(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2022년11월22일
(11) 등록번호 10-2469060
(24) 등록일자 2022년11월16일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G03F 7/20 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G03F 7/70266 (2013.01)
G03F 7/70033 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2017-7009820
(22) 출원일자(국제) 2015년09월07일
심사청구일자 2020년09월04일
(85) 번역문제출일자 2017년04월11일
(65) 공개번호 10-2017-0053713
(43) 공개일자 2017년05월16일
(86) 국제출원번호 PCT/EP2015/070391
(87) 국제공개번호 WO 2016/041805
국제공개일자 2016년03월24일
(30) 우선권주장
10 2014 218 474.6 2014년09월15일 독일(DE)
(56) 선행기술조사문헌
JP2004031954 A*
(뒷면에 계속)
전체 청구항 수 : 총 23 항

(73) 특허권자
칼 짜이스 에스엠티 게엠베하
독일 오버코헨 73447 루돌프-에버-슈트라쎄 2
(72) 발명자
안드레, 슈테판
독일, 73529 슈뵈비슈 그뮌트, 인 데어 포르슈타트 41
골데, 다니엘
독일, 73447 오버코헨, 유노베그 12
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
(유)한양특허법인

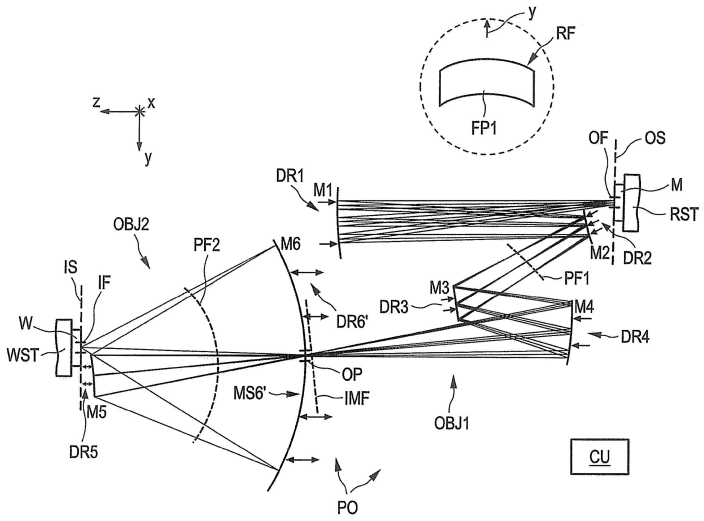
심사관 : 정성용

(54) 발명의 명칭 **EUV 마이크로리소그라피를 위한 투영 렌즈, 투영 노광 장치 및 투영 노광 방법**

(57) 요 약

극자외선 범위(EUV)로부터의 동작 파장(λ)을 갖는 전자기 방사선에 의해 투영 렌즈의 오브젝트 평면(OS)에 배치된 패턴을 투영 렌즈의 이미지 평면(IS)에 이미징하기 위한 투영 렌즈(PO)는, 오브젝트 평면에 배치되는 마스크(M)의 패턴이 다수의 미러(M1 내지 M6)에 의해 이미지 평면에 이미징 가능하게 되도록 오브젝트 평면과 이미지 평면 사이의 투영 빔 경로에 배치되는 미러 표면들을 갖는 다수의 미러를 포함한다. 주사 방향에 평행하게 진행하는 제1 방향(y-방향)으로의 제1 이미징 스케일이 제1 방향에 수직인 제2 방향(x-방향)으로의 제2 이미징 스케일보다 절대값 면에서 더 작다. 레티클 변위에 의해 초래되는 비점 파면 수차 부분들을 정정하기 위한 동적 파면 조작 시스템을 제공한다.

대 표 도



(52) CPC특허분류
G03F 7/70233 (2013.01)
G03F 7/70258 (2013.01)
G03F 7/70275 (2013.01)

(72) 발명자
그루너, 토랄프
독일, 73433 아알렌-호펜, 오팔스트라쎄 22
루오프, 요하네스
독일, 73431 아알렌, 드로스테-휠쇼프-베그 35
바브라, 노르베르트
독일, 97440 베르넥, 암 링 20
쉐머, 리카르다
독일, 86441 주스마르샤우젠, 베르팅거 스트라쎄 18
쉬나이더, 소냐
독일, 73447 오버코헨, 카펠렌베그 10/1

(56) 선행기술조사문헌
JP2005166778 A*
JP2009266886 A*
KR1020130141462 A*
JP2009532888 A
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

명 세 서

청구범위

청구항 1

극자외선 범위(EUV)로부터의 동작 파장(λ)을 갖는 전자기 방사선에 의해 투영 렌즈의 오브젝트 평면(OS)에 배치된 패턴을 상기 투영 렌즈의 이미지 평면(IS)에 이미징하기 위한 투영 렌즈(PO)로서,

상기 오브젝트 평면에 배치되는 마스크(M)의 패턴이 다수의 미러(M1 내지 M6)에 의해 상기 이미지 평면에 이미징 가능하게 되도록 상기 오브젝트 평면과 상기 이미지 평면 사이의 투영 빔 경로에 배치되는 미러 표면들을 갖는 상기 다수의 미러를 포함하며,

주사 방향에 평행하게 진행하는 제1 방향으로의 제1 이미징 스케일이 상기 제1 방향에 수직인 제2 방향으로의 제2 이미징 스케일보다 절대값 면에서 더 작되,

상기 오브젝트 평면에 수직인 변위 성분을 갖는 레티클 변위에 의해 초래되는 비점 파면 수차 부분들을 정정하기 위한 동적 파면 조작 시스템을 특징으로 하는, 투영 렌즈.

청구항 2

청구항 1에 있어서, 상기 파면 조작 시스템이, 레티클 변위에 의해 초래되는 비점 파면 수차 부분들이 주사 동작 동안 정정 가능하게 되도록 동적으로 구성되는 것을 특징으로 하는, 투영 렌즈.

청구항 3

청구항 1 또는 청구항 2에 있어서, 상기 파면 조작 시스템이, 상기 투영 빔 경로에 배치되는 변위 가능한 미러(M1 내지 M6)와 상기 미러의 포지션을 기준 포지션에 관해 가역적으로 변화시키기 위한 제1 작동 디바이스(DR1 내지 DR6)를 갖는 제1 조작기를 갖는 것을 특징으로 하는, 투영 렌즈.

청구항 4

청구항 3에 있어서, 상기 변위가 다음의 그룹:

상기 오브젝트 평면에 직교하게 향하는 기준 축(AX)에 평행한 상기 미러의 축방향 변위;

상기 오브젝트 평면에 직교하게 향하는 기준 축(AX)에 수직인 측방향으로의 상기 미러의 측방향 변위;

상기 미러의 틸팅;

회전 축에 대한 반사성 자유형태 표면을 갖는 미러의 회전으로부터 선택되는 적어도 하나의 변위를 포함하는 것을 특징으로 하는, 투영 렌즈.

청구항 5

청구항 3에 있어서, 상기 미러의 변위가, 시작 포지션으로부터 적어도 하나의 중간 포지션을 통해 다시 상기 시작 포지션으로의 미리 한정 가능한 움직임 프로파일에 따라 일 방향으로 진행하는 주사 동작의 시작과 끝 사이에서 시간 간격을 두고 실행되도록 상기 제1 조작기가 동적으로 설계되는 것을 특징으로 하는, 투영 렌즈.

청구항 6

청구항 3에 있어서, 복수의 상기 미러 또는 모든 상기 미러들(M1 내지 M6)이 각 경우에, 상기 미러의 포지션을 기준 포지션에 대해 가역적으로 변화시키기 위한 작동 디바이스(DR1 내지 DR6)를 갖는 것을 특징으로 하는, 투영 렌즈.

청구항 7

청구항 1 또는 청구항 2에 있어서, 상기 파면 조작 시스템이, 상기 투영 빔 경로에 배치되며 미러 표면(MS6)을 갖는 변형 가능한 미러(M6)와 상기 미러 표면의 표면 형상을 기준 표면 형상에 관해 가역적으로 비점수차적으로

변화시키기 위한 작동 디바이스(DR6')를 갖는 제2 조작기를 갖는 것을 특징으로 하는, 투영 렌즈.

청구항 8

청구항 7에 있어서, 상기 투영 렌즈가 상기 오브젝트 평면과 상기 이미지 평면 사이에 적어도 하나의 동공 표면(PF2)을 가지며, 변형 가능한 미러(M6)가 상기 동공 표면에 광학적으로 근접하게 배치되며, 비점수차적으로 변형 가능한 미러 표면을 갖는 미러가, 상기 미러 표면에서, 서브애퍼처 비(SAR)가 0.5와 1 사이의 범위에 있도록 배치되는 것을 특징으로 하는, 투영 렌즈.

청구항 9

청구항 1 또는 청구항 2에 있어서, 더 큰 절대값을 갖는 이미징 스케일과 더 작은 절대값을 갖는 이미징 스케일 사이의 스케일 비가 1.1 내지 2.5의 범위에 있는 것을 특징으로 하는, 투영 렌즈.

청구항 10

청구항 1 또는 청구항 2에 있어서, 상기 제2 방향으로의 투영 렌즈의 전방 초점거리가 절대값 면에서 3m 미만이며, 상기 전방 초점거리는 2m미만인 것을 특징으로 하는, 투영 렌즈.

청구항 11

청구항 1 또는 청구항 2에 있어서, 상기 투영 렌즈가 상기 주사 방향으로 만곡되는 링 필드(RF)를 이미징하도록 설계되는 것을 특징으로 하는, 투영 렌즈.

청구항 12

청구항 11에 있어서, 상기 이미지 평면에서, 상기 주사 방향으로 뒤처져 있는 필드 에지에서의 중간 필드 지점과 상기 필드 에지의 주변에서의 주변 필드 지점들 사이의 거리 - 상기 주사 방향으로 측정됨 - 가 상기 주사 방향에 수직으로 측정한 필드 폭의 5% 초과에 대응하도록, 상기 링 필드의 곡률이 크기 조정되는 것을 특징으로 하는, 투영 렌즈.

청구항 13

마스크(M)의 패턴의 적어도 하나의 이미지로 방사선-민감성 기판(W)을 노광하기 위한 투영 노광 장치(WSC)로서,

주 방사선 원(RS)으로부터 주 방사선을 수신하고, 상기 마스크(M) 상으로 향하는 조명 방사선을 생성하기 위한 조명 시스템(ILL);

투영 렌즈의 이미지 평면(IS)의 영역에 상기 패턴의 이미지를 생성하기 위한 투영 렌즈(PO);

상기 패턴이 상기 투영 렌즈의 오브젝트 평면(OS)의 영역에 배치되고 상기 투영 렌즈의 기준 축(AX)에 수직인 주사 방향으로 움직일 수 있도록 상기 조명 시스템과 상기 투영 렌즈 사이에서 상기 마스크를 홀딩하기 위한 마스크 홀딩 디바이스(RST); 및

상기 기판의 방사선-민감성 표면이 상기 투영 렌즈의 이미지 평면(IS) - 상기 이미지 평면은 상기 오브젝트 평면에 대해 광학적으로 켤레 관계임 - 의 영역에 배치되며, 상기 투영 렌즈의 기준 축에 수직인 마스크와 동기적으로 움직일 수 있도록 상기 기판을 홀딩하기 위한 기판 홀딩 디바이스(WST)를 포함하되,

상기 투영 렌즈는 청구항 1 또는 청구항 2에 따라 설계되는 것을 특징으로 하는, 투영 노광 장치.

청구항 14

청구항 13에 있어서, 상기 마스크 홀딩 디바이스(RST)가, 상기 오브젝트 평면(OS)에 직교하게 진행하는 z-방향에 평행한 상기 마스크의 제어된 변위를 위한 z-변위 디바이스를 갖는 것을 특징으로 하는, 투영 노광 장치.

청구항 15

청구항 14에 있어서, 상기 마스크의 변위가, 미리 한정 가능한 움직임 프로파일에 따라 일 방향으로 진행하는 주사 동작의 시작과 끝 사이에서 시간 간격을 두고 실행되도록 상기 z-변위 디바이스가 동적으로 설계되는 것을 특징으로 하는, 투영 노광 장치.

청구항 16

마스크의 패턴의 적어도 하나의 이미지로 방사선-민감성 기판을 노광하기 위한 투영 노광 방법으로서, 다음의 단계:

투영 노광 장치의 애너모픽(anamorphic) 투영 렌즈와 조명 시스템 사이에서, 상기 패턴이 상기 투영 렌즈의 오브젝트 평면의 영역에 배치되며 상기 투영 렌즈에 의해 상기 투영 렌즈의 이미지 평면 - 상기 이미지 평면은 상기 오브젝트 평면에 대해 광학적으로 켤레 관계임- 에 이미징 가능하도록, 상기 마스크를 제공하는 단계;

상기 조명 시스템에 의해 제공되는 조명 방사선으로 상기 패턴의 조명 영역을 조명하는 단계; 및

주사 동작 동안 주사 방향으로 상기 마스크를 움직이는 단계를 포함하되;

다음의 단계:

상기 오브젝트 평면에 수직인 변위 방향으로 상기 마스크를 변위시키는 단계;

동적 파면 조작 시스템에 의해 상기 마스크의 변위에 의해 초래되는 비점 파면 수차 부분들을 정정하는 단계 - 상기 변위는 상기 오브젝트 평면에 수직인 변위 성분을 가짐 - 를 특징으로 하는, 투영 노광 방법.

청구항 17

청구항 16에 있어서, 상기 마스크를 변위시키는 단계와 상기 비점 파면 수차 부분들을 정정하는 단계를 상기 주사 동작 동안 실행하는, 투영 노광 방법.

청구항 18

마스크의 패턴의 적어도 하나의 이미지로 방사선-민감성 기판을 노광하기 위한 투영 노광 방법으로서, 다음의 단계:

투영 노광 장치의 애너모픽 투영 렌즈와 조명 시스템 사이에서, 상기 패턴이 상기 투영 렌즈의 오브젝트 평면의 영역에 배치되도록, 상기 마스크를 제공하는 단계;

상기 기판의 방사선-민감성 표면이 상기 투영 렌즈의 이미지 평면 - 상기 이미지 평면은 상기 오브젝트 평면에 대해 광학적으로 켤레 관계임 - 의 영역에 배치되도록 상기 기판을 홀딩하는 단계;

상기 조명 시스템에 의해 제공되는 조명 방사선으로 상기 마스크의 조명 영역을 조명하는 단계;

상기 투영 렌즈를 사용하여 상기 조명 영역에 있는 상기 패턴의 일부분을 상기 기판의 이미지 필드 상에 투영하는 단계;

주사 동작 동안 주사 방향으로 상기 마스크를 움직이는 단계;

상기 주사 동작 동안 상기 오브젝트 평면에 수직인 변위 방향으로 상기 마스크를 변위시키는 단계; 및

상기 마스크의 상기 변위에 의해 초래되는 비점 파면 수차 부분들을 정정하기 위하여, 투영 빔 경로에 배치되는 조작 가능한 미러와, 조작 가능한 상기 미러의 광학 효과를 가역적으로 변화시키기 위한 작동 디바이스를 갖는 적어도 하나의 조작기를 구동함으로써, 상기 오브젝트 평면으로부터 상기 이미지 평면으로 통과하는 투영 방사선의 파면에 비점수차적으로 영향을 미치는 단계 - 상기 변위는 상기 오브젝트 평면에 수직인 변위 성분을 가짐 - 를 포함하는, 투영 노광 방법.

청구항 19

청구항 16 또는 청구항 17에 있어서, 청구항 1 또는 청구항 2에 기재된 투영 렌즈가 사용되는, 투영 노광 방법.

청구항 20

청구항 18에 있어서, 조작 가능한 상기 미러의 광학 효과의 변화에 관련된 상기 조작기의 작동 움직임이 1초 미만의 짧은 시간 스케일 내에서 실행되는 것을 특징으로 하는, 투영 노광 방법.

청구항 21

청구항 16 내지 청구항 18 중 어느 한 항에 있어서, 상기 파면 조작 시스템의 조작기들의 작동 디바이스들의 구

동은 상기 마스크의 동적 변위 및 틸팅 중 적어도 하나에 따라 실행되며, 상기 구동은 이전에 계산한 감도를 사용한 피드포워드 모델을 기초로 또는 이전에 계산한 룩업표를 기초로 실행되는 것을 특징으로 하는, 투영 노광 방법.

청구항 22

청구항 1 또는 청구항 2에 있어서, 상기 파면 조작 시스템이, 상기 투영 빔 경로에 배치되는 변위 가능한 미러(M1 내지 M6)와 상기 미러의 포지션을 기준 포지션에 관해 가역적으로 변화시키기 위한 제1 작동 디바이스(DR1 내지 DR6)를 갖는 제1 조작기를 가지며, 상기 투영 빔 경로에 배치되며 미러 표면(MS6)을 갖는 변형 가능한 미러(M6)와 상기 미러 표면의 표면 형상을 기준 표면 형상에 관해 가역적으로 비점수차적으로 변화시키기 위한 작동 디바이스(DR6')를 갖는 제2 조작기를 갖는 것을 특징으로 하는, 투영 렌즈.

청구항 23

청구항 22에 있어서, 상기 미러의 광학 효과의 변화에 관련된 작동 움직임이 1초 미만의 짧은 시간 스케일 내에서 생성 가능하도록, 제1 조작기 및 제2 조작기 중 적어도 하나가 동적으로 설계되는 것을 특징으로 하는, 투영 렌즈.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 다음의 발명은 2014년 9월 15일에 출원한 독일특허출원 제 10 2014 218 474.6호를 기초로 하며, 이 특허출원은 여기서 본 출원에 참조로서 인용된다.

[0002] 본 발명은, 극자외선 범위(EUV)로부터의 동작 파장(λ)을 갖는 전자기 방사선에 의해 투영 렌즈의 오브젝트 평면에 배치된 패턴을 투영 렌즈의 이미지 평면 상에 이미징하기 위한 투영 렌즈에 관한 것이다. 또한, 본 발명은 그러한 투영 렌즈를 포함하는 투영 노광 장치와, 투영 렌즈 및 투영 노광 장치를 사용하여 실행할 수 있는 투영 노광 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0003] 마이크로리소그라피 투영 노광 방법은 반도체 소자 및 기타 미세한 구조의 소자, 예컨대 마이크로리소그라피를 위한 마스크를 생산하기 위해 요즘 주로 사용되고 있다. 이들 방법은, 이미징될 구조의 패턴, 예컨대 반도체 소자의 층의 라인 패턴을 갖고 있는 마스크(레티클)의 사용을 수반한다. 이 패턴은 투영 렌즈의 오브젝트 평면의 영역에서 투영 렌즈와 조명 시스템 사이의 투영 노광 장치에 위치지정되어, 조명 시스템에 의해 제공되는 조명 방사선으로 조명한다. 패턴에 의해 변화하는 방사선은 투영 방사선으로서 투영 렌즈를 통해 통과하며, 투영 렌즈는 이 패턴을 기판 상에 이미징하며, 기판은 노광되며 방사선 민감 층으로 코팅되고 그 표면은 투영 렌즈의 이미지 평면에 놓이며, 이 이미지 평면은 오브젝트 평면에 관해 광학적으로 켤레 관계에 있다.

[0004] 더 미세한 구조를 생산할 수 있기 위해, 최근에, 적절한 개구수로 동작하며 극자외선 범위(EUV)로부터 사용되는 단파장의 전자기 방사선에 의해 실질적으로 특히 5nm와 30m 사이의 범위의 동작 파장으로 고분해능 성능을 얻는 광학 시스템을 개발하고 있다. 대략 13.5nm의 동작 파장, 예컨대 NA=0.3의 주어진 이미지-측 개구수를 갖는 EUV 리소그라피의 경우에, 이론적으로, 0.03㎛ 정도의 분해능을 대략 0.15㎛ 정도의 통상 초점 심도로 달성할 수 있다.

[0005] 극자외선 범위로부터의 방사선은 굴절 광학 요소를 사용하여 집속되거나 안내할 수 없으며, 이는 단파장이, 더 높은 파장에서 투과하는 알려진 광학 소재에 의해 흡수되기 때문이다. 그러므로 미러 시스템이 EUV 리소그라피를 위해 사용된다.

[0006] EUV 마이크로리소그라피 분야에서, 또한, 더 미세한 구조를 생산하기 위해, 더 높은 이미지-측 개구수(NA)를 갖는 투영 시스템을 개발함으로써 사용되는 시스템의 분해능 성능을 더 증가시키고자 노력하고 있다. 주어진 이미징 스케일(β)에 대해, 오브젝트-측 개구수(NA_0)이 그에 따라 또한 증가한다.

[0007] 더 높은 개구의 EUV 시스템의 경우, 협대역 마스크는 어려움을 야기하며, 이는 이들의 반사도 성능이 더 큰 입사각의 방사선에서 매우 감소하기 때문이다. 그러므로 리소그라피 광학 시스템의 경우 1:4(|β|=0.25)의 종래의 축소 이미징 스케일 대신 더 큰 축소도를 사용하는 것이 이미 제안되어 왔다. 예를 들어, 1:4(|β|=0.25)

대신 1:8(|β|=0.125)의 이미징 스케일이 오브젝트-측 개구수(NA_O)를 절반이 되게 하며, 그에 따라 마스크에서의 조명 방사선의 입사각 절반이 되게 한다. 그러나, (동일한 마스크 크기에 대한) 이러한 이미징 스케일은 노광된 필드의 크기를 축소시키며 그에 따라 처리량을 축소시킨다.

[0008] 오브젝트-측 개구수가 증가할 때, 오브젝트-측 주광선 각도가 증가해야 하며, 이 점은 마스크의 흡수재 구조에 의해 음영 효과와, 층 투과의 문제를 초래할 수 있다는 점을 이미 인식하게 되었다. 특히, 레티클 코팅으로 인해 심각한 아포디제이션(apodization) 효과가 발생할 수 있다(예컨대, WO2011/120821A1과 비교).

[0009] WO2012/034995A2는, 이런 이유로, 특히 애너모픽(anamorphic) 투영 렌즈로서 EUV 투영 렌즈를 설계할 것을 제안한다. 애너모픽 투영 렌즈는, 제1 방향으로의 제1 이미징 스케일이 제1 방향에 수직인 제2 방향으로의 제2 이미징 스케일과 편차가 있는 것을 특징으로 한다. 이러한 편차는 제조 공차에 의해 아마도 초래되는 편차를 상당히 벗어난 것이다.

[0010] 애너모픽 투영 렌즈로 인해, 상기 제1 방향으로 이미징될 레티클의 범위가 증가할 필요가 없고 그리고 투영 노광 장치의 처리량이 축소되지 않고도 예컨대 제1 방향으로 큰 오브젝트-측 개구수를 갖는 이미지 평면의 완벽한 조명이 가능케 된다. 더 나아가, 양 방향으로 균일한 이미징 스케일을 갖는 시스템과 비교하여, 조명 광의 경사진 입사에 의해 초래된 이미징 품질의 손실의 축소를 또한 얻을 수 있다.

[0011] 1:8 이미징 스케일(|β|=0.125)이 예컨대 주사 방향으로 설정되고, 여기서 필드 범위는 작은 반면, 종래의 1:4 이미징 스케일(|β|=0.25)이 주사 방향에 수직으로(교차-주사 방향) 작용한다면, 이것은 마스크에서 특히 큰 각도를 도입하기 보다는, 양 방향으로 |β|=0.25를 갖는 종래의 비-애너모픽 투영 렌즈와 비교한 필드 크기가 단지 절반이 되며 1/4이 되지는 않음을 보장한다. 게다가, 더 큰 레티클로 다시 전체 필드를 달성하는 옵션이 생긴다.

[0012] 투영 노광 장치는, 조작 시스템으로서, 제어 유닛의 제어 신호를 기초로 한정된 방식으로 이 시스템의 이미징 속성을 변화시킬 수 있는 다수의 조작기를 갖는 조작 시스템을 포함한다. 이 경우, 용어, "조작기"는, 특히 대응하는 제어 신호를 기초로 개별 광학 요소나 개별 광학 요소 그룹에 능동적으로 영향을 미쳐서 투영 빔 경로에서 그러한 요소나 그룹의 광학 효과를 변화시키도록 설계되는 광기계식 디바이스를 의미한다. 종종, 조작기는 예컨대 마스크 및/또는 기판을 변위시키고, 틸팅하고 및/또는 변형하기 위해 제공된다. 일반적으로, 조작기는, 계측되어 검출되는 이미징 수차가 타겟 지정된 방식으로 축소될 수 있도록 설정한다.

[0013] 일부 EUV 시스템에서, 레티클의 오브젝트 평면에 수직인 소자로의 변위 및/또는 틸팅이 이미징 수차를 정정하기 위해 유효한 조작 가능성을 구성한다. 반사 레티클 및/또는 비-텔레센트릭 시스템에서 방사선의 경사진 입사로, 그러한 레티클 변위에 의한 구조의 측방향 오프셋을 정정할 수 도 있다. 이 경우, 능동적인 원리는, 비-텔레센트릭 조명에 의해, 이미징의 대응하는 z-디포커싱에 나란한 레티클의 z-디포커싱이 항상 추가적으로 이미지의 측방향 시프트를 초래한다. 오브젝트 필드 내에서의 조명의 텔레센트리서티가 예컨대 2차적으로 변경된다면, 예컨대 레티클이나 기판 상에 존재하는 2차 왜곡 프로파일을 정정하는데 사용될 수 있는 z-디센트레이션(decentration)의 경우에 측방향 이미지 시프트의 2차 변동이 또한 있게 된다.

[0014] DE 10 2004 014 766A1(US 7,372,539B2와 비교)이, EUV 투영 노광 장치의 투영 렌즈에서 애너모피즘을 정정할 목적으로, 투영 렌즈의 축에 수직이며 주사 방향에 수직이고 레티클이나 웨이퍼 상에 생성되는 광 필드의 중심을 통해 자리하는 축에 대해 작은 각도만큼 레티클을 틸팅하는 것을 제안한다.

[0015] EP 1 039 510A1은, 생성된 이미지의 포지션과 이미징 스케일에서의 수차를 정정하기 위해 광학 축의 방향으로 레티클을 조정하고 틸팅하는 것을 제안한다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0016] 본 발명에 의해 해결되는 문제는, 필적할만한 범위까지 특정 단점을 허용해야 하지 않고도 애너모픽 투영 렌즈의 사용의 장점을 얻게 하는 조치를 명시하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0017] 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 발명은 청구항 1의 특징을 포함하는 투영 렌즈, 청구항 14의 특징을 포함하는 투영 노광 장치, 및 청구항 17 또는 청구항 19의 특징을 포함하는 투영 노광 방법을 제공한다.

[0018] 유리한 진전을 종속항에 명시한다. 모든 청구항의 문구는 상세한 설명의 내용에 참조로서 병합되어 있다.

[0019] 본 발명자들은, 애너모픽 렌즈의 경우에, 주사 방향 및 이에 수직으로 동일한 이미징 스케일을 갖는 종래의 시스템에서는 발생하지 않는 적어도 하나의 특별한 특징이 발생함을 인식하였다. 애너모픽 렌즈에 특정되는 파면 수차 타입을 식별하였다. 청구한 발명에 따른 시스템의 경우에, 이러한 수차 타입, 즉, 이러한 시스템 타입에 특정되는 수차는 특정하게 조정된 조치에 의해 해결하며, 적어도 부분적으로 정정할 수 있다.

[0020] 본 발명자들은 관찰로부터 특히 통상적인 이미징 시스템에서의 소위 종방향 스케일(또는 깊이 스케일)이 이미징 스케일의 제곱에 의해 주어짐을 계속해서 인지하게 되었다. 종방향 스케일은, 이미지 영역에서 오브젝트 평면에 수직인 방향 성분을 갖는 오브젝트 시프트의 경우에, 집속된 이미지를 얻기 위해 리포커싱이 실행되어야 하는 범위를 나타낸다. 애너모픽 렌즈에서, 이미징 스케일은 방향(제1 방향과 제2 방향으로의 이미징 스케일 사이의 편차)의 한정에 의해 변한다. 종방향 스케일에 대해서도 동일하게 발생한다. 결국, 그러나 오브젝트 평면에 수직인 오브젝트 시프트의 경우에, 주사 방향으로 방향을 갖는 구조는 그에 수직인 방향을 갖는 구조와 상이하게 디포커싱된다. 이들 상이한 초점 포지션은 비점수차에 불과하며, 이것은 예컨대 프린지 제르니케(fringe Zernike) 넘버 5(Z5)에 의해 최저 차수로 기재할 수 있다. 비-애너모픽 렌즈의 경우, 이러한 비점수차 기여는 정확히 0임을 강조해야 한다.

[0021] 청구된 발명은, 특히 이 새롭게 생긴 수차를 고려하기 위해, 비-애너모픽 렌즈와 비교하여 투영 렌즈의 정상적으로 구현되는 정정 시나리오를 변화시키거나 확장하는 것을 가능케 한다.

[0022] 투영 렌즈는, 투영 렌즈의 오브젝트 평면으로부터 이미지 평면으로 통과하는 투영 방사선의 파면에 동적으로 영향을 미치기 위한 파면 조작 시스템을 포함한다. 투영 빔 경로에 배치되는 파면 조작 시스템의 소자의 효과는 제어 유닛의 제어 신호에 따라 가변적으로 설정할 수 있어서, 투영 방사선의 파면은 타겟 지정된 방식으로 변화시킬 수 있다.

[0023] 일부 실시예에서, 파면 조작 시스템의 광학 효과는 주사 동작 동안 상대적으로 짧은 시간 스케일로, 즉 높은 다이나믹스로 타겟 지정된 방식으로 상당히 변화될 수 있다. 주사 동작은 각 주사 방향으로 마스크와 기판의 동기 움직임에 의해 특징지워지는 동작이며, 여기서 마스크는 주사 방향으로 한 번 주사되어, 이 주사 동작의 시작과 끝 사이에서, 마스크의 전체 패턴은 기판 상에 한 번 전사된다.

[0024] 예컨대, 주사 동작 과정에서, 레티클이나 마스크가 특정 수차를 보상하기 위해 (z-방향으로) 오브젝트 평면에 수직으로 향하는 움직임 성분으로 변위된다면, 예컨대, 애너모픽 투영 렌즈의 경우에, 지금까지 알려진 정정 가능성으로는, 보상될 수 없거나, 불충분하게만 보상되는 비점 파면 수차 부분이 생길 것이다. 대조적으로, 동적 파면 조작 시스템은, 주사 동작 동안 z-방향으로 레티클을 변위시켜서 초래되는 비점 파면 수차 부분을 완전히 또는 적어도 부분적으로 보상할 수 있다. 일부 실시예에서, 이러한 정정은 주사 동작 동안, 가변적으로 가능하며, 즉 리소그라피 조건에 대해 짧은 시간 스케일로 있게 되며, 이러한 시간 스케일은 현재의 시스템에서 주사 동작의 경우 대략 1초미만의 크기이다. 매우 동적인 파면 조작 시스템을 사용하여, 투영 렌즈의 이미징 특징은, 단일 주사 동작의 시작과 끝 사이에 원하는 비점 파면 정정을 생성하기 위해 미리 한정 가능한 시간 프로파일에 따라 주사 동작 동안 변화될 수 있다.

[0025] 일부 실시예는 주사 동작 밖, 예컨대 주사 동작이 시작하기 전 시간 간격을 두고 파면 조작 시스템의 광학 효과를 변화시키는 것을 포함한다. 그러한 변화는, 예컨대 투영 시스템을 초기에 조정할 때, 예컨대 새로운 마스크를 설치한 이후에 유용할 수 있다. 파면 조작 시스템은 이들 경우에 매우 동적인 것으로 구성될 필요는 없으며, 이는 변화는 느리게, 즉 더 긴 시간 스케일로 야기될 수 있기 때문이다. 그러나 크게 동적인 파면 조작 시스템이 또한 이러한 목적에 사용할 수 있다.

[0026] 일 실시예에 따라, 파면 조작 시스템은 (적어도 하나의) 제1 조작기를 가지며, 이러한 조작기는 투영 빔 경로에 배치된 변위 가능한 미러와, 기준 포지션에 대해 이 미러의 포지션을 가역적으로(reversibly) 변경하기 위한 제1 작동 디바이스를 가짐이 제공된다. 이러한 구성은, 파면 조작을 위한 적어도 하나의 미러의 강체 자유도를 사용하는 제1 타입의 조작기를 제공한다. 이 미러는, 미러 표면의 표면 형상이 결국 변화되지 않고도, 전체적으로 변위된다(즉, 그 위치나 포지션에 관해 변화한다). 변위는 축방향 변위(오브젝트 평면에 직교하게 향하는 투영 렌즈의 기준 축에 평행한 변위), 측방향 변위(기준 축에 수직인 측방향으로의 변위) 또는 미러의 틸팅을 포함할 수 있다. 또한, 변위가 회전 축을 중심으로 한 미러의 회전을 포함하거나, 오로지 회전으로 구성되는 것이 가능하다.

[0027] 제1 타입의 조작기의 하나의 개별적인 조작기로 충분할 수 있지만, 둘 이상의 제1 조작기가 일부 실시예에서 제

공된다. 특히, 제1 타입의 조작기의 조작기로서의 투영 렌즈의 모든 미러는 그 강체 자유도 면에서 제어되는 방식으로 움직일 수 있게 된다. 둘 이상의 제1 조작기가 있다면, 개선된 방식으로, 적어도 하나의 다른 제1 조작기의 적절한 강체 움직임에 의해 제1 조작기의 강체 움직임 동안 이 조작기에 의해 생성되는 원치 않는(기생) 수차를 부분적으로 또는 완전히 보상하는 것이 가능하여, 전체 효과로서, 실질적으로 원하는 비점 파면 정정이 남아 있지만, 기생 수차의 레벨은 그와 비교하여 낮게 될 수 있다.

[0028] 적어도 하나의 제1 조작기는, 미러의 변위가, 시작 포지션으로부터 적어도 하나의 중간 포지션을 통해 다시 시작 포지션으로의 제어 가능한 움직임 프로파일에 따라 일 방향으로 진행하는 주사 동작의 시작과 끝 사이에서 시간 간격으로 실행되도록 동적으로 설계할 수 있다. 이들 움직임은 예컨대 십 분의 1초 또는 십 분의 수 초 범위에서와 같이 매우 짧은 시간 스케일 내에서 실행될 수 있다.

[0029] 그러나 조작기는 다시 주사 동작 동안 반드시 시작 포지션으로 다시 움직일 필요는 없다. 2개의 연속 주사 동작이 반대 방향으로 주사될 수 도 있다. 이러한 상황은 이때 조작기가 (복귀 경로 상에서의) 제2 주사 동작에서만 다시 시작 포지션으로 움직이는 것일 수 있다. 조작기가 시작 포지션으로 다시 움직이지 않는 경우도 있을 수 있다.

[0030] 이들 경우에, 또한, 광학 효과의 변화에 관련된 움직임은 예컨대 십 분의 1초 또는 십 분의 수 초의 범위에서와 같은 매우 짧은 시간 스케일 내에서 실행될 수 있다.

[0031] 하나, 복수 또는 모든 미러의 빠른 강체 움직임에 의한 파면 조작은 투영 렌즈의 타입에 따라, 특정 환경하에서, 상대적으로 복잡한 방식으로만 구현 가능할 수 있다. 그러므로 대안적으로 또는 추가로 다른 타입의 조작기를 제공하는 것이 유용할 수 있다.

[0032] 일부 실시예에서, 파면 조작 시스템은 (적어도 하나의) 제2 조작기를 가지며, 이러한 조작기는, 투영 빔 경로에 배치되며 미러 표면을 갖는 변형 가능한 미러와, 기준 표면 형상에 대해 미러 표면의 표면 형상을 가역적으로 비점수차 변경하기 위한 작동 디바이스를 갖는다. 이를 위해, 작동 디바이스는, 예컨대 미러 표면의 4개의 사분면에서 작동하는, 대각선 방향으로 대향하게 배치되며 표면 형상의 비점수차 변화를 야기하기 위해 쌍으로 상이하게 구동될 수 있는 액추에이터 또는 액추에이터 그룹 쌍을 가질 수 있다.

[0033] 리소그라피에 적절한 이미징 투영 렌즈는 오브젝트 평면과 이미지 평면 사이에 적어도 하나의 동공 표면을 가지며, 상기 적어도 하나의 동공 표면은 오브젝트 표면에 대해 그리고 이미지 평면에 대해 푸리에-변환된 표면이다. 변형 가능한 미러는, 실제로 얻을 수 있는 표면 변형의 경우에 충분히 강한 비점수차 정정 효과를 입증할 수 있기 위해, 광학적으로 동공 표면에 근접하게 배치해야 한다.

[0034] 빔 경로에서 광학 표면이나 광학 요소의 포지션을 정량화하기 위해, 예컨대 서브애퍼처 비(SAR: SubAperature Ratio)을 사용할 수 있다.

[0035] 하나의 분명한 한정에 따라, 투영 빔 경로에서 광학 요소의 광학 표면의 서브애퍼처 비(SAR)는 SAR:=DSA/DCA에 따라 서브애퍼처 직경(DSA)과 광학적 자유 직경(DCA) 사이의 몫으로서 한정된다. 서브애퍼처 직경(DSA)은, 주어진 필드 지점으로부터 유래한 빔의 광선으로 조명한 광학 요소의 부분 표면의 최대 직경에 의해 제공된다. 광학적 자유 직경(DCA)은 광학 요소의 기준 축 주위의 최소 원의 직경이며, 여기서 이 원은, 오브젝트 필드로부터 온 모든 광선에 의해 조명되는 광학 요소의 표면의 영역을 에워싼다.

[0036] 필드 평면(예컨대, 오브젝트 평면 또는 이미지 평면)에서, SAR=0은 그에 따라 사실이다. 동공 평면에서, SAR=1은 사실이다. "필드 인근(near-field)" 표면은 그에 따라 0에 가까운 서브애퍼처 비를 갖는 반면, "동공 인근(near-pupil)" 표면은 1에 가까운 서브애퍼처 비를 갖는다.

[0037] 바람직하게도, 비점수차 변형 가능한 미러 표면을 갖는 미러는, 미러 표면에서, 서브애퍼처 비(SAR)가 0.5와 1 사이, 특히 0.7과 1 사이의 범위에 있도록 배치된다.

[0038] 주사 동작 동안 이미징 관련 변화를 달성하기 위해, 제1 조작기 및/또는 제2 조작기는, 미러의 광학 효과의 변화에 관련된 작동 움직임이 1초 미만, 특히 십 분의 1초 또는 십 분의 수초(예컨대, 2 또는 3 또는 4 또는 5 또는 6 또는 7 또는 8 또는 9초)의 범위의 짧은 시간 스케일 내에서 생성할 수 있도록 바람직하게는 동적으로 설계한다. 또한, 필요에 따라 주사 동작 동안 큰 동적 특징으로 사용되는 빠른 조작기가 그에 따라 수반된다.

[0039] 제1 타입의 조작기(강체 자유도에서의 움직임)와 제2 타입의 조작기(미러 표면 변형)의 조작기들은 상이한 실시예에서 대안적으로 제공할 수 있다. 필요에 따라, 동일한 투영 렌즈에서 상이한 타입의 조작기의 조합도 가능하

다.

[0040] 여기서 특별히 강조되며 투영 렌즈의 애너모픽 설계의 결과로서 생긴 비점 파면 수차 부분이 상호 수직 방향으로의 이미징 스케일의 제곱 사이의 차이에 따른다는 점을 고려하여, (절대값이 더 큰) 이미징 스케일과 (절대값이 더 작은) 이미징 스케일 사이의 스케일 비가 너무 크지 않는 것이 유리한 것으로 고려된다. 스케일 비는 예컨대 1.1 내지 2.5, 특히 1.5 내지 2의 범위에 있을 수 있다. 결국, 정정될 비점 파면 부분의 범위는 상대적으로 작은 값으로 제한될 수 있어서, 정정될 수차는 작게 유지된다. 투영 렌즈가 예컨대 x-방향으로 이미징 스케일(β_x=0.25)을 갖고, y-방향으로 이미징 스케일(β_y=0.125)을 갖는다면, 이것을 결국 2의 스케일 비를 야기한다.

[0041] 대안적으로 또는 추가로, 레티클의 위치에서, 즉 오브젝트 평면에서 제2 방향(x-방향(Z2 수차))으로의 이미지 편차의 2차 필드 프로파일을 생성하기 위해, 정정에 필요한 z-방향으로의 레티클의 이동을 축소시키기 위해 제2 방향으로의 텔레센트리서티의 상대적으로 큰 변경(텔레센트리서티 변경)을 제공할 수 있다. 이러한 이동이 작게 되면, 그에 따라 초래된 원치 않는 비점 파면 수차 부분이 또한 작게 유지될 수 있으며 그에 따라 더욱 쉽게 정정할 수 있다.

[0042] 텔레센트리서티 변경은 전방 초점 거리에 의해 한정되고, 변경이 커질수록 전방 초점 거리는 짧아진다. 무한 전방 초점 거리의 경우, 광학 시스템은 입력에서 텔레센트릭이며, 그에 따라 변경은 없다. 일부 경우에, 제2 방향으로의 전방 초점 거리가 절대값 면에서 2m 미만이라면, 유리한 것으로 고려되며, 여기서 그러한 전방 초점 거리는 바람직하게는 2m미만, 특히 1m미만이다. 제2 방향으로의 전방 초점 거리는 제1 방향으로의 전방 초점 거리에 대응할 수 있지만, 그럴 필요는 없다. 이러한 초점 거리는 제1 방향으로의 전방 초점 거리와 편차가 있을 수 있다.

[0043] 투영 렌즈는 직사각형 유효 오브젝트 필드(직사각형 필드)를 직사각형 유효 이미지 필드에 이미징하도록 설계할 수 있다. 대안적으로, 투영 렌즈는, 주사 방향으로 만곡된, 즉 호형 유효 오브젝트 필드인 링 필드를 이미징하도록 설계할 수 있다. 이 경우에, 이미지 평면에서, 주사 방향으로 뒤처지는 필드 에지에서의 중간 필드 지점과 필드 에지의 주변에서의 주변 필드 지점 사이의 - 주사 방향으로 측정된 - 거리는 주사 방향에 수직으로 측정한 필드 폭의 5% 초과, 바람직하게는 15% 초과, 특히 25% 초과에 대응하도록 링 필드의 곡률의 치수가 조정된다면, 유리한 것으로 고려된다. 그러한 크게 만곡된 링 필드는, 예컨대 필드 위에서 2차 Z3 변경, 즉 y-방향 또는 주사 방향으로의 이미지 편차의 2차 변경이 생성되는 정정 시나리오가 진행된 경우 유용할 수 있다. 그러한 정정은 레티클이 가열되는 경우에 파면 수차를 보상하는데 예컨대 유용할 수 있다. 이러한 상황에서, 더욱 크게 만곡된 링 필드가, 레티클의 작은 기울기만이 정정을 위해 필요하다는 점에 기여한다. 결국, 선택된 정정 진폭을 위한 관련 비점수차는 또한 상대적으로 작게 유지되며, 그에 따라 파면 조작 시스템에 의한 필요한 정정은 또한 적절한 것으로 판명될 수 있다.

[0044] 기재한 타입의 비점 파면 수차 부분을 보상할 수 있는 파면 조작 시스템은, 레티클 변위에 의해 초래되는 비점 파면 수차 부분의 정정과 독립적으로 x-y-비점수차를 정정하기 위한 빠른 정정 가능성으로서 사용될 수 도 있다. 그러한 수차는, 예컨대 2중극 조명과 사용하는 시스템에서의 가열 효과의 결과로서 구체적으로 발생할 수 있다.

[0045] 본 발명은 또한, 여기서 고려 중인 타입의 투영 렌즈, 즉 주사 동작 전 및/또는 동안 레티클 변위에 의해 초래되는 비점 파면 수차 부분을 정정하기 위한 동적 파면 조작 시스템을 포함하는 투영 노광 장치에 관한 것이다.

[0046] 일부 실시예에서, 투영 노광 장치의 마스크 홀딩 디바이스는, 오브젝트 평면에 직교하여 움직이는 z-방향에 평행한 마스크의 제어된 변위를 위한 z-시프트 디바이스를 포함한다. 이 z-시프트 디바이스는 z-방향에 평행한 움직임 소자로 마스크를 변위시키기 위해 여러 정정 시나리오의 환경에서 사용할 수 있어서, 비점 파면 수차 부분이 상호 수직한 방향으로 상이한 이미징 스케일로 인해 애너모픽 투영 렌즈에서 생성된다. 이것은 기재한 방식으로 파면 조작 시스템을 사용하여 보상할 수 있다. x-축에 대한 및/또는 y-축에 대한 레티클의 틸팅 또한 가능하며 편리할 수 있다. 이를 위해, 마스크 홀딩 디바이스는 틸팅 디바이스를 포함할 수 있다.

[0047] 본 발명은 또한, 마스크 패턴의 적어도 일 이미지로 방사선 민감성 기판을 노광하기 위한 투영 노광 방법에 관한 것이다. 애너모픽 투영 렌즈를 여기서 사용할 수 있다.

[0048] 일 실시예에서, 주사 동작 동안 주사 방향으로 마스크를 움직이면, 오브젝트 평면에 수직인 변위 방향(z-방향)으로의 마스크의 제어된 변위가 예컨대 특정 수차를 보상하기 위해 적어도 단계적으로 발생할 수 있다. 투영 빔 경로에 배치되는 조작 가능한 미러와, 조작 가능한 미러의 광학 효과를 가역적으로 변화시키기 위한 작동 디바

이스를 갖는 적어도 하나의 조작기의 구동에 의해, 오브젝트 평면으로부터 이미지 평면으로 통과하는 투영 방사선의 파면의 비점수차 영향을 사용하여, z-변위에 의해 생성되는 비점수차를 부분적으로 또는 완전히 보상할 수 있다.

[0049] 파면 조작 시스템의 조작기의 작동 디바이스의 구동은, 주사 동작 동안 거의 즉각적인 정정 효과를 달성하기 위해 마스크의 동적인 변위 및/또는 틸팅에 따라 실행할 수 있다. 이러한 구동은 예컨대 이전에 계산한 감도를 사용한 피드포워드 모델을 기초로 하여 실행할 수 있다. 예컨대, 마스크의 임의의 관련된 변위 움직임을 위해 이전에 계산한 미러의 작동 디바이스의 대응하는 작동 이동과 같이 저장되는 적어도 하나의 이전에 계산된 룩업표를 기초로 구동을 실행할 수 도 있다. 결국, 레티클의 포지션의 변화에 대한 파면 조작 시스템의 준-즉각적인 응답은 심지어 제어의 적절한 컴퓨팅 파워에 의해 달성할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0050] 본 발명의 추가 장점 및 양상은, 도면을 참조하여 설명한 본 발명의 바람직한 예시적인 실시예에 대한 다음의 설명과 청구범위로부터 자명하다.

도 1은 EUV 마이크로리소그라피를 위한 투영 노광 장치를 통한 단면을 개략적으로 도시한다.

도 2는, 제1 예시적인 실시예에 따른 투영 렌즈에서의 빔 경로를 설명하기 위한 도 1에 따른 투영 노광 장치로부터의 발췌부를 개략적으로 도시한다.

도 3은, 도 2에 수직인 평면에서 도 2에 대응하는 예시를 도시한다.

도 4는 이미징 시스템을 개략적으로 도시한다.

도 5는, 애너모픽 이미징 시스템의 경우에 축방향 오브젝트 변위에 의해 유도되는 이미지 평면의 변위를 개략적으로 도시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0051] 도 1은, 본 발명의 일 실시예에 따른 EUV 마이크로리소그라피 투영 노광 장치(WSC)의 예시적인 광학 소자를 예를 들어 도시한다. EUV 마이크로리소그라피 투영 노광 장치는, 반사성 마스크(M)의 패턴의 적어도 하나의 이미지로, 오브젝트 렌즈(O)의 이미지 평면(IS)의 영역에 배치되는 방사선-민감성 기판(W)을 노광하는 역할을 하며, 그러한 패턴은 투영 렌즈의 오브젝트 평면(OS)의 영역에 배치된다. 마스크(M)는 또한 여기서 대안적으로 레티클(M)로서 지정된다. 기판은 이 예의 경우에 반도체 소재로 구성된 웨이퍼이다.

[0052] 기재의 이해를 용이하게 하기 위해, 데카르트 xyz-좌표계를 나타내며, 이것은 도면들에 예시한 소자들의 각각의 포지션 관계를 드러낸다. 투영 노광 장치(WSC)는 스캐너 타입이다. x-축은 도 1에서 도면의 평면에 수직으로 도면 내로 진행한다. y-축은 오른쪽을 향해 진행한다. z-축은 아래로 진행한다. 오브젝트 평면(OS)과 이미지 평면(IS) 모두는 x-y 평면에 평행하게 진행한다. 투영 노광 장치의 동작 동안, 마스크(M)와 기판은 y-방향(주사 방향)으로 주사 동안 동기적으로 또는 동시에 움직임으로써 주사된다.

[0053] 이 장치는 1차 방사선 원(RS)의 방사선으로 동작한다. 조명 시스템(ILL)이 1차 방사선 원의 방사선을 수신하여 패턴 상에 보내는 조명 방사선을 성형하는 역할을 한다. 투영 렌즈(PO)는 패턴을 감광성 기판 상에 이미징하는 역할을 한다.

[0054] 1차 방사선 원(RS)은 특히 레이저 플라스마 원 또는 가스 방출 원 또는 싱크로트론-기반 방사선 원일 수 있다. 그러한 방사선 원은 특히 5nm와 15nm 사이의 파장을 갖는 EUV 범위에서 방사선(RAD)을 생성한다. 조명 시스템과 투영 렌즈는, 이 파장 범위에서 동작할 수 있기 위해 EUV 방사선을 반사하는 소자로 구성한다.

[0055] 방사선 원(RS)으로부터 나오는 방사선(RAD)은 집광기(COL)에 의해 집광되어 조명 시스템(ILL)에 안내된다. 조명 시스템은 혼합 유닛(MIX), 텔레스코프 광학 유닛(TO) 및 필드 형성 미러(FFM)를 포함한다. 조명 시스템은 방사선을 성형하며, 그에 따라 투영 렌즈(PO)의 오브젝트 평면(OS)에 또는 그에 근접하게 자리한 조명 필드를 조명한다. 이 경우, 조명 필드의 형태와 크기가 오브젝트 평면(OS)에서 유효하게 사용되는 오브젝트 필드(OF)의 형태와 크기를 결정한다.

[0056] 장치의 동작 동안, 반사성 레티클(M)이 오브젝트 평면(OS)의 구역에 배치된다.

[0057] 혼합 유닛(MIX)은 실질적으로 2개의 패싯 미러(FAC1, FAC2)로 구성된다. 제1 패싯 미러(FAC1)는, 오브젝트 평면

(OS)에 대해 광학적으로 켤레 관계인 조명 시스템의 평면에 배치된다. 그러므로 이것은 필드 패싯 미러로서 지정된다. 제2 패싯 미러(FAC2)는, 투영 렌즈의 동공 평면에 대해 광학적으로 켤레 관계인 조명 시스템의 동공 평면에 배치된다. 그러므로 이것은 동공 패싯 미러로서 지정된다.

[0058] 동공 패싯 미러(FAC2)와, 빔 경로에서 하류에 배열되며 그레이징 입사(incidence)로 동작하는 필드 형성 미러(FFM)와 텔레스코프 광학 유닛(TO)을 포함하는 이미징 광학 조립체를 사용하여, 제1 패싯 미러(FAC1)의 개별 미러링 패싯(개별 미러)이 오브젝트 필드에 이미징된다.

[0059] 필드 패싯 미러(FAC1)에서의 공간(국부적) 조명 세기 분포가 오브젝트 필드에서의 국부적 조명 세기 분포를 결정한다. 동공 패싯 미러(FAC2)에서의 공간(국부적) 조명 세기 분포가 오브젝트 필드(OF)에서의 조명 각도 세기 분포를 결정한다.

[0060] 유효 오브젝트 필드(OF)는 도 2 및 도 3에서의 예시적인 실시예에서의 직사각형 필드이지만, 다른 변형에서는 곡선 필드(링 필드(RF), 상세하게는 도 2를 참조)일 수 도 있다.

[0061] 마스크(M)(레티클)를 홀딩하고 조작하기 위한 마스크 홀딩 디바이스(RST)가, 마스크 상에 배치된 패턴이 투영 렌즈(PO)의 오브젝트 평면(OS)에 놓이도록 배치되며, 그러한 오브젝트 평면은 또한 레티클 평면으로서 지정된다. 마스크는, 주사 드라이브(SCM)를 사용하여 투영 렌즈(z-방향)의 기준 축(AX)에 수직인 주사 방향(y-방향)으로의 스캐너 동작을 위해 이 평면에서 움직일 수 있다.

[0062] 마스크 홀딩 디바이스(RST)는 (주사 방향 및 x-방향에 수직인) z-방향에 평행한 레티클의 제어되는 변위를 위한 z-변위 디바이스를 포함한다. 이것은 또한, x-방향에 평행하게 진행하는 틸팅 축에 대해 및/또는 y-방향에 평행하게 진행하는 틸팅 축에 대해 오브젝트 평면에 평행한 포지션으로부터 필요에 따라 마스크를 틸팅하기 위해 틸팅 디바이스를 포함할 수 있다. 이들 디바이스는, 특히 마스크의 변위가 미리 한정 가능한 움직임 프로파일에 따라 일 방향으로 나아가는 주사 동작의 시작과 끝 사이의 시간 간격에서 실행할 수 있도록 주사 동안 동적으로 사용할 수 있다.

[0063] 노광될 기판(W)은, 주사 방향(y-방향)으로 기준 축(AX)에 수직으로 마스크(M)와 동기적으로 기판을 움직이기 위해, 주사기 드라이브(SCW)를 포함하는 기판 홀딩 디바이스(WST)에 의해 홀딩된다. 투영 렌즈(PO)의 설계에 따라, 마스크와 기판의 이들 움직임을 서로 평행하게 또는 역평행하게 실행할 수 있다.

[0064] 기판 홀딩 디바이스(WST)는 (주사 방향에 수직인) z-방향에 평행한 기판의 제어되는 변위를 위한 z-변위 디바이스를 포함한다. 이것은 또한, x-방향에 평행하게 진행하는 틸팅 축에 대해 및/또는 y-방향에 평행하게 진행하는 틸팅 축에 대해 이미지 평면에 평행한 포지션으로부터 필요에 따라 웨이퍼나 기판을 틸팅하기 위해 틸팅 디바이스를 포함할 수 있다. 이들 디바이스는, 특히 기판의 변위가 미리 한정 가능한 움직임 프로파일에 따라 일 방향으로 나아가는 주사 동작의 시작과 끝 사이의 시간 간격에서 실행할 수 있도록 주사 동안 동적으로 사용할 수 있다.

[0065] "웨이퍼 스테이지"로서도 지정되는 기판 홀딩 디바이스(WST)와, "레티클 스테이지"로서도 지정되는 마스크 홀딩 디바이스(RST)는, 이 실시예의 경우 투영 노광 장치의 중앙 제어 유닛(CU)에 통합되는 주사 제어 유닛에 의해 제어되는 주사기 디바이스의 부분이다.

[0066] 조명 시스템(ILL)은 출사 동공을 가지며, 출사 동공의 형상은 투영 렌즈(PO)의 입사 동공의 형상에 맞게 되며 특히 입사 동공에 정밀하게 대응한다. 조명 시스템(ILL)의 출사 동공은 타원 형태로 구현된다. 이러한 구성은, 특히 타원형으로 구현된 동공 패싯 미러(FAC2)에 의해 달성할 수 있다. 그에 대한 대안으로서, 동공 패싯은, 타원형으로 구현된 엔빌로프를 갖는 방식으로 동공 패싯 미러(FAC2) 상에 배치될 수 도 있다.

[0067] 타원형 동공 패싯 미러(FAC2)의 반축은 2개의 상이한 반축 길이를 가질 수 있으며, 더 긴 반축 길이는 제1 반축 길이의 크기의 예컨대 적어도 한 배 반이며, 가능하게는 심지어 적어도 두 배이다. 조명 시스템(ILL)의 출사 동공의 반축은 대응하여 마찬가지로 상이한 반축 길이를 가질 수 있으며, 바람직하게는 조명 시스템의 출사 동공과 동일한 반축 길이 비를 가질 수 있다.

[0068] 비-애너모픽 이미징 스케일을 갖는 종래의 회전 대칭 시스템의 경우, 조명 빔의 주광선은, 필드-일정 최적 조명을 보장하기 위해 투영 렌즈의 입사 동공 평면에서 만나야 한다. VUV 시스템(진공 자외선 범위로부터의 동작 파장으로 동작하는 시스템)의 경우, 그러한 입사 동공은 통상 무한대에 있으며; 그에 따라 이들 시스템은 텔레센트릭, 즉 주광선이 레티클 상에 수직으로 충돌한다. EUV 시스템의 경우에, 반사성 레티클은 조명 빔 경로와 투영 빔 경로를 분리하기 위해 경사지게 조명해야 한다. 그러므로 입사 동공은 레티클로부터 유한 거리에 자리해

야 한다. 1m 내지 3m의 범위의 거리가 여기서는 유리한 것으로 고려한다. 이것은 결국 레티클에서의 주광선 각도의 변형, 제1 근사치로, x-방향으로의 선형 텔레센트리서티 프로파일에 대응하며 레티클의 z-시프트 상에 선형 Z2를 생성하는 선형 프로파일을 초래한다.

[0069] 투영 렌즈(PO)는, 오브젝트 평면에 대해 광학적으로 켤레 관계에 있으며 그에 평행하게 놓이는 이미지 평면(IS) 내로의 투영 렌즈의 오브젝트 평면(OS)에 배치된 패턴의 이미징을 축소시키는 역할을 한다. 이러한 이미징은, 이 예의 경우 13.5nm인 동작 파장(λ) 주위의 극자외선 범위(EUV)로부터의 전자기 방사선에 의해 실행된다. 오브젝트 필드(OF)는 이 경우 이미지 필드(IF)에 이미징된다.

[0070] 애너모픽 투영 렌즈가 수반된다. 애너모픽 투영 렌즈는 더는 회전 대칭이지 않으며, 오히려 자유형태 표면 설계로 설계한다. 그러므로 절대적으로 단일 입사 동공 포지션이 있어야 하는 것은 아니며, 오히려 x- 및 y-방향은 서로로부터 분리할 수 있어서 상이한 평면에 놓일 수 있다. 이것을 이때 비점수차 입사 동공이라고 칭한다. 그러므로 조명 시스템은 마찬가지로 비점수차, 즉 투영 렌즈의 비점수차 입사 동공에 맞춰지는 비-호모센트릭 이미징이 장착될 수 있다.

[0071] 도 2 및 도 3은, 애너모픽 투영 렌즈(PO)의 제1 실시예의 광학 설계를 상이한 도면으로 도시한다. 이 예시는, 오브젝트 필드(OF)의 2개의 반대편 주변을 각각 한정하는 2개의 오브젝트 필드 지점으로부터 그리고 중앙 오브젝트 필드 지점으로부터 나아가는 방사선의 개별 광선의 빔 경로를 도시한다.

[0072] 도 2 및 도 3에 따른 투영 렌즈(PO)는 총 6개의 미러를 가지며, 이들 미러는 오브젝트 필드(OF)로부터 나아가는 빔 경로 방향으로 연속해서 M1(제1 미러) 내지 M6(제6 미러)로 번호를 매긴다. 도 2 및 도 3은, 투영 렌즈(PO)의 설계 동안 계산한 미러(M1 내지 M6)의 반사 표면을 예시한다. 이 도면들로부터 자명한 바와 같이, 부분적으로는, 예시한 표면의 세그먼트만이 방사선을 반사하는데 실제로 사용된다. 미러(M1 내지 M6)의 실제 실시예는 그에 따라 도면들에 예시한 것보다 작을 수 있으며, 특히 도면들에서 예시한 계산된 반사 표면의 일부분만을 포함할 수 있다.

[0073] 평면일 수 있거나 만곡될 수 있는 제1 동공 표면(PF1)이 제2 미러(M2)와 제3 미러(M3) 사이에 자리한다. 게다가, 중간 이미지 표면(IMF)이 제4 미러(M4)와 제5 미러(M5) 사이에 자리한다. 중간 이미지 표면(IMF)은 평면이거나 만곡될 수 있다. 미러(M1 내지 M4)는 그에 따라 제1 (이미징) 부분 렌즈(OBJ1)를 형성한다. 미러(M5 및 M6)는 제2 이미징 부분 렌즈(OBJ2)를 형성한다.

[0074] 투영 렌즈는 모든 미러에 공통되는 "종래의" 광학 축을 갖지는 않는다. 기준 축(AX)(도 1 참조)은 오브젝트 평면 및 이에 평행한 이미지 평면에 수직으로 진행한다. 광학 시스템은 도 3에 예시한 y-z 평면에 대해 미러 대칭이다(도 3과 비교).

[0075] 제1 부분 렌즈(OBJ1)는 애너모픽 렌즈이다. 즉, 이것은 애너모픽 방식으로 이미징한다. 제2 부분 렌즈(OBJ2)는 마찬가지로 애너모픽 렌즈이다. 즉, 이것은 애너모픽 방식으로 이미징한다. 그러나 제2 부분 렌즈(OBJ2)가 비-애너모픽으로서 구현되는 것도 마찬가지로 가능하다.

[0076] 자유형태 표면을 갖는 애너모픽 시스템이 수반된다. 자유형태 표면을 갖는 미러의 경우에, 미러 표면은 x- 및 y-방향으로 상이한 곡률반경을 갖는다. 즉 비점수차를 갖는다. 전체 효과는 여기서, 시스템 또는 서브시스템이 애너모픽 방식으로 이미징한다는 점이다. 투영 렌즈(PO)는 복수의 비점수차 방식으로 이미징하는 미러, 예컨대 2개, 3개, 4개, 5개 또는 6개를 포함할 수 있다.

[0077] 투영 렌즈(PO)는 그에 따라 제1 방향으로의 제1 이미징 스케일(β_1)과, 이와 상이한 제2 방향으로의 제2 이미징 스케일(β_2)을 갖는다. 제2 이미징 스케일은 예컨대 제1 이미징 스케일의 크기의 적어도 한 배 반, 특히 적어도 두 배의 크기일 수 있다.

[0078] 투영 렌즈(PO)는, 주사 방향(y-방향)으로의 이미징 스케일의 절대값이 주사 방향에 수직인 이미징 스케일의 절대값보다 작도록 구현된다. 그러므로 시스템은 교차 주사 방향으로보다는 주사 방향으로 더욱 큰 축소 효과를 갖는다. 주사 방향으로의 이미징 스케일의 절대값은 예컨대 주사 방향에 수직인 것의 크기의 최대 3/4, 특히 최대 2/3, 특히 최대 1/2일 수 있다.

[0079] 투영 렌즈(PO)는 방향 의존적 오브젝트 측 개구수(NA_0)를 갖는다. 즉, 입사 동공은 원형 형상과 편차가 있다. 이 경우, 특정 방향, 즉 큰 이미징 스케일의 방향으로의 오브젝트-측 개구수(NA_0)는 예컨대 그에 수직인 방향으로의 것의 크기의 적어도 한 배 반이다.

[0080] 제6 미러(M6)는 방사선의 통과를 위한 관통 개구(OP)를 갖는다. 추가 동공 표면(PF2)이 미러(M5)와 미러(M6) 사이에 자리한다. 동공 표면(PF2)은 평면일 수 있거나 만곡될 수 있다.

[0081] 미러(M1 내지 M6)는 EUV 방사선에 반사인 것으로 구현된다. 이들 미러는, 입사되는 EUV 조명 광에 대한 그 반사를 최적화하기 위한 다수의 반사 층(다층 미러)을 갖는다. 미러 표면 상의 개별 광선의 입사각이 수직 입사에 가까울수록, 반사는 더 양호하게 더 최적화될 수 있다.

[0082] 미러(M1 내지 M5)는, 폐쇄된 방식으로, 즉 관통 개구가 없이 구현되는 반사 표면을 갖는다. 미러(M1, M4 및 M6)는 오목한 반사 표면을 갖는다. 미러(M2, M3 및 M5)는 볼록한 반사 표면을 갖는다.

[0083] 투영 렌즈(PO)의 미러(M1 내지 M6)나 그 반사 표면은, 회전 대칭 함수로 기재 가능하지 않는 자유형태 표면으로서 구현된다. 그러한 자유형태 표면은 회전 대칭 기준 표면으로부터 생성될 수 있다. 마이크로리소그라피를 위한 투영 노광 장치의 투영 렌즈의 미러의 반사 표면에 대한 자유형태 표면은 예컨대 US 2007-0058269A1으로부터 알려져 있다. 자유형태 표면은 다음의 수학식에 의해 수학적으로 기재할 수 있다:

$$Z(x,y)=\frac{cr^2}{1+\sqrt{1-(1+k)c^2r^2}}+\sum_{j=2}^{N}\frac{C_j}{N_{radius}^{m+n}}x^m y^n$$

[0084]

[0085] 여기서 이하가 사실이다:

$$j=\frac{(m+n)^2+m+3n}{2}+1$$

[0086]

[0087] Z는 지점(x, y)에서의 자유형태 표면의 새지털(sagittal) 높이이며, 여기서 $x^2 + y^2 = r^2$이다. 파라미터(c)는 대응하는 비구면의 정점 곡률에 대응하는 상수이다. k는 대응하는 비구면의 원뿔 상수에 대응한다. C_j는 단항식(x^m, y^n)의 계수이다. c, k 및 C_j의 값은 통상적으로 투영 렌즈(PO) 내에서 미러의 원하는 광학 속성을 기초로 하여 결정한다. N^{m+n}_{radius}는 계수(C_j)에 대한 공칭화 팩터이다. 단항식의 차수(m+n)는 임의적으로 변할 수 있다. 더 고차의 단항식이 더 양호한 이미지 수차 정정을 갖는 투영 렌즈의 설계를 얻게 할 수 있지만, 계산하기에 더 복잡하다. m+n은 3과 20보다 큰 값 사이의 값을 가질 수 있다.

[0088] 상세한 설명의 말미에 나타낸 표는 투영 렌즈(PO)의 광학 설계 데이터를 표 형태로 요약하며, 그러한 데이터는 광학 설계 프로그램인 Code V®를 사용하여 얻었다. 표 1은, 광학 소자의 광학 표면에 관해 그리고 개구 스탑에 관해 각 경우 정점 곡률의 역수(반경)와, 이미지 평면(IS)으로부터 나아가는, 즉 광 방향에 반대인 빔 경로에서의 인접하 요소 사이의 z-거리에 대응하는 거리 값(두께)를 명시한다.

[0089] 표 2는, 미러(M1 내지 M6)에 대한 앞서 명시한 자유형태 표면 수학식에서의 단항식(x^{mn})의 계수(C_j)를 명시한다. 표 3은 nm 단위의 절대값을 명시하며, 이 값에 따라, 미러 기준 설계로부터 나온 각 미러는 디센터(Y-디센터) 및 회전(X-회전)하였다. 이것은 자유형태 표면 설계 방법의 경우에 평행 시프트 및 틸팅에 대응한다. 이 경우에, 시프팅은 y-방향으로 실현하며, 틸팅은 x-축에 대해 실현한다. 이 경우, 회전각도는 도 단위로 명시한다.

[0090] 제2 미러(M2)는 X-방향과 Y-방향으로 상이한 범위로 만곡되어 있다. 이점은, 표 1에서 2차 계수(X2 및 Y2)가 상당히 상이한 차수의 크기(대략 20의 팩터의 차이)를 가진다는 점에서 자명하다. 이점은 제1 부분 렌즈(OBJ1)(및 또한 전체 투영 렌즈)가 애너모픽 방식으로 이미징한다는 점에 기여한다.

[0091] 투영 렌즈의 이 기본 설계는 WO 2012/034995A2에서의 도 2 및 도 3의 투영 렌즈에 대응한다. 이 출원에 기재한 다른 투영 렌즈는 마찬가지로 본 발명의 환경에서 사용할 수 있다. 이 문헌 WO 2012/034995A2의 개시 내용은 그 전체가 본 상세한 설명의 내용에 병합된다.

[0092] 예시적인 실시예에서의 투영 노광 장치는, 제어 유닛(CU)의 제어 신호를 기초로 한정된 방식으로 투영 렌즈의 이미징 속성과, 적절하다면 다른 소자의 이미징-영향 속성을 변화시킬 수 있는 수많은 조작기를 갖는 조작 시스

템을 포함한다. 이 경우, 용어, "조작기"는, 제어의 대응하는 제어 신호를 기초로 타겟 지정 방식으로 그 광학 효과를 변화시키도록 설계되는 디바이스를 나타낸다. 일반적으로, 조작기는, 계측에 의해 검출된 이미징 수차가 타겟 지정 방식으로 축소될 수 있도록 설정한다.

[0093] 투영 노광 장치의 동작 동안, 예컨대 레티클 스테이지와 기판 스테이지는 서로와 매우 정확히 동기화되는 방식으로 움직여야 한다. 이를 위해, 레티클과 기판 스테이지를 뛰어난 조작기로 만드는 정밀한 움직임 성능과 동적 제어 성능이 있다. 수차는 정확히 동기화된 프로파일로부터 타겟 지정 편차만큼 정정할 수 있다. 예를 들어, 레티클과 기판의 움직임 속도의 비가 설계 스케일로부터 편차가 있다면, 스케일 에러 같은 것이 마스크 제조 동안 발생하였을 수 있거나 요소 가열이 결과로서 생길 수 있으며, 예컨대 보상할 수 있다. 이러한 정정은 주사 프로세스 동안 아마도 가변적이다. 즉, 수십 분의 1초의 리소그라피 조건에 대해 매우 짧은 시간 스케일에 있다.

[0094] 특히 조명 및 투영 렌즈를 구분할 목적으로 EUV 레티클 상에서의 광의 경사진 입사 및 링 필드와 조합할 경우, 레티클 스테이지 및/또는 기판 스테이지의 틸트가 Z2, Z3 및 Z4의 2차 필드 프로파일을 설정할 수 있다. 약어(Z2, Z3 등)는 여기서 이미징에 관련된 특정 수차를 기재하는 제르니케 계수를 일반적으로 상징한다. 이 경우, Z2는 (주사 방향에 수직인) x-방향으로의 이미지 편차를 상징하고, Z3은 y-방향(주사 방향)으로의 이미지 편차를 나타내며, Z4는 디포커스를 나타낸다.

[0095] 언급한 바와 같이, 마스크 홀딩 디바이스(RST)는, (주사 방향 및 x-방향에 수직인) z-방향에 평행한 레티클 또는 마스크의 제어된 변위를 위한 z-변위 디바이스를 또한 포함한다. 이 변위는, 예컨대 특정 수차에 대해 필드 프로파일을 설정하기 위해 주사 동작 동안 아마도 매우 동적이다(예컨대, 수십 분의 1초 내지 수 초의 시간 스케일에 있다). 그러한 필드 프로파일은, 허용 가능한 부작용을 갖고 필드에서 직접 초래되는 그러한 이미지 수차 프로파일을 오직 보상할 수 있었던 인근-필드 요소가 부족하다면, 그렇지 않았다면 시스템에서 취급하기 어려울 레티클 가열 효과나 기판 불균일을 종종 정정한다. 주사 동안, 레티클 가열 효과나 웨이퍼 불균일은 변할 수 있으며, 재조정은 그에 따라 동적으로 실행해야 한다.

[0096] 대응하는 z-변위 디바이스는 기판 홀딩 디바이스(WST)에서 이미지 측 상에 제공된다.

[0097] 애너모픽 이미징 시스템에 특징되는 문제를 도 4 및 도 5를 참조하여 이하에서 설명할 것이다. 이러한 점에서, 도 4는, 그 주평면(H-H')에 의해 특징지어지고, 오브젝트-측 초점거리(F)와 이미지-측 초점거리(F')를 가지며 오브젝트 높이(y)를 갖는 오브젝트를 이미지 높이(-y')를 갖는 이미지로 이미징하는 이미징 시스템의 개략적 도시를 도시한다. 이 경우, 오브젝트는 오브젝트 평면(OS)에 자리하는 반면, 이미지는, 오브젝트 평면에 광학적으로 켤레 관계인 이미지 평면(IS)에서 생긴다. 오브젝트-측 및 이미지-측 거리는, 개략적으로 도시한 시스템의 광학 축에 평행하게 진행하는 z-방향을 따라 측정한다. 이미징 시스템의 이미징 스케일(β)은 $\beta=y'/y$에 따라 이미지 높이(y')의 절대값의 오브젝트 높이(y)의 절대값에 대한 비에 대응한다. 축소 이미징이 수반되므로, $|\beta|<0$이 사실이다. 이 이미징 스케일은 개략적으로 도시한 시스템의 y-z 평면에 존재하며, 이 평면은 도면의 평면과 일치한다. 오브젝트는 그 후 z-방향에 평행하게 시프트한다면, 이미지 평면이 z-방향으로 얼마나 시프트하는지 또는 다시 z-방향으로의 오브젝트 시프트 시에 집속된 이미징을 얻기 위해 이미지 영역에서의 재집속을 얼마나 실현해야 하는지에 대한 문제가 생긴다. Δz가 z-방향에 평행한 오브젝트 시프트의 범위를 나타낸다면, $\Delta z'$만큼의 이미지 평면의 필요한 변위가 다음 조건에 따라 이미지 영역에서 생긴다:

[0098] $$\Delta z'=\beta^2\Delta z$$

[0099] 몫($\Delta z'/\Delta z$)은 여기서 길이 스케일(또는 깊이 스케일)로서 지정된다. 종래의 이미징 광학 시스템에서의 종방향 스케일은 그에 따라 β^2로, 즉 이미징 스케일의 제곱으로 주어진다.

[0100] 투영 렌즈의 오브젝트 평면에 배치된 패턴의 투영 렌즈의 이미지 평면으로의 이미징이 적용되며, 이것이 의미하는 점은, z-방향으로 패턴을 갖는 레티클의 변위(포지션 변화)가 z-방향에 평행한 이미지 평면의 변위를 초래한다는 점이며, 여기서 변위의 범위는 이미징 스케일에 의존한다.

[0101] 애너모픽 이미징 시스템은 이때, 방향-의존적 이미징 스케일을 갖는 것을 특징으로 한다. x-방향으로의 이미징 스케일은 여기서 β_x로 주어져야 하며, 이에 수직인 y-방향으로의 이미징 스케일은 β_y로 주어져야 한다.

[0102] 이러한 점에서, 도 5는 왼편 부분에서 실선으로 오브젝트 평면(OS)의 레티클 또는 패턴의 원래 포지션을, 그리고 점선으로 z-방향으로 절대값(Δz)만큼 레티클이 변위한 후의 결과인 새로운 포지션을 개략적으로 도시한다. 오른편 부분 도면에서, 변위 전 이미지 평면(IS)의 원래 포지션을 실선으로 식별한다. 점선(IS_y)은 y-방향에 대

한 이미지 평면의 새로운 포지션을 도시한다. 이 새로운 포지션은 원래의 포지션에 대해 절대값(Δz_1)만큼 시프트하였다. 다른 점선(IS_x)은 x-방향으로의 새로운 이미지 평면의 포지션을 도시하며, 이 포지션은 이미지 평면의 원래 포지션으로부터 거리(Δz_2)에 있다. x-방향으로의 새로운 이미지 평면과 y-방향으로의 새로운 이미지 평면은 레티클이 시프트할 때 더는 일치하지 않지만, z-방향으로 서로로부터 일정 거리에 있음이 자명하다. 더 나아가, x-방향으로의 종방향 스케일이 y-방향으로의 종방향 스케일과 상이함이 자명하며, 다음은 사실이다:

$$\Delta z_1 = \beta_y{}^2 * \Delta z$$
$$\Delta z_2 = \beta_x{}^2 * \Delta z$$

[0103]

[0104] 이것이 다음의 수학식에 따른 비점 이미징 수차(AST)의 특징이다:

$$AST = \Delta z_2 - \Delta z_1 = \left(\beta_x{}^2 - \beta_y{}^2\right) * \Delta z$$

[0105]

[0106] 이로부터, 이미징 시스템의 주어진 이미지-측 개구수(NA)에 대해, 비점수차를 나타내는 제르니케 계수(Z5)는 다음의 수학식에 따라 유도할 수 있다:

$$Z_5 \approx AST / \left(\frac{4}{NA^2} - 1\right)$$

[0107]

[0108] x- 및 y-방향으로 동일한 이미징 스케일을 갖는 종래의 이미징 시스템에서, z-방향으로의 레티클의 시프트 결과로 생기는 이미징 수차는 종방향 스케일에 따라 z-방향에 평행하게 노광되는 기판의 대응하는 변위에 의해 완벽히 정정할 수 있었다. 그러한 정정은 그러나 애너모픽 이미징 시스템의 경우에 가능하지 않으며, 이는 상호 수직인 평면이나 방향으로의 이미징 스케일이 상이하기 때문이다. 본 발명에 따른 투영 렌즈의 예시적인 실시예에서, 애너모픽 이미징에도 불구하고, 레티클의 z-변위에 의해 생성되는 비점수차 부분을 적어도 부분적으로 정정할 수 있기 위해, 특정 수단이 존재한다. 이를 위해, 투영 렌즈(PO)는, 주사 동작 동안 레티클 변위에 의해 초래되는 비점 파면 수차 부분을 정정하기 위해 동적 파면 조작 시스템이 장착된다.

[0109] 본 발명자들에 의한 조사는, (예컨대, 십 분의 수초의 시간 스케일 상에서) 신속하게 투영 렌즈의 미러를 그 강체의 자유도에서 제어되는 방식으로 움직임으로써, 발생하는 비점수차의, 기재하였고 일반적으로 바람직하지 않으며 그에 따라 해로운 효과를 보상할 수 있음을 보여주었다. 이를 위해, 할당된 작동 디바이스(DR1 내지 DR6)(양방향 화살표로 기호화함)는 미러(M1 내지 M6) 각각에 제공된다. 작동 디바이스 각각은 구동 목적으로 투영 노광 장치의 중앙 제어 유닛(CU)에 연결된다. 작동 디바이스 각각은, 각각의 미러 표면이 프로세스에서 변형되지 않고도, 기본 설계에 의해 미리 한정된 그 기준 위치(예컨대, 표 1 및 2)에 관해 할당된 미러를 움직일 수 있다. 변위는 예컨대 기준 축(오브젝트 평면과 이미지 평면에 수직인 축)에 평행한 시프트, 기준 축에 수직인 시프트 및/또는 틸팅(틸팅된 움직임)을 포함할 수 있다.

[0110] 모든 미러는 비-회전 대칭의 반사성 자유형태 표면을 갖는다. 그러한 형태인 경우에, 적절하다면, 회전 축에 대한 제어된 회전이 또한 파면의 비점수차 변화를 생성하는데 사용할 수 있다(WO 2012041459A1과 비교). 변위는 그에 따라 그러한 회전에 의해서만 생성되거나 주사 동안 회전 축에 대한 미러 중 적어도 하나의 회전을 또한 포함할 수 있다.

[0111] 그 강체의 자유도에서 움직일 수 있게 작동하는 미러는 그에 따라 제1 타입의 조작기 중 조작기의 소자가 되어, 오브젝트 평면에 수직인 레티클의 변위의 결과로서 생길 수 있는 비점 파면 수차 부분의 부분적인 또는 완벽한 보상을 허용한다.

[0112] 더 나아가, 제1 타입의 조작기는 투영 렌즈의 x-y 비점수차에 대한 고속 정정 가능성을 제공한다. 2중극 조명이 예컨대 이미징 밀집 라인을 위해 사용된다면, 그러한 비점수차는 예컨대 투영 렌즈에서 가열 효과의 결과로서 생길 수 있다. 미러 중 일부(하나 또는 복수)는, 이들이 입사 방사선 에너지의 공간 분포로서 이러한 비-회전 대칭 광 분포가 되며 조명되지 않은 영역에서보다 조명된 영역에서 더 큰 정도로 국부적으로 가열되어 그에 따라 변형되도록 동공 표면에 근접하게 자리할 수 있다. 이것은, x-y 방향에서의 비점수차가 생기도록 정밀하게 광학 경로 길이를 변화시킬 수 있다. 이러한 효과는 제1 타입의 조작기 중의 조작기에 의해 부분적으로 또는 완전히 보상할 수 있다.

[0113] 고속 강체 조작기의 효과는 정량적 예를 기초로 설명할 수 있다. 일 예로, (여기서 더 상세하게 예시하지는 않는) EUV 투영 렌즈는 상대적으로 크게 만곡된 링 필드(RF)에 의해 동작하며, 이러한 링 필드는 예컨대 x-방향에 평행한 이미지 평면에서 26㎜의 폭과, x-방향에 수직, 즉 주사 방향으로 1.2㎜의 높이를 가질 수 있다. 링 필드는, 이미지 평면에서, 주사 방향으로 뒤처져 있는 (오목하게 만곡된) 필드 에지에서의 중간 필드 지점(FP1)과 필드 에지의 주변에서의 주변 필드 지점 사이의 거리 - 주사 방향(y-방향)으로 측정됨 - 가 주사 방향에 수직으로 측정한 필드 폭의 25% 초과에 대응할 정도로 큰 범위까지 만곡될 수 있다.

[0114] 투영 렌즈는 x-방향으로 이미징 스케일(β_x=0.25)(제2 이미징 스케일)과 y-방향으로 이미징 스케일(β_y=0.125)(제1 이미징 스케일)을 가져야 한다. 3개의 수차(Z2, Z3, Z4)에 대해, 시뮬레이션에 의해 상이한 정정 시나리오마다 x-방향으로의 상이한 필드 프로파일에 대한 정정 포텐셜을 결정하였다. 이 경우, 약어, "Z2_0"은 상수 부분을 상징하고, Z2_1은 선형 부분을 상징하고, Z2_2는, 주사 방향(x-방향으로의 왜곡)으로 평균을 구한 Z2 수차의 프로파일의 2차 부분을 상징한다.

[0115] 제1 정정 시나리오에서, 레티클의 z-시프트는 최적화된 z-시프트에 의해서만 보상되었으며 웨이퍼의 x- 및 y-축에 대해 틸팅된다. 표 4는 대응하는 잔류 수차 레벨을 도시한다. Z2_1 및 Z2_2가 레티클과 웨이퍼의 움직임에 의해서만 충분히 정정될 수 없음이 자명하다. 이것은 실질적으로는 시뮬레이션의 기초가 되는 투영 렌즈의 애너모픽 설계로부터 유래한다.

[0116] 그 밖에는 동일한 경계 조건을 갖고, 제2 정정 시나리오에서, 모든 미러의 고속의 조정된 강체 움직임도, 레티클과 웨이퍼의 z-변위 외에, 허용되었다. 표 5는 대응하는 잔류 수차 레벨을 도시한다. 중요한 프로파일(Z2_1 및 Z2_2 및 Z3_2)을 잘 정정할 수 있음이 자명하다.

[0117] [표 4]

	_0	_1	_2
Z2	0.0 %	77.6%	82.2%
Z3	0.0%	4.4%	43.8%
Z4	2.4%	2.5%	13.7%

[0118]

[0119] [표 5]

	_0	_1	_2
Z2	0.0 %	0.2%	5.7%
Z3	0.0%	0.1%	11.7%
Z4	0.2%	2.3%	14.2%

[0120]

[0121] 오브젝트 평면에 수직인 레티클 변위의 결과로서 비점 파면 수차 부분을 축소하거나 보상하기 위한 추가 정정 가능성은 조작기로서 동공 표면에 광학적으로 충분히 가깝게 위치지정되는 하나 또는 복수의 미러를 사용하는 것과, 그 미러 표면을 비점수차적으로 변형하는 것으로 이루어진다. 제2 타입의 조작기를 그에 따라 제공할 수 있다.

[0122] 도 3에 관해 도시한 파면 조작 시스템의 변형은 제2 타입의 조작기의 대응하는 조작기로서 동공 표면(제2 동공 표면(PF2))의 상대적으로 인근에 배치되는 제6 미러(M6)를 사용한다. 미러는, 투영 빔 경로에 배치되는 가역적으로 변형 가능한 미러 표면(MS6)을 갖는다. 미러 표면(MS6)에서의 서브애퍼쳐 비(SAR)는 조건(SAR>0.9)을 만족하며, 그 결과, 미러 표면이 가장 가까운 동공 표면에 광학적으로 인근에 있음이 분명하다. 미러에 할당되는 작동 디바이스(DR6')가, 기준 표면 형상에 대한 미러 표면의 표면 형상의 가역적인 비점수차 변화를 생성하도록 설계된다. 기준 표면 형상은, 투영 렌즈의 광학적 기초 설계로부터 얻은 그러한 표면 형상이다(예컨대, 표 1 및 표 2 참조). 도 3의 상세한 예시는, 미러 표면을 비점수차적으로 변형하기 위해 작동기(예컨대, 압전-작동기)(ACT)를 갖는 제6 미러(M6)의 후방측을 도시하며, 이러한 작동기는 4개의 사분면으로 나눈다.

[0123] 제1 타입의 조작기(강체 자유도의 움직임)와 제2 타입의 조작기(미러 표면 변형)의 조작기는 대안적으로 상이한 실시예 상에서 제공될 수 있다. 동일한 투영 렌즈에서의 상이한 타입의 조작기의 조합이 필요에 따라 가능할 수도 있다.

[0124] 제1 및/또는 제2 타입의 조작기의 조작기를 구동할 여러 가능성이 있다.

[0125] 작동 디바이스의 구동은 피드포워드 모델을 기초로 하여 실행할 수 있다. 이러한 구동 변형에서, 주사 동작 동안 레티클의 동적 변위/틸팅이 상기 주사 동작 전에 이미 알려져 있다. 이전에 계산되어 표로 정리한 감도에 의해, 레티클 움직임에 의해 초래되며 주도 동작 동안 발생할 원치 않는 비점수차도 알려져 있다. 이 경우에, 용어, "감도"는 조작기에서의 한정된 급격한 값 변화와 이미징 품질이나 리소그라픽 수차에 관한 결과적인 효과 사이의 관계를 기재한다.

[0126] 제어 유닛(CU)에 통합된 최적화 알고리즘은 이때, 비점수차를 동적으로 정정하기 위해 예상한 비점수차를 기초로 대응하는 "동적 정정 레시피"(즉, 각 조작기마다의 최적 이동 또는 작동 거리 또는 최적 궤적)을 계산할 수 있다. 이 정정 레시피를 기초로, 미러의 작동 디바이스는 주사 동작 동안 동적으로 구동하여, 비점수차를 그에 따라 정정한다.

[0127] 통합된 최적화 알고리즘에 의해 조작기의 최적 궤적을 계산하는 것의 대안으로서, 레티클의 임의의 가능한 움직임인 경우, 조작기의 관련 최적 이동을 미리 계산할 수 있어서 제어 유닛의 메모리에 표 형태(룩업표)로 존재할 수 있다. 이 경우에, 조작기의 이동이 각 주사 동작 전에 한정되기보다는, 제어 유닛이 존재하는 표를 사용하여 레티클의 즉흥적인 포지션을 기초로 주사 동작 동안 조작기의 작동 디바이스를 구동하는 것도 가능하다. 이 경우, 그러므로, 레티클의 움직임은 이와 결합되는 조작기의 준-즉흥적인 움직임을 초래한다.

[0128] 상기 실시예들에서, 파면 조작 시스템의 광학 효과는 주사 동작 동안 상대적으로 짧은 시간 스케일 상에서 동적으로 변화한다. 그러나 이것은 파면의 조작이 유용할 수 있는 유일한 상황은 아니다. 예컨대, 일 실시예에서, 파면 조작 시스템의 광학 효과는 주사 동작 밖인 시간 간격 동안 변화한다. 구체적으로, 마스크를 변위시키며 비점 파면 수차 부분을 정정하는 단계들은 새로운 세트의 주사 동작이 실행되기 전 셋업 페이즈에서 실행할 수 있다. 예시적인 시나리오를 이하에서 기재할 것이다.

[0129] 제1 시나리오에서, 투영 오브젝티브의 초기 조정을 고려한다. 초기 조정 동안, 투영 오브젝티브는, 오브젝트 평면에 수직으로, 즉 z-방향으로 마스크를 변위시킴으로써 적어도 부분적으로 정정할 수 있었던 배율 에러를 보일 수 있다. 앞서 설명한 바와 같이, 잔류 비점수차는, 애너모픽 투영 오브젝티브를 사용할 때 생성될 수 있다. 제1 시나리오에서, 파면 조작 시스템의 변형 가능한 미러를 사용하여 대응하는 비점수차를 생성하여 마스크 변위에 의해 생성된 비점수차를 적어도 부분적으로 보상할 것이다. 정정 효과를 달성하기 위해, 가상의 조작기를 생성할 수 있으며, 그러한 조작기는 본질적으로 비점수차가 없는 가상의 조작기로 고려될 수 있으며 변형 가능한 미러와 변위 가능한 마스크를 포함한다.

[0130] 일 단계는 마스크와 변형 가능한 미러의 감도를 평가 유닛에 로딩하는 단계를 포함한다. 본 출원에서, 용어, "감도"는 조작기의 설정점의 한정된 변화와, 설정점의 변화와 관련된 이미징 품질에 관한 최종 효과 사이의 관계를 기재한다. 설정점의 변화는 예컨대 액추에이터의 포지션의 변화, 즉 그 다음 단계로의 이동을 포함할 수 있으며, 마스크 변위에 의해 생성되는 비점수차를 보상하는데 유효할 수 있는 작동 움직임에 대한 프로파일을 계산한다. 이들 사전 계산을 활용하여 변형 가능한 미러와 변위 가능한 마스크를 포함한 가상의 조작기를 제공한다.

[0131] 새로운 노광 세트를 준비할 때, 새로운 마스크를 투영 노광 장치의 마스크 홀딩 디바이스에 로딩할 수 있다. 수차 측정은 그 후 파면 측정 시스템과 같은 적절한 수단에 의해 실행할 것이다. 변위 가능한 마스크와 변형 가능한 미러를 포함하는 가상의 조작기에 대한 액추에이터 움직임(또는 이동)의 대응하는 조합과 감도를 포함한 하나 이상의 조작기가 그 후 로딩될 것이다. 조작기를 포함하는 투영 오브젝티브의 전체 거동을 기재하는 모델은 그 후 다음의 루틴으로 활성화된다. 이 모델은, 액추에이터의 이동을 변경하고 대응하는 잔류 수차를 고려함으로써 최적화할 수 있다. 후속한 수차 측정이 특정 역치값 초과의 수차 값이나 특정 역치값을 보이는 경우, 변화된 파라미터를 가진 새로운 최적화 루틴을 시작할 것이다. 수차 측정이, 조작기를 변경함으로써 상당한 개선을 얻을 수 없거나 및/또는 수차 레벨이 규격 내에 있음을 보일 때 초기 조정의 끝에 도달한다. 다른 시나리오에서, 상이한 패턴 층을 다수의 노광 절차로 위아래로 인쇄(노광)해야 한다. 2개의 상이한 마스크 타입(A 및 B)이 이를 위해 사용되며, 마스크 각각의 패턴은 상이한 배율 에러를 가질 수 있다. 배율 에러는 예컨대 외부 측정에 의해 미리 결정할 수 있다. 투영 오브젝티브가 오브젝트 측 상에서 비-텔레센트릭일 경우, z-방향으로의 마스크의 변위가 (배율 에러를 보상하기 위한) 배율 조작기로서 사용될 수 있다. 애너모픽 투영 렌즈에서의 기생 비점수차를 회피하기 위해, 변형 가능한 미러와 같은 조작기의 대응하는 작동을 실행해야 한다.

[0132] 이 프로세스에서, 마스크(A)를 먼저 사용한 후 마스크 홀딩 디바이스로부터 언로딩할 수 있다. 다음 단계에서, 마스크(B)를 마스크 홀딩 디바이스에 로딩할 수 있고, 대응하는 마스크 데이터를 제어 유닛에 로딩한다. 적절한 시간에, 변위 가능한 마스크와 변형 가능한 미러를 포함하는 가상 조작기에 대한 설정점 변화의 각각의 감도와

조합을 포함하여, 조작기가 평가 유닛에 로딩된다. 조작기를 포함하는 투영 오브젝티브의 전체 거동을 기재한 모델을 그 후 다음의 루틴으로 활성화한다. 이 모델은 액추에이터의 이동을 변경하고 대응하는 잔류 수차를 고려함으로써 최적화할 수 있다.

[0133] 마스크(B)가 원하는 위치에 위치지정되고 변형 가능한 미러가 원하는 변형 상태를 가지면, 새로운 노광을 시작할 수 있다.

[0134] 변형 가능한 미러(및 가능한 다른 조작기)의 변형 상태와 마스크의 포지션에 적용되는 조정은 주사 동작 동안의 조작 경우만큼 빠를 필요는 없다. 그러나 매우 동적인 파면 조작 시스템은 주사 동작이 실행되는 시간 간격 외부에서 실행되는 조작에 사용할 수 있다.

[0135] [표 1]

표면	반경	거리 값	동작 모드
이미지 평면	무한대	352.884	
M6	-869.919	-802.884	REFL
M5	-219.761	1800.737	REFL
M4	-999.946	-434.619	REFL
M3	-1033.356	483.632	REFL
M2	2464.083	-947.116	REFL
M1	1323.688	1047.116	REFL
오브젝트 평면	무한대	0.000	

[0136]

[0137] [표 2]

계수	M6	M5	M4
K	3.303831E-03	2.041437E-02	-1.056546E-01
Y	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
X2	1.106645E+00	4.620513E+00	1.065419E+00
Y2	1.316656E+00	4.632819E+00	2.089523E+00
X2Y	-6.987016E-02	6.244905E-02	2.322141E-01
Y3	-1.544816E-01	-2.303227E-01	-2.158981E-01
X4	3.297744E-02	9.371547E-02	7.579352E-02
X2Y2	6.476911E-02	1.671737E-01	8.744751E-02
Y4	5.431530E-02	7.743085E-02	2.360575E-01
X4Y	-7.040479E-04	4.607809E-03	3.61681E-03
X2Y3	-6.159827E-03	-1.034287E-02	9.782459E-03
Y5	-4.061987E-03	-3.840440E-03	-1.297054E-01
X6	1.398226E-03	3.085471E-03	6.847894E-03
X4Y2	2.977799E-03	8.906352E-03	6.372742E-03
X2Y4	4.433992E-03	8.678073E-03	-2.569810E-02
Y6	1.255594E-03	1.683572E-03	9.106731E-02
X6Y	2.959767E-04	1.881484E-04	1.342374E-03
X4Y3	-2.320109E-04	-1.123168E-03	-5.896992E-03
X2Y5	-3.354895E-04	-5.949903E-04	1.660704E-03
Y7	8.956891E-05	-3.952323E-04	-3.764049E-02
Nradius	2.899772E+02	6.300046E+01	2.064580E+02

[0138]

계수	M3	M2	M1
K	5.744686E-01	-3.325393E+02	-1.583030E-02
Y	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
X2	3.551408E-01	3.277030E-01	-2.811984E-02
Y2	2.123536E+00	1.609563E+00	-4.135935E-01
X2Y	2.013521E-01	-6.948142E-01	-3.866470E-02
Y3	-1.210907E-02	3.694447E-01	-1.853273E-02
X4	6.478320E-02	1.389729E-01	1.349339E-03
X2Y2	7.482002E-02	1.984843E-01	3.032808E-03
Y4	8.327949E-02	-1.227576E-01	-2.824781E-03
X4Y	-2.048831E-03	-4.568931E-02	-4.300195E-04
X2Y3	-4.029059E-03	-1.713508E-02	-6.501345E-04
Y5	-1.415756E-02	5.185385E-03	3.144628E-03
X6	1.998416E-04	-1.834856E-02	6.906841E-05
X4Y2	-1.979383E-03	-3.309794E-02	5.274081E-05
X2Y4	-5.943296E-03	-5.169942E-02	-1.330272E-03
Y6	1.246118E-03	-1.603819E-01	-1.363317E-02
X6Y	1.584327E-04	7.876367E-03	-2.377257E-05
X4Y3	-3.187207E-04	-1.244804E-02	-2.251271E-04
X2Y5	-5.563691E-04	-5.746055E-02	-0.996573E-04
Y7	-1.399787E-03	-3.870909E-02	4.001012E-03
Nradius	8.132829E+01	7.472082E+01	1.311311E+02

[0139]

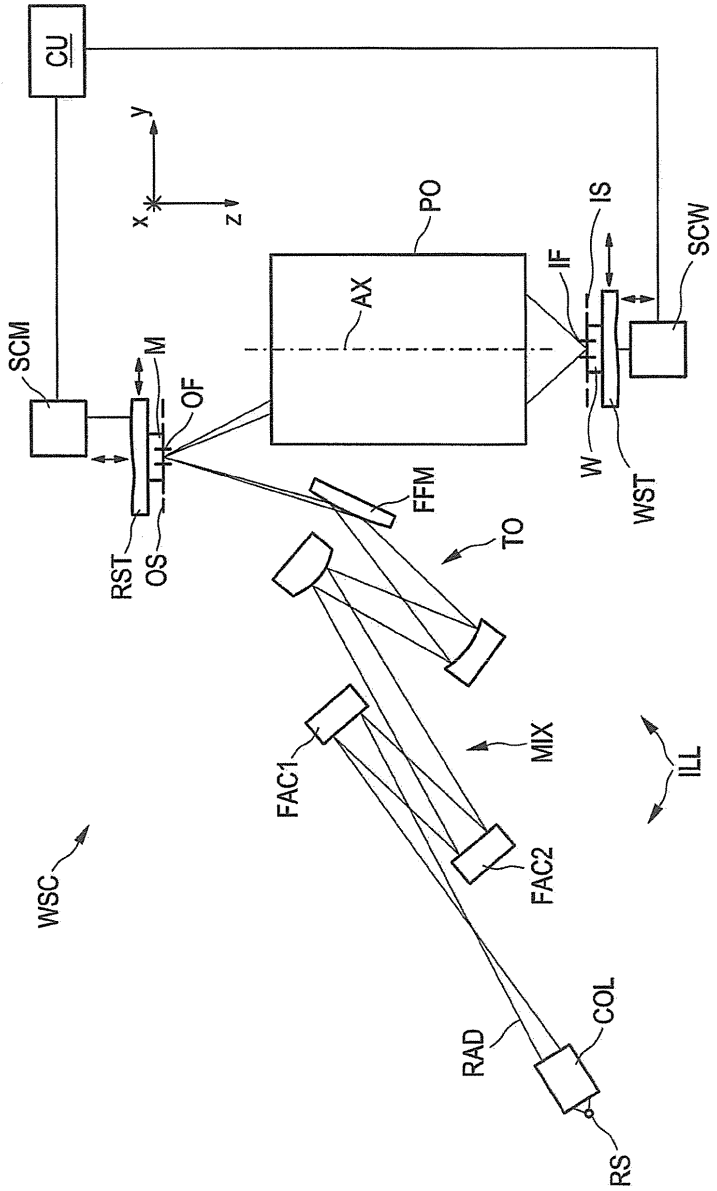
[0140] [표 3]

계수	M6	M5	M4	M3	M2	M1	이미지 평면
Y-디센터	-51.252	-99.408	123.654	215.631	528.818	512.855	0.000
X-회전	0.323	7.067	-2.444	10.483	16.940	3.488	0.000

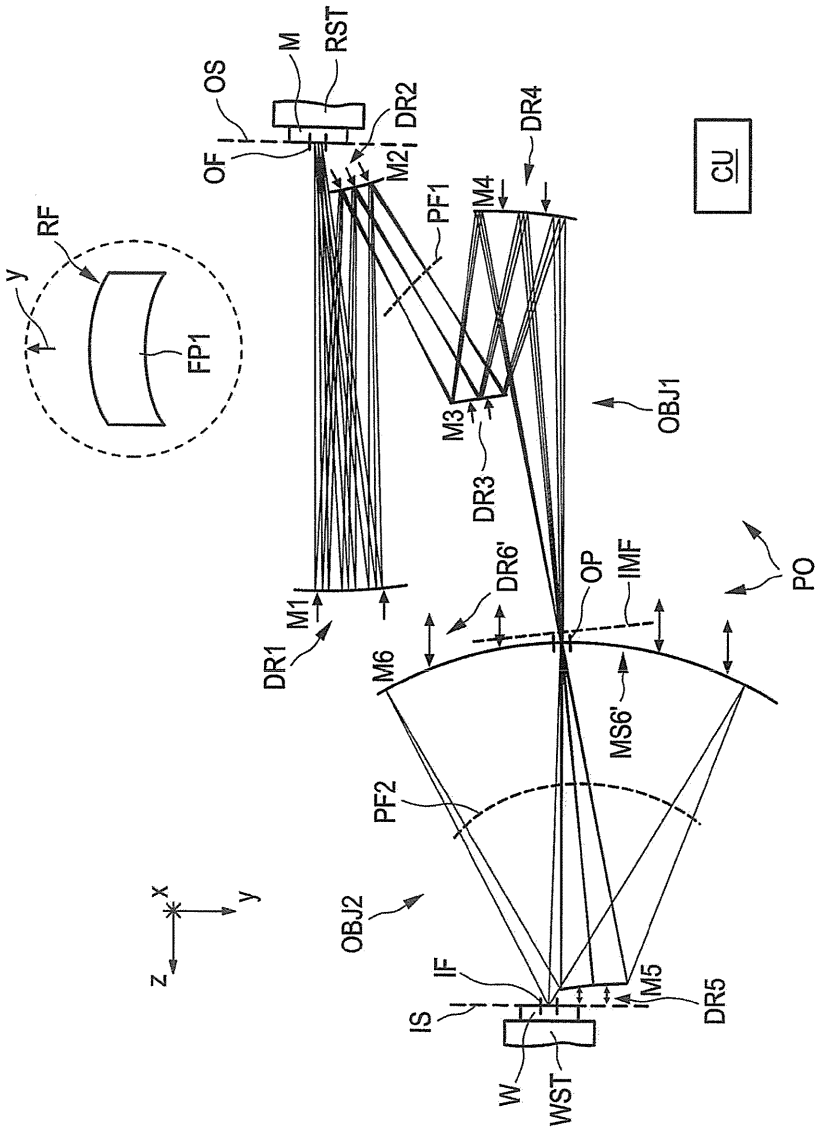
[0141]

도면

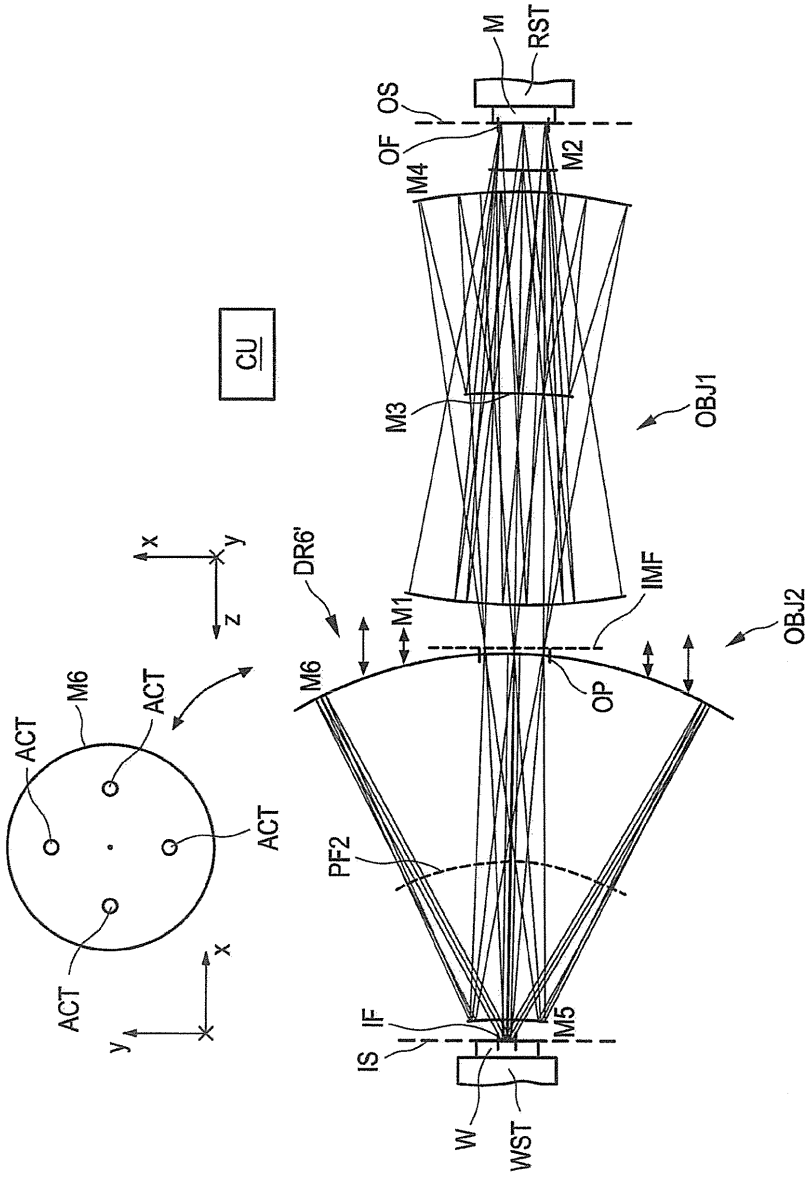
도면1


CU
y
x
z
PO
IS
SCW
IF
AX
SCM
M
OF
W
WST
FFM
RST
OS
TO
MIX
ILL
FAC1
FAC2
WSC
RAD
COL
RS

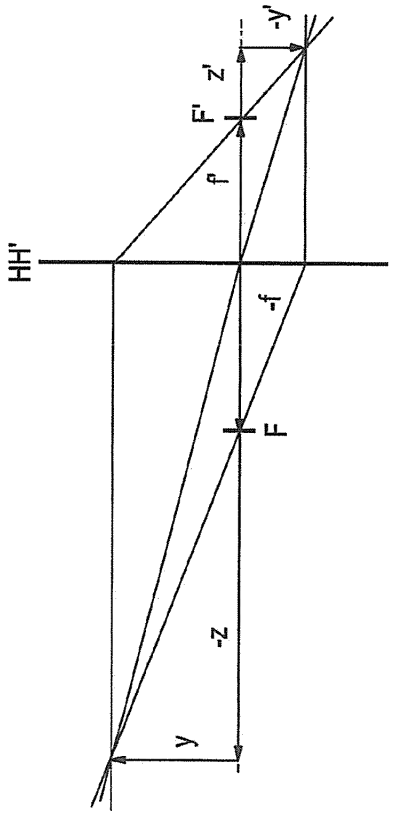
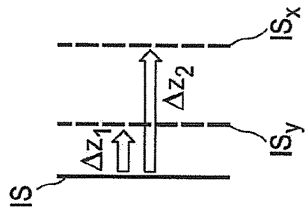
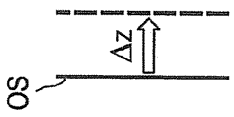
도면2


RF
y
FP1
OS
M
RST
OF
DR2
M2
PF1
M4
DR4
CU
M3
DR3
OBJ1
DR6'
OP
IMF
PO
M1
DR1
M6
MS6'
PF2
OBJ2
IF
IS
M5
DR5
W
WST
x
y
z

도면3


M
RST
OS
OF
M4
M2
CU
M3
OBJ1
x
y
z
DR6'
M1
IMF
OBJ2
M6
ACT
OP
ACT
M6
ACT
ACT
PF2
x
y
IF
IS
M5
W
WST

도면4



도면5