강한 온도의 기능이라는 사실을 이용한다. 그 방법은, 장파 어닐링 방사의 흡수가 실재하는 임계온도로 기판을 가열하고, 그 후에 그 기판을 어닐링 방사로 조사하여 기판을 어닐링할 수 있는 온도를 만드는 단계를 포함한다.

대표도

도 1a

특허청구의 범위

청구항 1.

상온에서, 표면을 갖는 기판에 의해 실질적으로 흡수되지 않는 어닐링 방사 빔으로 상기 기판의 레이저 열 어닐링을 수행하기 위해 상기 기판을 예열하는 장치로서,

상온에서 상기 기판에 의해 흡수되는 예열 방사를 방사하도록 구성된 예열 방사 소스;

상기 예열 방사를 수광하고 상기 기판에 제 1 이미지를 형성하는 예열 방사 빔을 형성하도록 구성된 릴레이 렌즈들; 및

상기 기판으로부터 반사되는 예열 방사를 수광하고 상기 반사된 예열 방사를 리사이클 방사빔으로서 다시 상기 기판으로 향하게 하도록 구성된 리사이클링 광학 시스템을 포함하며,

상기 제 1 이미지는 상기 기판 표면 상에 주사되어 상기 어닐링 방사 빔에 의해 형성된 제 2 주사 이미지의 앞에 존재하거나 혹은 상기 제 2 이미지와 부분적으로 중첩되는 상기 표면의 일부를 예열하는, 기판 예열 장치.

청구항 2.

제 1 항에 있어서,

상기 리사이클링 광학 시스템은 집광/결상 렌즈들 및 코너 큐브 반사기를 포함하는, 기판 예열 장치.

청구항 3.

제 2 항에 있어서,

상기 리사이클된 방사 빔 및 상기 예열 방사 빔은 각각 입사각을 갖고, 상기 리사이클링 광학 시스템은 광학 축을 갖고, 상기 코너 큐브 반사기는 상기 리사이클 방사 빔과 상기 예열 방사 빔의 입사각들을 적어도 부분적으로 분리하도록 상기 광학 축에 대하여 변위되는, 기판 예열 장치.

청구항 4.

제 1 항에 있어서,

상기 리사이클링 광학 시스템은 텔레센트릭 릴레이 및 회절 격자를 포함하는, 기판 예열 장치.

청구항 5.

상온에서 표면을 갖는 기판에 의해 실질적으로 흡수되지 않는 어닐링 방사 빔으로 상기 기판의 레이저 열 어닐링을 수행하기 위해 상기 기판을 예열하는 장치로서,

상온에서, 각각 상기 기판에 의해 흡수되는 광장을 갖는 제 1 및 제 2 예열 방사 빔으로 상기 기판의 일부를 조사하도록 구성된 제 1 및 제 2 예열 광학 시스템들을 포함하고,

상기 제 1 및 제 2 예열 방사 빔들은, 상기 예열 방사 빔 및 상기 어닐링 방사 빔이 상기 기판 표면에 대하여 주사될 때, 상기 어닐링 방사 빔에 의해 형성된 제 3 주사 이미지의 앞에 유지되는 제 1 및 제 2 주사 이미지들을 각각 형성하는, 기판 예열 장치.

청구항 6.

제 5 항에 있어서,

상기 제 1 및 제 2 예열 방사 빔들은 p-편광되어 있고, 상기 기판의 표면에 존재하는 구조들로부터의 흡수의 변동을 최소화하는 각도에서, 상기 기판 표면을 차단하는, 기판 예열 장치.

청구항 7.

제 5 항에 있어서,

상기 제 1 및 제 2 예열 방사 빔들은 동일하고 반대되는 입사각들을 갖는, 기판 예열 장치.

청구항 8.

상온에서, 표면을 갖는 기판에 의해 실질적으로 흡수되지 않는 어닐링 방사 빔으로 상기 기판의 레이저 열 어닐링을 수행하기 위해 상기 기판을 예열하는 장치로서,

상온에서, 상기 기판에 의해 흡수되는 광장을 갖는 다수의 예열 방사 빔으로 상기 기판의 일부를 조사하도록 각각 구성된 다수의 예열 광학 시스템을 포함하며,

상기 다수의 예열 방사 빔들은, 상기 예열 방사 빔 및 상기 어닐링 방사 빔들이 상기 기판 표면에 대하여 주사될 때, 각각 어닐링 방사 빔 이미지의 앞에 유지되는 이미지들을 각각 형성하는, 기판 예열 장치.

청구항 9.

상온에서, 기판에 의해 실질적으로 흡수되지 않는 어닐링 방사 빔으로 레이저 열 어닐링을 수행하기 위해 상기 기판 표면을 예열하는 방법으로서,

예열 방사 빔으로 상기 기판의 일부분을 조사하는 단계;

상기 기판의 상기 일부분으로부터 반사된 예열 방사를 수광하는 단계; 및

상기 수광된 방사를 상기 기판의 상기 일부분으로 되돌리는 단계를 포함하는, 기판 예열 방법.

청구항 10.

제 9 항에 있어서,

상기 수광된 방사를 상기 기판의 상기 일부분으로 되돌리는 상기 단계는, 상기 수광된 방사를 코너 큐브 반사기로 반사하는 단계를 포함하는, 기판 예열 방법.

청구항 11.

제 9 항에 있어서,

상기 수광된 방사를 상기 기판의 상기 일부분으로 되돌리는 상기 단계는, 루프 미러 및 원통형 미러로부터 상기 수광된 방사선을 반사하는 단계를 포함하는, 기판 예열 방법.

청구항 12.

제 9 항에 있어서,

상기 수광된 방사를 상기 기판의 상기 일부분으로 되돌리는 단계는, 상기 기판으로 되돌려지는 상기 방사가 상기 기판 표면에 걸쳐 계속 결상되도록 상기 수광된 방사에 대하여 기울어져 있는 회절격자에 의해 상기 수광된 방사를 회절시키는 단계를 포함하는, 기판 예열 방법.

청구항 13.

상온에서, 표면을 갖는 기판에 의해 실질적으로 흡수되지 않는 어닐링 방사 빔으로 상기 기판의 레이저 열 어닐링을 수행하기 위해 상기 기판을 예열하는 방법으로서,

상온에서, 각각 상기 기판에 의해 흡수되는 광장을 갖는 제 1 및 제 2 예열 방사 빔으로 상기 기판의 제 1 부분을 조사하는 단계; 및

상기 어닐링 방사 빔들이 상기 가열된 제 1 부분에 도달하면 상기 어닐링 방사 빔이 상기 기판에 의해 흡수되도록, 상기 예열 방사 빔들 및 상기 어닐링 방사 빔이 상기 기판 표면에 대하여 주사될 때, 상기 어닐링 방사 빔으로 조사된 상기 기판 표면의 제 2 부분의 앞에 상기 제 1 부분을 유지하는 단계를 포함하는, 기판 예열 방법.

청구항 14.

제 13 항에 있어서,

상기 제 1 및 제 2 예열 방사 빔들은 동일 광장을 갖는, 기판 예열 방법.

청구항 15.

제 13 항에 있어서,

상기 어닐링 방사 빔은 브루스터 각으로 상기 기판에 입사하고, 상기 예열 방사 빔들은 각각 중심각을 포함하는 각도 범위로 상기 기판에 입사하며, 상기 각도 범위 각각에 대한 상기 중심각은 브루스터 각과 상이한, 기판 예열 방법.

청구항 16.

제 13 항에 있어서,

상기 어닐링 방사 빔 및 상기 예열 방사 빔들은 상기 기판의 표면에 존재하는 구조들로부터의 흡수의 변동을 최소화하는 각도로 상기 기판에 각각 입사하는, 기판 예열 방법.

청구항 17.

제 13 항에 있어서,

- i) 상기 기판에서 0.15 와 0.5 사이의 개구 수 및

ii) 42° 내지 62° 의 입사각을 갖도록 상기 제 1 및 제 2 예열 방사 빔을 형성하는 단계를 포함하는, 기판 예열 방법.

청구항 18.

제 17 항에 있어서,

상기 제 1 및 제 2 예열 방사 빔은 52° 의 입사각을 갖는, 기판 예열 방법.

명세서

발명의 상세한 설명

발명의 목적

발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

관련출원의 상호참조

본 출원은 2003년 9월 29일에 출원된 미국 특허 출원 제 10/674,106호의 일부계속출원 (CIP; Continuation-In-Part) 이다.

발명의 기술분야

본 발명은 레이저 열 어닐링 (annealing)에 관한 것이며, 보다 구체적으로는 실온에서 어닐링 방사 빔을 효과적으로 흡수하지 않는 기판의 레이저 열 어닐링을 수행하기 위한 장치 및 방법에 관한 것이다.

종래 기술에 대한 설명

레이저 열 어닐링 또는 LTA ("레이저 열 프로세싱 (laser thermal processing)"으로 지칭됨)은 기판 표면의 온도를 급속히 증가시키거나 감소시켜 그 성질을 변화시키는데 이용되는 기술이다. 일 예는, 집적 장치 또는 집적 회로를 형성하는 데 이용되는 트랜지스터의 소스, 드레인 또는 게이트 영역의 도편트 (dopant)의 어닐링 및/또는 활성화를 포함할 수 있다. 또한, LTA는 폴리-실리콘 러너 (runner) 저항을 낮추거나 기판 (또는 웨이퍼)에 물질을 형성하거나 그로부터 제거하기 위한 화학 반응을 유발하기 위해 집적 소자 또는 집적 회로의 실리사이드 영역을 형성하는데 이용된다.

LTA는 종래의 어닐링 기술에 비하여 약 1000배 정도의 어닐링 사이클의 속도 증가의 가능성을 제공하며, 이로써 실리콘 웨이퍼에 사용되는 어닐링 또는 활성 사이클 동안에 사실상 도편트 불순물의 확산을 제거한다. 그 결과는 더욱 급격한 도편트 프로파일 (profile) 과, 일정한 경우에는 더 높은 활성화의 레벨을 얻을 수 있다는 것이다. 이는 더 높은 성능 (예를 들어 빠른 속도) 의 집적 회로를 초래한다.

발명이 이루고자 하는 기술적 과제

미국 특허 출원 제 10/287,864 호는 CO_2 레이저 방사를 이용하는 도핑된 실리콘 기판의 LTA 수행을 개시한다. 레이저 방사는 좁은 직선에 결상되고, 기판 상에서 래스터 (raster) 패턴으로 일정한 속도로 주사된다. 그러나, 이런 접근법은 상대적으로 고농도로 도핑된 (즉, 도편트의 농도가 약 $3 \times 10^{17} \text{ atom/cm}^3$ 이상인) 기판에 대해서만 잘 작용하고, 도핑된 실리콘의 레이저 방사의 흡수 길이는 열 확산 길이보다 작거나 대략 그에 필적한다. 반대로, 저농도로 도핑된 (즉, 도편트의 농도가 약 $1 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^3$ 이하인) 기판의 경우, CO_2 레이저 방사는 그 기판에 상당한 에너지를 전달함이 없이 그 기판을 통과한다.

따라서, $10.6\mu\text{m}$ 의 파장을 갖는 CO_2 레이저 방사처럼 가열하지 않고, 기판을 그대로 통과해버릴 수 있는, 방사를 이용하여 저농도로 도핑된 실리콘 기판의 LTA를 효과적으로 수행하는 방법이 필요하다.

발명의 구성

발명의 요약

본 발명의 제 1 양태는 표면을 갖는 기판의 레이저 열 어닐링을 수행하는 장치이다. 본 장치는 상온에서 기판에 의해 실질적으로 흡수되지 않는 광장을 갖는 연속적인 어닐링 방사를 생성할 수 있는 레이저를 포함한다. 또한, 본 장치는 그 어닐링 방사를 수광하고, 그 기판 표면에 제 1 이미지를 형성하는 어닐링 방사 빔을 형성하도록 구성된 어닐링 광학 시스템을 포함하며, 여기서 제 1 이미지는 기판 표면 상에 주사된다. 또한, 본 장치는 그 기판의 적어도 일부를 임계온도로 가열하여 그 가열된 부분에 입사하는 어닐링 방사 빔이 주사동안 그 기판의 표면 근처에서 실질적으로 흡수되도록 하는 가열 장치를 포함한다. 일 예시적인 실시형태에서, 그 기판의 일부의 가열은, 즉시 장파장 어닐링 빔에 우선하는 단파장 레이저 다이오드 빔을 이용하여 수행된다.

본 발명의 제 2 양태는 기판을 레이저 열 어닐링하는 방법이다. 본 방법은 레이저로부터 상온에서 기판에 의해 실질적으로 흡수되지 않는 광장을 갖는 어닐링 방사 빔을 제공하고, 그 기판의 적어도 일부를 임계온도로 가열하여 그 어닐링 방사 빔이 상기 가열된 부분의 기판 표면 근처에서 실질적으로 흡수될 수 있도록 하는 단계를 포함한다. 또한, 본 방법은 그 어닐링 방사 빔을 기판에 주사하기 전에 즉시 기판 표면의 일부를 가열함으로써 자체-유지 (self-sustaining) 어닐링 조건을 개시하는 단계를 포함한다.

상세한 설명

본 발명은 기판의 레이저 열 어닐링 (LTA)에 관한 것으로, 보다 구체적으로는 저농도로 도핑된 실리콘 웨이퍼 (기판)의 LTA 수행을 위한 장치 및 방법에 관한 것이다. "저농도로 도핑된 (lightly doped)"의 용어는 여기에서 도편트 농도가 대략 10^{16} atom/cm³ 이하임을 의미한다. 기판의 도편트 농도는 바람직한 저항 레벨 및 기판 유형 (즉, N-형 또는 P-형)을 달성하기 위한 정규의 기판 제조와 연관된다.

다음의 설명에서, 본 발명에 의해 생성하고자 하는 "자체-유지 어닐링 조건 (self-sustaining annealing condition)"에 따라 본 발명의 LTA 장치의 일반적인 실시형태를 설명한다. 그 다음으로, 본 발명의 다양한 예시적인 실시형태를 설명한다. 또한, 실리콘 기판에 의한 방사 흡수의 주요 특성을 나타내는 다수의 상이한 기판 온도 그래프와 관련하여 본 발명을 설명한다. 그후에, 예열 방사 빔의 적절한 전력 레벨을 결정하기 위한 방법을 설명하고, 예열 방사 빔을 가지고 기판을 가열하기 위한 예시적인 실시형태에서 사용되는 가열 렌즈의 실시예를 설명한다. 그후에, 예열 빔 및 어닐링 방사 빔의 바람직한 주사 및 방향을 상세히 설명한다.

I. 일반적인 LTA 장치

도 1a는 어닐링될 기판 (10)과 본 발명의 LTA 장치 (8)의 실시형태의 단면도이다. 기판 (10)은 상부 표면 (12)과, "도핑되지 있지 않거나", 보다 정확히 말하면, 통상적으로 극도로 얇은 영역에 매우 높은 도핑 레벨을 포함하는 매우 작은 접합 (junction) 영역 또는 장치보다 저농도로 도핑된 몸체 (bulk) 영역 (16)을 갖는다. 문자 N은 기판 상부 표면 (12)에 대한 법선을 나타낸다. 예시적인 실시형태에서, 기판 (10)은 실리콘 웨이퍼이다.

LTA 장치 (8)는 광학 축 A1 상에 배열된 어닐링 방사 소스 (26) 및 LTA 렌즈 (27)를 갖는 LTA 광학 시스템 (25)을 포함한다. 렌즈 (27)는 연속 (즉, 논-펄스; non-pulsed) 어닐링 방사 (18)를 어닐링 방사 소스 (26)로부터 수광하고 기판 표면 (12)에 이미지 (30) (예를 들어, 라인 이미지)를 형성하는 연속 어닐링 방사 빔 (20)을 생성한다. 어닐링 방사 빔 (20)은 표면 법선 N과 광학 축 A1과 관련하여 측정되는 입사각 θ_{20} 으로 상부 표면 (12)에 입사된다.

화살표 (22)는 기판 표면 (12)에 대한 어닐링 방사 빔 (20)의 예시적인 이동 방향을 나타낸다. 기판 (10)은 척 (chuck; 28)에 의해 지지되며, 척은 차례로, 스테이지 (그리고 이에 따라서, 기판)를 어닐링 방사 빔 (20)이나 다른 래퍼런스에 대하여 선택된 속도 및 방향으로 이동시키는, 스테이지 드라이버 (29)에 동작적으로 접속되는 이동성 스테이지 (MS)에 의해 지지된다. 이동성 스테이지 (MS)의 주사 (scanning) 이동은 화살표 (22')로 표시된다. 예시적인 실시형태에서, 스테이지 (MS)는 적어도 2 방향으로 이동할 수 있다.

예시적인 실시형태에서, LTA 장치 (8)는 반사된 방사 감시기 (M1)와 온도 감시기 (M2)를 포함한다. 반사된 방사 감시기 (M1)는 기판 표면 (12)으로부터 반사된, 방사 (20R)로 표시한, 방사를 수광하도록 배열된다. 온도 감시기 (M2)는 기

판 표면 (12) 온도를 측정하도록 배열되며, 예시적인 실시형태에서, 어닐링 방사 빔 (20)에 의해 이미지 (30)가 형성되는 곳이나 그 근처에서 수직 입사각으로 기판을 관측하기 위해 표면 법선 (N)을 따라 배열된다. 감시기들 (M1 및 M2)은, (바로 다음에 설명될) 제어기에 결합되어 다음에 설명되는 것처럼 반사된 방사 (20R) 양의 측정치 및/또는 기판 표면 (12)의 온도 측정치에 기초하여 피드백 제어를 제공한다.

예시적인 실시형태에서, LTA 장치 (8)는 또한, 입사 전력 감시기로서 역할하는 렌즈 (27)에 포함된 광학 감시기 (M3)는 물론, 어닐링 방사 소스 (26), 스테이지 드라이버 (29), 감시기들 (M1 및 M2)에 동작적으로 접속된 제어기 (32)를 포함한다. 제어기 (32)는 예를 들어, 메모리에 결합된 마이크로프로세서, 또는 마이크로제어기, 프로그램가능 로직 어레이 (PLA), 필드-프로그램가능 로직 어레이 (FPLA), 프로그램된 어레이 로직 (PAL), 또는 기타 제어 장치 (미도시)가 될 수 있다. 제어기 (32)는 2개의 모드, 즉 1) 스테이지 드라이버 (29)를 통하여 일정한 주사 레이트의 어닐링 방사 빔 (20)에 의해 기판 (10)에 전달되는 일정한 전력을 유지하는 개방-루프, 및 2) 기판 표면 (12) 상의 일정한 최대 온도 또는 기판에 흡수된 일정한 전력을 유지하는 폐쇄-루프로 동작할 수 있다. 최대 기판 온도는 그 흡수된 전력에 의해 직접적으로, 그리고, 그 주사 속도의 제곱 루트와 반비례하여 변화한다.

예시적인 실시형태에서, 폐쇄 루프 제어는 기판에 입사하는 어닐링 방사 빔 (20)의 흡수된 전력 대 주사 속도의 제곱 루트의 일정한 비율을 유지하는데 사용된다. 즉, P_{20} 이 어닐링 방사 빔 (20)의 전력량이고, P_{30} 이 반사된 전력인 경우에, 그 흡수된 전력은 $P_a = P_{20} - P_{30}$ 이다. 만일, V가 어닐링 방사 빔에 대한 기판 (10)의 주사 속도라면, $P_a/V^{1/2}$ 는 일정한 온도를 간접적으로 유지하기 위해 일정하게 유지된다.

직접적인 최대온도 측정에 기초한 폐쇄 루프 동작의 경우에, 제어기 (32)는 온도 감시기 (M2)로부터 신호 (S2)를 통하여 최대 기판 온도와 같은 신호 (예를 들어, 전자 신호)를 수신하고, 일정한 최대 기판 온도를 유지하기 위해 입사 전력이나 주사속도를 제어한다. 흡수된 전력 (P_a)은, 어닐링 방사 빔의 일부를 신호 S4를 통하여 샘플링함으로써 얻어진 어닐링 방사 빔 (20)의 입사 전력 P_1 로부터, 반사된 방사 감시기 (M1)에 의해 생성된 신호 S1을 통하여 반사된 어닐링 방사 빔 (20R)의 전력 P_{30} 을 감산하여 얻어진다.

또한, 제어기 (32)는 그 수신된 신호들과 입력 파라미터들 (예를 들어, 원하는 흡수 전력 레벨 및 지속 시간)에 기초하여 파라미터들을 계산하도록 구성된다. 제어기 (32)는 보다 큰 어셈블리 툴이나 프로세싱 툴의 일부인 작동자 또는 마스터 제어기 (미도시)로부터 외부 신호 (S3)를 수신하기 위하여 결합될 수도 있다. 이 파라미터는 기판을 프로세스하는데 공급되어야 하는 어닐링 방사 (20)의 소정의 1회분 (양) 또는 원하는 최대 기판 온도를 나타낸다. 파라미터 신호(들)은 기판 (10)에 대한 어닐링 방사 (20)의 소정의 1회분을 전달하는 데 이용되는 강도, 주사 속도, 주사 속력, 및/또는 주사 수를 나타낼 수도 있다.

예시적인 실시형태에서, 어닐링 방사 소스 (26)는 CO_2 레이저이며 어닐링 방사 빔 (20)은 $10.6\mu\text{m}$ 의 파장을 갖는다. 다만, 일반적으로 어닐링 방사 소스 (26)는, 상온에서는 기판에 의해 실질적으로 흡수되지 않지만 그 기판이나 기판 상부의 충분한 부분이 상온보다 고온인 경우 그 동일 기판에 의해 실질적으로 흡수되는 파장을 갖는 방사를 방사하는 임의의 연속 방사 소스이다. 바람직한 실시형태에서, 어닐링 방사 소스 (26)는 레이저이다.

LTA 장치 (8)는, 기판의 몸체의 온도는 실질적으로 변화시키지 않으면서 기판의 상부의 온도를 효과적으로 상승시키기 위하여 기판 상부 근처에서 어닐링 방사 빔 (20)의 흡수를 이용하도록 구성된다. 즉, 기판이 반도체 웨이퍼인 경우에, 본 발명은 웨이퍼 몸체를 가열시키기 보다는 장치 (예를 들어, 트랜지스터)가 형성되는 표면이나 그 근처의 웨이퍼의 온도를 증가시키도록 의도된다.

그러나, 실온에서, 저농도로 도핑된 기판과 도핑되지 않은 기판은 어닐링이 곤란한데, 장파장 방사 빔은 상부 표면을 충분히 가열시키지 않고 그 기판을 바로 통과하기 때문이다. 반면에, 고농도로 도핑된 기판은 어닐링에 어려움이 없는데, 입사 어닐링 방사는 물질의 대략 100 미크론 정도로 흡수되어 원하는 어닐링 온도로 그 온도를 상승시키기 때문이다.

빔으로부터 충분한 방사를 흡수하지 않는 기판 (10)의 몸체 (밸크; 16)는 가열되지 않으며, 어닐링 방사 빔 (20)이 더 이상 그 기판에 적용되지 않을 때 그 상부 표면 영역을 신속히 냉각시키는 역할을 한다. 본 발명은, $10.6\mu\text{m}$ 의 CO_2 레이저 파장과 같은 일정한 자외선 파장의 저농도로 도핑된 실리콘에서의 방사의 흡수가 기판 온도에 강하게 의존한다는 사실을 이용한다. 일단 어닐링 방사 빔 (20)의 충분한 흡수가 일어나면, 그 기판 표면 온도가 상승하고, 이것은 보다 강한 흡수를 야기하며, 차례로 그 기판 표면을 더욱 가열하게 한다.

II. 자체-유지 어닐링 조건

도 2는 기판 온도 T_S (°C)에 대한, $10.6\mu\text{m}$ 의 파장 방사에 대한 실리콘 기판의 흡수 길이 L_A (μm) (세로축)의 그래프이다. 또한, 기판 온도 T_S (°C)의 함수로서 $200\mu\text{s}$ 의 지속시간 동안의 확산 길이 L_D (μm)에 대한 점들이 그 그래프에 포함되어 있다. 흡수 길이 L_A 는 그 어닐링 방사 빔 (20)의 강도가 $1/e$ 만큼 약해지는 두께이다. 열 확산 길이 L_D 는 일정한 지속시간 이후에 순간적인 표면 온도의 상승이 그 물질로 전파되는 깊이이다. L_A 와 L_D 는 T_S 가 600°C 일 때, 대략 $60\mu\text{m}$ 의 동일한 값을 가진다.

기판 온도 T_S 에 대한 흡수 경로 길이 L_A 의 심한 변화는 2개의 가능한 정상-상태 조건을 만드며, 즉, (1) 어닐링 방사 빔 (20)이 실질적으로 흡수되지 않고 기판을 통과하여, 그 기판을 실질적으로 가열하지 않거나, (2) 어닐링 방사 빔 (20)이 기판 표면 (12) 근처에서 흡수되어, 이로써 어닐링 방사 빔 (20)이 그 기판 표면 상에서 이동 (주사) 됨에 따라 그 빔과 같이 이동하는 이미지 (30)에 대응하는 기판 표면이나 그 바로 아래에 "열 점"을 생성한다.

도 3은 깊이 (μm) 및 어닐링 방사 빔 위치 (μm)의 함수로서 기판 온도 (°C) 프로파일의 컴퓨터 시뮬레이션이다. 온도 프로파일은, 그 기판안에서 그 기판 표면 (12)에 걸쳐서 이동하는 열 점 (31)이다. 이동하는 열 점 (31)은 열 확산에 의하여 나아간 이미지 (30) 앞의 기판 (10)의 영역을 예열하도록 가능하다 (아래 설명된 도 4b 참조). 열 점 (31)의 전파와 관련된 기판 예열은 그 기판 표면 상에 어닐링 방사 빔 (20)이 주사될 때 그 빔의 방사가 상부 표면 (12) 근처에서 효과적으로 흡수되도록 허락한다. 정상 상태 조건 (2)는 본 발명의 방법과 함께 장치 (8)를 이용하여 생성하려는 것으로서, 여기서는 "자체-유지 어닐링 조건"으로 지칭한다.

본 발명에 따른 자체-유지 어닐링 조건을 생성하기 위한 일반적인 방법은 기판 (10) (또는 기판의 선택 영역이나 위치)을 임계 온도 T_C (예를 들어, 다음에 상세히 설명되는 것처럼, 350°C 이상)로 가열하여 어닐링 방사 빔 (20)이 그 기판에 의해 실질적으로 흡수되도록 하는, 즉, 자체-유지 어닐링 조건이 개시되는 지점으로 흡수되도록 하는 단계를 포함한다.

그 정확한 T_C 값은 기판내의 온도 확산, 도핀트 농도 및 어닐링 방사 빔 강도에 의존한다. 따라서, 예시적인 실시형태에서 임계 온도 (T_C)는 실험적으로 결정된다. 이것은 예를 들어, 다양한 시작 온도 조건이나 일정한 시작 온도 조건을 갖는 기판의 테스트를 위한 어닐링 방사 빔에 의해 생기는 최대 온도 및 다양한 어닐링 방사 및 예열 방사 빔 강도를 측정하는 단계를 포함한다. 자체-유지 어닐링 조건을 초래하는 기판 (10)의 예열은 다양한 방법으로 달성될 수 있다. LTA를 수행할 목적으로 저농도로 도핑된 실리콘 기판 (10)의 자체-유지 어닐링 조건을 생성하는 방법을 실행하기 위하여 기판 (10)을 가열하기 위한 가열 장치를 포함하는 LTA 장치 (8)의 다수의 예시적인 실시형태를 아래에 설명한다.

III. 선택적 열 쉴드를 갖는 가열된 척 실시형태

도 1a를 다시 참조하면, 예시적인 실시형태에서 척 (28)은 열적으로 도전성이고, 제어기 (32)에 접속되어 그에 의해 제어되는, 전원 (52)에 접속되어 있는 가열 소자 (50)를 포함한다. 열 절연 층 (53)은 척 (28)의 저면과 측면을 둘러싸서 원하지 않는 스테이지의 가열 및 척으로부터의 열 손실을 제한한다.

동작시에, 제어기 (32)는 전원 (52)을 활성화시키고, 이것은 차례로 가열 소자 (50)에 전력을 공급한다. 이에 응답하여, 가열 소자 (50)는 열 (56)을 생성한다. 예시적인 실시형태에서, 생성된 열 (56)의 양은 척의 온도 센서 (57)에 의해 제어되고 동작적으로 전원 (52)에 (대안적으로, 제어기 (32)에) 접속되어 척의 온도는 일정한, 선정의 최대 값으로 제한된다. 일단 기판이 척 위에 로드되면, 그것의 온도는 매우 빨리 척과 동일한 온도에 도달한다. 통상적으로, 척의 온도 (T_{CH})는 약 400°C 이다.

다른 예시적인 실시형태에서, 또한 장치 (8)는 선택적으로 전술한 기판 (12)에 의해 지지되어 열 (56)을 그 기판으로 다시 반사하는 열 쉴드 (62)를 포함한다. 이는 보다 기판의 균일한 가열을 초래하고 그 쉴드의 반대측에 있는 장치 구성요소는 덜 가열되게 만든다. 예시적인 실시형태에서, 열 쉴드 (62)는 금-코팅 유리판이다. 열 쉴드 (62)는 어닐링 방사 빔 (20)이 기판 (10)의 표면 (12)에 도달할 수 있도록 하는 개구 (64)를 포함한다.

IV. 가열된 엔클로저 (enclosure) 실시형태

도 1b를 참조하면, 다른 예시적인 실시형태에서, 장치 (8)는 기판 (10)과 척 (28) 또는 기판, 척, 및 스테이지 (MS)를 둘러싸기에 충분히 큰 내부 영역 (82)을 갖는 가열된 엔클로저 (예를들면, 오븐) (80)를 포함한다. 엔클로저 (80)는 전원 (52)에 접속되어 있는 (바람직하게는 척 (28)에 포함되는 것에 더하여) 추가적인 가열 소자 (50)를 포함한다. 전원 (52)은 제어기 (32)에 접속된다. 예시적인 실시형태에서, 엔클로저 (80)는 어닐링 방사 빔 (20)이 기판 (10)의 표면 (12)에 도달하도록 하는 원도우 또는 개구 (84)를 포함한다. 도 1a와 관련하여 전술한 열 절연 층 (53)은 바람직하게는 척의 측면과 저면에 제공되어 척으로부터 스테이지로의 원하지 않는 열 손실을 제한한다.

동작시에, 제어기 (32)는 전원 (52)을 활성화시키고 이것은 차례로 가열 소자 (50)로 전력을 공급한다. 응답으로, 가열 소자 (50)는 열 (56)을 생성하고 이로써 척, 기판, 및 그 주위의 온도를 약 400°C의 최대 임계온도 T_C 로 상승시킨다. 엔클로저 (80)는 바람직하게는 열적으로 절연하여 열 (56)이 내부 영역 (82) 안에 가두어져 (trap) 있도록 하고, 이로써 효율적이고 균일한 기판의 가열을 촉진한다.

V. 예열 방사 빔 실시형태

도 1c를 참조하면, 다른 예시적인 실시형태에서, 장치 (8)는 광학 축 (A2)를 따라 배열된 예열 방사 소스 (142) 및 릴레이 렌즈 (143)를 갖는 예열 광학 릴레이 시스템 (140)을 포함한다. 예열 방사 소스 (142)는, 어닐링 방사 빔에 의해 가열되기에 앞서 기판을 예열하는 데 사용되는 예열 방사 빔 (150)을 갖는 릴레이 렌즈 (143)에 적용되는 방사 (147)를 방출한다. 방사 (147)는 실리콘의 100 μm 이하만큼 쉽게 (실질적으로) 흡수되는 파장을 갖는다. 예시적인 실시형태에서, 예열 방사 소스 (142)는 0.8 μm (800nm) 또는 0.78 μm (780nm)의 파장을 갖는 예열 방사 (147)를 방사하는 레이저 다이오드 어레이이다. 릴레이 렌즈 (143)의 예시적인 실시형태는 다음에 설명한다. 예열 방사 소스 (142) 및 릴레이 렌즈 (143)는 감시기들 (M1 및 M2), 및 설명의 용이를 위하여 도 1c에는 도시하지 않았으나 도 1a에 도시한 스테이지 드라이버 (29)와 함께 제어기 (32)에 동작가능하게 접속된다.

동작시에, 예열 방사 소스 (142)는 릴레이 렌즈 (143)에 의해 수광되는 방사 (147)를 방사한다. 릴레이 렌즈 (143)는 기판 표면 (12)에 이미지 (160) (예를 들어, 라인 이미지)를 형성하는 예열 방사 빔 (150)을 생성한다. 예열 방사 빔 (150)은 기판 표면 법선 (N)에 대하여 측정되는 입사각 (Θ_{150})으로 기판 표면 (12)에 입사한다.

예시적인 일 실시형태에서, 어닐링 방사 빔 (20)에 의해 형성된 이미지 (30) 및 예열 방사 빔 (150)에 의해 형성된 이미지 (160)는 도 1c에 도시된 것처럼 기판 표면 (12)에 나란히 위치된다. 따라서, 예열 방사 빔 (150)은 어닐링 방사 빔 (20)에 의해 조사되는 부분의 바로 앞의 기판 영역이나 부분을 국부적으로 예열하는 역할을 한다. 화살표 (22')는 (예를 들어, 도 1의 이동가능한 척 (28)을 통한) 기판 (10)의 이동을 나타내며, 예시적인 일 실시형태에서 기판 (10)은 고정된 방사 빔 (20, 150) (또는, 고정된 이미지 (30, 160))의 아래에서 이동하여 이들 빔 (또는 이미지)의 주사를 실행한다.

다른 예시적인 실시형태에서 예열 방사 빔 (150) 및 어닐링 방사 빔 (20)은 도 4a에 도시된 것처럼, 예를 들어, 각각의 빔 강도 프로파일의 $1/e^2$ 의 강도 곡선에서 부분적으로 중첩한다.

도 4b는 빔 (20, 150)에 의해 조사되는 기판의 예시적인 실시형태의 확대 단면도이다. 도 4b는 어닐링 방사 빔 (20)의 앞에 이미지된 예열 방사 빔 (150)으로부터의 열 (166)이 기판의 상부 표면 근처에서 어닐링 방사 빔의 흡수를 촉진하는 방법을 나타낸다. 예열 방사 빔 (150)으로부터의 열 (166)은 어닐링 방사 빔 (20)의 앞의 기판 (10)으로 확산된다. 방사 빔들이 기판에 대하여 화살표 (22')와 같이 움직이면, 어닐링 방사 빔 (20)은 예열 방사 빔 (150)에 의해 사전에 예열된 영역 (즉, 기판 부분)을 통과한다. 이런 프로세스는 기판 표면 및 그 근처의 기판의 온도를 임계 온도 T_C 이상으로 상승시키는 데 사용한다. 이것은 흡수된 어닐링 방사 빔 (20) (점선)으로 나타낸 것과 같이, 어닐링 방사 빔 (20)이 기판으로 효과적으로 흡수는 것을 허용한다. 기판 표면 (12) 근처의 기판 (10)으로의 어닐링 방사 빔 (20')의 상대적으로 빠른 흡수는 어닐링 방사 빔의 트레일링 에지에서 어닐링 온도 T_A (예를 들어 약 1600°C) 까지 기판 표면의 온도를 매우 빠르게 최대로 증가시키는 역할을 한다. 이것은 예를 들어, 기판의 상부 표면에 주입된 도편트를 활성화시킴으로써 기판에 형성된 선택 영역의 어닐링을 유도한다.

VI. 기판 온도 그래프

도 5는 고농도로 도핑된 실리콘 기판을 10.6 μm 의 방사로 조사하여 얻은, 방사의 입사 전력 P_I (W/cm)의 함수인, 최대 기판 온도 T_{MAX} (°C)의 그래프이다. 이 데이터를 유도하기 위해 2차원의 유한-요소 시뮬레이션 프로그램이 사용되었다. 그

시뮬레이션은 무제한의 긴 어닐링 방사 빔을 가정하였다. 따라서, 빔 전력은 watt/cm^2 이 아닌 Watt/cm 로 측정된다. 또한 그 시뮬레이션은 어닐링 방사 빔 (20) 이 $120\mu\text{m}$ 의 FWHM (Full-Width Half-Maximum) 을 갖는 가우시안 빔 프로파일을 갖고, $200\mu\text{s}$ 의 지속시간 동안 $600\text{mm}/\text{s}$ 의 속력으로 기판 상부 표면 (12) 상에 주사되는 것으로 가정하였다. 여기서 "지속 시간"은 어닐링 방사 빔 (20) 에 의해 형성되는 이미지 (30) 가 기판 표면 (12) 의 특정한 지점에 머무르는 시간의 길이다. 이 경우에, 그래프는 입사 전력 P_I 과 최대 기판 온도 T_{MAX} 사이의 대략적인 선형 관계를 나타낸다. 2차원 모델은 어닐링 방사 빔 (20) 이 무한정으로 길다고 가정하기 때문에, 라인 이미지 (30) 의 말단에서는 추가적인 에너지 손실이 없다. 유한한 빔 길이는 빔의 말단에서 추가적인 열 손실을 초래하고 따라서 주어진 입사 전력 레벨 P_I 에 대한 최대 온도를 낮추게 될 것이다.

도 5는, 흡수하는 (즉, 고농도로 도핑된) 기판에서, 특정 조건 셋트에 대하여 최대 기판 표면 온도 T_{MAX} 를 실온으로부터 427°C 까지 상승시키는데, 약 $500 \text{ Watt}/\text{cm}$ 의 입사 전력 P_I 가 필요함을 나타낸다. 이것은, 동일한 조건 셋트에 대하여, 1410°C 의 실리콘 용융점까지 온도를 상승시키는 데 $1150\text{Watt}/\text{cm}$ 가 필요한 것과 비교될 수 있다.

도 5에 도시된 관계는 어닐링 방사 빔 (20) 과 동일한 폭과 지속시간을 갖는 예열 방사 빔 (150) 에 대한 우수한 근사값이다. 열 확산은 양자의 경우에 기판의 열 확산을 위한 주요한 메커니즘이다. 400°C 의 피크 기판 온도 T_{MAX} 는 400°C 의 균일한 기판 온도 T_S 와 거의 동일한 어닐링 방사 빔 (20) 의 흡수를 제공하지 않는데, T_{MAX} 분포는 대략 열 확산 길이 L_D 만큼 떨어진 기판내에서 주변온도로 떨어지기 때문이다.

도 6은 도핑되지 않은 실리콘 기판에 대하여 $10.6\mu\text{m}$ 파장의 어닐링 방사 빔 (20) 의 2개의 다른 입사 전력 P_I 에 대한 최초 기판 온도 T_I 의 함수인 최대 기판 온도 $T_{MAX}(^\circ\text{C})$ 의 그래프이다. 또한 이것은 2차원 요한 요소 모델 (finite element model)로부터 유도되었다. 약 327°C 이하의 온도에 대하여, 입사 방사는 거의 아무런 효과를 나타내지 않으며, 최대 온도 T_{MAX} 는 거의 최초 기판 온도 T_I 와 동일하다. 즉, 어닐링 방사 빔 (20) 은 기판 (10) 을 통과하며, 기판을 상당히 가열시키지 않는다. 다만, 어닐링 방사 빔 (20) 의 상당한 흡수는 어닐링 방사 빔의 입사 전력 P_I 의 양에 의존하여, 377°C 와 477°C 사이의 최초 기판 온도 T_I 에서 발생한다. 그 결과 최대 기판 온도 T_{MAX} 에서 샤프한 증가가 있다. 일단 높은-흡수, 높은-온도 전이이 일어나면, 어닐링 방사 빔 (20) 에 의한 조사는 최대 온도 T_{MAX} 를 선형적으로 증가시킨다.

도 5 및 도 6 그래프에 사용된 전력의 단위는 Watt/cm 이다. 이 전력은 반전력 지점들 사이에 포함되어 있는 주사 이미지 (30) (예를 들어, 라인 이미지) 의 단위 길이당 전력을 의미한다. 따라서, $120\mu\text{m}$ 의 폭을 갖는 이미지 (30) 의 $1150 \text{ W}/\text{cm}$ 의 전력은 $95,833 \text{ W}/\text{cm}^2$ 의 평균 강도에 대응한다.

자체-유지 어닐링 조건을 생성하기 위하여 기판을 임계 온도 (T_C) 로 가열하는 예열 방사 소스 (142) 에 의해 생성되는 온도는 도 6의 그래프의 정보로부터 추정될 수 있다. 그 그래프는, 기판이 약 427°C 의 균일한 온도 T_I 에 도달하면, 자체-유지 어닐링 조건의 개시를 나타내는 기판 온도 T_{MAX} 의 갑작스러운 증가가 있음을 나타낸다. 만일 레이저 다이오드 소스가 필요한 예열을 제공하기 위해 사용된다면 매우 높은 온도가 기대되는데, 다이오드 소스는 일 열 확산 길이에서 주위 온도로 떨어지는 불균일한 온도 분포를 제공하기 때문이다.

도 7은 기판 온도 $T_S(^\circ\text{C})$ 의 함수인 도핑되지 않은 실리콘의 780nm 방사의 흡수 길이 $L_A(\mu\text{m})$ 의 그래프이다. 800nm 에서의 흡수 특징은 780nm 에서의 경우와 매우 유사하다. 그래프로부터 알 수 있듯이, 상온인 경우에도, 흡수 길이 L_A 는 약 $10\mu\text{m}$ 이고, 이것은 기판 표면 영역의 효과적인 가열, 및 주로 $200\mu\text{s}$ 이상의 타임 스케일에 대한 열 확산에 의해 결정되는 열 배분을 보장할 정도로 충분히 짧다.

(예열 방사 빔 (150) 을 생성하는 데 사용되는) 레이저 다이오드 소스에 의해 생성된 것과 같은 불균일한 온도 분포를 갖는 도핑되지 않은 실리콘 기판에서 CO_2 레이저 빔의 효과적인 흡수를 얻기 위하여, 약 $100\mu\text{m}$ 의 흡수 길이에 대응하는 온도가 추정된다. 이것은 약 550°C 의 피크 기판 온도 T_{MAX} 를 가지고 달성된다. 도 5를 다시 참조하면, 약 550°C 의 최대 기판 온도 T_{MAX} 는 예열 방사 빔 (150) 이 약 $600\text{W}/\text{cm}$ ($50,000\text{W}/\text{cm}^2$) 의 전력을 갖도록 요구한다.

VII. 예열 방사 빔 전력의 결정

실제로, 기판 (10)에 대한 어닐링 방사 빔 (20)의 효과적인 커플링 달성을 필요한 예열 방사 빔 (150)의 최소 전력을 결정하는 간단한 일이다. 예시적인 실시형태에서, 흡수 기판을 어닐링하기에 충분한 전력 레벨로 설정된 어닐링 방사 빔 (20)을 가지고, 상온의 어닐링 방사 빔 (20)의 파장에서 실질적으로 비흡수적인 기판이 예열 방사 빔 (150)과 어닐링 방사 빔 (20)에 의해 조사된다. 예열 방사 빔 (150)의 전력 레벨은 어닐링 온도가 기판에서 발견될 때까지 증가된다. 이것은 예를 들어, 기판온도를 도 1a에 도시된 온도 감시기 M2에 의해 측정함으로써 달성될 수 있다.

기판과 어닐링 방사 빔의 적거나 아예 없는 커플링으로부터 기판 표면에서의 효과적인 커플링으로의 전환은 통상적으로 매우 갑작스러운 것이다. 만일 기판 온도 T_S 가 매우 낮다면, 어닐링 온도에 대한 전환이나 기판 녹는 점에 대한 급격한 전환은 발생하지 않을 수 있다. 기판 온도가 더 높아짐에 따라, 녹는 온도 이하에서 안정적인 동작을 허용하는 어닐링 전력 레벨의 좁은 범위가 존재하게 된다. 기판 온도가 더욱 증가하면, 어닐링 전력 레벨의 범위와 대응하는 어닐링 온도의 범위를 증가시킨다. 따라서, 기판의 어닐링 방사 빔 (20)의 흡수 전환을 개시시키거나 대안적으로 그것은 기판의 어닐링 온도를 리드하는 예열 방사 빔 (150)의 뚜렷하게 규정된 전력 레벨은 존재하지 않는다. 그러나, 그 아래에서는 원하는 어닐링 온도의 범위가 신뢰성 있게 달성될 수 없는 최소 실제 전력 레벨이 있다. 예시적인 실시형태에서, 예열 방사 빔 (150)은, 어닐링 방사 빔이 기판에 의해 효과적으로 흡수됨을 보증하고 큰 범위의 어닐링 온도도 쉽게 접근함을 보증하는 이 최소 전력 레벨보다 약간 위의 전력 레벨로 설정된다.

예시적인 실시형태에서, 자체-유지 어닐링 조건을 개시하는 데 필요한 예열 방사 빔 (150)의 전력 P_I 의 양은 550°C의 최대 기판 온도 T_{MAX} 를 제공하는 데 필요하다. 200μs의 지속시간을 가정하면, 도 5의 그래프는 이것이 600W/cm의 입사 전력에 대응함을 나타낸다. 그러나, 어닐링 방사 빔 이미지 (30)에 필적하는 폭을 갖는 이미지 (160)를 생성하는 예열 방사 빔 (150)에서 600W/cm의 강도를 얻는 것은 그리 용이하지 않다. 예시적인 실시형태에서, 예열 방사 빔 (150)은, 약 75°인 실리콘의 브루스터 각 (Brewster's angle)이나 그 근처인 입사각 θ_{150} 을 갖는 것이 바람직하다. 이 각은 반사되는 방사를 감소시키고, 기판에 제공될 법한 다양한 구조들에 대하여 기판에서 흡수되는 에너지를 균일화시킨다. 약 75°인 입사각 θ_{150} 에서, 예열 방사 빔 (150)은 기판 표면 (12)에서 흐려지고 (smeared out) 약 4 팩터만큼 증가된 영역을 커버하며, 그 강도는 비례적으로 감소된다.

예열 방사 빔 (150)의 총 전력은, 예를 들어 추가적인 레이저 다이오드의 행들을 부가함으로써, 예열 소스를 크게 제조하여 증가될 수 있다. 그러나, 이것은 예열 방사 빔 (150)의 폭을 비례적으로 증가시킨다. 증가된 예열 방사 빔 폭은 지속시간을 증가시키고 열 확산 깊이를 증가시키며, 이것은 또한 소정의 최대 온도를 달성하는 데 요구되는 전력을 증가시킨다. 따라서, 릴레이 렌즈 (143)는 사용 가능한 예열 방사 소스 (142)를 이용하여 임계 온도 범위 내로 기판을 가열하기에 충분한 강도를 갖는 예열 방사 빔 (150)을 제공하도록 설계될 것이 요구된다. 본 발명에 따른 그러한 릴레이의 예를 바로 아래에 설명한다.

VIII. 광학 릴레이 시스템의 예시적인 실시형태

도 8a 및 8b는 각각 광학 릴레이 시스템 (140)과 기판 (10)의 예시적인 실시형태의 단면도를 나타낸다. 도 8a는 Y-Z 평면, 도 8b는 X-Z 평면을 도시하였다. 도 8a, 8b에서, 페이지를 맞추기 위하여, 릴레이를 2부분으로 나누고, 표면들 (s13 및 s14)을 갖는 렌즈 소자를 2부분 모두에 도시하였다.

예시적인 실시형태에서, 예열 방사 소스 (142)는 코히어런트 반도체 그룹. 5100 패트릭 헨리 드라이브, 산타 클라라, 캘리포니아 95054로부터 입수할 수 있는 LightStack™ 7 x 1/L PV 어레이와 같은 2차원 레이저 다이오드 어레이를 포함한다. LightStack™ 어레이에는 각각 10mm 길이에 1.9mm 간격을 두고 스택된 워터-냉각 레이저 다이오드의 7행을 포함한다. 다이오드들의 각 행은 80W의 광학 전력을 방사할 능력이 있다. 릴레이 렌즈 (143)는 (예열 방사 소스 (142)가 배열되는) 대물 평면 OP, (기판 (10)이 배열되는) 이미지 평면 IP, 및 그 이미지 평면과 대물 평면을 연결하는 광학 축 A2를 포함한다.

예시적인 실시형태와 상술한 실시형태에서, 릴레이 렌즈 (143)는 기판 (10) 상에 주사되는 이미지 (예를 들어, 라인 이미지) (160)를 형성하는 예열 방사 빔 (150)을 생성하도록 설계된다. 이미지 (160)의 주사는 릴레이 렌즈 (143) (도 1c)에 대하여 (이동가능 스테이지 MS를 통하여) 척 (28)을 이동시키는 등의 임의의 방식으로 달성될 수 있다. 이미지 (160)를 갖는 기판 (10)을 국부적으로 조사하는 것은 한번에 전체적으로 기판을 조사하는 것에 비하여 바람직한데, 상대적으로 작

은 이미지 영역 상에서 기판을 가열시키는데 필요한 높은 빔 강도를 달성하는 것이 더 용이하기 때문이다. 따라서, 레레이 렌즈 (143)에 의해 제공되는 국부적인 예열은 어닐링 방사 빔 (20)을 사용하여 기판을 조사하는 것과 동시에 행해져야 한다.

레이저 다이오드의 방사 특성은 이방성 (anisotropic)이고 인접한 다이오드들간의 간격은 X와 Y 평면에서 상당히 다르기 때문에, 기판 (10)에 이미지 (160)를 효과적으로 형성하기 위해서 레레이 렌즈 (143)는 왜상 (anamorphic)이어야 한다. 또한, 기판 (10)의 이미지 (160)에 원하는 강도를 달성하기 위해서는, 이미지 평면 IP에 상대적으로 많은 개구수가 필요하다.

따라서, 도 9a, 9b를 참조하면, 레레이 렌즈 (143)는 광학 축 A2를 따라 예열 방사 소스 (142)로부터 차례로, 예열 방사 소스 (142)를 구성하는 레이저 다이오드 (198)의 행들의 수에 대응하는 렌즈렛 (201)을 갖는 원통형 렌즈 어레이 (200)를 포함한다. 원통형 렌즈 어레이 (200)는 X-Z 평면에서 전력을 가지며, 방사 소스로 (142)부터 X-Z 평면으로 방사된 (도 9a) 각각의 예열 방사 빔 (147)을 시준하는 역할을 하며, 방사가 Y-Z 평면에서 10°의 원뿔 각 (cone angle)을 갖도록 허용한다. 다이오드 어레이와 원통형 렌즈 어레이의 조합은 왜상의 레레이의 입력으로서 역할하며, 이것은 기판상에 원통형 렌즈 어레이를 다시 이미지 한다.

표 1은 도 8a, 8b에 도시된 레레이 렌즈 (143)의 예시적인 실시형태에 대한 렌즈 설계 데이터를 나타낸다.

[표 1]

s#	반지름 (RDY, RDX)	TH	Glass	소자
1	RDY = RDX = 8	3.100	NBK7	렌즈 202
2	RDY = RDX = -142.696	0.500		
3	RDY = RDX = 8	5.800	NBK7	렌즈 204
4	RDY = -30.060 RDX = 8	107.027		
6	RDY = 544.836 RDX = 8	7.800	B270	렌즈 206
7	RDY = -47.730 RDX = 8	113.564		
8	RDY = 99.955 RDX = 8	8.00	NBK7	렌즈 208
9	RDY = 1309.204 RDX = 8	52.015		
11	RDY = 8 RDX = 38.835	9.900	NBK7	렌즈 210
12	RDY = RDX = 8	6.946		
13	RDY = 8 RDX = -199277.3	9.600	NBK7	렌즈 212
14	RDY = 8 RDX = -13.079	338.951		
15	RDY = RDX = 50.084	6.749	NBK7	렌즈 214
16	RDY = RDX = 693.301	19.454		
17	RDY = RDX = 21573827	3.000	NBK7	렌즈 216
18	RDY = RDX = 34.369	5.895		
19	RDY = RDX = 946.3332	9.000	NBK7	렌즈 218
20	RDY = RDX = -84.838	.500		
21	RDY = RDX = 46.343	6.370	용해된 실리카	렌즈 220
22	RDY = RDX = 22.240	42.168		
23	RDY = RDX = 4434.483	8.000	용해된 실리카	렌즈 222
24	RDY = RDX = 8	21.000		
이미지 평면				

도 8a, 8b를 다시 참조하면, 레레이 렌즈 (143)는 공통 매개 이미지 평면 (IM)과 시리즈인 2개의 이미지 서브릴레이 (R1 및 R2)로 구성되어 있다. 서브릴레이 (R1)는 Y-Z, X-Z 평면에서 실질적으로 다른 전력을 갖는 원통형 렌즈 소자를 주로 채용하는 왜상의 레레이이고, 서브릴레이 (R2)는 구형상의 소자를 채용하고 1:6의 축소 비율을 갖는 종래의 레레이이다. 왜상의 레레이 (R1)는 Y-Z 평면에서 1:1의 확대 비율을 갖고 X-Z 평면에서 1:10의 축소 비율을 갖는다. 레레이 렌즈 (143)는 대물 평면 OP와 이미지 초점 평면 IP에서 텔레센트릭 (telecentric)하다.

대물 평면 OP와 이미지 평면 IP 양자에서의 텔레센트리서티는 예열 방사 소스 (142)에 바로 인접하게 배치된 구형상의 필드 렌즈 (202) (표면 s1-s2)와 원통형 렌즈 (204) (표면 s3-s4)에 의해 달성된다. 원통형 렌즈 (204)는 Y-Z 평면에서만 전력을 가지며 s5에서 Y-Z 평면에 퓨펄 (pupil) 이미지를 형성한다. 다음으로, Y-Z 평면에 전력을 갖고, 매개 이미지 평면에 1:1의 다이오드 어레이를 다시 이미지하는 2개의 원통형 렌즈 (206, 208) (표면 s6-s9)가 있다. 표면 s10은 X-Z 평면의 퓨펄 평면을 식별한다. X-Z 평면에 전력을 갖고 10:1의 축소 비율로 매개 이미지 평면에 다이오드 어레이를 다시 이미지하는 한 쌍의 원통형 렌즈 (210, 212) (표면 s11-s14)가 다음에 온다. 매개 이미지는, 6:1의 축소 비율을 갖는 서브릴레이를 형성하는 구형상의 렌즈 그룹 (214-222) (평면 s15-s24)에 의해 최종 이미지 평면에 다시 이미지된다. 따라서, 레레이는 다이오드들의 행들을 포함하는 평면에 전체적으로 6:1의 축소 비율을 갖고, 다이오드들의 각 행들에 수직한 평면에 60:1의 축소 비율을 갖는다.

Y-Z 평면의 6:1의 축소 비율은, 대물 평면 (OP) 의 10mm로부터 이미지 평면 IP의 1.67mm까지 예열 방사 소스 (142) 의 시준되지 않은 것 (슬로우-축) 의 크기를 10mm 감소시킨다. 따라서, 동일 평면에서, 예열 방사 소스 (142)로부터 대물 평면 OP에 방사된 방사의 10°의 원뿔각은 이미지 평면 (IP) 에서 60°로 증가된다.

X-Z 평면의 축소 비율은 60:1이다. 따라서, 대물 평면 (OP) 에 효과적인 소스 (220) 를 구성하는 (다이오드들의 7행에 걸쳐 x방향으로 측정된) 레이저 다이오드 어레이의 11.4mm 크기는 이미지 평면 IP에서 0.19mm로 감소된다. 또한, 효과적인 소스 (220) 에 시준된 빔의 1°FWHM 각도 확산은 이미지 평면 (IP) 에서 60°원뿔 각으로 증가된다.

만일, 대물 평면 OP의 방사 소스 (142)로부터 이미지 평면 IP의 기판 (10) 으로의 예열 방사 (147) 전달의 전체 효율성이 (기판 표면 (12) 에서의 반사 손실을 포함하여) 50%이면, 도 8a, 8b의 릴레이 렌즈 (143) 는 280W를 이미지 (160) 에 제공할 수 있다. 예시적인 1.6mm x 0.19mm의 이미지 (160) 크기에 대하여, 이것은 921W/mm²의 전력 밀도를 달성한다. 수직 입사각 ($\Theta_{150}=0^\circ$) 에서, 이 전력 밀도는 실리콘 기판 (10) 의 상온 온도 (즉, ~20°C) 를 약 500°만큼 증가시켜 약 0.2ms의 지속시간을 가정할 때 거의 520°C까지 증가시킬 것이다. 이것은 자체-유도 어닐링 조건을 개시하기 위해 필요한 400°C의 임계, 균일한 온도 이상이며, 어닐링 레이저 이미지 (30) 의 바로 앞에 위치되는 다이오드 어레이 이미지 (160) 에 의해 제공되는 것과 같은 불균일한 온도 분포를 위한 정확한 범위에 있다. 이 경우에, 예열 방사 빔 (150) 은 어닐링 방사 빔 (20) 을 앞선다고 (즉, 그 앞에 주사된다고) 가정된다. 이런 방식으로, 예열 방사 빔에 의해 생성된 최대 온도 T_{MAX} 는 어닐링 방사 빔 (20) 을 동일한 기판의 예열된 부분에 조사하기 이전에 달성된다. 예시적인 실시형태에서, 예열 방사 빔 및 어닐링 방사 빔의 상대적인 위치는 주사 방향이 역전될 때마다 역전되며 예열 방사 빔은 항상 어닐링 방사 빔을 앞선다.

IX. 방사 빔 주사 및 방향

전술한 것처럼, 예시적인 실시형태에서, 예열 방사 빔 (150) 에 의해 형성된 이미지 (160) 는 기판 (10) 상에 주사된다. 이와 관련하여, 어닐링 방사 빔 (20) 에 의해 형성된 이미지 (30) 는 기판 상에 주사되어, 이것은 예열 방사 빔에 의해 예열된 기판 부분에 입사된다.

예시적인 실시형태에서, 주사는 기판을 나선형, 캐스터 또는 좌우교대식 (boustrophedonic) 패턴으로 움직임으로써 수행된다. 좌우교대식 주사 패턴에서, 주사 방향은 역전되며, 매 주사 이후에 횡단-주사 (cross-scan) 위치가 증가된다. 이 경우에, 전술한 것처럼, 각각의 주사 사이에 예열 방사 빔 (150) 과 어닐링 방사 빔 (20) 의 상대적인 위치들을 변화시킬 것이 요구된다. 예시적인 실시형태에서, 이것은 전체 릴레이 렌즈 (143) 의 위치를 이동시킴으로써 달성된다. 어닐링 방사 빔이 대략 120μm 폭 (FWHM) 이고 예열 방사 빔 (250) 이 190μm 폭 (상부-햇 프로파일) 일 때, 릴레이 렌즈 (143) 는 빔 중심들 사이의 거리의 약 2배 또는 주사 방향에 평행한 방향으로 약 393μm 만큼 이동될 것이 요구된다. 예를 들어, 이것은 릴레이 렌즈 (도 1c) 의 이동을 실행시키도록 예열 릴레이 렌즈 (143) 에 동작적으로 접속된 제어기 (32) 로부터의 신호에 의해 달성된다. 유사한 방식으로, 제어기 (32) 는 주사 이전에 기판의 초점, 정점, 및 틸트 (tilt) 파라미터들을 조절함으로써 예열 방사 빔 (150) 의 초점을 제어한다.

전술한 미국 특허 출원 제 10/287,864 호에 개시된 것처럼, 어닐링 방사 빔 (20) 을 기판에 브루스터 각도로 또는 그와 근사한 각도로 입사시키고 P-편광시키는 것이 바람직하다. 이것은 어닐링 동안에 기판과 만나기 쉬운 필름 스택이 이런 조건하에서 작은 반사율 및 반사율에 있어 작은 변화를 갖기 때문이다.

예시적인 실시형태에서, 예열 방사 빔 (150) 은 어닐링 방사 빔 (20) 의 경우와 유사한 방식으로 브루스터 각 또는 그에 근사한 입사각 Θ_{150} 으로 기판을 조사하도록 배열된다. 일반적으로, 이 각은 활성화 (어닐링) 단계 이전에 기판에서 발견되기 쉬운 상이한 필름 스택들 사이에서 반사율의 변동을 저감시킨다. 그러나, 이 빔 방향 (각) 이 어닐링 파장에서는 매우 잘 작동하지만, 예열에 사용되는 파장에서는 효과적이지 않다. 예열 방사 빔 파장들 사이의 대략적인 동일성과 반도체 구조 (예를 들어, 트랜지스터와 같은 장치 (14)) 를 만드는데 사용되는 필름들의 두께는 모든 입사각에 있어서 기판 반사율에 더 큰 변화를 가져온다. 또한, 브루스터 각 또는 이에 근사한 입사각 Θ_{150} 은 수직 입사각 (즉, $\Theta_{150}=0^\circ$) 에 비하여 3 또는 4배 큰 영역에 이미지 (160) 를 확산시키고, 대응하는 양만큼 전력 밀도를 낮춘다. 어닐링 방사 빔 구조에 의해 주로 설정되므로, 만일 주사 속도가 변화하지 않는다면, 최대 온도 또한 감소된다.

수직 입사각이나 이에 근사한 각에서 동작하는 경우의 문제 중 하나는 반사된 방사의 일부가 매우 높고 그것이 방사 소스 (예를 들어, 다이오드 어레이) 로 되돌아 올 경우에 심각한 손상을 야기한다는 것이다. 도 10a 및 10b는 예열 방사 소스 (142; 도 1c) 로 다시 반사 또는 산란되는 예열 방사의 양을 감소시키기 위한 예열 릴레이 광학 시스템 (140) 의 예시적인

실시형태를 나타내는 구조도이다. 도 10a를 참조하면, 바람직한 실시형태에서, 예열 방사 빔 (150)은 $\Theta_{150} = 0^\circ$ 의 수직 입사각을 갖는다. 수직 입사각은 예열 방사 빔 (150)의 상당량이 기판으로부터 반사되어 (반사된 예열 방사는 150R로 표시), 예열 방사 소스 (142) 쪽으로 다시 전달되도록 한다. 반사된 예열 방사 (150R)가 다시 예열 방사 소스 (142)로 보내지면, 소스의 실패를 촉진할 수 있다. 방사된 예열 방사 (147)는 (레이저 다이오드의 경우처럼) 편광되고, 예시적인 실시형태에서, 예열 방사 소스로 돌아오는 반사된 예열 방사 (150R)의 양은 예열 방사 빔의 편광방향과 나란히 정렬된 편광기 (143P), 및 편광기와 기판 사이에 위치된 1/4 웨이브 판 (143WP)을 배열시킴으로써 감소된다. 1/4 웨이브 판은 편광기로부터 기판으로 이동하는 방사를 기판의 원형의 편광 방사로 변환시킨다. 기판으로부터 돌아오는 임의의 방사는 1/4 웨이브 판을 통과한 이후에 선형 편광 방사로 다시 변환된다. 한편, 되돌아오는 방사의 편광의 방향은 원래의 방향과 직교한다. 따라서, 돌아오는 빔은 편광기에 의해 전달되지 않고 레이저 다이오드 어레이에 도달하지 않는다.

도 10b를 참조하면, 입사각 Θ_{150} 이 법선에서 벗어난 (off-normal) 입사각으로 선택되어 반사된 (스펙큘러; specular) 예열 방사 (150) 가 예열 방사 소스로 돌아오지 못하도록 되는 경우라도, 예열 방사 소스로 돌아오는 산란된 (또는 논스펙큘러) 예열 방사 (150S)는 문제를 낳는다. (레이저와 같은) 일정 유형의 예열 방사 소스로 되돌아온 방사의 아주 작은 양이라도 광학적 불안정을 야기할 수 있다. 또한, 기판에서 흡수되는 방사의 비율을 증가시키고 기판상의 다양한 구조에 의해 야기되는 흡수의 변동을 감소시키기 위해서 법선 각도에서 벗어나서 동작할 때, p-편광된 예열 방사 빔을 채용하는 것이 바람직하다.

따라서, 예시적인 실시형태에서, 예열 방사 소스 (142)로 돌아오는 예열 방사 (150S)의 양은 편광기 (143P) 와 패러데이 회전자 (143F) 를 릴레이 렌즈 (143) 아래에 부가함으로써 감소된다. 패러데이 회전자 (143F) 는 편광기 (143P) 와 기판 (10) 사이에 위치된다. 동작시에, 패러데이 회전자는, 회전자를 2번 통과한 이후에 예열 방사 빔 (150)의 편광을 90° 회전시키고, 그 편광기는 편광-회전된 예열 방사 (150S) 가 예열 방사 소스 (142)로 되돌아오는 것을 방지한다. 예열 방사 빔 (150) 이 법선의 입사각에서 벗어나 있도록 광학 릴레이 시스템 (140) 을 동작시키는 것은 진단에 유용한 반사된 예열 방사 빔 (150R) 의 전력 측정을 촉진한다.

입사 예열 방사 빔 (150) 과 반사된 예열 방사 (150R) 의 전력의 측정은 기판 (10) 에 의해 흡수된 전력을 계산하는 데 이용될 수 있다. 그리고, 이것은 예열 방사 빔 (150) 에 의해 발생된 최대 온도를 추정하는 데 이용된다. 예열 방사 빔 (150) 에 흡수된 전력을 임의의 최소 임계치 이상으로 유지함으로써, 기판에 의한 어닐링 방사 빔 (20) 의 강한 흡수를 유발하는데 충분한 예열이 보장된다.

예열 방사 (150) 를 가지고 예열 방사 빔의 반사를 최소화하는 각도 Θ_{150} 으로 기판 (10) 을 조사하는 것이 바람직하지만, 그것이 항상 편리하거나 가능한 것은 아니다. 이것은, 기판 (10) 의 반사율이 다양한 박막과 기타 그 위에 존재하는 구조들을 가질 수 있는 기판 표면 (12) 의 성질에 의존하기 때문이다.

이들 구조는 접합 영역의 베어 실리콘으로부터, 필드 옥사이드, 필드 옥사이드상의 폴리실리콘이다. 통상의 접적 회로는 30% ~ 50% 의 필드 옥사이드, 약 15% ~ 20% 의 베어 실리콘 또는 실리콘상의 폴리실리콘으로 구성되며, 그 나머지는 필드 옥사이드 상의 폴리실리콘인 것으로 추정된다. 그러나, 이들 비율은 회로마다 변화할 수 있으며, 한 회로 내에서도 변화할 수 있다.

도 11은, 접합부 활성화를 위한 실리콘 기판에 통상적으로 제공되는 예시적인 필드 옥사이드막들 (300nm, 400nm 및 500nm) 을 갖는 베어 실리콘의 입사각 Θ_{150} (degree) 에 대한 다양한 반사율 R (%) 을 나타낸다. 도 11의 그래프는 기판 상에 입사하는 방사가 800nm의 파장을 가지며 P-편광된 것으로 가정한다. 그래프로부터 알 수 있듯이, 이들 필름에 대하여 최적의 동작 지점은 반사율이 모두 약 14%와 동일한 각도인 약 55° 의 입사각 (e') 에 대응한다.

도 12는 도 11에 유사한 그래프이며, 실리콘 기판 상에 300nm, 400nm 및 500nm의 두께를 갖는 옥사이드 층의 130nm의 두께의 폴리실리콘 층의 반사율을 도시한다. 이경우에, 이상적인 동작 입사각은 없지만, 55° 가 합리적인 선택이다. 실제로, 폴리실리콘 층 및 실리콘 층의 활성화된 도편트의 존재는 이들 영역에 보다 금속과 같은 것을 제공하며 입사각의 모든 각도에서 반사율을 증가시킨다.

아래 더 상세히 기술하겠지만, 도 16을 간단히 참조하면, 예열 방사 소스 (142)로부터 기판 (10) 으로 충분한 에너지를 전달하기 위해서, 예열 방사 빔 (150) 이 기판에 실질적인 입사각 범위를 채용할 것이 요구되며 즉, 예열 렌즈 (143) 는 실질

적인 개구수 $NA = \sin\Phi_{150}$ 를 가지며, 여기서 Φ_{150} 은 축 A2와 예열 방사 빔 (150)의 바깥쪽 광선 (150A 또는 150B)에 의해 형성되는 각의 절반이다. 입사각 Θ_{150} 은 표면 법선 N과 축 A2사이에서 측정되며, 여기서 축 A2는 또한 예열 방사 빔 (150)의 축 광선을 나타낸다. 축 광선과 표면 법선 N 사이의 각은 여기서 각도들 범위의 "중심각"으로서 지칭된다.

예시적인 실시형태에서, 입사각들의 20° 범위가 입사 평면에 있는 것으로 간주되면, 도 11의 그레프는 다양한 필름 스택들 사이의 반사율의 변화를 최소화하기 위한 우수한 선택은 약 52° 를 중심으로 하는 약 42° 내지 약 62° 의 입사각 Θ_{150} 으로의 확산임을 제안된다.

실제로, 기판으로부터 반사되는 예열 방사를 제거하기는 어렵기 때문에, 본 발명의 예시적인 실시형태는 반사된 예열 방사 (150R)를 포착 (capturing) 하고, 그것을 "리사이클된 방사 (150RD)"로서 다시 기판으로 향하게 하는 단계를 포함하며, 이것은 흡수되어 기판 가열에 기여한다.

따라서, 도 13을 참조하면, 도 10b와 유사한, 반사된 예열 방사 (150R)를 수광하고 그것을 리사이클된 예열 방사 (150RD)로서 기판으로 다시 향하게 하도록 배열된 리사이클링 광학 시스템 (300)을 포함하는, 본 발명의 LTA 장치 (8)의 예시적인 실시형태의 확대 개략도이다. 리사이클링 광학 시스템 (300)은 표면 법선 N에 대하여 각 Θ_{150RD} 를 만드는 축 A3를 따라 배열된다. 리사이클링 시스템 (300)이 반사된 예열 방사 (150R)를 가장 잘 수광하도록 하기 위해, 예시적인 실시형태에서, 각 Θ_{150RD} 은 예열 방사 빔 입사각 Θ_{150} 과 동일하게 된다.

도 14는 중공의 코너 큐브 반사기 (310) 및, 렌즈로부터 기판 표면 (12) 까지의 거리에 대응하는 초점길이 (F)를 갖는 집광/결상 렌즈 (316)를 포함하는 리사이클링 광학 시스템 (300)의 예시적인 실시형태의 단면도이다. 중공의 코너 큐브 반사기 (310)는, 도면을 단순화하기 위해 단지 2개의 표면들 (312 및 314) 만 도 14에 간략하게 도시하였지만, 오른쪽 각도에서 교차하는 3개의 반사 표면을 갖는다.

동작시에, 렌즈 (316)는 기판 표면 (12)으로부터 반사된 예열 방사 (150R)를 집광하고, 그것을 평행한 광선들 (320)로서 코너 큐브 반사기 표면들 (312 및 314)으로 향하게 한다. 평행한 광선들은 3개의 반사기 표면으로부터 반사되며, 리사이클된 예열 방사 (150RD)를 구성하는 평행한 광선들 (320')로서 정확히 반대방향으로 렌즈 (316)로 다시 향하게 된다. 평행한 광선 (320')은 렌즈 (316)에 의해 집광되며 원래 지점의 기판 표면 (12)으로 다시 결상된다.

도 15는 도 14에 도시된 예시적인 실시형태의 변형예의 단면도로서, 코너 큐브 반사기 (310)가 축 A3에 대하여 ΔD 만큼 범위되어 있다 (어긋나 있다). 이것은 반사된 예열 방사 빔 (150R)과 리사이클된 예열 방사 빔 (150RD) 사이에서 기판으로의 입사각에 오프셋을 초래한다. 기판 상의 빔의 위치는 동일하게 유지되며 단지 입사각만 변화한다. 2개의 빔의 입사각 사이의 상대적인 오프셋은 반사된 예열 방사가 예열 방사 소스 (142)로 다시 이동하는 것을 막고 방사 소스의 불안정성을 야기하는 것을 막는데 이용될 수 있다. 이 특정한 예시적인 실시형태에서, 총 내부 반사를 채용하는 반사형 코너 큐브는 작동하지 않는데, 빔의 편광을 보존하지 않기 때문이다.

도 16은, 집광/결상 렌즈 (450) 및 격자표면 (462)을 갖는 격자 (460)를 갖는 리사이클링 광학 시스템 (300)의 다른 예시적인 실시형태의 단면도이다. 예시적인 실시형태에서, 렌즈 (450)는, 제 1 및 제 2 렌즈들 (470 및 472) 와 제 1 및 제 2 렌즈 사이에 위치된 개구 스탑 (aperture stop; 474)을 갖는 고해상도, 텔레센트릭 릴레이이다. 또한, 예시적인 실시형태에서, 렌즈는 기판측에 초점길이 (F1) 및, 격자측에 초점길이 (F2)를 가지며, 렌즈는 기판 표면 (12) 이 렌즈 (470)로부터 축 A3를 따라 측정된 거리 (F1) 만큼 떨어지고, 격자 (460)는 렌즈 (472)로부터 축 A3를 따라 측정된 거리 (F2) 만큼 떨어지도록 배치된다. 또한 두개의 렌즈들 (470 및 472)는 그 2개의 초점 거리의 합과 같은 거리만큼 떨어져 있다.

격자 표면 (462)은 바람직하게는 예열 방사 빔 (150)의 방사의 파장을 광학적으로 회절시키도록 구성되고, 입사 방사가 입사경로를 따라 되돌아오도록 조절된다. 최적의 격자 주기 (period; P)는 $P=n\lambda/2\sin\Theta_G$ 로 주어지고, 여기서 λ 는 예열 방사의 파장이며, Θ_G 는 격자 표면 법선 N_G 에 대한 격자상으로의 입사각이며, n은 격자를 들러싸는 매체의 굴절율이다 (공기는, $n=1$). 격자의 목적은 기판에서의 틸트된 초점평면을 보상하기 위한 것이며, 그렇지 않으면 되돌아오는 이미지는 이미지 지점 (468)과 릴레이 (450)의 축 사이의 도 16의 평면상의 거리에 의존하는 양만큼 초점이 어긋나게 된다. 이러한 구조에서, 릴레이 (450)는 $-1X$, $\Theta_G = \Theta_{150} = \Theta_{150R} = \Theta_{150RD}$ 에서 동작한다. 일반적으로, $\tan\Theta_G=M\tan\Theta_{150}$ 이고, M은 기판으로부터 격자까지의 릴레이 (450)의 확대 비율이다.

동작시에, 반사된 방사 (150R) 는, 방사를 격자 표면 (462)으로 초점을 맞추는 렌즈 (470, 472)를 포함하는 텔레센트릭 릴레이 (450)에 의해 집광된다. 격자 표면 (462)은 방사를 다시 릴레이 (450)로 향하게 하여 (보다 정확하게 회절시키며), 이것은 리사이클된 예열 방사 (150RD)를 표면 (12)이나 반사된 예열방사가 발생된 지점 (468) 근처로 다시 향하게 한다.

도 16의 실시형태의 단점은, 결국에는 그 격자를 녹이거나 손상시킬 수 있는 계속되는 방식으로 반사된 예열 방사 (150R) 가 격자의 매우 작은 지점 (spot)에 이미지된다는 것이다. 비슷한 문제가 격자 대신에 수직-입사 미러 (미도시)를 사용하는 경우 발생될 수 있다. 따라서, 도 16의 예시적인 실시형태를 이용하는 도 1c의 장치 (8)를 동작시키는데 주의하여야 한다.

도 17은, 예열 방사 소스들 (142 및 142')를 각각 가지며 각각 기판에 이미지 (160, 160')를 형성하는 예열 방사 빔들 (150 및 150')을 각각 방사하는 2개의 예열 광학 릴레이 시스템들 (140 및 140')을 채용하는 기판 (10) 예열을 위한 배열의 예시적인 실시형태의 단면도이다. 예시적인 실시형태에서, 예열 시스템들 (140 및 140')은 적어도 부분적으로 기판상의 다른 하나를 중첩하는 이미지들 (160 및 160')를 각각 형성하도록 배열된다. 그러한 배열은 고전력 예열 방사들 (147 및 147')를 출력하기 위한 예열 방사 소스들 (142 및 142')에 대한 요구를 감소시킨다. 예시적인 실시형태에서, 예열 방사 소스들 (142 및 142')는 각각 레이저 다이오드 어레이이다. 또한, 예시적인 실시형태에서, 레이저 다이오드는 780nm-840nm의 파장의 방사를 방사한다. 예열 방사 소스들 (142 및 142')는 제어기 (32)에 동작적으로 접속되어 있다.

예시적인 실시형태에서, 어닐링 방사 빔 (20) (도 1c)은 기판 표면에 실리콘에 대한 브루스터 각 또는 그 근처의 입사각 Θ_{20} 으로 입사한다 (즉, 10.6 μm 에서의 Θ_{20} 는 75°). 도 17의 예열 방사 빔들 (150 및 150')은 예열 빔의 큰 각도의 확산때문에 브루스터 각과 다를 수 있는 각도 Θ_{150} 및 $\Theta_{150'}$ 으로 입사한다. 예시적인 실시형태에서, 입사각 Θ_{150} 및 $\Theta_{150'}$ 은 (예를 들어, 약 52°로) 동일하며, 다른 예시적인 실시형태에서, 입사각 Θ_{150} 및 $\Theta_{150'}$ 은 다르다.

예시적인 실시형태에서, 이미지 (160, 160')는 이미지 (30)의 앞 (즉, 주사 방향의 앞에)에 형성되어, 어닐링 방사 빔 (20)이 기판 표면 (12)에 대하여 주사되면, 기판은 그 빔이 기판의 예열된 부분 상에 도달하기에 앞서 예열된다.

도 17의 실시형태는 2개의 예열 방사 빔 (150, 150')에 한정되지 않는다. 일반적으로, 원하는 예열 효과를 얻기 위하여, 임의의 합리적인 수의 예열 방사 빔이 대응하는 이미지를 기판 표면 (12) 상에 형성하는데 이용될 수 있다.

전술한 상세한 설명에서, 설명의 용이함을 위하여 다양한 특성들은 다양한 예시적인 실시형태들로 그룹화되었다. 본 발명의 다수의 특징들과 이점은 상세한 설명으로부터 명백하며, 이것은 첨부된 청구의 범위에 의해 본 발명의 정신과 영역을 일탈하지 않고 상술한 장치의 모든 특징들과 이점을 포함하는 것으로 의도된다. 또한, 다수의 수정과 변형이 당업자에게 용이하며, 본 발명은 여기에 설명한 특정 구성이나 동작에 한정되지 않는다. 따라서, 다른 실시형태가 첨부된 청구범위의 범위내에 있다.

발명의 효과

이상 설명한 것처럼 본 발명에 의하면, 저농도로 도핑된 실리콘 기판의 경우에도, 레이저 열 프로세싱을 효과적으로 수행하는 장치 및 방법을 제공할 수 있다.

도면의 간단한 설명

도 1a는 LTA 광학시스템에 의해 프로세스되는 실리콘 기판과 함께 LTA 광학시스템을 포함하는 본 발명의 LTA 장치의 예시적인 실시형태의 단면도로서, LTA 장치는 기판을 지지하고 예열하는 가열된 척 (chuck)을 포함하고 그장치의 나머지 부분과의 방사 커플링을 감소시키고 효율적인 기판 가열을 촉진하기 위하여 척을 둘러싸는 광학 열 실드 (shield)를 포함하는, 단면도.

도 1b는 도 1a에 도시된 장치와 유사한, 기판을 예열하기 위하여 기판을 둘러싸는 가열된 엔클로저를 포함하는, 본 발명의 LTA 장치의 실시형태의 단면도.

도 1c는 도 1a에 도시된 장치와 유사한, 예열 방사 빔을 이용하여 적어도 기판의 일부를 예열하도록 구성된 광학 가열 시스템에 의해 가열된 척과 광학적 열 실드가 치환된, 본 발명의 LTA 장치의 실시형태의 단면도.

도 2는 기판 온도 T_S ($^{\circ}$ C)에 대한, $10.6\mu m$ 파장의 어닐링 방사 빔의 도핑되지 않은 실리콘 기판으로의 흡수 경로 길이 L_A (μm)의 그래프와 함께, 기판 온도 T_S ($^{\circ}$ C)에 대한, $200\mu s$ 의 지속 시간 (dwell time)을 갖는 방사 빔과 연관된 확산 길이 L_D 의 그래프.

도 3은 깊이 (μm)와 어닐링 방사 빔 위치 (μm)의 함수로서 기판 온도 프로파일의 컴퓨터 시뮬레이션을 나타낸 도면이며, 자체-유지 어닐링 조건과 연관된 어닐링 방사 빔에 의해 기판에 형성된 "열 점 (hot spot)"을 나타낸다.

도 4a는 기판 표면상의 위치의 함수로서 예열 빔 및 어닐링 방사 빔의 상대적 강도 및 빔 프로파일의 예시적인 실시형태의 개략도.

도 4b는 어닐링 방사 빔의 앞에 이미지된 예열 방사 빔으로부터의 열이 자체-유지 어닐링 조건을 실행시키기 위해 기판에서의 어닐링 방사 빔의 흡수를 촉진하는 방법을 나타내는 기판의 확대 단면도.

도 5는 어닐링 방사 빔의 입사 전력 P_I (W/cm)에 대한, 고농도로 도핑된 실리콘 기판을 $10.6 \mu m$ 의 파장을 갖는 어닐링 방사 빔으로 조사하여 생성된 최대 기판 온도 T_{MAX} ($^{\circ}$ C)의 그래프.

도 6은 도핑되지 않은 기판에 대한 어닐링 방사 빔의 상이한 입사 전력 P_I 에 대한 최초 기판 온도 T_I 의 함수로서 유한-요소 시뮬레이션에 의해 얻어진 최대 기판 온도 T_{MAX} ($^{\circ}$ C)의 그래프.

도 7은 기판 온도 T_S ($^{\circ}$ C)의 함수로서 실리콘에서 780nm의 예열 방사 빔의 흡수 길이 L_A (μm)의 그래프.

도 8a는 도 1c의 광학 릴레이 시스템의 실시형태를 Y-Z 평면에서 본 단면도.

도 8b는 도 1c 및 도 8a의 광학 릴레이 시스템의 실시형태를 X-Z 평면에서 본 단면도.

도 9a는 열 방사 소스 및 원통형 (cylindrical) 렌즈 어레이를 X-Z 평면에서 본 확대 단면도.

도 9b는 열 방사 소스 및 원통형 렌즈 어레이를 Y-Z 평면에서 본 확대 단면도.

도 10a는 예열 방사 소스, 릴레이 렌즈 및 기판에 수직 입사하는 예열 방사 빔, 또한 기판으로부터 반사되는 예열 방사의 양과 예열 방사 소스로 돌아오는 양을 감소시키기 위해 예열 방사 빔에 배열된 편광기 및 1/4 웨이브 판을 포함하는 확대 개략도.

도 10b는 예열 방사 소스, 릴레이 렌즈 및 기판에 거의 수직 입사하는 예열 방사 빔, 또한 기판으로부터 산란되는 예열 방사의 양과 예열 방사 소스로 돌아오는 양을 감소시키기 위해 예열 방사 빔에 배열된 편광기 및 패러데이 회전자를 포함하는 확대 개략도.

도 11은 실리콘 기판상의 300nm, 400nm, 및 500nm 두께의 필드 옥사이드 막을 가진 베어 실리콘 (bare silicon)에 대한 입사각 Θ (degree)에 대한 반사율 R (%)의 변화를 나타내는 그래프.

도 12는 실리콘 기판상의 각각 300nm, 400nm, 및 500nm 두께의 옥사이드 층을 갖는 130nm 두께의 폴리실리콘 층의 반사율을 나타내는, 도 11과 유사한 그래프.

도 13은, 반사된 예열 방사 (150R)를 수광하고 그것을 다시 기판으로 향하도록 배열된 리사이클링 광학 시스템 (300)을 포함하는 것을 제외하고 도 10b과 유사한 본 발명의 LTA 장치의 예시적인 실시형태의 확대 개략도.

도 14는 코너 반사기 및 집광/결상 렌즈를 포함하는 도 13의 리사이클링 광학 시스템의 예시적인 실시형태의 단면도.

도 15는 도 14에 도시된 예시적인 실시형태의 변형예의 단면도로서, 코너 반사기가 축(A3)에 대하여 $\triangle D$ 만큼 변위되어 (어긋나서; decentered), 직접적으로 입사하는 예열 방사 빔과 리사이클된 예열 방사 빔의 입사각 사이에 오프셋(offset)을 초래하는 도면.

도 16은 집광/결상 렌즈 및 격자를 포함하는 도 13의 리사이클링 광학 시스템의 다른 예시적인 실시형태의 단면도.

도 17은 기판 법선에 대하여 서로 반대 방향에서 유사한 입사각을 갖는 2개의 예열 광학 릴레이 시스템을 이용하여 기판을 예열하기 위한 배치의 예시적인 실시형태의 단면도.

※ 도면의 주요부분에 대한 부호의 설명

8: LTA 장치 10: 기판

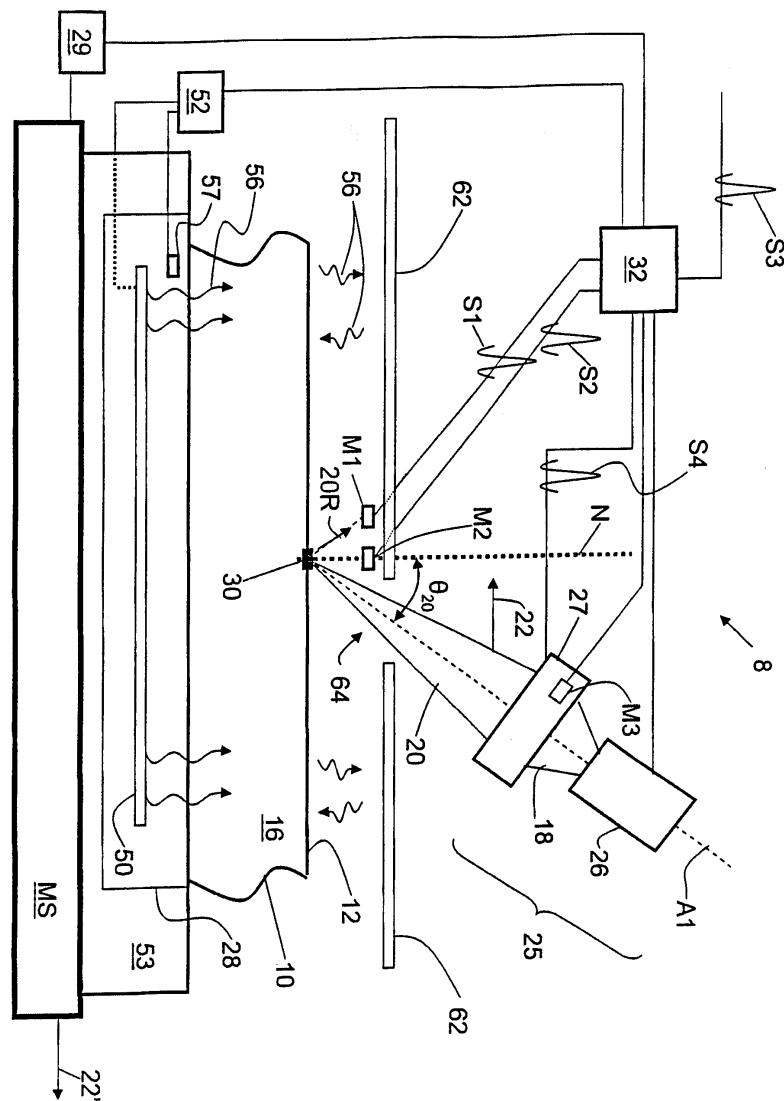
20: 어닐링 방사 빔 28: 측

32: 제어기 150: 예열 방사 빔

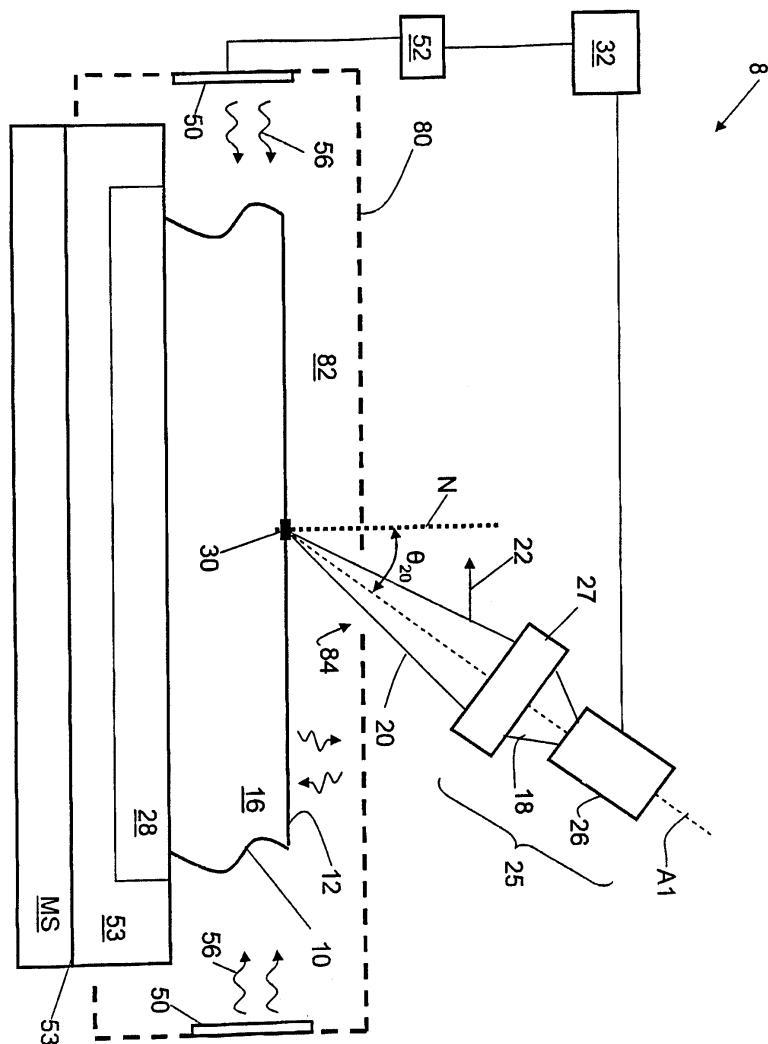
도면에 도시된 다양한 소자는 단순하게 묘사하였으며 치수를 도시하지 않았다. 소자의 일부는 확대 도시하였으며, 반대로 일부는 축소 도시하였다. 도면은 본 발명의 다양한 구현을 설명하도록 의도되었으며, 당업자에게 이해될 수 있으며 적절히 실시할 수 있다.

도면

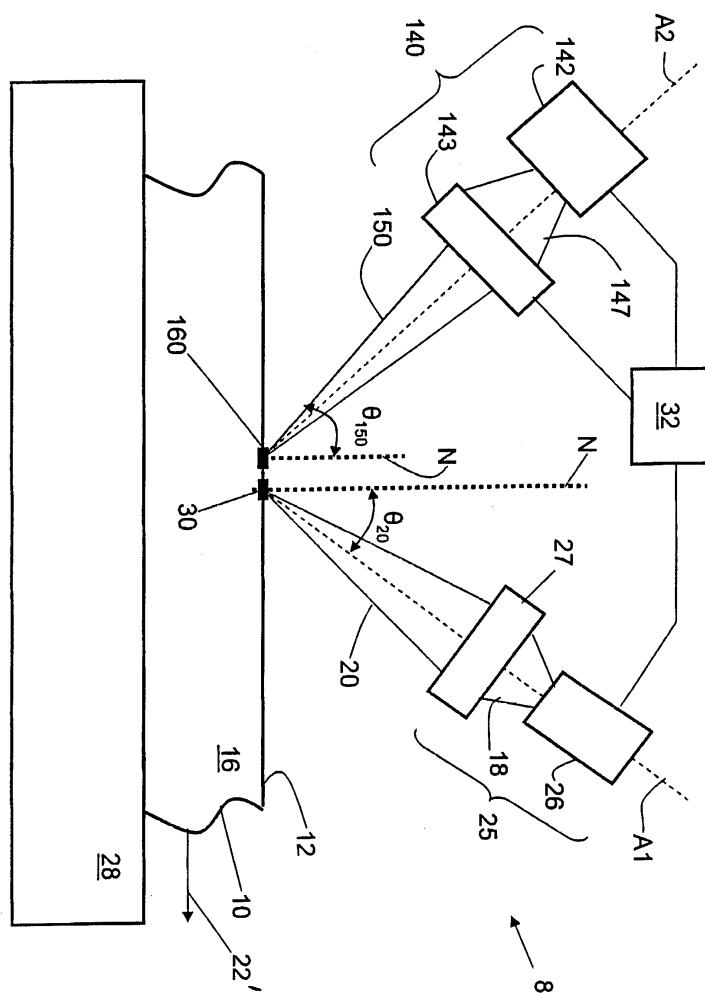
도면1a



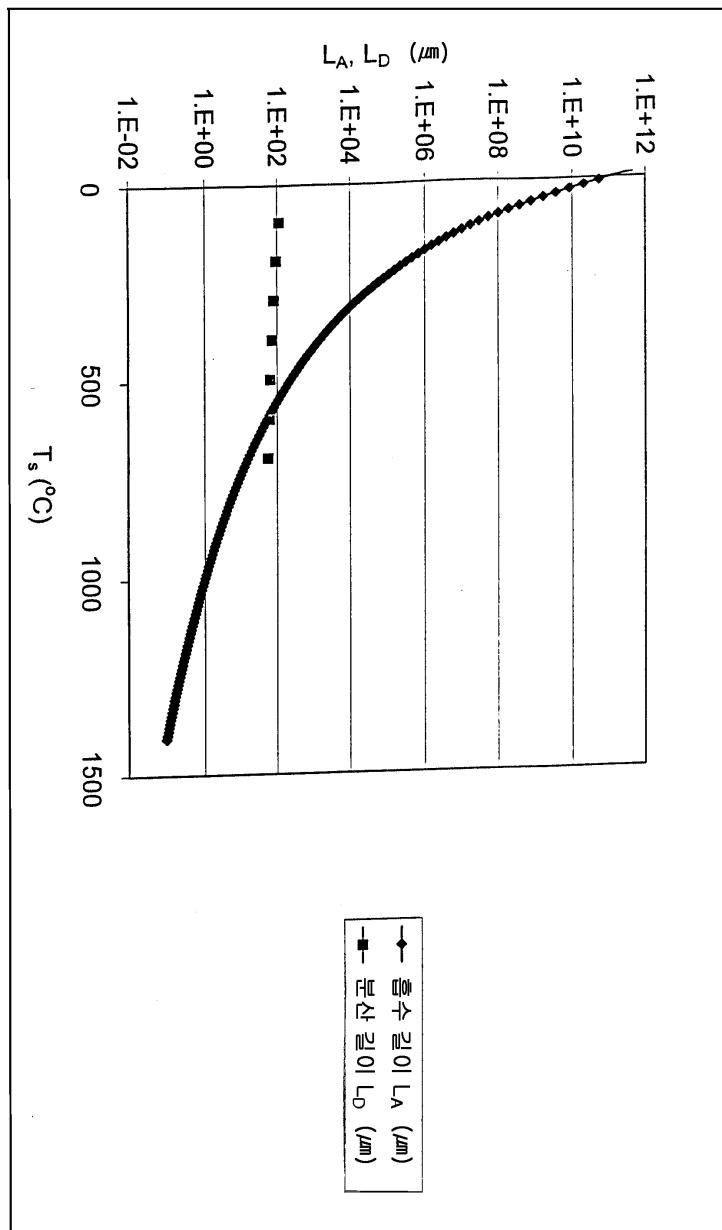
도면1b



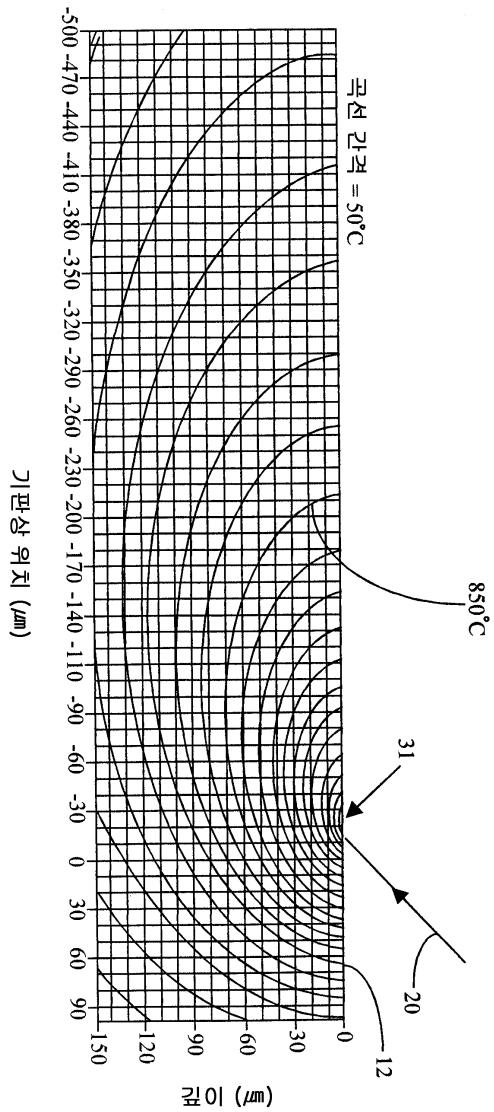
도면1c



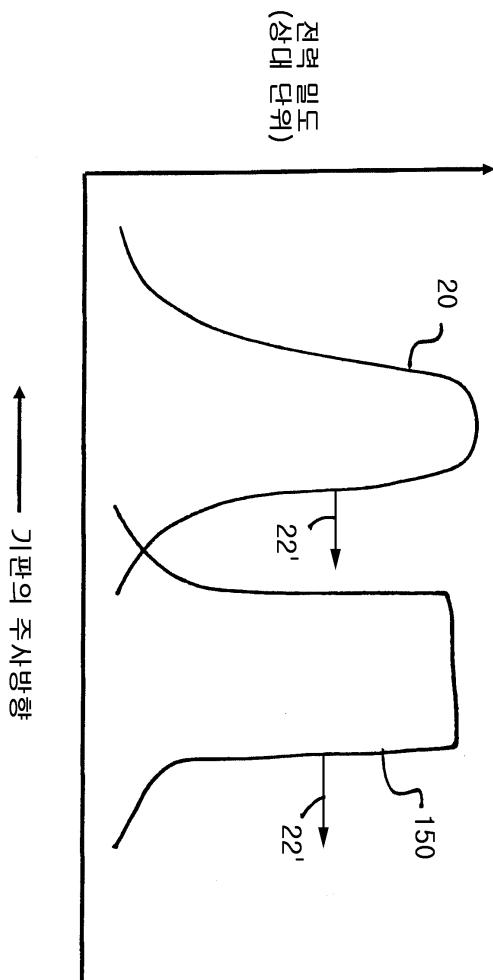
도면2



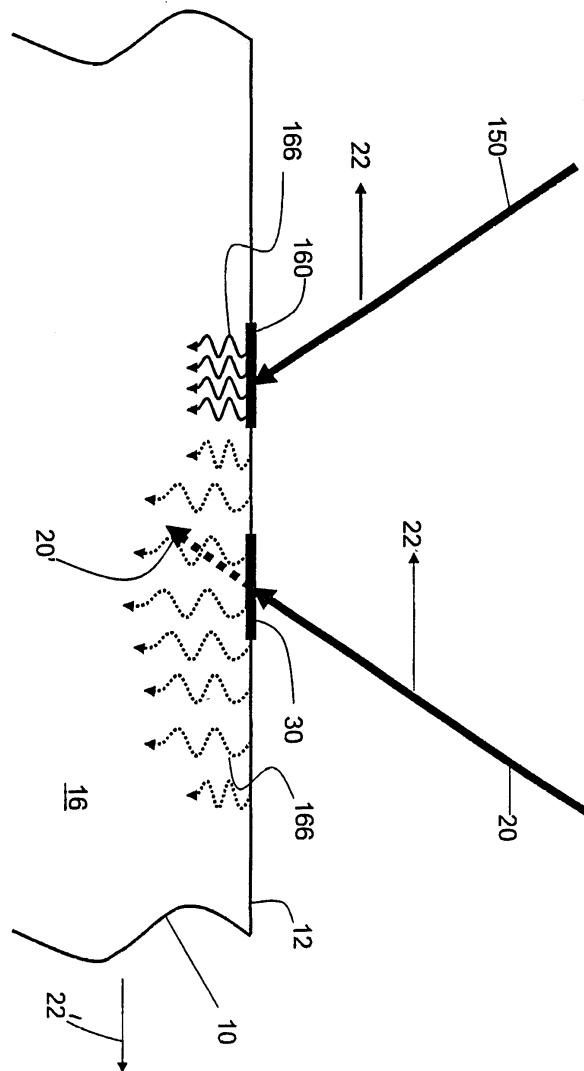
도면3



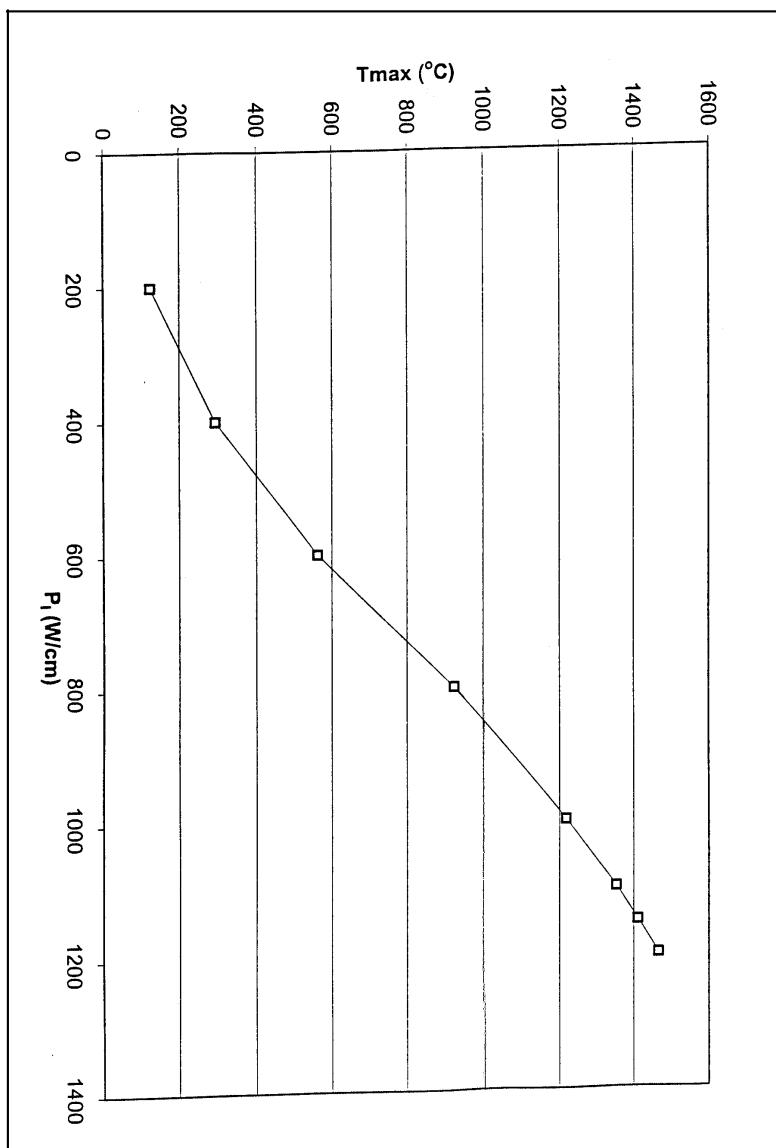
도면4a



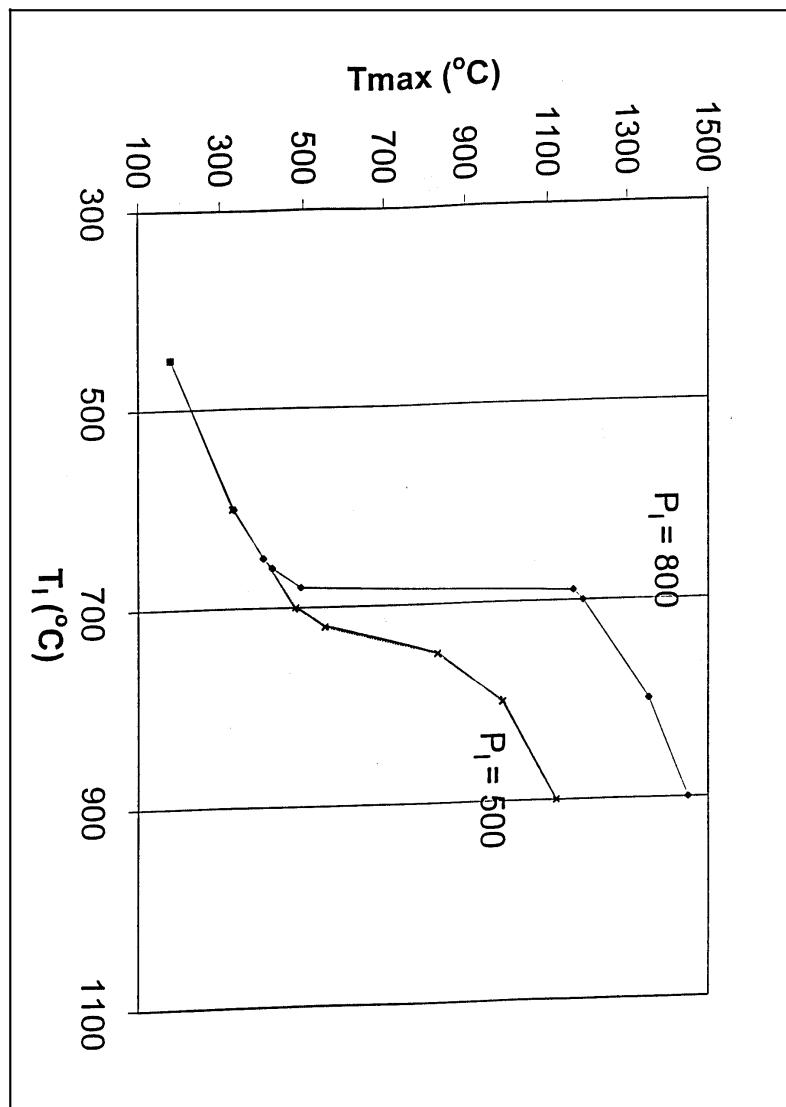
도면4b



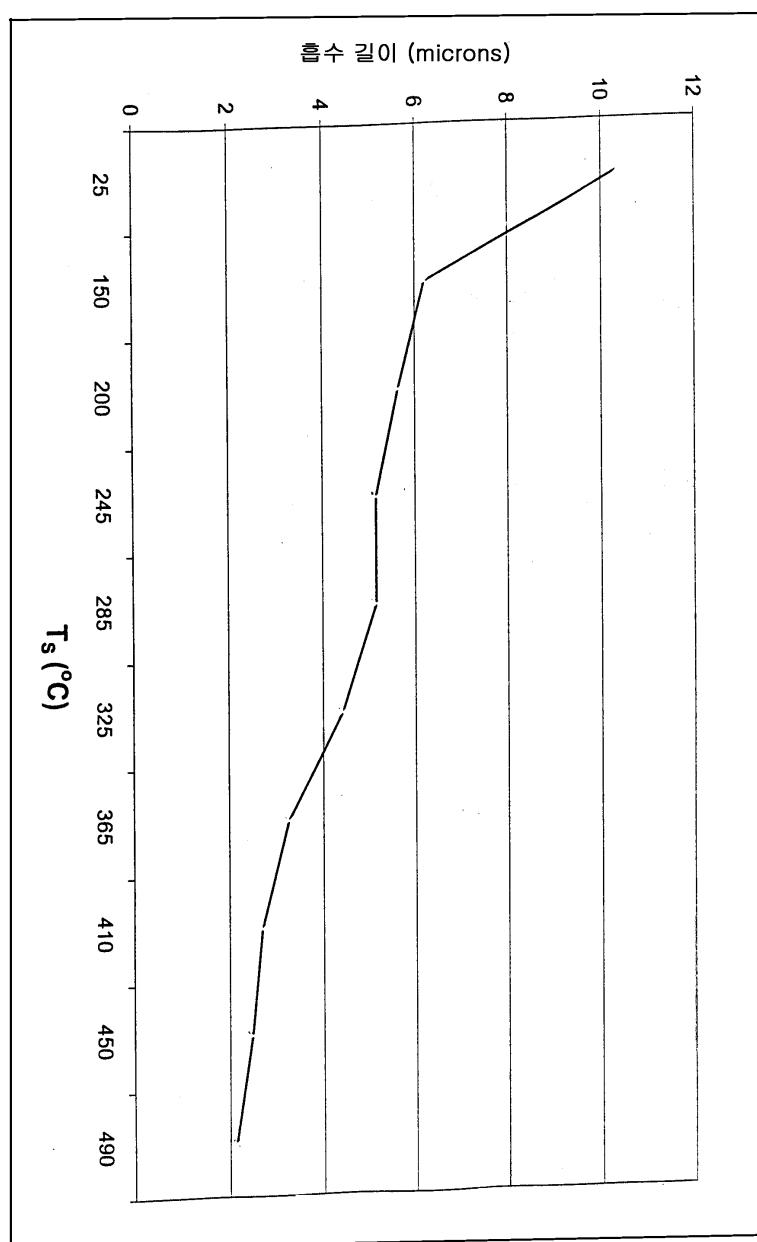
도면5



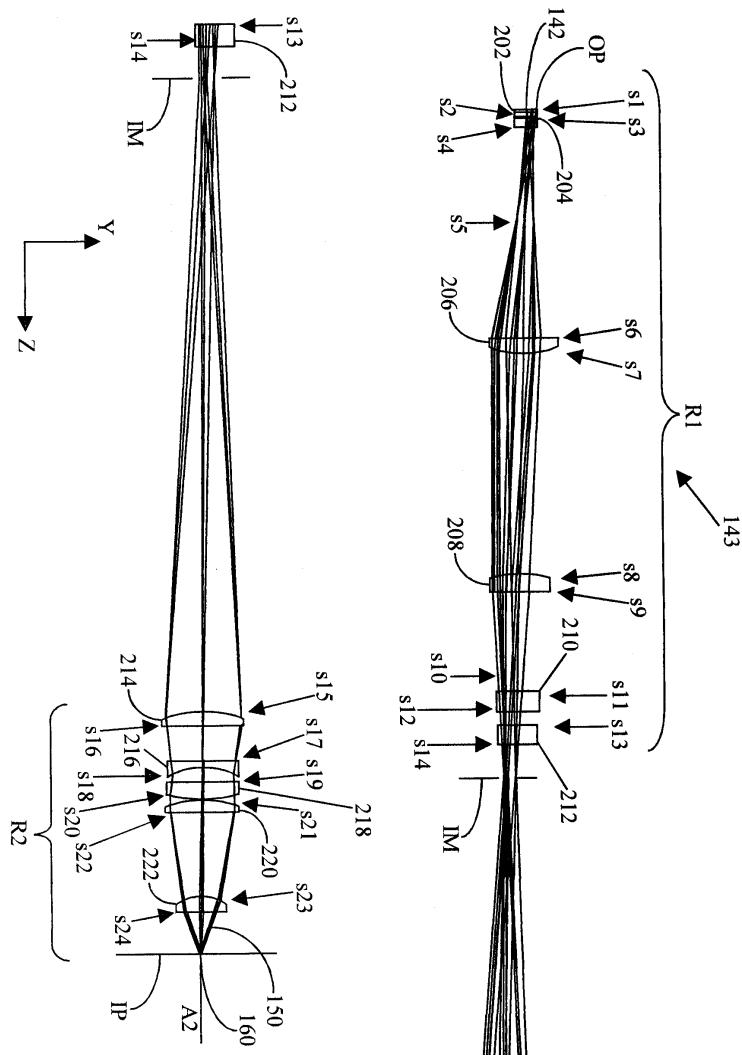
도면6



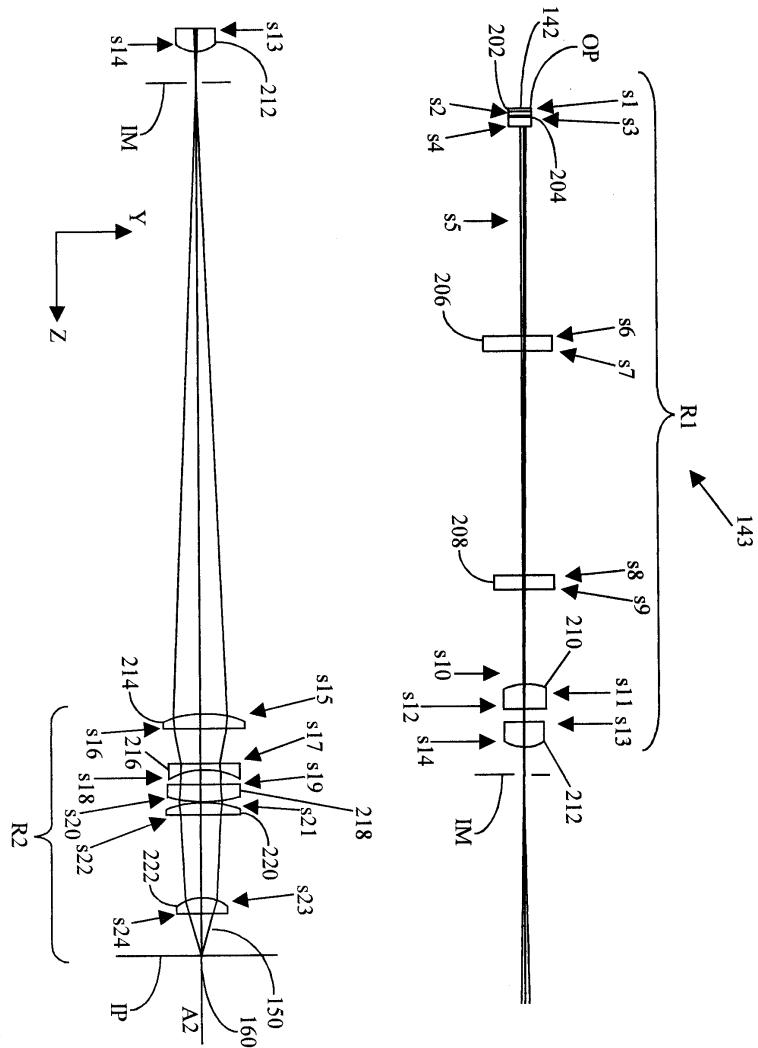
도면7



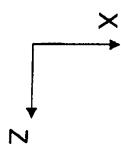
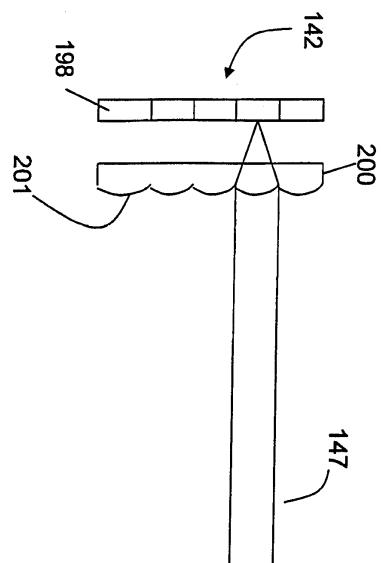
도면 8a



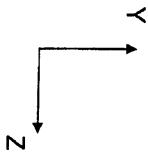
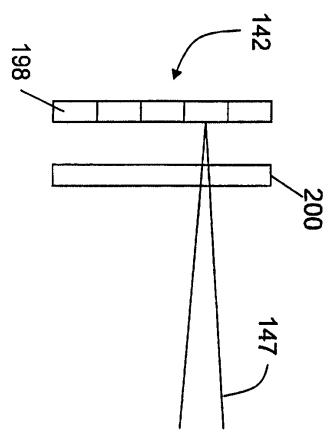
도면 8b



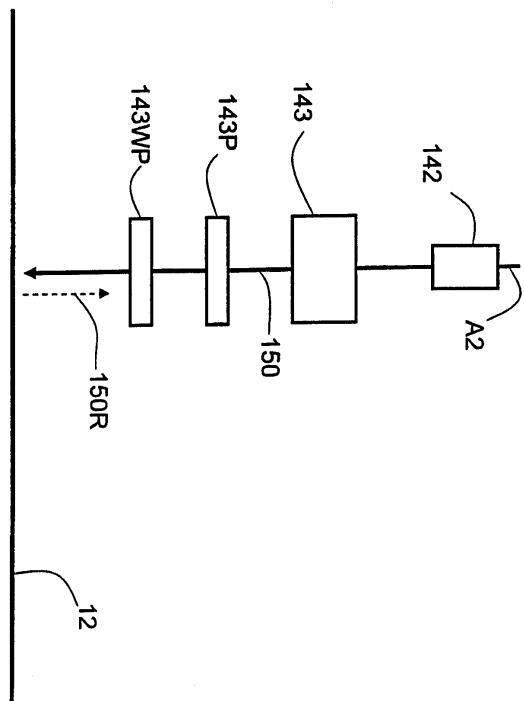
도면9a



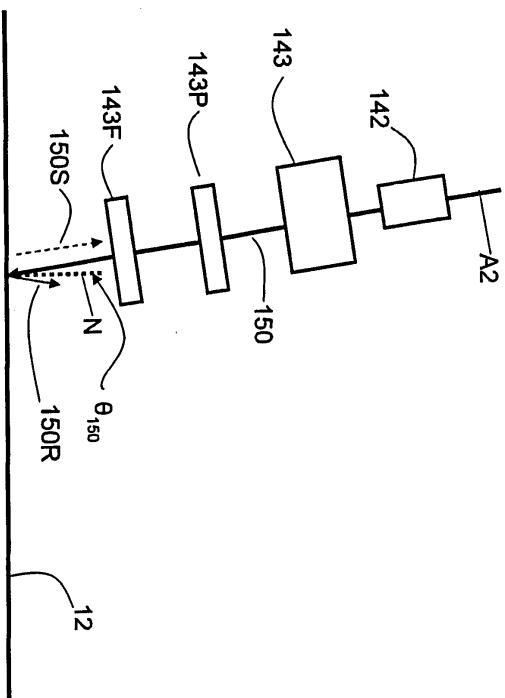
도면9b



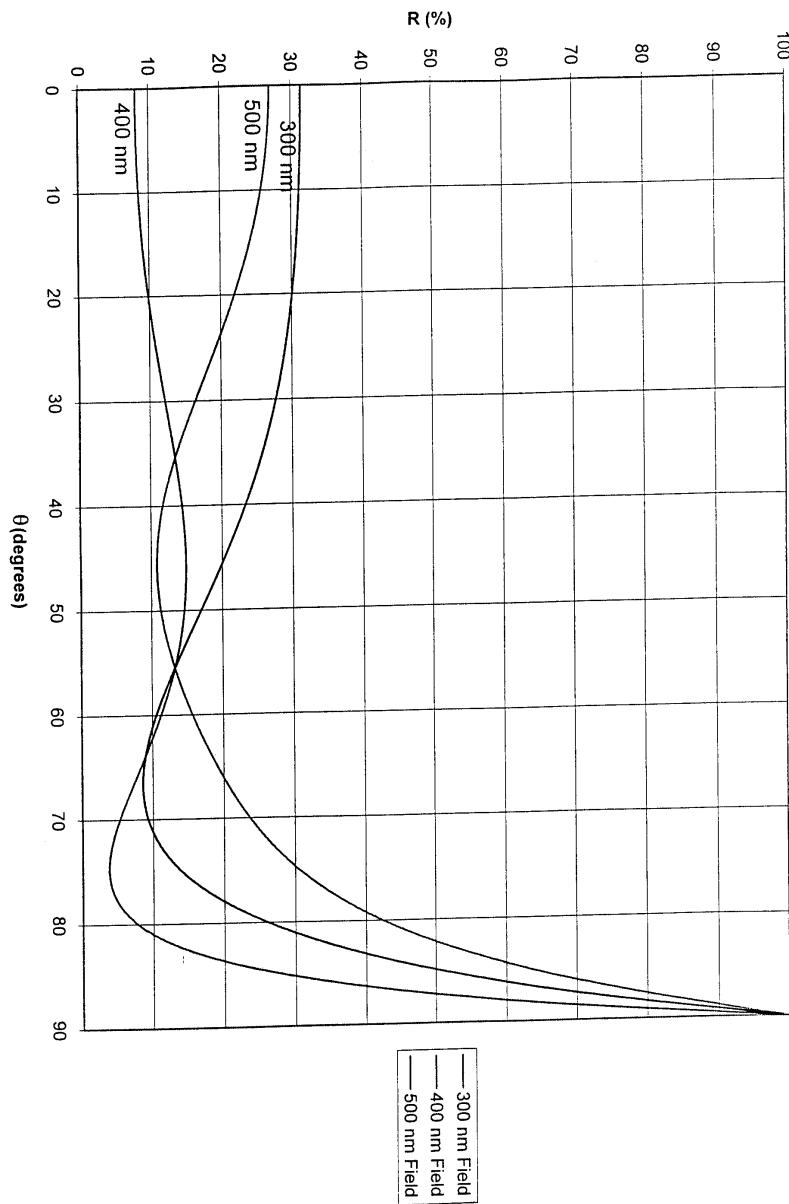
도면10a



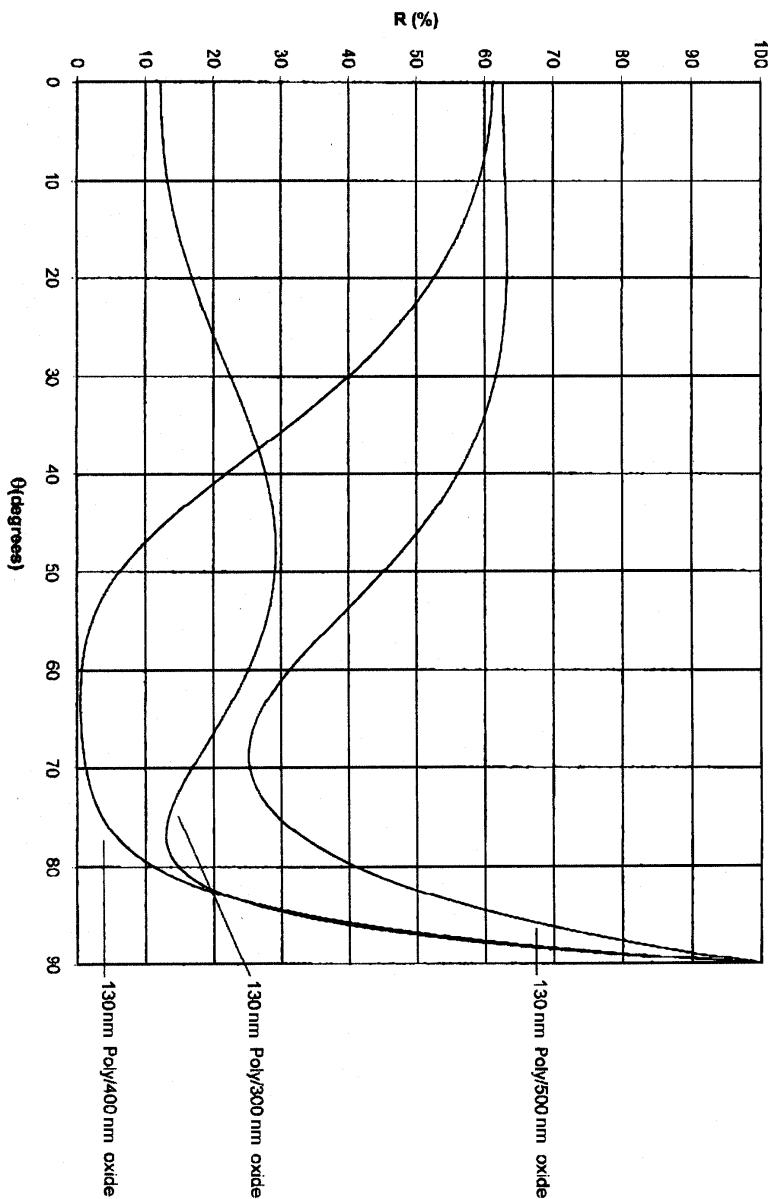
도면10b



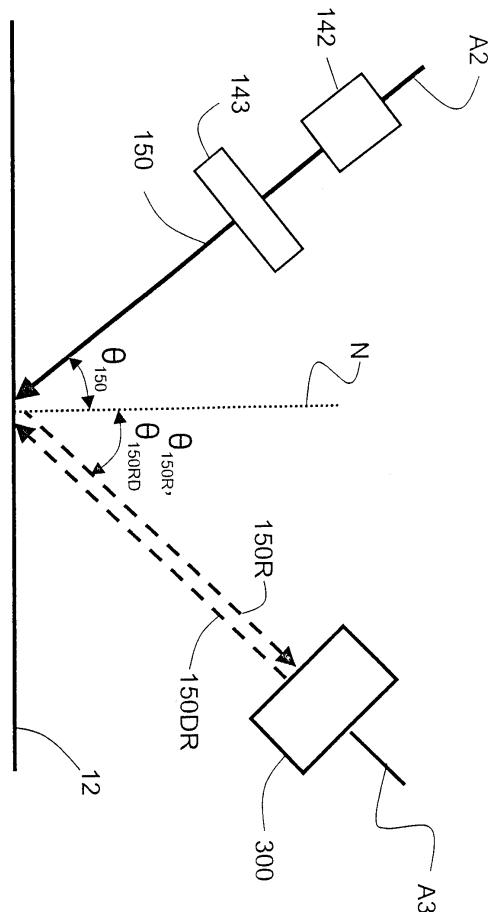
도면11



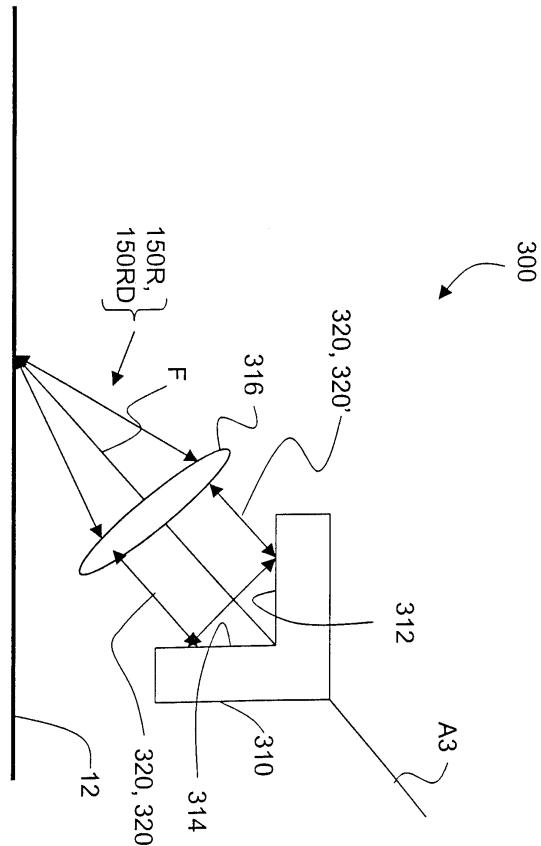
도면12



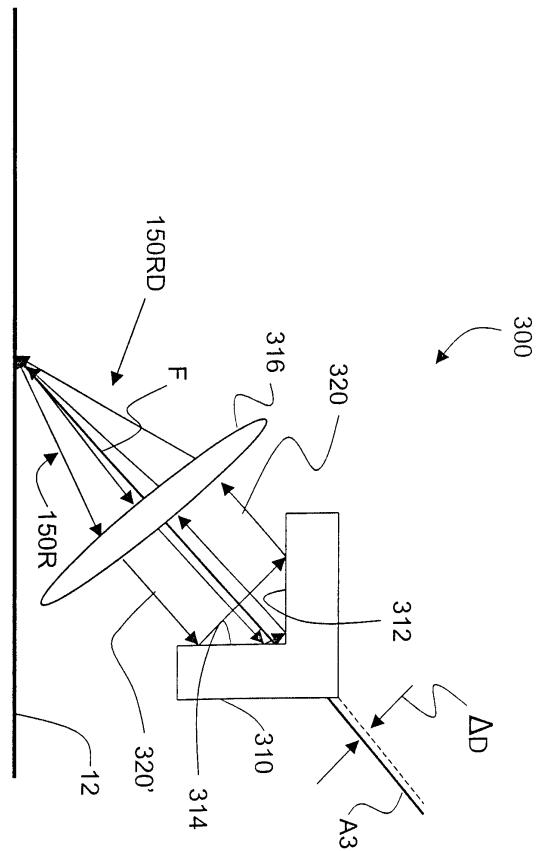
도면13



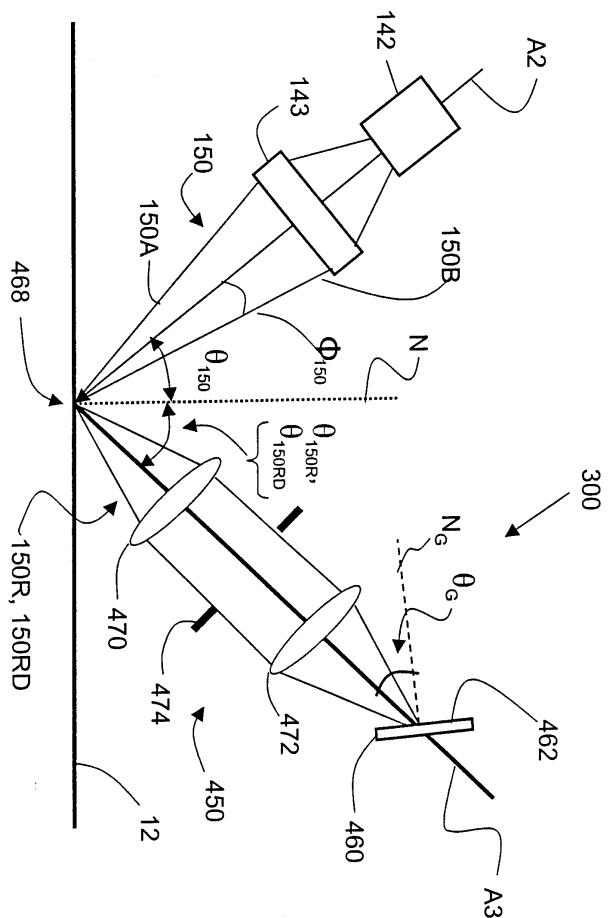
도면14



도면15



도면16



도면17

