

마이크로칼럼에서 변형된 4중극 디플렉터와 8중극 디플렉터의 스캔 영역 비교

김영철¹, 김호섭², 안승준², 오태식², 김대욱^{2*}
¹울지대학교 안경광학과, ²선문대학교 정보디스플레이학과

Study on the Scan Field of Modified Octupole and Quadrupole Deflector in a Microcolumn

Young Chul Kim¹, Ho-Seob Kim², Seong Joon Ahn², Tae-Sik Oh², Dae-Wook Kim^{2*}

¹Department of Optometry, Eulji University

²Department of Information Display, Sun Moon University

요 약 마이크로칼럼에서는 전자빔을 스캔하기 위해 초소형화된 정전디플렉터를 사용하는 경우가 많다. 주로 두 개의 8중극 디플렉터(double octupole deflector)를 사용하는 경우가 많은데, 이는 스캔 영역을 넓게 하면서도 전자빔이 대물렌즈를 통과할 때에 광축 근처에 위치하도록 함으로써 수차를 작게 유지할 수 있는 장점이 있기 때문이다. 마이크로칼럼은 최종적으로는 멀티 칼럼 형태로 사용하여 전자빔 장비의 throughput을 높이하고자 하는 목적으로 연구가 되고 있는데, 칼럼의 수가 많아지게 되면 각 부품에 연결되는 배선의 수도 함께 증가하게 된다. 이에 따라 정전렌즈, 디플렉터 등의 마이크로칼럼 부품 배선을 진공 챔버 밖에 있는 제어장비와 연결하는 과정에서 실질적인 문제에 봉착하게 된다. 이러한 문제를 완화하기 위하여 렌즈 수를 최소화할 수 있도록 대물렌즈를 제거한 마이크로칼럼 구조를 선택하여, 변형된 4중극 및 8중극 디플렉터의 동작을 전산 모사 방법으로 연구하였다. 기본적으로 MEMS 공정을 적용하기 용이한 실리콘 디플렉터 구조에서 각 전극의 크기를 동일하게 하지 않고, 서로 다른 크기의 전극을 교대로 배치하도록 디자인하였다. 8중극과 4중극 디플렉터 각각에서 디플렉터 전압을 인가하는 구동전극의 크기에 변화를 주었을 때 스캔 영역과 디플렉터 중심점에서의 전기장의 변화를 조사하여 비교하였다. 스캔 영역은 디플렉터전압에 따라 선형적으로 비례하였다. 스캔영역과 중심점에서의 전기장 세기 모두 8중극 디플렉터에 비해 4중극 디플렉터에서 더 크게 나타났으며, 전극의 크기에 따라 약 1.3 ~ 2.0 배 큰 것으로 조사되었다.

Abstract In a microcolumn, a miniaturized electrostatic deflector is often adopted to scan an electron beam. Usually, a double octupole deflector is used because it can avoid excessive spherical aberrations by controlling the electron beam path close to the optical axis of the objective lens and has a wide scan field. Studies on microcolumns have been performed to improve the low throughput of an electron column through multiple column applications. On the other hand, as the number of microcolumns increases, the number of wires connected to the components of the microcolumn increases. This will result in practical problems during the process of connecting the wires to electronic controllers outside of the vacuum chamber. To reduce this problem, modified quadrupole and octupole deflectors were examined through simulation analysis by selecting an ultraminiaturized microcolumn with the Einzel lens eliminated. The modified deflectors were designed changing the size of each electrode of the conventional Si octupole deflector. The variations of the scan field and electric field strength were studied by changing the size of active electrodes to which the deflection voltage was to be applied. The scan field increased linearly with increasing deflection voltage. The scan field of the quadrupole deflector and the electric field strength at the center were calculated to be approximately 1.3 ~ 2.0 times larger than those of the octupole deflector depending on the electrode size.

Keywords : MEMS, Microcolumn, Octupole deflector, Quadrupole deflector, Scan field

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018R1D1A1B07046695).

*Corresponding Author : Dae-Wook Kim(Sun Moon Univ.)

Tel: +82-41-530-2235 email: phykdw@sunmoon.ac.kr

Received August 2, 2018

Revised August 31, 2018

Accepted November 2, 2018

Published November 30, 2018

1. 서론

마이크로칼럼은 높이와 직경이 각각 2 cm 이하로 초소형화된 전자칼럼으로, 여러 개의 마이크로칼럼을 병렬로 사용할 수 있어서 MAPPER 등의 multi-beam system과 함께 전자빔 장비의 throughput 문제를 해결할 수 있는 대안 중의 하나로 연구되어 왔다[1-3]. 마이크로 칼럼을 형성하는 주요 부품들은 초소형 전자방출원, 소스렌즈(source lens), 아인즐렌즈(Einzel lens), 디플렉터 등이다. 전자방출원은 다양한 재질의 전계방출원, 열전계방출원 등이 사용된다. 전자렌즈에는 자기렌즈 혹은 정전렌즈가 사용되며, 디플렉터는 폴리브덴 봉이나 실리콘 디플렉터 등이 사용되어 왔다[4-5].

기본적으로 이러한 부품들은 모두 전기적 신호에 의해 제어되므로 각 부품의 전극에는 전기적 제어장치와 연결되는 배선이 배치되어야만 한다. 병렬로 배치된 다수의 마이크로칼럼을 동시에 동작시키기 위해서는 배선의 숫자도 함께 증가되어야 한다. 그러나 실제적으로 진공 내의 마이크로칼럼에서 외부의 제어장치에 연결할 수 있는 배선의 수는 feedthrough의 구조에 의해 제한을 받을 수밖에 없다. 8중극 디플렉터(octupole deflector)를 사용할 경우 하나의 마이크로칼럼에 8개의 배선이 연결되어야 하며, N 개의 마이크로칼럼을 구동하기 위해서는 8N 개의 배선이 제어장치에 연결되어야 한다. 이에 따라 외부 제어장치와 연결되는 배선의 수를 줄이는 방안에 대한 연구도 마이크로칼럼의 실제적인 응용에 매우 중요한 이슈 중의 하나이다[3,6].

일반적으로 마이크로칼럼에서 전자렌즈는 Fig. 1(a)에서와 같이 extractor(S_1), accelerator(S_2), 그리고 limiting aperture(S_3)의 세 개의 전극으로 구성된 소스렌즈와 동일한 세 개의 전극을 지닌 아인즐렌즈로 구성되어 있다. 이러한 마이크로 칼럼의 기본 구조에서 Fig. 1(b)와 같이 아인즐렌즈를 제거하여 칼럼 전체의 길이를 획기적으로 줄이는 개선된 모델이 제시되었다[7,8]. 이 개선된 모델에서는 소스렌즈에 하나의 전극(S_{2s})을 추가하여 전자빔을 집속하는 전압을 인가하도록 함으로써, 아인즐렌즈를 제거하고도 기존의 마이크로칼럼과 같은 성능을 유지할 수 있도록 하였다.

마이크로칼럼과 같은 초소형 전자칼럼에서는 MEMS 공정으로 batch-fabrication이 가능한 소형 실리콘 디플렉터 구조가 자주 사용되었다[9-11]. MEMS 공정을 할

용하면 마스크 패턴 디자인에 따라 실리콘으로 다양한 형태의 디플렉터를 제작할 수 있다. 여기서는 참고문헌 [8]에서 제시한 마이크로칼럼 구조를 기본으로 하여, 변형을 한 8중극 및 4중극 디플렉터(quadrupole deflector)를 적용한 마이크로칼럼의 스캔영역에 대한 조사 결과를 보고하고자 한다.

2. 본 론

2.1 마이크로칼럼 및 디플렉터 모델링

본 시뮬레이션에 사용된 마이크로 칼럼의 구조는 아래와 같다. 참고문헌[8]에서 제시된 것처럼 Fig. 1(a)와 같은 일반적인 마이크로칼럼에서 아인즐렌즈를 제거하고, 전극을 세 개 사용하는 소스렌즈에 하나의 전극(S_{2s})을 추가하여 Fig. 2(b)와 같은 마이크로칼럼을 모델링하였다. 디플렉터는 일반적인 대칭형의 디플렉터와 함께 변형된 8중극 디플렉터 및 4중극 디플렉터들을 적용하여 디플렉터 구조에 따른 스캔영역 변화를 조사하였다.

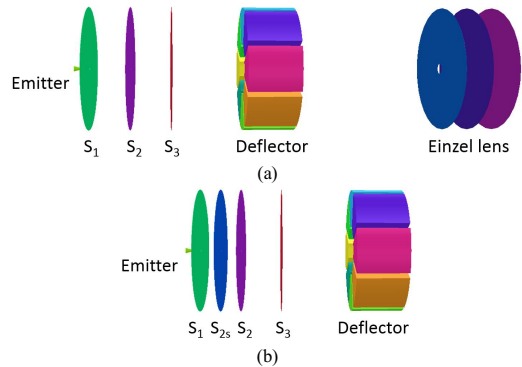


Fig. 1. (a) Conventional microcolumn with Einzel lens. (b) The microcolumn structure used in this work. Einzel lens is eliminated and one additional subsidiary electrode (S_{2s}) is added in source lens.

소스렌즈를 구성하는 각 전극의 두께는 모두 2 μm 이다. 각 전극의 중앙에는 전자빔이 통과할 수 있는 원형의 홀(aperture)이 형성되어 있는데 이들의 직경은 모두 50 μm 이며, 전극 S_3 에 형성된 홀의 직경은 5.0 μm 로 하였다. 디플렉터의 내경은 1 mm 이다. Table 1에 소스렌즈의 각 전극 중앙에 위치한 홀의 직경, 디플렉터의 내경, 그리고 각 부품 간의 거리를 정리하였다.

Table 1. The geometrical dimension of each component and the distance between each component of a microcolumn described in Fig. 1(b).

The aperture diameter of source lens electrodes and the inner diameter of the deflector (μm)				
S_1	S_{2s}	S_2	S_3	Deflector
50	50	50	5.0	1,000

The distances between each component (μm)				
Emitter- S_1	S_1 - S_{2s}	S_{2s} - S_2	S_2 - S_3	S_2 -Deflector
50	200	200	400	700

Fig. 2에 본 연구에서 고려한 두 종류의 8중극 디플렉터와 4중극 디플렉터의 구조를 제시하였다. Fig. 2(a)는 일반적으로 사용되는 실리콘 디플렉터 구조로 모든 전극이 똑같은 크기로 제작되며, 전극과 전극 사이의 빈 공간을 포함하면 모든 전극은 디플렉터 중심에서 $\theta = 45^\circ$ 의 각도로 배치되어 있다. 여기서 θ 는 디플렉터 중심에서 바라본 각 전극의 각도를 의미한다.

Fig. 2(b)에 제시된 모델은 전극의 크기에 변화를 주어서, 상하좌우의 전극은 중심에서 $\theta = 30^\circ$ 의 각도를 이루고 있으며, 대각선 방향의 전극은 $\theta = 60^\circ$ 의 각도를 이루고 있다. 가로축을 x 축, 세로축을 y 축 이라고 하면 x 축과 y 축 방향으로 각각 디플렉터 전압을 인가하고, 대각선 방향으로로는 8중극 모드 구동을 위한 추가적인 전압을 인가하거나 혹은 대각선 방향의 전극들은 접지하여 구동하는 것이 일반적이다.

Fig. 2(c)는 Fig. 2(b)의 구조에서 대각선 방향의 전극들을 제거하고 상하좌우의 네 전극만을 남긴 4중극 디플렉터의 한 예이다.

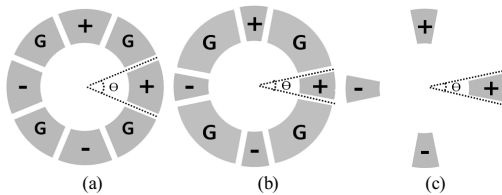


Fig. 2. The schematic diagram for (a) a conventional Si octupole deflector, (b) a modified octupole deflector, and (c) a quadrupole deflector, considered in this simulation.

2.2 Modified Deflector 시뮬레이션

본 시뮬레이션에서는 Fig. 2의 상하좌우의 전극들에

디플렉터 전압을 인가하고, 대각선 방향의 전극들을 접지시켰다. 8중극 디플렉터 구조에서는 구동 전극의 크기를 $\theta = 30^\circ, 45^\circ$, 그리고 60° 로 변화시키면서 세 가지 모델을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 2(c)에 제시된 4중극 디플렉터의 경우에는 구동 전극의 크기를 $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$, 그리고 90° 로 변화를 주면서 네 가지 모델에 대해 계산을 수행하였다.

이렇게 모델링한 마이크로칼럼의 디플렉터의 스캔 영역 변화를 상업용 프로그램 ‘OPERA 3D’를 사용하여 조사하였다. 구동 전극에 인가하는 디플렉션 전압을 150 V 까지 변화시키면서 스캔 영역을 구하였다.

Fig. 3(a)는 Fig. 1(b)에 제시된 마이크로 칼럼의 S_2 와 S_3 전극은 접지시킨 상태에서, 전자방출원에 -1 kV, S_1 전극에 -700 V, S_{2s} 전극에 -867 V 의 전압을 각각 인가하고 전자빔의 궤적을 얻은 것이다. 이 때 디플렉터에 전압은 인가하지 않았다. 전자빔이 진행되는 방향을 z 축으로 설정하였을 때 디플렉터의 위치는 $z = 1,558 \mu\text{m}$ 에서 $2,058 \mu\text{m}$ 사이이며, 초점은 대략 $z = 4,700 \mu\text{m}$ 정도의 위치에 형성되었다.

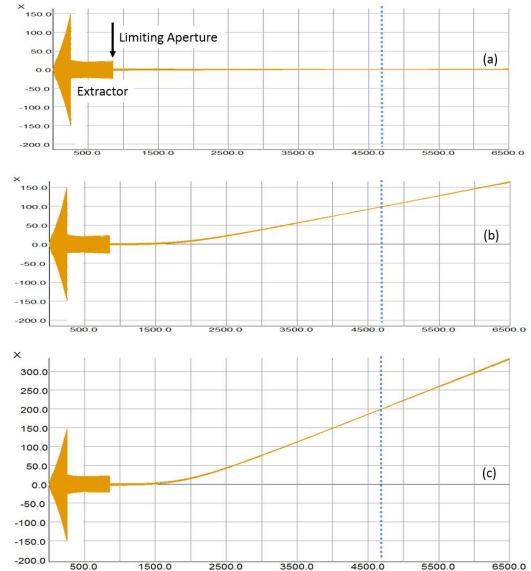


Fig. 3. Electron beam trajectories obtained by applying deflection voltage to 30° electrodes of the modified octupole deflector (a and b) and quadrupole deflector (c). Deflection voltage is 0 V for (a), and 100 V for both (b) and (c). The column operation conditions are described in text.

Fig. 3(b)는 마이크로칼럼의 다른 구동 조건들은 같게 유지한 상태에서 크기가 $\theta = 30^\circ$ 인 디플렉터 전극에 +100 V와 -100 V의 디플렉션 전압을 인가하고, 8중극 디플렉터의 전자빔 편향 정도를 구한 것이다. Fig. 3(c)는 동일한 조건에서 구동전극의 크기가 $\theta = 30^\circ$ 인 4중극 디플렉터에서 전자빔 궤적을 구한 것이다.

그림에서 점선으로 표시된 $z = 4,700 \text{ um}$ 위치는 전자빔의 초점이 형성되는 면이다. Fig. 3(b)와 (c)에서 같은 $\theta = 30^\circ$ 크기의 전극을 사용하여 구동했을 때 4중극 디플렉터의 스캔 영역이 8중극 디플렉터의 스캔 영역에 비해 큰 것을 알 수 있다.

디플렉터 전극의 각도가 각각 $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 인 세 가지 8중극 디플렉터와 $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$, 그리고 90° 인 네 가지 4중극 디플렉터에서, 디플렉터 전압을 증가시키면서 $z = 4,700 \text{ um}$ 평면에서 전자빔의 편향 정도를 구하였다. Fig. 4는 시뮬레이션을 통해 얻은 디플렉터의 스캔 영역을 그래프로 정리한 것이다.

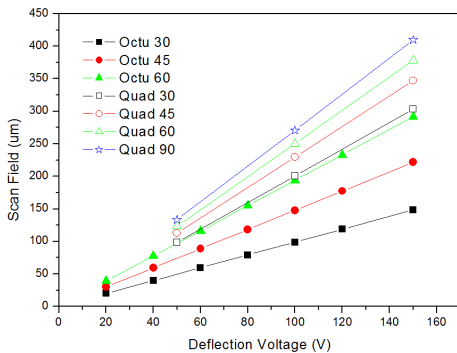


Fig. 4. The variations of deflection field depending on the size (radial angle) of deflector electrode for both octupole and quadrupole deflector structures.

Fig. 4에서 속이 찬 사각형, 원, 삼각형들은 8중극 디플렉터에서 얻은 데이터들이며, 속이 빈 사각형, 원, 삼각형들과 속이 빈 별들은 4중극 디플렉터에서 얻은 데이터들이다. 범례의 숫자들은 구동 전극의 각도를 의미한다. 그래프에서 보는 바와 같이 스캔 영역은 디플렉터 전압에 선형적으로 비례하는데, 디플렉터 전극의 크기가 커질수록 증가하는 것으로 나타났다.

8중극 디플렉터에서 $\theta = 30^\circ$ 전극을 사용했을 경우를 기준으로 하면, $\theta = 45^\circ$ 전극을 사용한 경우의 스캔 영

역은 1.49 배, $\theta = 60^\circ$ 전극을 사용한 경우에는 1.96 배로 나타났는데, 이 값은 전극의 크기(각도) 비와 거의 같은 값이다. 즉, 스캔 영역은 단순히 전극의 크기와 거의 비례하는 것을 알 수 있다.

한편, 4중극 디플렉터의 경우에 $\theta = 30^\circ$ 전극을 사용했을 경우를 기준으로 하면, $\theta = 45^\circ, 60^\circ$, 그리고 90° 전극을 사용한 경우에는 각각 1.14 배, 1.25 배, 그리고 1.35 배의 스캔 영역을 갖는 것으로 나타났다. 전극 크기에 따라 스캔영역이 증가하지만 비례관계가 성립하지는 않는 것으로 나타났다.

2.3 결과 분석

이러한 스캔 영역 변화를 좀 더 살펴보기 위하여 광축에 수직하고 디플렉터의 중앙을 지나는 평면(즉, $z = 1,808 \text{ um}$ 평면)에서 전기적 포텐셜과 전기장의 변화를 구하였다.

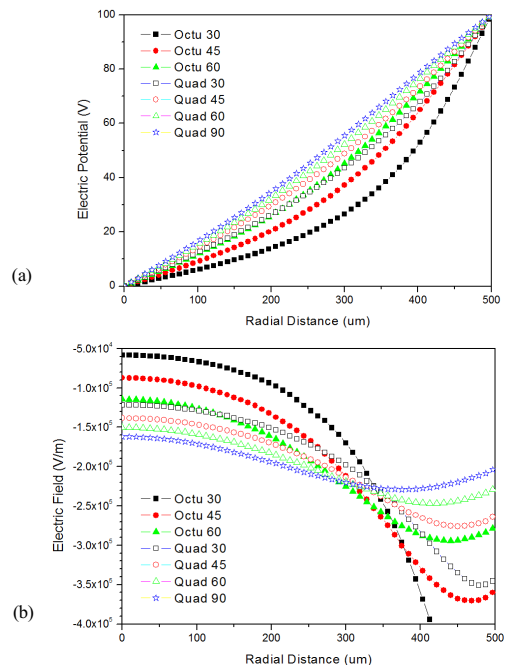


Fig. 5. The variation of (a) electric potential and (b) electric field strength with the radial distance from the center to the deflector electrode. Deflection voltage is 100 V.

Fig. 5(a)와 (b)에 제시된 그래프는 디플렉터 구동 전압이 100 V 일 때, 디플렉터 중심점에서 전극까지 x 방향 거리에 따라 전기적 포텐셜(a)과 전기장의 세기(b) 변

화를 나타낸 것이다. 그림에서 속이 찬 사각형, 원, 삼각형들은 8중극 디플렉터에서 얻은 데이터들이며, 속이 빈 사각형, 원, 삼각형들과 속이 빈 별들은 4중극 디플렉터에서 얻은 데이터들이다.

포텐셜 그래프는 -x축으로는 원점대칭을 이루고 있고, 전기장 그래프는 y축 대칭을 이루고 있는데 여기서는 편의상 $x > 0$ 인 경우만을 제시하였다. 전반적으로 포텐셜은 $x > 0$ 인 곳에 위치한 전극에서부터 감소하여 중심에서 0이 된다.

$\theta = 30^\circ$ 처럼 전극의 크기가 작은 경우에는 포텐셜이 전극 근처에서 급격하게 감소하고 중심에서 완만하게 0에 접근하고 있으며, 이에 따라 전기장의 세기는 전극 근처에서 크고 중심에서는 작은 값(절대값)을 갖는다. 반면에 $\theta = 60^\circ$ 와 같이 전극의 크기가 큰 경우에는 포텐셜이 전극 근처에서 완만하게 감소하여 중심에서 기울기가 커지며, 전기장의 세기도 커지게 된다. 전극의 크기가 $\theta = 90^\circ$ 인 경우(4중극)에는 포텐셜은 선형에 가까운 감소 추세를 보이며, 중심 근처에서 전기장의 세기는 가장 큰 것으로 나타났다.

즉, 전극의 크기가 커질수록 디플렉터 중심 근처에서 전기장의 세기가 강해진다. 구동 전극의 크기가 동일할 경우 4중극과 8중극 디플렉터를 비교하면, 4중극 디플렉터의 경우에 포텐셜도 높고 전기장의 세기도 강한 것으로 나타났다.

스캔영역과 중심점에서의 전기장 세기 모두 8중극 디플렉터에 비해 4중극 디플렉터에서 더 크게 나타났으며, 전극의 크기가 $\theta = 30^\circ \sim 60^\circ$ 인 경우 약 1.3 ~ 2.0 배 큰 것으로 조사되었다.

Fig. 6은 디플렉터 구동전압이 100 V 일 때, 디플렉터 전극의 각도에 따른 스캔 영역(왼쪽 y축)과 디플렉터 중심에서의 전기장의 세기(오른쪽 y축) 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 속이 찬 사각형과 원은 각각 8중극 디플렉터에서 얻은 전기장과 스캔영역 데이터이며, 속이 빈 사각형과 원은 4중극 디플렉터에서 얻은 전기장과 스캔영역 데이터이다.

앞서 언급한 바와 같이 스캔영역은 8중극 디플렉터에서는 거의 선형적인 거동을 보이고 있으며, 4중극 디플렉터에서는 비선형적으로 증가하는 모습을 보인다. 이러한 변화 추세는 전기장의 경우에도 거의 같은 것으로 나타났다.

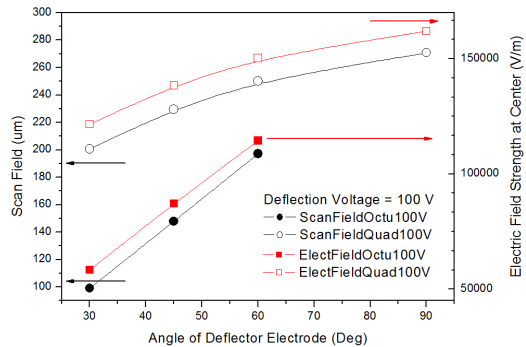


Fig. 6. The variation of electric field strength according to the angle (size) of the deflector electrode.

아래의 Fig. 7은 8중극과 4중극 디플렉터를 동일하게 100 V의 구동 전압으로 동작시켰을 때, 디플렉터 중심에서 전기장의 세기와 스캔 영역 사이의 관계를 그래프로 정리한 것이다. 예상되는 바와 같이 디플렉터의 종류와 무관하게 전자빔의 스캔영역은 전기장의 세기에 비례하는 것으로 나타났다.

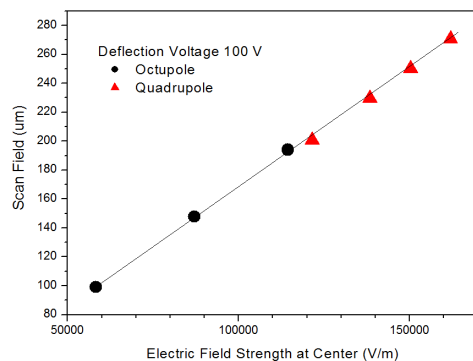


Fig. 7. The relation between the electric field strength at deflector center and the scan field.

따라서 단순히 스캔영역만을 고려하여 디플렉터를 디자인 할 경우에는 전기장의 세기가 강하도록 전극의 크기를 키우고 4중극 방식으로 구동하는 것이 유리함을 알 수 있다. 해상도에 대한 정보를 얻기 위하여 같은 소프트웨어(OPERA 3D)를 사용하여 시뮬레이션을 하면 디플렉터 전극의 크기를 변화시켜도 해상도에는 미세한 차이만 나는 것으로 조사되었다.

3. 결 론

마이크로칼럼을 멀티칼럼으로 사용하기 위해서는 배선의 수가 최소화 되어야 한다. 이를 위해 MEMS 기술로 batch-fabrication이 가능한 8중극과 4중극 실리콘 디플렉터의 개선된 모델을 디자인하였다.

각 전극의 크기가 동일한 일반적인 8중극 디플렉터 구조를 변형하여, 디플렉터 중심에서 각도가 $\theta = 30^\circ, 60^\circ$ 인 서로 다른 크기의 전극을 교대로 배치하는 구조로 modified octupole deflector를 디자인 하였다. 4중극 디플렉터의 경우에는 상하좌우의 디플렉터 전극의 크기를 중심에서 각도가 $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$, 그리고 90° 가 되도록 디자인하였다.

이들 8중극과 4중극 디플렉터의 스캔 동작에 대한 시뮬레이션 연구를 수행한 결과, 전체적으로 4중극 디플렉터의 경우에 중심점에서 전기장의 세기가 강하고 스캔영역도 그에 따라 커지는 것으로 나타났다. 8중극 디플렉터의 경우에는 스캔영역과 중심점에서의 전기장의 세기 모두 전극의 크기에 따라 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 4중극 디플렉터의 경우에는 비선형적인 증가 추세를 보였다.

References

[1] E. Kratschmer, H. S. Kim, M. G. R. Thomson, K. Y. Lee, S. A. Rishton, M. L. Yu, S. Zolgharnain, B. W. Hussey, T. H. P. Chang, "Experimental evaluation of a 20×20 mm footprint microcolumn", *Journal of Vacuum Science & Technology B*, Vol.14, No.6, pp.3792-3796, 1996.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1116/1.588669>

[2] T. H. P. Chang, M. G. R. Thomson, E. Kratschmer, H. S. Kim, M. L. Yu, K. Y. Lee, S. A. Rishton, B. W. Hussey, S. Zolgharnain, "Electron beam microcolumns for lithography and related applications", *Journal of Vacuum Science & Technology B*, Vol.14, No.6, pp.3774-3781, 1996.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1116/1.588666>

[3] A. C. Zonneville, C. Th. H. Heerkens, C. W. Hagen, P. Kruit, "Multi-electron-beam deflector array", *Microelectronic Engineering*, Vol.123, pp.140-148, 2014.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.mee.2014.06.014>

[4] Z. Liu, J. Ximen, "A study of miniaturized electrostatic octupole deflectors", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol.363, No.1-2, pp.225-231, 1995.
DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/0168-9002\(95\)00156-5](https://dx.doi.org/10.1016/0168-9002(95)00156-5)

[5] C. Stebler, T. Pfeffer, U. Stauffer, N. F. de Rooij, "Microfabricated double layer octupoles for microcolumn applications", *Microelectronic Engineering*, Vol.46, No.1-4, pp.401-404, 1999.
DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/S0167-9317\(99\)00118-5](https://dx.doi.org/10.1016/S0167-9317(99)00118-5)

[6] H. Kim, C. Han, K. Chun, "The Novel Deflector for Multi Arrayed Microcolumn Using Microelectromechanical System (MEMS) Technology", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.42, Part 1, No.6B, pp.4084-4088, 2003.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1143/JJAP.42.4084>

[7] T. S. Oh, D. W. Kim, S. Ahn, H. S. Kim, "Improved design of 5 nm class electron optical microcolumn for manufacturing convenience and its characteristics", *Journal of Vacuum Science & Technology A*, Vol.31, No.6, Article ID 061601, pp.1-6, 2013.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1116/1.4815953>

[8] T. S. Oh, H. S. Kim, S. Ahn, D. W. Kim, "Design of an ultra-miniaturized electron optical microcolumn with sub-5 nm very high resolution", *Ultramicroscopy*, Vol.136, pp.171-175, 2014.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ultramic.2013.10.003>

[9] H. S. Gross, F. E. Prins, D. P. Kern, "Fabrication and characterisation of an array of miniaturized electrostatic multipoles", *Microelectronic Engineering*, Vol.41-42, pp.489-492, 1998.
DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/S0167-9317\(98\)00114-2](https://dx.doi.org/10.1016/S0167-9317(98)00114-2)

[10] L. P. Muray, K. Y. Lee, J. P. Spallas, M. Mankos, Y. Hsu, M. R. Gmur, H. S. Gross, C. B. Stebler, T. H. P. Chang, "Experimental evaluation of arrayed microcolumn lithography", *Microelectronic Engineering*, Vol.53, No.1-4, pp.271-277, 2000.
DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/S0167-9317\(00\)00313-0](https://dx.doi.org/10.1016/S0167-9317(00)00313-0)

[11] T. H. P. Chang, M. Mankos, K. Y. Lee, L. P. Muray, "Multiple electron-beam lithography", *Microelectronic Engineering*, Vol.57-58, pp.117-135, 2001.
DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/S0167-9317\(01\)00528-7](https://dx.doi.org/10.1016/S0167-9317(01)00528-7)

김 영 철 (Young Chul Kim)

[정회원]



- 1991년 2월 : 인하대학교 물리학과 (이학사)
- 1993년 2월 : 인하대학교 물리학과 (이학석사)
- 2000년 8월 : 인하대학교 물리학과 (이학박사)
- 2001년 8월 : 충북대학교 박사후 연구원

- 2002년 2월 : 한국표준과학연구원 위축연구원
- 2003년 9월 ~ 2010년 8월 : 선문대학교 정보디스플레이학과 계약교수
- 2010년 9월 ~ 현재 : 을지대학교 안경광학과 교수

<관심분야>

전자빔 기술, 광학, 빛의 비고전성, 빛의 얽힘성

김 호 섭(Ho Seob Kim) [정회원]



- 1984년 2월 : 인하대학교 물리학과 (이학사)
- 1986년 12월 : 미국 미조리주립대학교 물리학과(이학석사)
- 1992년 5월 : 미국 미조리주립대학교 물리학과(이학박사)
- 1996년 10월 : IBM Watson Research Center 연구원

- 1999년 2월 : Etec System, Inc. 전자빔 리소그래피 설계/제작 팀장
- 1999년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 정보디스플레이학과 교수

<관심분야>

전자빔 리소그래피, Microcolumn, Multi microcolumn, 전자빔 기술, 반도체 장비

오 태 식(Tae Sik Oh) [정회원]



- 1985년 2월 : 성균관대학교 전자공학과(공학사)
- 1990년 8월 : 경희대학교 산업정보대학원 전자공학과(공학석사)
- 2005년 2월 : 성균관대학교 나노과학공학과(공학박사)
- 1984년 12월 ~ 2003년 7월 : 삼성 SDI 중앙연구소 수석연구원

- 2003년 7월 ~ 2006년 2월 : 삼성종합기술원 디스플레이 Lab 전문연구원
- 2006년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 정보디스플레이학과 교수

<관심분야>

전자 렌즈 설계 및 전자빔 기술, 디스플레이 소자 구조 해석, 설계 및 평가

안 승 준(Seongjoon Ahn) [정회원]



- 1985년 2월 : 경북대학교 물리학과 (이학사)
- 1989년 2월 : 한국과학기술원 물리학과(이학석사)
- 1993년 2월 : 한국과학기술원 물리학과(이학박사)
- 1989년 2월 ~ 1997년 2월 : 삼성 전자 반도체연구소 선임연구원

- 1997년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 정보디스플레이학과 교수

<관심분야>

반도체 공정 및 장비기술, 레이저 annealing, 레이저 미세가공, 전자빔 기술, 접지기술

김 대 옥(Dae-Wook Kim) [정회원]



- 1984년 2월 : 서울대학교 전자공학과(공학사)
- 1988년 2월 : 서울대학교 물리학과 (이학석사)
- 1992년 2월 : 서울대학교 물리학과 (이학박사)
- 1993년 3월 ~ 2009년 2월 : 선문대학교 물리학과 교수

- 2009년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 정보디스플레이학과 교수

<관심분야>

반도체 장비, 나노 과학, MEMS, 전자빔 기술