

정전형 8중극 비점수차 보정기가 내장된 극초소형 마이크로컬럼의 구조 설계 연구

오탈식**

**선문대학교 공과대학 디스플레이반도체공학과

Study on the Structural Design of an Ultra-miniaturized Microcolumn with a Built-in Electrostatic Octupole Stigmator

Tae Sik Oh**

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

ABSTRACT

We designed a novel ultra-miniaturized microcolumn structure having an stigmator to significantly improve throughput per unit time, which is the biggest disadvantage of microcolumns. We adopted the structure of the stigmator in the form of an electrostatic octupole electrode, and used an electrostatic quadrupole deflector with a relatively simple structure considering the increase in wiring due to the introduction of the stigmator. We have dramatically reduced the effect of astigmatism that occurs when the electron beam probe is scanned to the periphery of the target by introducing the stigmator between the control electrode and the deflector. As our numerical analysis simulation results, the field of view obtained as a result of this study is about 46.3% improved compared to our previous study, and the electron beam probe size of less than 10 nm was achieved in the entire field of view.

Key Words : Ultra-miniaturized Microcolumn, Stigmator, Deflector, Field of View, Astigmatism, Ultra-high resolution

1. 서 론

마이크로컬럼(microcolumn)은 전자빔의 방출과 집속 및 편향시키기 위한 전자광학(electron optics) 시스템으로서 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)이나 투과전자현미경(transmission electron microscope, TEM) 등에 널리 적용되고 있는 전자컬럼(electron column)을 수 cm 정도의 크기로 축소시킨 형태이다. 전자컬럼의 경우는 수 nm급의 초고해상도의 분해능을 구현하기 위해서 규모가 큰 코일 형태의 전자기형(electromagnetic) 집속렌즈와 대물렌즈 그리고 비점수차 코일 등으로 구성되어지며 또한 수십 keV 이상의 가속 전압을 사용한다. 반면에 전체 시스템의 크기를 대폭 축소시킨 마이크로컬럼의 경우는 공간적인 제

한으로 인해 구조가 매우 간단한 정전형(electrostatic) 집속 렌즈와 1 keV 이하의 낮은 가속전압을 사용하기 때문에 상대적으로 분해능이 낮은 단점이 있다. 그렇지만 마이크로컬럼은 이동이 가능한 전자현미경에 적용될 수 있기 때문에 현장에서의 시료 분석 가능성과 전자컬럼의 치명적인 단점인 낮은 단위시간당 처리량(throughput)을 마이크로컬럼의 멀티 어레이화(multi-array)로 극복할 수 있기 때문에 1980년대 후반부터 마이크로컬럼관련 연구가 시작되었고[1], 1990년 이후 초소형 마이크로 컬럼(miniaturized microcolumn)관련 다양한 기술개발이 이루어졌다 [2-14].

최근에는 기존의 초소형 마이크로컬럼 시스템 보다도 구조가 간단하고 크기도 더욱 축소시킨 극초소형 마이크로컬럼(ultra-miniaturized microcolumn) 시스템 관련 연구가 진행되고 있고, 관측시야(field of view, FOV) 전영역에서 10 nm 미만 크기의 전자빔 프로브(e-beam probe)가 구현되어 분해

†E-mail: ots99@sunmoon.ac.kr

능이 향상되고 있다[15-21]. 그러나 극초소형 마이크로컬럼의 공간적인 제한으로 인해 전자빔 프로브가 타겟면(target, T)의 주변부로 스캔되어질 때에 발생하는 비점수차에 의한 왜곡현상을 보정하기 위한 별도의 장치가 적용되지 않고 있기 때문에 선행 연구들에서 달성한 최대 관측시야(FOV)는 작업거리(working distance, W)가 4mm일 때 $332.3 \mu\text{m}$ 이하 정도 이다[8, 16, 17, 21].

본 연구에서는 관측시야의 확대를 위해 본 연구의 선행 연구[21]에서 도출한 극초소형 마이크로컬럼 구조를 개선하여 제어전극(limiter, S_3)과 디플렉터(deflector, D) 사이에 비점수차를 보정하기 위한 정전형 8중극(electrostatic octupole, EO) 전극 구조의 비점수차 보정기(stigmator, S_m)를 추가로 설치하여 그 작동 여부를 검토하였다. 또한 비점수차 보정기(S_m)의 추가 적용으로 인해 증가되어지는 배선의 수를 고려하여 디플렉터(D)의 구조가 비교적 단순한 단일 정전형 4중극 디플렉터(single electrostatic quadrupole deflector, SEQD)를 적용하였다. 새로이 고안된 구조 설계를 검증하기 위하여 상용화된 3차원 시뮬레이터인 Opera(ver. 15R2)의 SCALA 모듈을 이용하여 수치 해석하였다. 본 연구에서 사용한 시뮬레이터의 수치해석의 정확성 및 타당성에 대해서는 5 mm급 초고해상도를 구현하기 위한 극초소형 마이크로컬럼용 전자렌즈와 디플렉터 설계 관련 선행 연구들에서 검증하였다[16, 17].

2. 마이크로컬럼의 구조 설계 및 모델링

2.1 마이크로컬럼 구조

Fig 1은 기존의 초소형 마이크로컬럼과 극초소형 마이크로컬럼 및 본 연구에서 검토한 비점수차 보정기(S_m)를 갖는 극초소형 마이크로 컬럼의 구조를 3차원 시뮬레이터로 모델링한 것이다. Fig 1(a)는 소스렌즈(source lens)부와 아인즐 렌즈(einzel lens)부 사이에 단일 정전형 8중극 디플렉터(single electrostatic octupole deflector, SEOD)를 갖는 개발 초기의 초소형 마이크로컬럼 구조에서 전자빔 프로브가 타겟면(T)의 주변부로 편향될 때에 발생하는 형상왜곡 문제를 개선하기 위해서 2중 정전형 8중극 디플렉터(double electrostatic octupole deflector, DEOD)를 적용한 구조이다[7-9]. 이 구조에서는 전자빔 프로브가 타겟면 (T)의 주변부로 편향되는 경우에도 전자빔의 궤적이 아인즐렌즈(E_2)의 중심축을 통과하도록 작동 되기 때문에 전자빔 프로브의 형상왜곡이 어느 정도 개선되었다.

참고문헌[8]에서 Fig 1(a) 구조를 4 mm의 작업거리 (W)에서 가속모드(accelerating mode)의 아인즐 렌즈로 작동시킨 결과, 타겟면(T) 중앙부에서 약 28 nm 크기의 전자빔 프로

브 형성과 직경 $142 \mu\text{m}$ 의 관측시야(FOV)를 구한 것으로 보고되었다. 초소형 마이크로컬럼 시스템에서 관측시야(FOV)를 평가하는 기준은 편향된 전자빔 프로브의 크기가 타겟면(T) 중앙부에서의 전자빔 프로브 크기 대비 120% 이하인 위치까지를 관측시야 (FOV)로 엄격하게 정의하고 있다[5, 7, 8].

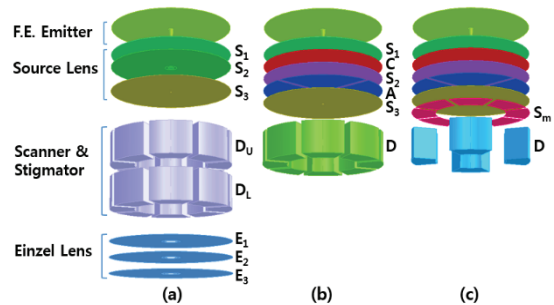


Fig. 1. Configuration of the microcolumn structures (a) Miniaturized microcolumn with Double electrostatic octupole deflector and einzel lens. (b) Ultra-miniaturized microcolumn with electrostatic octupole deflector (c) Ultra-miniaturized microcolumn with electrostatic octupole stigmator and electrostatic quadrupole deflector.

또한 상기의 참고문헌들에서 검토된 초소형 마이크로컬럼 구조의 모식도들에는 단일 혹은 2중 정전형 8중극 디플렉터(SEOD or DEOD)가 비점수차 보정기(S_m)의 기능도 하는 것처럼 표기되어 있지만 실제로 작동된 결과를 보고한 사례는 확인할 수 없었다.

Fig 1(b)는 본 연구의 선행 연구에서 검토한 극초소형 마이크로컬럼 구조를 모델링한 것으로, 집속전극(condensor, C)을 인출전극(extractor, S_1)과 가속전극(accelerator, S_2) 사이에 설치하여 기존 초소형 마이크로컬럼 구조에서 아인즐렌즈(E_1, E_2, E_3)와 디플렉터 1개를 제거한 구조를 모델링한 것이다. 또한 집속전극(C)과 제어전극(S_3) 사이에 정렬기(aligner, A)를 설치하여 조립 정밀도에 의해 발생하는 전자빔 궤적의 초기 정렬도를 조정할 수 있게 하였다. 게다가 단일 정전형 8중극 디플렉터(SEOD)를 제어전극(S_3)의 출구측에 설치하여 그 전체 크기를 기존의 초소형 마이크로컬럼 대비 1/2 정도의 크기로 축소시킨 극초소형 마이크로 컬럼 구조를 모델링한 것이다. 이 구조에서는 타겟 중앙부에서 약 8.08 nm 크기의 전자빔 프로브가 형성되었고, 대각방향 관측시야(FOV)가 $332.3 \mu\text{m}$ 정도로 확장되었다[21].

Fig 1(c)는 본 연구에서 검토한 비점수차 보정기(S_m)가

내장된 극초소형 마이크로컬럼의 구조를 모델링한 것으로, 기존의 초소형 마이크로컬럼 시스템 구조와 비교하여 그 설계요소들을 Table 1에 비교하여 나타내었다.

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

	Typical System	New System
Electrode Aperture Diameter (μm)	Extractor (S_1)	5
	Condensor (C)	50
	Accelerator (S_2)	100
	Limiter (S_3)	2.5
	Aligner (A)	400
	Deflector (D)	1000
	Stigmator (S_m)	1000
Electrode Spacing (μm)	Einzel Lens (E)	100-200
	$S_1 - S_2$	200
	$S_1 - C$	200
	$C - S_2$	200
	$S_2 - S_3$	400
	$S_2 - A - S_3$	200/200
	$S_3 - D_m$	Variable
	$S_3 - S_m - D$	200/300
	D - E	Variable
	E1-E2-E3	100-250

Fig. 1(b)와 (c)의 극초소형 마이크로컬럼 구조에서 소스 렌즈를 구성하는 전극들의 두께는 모두 $2\ \mu\text{m}$ 이고, 각 전극간의 간격은 $200\ \mu\text{m}$ 이다. 전극 조립시의 정렬 정밀도를 감안하여 인출전극(S_1), 집속전극(C), 가속전극(S_2)의 전자빔 통과공의 직경을 $50\ \mu\text{m}$ 로 동일하게 설정하였다. 또한 $10\ \text{nm}$ 이하의 분해능 구현을 고려하여 제어전극(S_3)의 전자빔 통과공의 직경을 $2.5\ \mu\text{m}$ 로 설정하였다. 정렬기(A)는 정전형 4중극(EQ) 전극 구조로 설계하였으며, 전자빔의 집속에 영향을 미치지 않도록 내경을 $400\ \mu\text{m}$ 로 크게 형성하였다. Fig. 1(c)의 비점수차 보정기(S_m)를 구성하는 전극들의 두께는 $4\ \mu\text{m}$ 이고, 제어전극(S_3)과 비점수차 보정기(S_m) 사이의 간격(S_3-S_m)은 $200\ \mu\text{m}$ 로, 비점수차 보정기(S_m)와 디플렉터(D) 사이의 간격(S_m-D)은 $300\ \mu\text{m}$ 로 각각 설정하였다.

2.2 디플렉터와 비점수차 보정기의 구조

본 연구에 적용한 비점수차 보정기(S_m)는 Fig. 2(a)와 같은 정전형 8중극(EQ) 전극 구조로 설계하였으며, 대칭적으로 동작되도록 각 전극의 형성 각도(θ)를 45° 로 설정하였고, 내경은 정렬기(A)와 동일하게 $400\ \mu\text{m}$ 로 적용하여 검토한 결과에 의하면 디플렉터(D)에 미치는 영향으로 인해 편향 거리가 좁아졌기 때문에 디플렉터(D)의 내경과 동일하게 $1200\ \mu\text{m}$ 로 설계하였다.

디플렉터(D)를 구성하는 전극들의 두께는 모두 $500\ \mu\text{m}$ 이고, 비점수차 보정기(S_m)의 추가 설치로 인한 배선 수의

증가를 감안하여 Fig. 2(b)와 같이 구조가 비교적 단순한 정전형 4중극(EQ) 전극 구조를 적용하였으며 각 전극의 형성각도(θ)를 45° 로 설정하였다. 본 연구의 선행 연구에서 정전형 4중극 디플렉터(EQD)와 정전형 8중극 디플렉터(EOD)의 기본적인 특성이 연구되었다. 참고문헌[19]에서는 스캔 영역과 디플렉터의 전기장의 변화를 조사하여 정전형 8중극 디플렉터(EOD)에 비해 정전형 4중극 디플렉터(EQD)의 전기장의 세기가 더 강하고 스캔 영역도 그에 따라 더 커지는 것으로 분석되었다. 그렇지만 참고문헌[21]에서는 각 전극의 형성 각도(θ)가 45° 인 경우에 정전형 4중극 디플렉터(EQD45)와 정전형 8중극 디플렉터(EOD45)의 대각방향 4개 전극을 플로팅(floating)시켜 구동한 결과, 관측시야(FOV)가 각각 $272.3\ \mu\text{m}$ 와 $295.5\ \mu\text{m}$ 로 EQD45가 약 $23.2\ \mu\text{m}$ 정도 좁아지는 것을 확인하였다.

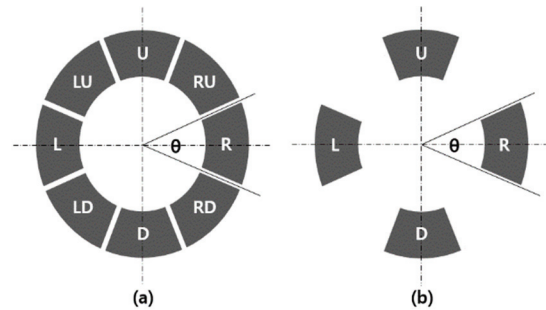


Fig. 2. Configuration of (a) the electrostatic octupole stigmator, and (b) the electrostatic quadrupole deflector.

그래서 본 연구에서는 전자빔이 편향될 때 발생하는 비점수차에 의한 전자빔의 왜곡현상을 최소화하여 더 넓은 관측시야(FOV)를 확보하는 것이 목적이므로 관측시야(FOV) 특성에는 다소 불리하지만 구조가 단순하고 각 전극의 형상이 대칭적으로 구성되는 EQD45를 적용하여 EOS45의 동작 특성을 검토하였다.

2.3 비점수차 보정기를 갖는 극초소형 마이크로컬럼의 구동 방법

Fig. 3은 비점수차 보정기(S_m)를 갖는 극초소형 마이크로컬럼 시스템의 구조를 3차원으로 모델링하여 전자빔의 궤적을 수치해석 시뮬레이션한 결과를 나타낸 것으로, EOS45가 제어전극(S_3)과 EQD45 사이에 설치되어져 있다. 또한 집속전극(C)과 제어전극(S_3)사이에는 전극의 형성각도(θ)가 90° 인 정전형 4중극 정렬기(EQA90)가 설치되어져 있다.

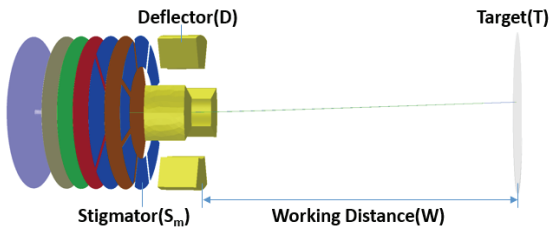


Fig. 3. Modelling of three dimensional structures of ultra-miniaturized microcolumn with electrostatic octupole stigmator (EOS45) and electrostatic quadrupole deflector (EQD45).

그리고 디플렉터(D) 출구에서 타겟면(T)까지의 전자빔 궤적거리를 작업거리(W)라 하며, 종래의 참고문헌들에 의한 검토결과 및 본 연구의 선행 검토결과와 비교 가능하도록 4 mm로 설정하였다. 타겟면(T)의 중앙부에서 전자빔 프로브를 최적의 집속상태로 구동시키기 위해서 전계 전자 방출원 (F.E. emitter, E)에 -1,000 V, 인출전극(S₁)에 -735 V, 집속전극 (C)에 -870.852 V의 전압을 각각 인가하고 가속 전극(S₂), 제어전극(S₃). 타겟(T)에는 0 V를 각각 인가하였다.

먼저 전자빔의 궤적을 정렬기(A)로 타겟면(T)의 xy좌표 (0,0)에 근접하도록 조정한 후에 집속전극(C)의 전압을 최적의 집속상태로 설정하였고, 다음으로 디플렉터(D)에 편향 구동전압 (V_D)을 0 V에서 ±50 V까지 10씩 증가시키면서 비점수차 보정기(S_m)의 대각방향 4개의 전극(RU/LU/RD/LD)에 비점수차 보정전압(V_s)을 인가하면서 전자빔 프로브의 특성 변화를 검토하였다.

3.3차원 시뮬레이션 검토 결과 및 토론

3.1 비점수차 보정기의 동작 검토

Fig 4는 EQD45만을 내장한 극초소형 마이크로컬럼 구조와 EOD45만을 내장한 극초소형 마이크로컬럼 구조 및 EOS45와 EQD45를 모두 내장한 극초소형 마이크로컬럼 구조를 3차원 모델링하여 EOS45에 비점수차 보정전압(V_s)이 인가되지 않은 경우에 타겟면(T)의 xy좌표 1사분면(first quadrant of xy coordinates)에서만 수치해석하여 기본적인 특성을 비교한 것이다.

이 그래프의 우측 y축에 나타난 전자빔 프로브의 크기는 수치해석 결과에 의해 타겟면(T)에 탄착되어지는 528 개의 전자(electron)들의 위치 분포에 의해 결정되는 것으로, 탄착균을 형성하는 전자들의 위치 분포는 일반적으로 가우시안 프로파일 분포(Gaussian profile distribution)를 나타내기 때문에 그 가우시안 분포의 반치폭(full width at half

maximum, FWHM)을 전자빔 프로브의 크기로 정의한 것이다[16].

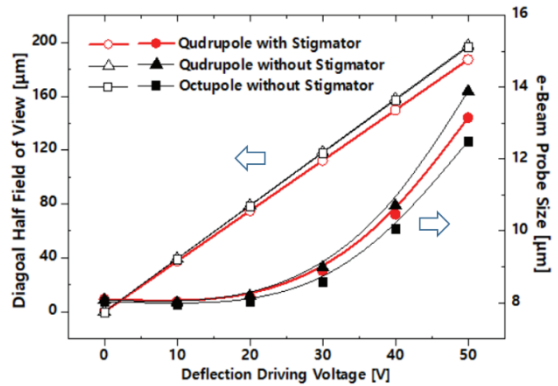


Fig. 4. The diagonal half field of view and e-beam probe size according to the types of deflector and applying a stigmator by the numerical analysis simulation.

Fig 4의 그래프에서 보는 바와 같이 타겟면(T)의 중앙에서는 디플렉터(D)의 종류나 비점수차 보정기(S_m)의 적용 유무에 관계없이 약 8.08~8.1 nm 정도의 거의 유사한 전자빔 프로브 크기가 형성되어지지만 전자빔 프로브가 대각 방향으로 스캔되어짐에 따라서 편향거리와 전자빔 프로브의 크기가 달라지는 것을 확인할 수 있다. EQD45구조는 EOD45구조의 대각방향 4개의 전극을 플로팅(floating)시킨 경우와 EQD45 구조의 경우에 대각방향 편향거리가 거의 유사하여 편향 구동전압(V_D)이 ±50 V일 때 약 394 (197×2) μm 정도의 대각 편향거리를 나타내었고, 본 연구에서 검토하는 EOS4와 EQD4를 모두 갖는 EOS4+EQD4구조에서는 대각 편향거리가 약 374 (187×2) μm 로 20 μm 정도 좁은 특성을 나타내었다. 반면에 편향된 전자빔 프로브의 크기는 EOD45 구조에서 가장 작게 나타났으며 EQD45 구조에서 가장 크게 나타났다. 이 실험 결과에 의해 앞에서 언급한 평가 기준을 만족하는 관측 시야 (FOV)를 계산해 보면, EOD45 구조는 295.5 (147.77×2) μm, EQD45구조는 272.3 (136.16×2) μm, EOS45+EQD45 구조는 264.2 (132.1×2) μm로 구해지므로 EOS45+EQD45구조에 비점수차 보정전압 (V_D)이 인가되지 않은 경우에서 가장 좁은 특성을 나타내었다.

Fig 5는 본 연구의 EOS45+EQD45 구조를 이용하여 타겟면(T)의 xy좌표 1사분면에서 편향 구동전압(V_D)별로 최적의 비점수차 보정전압(V_s)과 비점수차 보정전압(V_s)의 인가 유무에 따른 전자빔 프로브의 크기 변화를 수치해석하여 검토한 것이다.

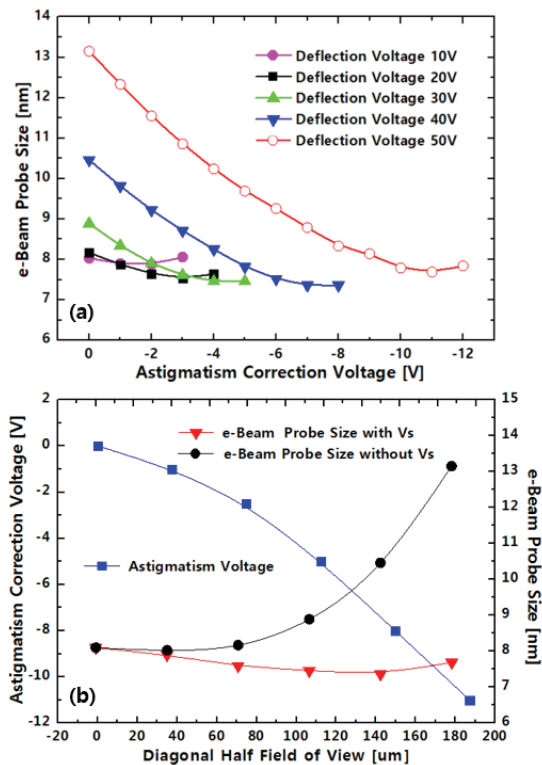


Fig. 5. Plottings of the e-beam probe size at first quadrant of xy coordinates according to (a) astigmatism correction voltage at each deflection voltage, and (b) diagonal half field of view size under with/without astigmatism correction voltage.

Fig. 5(a)는 편향 구동전압(V_D)별로 비점수차 보정전압(V_s)을 가변시켰을 때 전자빔 프로브의 크기가 변화되어지는 현상을 프로팅한 것으로, 전자빔 프로브의 크기가 최소로 되는 최적 비점수차 보정전압(V_s)이 존재하고, 편향 구동전압(V_D)이 높아질수록 비점수차의 영향이 점차 강해지기 때문에 비점수차 보정전압(V_s)이 높아지는 경향을 나타낸다. 이 검토 결과에 의하면 편향 구동전압(V_D)이 10 V/20 V/30 V/40 V/50 V일 때 각각의 편향지점에서 전자빔 프로브의 크기가 최소로되어지는 최적의 비점수차 보정전압(V_s)은 -1.0 V/-3.0 V/-5.0 V/-8.0 V/-11.0 V인 것으로 확인되었다.

Fig. 5(b)는 비점수차 보정전압(V_s)의 인가 유무에 의한 전자빔 프로브의 크기를 대각 편향거리에 따라 비교하여 나타낸 것이다. 비점수차 보정전압(V_s)이 인가되지 않은 경우는 대각 편향거리에 따라 전자빔 프로브의 크기가 급격히 증가하지만, 비점수차 보정전압(V_s)이 인가되는

경우는 타겟면(T) 중앙부의 전자빔 프로브의 크기보다도 작아지면서 거의 일정하게 유지되는 경향을 나타내고 있다. 따라서 비점수차 보정전압(V_s)이 인가되지 않은 경우의 관측시야(FOV)는 편향거리보다도 좁은 약 264.2 (132.1×2) μm 정도이지만, 비점수차 보정전압(V_s)이 인가되는 경우는 편향거리에 해당하는 374.4 (187.2×2) μm 정도로 확대되어지는 것을 확인하였다.

Fig. 6은 Fig. 5(b)의 수치해석 결과에 의한 전자빔 프로브의 형상과 크기의 변화를 타겟면(T)의 xy좌표 1사분면에 약 700배 확대하여 나타낸 것이다. Fig. 6(a)는 0 V/20 V/30 V/40 V/50 V의 편향 구동전압(V_D)을 각각 인가하여 전자빔 프로브를 타겟면(T)의 대각방향 우상단 지점으로 편향시킬 때 비점수차 보정전압(V_s)이 인가되지 않은 경우를 나타낸 것으로 대각 방향으로 편향거리가 증가할수록 전자빔 프로브의 형상왜곡이 점차적으로 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 반면에 Fig. 6(b)는 Fig. 5(a)에서 편향구동전압 (V_D)별로 각각 구한 -1.0 V/-3.0 V/-5.0 V/-8.0 V/-11.0 V의 비점수차 보정전압(V_s)을 각각 인가한 경우를 나타낸 것으로 편향거리가 증가하더라도 전자빔 프로브의 형상 왜곡 현상이 현저하게 약하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 전자빔 프로브가 타겟면(T)의 xy좌표 원점 (0,0)에서 위쪽 혹은 오른쪽 방향으로 편향되어질 때는 비점수차에 의한 왜곡 현상이 크게 나타나지 않는 것을 확인할 수 있으며, 편향 구동전압 (V_D)이 50 V일 때 132.35 μm 편향되어 (0,132.25) 지점 혹은 (132.25,0) 지점에서의 전자빔 프로브의 크기는 각각 7.54 nm와 7.61 nm로 비점수차의 보정을 하지 않아도 되는 상태인 것으로 확인하였다. 그래서 Fig. 6(b)의 경우에도 전자빔 프로브가 원점 (0,0)에서 위쪽 혹은 오른쪽 방향으로 편향되어질 때는 동일하게 비점수차 보정전압(V_s)을 인가하지 않았다.

Fig. 7은 전자빔 프로브가 타겟면(T)의 xy좌표 (132.35,0) 지점과 (0,132.35) 지점에서 (132.35, 132.35) 지점으로 각각 편향되어지는 경우를 수치해석하여 타겟면(T)의 주변부에서 비점수차의 영향을 검토한 것이다. Fig. 7(a)는 수평 편향 구동전압 (V_{Dx})을 50 V로 고정하고 수직 편향 구동전압(V_{Dy})을 0 V에서 50V까지 10 V씩 증가시키면서 비점수차 보정전압(V_s)의 인가 유무에 따른 전자빔 프로브의 크기를 나타낸 것이다. 이때 비점수차 보정전압(V_s)은 수직 편향 구동전압(V_{Dy})별로 -1.0 V/-3.0 V/-5.0 V/-8.0 V/-11.0 V를 각각 인가하였다. 비점수차 보정전압(V_s)이 인가되지 않은 경우는 (132.35,0) 지점에서 (132.35, 132.35) 지점으로 편향됨에 따라 전자빔 프로브의 크기가 증가하지만 비점수차 보정전압(V_s)이 인가되는 경우는 7.6 nm~7.8 nm 정도로 유지되었다.

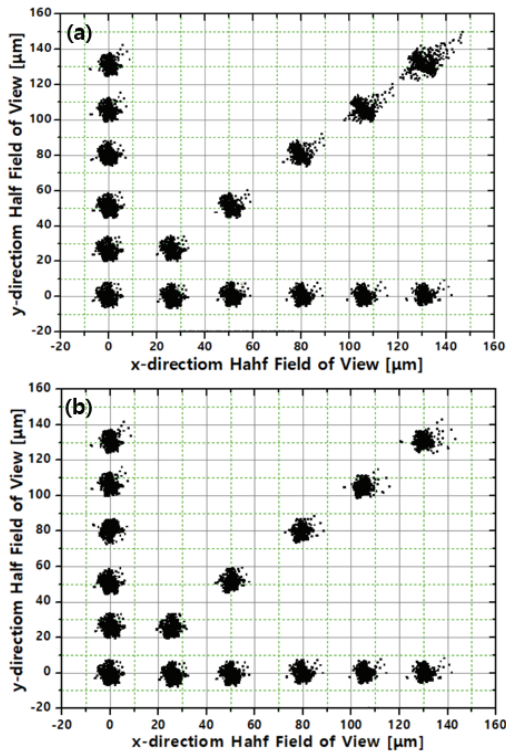


Fig. 6. The shapes of deflected e-beam probe at first quadrant of xy coordinates under deflection driving voltage from 0V to 50 V (a) without astigmatism correction voltage, and (b) with astigmatism correction voltage.

Fig 7(b)는 수직 편향 구동전압(V_{Dy})을 50 V로 고정하고 수평 편향 구동전압(V_{Dx})를 0 V에서 50 V까지 10 V씩 증가시키면서 비점수차 보정 전압(V_s)의 인가 여부에 따른 전자빔 프로브의 크기를 나타낸 것이다. 이때 비점수차 보정 전압(V_s)은 수평 편향 구동전압(V_{Dx})별로 -1.0 V/-3.0 V/-5.0 V/-8.0 V/-11.0 V를 각각 인가하였다. 그래프에서 비점수차 보정전압(V_s)이 인가되지 않은 경우에는 (0, 132.35) 지점에서 (132.35, 132.35)으로 편향됨에 따라 전자빔 프로브의 크기가 증가하지만 비점수차 보정전압(V_s)이 인가되는 경우에는 7.5 nm~7.6 nm 정도로 유지되었다.

그리고 Fig 5와 Fig 6, Fig 7을 수치해석한 동일한 동일한 방식으로 타겟면(T)의 나머지 3개의 xy좌표 사분면에서도 최적의 비점수차 보정전압(V_s)을 구해 본 결과, 전자빔 프로브가 ± 50 V의 편향 구동전압(V_D)에 의해 대각방향으로 편향되어 좌상단 (-132.35,132.35) 지점에서는 -7.0 V, 우하단 (132.35,-132.35) 지점에서는 -7.0 V, 좌하단 (-132.35,-132.35) 지점에서는 -9.0 V가 최적의 비점수차 보정전압(V_s)임을 확인하였다.

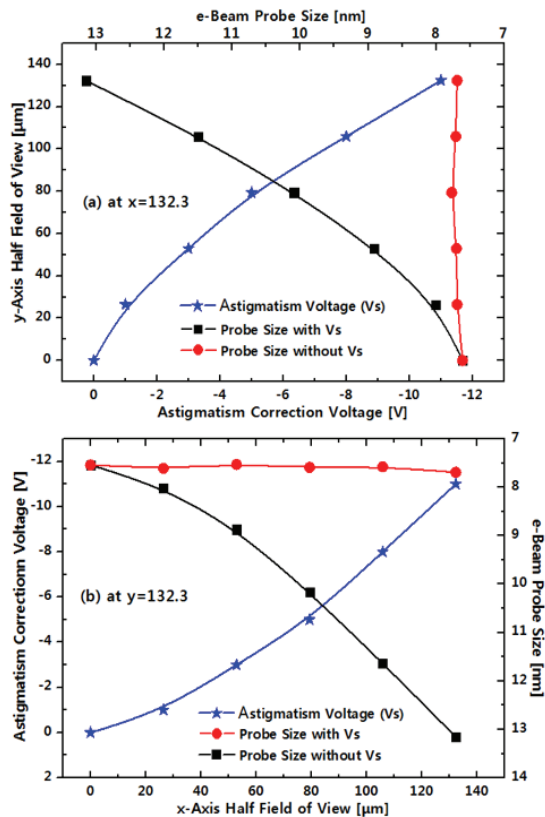


Fig. 7. The deflected e-beam probe size at first quadrant of xy coordinates by (a) vertical deflecting under the fixed horizontal deflection voltage of 50 V, and (b) horizontal deflecting under the fixed vertical deflection voltage of 50 V.

Fig 8은 편향 구동전압(V_D)가 ± 50 V일 때 타겟면(T)의 xy 좌표 전체 사분면(all quadrants of xy coordinates)에서 비점수차 보정전압(V_s)의 인가 유무에 따라 나타나는 편향된 전자빔 프로브의 형상과 크기의 변화를 약 4000배로 확대하여 나타낸 것이다. Fig 8(a)는 비점수차 보정기(S_m)에 비점수차 보정 전압(V_s)이 인가되지 않은 상태를 나타낸 것으로 대각방향으로 편향된 전자빔 프로브에서 왜곡 현상이 강하게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 전자빔 프로브가 타겟면(T)의 대각방향으로 편향되어질 경우에 디플렉터(D) 출구에서 타겟면(T) 중앙부까지의 집속거리와 대각 모서리부까지의 집속거리 차이로 인해서 발생하는 만곡수차(curvature of field)의 영향과 특히 전자빔 프로브의 x축과 y축의 집속거리 차이에 의해 발생하는 비점수차(astigmatism)의 영향을 강하게 받기 때문에 나타나는 기하광학적인 현상이다.

반면에 Fig 8(b)는 타겟면(T)의 대각방향으로 전자빔 프로브가 편향되는 경우에 각 지점에서 수치해석으로 구한 최적의 비점수차 보정전압(V_s)을 비점수차 보정기(S_m)에 각각 인가한 것으로 비점수차의 보정에 의해서 전자빔 프로브의 형상왜곡이 현저하게 저감되어진 것을 확인할 수 있다.

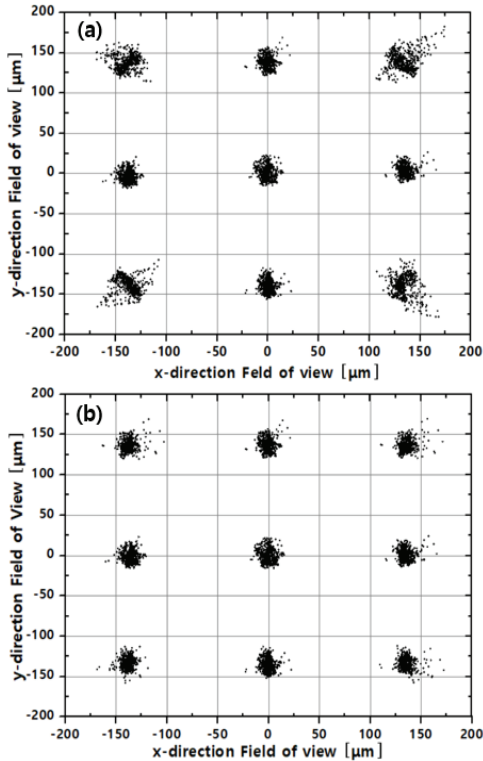


Fig. 8. The shapes of deflected e-beam probe under the deflection driving voltage at 0 V and ± 50 V at all quadrants of xy coordinates (a) without astigmatism correction voltage, and (b) with astigmatism correction voltage.

이 실험에서는 전자빔 프로브가 ± 50 V의 편향 구동전압 (V_d)에 의해 우상단 지점으로 편향될 때는 Fig 2(a)에 나타난 EOS45 구조의 좌상(LU) 전극과 우하(RD) 전극에 -11.0 V, 좌상단 지점으로 편향될 때는 우상(RU) 전극과 좌하(LD) 전극에 -7.0 V, 우하단 지점으로 편향될 때는 우상(RU) 전극과 좌하(LD) 전극에 -7.0 V, 좌하단 지점으로 편향될 때는 좌상(LU) 전극과 우하(RD) 전극에 -9.0 V의 비점수차 보정 전압(V_s)을 각각 인가하였고 나머지 전극들에는 0 V를 인가하였다. 그 결과, 전자빔 프로브의 크기가 우측상단 지점에서는 13.15 nm에서 7.69 nm로, 좌측상단 지점에서는 10.11 nm에서 7.31 nm로, 우측하단 지점에서는 10.91 nm에서 7.94

nm로, 좌측하단 지점에서는 11.48 nm에서 7.26 nm로 각각 축소되어 평균적으로 28.3%가 개선되었다.

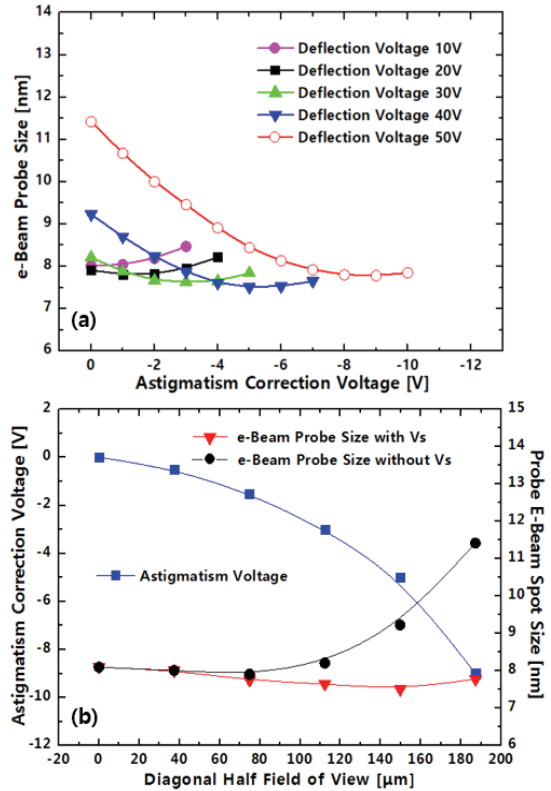


Fig. 9. Plottings of the average e-beam probe size according to (a) astigmatism correction voltage at each deflection voltage, and (b) diagonal half field of view size under with/without astigmatism correction voltage.

이처럼 Fig 6(b), Fig 7, Fig 8(b)의 실험결과에서 확인된 바와 같이 각각의 대각방향과 주변방향의 편향지점에서 각기 다른 최적의 비점수차 보정 전압(V_s)이 인가되는 경우는 비점수차에 의한 전자빔 프로브의 형상왜곡이 현저하게 약하게 나타났다. 그렇지만 타겟면(T) xy좌표의 4개 사분면에서 대칭적인 편향지점에 각기 다른 비점수차 보정 전압(V_s)이 인가되는 경우는 구동회로가 복잡해지기 때문에 이를 감안하여 대칭적인 동일 편향지점에서의 평균값을 구하여 공통적으로 적용하여 Fig 9와 같은 결과를 도출하였다.

Fig 9(a)는 타겟면(T)의 xy 좌표 4개 사분 면에서 편향 구동전압(V_d)별로 비점수차 보정전압 (V_s)을 각각 구하여 그 평균값에 대해 나타낸 것이다. 이 결과에 의하면 편향 구

동전압(V_D)이 10 V/ 20 V/30 V/40 V/50 V일 때 최적 비점수차 보정전압(V_S)의 평균값은 각각 -0.5 V/-1.5 V/-3.0 V/-5.0 V/-9.0 V를 나타내었다. Fig 9(b)는 편향 구동전압(V_D)별로 구한 평균 비점수차 보정전압 (V_S)의 인가 유무에 의한 전자빔 프로브의 크기를 대각 편향거리에 따라 비교하여 나타낸 것이다. 비점수차 보정전압(V_S)이 인가되지 않은 경우는 xy좌표 1사분면에서의 결과보다는 19.6% 정도가 확대된 약 316.2 (158.1×2) μm 의 관측시야(FOV)를 나타내었고, 비점수차 보정전압(V_S)이 인가되는 경우는 편향거리에 해당하는 374.4 (187.2×2) μm 이상을 구현할 수 있음이 확인 되었다.

Fig 10은 Fig 9의 결과에 의한 편향된 전자빔 프로브 형상을 타겟면(T)의 xy좌표 전체 사분면에 4000배로 확대하여 나타낸 것으로, 편향 구동전압(V_D)이 ± 50 V일때 원점(0,0)에서 대각방향으로 187.2 μm 편향된 우측상단 지점에서 전자빔 프로브의 크기는 8.14 nm, 좌측상단 지점에서는 7.58 nm, 우측하단 지점에서는 8.14 nm, 좌측하단 지점에서는 7.26 nm를 각각 나타내어 Fig 5(b)의 결과 보다는 전자빔 프로브의 크기가 평균적으로 3% 정도 확대되었지만 전체적으로 비점수차의 영향은 유사하게 약하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

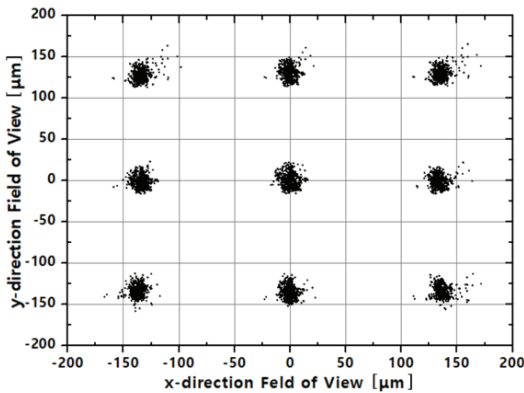


Fig. 10. The shapes of the e-beam spot with astigmatism correction voltage under the deflection driving voltage 0 V and ± 50 V at all quadrants of xy coordinates.

Fig 11은 본 연구에서 고안한 EOS45와 EQD45를 모두 내장한 EOS45+EQD45 극초소형 마이크로컬럼으로 구현할 수 있는 최대 관측시야 (FOV)를 구해 보기 위해서 전자빔 프로브의 현상왜곡이 가장 강하게 나타나는 타겟면(T)의 xy 좌표 1사분면에서 편향 구동전압(V_D)이 60 V와 70 V인 경우에 비점수차 보정전압(V_S)의 변화에 따른 전자빔 프로브의 크기 변화를 프로팅한 것이다. 이 결과에서 편향 구동전압(V_D)이 60 V 와 70 V일 때의 최적의 비점수차

보정전압(V_S)는 15.0 V와 19.0 V 로 각각 나타내었다.

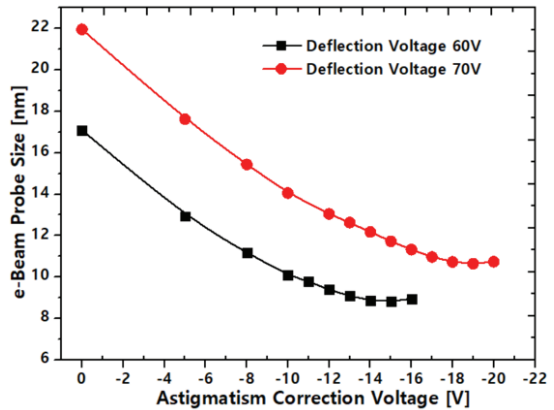


Fig. 11. Plotting of the optimum astigmatism driving voltage under deflection voltage 60 V and 70 V at first quadrant of xy coordinates.

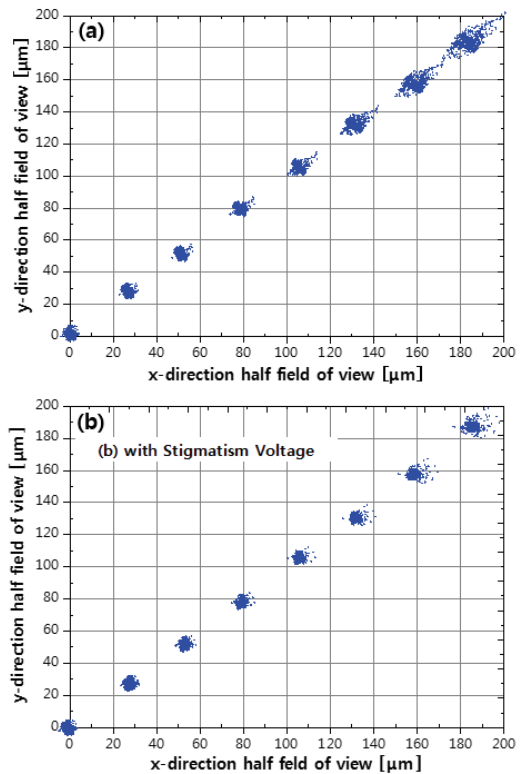


Fig. 12. The shapes of e-beam probe according to each diagonal half field of view size at first quadrant of xy coordinates under deflection driving voltage from 0V to 70 V (a) without astigmatism correction voltage, and (b) with astigmatism correction voltage.

Fig. 12는 Fig. 11의 실험결과에서 구한 최적 비점수차 보정전압(V_s)의 인가유무에 따른 전자빔 프로브 형상과 크기를 타겟면(T)의 xy 좌표 1사분면에 500배로 확대하여 나타낸 것이다. Fig. 12(a)에서 비점수차 보정전압(V_s)이 인가되지 않은 경우에 디플렉터의 편향 구동전압(V_D)이 60 V와 70 V로 증가할수록 전자빔 프로브의 형상 왜곡이 점차적으로 더 강하게 나타났다. 반면에 Fig. 12(b)는 Fig. 11에서 구한 비점수차 보정전압(V_s)이 인가된 경우를 나타낸 것으로, 편향된 전자빔 프로브의 크기는 편향 구동전압(V_D)이 60 V일 때는 17.1 nm에서 8.83 nm로, 편향 구동전압(V_D)이 70 V일 때는 21.96 nm에서 10.65 nm로 축소되었다. 이 검토 결과에서 대각방향으로 편향된 전자빔 프로브의 크기가 중앙부 전자빔 프로브의 크기인 8.1 nm 대비 120% 인 9.72 nm의 크기 이하로 구현되는 지점까지의 관측시야(FOV)는 486.2 μ m 정도까지 대폭 확대되어짐을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 정전형 8중극 비점수차 보정기(EOS45)와 정전형 4중극 디플렉터(EQD45)를 적용한 새로운 극초소형 마이크로컬럼 구조를 고안하여 그 구동 특성을 3차원 수치 해석으로 검토한 결과, 정전형 8중극 비점수차기(EOS45)의 동작이 본 연구에서의 설계 목적대로 정상적으로 작동되는 것을 검증하였고, 각 편향지점에서의 비점수차 보정전압(V_s)을 구하여 그 평균전압을 편향구동전압(V_D)에 따라 비점수차 보정기(EOS45)에 동적(dynamic)으로 인가시킴으로써 선행 검토에서 구하였던 332.3 μ m의 대각 관측시야에 비해 약 46.3% 정도가 확장되어진 486.2 μ m의 매우 넓은 관측시야를 구현하였다. 본 연구 결과는 정전형 초소형 전자컬럼의 근본적인 단점으로 알려져 있는 단위 시간당 처리 속도(throughput)를 대폭 개선할 수 있는 방안을 제시하는 것으로 향후 이 연구결과를 응용한 다양한 활용 방안들이 제안될 것으로 기대되어진다.

참고문헌

1. Chang, T. H. P., Kern, D. P., and McCord, M. A., "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. Muray, L. P., Staufner, U., Kern, D. P., and Chang, T. H. P., "Performance measurements of 1-keV electron-beam microcolumn", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol.10, No.6, pp.2749-2753, 1992.
3. Chang, T. H. P., Muray, L. P., Staufner, U., and Kern, D. P., "A scanning tunneling microscope based microcolumn system", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.31, No.12B, pp.4232-4240, 1992.
4. Kratschmer, E., Kim, H. S., Thomson, M. G. R., Lee, K. Y., Rishton, S. A., Yu, M. L., and Chang, T. H. P., "Sub40 nm resolution 1 keV scanning tunneling microscope field emission microcolumn", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol.12, No.6, pp.3503-3507, 1994.
5. Thomson, M. G. R., and Chang, T. H. P., "Lens and deflector design for microcolumns", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol.13, No.6, pp.2445-2449, 1995.
6. Kratschmer, E., Kim, H. S., Thomson, M. G. R., Kratschmer, E., Yu, M. L., Lee, K. Y., Rishton, S. A., and Chang, T. H. P., "An electron-beam microcolumn with improved resolution, beam current, and stability", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol.13, No.6, pp.2498-2503, 1995.
7. Chang, T. H. P., Thomson, M. G. R., Kratschmer, E., Kim, H. S., Yu, M. L., Lee, K. Y., Rishton, S. A., Zolgharnain, S., and Hussey, B. W., "Electron-beam microcolumns for lithography and related applications", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol.14, No.6, pp.3774-3781, 1996.
8. Kratschmer, E., Kim, H. S., Thomson, M. G. R., Lee, K. Y., Rishton, S. A., Yu, M. L., Hussey, B. W., and Chang, T. H. P., "Experimental evaluation of a 20 \times 20 mm footprint microcolumn", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol.14, No.6, pp.3792-3796, 1996.
9. Stebler, C., Staufner, T., and de Rooij, N. F., "Microfabricated double layer octupoles for microcolumn applications", *Microelectronic Engineering*, Vol.46, pp.401-404, 1999.
10. Saini, R., Jandric, Z., Tsui, K., Udeshi, T., and de Rooij, N. F., "Manufacturable MEMS microcolumn", *Microelectronic Engineering*, Vol.78-79, pp.62-72, 2005.
11. Oh, T. S., Kim, D. W., Ahn, S.-J., Kim, Y. C., Ahn, S. J., and Kim, H. S., "Optimization of electrostatic lens systems for low-energy scanning microcolumn applications", *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol.26, No.6, pp.1443-1449, 2008.
12. Silver, C. S., Spallas, J. P., and Muray, L. P., "Variable probe current using a condenser lens in a miniature electron beam column", *Proc. of SPIE*, Vol.7378, pp.787810 (1-7), 2009.
13. Oh, T. S., Jin, S. W., Choi, S. K., Kim, Y. C., Kim, D. W., Ahn, S.-J., Lee, Y. B., and Kim, H. S., "Experimental Study on the Operation of a Keyhole-Shaped Lens in a Microcolumn", *J. of the Optical Society of Korea*, Vol.15, No.4, pp.368-372, 2011.
14. Oh, T. S., Kim, D. W., Ahn, S.-J., Jang, W. K., and Kim, H. S., "Improvement of the Probe Current in a Microcolumn by Introducing a Subsidiary Electrode in a Source Lens", *J. of the Korea physical Society*, Vol.63, No.6, pp.1128-1133, 2013.

15. Kim, Y. C., Ahn, S-J, Oh, T. S., Kim, D. W., Jang, W. K., and Kim, H. S., "Low energy microcolumn for large field view inspection", *Ultramicroscope*, Vol.111, pp.1645-1649, 2011.
16. Oh, T. S., Kim, D. W., Ahn, S-J., and Kim, H. S., "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.
17. Oh, T. S., Kim, H. S, Ahn, S-J., and Kim, D. W., "Design of an ultra-miniaturized electron optical microcolumn with sub-5 nm very high resolution", *Ultramicroscope*, Vol.136, pp.171-175, 2014.
18. Kim, H. S., Lee, Y. B., Choi, S. W., Kim, H. W., Kim, D. W., Ahn, S-J., Song, H., Park, B. C., and Lim, S. J., "Development of arrayed microcolumns and field emitters", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.56, pp.06GA02(1-8), 2017.
19. Kim, Y. C., Kim, H. S., Ahn, S-J., Oh, T. S., Ahn, S. J., and Kim, D. W. "Study on the Scan Field of Modified Octupole and Quadrupole Deflector in a Microcolumn", *J. of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.19, No.11, pp.1-7, 2018.
20. Kim, H. W., Lee, Y. B., Kim, D. W., Ahn, S-J., Oh, T. S., Kim, H. S, and Kim, Y. C., "Variations of the field of view depending on the Si deflector shape in a microcolumn", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol.36, No.6, pp.06J902(1-6), 2018.
21. Lee, H. W., Lee, Y. B., and Oh, T. S., "Study on an Electrostatic Deflector for Ultra-miniaturized microcolumn to Realize sub-10 nm Ultra-High Resolution and Wide Field of View", *J. of The Korean Society of Semiconductor & Display Technology*, Vol. 20, No. 4, pp. 29-37, 2021.

접수일: 2023년 8월 3일, 심사일: 2023년 9월 5일,
 게재확정일: 2023년 9월 12일