

Catadioptric NA 0.6 Objective Design in 193 nm with 266 nm Autofocus

Do Hee Kim¹, Seok Young Ju¹, Jun Ho Lee^{1,2†}, Hagyong Kihm^{3,4}, and Ho-Soon Yang^{3,4}

¹Department of Optical Engineering, Kongju National University, Cheonan 31080, Korea

²Institute of Application and Fusion for Light, Kongju National University, Cheonan 31080, Korea

³Advanced Instrumentation Institute, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 34113, Korea

⁴Department of Science and Measurement, University of Science and Technology, Daejeon 34113, Korea

(Received March 6, 2023; Revised March 20, 2023; Accepted March 21, 2023)

We designed a catadioptric objective lens with a 0.6 numerical aperture (NA) for semiconductor inspection at 193 nm. The objective lens meets major requirements such as a spatial resolution of 200 nm and a field of view (FOV) of 0.15 mm or more. We selected a wavelength of 266 nm for autofocus based on the availability of the light source. First, we built the objective lenses of three lens groups: a focusing lens group, a field-lens group, and an NA conversion group. In particular, the NA conversion group is a group of catadioptric lenses that convert the numerical aperture of the beam focused by the prior groups to the required value, i.e., 0.6. The last design comprises 11 optical elements with root-mean-squared (RMS) wavefront aberrations less than $\lambda/80$ over the entire field of view. We also achieved the athermalization of the objective lens with focus-shift alone satisfying the performance of RMS wavefront aberration below $\lambda/30$ at a temperature range of 20 ± 1.2 °C.

Keywords: Catadioptric, Dual wavelengths, Objective lens, Numerical aperture, Semiconductor inspection

OCIS codes: (150.3040) Industrial inspection; (220.1000) Aberration compensation; (220.3620) Lens system design

이중 파장 심자외선 카타디옵트릭 NA 0.6 대물렌즈 광학 설계

김도희¹ · 주석영¹ · 이준호^{1,2†} · 김학용^{3,4} · 양호순^{3,4}

¹공주대학교 광공학과

☎ 31080 충청남도 천안시 서북구 천안대로 1223-24

²공주대학교 광융합응용기술연구소

☎ 31080 충청남도 천안시 서북구 천안대로 1223-24

³한국표준과학연구원 첨단측정장비연구소 우주광학팀

☎ 34113 대전광역시 유성구 가정로 267

⁴과학기술연합대학원대학교 정밀측정과

☎ 34113 대전광역시 유성구 대덕대로989번길 111

(2023년 3월 6일 받음, 2023년 3월 20일 수정본 받음, 2023년 3월 21일 게재 확정)

193 nm에서 반도체 전공정 검사 장치에 적용될 수 있는 반사 굴절 혼합 형식(카타디옵트릭)의 수치 구경(numerical aperture, NA) 0.6 대물렌즈를 설계하였다. 200 nm 공간 분해능 및 0.15 mm 이상의 시야를 확보하기 위하여, 먼저 렌즈 전체 배치를 포커싱 렌즈 그룹, 필드 렌즈 그룹 및 NA 변환 그룹으로 구성하였으며, 선행 그룹에 포커싱된 빔의 수치 구경 값을 필요 값, 즉 0.6으로 변환하는 기능을 수행한다. 총

†Corresponding author: jhlsat@kongju.ac.kr, ORCID: 0000-0002-4075-3504

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

11개의 광학 소자로 구성된 최종 설계는 모든 관측 시야에 대하여 $\lambda/80$ 이하의 RMS 파면 수차를 만족하였다. 또한 고분해능 대물렌즈의 높은 환경 민감도로 인한 온도 변화에 따른 광학계 성능 해석 결과, ± 0.1 °C의 온도 변화에서도 목표 성능 이하로의 성능 저하가 확인되어 온도 변화에 따른 광학 보상이 반드시 필요하였다. 이에 초점면 이동을 보상자로 적용할 경우, 20 ± 1.2 °C까지 RMS 파면 수차 변화량이 $\lambda/30$ 이하로 목표 성능을 만족하여 실제 반도체 공정 환경에서도 이용이 가능함을 확인하였다.

Keywords: 카타디옵트릭, 이중 파장, 대물렌즈, 개구수, 반도체 검사

OCIS codes: (150.3040) Industrial inspection; (220.1000) Aberration compensation; (220.3620) Lens system design

I. 서 론

현재 세계 시장에서 고분해능 대물렌즈에 대한 수요가 계속 해서 높아지고 있다. 대표적으로 반도체 웨이퍼의 패턴 결함을 검사하는 검사 장비용 대물렌즈의 경우, 반도체 공정 과정에서 웨이퍼에 많은 불량 발생하기 때문에 그중 높은 확률로 나타나는 패턴 결함을 검출하기 위한 검사 공정이 필수적이기 때문이다. 이러한 공정에서는 많은 검사/계측 기법을 이용한다^[1,2]. 이때 대물렌즈는 항상 중요한 구성 요소이며, 그 외에도 리소그래피 공정, 환경 모니터링, 플라즈마 진단 및 형광 현미경 등 매우 많은 분야에서 고분해능 대물렌즈를 필요로 한다. 그러나 국내에서는 고분해능을 위한 자외선 파장 대역의 높은 수치 구경(numerical aperture, NA)을 갖는 대물렌즈에 대한 개발 경험이 없어 수입에 의존하고 있다. 따라서 고분해능 대물렌즈 제작의 국내 원천 기술 개발을 위해 대물렌즈 설계 연구가 필요하며, 본 연구를 통해 200 nm 공간 분해능 및 0.15 mm 이상의 시야(field of view, FOV)를 갖는 대물렌즈의 설계를 목표로 선정하였다.

대물 렌즈의 공간 분해능은 회절에 의하여 한계가 정해지며, 이 때 한계값(R)은 사용 파장(λ)과 수치 구경에 의하여 식 1과 같이 결정된다^[3].

$$R = 0.61 \times \frac{\lambda}{NA}. \quad (1)$$

반도체 공정에서 사용되는 심자외선(deep ultraviolet, DUV) 주요 파장에서의 회절 한계 공간 분해능을 표 1에 정리하여 놓았다. 대물렌즈의 수치 구경이 높아질수록 더 작은 회절 공간 분해능을 얻을 수 있지만, 필요 광학 요소 증가와 각면의 민감도 증가에 따른 설계 및 제작/조립의 난이도가 증가

Table 1. Diffraction-limited spatial resolutions of high-numerical-aperture (NA) objective lens at deep ultraviolet (DUV) wavelengths

Wavelength (nm)	NA	Spatial Resolution (nm)
266	0.6	270.4
266	0.8	202.8
193	0.6	196.2
193	0.8	147.2
157	0.6	159.6
157	0.8	119.7

하게 된다. 또한, 사용 파장이 짧아질수록 높은 공간 분해능을 얻을 수 있지만, 적용 가능 매질이 급격하게 제한되어 설계 및 수차 제어의 어려움 또한 증가하게 된다.

그림 1은 심자외선 파장대역 렌즈에 사용되는 칼슘 플로라이드(calcium fluoride, CaF_2)의 파장 변화에 따른 굴절률의 변화를 보여주고 있다^[4]. 이 그림에서 보이듯 칼슘 플로라이드의 굴절률은 심자외선 대역에서 급격한 변화를 보이고 있으며, 이러한 급격한 굴절률의 변화로 인해 적용 파장 대역 및 오토-포커스 파장의 선택에 상당한 제약이 발생한다^[5]. 이러한 파장 대역의 제약과 광원(레이저)의 가용성을 동시에 고려하여, 266 nm를 오토-포커스 파장으로 선택하였다.

일반적으로 대물렌즈는 반사형, 굴절형(refractive) 및 반사 굴절 혼합형(카타디옵트릭, catadioptric)이 있다. 먼저, 반사형은 거울 반사의 물색성(achromatism)을 고려하면 심자외선 대역은 물론 극자외선(extreme ultraviolet, EUV) 대역에서도 사용이 적합하나, 좁은 관측 시야 및 중앙 차폐에 따른 성능 저하 등으로 인해 반도체 검사 대물렌즈로는 매우 제한적으로 사용되고 있다. 굴절형 및 카타디옵트릭 방식은 반도체 검사용 대물렌즈로 널리 사용된다^[6-13]. 다만, 그림 2에서 보여지듯 200 nm 이하 파장 대역에서는 높은 수치 구경, 제작 및 조립의 난이도, 한정된 가용 렌즈 재질 등으로 인해 카타디옵트릭 방식을 적용한다. 따라서, 본 논문 설계 대물렌즈 타입으로 카타디옵트릭을 선택하였다.

마지막으로 심자외선 대물렌즈에 적용되는 광학 소자의 온

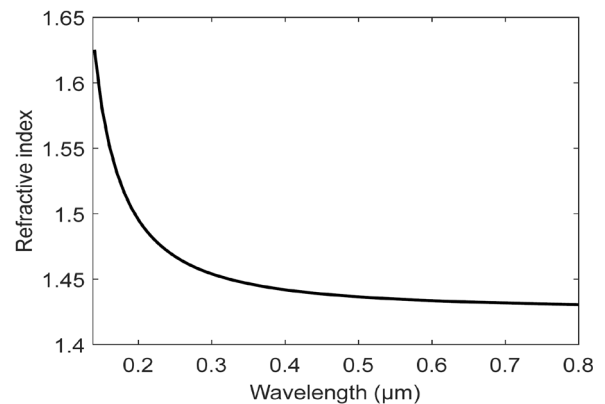


Fig. 1. Chromatic variation of the refractive index of calcium fluoride (CaF_2) over the wavelength range of 0.1–0.8 μm .

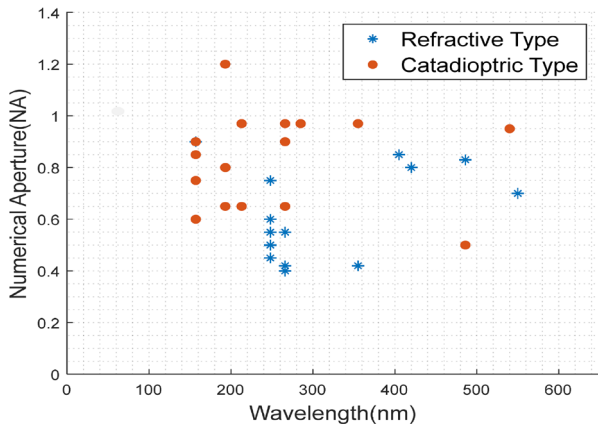


Fig. 2. Numerical apertures vs. design wavelengths of 30 publically reported objective lenses.

도 변화에 따른 굴절률의 변화가 매우 커, 심자외선 대물렌즈는 환경온도 변화에 따라 급격한 성능 저하를 보인다^[14]. 반도체 검사 장비를 이용하는 클린룸의 경우 이러한 광학계의 민감도를 고려하여 20-24 °C 범위 내에 있는 기준 온도에서 항온습습기 등의 방법을 이용하여 ±0.1-1 °C로 정밀하게 온도 및 주변 환경을 제어한다^[15,16]. 따라서 심자외선 대물렌즈의 설계 시 온도 변화에 따른 대물렌즈의 성능 변화 예측 및 비열화(athermalization) 설계가 요구된다.

따라서 본 논문에서는 선정된 사양 및 카타디옵트릭 설계 타입에 대하여, 수치 구경 0.6 심자외선 대물렌즈 설계를 보고한다. 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서 설계 사양을 제시하며, 제3장에서 선정된 사양을 토대로 진행된 설계를 보여준다. 그리고 제4장에서 온도 민감도 분석과 비열화에 대해 보고하고, 마지막으로 제5장에서 결론 및 맺음말을 전한다.

II. 설계 사양 선정

선정된 설계 타입의 기존 특허 및 논문 등의 문헌 조사를 통해 반사 굴절 형식 대물렌즈 설계 데이터를 획득하였고, 수집된 데이터를 토대로 설계 타입에 대한 분석을 진행하였다. 우선, 수집된 데이터의 레이아웃을 통해 반사 굴절 형식의 대물렌즈가 그림 3과 같이 포커싱 렌즈 그룹과 필드 렌즈 그룹, 반사 굴절 그룹(NA 변환 그룹)을 갖는 것을 확인하였다^[17]. 광학계로 들어온 빛은 포커싱 렌즈 그룹을 지나 필드 렌즈 그룹 근처에서 내부 이미지를 형성한 후, 반사 굴절 그룹을 통해 특정 수치 구경을 갖는 초점을 맺게 된다.

수집된 설계 데이터를 토대로 포커싱 렌즈 그룹과 필드 렌즈 그룹에 이용되는 렌즈의 매수를 분류하였다. 분류 결과, 그림 4와 같이 포커싱 렌즈 그룹의 경우 6매와 7매를 이용한 설계 데이터가 가장 많았으며, 필드 렌즈 그룹에는 1매를 이용한 설계 데이터가 가장 많았다. 따라서 기초 설계 사양으로 포커싱 그룹의 렌즈 매수를 7매, 필드 렌즈 그룹의 렌즈 매수

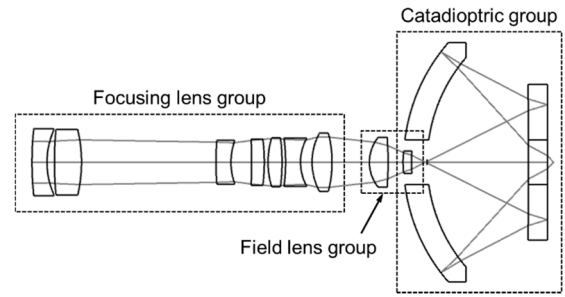


Fig. 3. Schematic diagram of a typical catadioptric objective lens comprising three functional groups: a focusing lens group, a field lens group and a catadioptric group.

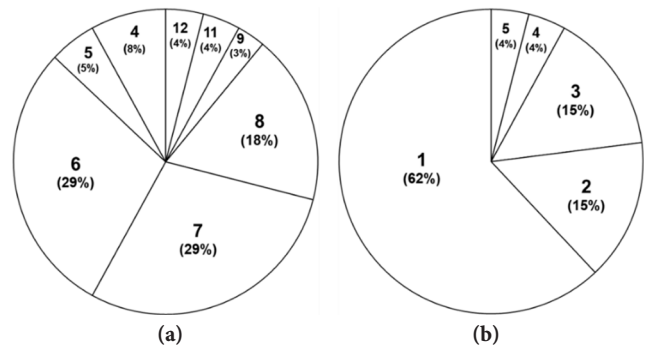


Fig. 4. Numbers of optical elements of (a) focusing lens and (b) field lens groups from publically available lens data.

를 1매로 선정하였다. 하지만 수집된 설계 데이터의 대부분이 200 nm 이상의 파장을 설계 파장으로 이용하였기 때문에 실질적으로 193 nm에서는 수차를 보정하기 위해 렌즈 매수를 추가할 필요가 있을 것으로 예상하였다.

다음으로 설계 데이터 중 대표 특허 3개를 선정하여 광학계 후반부를 이루는 반사 굴절 그룹의 구성을 분류하였다. 그림 5(a)의 경우, 단일 반사 요소와 반사 굴절 요소가 합쳐져 두 번의 색수차 보정과 한 번의 구면/코마수차 보정이 발생한다^[18]. 그림 5(b)의 경우, 두 개의 반사 굴절 요소로 두 번의 색수차 보정과 두 번의 구면/코마수차 보정이 발생한다^[19]. 마지막으로 그림 5(c)의 경우, 단일 반사 요소와 반사 굴절 요소, 그리고 가운데에 수차 보정 렌즈를 추가하여 두 번의 색수차 보정과 두 번의 구면/코마수차 보정이 발생한다^[20]. 따라서 현재 설계가 두 개의 파장을 이용하며 민감도가 높은 것을 고려하여, 두 개의 광학 요소로 색수차와 구면/코마수차를 보다 잘 보정할 수 있는 그림 5(b) 구성의 반사 굴절 그룹을 채택하였다.

설계 데이터 분석을 통해 최종적으로 선정된 설계 사양은 표 2와 같다. 앞서 선정된 사양 외에 초점거리, 배율, 전장길이(total track length, TTL) 등을 추가로 선정하였다. 보편적인 현미경 및 반도체 검사장비의 튜브렌즈의 초점거리가 200 mm이고, 실제 상용화되어 있는 수치 구경 0.6의 대

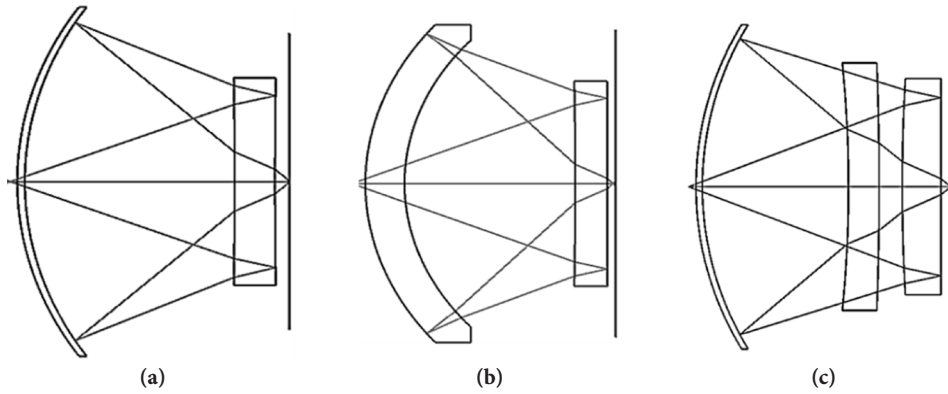


Fig. 5. Three representative types of catadioptric group (NA-conversion) for high NA DUV objective lenses. NA, numerical aperture; DUV, deep ultra violet.

Table 2. Design specifications for the high-numerical-aperture deep ultra violet (NA DUV) objective lens for semiconductor inspection

Classification	Requirement Specification
Design Type	Catadioptric
NA	0.6
Wavelength (nm)	193
Auto-focus Wavelength (nm)	266
Effective Focal Length (mm)	4
Magnification	50×
Full Field of View (mm)	>0.15
Total Track Length (mm)	95
Design Root-mean-squared Wavefront Aberration	<0.05λ

물렌즈의 배율이 50×가 가장 많은 것을 고려하여 무한 결상 (infinite conjugate)이며 초점거리가 4 mm인 것을 설계 사양으로 지정하였다. 전장길이가 마찬가지로 일반적으로 비슷한 사양을 갖는 기성품 대물렌즈가 95 mm인 것을 고려하였으며, 전체 시야(full field of view, FFOV)는 0.15 mm 이상으로 선정하였다. 마지막으로 높은 성능의 대물렌즈 설계를 위해 목표 성능은 회절 한계 기준으로 제품 평균 제곱근(root mean square, RMS) 파면 수차 $\lambda/20$ 이하로 선정하였다.

III. 설 계

3.1. 기초 설계

앞서 선정된 설계 타입과 목표 사양에 맞춰 공개된 문헌 데이터 중, 가장 근접한 문헌을 설계의 초기 모델로 선정하였다^[17]. 우선 해당 특허에서 266 nm였던 설계 파장을 193 nm로 변경하였고, 광 경로의 꺾임이 심하고 렌즈의 파워가 균일하지 않은 것을 고려하여 성능을 보완할 수 있도록 기초 설계를 진행하였다. 기초 설계의 레이아웃은 그림 6에 나타나 있다. 초기 모델과 마찬가지로 후반부에 2개의 만진 거울을 배치하였고, 앞부분에 8개의 렌즈를 배치하였다. 이에 따라 파장 193 nm

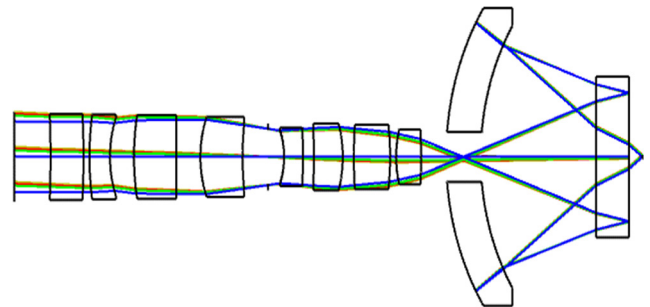


Fig. 6. Initial design layout of the numerical aperture 0.6 objective lens for 193 nm imaging only.

에서 앞서 선정된 수치 구경과 초점거리를 만족할 수 있었고, 초기 모델의 FOV인 0.15 mm보다 더 큰 0.32 mm의 FOV 까지 목표 성능을 만족하였다. 다만 아직 오토-포커스 파장인 266 nm에서 목표 성능을 만족할 수 없었고, 초기 모델 자체의 전장길이가 짧아 기초 설계에서도 95 mm에 도달하지 못하였다. 따라서 전장길이를 증가시키고, 오토-포커스 파장을 추가한 이후에 선정된 사양 내에서 목표 성능을 만족할 수 있도록 보완 설계를 진행해야 함을 확인하였다.

3.2. 최적화 설계

앞서 시행한 기초 설계를 토대로 목표 설계 사양 및 성능에 맞춰 추가 보완 설계를 진행하였다. 우선 오토-포커스 파장인 266 nm의 파장을 추가하였다. 또한, 동축 방식의 오토-포커스 기능을 고려하여 266 nm의 파장에서의 설계 및 성능 확인은 중심 시야(OF)에서만 진행하였다. 그리고 파장의 추가로 인해 발생하는 색수차를 제어하기 위해 갈슘 플로라이드 매질을 추가하여 용융 실리카 매질, 칼슘 플로라이드 매질을 각각 5개의 광학 요소에 배치하였으며, 이때 실제 제품을 제작할 때 갈슘 플로라이드 매질의 가공이 어려운 점을 고려하여 직경이 크고 광학계의 파워가 집중되어 있는 반사 굴절 그룹에는 배치하지 않았다. 그리고 전장길이 95 mm를 만족할 수 있도록

제한조건을 추가하여 설계 최적화를 진행하였다. 추가적으로 진행된 보완 설계의 레이아웃은 그림 7과 같다.

최적화 결과 기초 설계와 동일한 렌즈 매수로 주 설계 파장인 193 nm에서 앞서 만족한 FOV, 초점거리 등의 사양을 만족하였고, 266 nm 파장에서의 중심 시야에서 목표 성능인 RMS 파면 수차 0.05λ 이하를 만족하였다. 하지만 193 nm 파장의 스팟 다이어그램에서 최외곽 시야의 스팟 반경이 회절 반경의 2배에 가깝게 큰 것을 확인하여, 추가적으로 성능을 높이기 위한 최적화 설계를 진행하였다.

우선, 성능 보완과 각 렌즈의 민감도를 줄이기 위해 렌즈 1매를 추가하였고, 렌즈 직경 대비 두께가 큰 렌즈의 두께를 제한조건을 이용하여 조절하였다. 최종적으로 최적화 설계가 완

료된 광학계의 레이아웃과 성능은 그림 8 및 9에 나타나 있다. 기초 설계와 비교하였을 때 오토-포커스 파장인 266 nm를 추가하였으며, 동일하게 설정된 193 nm의 설계 파장과 초점거리 대비 더 큰 화각에서도 목표 성능을 만족하여 50× 배율일 때 검출기 기준 25 mm 이미지 서클까지 이용이 가능함을 확인하였다. 최종적으로 11매의 광학요소로 95 mm의 전장 거리와 0.0124λ의 목표 성능을 만족하였다. 표 3을 통해 각 설계의 사양 및 최종 설계가 266 nm의 오토-포커스 파장에서도 0F에서 목표 성능을 만족한 것을 확인할 수 있다. 266 nm의 오토-포커스 경로의 수차 구경은 193 nm 이미징 경로의 설계 값과 약간의 차이가 있으나, 반도체 검사 목적으로는 큰 영향이 없어 본 설계 목적 범위 내에 있다.

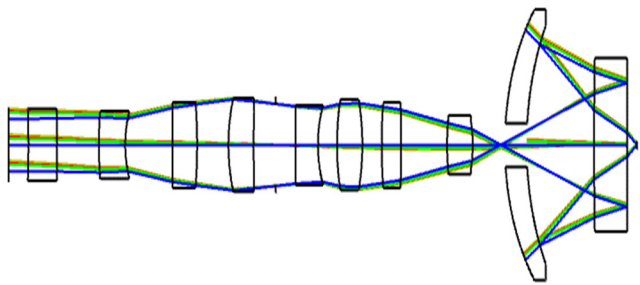


Fig. 7. Initial design layout of the numerical aperture 0.6 objective lens for 193 nm imaging with 266 nm autofocus.

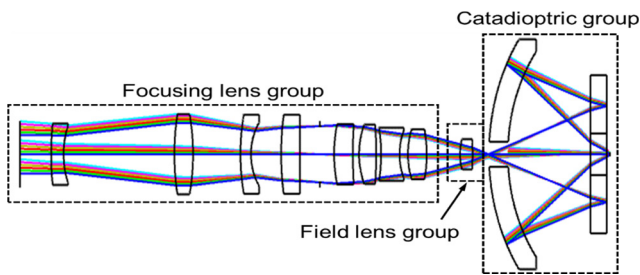


Fig. 8. Optimized design layout of the numerical aperture 0.6 objective lens for 193 nm imaging with 266 nm autofocus.

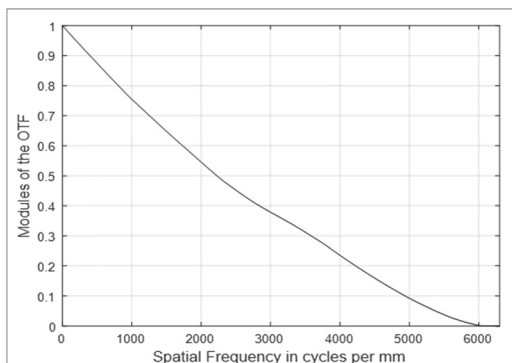
IV. 온도 민감도 분석

4.1. 온도 민감도 분석

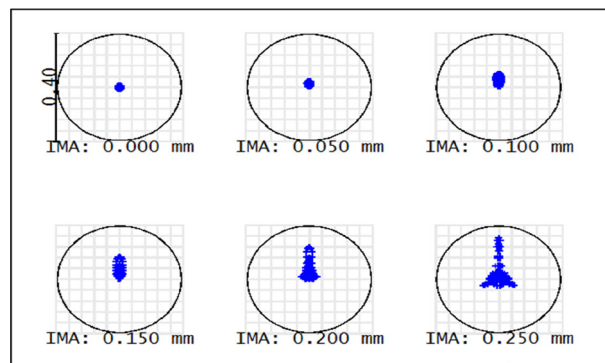
마지막으로 설계의 RMS 파면수차(wavefront aberration, WFE)와 추가 저하 요인을 고려하여 최종적으로 목표 성능인 $\lambda/20$ 를 만족시킬 수 있도록 RMS WFE budget을 표 4와 같

Table 3. Design results of the numerical aperture (NA) 0.6 objective lens for 193 nm imaging with 266 nm autofocus

Classification	Imaging Path	Auto-focus Path
NA	0.6	0.59
Wavelength (nm)	193	266
Effective Focal Length (mm)	4	4
Magnification	50×	50×
Full Field of View (mm)	0.5	0
Total Track Length (mm)	95	95
Root-mean-squared Wavefront Aberration	0.0024λ at Zero Field (0F) 0.0124λ at One Margin (1F)	0.0005λ at Zero Field (0F)



(a)



(b)

Fig. 9. Design performances of the optimized objective design: (a) modulation transfer function graph and (b) spot diagram.

이 작성하였다. 광학계 설계 자체의 성능(RMS WFE)과 저하 요인으로 인한 성능 저하(RMS WFE 변화량)를 제곱 합계 제곱근(root sum square, RSS)으로 계산하여 최종 대물렌즈의 RMS WFE를 추정하였다. 대물렌즈의 저하 요인은 크게 제작/조립 공차에 의한 성능 저하와 온도 변화에 의한 성능 저하로 분류할 수 있다. 이때 특히 단파장의 경우 매질의 제한이 있고 온도 변화에 따른 매질의 변화 또한 크기 때문에 제작/조립 공차를 모두 포함한 성능 저하와 온도 변화에 의한 성능 저하를 동일하게 $\lambda/30$ 로 제한하였다. 따라서 본 논문에서는 더 민감도가 클 것으로 예상되는 온도 변화에 따른 광학계의 성능 변화를 확인하기 위해 온도 민감도 분석을 진행하였다.

우선 광학계는 온도에 따라 매질의 열팽창 계수에 의해 렌즈의 곡률, 두께 등이 변하고, dn/dT 값에 의해 매질의 굴절률에 변화가 생겨 광학계 성능도 변하게 된다^[21]. 온도에 따른 굴절률의 변화는 식 2를 따르며, 설계에 이용된 칼슘 플로라이드와 용융 실리카 매질의 온도에 따른 굴절률 변화는 그림 10과 같다.

$$\Delta n_{\text{abs}}(\lambda, T) = \frac{n^2(\lambda, T_0) - 1}{2n(\lambda, T_0)} (D_0 \cdot \Delta T + D_1 \cdot \Delta T^2 + D_2 \cdot \Delta T^3 + \frac{E_0 \Delta T + E_1 \Delta T^2}{\lambda^2 - \lambda_{TK}^2}) \quad (2)$$

여기서, T_0 는 기준온도로 20 °C가 적용되었고, ΔT 는 기준온도로부터의 온도 변화를 의미한다. D_0, D_1, D_2, E_1, E_2 및 λ_{TK} 는 렌즈 재료의 열광학(thermo-optic) 특성을 나타내는 인자들

Table 4. Wavefront error budget at the edge of the field (1F)

Design	Temperature Change	Manufacture/ Assembly	Total
$\lambda/80 (=0.0125\lambda)$	$\lambda/30 (=0.033\lambda)$	$\lambda/30 (=0.033\lambda)$	$\lambda/20 (=0.048\lambda)$

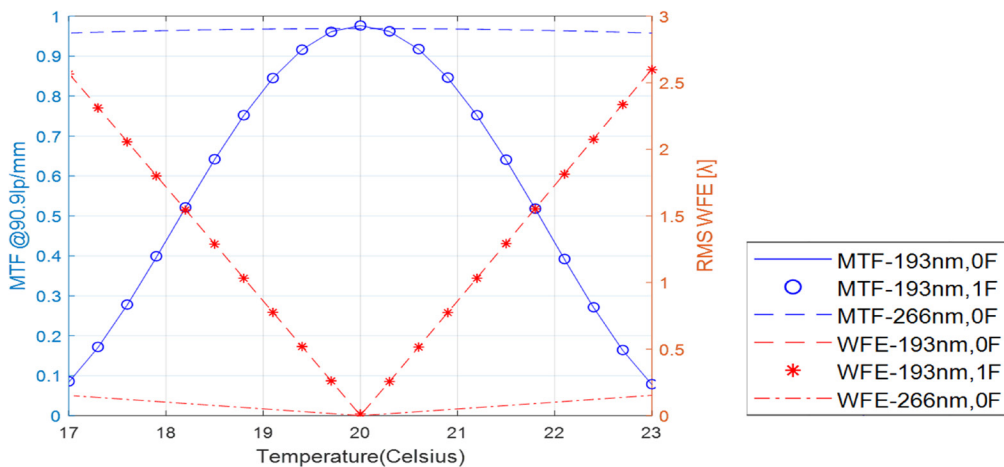


Fig. 11. Thermal variations of the modulation transfer function (MTF) and root-mean-squared wavefront aberration (RMS WFE) of the optimized objective design with no active compensation.

이다.

그림 10의 그래프를 통해 온도 변화에 따른 매질의 굴절률 변동이 큰 것을 확인하였고, 해당 수치와 앞서 선정한 RMS WFE 값을 고려하여 온도 민감도 분석을 진행하였다. 설계의 기준 온도는 반도체 공정 환경 온도를 고려하여 20 °C로 설정하였고, 온도 변화에 따른 광학계의 변조전달함수(modulation transfer function, MTF), RMS 파면 수차의 변화는 그림 11과 같이 나타났다. 설계의 MTF는 관측 파장인 193 nm에서 중심(0F)과 최외곽시야(1F) 모두 5.5 μm 센서 기준 Nyquist 주파수인 90.9 lp/mm에서 설계치인 97.6%에서 온도가 변화함에 따라 가우시안 분포로 감소하였고, RMS 파면 수차의 경우 설계치에서 온도의 변화에 따라 선형적으로 감소되는 것을 확인하였다. 266 nm 파장에서는 두 성능 모두 변동이 비교적 적은 것을 확인하였다.

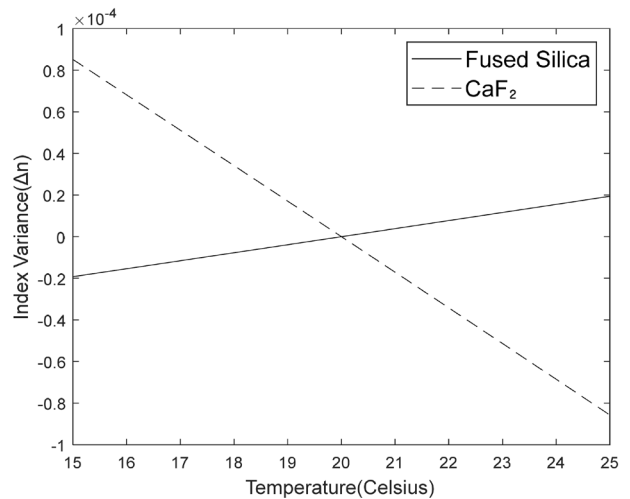


Fig. 10. Refractive index changes of calcium fluoride and fused silica material according to temperature.

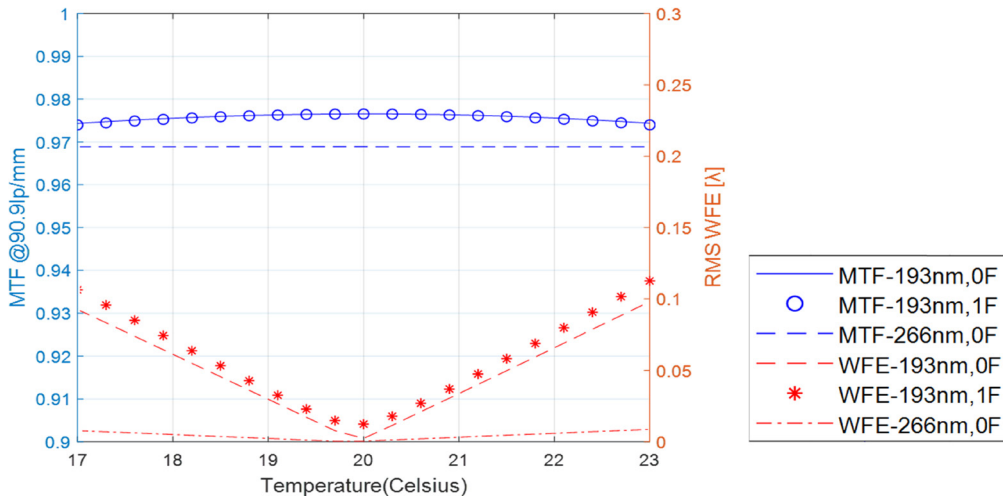


Fig. 12. Thermal variations of the modulation transfer function (MTF) and root-mean-squared wavefront aberration (RMS WFE) of the optimized objective design with auto-focus compensation.

4.2. 비열화 설계

온도 민감도 분석을 통해 현재 광학계가 ±0.1 °C의 온도 변화에서도 RMS 파면 수차와 MTF 모두 목표 성능을 만족하지 못하는 것을 확인하였고, 이는 설계된 광학계의 온도 민감도가 매우 높음을 의미한다. 따라서 이러한 광학계의 성능 저하를 보정하기 위해 보상자를 이용해야 한다. 우선, 본 논문에서는 실제 대물렌즈를 상용품으로 이용할 때 적용시킬 수 있도록 마지막 면의 거리인 초점면 이동을 보상자로 선정하였고, 보상자를 작동시켰을 때 각 온도별 성능 변화를 추가로 확인하였다.

확인 결과, 보상자(best focus)를 ±7.2 μm 이내로 작동함으로써 ±1.2 °C까지 수차가 보정되는 것을 확인하였다. 이때의 성능은 두 파장에서 모두 MTF가 90.9 lp/mm에서 ±3 °C의 온도 변화가 발생하는 동안 회절 한계에서 0.3% 이내의 차이가 발생하는 것을 확인하였고, RMS 파면 수차의 경우 ±1.2 °C까지 성능 변화량이 λ/30 이하인 것을 확인하였다. 최종적으로 수차가 보정된 온도별 MTF, RMS 파면 수차 그래프를 그림 12에 나타내었다. ±1.2 °C의 온도 내에서는 초점면 이동만으로도 목표 성능을 만족할 수 있기 때문에, ±0.1-1 °C로 정밀하게 온도가 제어되는 반도체 공정 실험실에서 이용이 가능함을 확인할 수 있었다.

파장인 266 nm의 두 자외선 파장에서 이용이 가능하며, 수치구경 0.6을 만족시키는 것을 설계 목표로 삼았다. 현재까지의 대물렌즈 설계에 관한 문헌 분석을 통해 설계 타입 및 사양을 선정하여, 초기 모델을 토대로 본 연구의 목표에 맞는 기초 및 최적화 설계를 진행하였다. 최종적으로 11개의 광학 요소를 이용하여 193 nm의 설계 파장과 266 nm의 오토-포커스 파장에서 RMS 파면 수차 0.0124λ (1F)를 만족하였으며, MTF 또한 모든 공간 주파수에서 회절 한계 0.4% 미만의 차이로 설계 목표 성능을 달성하였다. 또한 설계된 광학계가 실제로 이용될 때 주변 환경 변화에 대한 성능 변화를 예측하기 위해 온도 민감도 분석을 진행하여 본 설계가 ±0.1 °C의 온도 변화에도 영향을 받을 만큼 민감도가 높은 것을 확인하였다. 이는 보상자인 초점면 이동을 ±7.2 μm 이내로 작동시킴으로써 ±1.2 °C까지 목표 성능 이내로 수차를 보정하여, 정밀하게 온도가 제어되는 실제 반도체 공정 실험실에서 이용이 가능함을 확인하였다. 본 연구를 통해 향후 더 높은 분해능의 대물렌즈 설계 연구를 수행할 수 있을 것으로 보이며, 검사 장비뿐만 아니라 반도체 검사에 이용되는 여러 검사 기법에도 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

재정지원

이 논문은 과학기술정보통신부 재원으로 한국연구재단-나노·소재기술개발사업(2021M3H4A3A01055840, “초정밀 고분해능 자외선 광학결정 렌즈 원천기술 개발”) 및 산업통상자원부 재원으로 한국산업기술평가관리원(No. 1415177869, “patterned wafer의 초미세 불량 분석 검출 장비 개발”)의 지원을 받아 수행된 연구임.

V. 결 론

세계 시장에서 반도체 검사장비를 위한 고분해능 대물렌즈에 대해 관심이 높은 반면, 국내에서는 개발 경험이 부족함을 인지하고, 국내 원천 기술 개발을 위한 고분해능 대물렌즈 설계 연구를 진행하였다. 200 nm의 공간 분해능을 확보하기 위하여 관측 파장인 193 nm와 수차 보정을 위한 오토-포커스

이해상충

저자는 본 논문과 관련된 어떠한 이해충돌 사항도 없었음을 밝힌다.

데이터 가용성

본 연구의 결과 분석 및 생성된 데이터에 접근하거나 사용하고자 하는 이는 저자에게 타당한 이유를 밝히고 허가를 득해 사용 가능하다.

References

1. J. Y. Joo, J. H. Lee, W. H. Jang, and Y. W. Lim, "Defect height estimation via model-less TSOM under optical resolution," *Opt. Express* **29**, 27508-27520 (2021).
2. J. H. Lee, J. Y. Joo, J. B. Lee, J. W. Park, J. Jeong, and O.-H. Kwon, "Through-focus optical scanning microscopy for embedded defect detection and classification," in *Proc. 2022 IEEE 24th Electronics Packaging Technology Conference -EPTC* (Singapore, Dec. 7-9, 2022), pp. 23-25.
3. A. Yen, "Rayleigh or Abbe? Origin and naming of the resolution formula of microlithography," *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS* **19**, 04501 (2020).
4. M. Daimon and A. Masumura, "High-accuracy measurements of the refractive index and its temperature coefficient of calcium fluoride in a wide wavelength range from 138 to 2,326 nm," *Appl. Opt.* **41**, 5275-5281 (2002).
5. Y. Minami, M. C. Raduban, K. Kuroda, K. Shinohara, Y. Lai, K. Yamanoi, N. Sarukura, T. Shimizu, R. Ishii, Y. Kawakami, N. Kabasawa, T. Amano, K. Kiyohara, and M. Kiyohara, "Achromatic deep ultraviolet lens using novel optical materials," *Phys. Status Solidi B* **257**, 1900480 (2020).
6. W. Vollrath, "Ultra-high-resolution DUV microscope optics for semiconductor applications," *Proc. SPIE* **5865**, 117-125 (2005).
7. W. Ulrich, H.-J. Rostalski, and R. M. Hudyma, "The development of dioptric projection lenses for DUV lithography," *Proc. SPIE* **4832**, 158-169 (2002).
8. T. Sure, T. Bauer, J. Heil, and J. Wesner, "DUV-Microscope objectives: technology driver that forces the production to switch from the micrometer scale to the nanometer scale," *Proc. SPIE* **5965**, 59651H (2005).
9. T. Ishiyama and K. Yamaguchi, "High NA projection lens designs for exposure tools," *Proc. SPIE* **4832**, 175-180 (2002).
10. J. E. Webb, "Using multi-function components to solve optical design challenges for DUV microlithographic applications," *Proc. SPIE* **5874**, 587401 (2005).
11. T. Matsuyama, Y. Ohmura, Y. Fujishima, and T. Koyama, "Catadioptric projection lens for 1.3 NA scanner," *Proc. SPIE* **6520**, 652021 (2007).
12. Z. Cao, Y. Li, and S. Mao, "Grouping design method of catadioptric projection objective for deep ultraviolet lithography," *Opt. Eng.* **56**, 025102 (2017).
13. J. E. Webb, J. Bentley, P. F. Michaloski, A. R. Phillips, and T. Tienvieri, "Optical design forms for DUV and VUV microlithographic processes," *Proc. SPIE* **4346**, 566-576 (2001).
14. T. Sure, J. Heil, and J. Wesner, "Microscope objective production: On the way from the micrometer scale to the nanometer scale," *Proc. SPIE* **5180**, 283-292 (2003).
15. K.-M. Choi, J.-E. Lee, K.-Y. Cho, K.-S. Kim, and S.-H. Cho, "Clean room structure, air conditioning and contamination control systems in the semiconductor fabrication process," *J. Korean Soc. Occup. Environ. Hyg.* **25**, 202-210 (2015).
16. J. Yin, X. Liu, B. Guan, Z. Ma, and T. Zhang, "Performance analysis and energy saving potential of air conditioning system in semiconductor cleanrooms," *J. Build. Eng.* **37**, 102158 (2021).
17. D. R. Shafer, Y.-H. Chuang, and J. J. Armstrong, "Small catadioptric microscope optics," *Proc. SPIE* **5523**, 12-18 (2004).
18. Y.-H. Chuang, D. Shafer, B.-M. B. Tsai, and J. J. Armstrong, "High NA system for multiple mode imaging," U.S. Patent 6064517A (2000).
19. D. R. Shafer, Y.-H. Chuang, and J. J. Armstrong, "Catadioptric imaging system for broad band microscopy," U.S. Patent 8675276B2 (2014).
20. Y.-H. Chuang, D. R. Shafer, and J. J. Armstrong, "Small ultra-high NA catadioptric objective," U.S. Patent 7646533B2 (2005).
21. S. C. Park, H. J. Moon, and M. H. Lee, "The design of athermalized tessar type by optimization of mounting structure and materials," *J. Opt. Soc. Korea* **4**, 133-139 (1993).