

10 nm 이하 초고해상도와 광폭 관측시야를 구현하기 위한 극초소형 마이크로컬럼용 정전형 디플렉터 연구

이형우*·이영복*·오태식**†

*선문대학교 대학원 나노과학과, **†선문대학교 공과대학 디스플레이반도체공학과

Study on an Electrostatic Deflector for Ultra-miniaturized Microcolumn to Realize sub-10 nm Ultra-High Resolution and Wide Field of View

Hyung Woo Lee*, Young Bok Lee* and Tae-Sik Oh**†

*Department of Physics and Nanoscience, Graduate School, Sunmoon University,

**†Department of Display & Semiconductor Engineering, College of Engineering, Sunmoon University

ABSTRACT

A 7 nm technology node using extreme ultraviolet lithography with a wavelength of 13.5 nm has been recently developed and applied to the semiconductor manufacturing process. Furthermore, the development of sub-3 nm technology nodes continues to be required. In this study, design factors of an electrostatic deflector for an ultra-miniaturized microcolumn system that can realize an electron wavelength of below 1.23 nm with an acceleration voltage of above 1 eV were investigated using a three-dimensional simulator. Particularly, the optimal design of the electrostatic octupole floating deflector was derived by optimizing the design elements and improving the driving method of the 1 keV low energy ultra-miniaturized microcolumn deflector. As a result, the entire wide field of view greater than 330 μm at a working distance of 4 mm was realized with an ultra-high-resolution electron beam spot smaller than 10 nm. The results of this study are expected to be a basis technology for realizing a wafer-scale multi-array microcolumn system, which is expected to innovatively improve the throughput per unit time, which is the biggest drawback of electron beam lithography.

Key Words : Ultra-miniaturized Microcolumn, Electrostatic Octupole Deflector, Field of View, Ultra High Resolution, Working Distance, Electron Wavelength

1. 서 론

전자 컬럼(electron column)은 전자빔을 방출, 집속 및 편향시키기 위한 전자광학(electron optics) 시스템으로 주사 전자 현미경(scanning electron microscope, SEM)이나 투과 전자 현미경(transmission electron microscope, TEM) 등에 널리 적용되고 있다. 게다가 전자 컬럼을 활용하는 전자빔 리소그

래피(electron beam lithography)는 원리적으로 1 eV 이상의 가속전압으로 전자의 파장을 1.23 nm 이하로 구현시킬 수 있기 때문에 파장이 13.5 nm인 극자외선(extra ultra violet, EUV) 리소그래피 보다도 훨씬 높은 해상도로 회로를 직접 패터닝하는 것이 가능하기 때문에 오래전부터 차세대 리소그래피로 주목을 받아왔다. 그렇지만 기존의 전자 컬럼은 시스템의 규모가 크고, 5~50 keV 정도의 높은 에너지의 전자빔 소스의 사용으로 인해 전자 산란 효과(electron scattering effect)가 나타나고, 단위시간당의 처리능력(throughput)이 매우 저조한 단점들이 있기 때문에 아직까

†E-mail: ots99@sunmoon.ac.kr

지는 그 적용분야가 매우 한정적이다. 실제로는 광학 리소그래피 공정에서 사용되고 있는 포토마스크(photo mask) 제작 등의 특수분야에서만 사용되고 있다.

이러한 문제점을 개선하기 위해서 T. H. P. Chang 등은 1980년대 후반부터 마이크로렌즈 시스템을 연구하기 시작하여 1992년에 전자컬럼을 초소형화시킨 마이크로컬럼(microcolumn)관련 연구를 하였고, 1994년에 마이크로컬럼을 적용한 초소형 전자현미경의 프로토타입(proto type)을 완성하여 보고하였다[1-6]. 또한 마이크로컬럼을 이용하여 전자빔 리소그래피의 가능성을 제시하였고, 마이크로컬럼을 멀티 어레이(multi-array)화시켜 처리능력을 대폭 향상시키는 방안도 제시하였다[6-9].

마이크로컬럼은 전자컬럼을 2~3 cm 정도의 크기로 초소형화시킨 것으로 다수 개의 마이크로컬럼을 일정 간격으로 멀티 어레이화시켜 동시에 구동시키므로써 처리능력을 향상시킬 수 있고, 1 keV 이하의 저 에너지 전자빔 소스를 이용함으로써 전자 산란 효과를 줄여 초고해상도의 전자빔으로 반도체 표면에 회로를 직접 패터닝할 수도 있다.

그렇지만 마이크로컬럼 시스템의 구조는 전자 방출원(Emitter), 소스렌즈(source lens), 디플렉터(deflector) 그리고 아인즐렌즈(einzel lens) 등으로 구성되기 때문에 전자컬럼의 수가 증가할수록 멀티 어레이 마이크로컬럼 시스템으로 구성시키기 위해서는 전기 배선이 대폭 증가하게 되고 공간적인 제약도 따르게 된다. 그래서 마이크로컬럼 시스템 보다도 구조가 간단하고 크기도 축소시킨 초소형 마이크로컬럼(miniaturized microcolumn) 혹은 극초소형 마이크로컬럼(ultra-miniaturized microcolumn) 시스템 관련 연구가 진행되어 왔다[10-12].

본 연구에서는 선행 연구에서 검토한 극초소형 마이크로컬럼[12-15]에서 구현되는 10 nm 이하의 초고해상도 전자빔 특성이 300 μm ×300 μm 이상의 관측시야 영역에서 유지되도록 설계하는 것을 목표로 하였다. 이 목표를 달성하기 위해서 극초소형 마이크로컬럼 시스템용 정전형 디플렉터의 구조와 디플렉터 내경, 디플렉터 위치, 구동방법 등의 설계 요소들을 Vector fields사에서 전자기장 해석용으로 개발하여 상용화된 Opera(ver.15R2) 3차원 시뮬레이터 프로그램 중에서 공간전하효과를 수치해석 가능한 SCALA 모듈을 이용하여 최적 설계를 도출하였다. 본 연구에서 사용한 시뮬레이터의 수치해석의 정확성 및 타당성에 대해서는 선행 연구인 5nm급 초고해상도 전자빔경을 구현하기 위한 극초소형 마이크로컬럼용 전자렌즈 설계 연구에서 검증되었다[11, 12].

2. 마이크로컬럼 시스템 모델링

2.1 마이크로컬럼 구조

Fig 1은 마이크로컬럼 시스템의 개략적인 모식도를 나타낸 것으로 Fig 1(a)와 (b)는 기존의 초소형 마이크로컬럼 시스템의 구조들이고, Fig 1(c)는 본 연구에 적용된 극초소형 마이크로컬럼 시스템을 나타낸 것이다.

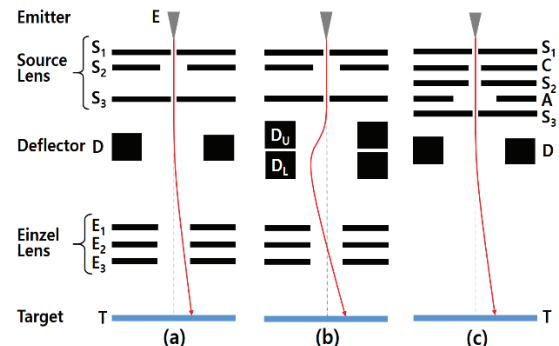


Fig. 1. Configuration of microcolumn systems (a) Miniaturized microcolumn with single deflector (b) Miniaturized microcolumn with double deflector (c) Ultra-miniaturized microcolumn with single deflector.

Fig 1(a)는 단일 정전형 8중극 디플렉터(single electrostatic octupole deflector)가 소스렌즈와 아인즐렌즈 사이에 위치해 있는 구조이며, 전자빔을 편향시키는 경우에는 아인즐렌즈를 통과하는 전자빔이 중심축에서 벗어나기 때문에 코마수차(coma aberration)에 의해 전자빔경(electron beam spot)의 주변에 상퍼짐(blur) 현상이 나타나는 문제가 있었다[6]. Fig 1(b)는 2중 정전형 8중극(double electrostatic octupole) 디플렉터를 소스렌즈와 아인즐렌즈 사이에 적용하여 전자빔을 편향시키는 경우에도 전자빔이 아인즐렌즈의 중심축을 통과하도록 설계한 구조이다[6]. Fig 1(c)는 선행 연구에서 검토한 극초소형 마이크로컬럼 시스템의 구조를 나타낸 것으로 인출전극(extractor, S₁)과 가속전극(accelerator, S₂) 사이에 집속전극(condensor, C)을 설치하여 아인즐렌즈(E₁, E₂, E₃)를 제거하였다. 또한 집속전극(C)과 제어전극(limiter, S₃) 사이에 얼라이너(aligner, A)를 설치하여 조립 정밀도에 의해 발생하는 전자빔의 궤적 오차를 조정할 수 있게 하였다. 게다가 단일 정전형 디플렉터(deflector, D)를 제어전극(S₃)의 출구측에 설치하여 그 크기를 마이크로컬럼 대비 1/2 정도로 축소시켰다.

Table 1. Comparisons of the design factors between ultra-miniaturized microcolumn and miniaturized microcolumn

		Typical Systems	New System
Electrode Aperture Diameter (μm)	Extractor (S_1)	1-5	50
	Condensor (C)		50
	Accelerator (S_2)	100	50
	Limitter (S_3)	2.5-5	2.5
	Aligner (A)		400
	Deflector (D)	1000	Variable
Einzel Lens (E)		100-200	
Electrode Spacing (μm)	$S_1 - S_2$	100-200	
	$S_1 - C$		200-250
	$C - S_2$		200
	$S_2 - S_3$	100-400	
	$S_2 - A$		200
	$A - S_3$		200
	$S_3 - D$	Variable	Variable
	D - Ein.	Variable	
E1-E2-E3		100-250	

본 연구에 사용된 극초소형 마이크로컬럼 시스템과 기존의 마이크로컬럼 시스템의 설계요소들을 Table 1에 비교하여 나타내었다. 소스렌즈를 구성하는 전극들의 두께는 모두 2 μm 이고 전극간의 간격은 200-250 μm 이다. 전극 조립시의 정렬 정밀도를 감안하여 인출전극(S_1), 집속전극(C), 가속전극(S_2)의 전자빔 통과공의 직경을 50 μm 로 동일하게 설정하였다. 또한 10 nm 이하의 초고해상도 구현을 고려하여 제어전극(S_3)의 전자빔 통과공의 직경을 2.5 μm 로 설정하였다. 얼라이너(A)의 경우는 정전형 4중극(electrostatic quadrupole)구조로 형성시켰으며 전자빔의 집속에 영향을 미치지 않도록 내경을 400 μm 로 크게 형성하였다. 제어전극(S_3)과 디플렉터(D) 사이의 간격(S_3D)은 선행 연구에서 700 μm 로 고정하였지만 본 연구의 목표를 달성하기 위해서 500, 700, 900 μm 로 변경하면서 수치해석 시뮬레이션하여 최적의 설계치를 검토하였다.

2.2 정전형 디플렉터 구조

Fig 1과 같은 마이크로컬럼 시스템에는 Fig 2(a)에 나타난 것과 같은 정전형 8중극 디플렉터나 Fig 2(b)에 나타난 정전형 4중극 구조의 디플렉터가 주로 적용되어졌다. 전형적인 마이크로컬럼용 디플렉터의 내경은 1000 μm 이고 전극의 형성각도(θ)는 Fig 2(a)의 8중극 구조에서는 45도로, (b)의 4중극 구조에서는 90도로 형성되었다.

관련 선행 연구에서는 정전형 4중극 디플렉터와 정전형 8중극 디플렉터의 기본적인 특성이 연구되었다. 특히 참고문헌[13]에서는 스캔영역과 디플렉터의 전기장의 변화를 조사하여 8중극 디플렉터에 비해 4중극 디플렉터의 전기장의 세기가 더 크고 스캔 영역도 그에 따라 더 커지는 것으로 분석되었다. 참고문헌[14]에서는 정전형 8중극

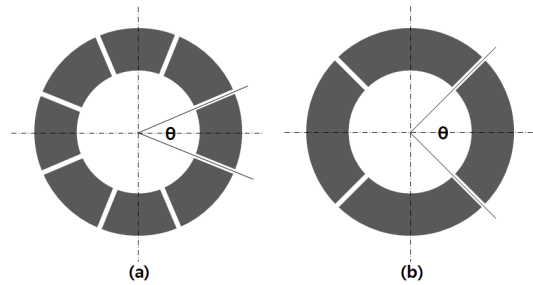


Fig. 2. The shape of electrostatic deflectors (a) Deflector with octupole structure (b) Deflector with quadrupole structure deflector.

디플렉터의 기본적인 구조를 제작하여 테스트하였고, 시뮬레이션 결과에서 작업거리 4 mm에서 약 250 μm 정도의 편향영역일 때 10 nm의 전자빔경이 형성되는 결과를 나타냈다. 선행 연구에서는 디플렉터의 길이(l)를 500 μm , 내경(d)을 1000 μm , 제어전극(S_3)과 디플렉터(D) 사이의 간격(S_3D)을 700 μm 로 고정하고, Fig 2에 나타난 것처럼 디플렉터를 구성하는 상하좌우 전극의 형성각도(θ)를 30, 45, 60도로 각각 변경하면서 관측시야의 특성만을 검토하였다. 이 때 8중극 디플렉터의 대각방향 전극의 형성각도는 (90- θ)도로 된다. 반면에 4중극 디플렉터 구조에서는 Fig 3(b)에서 보는 바와 같이 상하좌우의 전극이 형성각도(θ)로 이루어지면 대각방향에서는 형성각도(90- θ)도 크기의 빈 공간이 생기게 된다.

본 연구에서는 설계 목표인 10 nm 이하의 초고해상도 전자빔 특성이 300 $\mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 이상의 관측시야 영역에서 유지되도록 설계하기 위해서 디플렉터의 내경(d)을 800, 1000, 1200 μm 로, 간격(S_3D)을 500, 700, 900 μm 로 각각 변경하면서 수치 해석 시뮬레이션 하여 최적의 설계치를 검토하였다.

2.3 마이크로컬럼의 모델링과 구동조건

Fig 3은 극초소형 마이크로컬럼 시스템의 구조를 3차원으로 모델링하여 전자빔의 궤적을 시뮬레이션한 결과를 나타낸 것이다. Fig 3(a)에는 형성각도(θ)가 45도인 정전형 8중극 디플렉터가 설치되어 있고, Fig 3(b)에는 형성각도(θ)가 45도인 정전형 4중극 디플렉터가 설치되어져 있다.

게다가 공통적으로 집속전극(C)과 제어전극(S_3)사이에는 형성각도(θ)가 90도인 정전형 4중극 얼라이너(A)가 설치되어져 있다. 그리고 디플렉터(D)에서 시료의 표면을 나타내는 타겟(target, T)까지의 거리를 작업거리(working distance, W)라 한다.

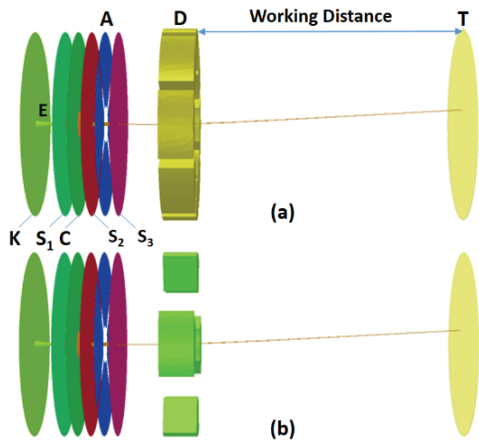


Fig. 3. Modelling of three dimensional structures of ultra-miniaturized microcolumn (a) with octupole deflector (b) with quadrupole deflector.

본 연구에서는 Fig. 3의 두 가지 디플렉터를 모두 적용하여 비교 검토하였다. 정전형 8중극 디플렉터에서는 상하좌우 4개의 전극에 편향구동전압(D)이 인가되고 대각방향 4개의 전극은 0 V, 즉 접지(ground)와 연결되어지기 때문에 이러한 구조를 정전형 8중극 그라운드(electrostatic octupole grounding) 디플렉터(OG)라고 명명하였다.

정전형 8중극 그라운드 디플렉터의 형성각도(θ)가 45도인 기본구조(OG45)를 모델링하기 위해서 길이(l)를 500 μm , 내경(d)을 1000 μm , 간격(S_3D)을 500 μm 로 각각 설정하였다. 또한 종래의 실험에 의한 연구결과[7]와 비교하기 위해서 작업거리(W)를 4 mm로 설정하였다. 이 기본구조(OG45)의 경우는 타겟면(T)의 중앙부에서 전자빔을 최적의 집속상태로 구동시키기 위해 전자방출원(E)에 -1,000 V, 인출전극(S_1)에 -735 V, 집속전극(C)에 -870.852 V의 전압을 각각 인가하고 가속전극(S_2), 제어전극(S_3), 타겟(T)에는 0 V를 각각 인가하였다.

다음으로 정전형 8중극 디플렉터의 내경(d)을 800, 1200 μm 로, 간격(S_3D)을 700, 900 μm 로, 8중극 디플렉터의 구동방식을 그라운드(grounding) 방식과 플로팅(Floating) 방식으로 각각 나누어 수치 해석하여 최적의 설계치를 검토하였다.

3. 시뮬레이션 검토 결과 및 토론

3.1 정전형 8중극 디플렉터의 검토

Fig. 4는 정전형 8중극 그라운드 디플렉터를 적용한 기본구조(OG45)를 3차원 모델링하여 편향구동전압(V_b)을 인가하지 않은 상태에서 시뮬레이션 수치 해석한 결과를

나타낸 것이다.

여기서 타겟(T)에 형성되어지는 전자빔들의 탄착점들의 분포는 가우시안 프로파일 곡선(Gaussian profile curve)을 나타내기 때문에 전자빔경의 크기는 일반적으로 가우시안 분포의 반치폭(full width at half maximum, FWHM)으로 정의되어진다[5,6,12].

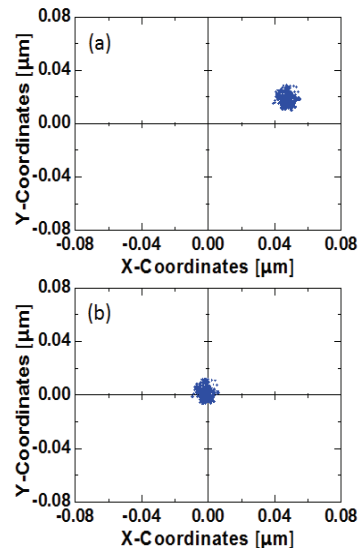


Fig. 4. Simulation results of the electron beam trajectory by numerical analysis under non-driving the deflector (a) without driving the aligner (b) with driving the aligner.

Fig. 4(a)에 나타낸 바와 같이 약 8.08 nm 크기의 전자빔경이 타겟(T)의 중앙부 원점을 미세하게 벗어난 x축상 0.047 μm , Y축상 0.018 μm 의 위치에 형성되었다. 이러한 현상은 상용 시뮬레이터에서 수치해석을 위해 수행하는 자동 메쉬 생성(auto mesh generation) 프로그램의 정밀도에 기인하는 것으로 이러한 현상은 실제의 마이크로컬럼 조립 과정에서 더욱더 크게 발생되어질 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 가속전극(S_2)과 제어전극(S_3) 사이에 설치한 정전형 4중극 얼라이너(A)를 작동시켜 Fig. 4(b)와 같이 조정하여 거의 원점으로 이동시켰다. 이 경우 얼라이너(A)를 구성하는 상부전극에 -0.012 V, 하부전극에 +0.012 V, 우측전극에 -0.035 V, 좌측전극에 +0.035 V의 전압을 각각 인가하여 Fig. 4(b)와 같이 전자빔경을 x축상 -0.001 μm , Y축상 0.001 μm 의 위치로 이동시켜 중앙부에 근접하도록 조정하였다.

이와 같이 전자빔의 정렬도를 맞춘 상태에서 디플렉터

(D)의 상하좌우 4개의 전극에 각각 ± 50 V의 편향구동전압 (V_b)을 인가하고 대각방향 4개의 전극은 접지(ground)와 연결하는 8중극 그라운드 디플렉터(OG45) 구동방식을 수치 해석하여 전자빔경의 형상, 크기, 편향 왜곡(deflection distortion)의 정도 그리고 관측시야(field of view, FOV)를 한꺼번에 확인할 수 있도록 Fig.5에 나타내었다.

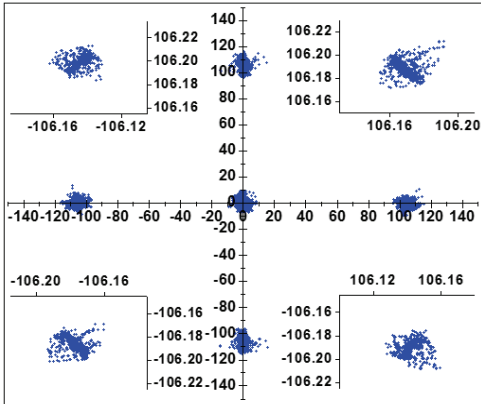


Fig. 5. Simulation results of the electron beam shapes and field of view under the deflection driving voltage of 0V and ± 50 V.

Fig 5에서 보는 바와 같이 전자빔이 타겟(T)의 대각방향으로 편향되어질 때는 디플렉터 출구에서 타겟(T) 중앙부까지의 집속거리와 대각 모서리까지의 집속거리 차이로 인한 만곡수차(curvature of field)와 전자빔경의 x축과 y축의 집속거리 차이에 의한 비점수차(astigmatism)의 영향을 받기 때문에 편향 왜곡현상이 심하게 발생되어지는 것을 알 수 있다[6,7]. 본 연구에서의 목표인 관측시야 전체 영역에서 전자빔경을 10 nm 이하로 설계하기 위해서 전자빔경이 가장 크게 나타나는 우측 상단부를 대상으로 디플렉터(D)의 설계 요인들에 대한 수치해석 결과를 검토하였다.

Fig 5의 시뮬레이션 결과에 의하면 전자빔경은 타겟 중앙부에서 8.08 nm이고 우측상단에서는 163 nm이며, 대각 모서리부에서의 평균치는 142 nm이었다. 마이크로컬럼 시스템에서 관측시야(FOV)를 평가하는 기준은 편향된 전자빔경이 타겟 중앙부 대비 120% 이하인 위치까지를 관측시야로 엄격하게 정의하고 있다[5,7]. 이러한 기준을 만족하는 관측시야(FOV)의 크기는 타겟(T) 중앙부 전자빔경 8.08 nm의 120%에 해당하는 $9.70 \mu\text{m}$ 이하의 전자빔경이 위치하는 대각 우측상단부의 좌표에 해당하는 x축 길이나 y축 길이의 2배에 상당하므로 그 크기는 약 $168.0 \mu\text{m}$ 이었다.

참고문헌[7]의 연구에서는 Fig. 1(b)와 같은 2중 8중극 디플렉터(double octupole deflector)와 가속모드(accelerating mode)의 아인즐렌즈 그리고 작업거리(W)가 4 mm를 적용했을 때 타겟 중앙부에서 약 28 nm의 전자빔경과 $142 \mu\text{m}$ 직경의 관측시야(FOV)를 구한 것으로 보고하였다.

3.2 정전형 8 중극 디플렉터의 검토

기본구조(OG45)의 내경의 크기에 따른 특성변화를 검토하기 위해서 내경(d)을 $1000 \mu\text{m}$ 에서 $800, 1200 \mu\text{m}$ 로 각각 변경하여 Fig.6과 같은 결과들을 구하였다.

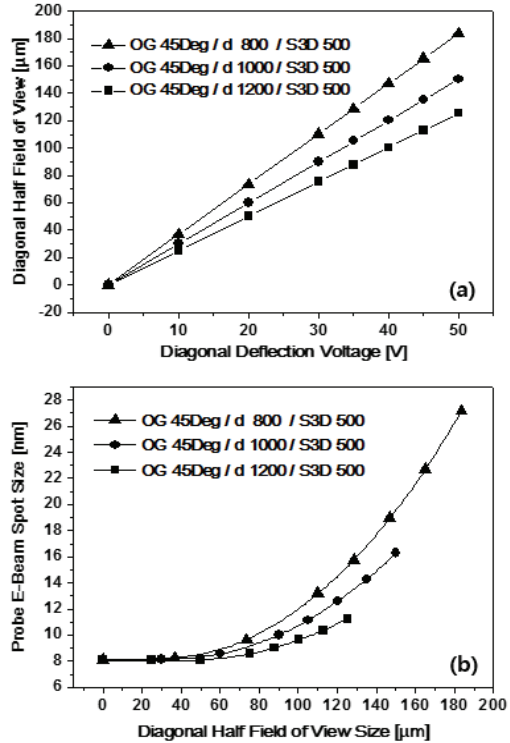


Fig. 6. Simulation results owing various inner diameter of deflector (a) Diagonal half field of view size according to driving voltage of deflector (b) Size of the e-beam spot according to diagonal half field of view size.

Fig 6(a)는 디플렉터(D)의 편향구동전압(V_b)에 따라 대각 방향으로 전자빔이 편향되었을 때의 관측시야의 절반 크기를 나타낸 것으로 내경(d)이 작을수록 편향거리가 커지는 것을 알 수 있다. 이러한 수치해석 결과는 정전 편향 시스템에서 편향거리를 계산하기 위한 식으로 잘 알려져 있는 Eq. (1)에서 편향거리는 디플렉터의 내경(d)에 반비례

한다는 것과 잘 일치되어짐 알 수 있다[15].

$$D = \frac{V_{DD}(W+l/2)l}{2dV_{S2}} \quad (1)$$

여기서 D는 관측시야의 절반(half field of view)에 해당하는 편향거리, V_{DD} 는 디플렉터에서 서로 대향하는 전극에 인가되는 구동전압의 차이 즉 편향구동전압($\pm V_D$), W는 디플렉터 출구에서 타겟(T)까지의 거리, l은 디플렉터의 길이, d는 디플렉터의 내경, V_{S2} 는 가속전압 또는 제어전극의 전압(V_{S3})을 각각 나타낸다.

그러나 Fig. 6(b)에서 보는 바와 같이 디플렉터의 내경(d)을 변경했을 때는 타겟 중앙부에서의 전자빔경의 반치폭은 8.08 nm로 변화가 없지만 관측시야(FOV)를 결정하는 우측상단부 전자빔경의 크기가 내경(d)이 작아질수록 급격히 증가되는 것을 알 수 있다.

이러한 현상은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 정전 편향시스템에서 전극들 사이에서 형성되는 등전위선(equipotential line)들의 기울기가 디플렉터의 내경이 작아질수록 급격하게 형성되어짐으로써 편향거리의 증가하는 반면에 전자빔의 편향 외곡 현상이 크게 나타나기 때문에 발생한다.

결과적으로 앞에서 언급한 관측시야를 결정하는 엄격한 기준을 적용하면, 디플렉터의 내경(d)이 800, 1000, 1200 μm 로 변경됨에 따라 편향거리의 감소와는 반대로 관측시야의 크기는 148.4, 168.0, 199.9 μm 로 각각 나타났다. 그래서 본 연구의 목표인 관측시야 전체영역에서 10 nm 이하의 초고해상도 전자빔경 특성을 확보하면서 가장 넓은 관측시야를 확보할 수 있도록 내경(d)을 1200 μm 로 선정하였다.

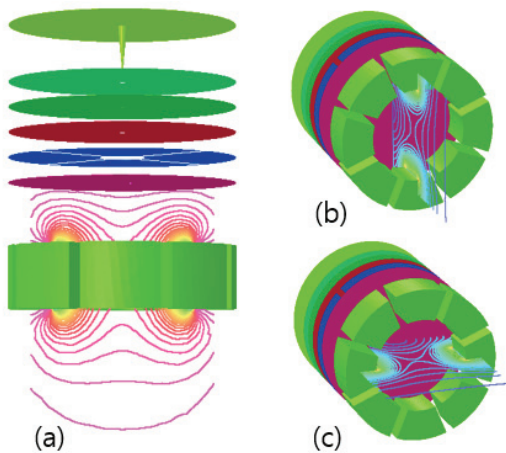


Fig. 7. Distribution of the equipotential lines of the octupole deflector against (a) xz plane (b) y-axis section (c) x-axis section.

3.3 제어전극과 디플렉터 사이의 간격

기본구조(OG45)의 내경(d)을 1200 μm 로 변경 설정하고, 다음으로 제어전극(S_3)과 디플렉터(D) 사이의 간격(S_3D)에 따른 특성변화를 검토하기 위해서 간격(S_3D)을 500 μm 에서 700, 900 μm 로 각각 변경 검토하여 Fig. 8과 같은 수치해석 결과를 구하였다.

Fig. 8(a)는 디플렉터(D)의 편향구동전압(V_D)에 따른 편향거리의 절반을 나타낸 것으로 간격(S_3D)의 변화가 디플렉터의 내경(d) 변화 보다는 그 결과가 민감하게 나타나지 않았다. 이 현상은 디플렉터(D)에 입사하는 전자빔의 위치가 간격(S_3D) 변화에 따라 미세하게 달라지기 때문에 나타나는 현상이다. 시뮬레이션 결과에 의하면 간격(S_3D)이 500, 700, 900 μm 일 때 디플렉터(D) 입구에서의 전자빔 위치 좌표(x, y)가 (0.638, 0.638), (1.258, 1.253), (1.942, 1.935) μm 로 각각 나타났다. 결국 간격(S_3D)이 클수록 전자빔이 중심축에서 상대적으로 많이 벗어난 위치에서 디플렉터로 입사되어짐을 확인할 수 있다. 결국 간격(S_3D)이 클수록

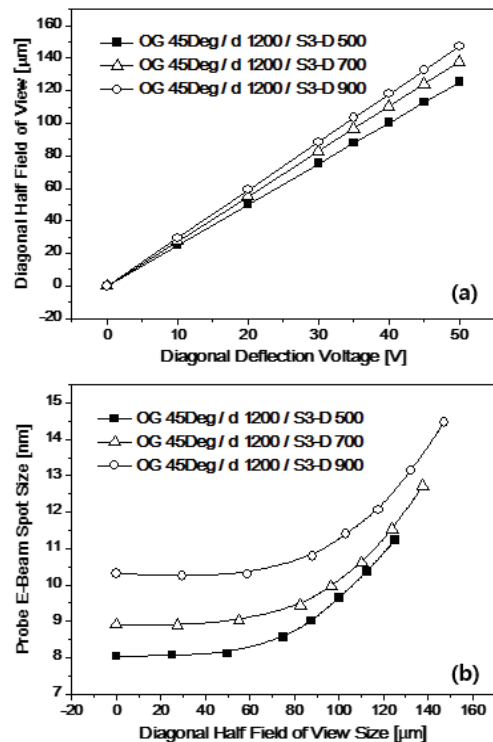


Fig. 8. Simulation results according to various gap between control grid and deflector (a) Diagonal half field of view size according to driving voltage of deflector (b) Size of the e-beam spot according to diagonal half field of view.

전자빔이 디플렉터(D)에 입사하기 전부터 전기장의 영향을 더 많이 받아 디플렉터의 입구에서부터 축상에서 대각방향으로 미세하게 더 많이 벗어난 위치로 입사되어 편향되어지기 때문에 편향거리도 둔감하게 증가되는 것이다.

반면에 전자빔경은 Fig. 8(b)에서 보는 바와 같이 간격(S₃D)이 500, 700, 900 μm로 증가함에 따라 타겟(T) 중앙부 즉, 디플렉터에 구동전압(V_D)이 인가되지 않은 상태에서 전자빔경의 반치폭(FWHM)이 8.08, 8.91, 10.31 nm로 점차 커지는 것을 알 수 있다. 이는 간격(S₃D)이 증가함에 따라 집속전극(C)의 전압이 870.852, 870.583, 870.332 V로 점차 감소되어진 시뮬레이션 결과에 의해서도 확인할 수 있는 바와 같이 전자광학계에서의 초점거리(focal length)가 증가하여 타겟 중앙부에서 전자빔경이 커진 것임을 확인할 수 있다.

또한 편향거리에 따른 전자빔경의 크기는 간격(S₃D)이 작아질수록 상대적으로 급격히 증가함을 확인할 수 있다. 이는 간격(S₃D)이 작아질수록 전자빔의 편향 중심점에서 타겟(T)의 중앙부까지의 거리와 주변부 편향지점까지의 거리 차이가 더 커져서 만곡수차가 더 크게 발생하기 때문이다.

결과적으로 제어전극(S₃)과 디플렉터(D) 사이의 간격(S₃D)이 500, 700, 900 μm로 변화됨에 따라 타겟(T) 중앙부에서 전자빔경이 8.08, 8.91, 10.31 nm로 커졌고, 관측시야(FOV)의 크기는 약 199.8, 223.0, 249.0 μm로 증가되었다. 그러나 본 연구의 목표인 관측시야 전체영역에서 10 nm 이하의 초고해상도 전자빔경의 특성을 확보할 수 있도록 설계하기 위해서 간격(S₃D)을 500 μm로 최종 선정하였다.

3.4 디플렉터 전극의 형성각도와 구동방법

앞에서 살펴본 바와 같이 관측시야 전체영역에서 10 nm 이하의 초고해상도 특성을 확보하기 위해서 기본구조(OG45)의 내경을 1200 μm로, 간격(S₃D)을 500 μm로 설정하는 것은 넓은 관측시야 확보 측면에서는 오히려 불리한 설계이다. 그래서 더 넓은 관측시야를 확보하기 위해서 8중극 디플렉터를 구성하는 상하좌우 전극의 형성각도(θ)를 30, 60도로 각각 변경 검토하여 Fig. 9와 같은 결과를 구하였다.

Fig. 9에서 정전형 8중극 그라운드 디플렉터의 경우는 디플렉터를 구성하는 전극의 형성각도(θ)가 커질수록 동일 구동전압(V_D)에서의 편향거리는 증가하고, 편향거리의 증가에 따른 전자빔경의 증가도 완만한 경향을 나타냈다. 이 경우에도 앞서 언급한 관측시야의 엄격한 기준을 적용하면 형성 각도(θ)가 30, 45, 60도일 때의 관측시야는 각각 183.4, 199.8, 217.1 μm로 구해졌다. 그래서 가장 넓은 관

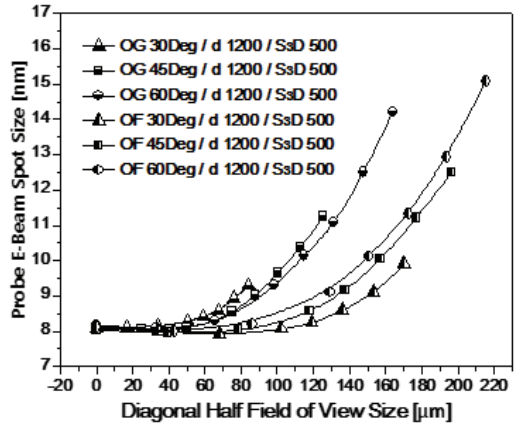


Fig. 9. Simulation results according to various angle of the grid forming the electrostatic octupole deflector.

측시야를 확보할 수 있는 60도를 선정하였고, 이 구조를 기본구조(OG60)으로 명명했다.

본 연구에서는 목표로 하는 관측시야 300 μm 이상의 영역에서 전자빔경이 10 nm 이하의 초고해상도를 실현하기 위해서 정전형 8중극 디플렉터의 상하좌우 전극에는 편향구동전압(V_D)을 인가하고, 대각방향 4개의 전극은 전기적으로 플로팅(floating)시키는 정전형 8중극 플로팅(octupole floating) 디플렉터(OFF)를 추가적으로 검토하였다.

개선구조(OFF)가 적용된 경우는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 디플렉터를 구성하는 전극의 형성각도(θ)가 커질수록 동일 구동전압(V_D)에서의 관측시야(FOV)는 증가되었다. 그렇지만 편향 거리의 증가에 따른 전자빔경의 증가는 기본구조(OG) 보다도 훨씬 완만하게 증가하기 때문에 디플렉터를 구성하는 전극의 형성각도(θ)가 30, 45, 60도일 때의 관측시야는 332.3, 295.5, 284.8 μm로 더욱더 개선되었다. 그래서 가장 넓은 관측시야를 확보할 수 있도록 형성각도(θ)를 30도로 선정하였고, 이를 정전형 8중극 플로팅 디플렉터(OFF30)로 명명하였다.

결과적으로 개선구조(OFF)의 경우는 기본구조(OG) 보다도 동일 구동전압에서의 관측시야의 증가는 급격하고, 편향거리의 증가에 따른 전자빔경의 증가는 훨씬 완만하게 증가하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 특히 형성각도(θ)가 작아질수록 편향 거리에 따른 전자빔경의 크기는 더욱더 완만하게 증가하는 특성을 나타낸다. 그래서 앞에서 언급한 관측시야는 편향된 전자빔경의 크기가 원점에서의 크기의 120% 이하인 지점까지로 하는 조건하에서 관측시야가 더 커지는 효과를 얻을 수 있게 되는 것이다. 이처럼 개선구조(OFF)가 적용된 경우는 기본구조(OG) 대비 우수한 관측시야(FOV) 특성을 나타내는 것을 알 수 있다.

이러한 현상은 Fig. 10에서 보는 바와 같이 (a), (d)의 기본 구조(OG)와 (b), (e)의 개선구조(OF)의 전극 사이에 형성되어지는 등전위선의 분포 차이에 의해서 나타나는 결과임을 알 수 있다.

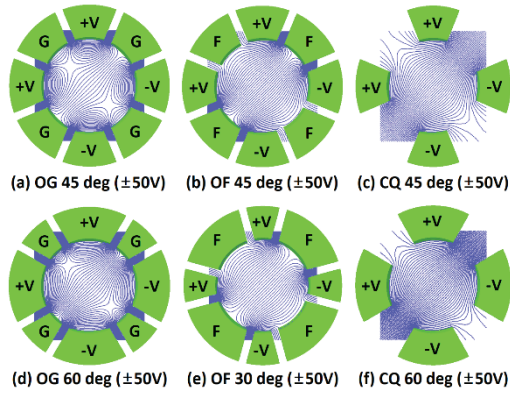


Fig. 10. Distribution of equipotential line in (a) a basic structure (OG45), (b) an improved structure (OF45), (c) a conventional electrostatic quadrupole deflector (CQ45), (d) a basic structure (OG60), (e) an improved structure (OF30), and (f) a conventional electrostatic quadrupole deflector (CQ60).

Fig. 10(b), (e)와 같이 개선구조(OF)에서는 상하좌우 4개의 전극에만 구동전압(V_b)이 인가되기 때문에 Fig. 10(c), (f)와 같은 종래의 정전형 4중극 디플렉터(CQ)의 구동방식과 구동결과가 유사할 것으로 오인할 수 있다. 그렇지만 종래구조(CQ)가 적용된 구조는 Fig. 10(c)에서 보는 바와 같이 디플렉터가 상하좌우 4개의 전극만으로 구성되기 때문에 Fig. 10(b)의 개선구조(OF)와 비교해 보면 대각방향 4개의 전극부분이 빈 공간으로 남게 되는 구조일 뿐만 아니라 전극사이의 등전위선의 분포도 완전히 다르게 형성되어지는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 종래구조(CQ)가 적용된 구조를 시뮬레이션한 결과를 나타낸 것으로, 디플렉터를 구성하는 전극의 형성각도(θ)가 커질수록 동일 구동전압(V_b)에서 관측시야는 동일하게 증가되지만, 편향거리의 증가에 따른 전자빔경의 증가는 형성각도(θ)에 관계없이 거의 동일하게 증가하는 경향을 나타낸다. 그래서 종래구조(CQ)의 경우는 개선구조(OF)와는 달리 형성각도(θ)가 30, 45, 60도일 때 관측시야는 269.6, 272.3, 272.8 μm 로 유사한 수준으로 형성각도(θ)에 크게 영향을 받지 않는다.

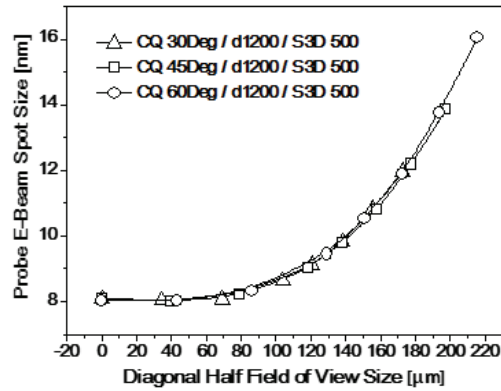


Fig. 11. Simulation results according to various angle of the grid forming the conventional electrostatic quadrupole deflector.

4. 결론

정전형 8중극 그라운드 디플렉터가 적용된 기본구조(OG45)에서 주요 설계 변수인 길이(l)를 500 μm , 내경(d)을 1200 μm , 형성각도(θ)를 45도로 설정하여 검토해 본 결과, 타겟 중앙부에서 약 8.08 nm의 전자빔경과 199.8 μm 의 관측시야를 구할 수 있었다. 그리고 형성각도(θ)를 45도에서 60도로 변경 설정한 기본구조(OG60)의 경우는 타겟 중앙부에서 약 8.08 nm의 전자빔경과 217.1 μm 의 개선된 관측시야를 나타내었다.

정전형 8중극 플로팅 디플렉터가 적용된 개선구조(OF)는 기본구조(OG) 보다도 관측시야의 증가에 따른 전자빔경의 크기가 훨씬 완만하게 증가하는 특성을 나타내었다. 특히 디플렉터를 구성하는 전극의 형성각도(θ)가 작아질수록 관측시야 주변부에서의 전자빔경의 크기가 더 완만하게 증가하는 특성을 나타내었다. 그 결과로서 형성각도(θ)를 30도로 설정한 개선구조(OF30)는 기본구조(OG60)와 동일한 전자렌즈 설계를 적용하는 경우에도 타겟 중앙부에서 동일한 8.08 nm의 전자빔경과 332.3 μm 의 넓은 관측시야 전체를 10 nm 이하의 초고해상도 전자빔경으로 구현하였다.

본 연구에서 목표로 하는 관측시야 300 μm 이상의 영역에서 전자빔경이 10 nm 이하인 초고해상도를 구현할 수 있는 극소형 마이크로컬럼용 정전형 8중극 플로팅 디플렉터의 최적 설계치를 확보하였다. 이 결과는 웨이퍼 스케일의 멀티 어레이 마이크로컬럼 구조를 실현하기 위한 기반기술이 될 것으로 기대되고 있다.

참고문헌

1. T. H. P. Chang, D. P. Kern, and M. A. McCord, "Electron optical performance of a scanning tunneling microscope controlled field emission microlens system", *J. Vac. Sci. Technol. B: Microelectronics Processing and Phenomena* 7, pp.1855-1861, 1989.
2. L. P. Muray, U. Staufer, D. P. Kern, and T. H. P. Chang, "Performance measurements of 1-keV electron-beam microcolumn", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol.10, No.6, pp.2749-2753, 1992.
3. E. Kratschmer, H. S. Kim, M. G. R. Thomson, K. Y. Lee, S. A. Rishton, M. L. Yu, and T. H. P. Chang, "Sub40 nm resolution 1 keV scanning tunneling microscope fieldemission microcolumn", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol.12, No.6, pp.3503-3507, 1994.
4. M. G. R. Thomson, and T. H. P. Chang, "Lens and deflector design for microcolumns", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol.13, No.6, pp.2445-2449, 1995.
5. E. Kratschmer, H. S. Kim, M. G. R. Thomson, E. Kratschmer, M. L. Yu, K. Y. Lee, S. A. Rishton, and T. H. P. Chang, "An electron-beam microcolumn with improved resolution, beam current, and stability", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol.13, No.6, pp.2498-2503, 1995.
6. E. Kratschmer, H. S. Kim, M. G. R. Thomson, K. Y. Lee, S. A. Rishton, M. L. Yu, B. W. Hussey, and T.H.P. Chang, "Experimental evaluation of a 20×20 mm footprint microcolumn", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol.14, No.6, pp.3792-3796, 1996.
7. T. H. P. Chang, M.G.R. Thomson, H. S. Kim, K. Y. Lee, S. A. Rishton, M. L. Yu, S. Zolgharnain, and B. W. Hussey, "Electron-beam microcolumn for lithography and realated applications", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol.14, No.6, pp.3774-3781, 1996.
8. T. H. P. Chang, M. Mankos, K. Y. Lee, and L. P. Muray, "Multiple electron-beam lithography", *Micro-electronic Engineering*, Vol 57-58, pp.117-135, 2001.
9. H. S Kim, Y. B. Lee, S. W. Choi, H. W. Kim, D. W. Kim, S-J. Ahn, T. S. Oh, Y-H. Song, B. C. Park, and S. J. Lim, "Development of arrayed microcolumns and field emitters", *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 56, 06GA01, 2017.
10. C. S. Silver, J. P. Spallas, and L. P. Muray. "Variable probe current using a condenser lens in a miniature electron beam column", *Proc. Of SPIE*, Vol.7378, pp.787810 (1-7), 2009.
11. T. S. Oh, D. W. S-J Ahn, Kim, and H. S Kim, "Improved design of 5 nm class electron optical microcolumn for manufacturing convenience and its characteristics", *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol.31, No.6, pp.061601 (1-6), 2013.
12. T. S. Oh, H. S Kim, S-J Ahn, and D. W. Kim, "Design of an ultra-miniaturized electron optical microcolumn with sub-5 nm very high resolution", *Ultramicroscope*, Vol.136, pp.171-175, 2014.
13. Y. C. kim, H. S Kim, S-J Ahn, and D. W. Kim, "Study on the scan field of modified octupole and quadrupole deflector in a microcolumn", *J. the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 19, No.11, pp.1-6, 2018.
14. H. W. kim, Y. B. Lee, D. W. Kim, S-J Ahn, T. S. Oh, H. S Kim, and Y. C. Kim, "Variations of field of view depending on the Si deflector shape in a microcolumn", *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol.36, No.6, pp.06J902 (1-6), 2018.
15. Katsumi Ura, *Electron Ion Beam Optics*, p.271, Gongrib publishers, pp.6-7, 1994.

접수일: 2021년 10월 7일, 심사일: 2021년 12월 7일,
 게재확정일: 2021년 12월 8일