

초소형 전자칼럼을 위한 마이크로 자기장 디플렉터 연구

김영철 · 김대욱 · 안승준 · 김호섭[†]

선문대학교 신소재과학과/차세대반도체연구소
Ⓣ 336-708 충남 아산시 탕정면 갈산리 100

박성순 · 박경완 · 황남우

전자빔기술센터(주)
Ⓣ 336-708 충남 아산시 탕정면 갈산리 100

(2007년 8월 2일 받음, 2007년 10월 30일 수정본 받음)

초소형 전자칼럼을 위한 마이크로 자기장 디플렉터를 제작하여 저에너지 영역에서 디플렉터의 동작 특성을 확인하였다. 마이크로 디플렉터는 지름이 500 μm 의 원통형 코어에 감겨진 100 μm 지름의 Cu 코일로 구성되어 있다. 두 쌍의 디플렉터는 10 \times 10 mm 크기의 절연 기판에 고정되어 전자빔을 2차원 스캔할 수 있도록 고안되었다. 마이크로 자기장 디플렉터를 부착한 초소형 전자칼럼을 저전력으로 시험 구동한 결과 100 $\mu\text{m}/\text{A}$ 의 편향 결과를 얻어 활용 가능성을 확인하였다.

주제어 : Microcolumn, Electron beam, Magnetic deflector

I 서 론

전자현미경은 나노기술을 위한 핵심적인 분석·측정 장비이다. 반도체 산업 현장에서는 고밀도의 반도체 제품을 효율적으로 생산하기 위하여 고분해능(high-resolution)과 높은 생산성(high-throughput)이라는 상반된 두 조건을 만족할 수 있는 미세 패턴링 및 패턴 검사 장비가 요구되고 있다. 기존의 고전압(10 kV 이상) 구동방식의 전자빔 장비는 고 분해능의 측면에서 산업 현장의 요구 사항을 충족시키고 있으나 생산성 측면에서는 광학 장비가 전자빔 장비로 대체되어야 할 필요성이 높아지고 있다.

초소형 전자칼럼은 기존의 전자빔 장비의 낮은 생산성 문제를 해결할 수 있는 대안으로 연구되고 있다.^[1-2] 기존 전자빔 장비의 전자칼럼은 1 m 정도의 크기인 반면 초소형 전자칼럼의 크기는 수 cm에 불과해 제한된 공간 내에 다수의 전자칼럼을 병렬로 배치하는 것이 가능하며, 각각의 칼럼을 동시에 구동하여 높은 생산성을 얻을 수 있다.^[2-3]

초소형 전자칼럼의 전체 구조는 일반적인 전자 현미경과 같이 전자방출원, 소스렌즈, 디플렉터, 수렴렌즈 등으로 구성되어 있다(그림 1). 전자방출원으로부터 방출된 전자는 소스렌즈를 지나면서 큰 각도로 퍼지는 전자들이 걸러지고, 수렴렌즈에 의하여 샘플에 모아진다. 디플렉터는 전자빔을 스캔하는 역할을 하는데, 이 작용에 의하여 샘플에 원하는 모양의 패턴을 만들 수 있다. 전자렌즈(소스렌즈, 수렴렌즈)는 두께가 1~2 μm 인 얇은 금속 박막 또는 실리콘 박막으로 이루어진 전극판층과, 각각의 전극판을 지지하고 절연시키는 절

연층으로 구성된다. 각 전극판의 중앙에는 전자빔을 통과하는 원형 홀이 있으며, 이들의 홀 모양의 기하학적인 정확성과 이들 간의 정렬 상태가 전자빔 제어계의 광학 수차로 직결되므로 수 마이크로미터 이내의 오차를 가져야 한다.^[4]

초소형 전자칼럼은 구조가 간단하고 정교하게 제작되어 크기가 3 mm 정도인 전자칼럼으로 전자현미경 모드에서 10 nm 이하의 분해능과 1 nA 이상의 전자빔 전류가 가능한 특성을 가지고 있다.^[1] 일반적으로 전자칼럼에서 전자빔을 제어하는 방식으로 전기장 제어방식, 자기장 제어방식, 전기장과 자기장 제어가 혼합된 혼합방식 등이 있다. 현재까지 개발된 초소형 전자칼럼은 구조가 단순하고 소형 제작이 용이한 전기장 방식에 대한 연구가 주로 진행되었다.^[5] 하지만 초소형 전자칼럼의 성능 및 제어 방식의 향상을 위해서는 광학

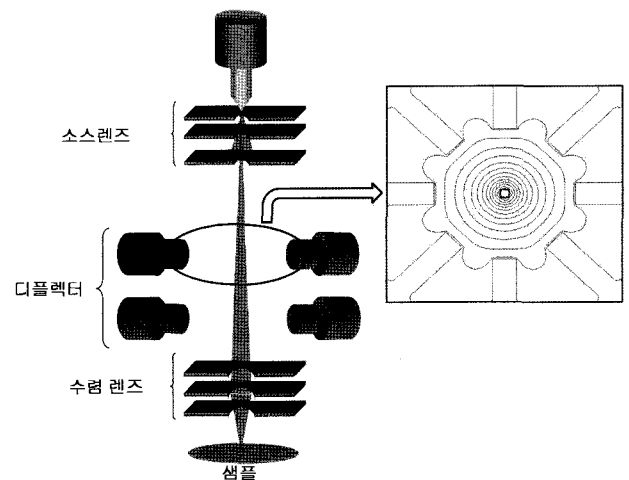


그림 1. 초소형 전자칼럼의 구성도.

[†] E-mail: hskim3@sunmoon.ac.kr

수차가 작은 자기장 방식 또는 혼합 제어 방식의 도입이 바람직하다.

본 연구에서는 초소형 전자칼럼에 적합한 구조를 가지고 특성이 우수한 마이크로 자기장 디플렉터를 설계 제작하여 전자칼럼에 부착하고 동작 특성을 조사하였다.

II 자기장 디플렉터의 구조 및 특성

디플렉터는 전자칼럼에서 전자들을 좌우방향으로 편향시키는 기능을 가지고 있다. 디플렉터는 전압을 인가하여 발생하는 전기장으로 전자를 편향하는 전기장 방식과 전류를 인가하여 발생된 자기장을 이용한 자기장 방식으로 구분된다.

그림 2는 본 연구에서 설계된 4개의 디플렉터 전극으로 구성된 자기장 방식을 위한 디플렉터의 기본 구조를 보여주고 있다. 단위 디플렉터 전극은 금속과 같은 도체 또는 고도핑된 반도체 등으로 형성된 코어와 이 코어를 감고 있는 코일로 구성된다. 코일은 절연체 피복이 있는 금속 도선을 사용하였다.

그림 2(a)는 두 개의 디플렉터 전극을 구성하는 두 개의 코어가 한 가닥의 코일을 사용하여 직렬형태로 감겨져 있는 구조를 보여준다. 코일에 전류를 인가하면 디플렉터 전극 사이에서 자기장이 발생하여 전자빔의 궤적을 제어한다. 그림 2(b)에서 점선으로 표시된 원은 디플렉터 내에서 전자빔이 지나가는 통로의 단면을 표시한 것으로 이 원안에서 전자빔은 좌우 또는 상하로 편향된다. 따라서 전체적인 자기장 디플렉터는 코어와 이 코어의 둘레를 감고 있는 코일로 이루어지는 전극이 전자빔 경로에 방사상으로 4개 또는 8개로 구성

되도록 설계하였다.

자기장 디플렉터 또는 전기장 디플렉터에서 두 전극 사이에 있는 전자는 자기장 또는 전기장에 의하여 힘을 받아 궤적 변화를 일으킨다(그림 3). 전기장 디플렉터는 인가된 전압에 의해 디플렉터 중앙에 $E = V/d$ 의 전기장을 생성시키고 이로 인해 전자는 $q_e E$ 의 힘을 받는다. 자기 디플렉터인 경우 감겨진 코일에 전류를 흘려주면 코일 중앙에 자기장 B 가 발생되고, 이 공간을 지나는 전자는 자기장에 의하여 $q_e v B$ 의 힘을 받는다. 자기 디플렉터에 의해 발생하는 자기력이 기존의 전기 디플렉터에 의해 발생하는 전기력과 같을 조건으로부터,

$$NI = \frac{(d^2 + a^2)^{3/2}}{\mu_0 a^2} \frac{V}{vd}$$

관계식을 얻을 수 있다. 여기서 N 은 코일의 감은 수, I 는 코일에 흐르는 전류, a 는 코일의 반경, d 는 코일 사이 간격이다. 따라서 자기력은 코일의 감은 수 N 과 코일에 흘려주는 전류 I 를 조절함으로써 제어할 수 있다.

디플렉터로 전자를 제어함에 있어서 전자의 속력은 매우 중요한 요소이다. 팁 전압이 증가하면 전자의 속도도 따라서 증가한다. 전기 렌즈의 경우 전기력은 전자의 속력에 의존하지 않지만 전자의 속력에 따라 전자가 디플렉터의 영향을 받는 구간을 지나는 시간이 달라지므로 전자의 속력에 따라 전자가 휘는 정도가 달라진다. 자기 렌즈에서는 전자의 속력에 따라 회전 반경이 변하기 때문에 전자의 휘는 정도가 다르게 나타난다.

그림 4(a)는 전자방출원의 전압에 대한 NI 값의 변화를 보

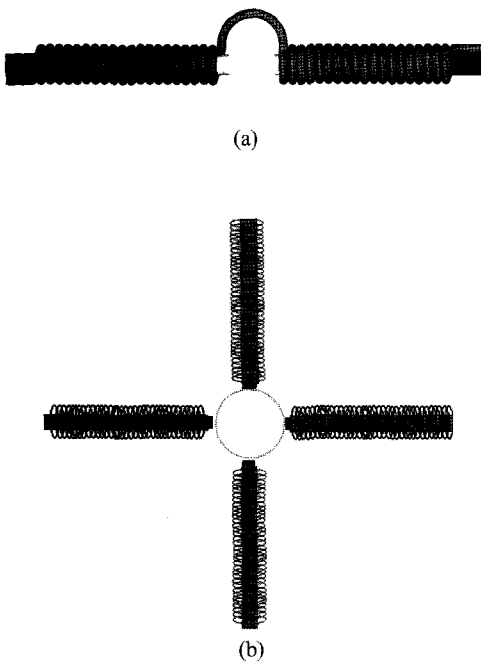


그림 2. (a) 한 쌍의 자기장 디플렉터의 개념도. (b) 자기장 디플렉터의 배치 구성.

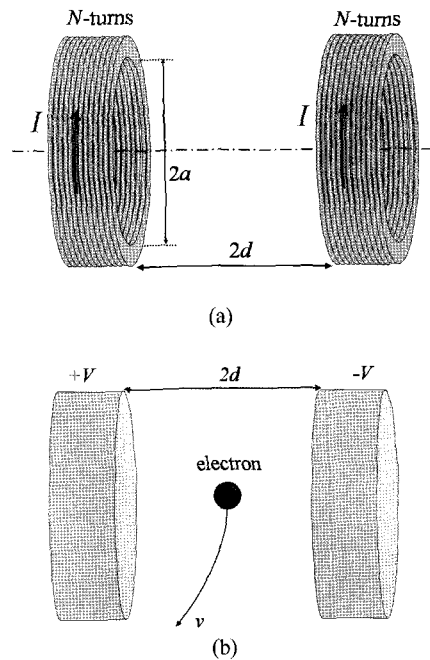


그림 3. (a) 자기 디플렉터. (b) 전기 디플렉터.

여주고 있다. 팁 전압이 커지면 전자의 속력이 증가하며, 속력이 증가함에 따라 자기장의 세기가 일정하더라도 자기력은 증가한다. 따라서 전자의 속력에 반비례하여 작은 값의 NI로 전자를 제어할 수 있음을 의미한다. 이는 전자의 속력이 커짐에 따라 높은 전압을 인가해야 하는 전기 디플렉터에 비해 큰 장점이라 할 수 있다.

또한 디플렉터 중심에서의 자기장의 세기는 디플렉터의 간격 d 와 디플렉터의 반경 a 에 의존한다. 그림 4(b) 및 4(c)는 이 두 값에 따라 변화에 따른 NI 값의 변화를 보여주는 그래프이다. NI의 값은 디플렉터의 간격 d 와 반경 a 의 값이 증가함에 따라 감소하다 다시 증가하는 모습을 보이고 있다. 따라서 디플렉터 간격 또는 반경이 지나치게 커지면 중앙에서 자기장과 전기장의 세기가 모두 약해져서 높은 NI 값이 요구된다. NI 값이 최소가 될 조건은 $a^2 - 2d^2 = 0$ 이며, 따라서 $a = \sqrt{2}d$ 를 만족될 때, 최소의 NI 값을 갖게 된다.

III. 자기장 디플렉터의 구동 및 평가

그림 5는 자기장 디플렉터를 포함한 초소형 전자칼럼의 사

진과 구조도를 보여주고 있다. 초소형 전자칼럼은 전자방출원, 소스렌즈, 정전기 디플렉터, 수렴렌즈 등의 구조를 가지고 있다. 평가를 위한 자기장 디플렉터는 상술한 바와 같이 코일 형태로 제작되어 초소형 전자칼럼의 하단부에 네 방향으로 부착하였다.

자기장 디플렉터의 전체 크기는 10×10 mm로서 초소형 전자칼럼과 동일한 규격을 가지고 있다. 본 실험에서 사용된 자기장 디플렉터의 전극 반경은 $300 \mu\text{m}$ 이며, 전극간의 간격은 1 mm가 되도록 구성하였다. 이러한 구조에서는 1 A의 전류를 인가하면 1×10^{-2} T의 자기장이 생성된다.

초소형 전자칼럼 및 자기장 디플렉터는 초고진공 챔버에서 진공도가 약 1×10^{-9} torr 환경을 유지하며 실험을 진행하였다. 초소형 전자칼럼은 전자방출원에 약 240 V의 저전압을 인가하여 전자들이 안정적으로 방출되도록 방출전극에 -70 V를 인가하였다. 포커스 전압은 247 V를 인가하고 정전기 디플렉터를 구동하여 전자칼럼 하단에 장착된 샘플의 이미지를 획득하였다. 이 조건에서 측정된 방출 전류는 $0.6 \mu\text{A}$ 이며, 전자칼럼의 포커스렌즈와 샘플과의 거리는 약 10 mm이며, 자기장 디플렉터와 샘플과의 거리는 약 5 mm이다. 실험에

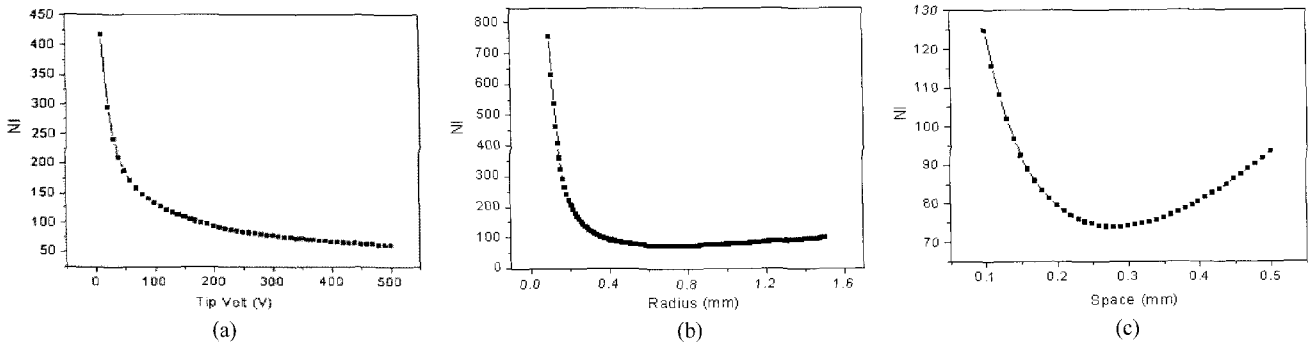


그림 4. (a) 팁 전압변화에 따른 NI 값의 변화를 나타내는 그래프.
 (b) 반경 a 의 변화에 따른 NI 값의 변화.
 (c) 간격 d 의 변화에 따른 NI 값의 변화.

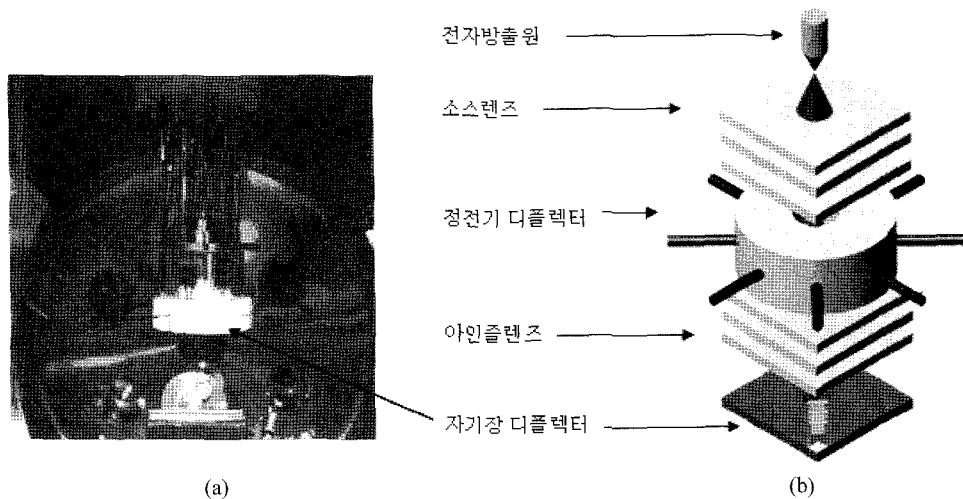


그림 5. 자기장 디플렉터를 포함한 전자칼럼의 사진과(a) 구조도(b).

사용된 샘플은 400 메쉬 구리 그리드로서 사각 홀 사이의 간격이 63.5 μm 이다.

자기장 디플렉터의 X 디플렉터(x-축 방향)과 Y 디플렉터(y-축 방향) 코일에 흐르는 전류를 0 A에서 0.9 A까지 변화시키면서 그리드 샘플 이미지의 위치변화를 관찰하는 방법으로 마이크로 자기장 디플렉터의 특성을 조사하였다. 그림 6(a)는 Y 디플렉터에 인가한 전류의 크기에 따른 그리드 이미지 변화를 보여주고 있다. 샘플 이미지의 한 점을 기준으로 하여 디플렉터에 흐르는 전류 크기에 따른 이미지 편향을 관찰하였다. 전류값은 0 A에서부터 시작하여 0.3 A씩 증가시키며 이미지 변화를 측정하였으며, 최대 0.9 A까지 측정하였다. 그림 6(a)의 아래에서부터 위로 디플렉터 전류가 각각 0 A, 0.3 A, 0.6 A, 그리고 0.9 A일 때에 얻은 네 개의 이미지를 제시하였다.

그림 6(b)에 Y 디플렉터 전류가 0.3 A인 경우에 이미지 편향 측정 결과를 제시하였다. 디플렉터에 전류가 흐르지 않을 경우에 얻은 이미지를 우측 하단에 고정하고, 디플렉터 전류가 0.3 A일 때 얻은 이미지를 우측 상단과 좌측 하단에 배치하여 임의의 한 점 P의 좌우 및 상하 편향을 측정하였다. 우측 하단 이미지의 화살표 시작점 P에 해당하는 점을 동그라미로 표시하였다. 그림에서 보듯이 편향이 주로 상하 방향 일어났지만 좌우 방향으로도 발생한 것을 알 수 있었다. 그림 6(b)에서는 대시-점 선(dash-dotted line), 점 선(dotted line), 및 대시 선(dashed line)은 P점의 변위를 알기 쉽게 표시하기 위한 보조선들로, 각각 전류가 0.3 A, 0.6 A, 그리고 0.9 A일 때의 이미지들에서 P점에 해당하는 점과 전류가 0 일 때 얻은 이미지에서 P점을 연결하는 선들이다.

그림에서, 전류가 0 A일 때 얻은 이미지의 P점이 전류가 0.3 A일 때에 윗 방향으로 36 μm , 왼쪽 방향으로 10.9 μm 이동한 것을 확인할 수 있다. 굵은 실선으로 표시된 벡터는 디플렉터 전류가 0.3 A일 때의 P점의 변위를 표시한 것이며, 대시 선으로 표시된 벡터는 전류가 0.9 A일 때의 변위이다. 굵은 실선으로 표시된 벡터와 대시 선으로 표시된 벡터는 거의 평행한 것으로 보인다.

이와 같은 방법으로 세 점을 택하여 y방향 디플렉터 전류 변화에 따른 평균적인 이미지 편향을 얻은 결과, 디플렉터 전류 값이 0.3 A, 0.6 A, 0.9 A에 해당할 때 y방향으로는 각각 36.0 μm , 68.6 μm , 100.0 μm 의 변위를 보였고, x방향으로는 10.9 μm , 19.7 μm , 27.3 μm 의 평균 변위를 보였다. 이를 정리하면 y 디플렉터에 전류가 흐를 때 y축에 대해 약 15° 정도 기울어진 상태로 이미지 편향이 일어나는 것으로 확인되었다. 또, 같은 방법으로 x방향 디플렉터의 동작 특성을 조사한 결과, 디플렉터 전류 값이 0.3 A, 0.6 A, 0.9 A일 때에 x방향으로는 40.9 μm , 82.0 μm , 105.8 μm 의 평균 변위를, y방향으로는 10.9 μm , 20.4 μm , 29.2 μm 의 평균 변위를 보였다. 이 경우에도 x 디플렉터와 약 15° 정도 기울어져서 이미지 편향이 일어나는 것으로 확인되었다.

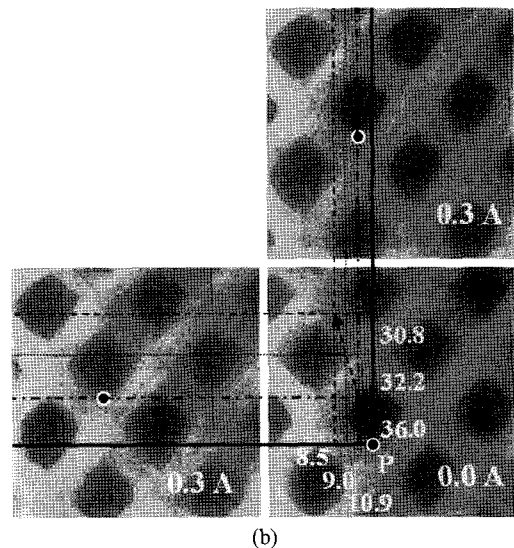
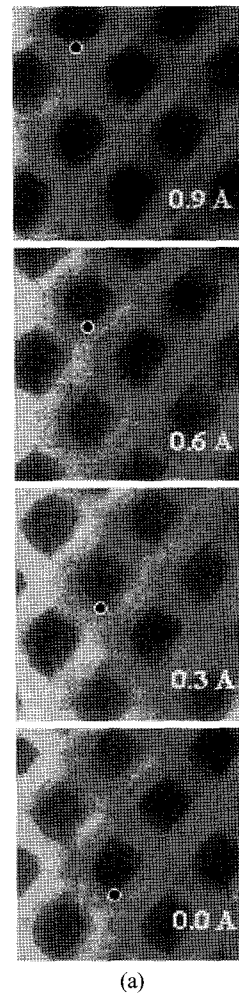


그림 6. (a) y-축 자기장 디플렉터에 인가한 전류의 크기에 따른 그리드 이미지 변화. (b). 디플렉터 전류가 0.3 A일 때의 이미지 편향, 굵은 실선으로 표시된 벡터는 전류가 0.3 A일 때 P점의 변위를 나타낸 것이며, 점선으로 표시된 벡터는 전류가 0.9 A일 때의 변위.

IV. 결과 및 논의

위에서 얻은 결과를 정리하여 그림 7에 제시하였다. 그림 7은 자기장 디플렉터에서 측정된 인가 전류와 이미지 이동 거리 사이의 관계를 나타낸 그래프이다. 디플렉터에 인가된 전류의 변화에 대해 각 축의 변위는 선형적으로 변화하는 것을 알 수 있다. 이 그림에서 속이 빈 부호(open symbol)와 속이 찬 부호(solid symbol)는 각각 x 디플렉터 및 y 디플렉터에 인가된 전류 크기에 따른 이미지 편향(P점의 변위)을 나타낸 것이다.

속이 빈 원과 삼각형은 각각 Y 디플렉터에 전류를 인가했을 때 P점의 y방향 변위와 x방향 변위이다. 그림에서 알 수 있듯이 변위가 선형적인 변화를 보여주고 있으며, 맞춤(fitting) 결과 y방향으로는 106.7 $\mu\text{m}/\text{A}$, x방향으로는 27.3 $\mu\text{m}/\text{A}$ 의 변화율을 보이고 있다. 속이 찬 원과 삼각형은 각각 X 디플렉터에 전류를 인가했을 때 P점의 y방향 변위와 x방향 변위이다. 그림에서 알 수 있듯이 변위가 선형적인 변화를 보여주고 있으며, 맞춤(fitting) 결과 y방향으로는 30.5 $\mu\text{m}/\text{A}$, x방향으로는 108 $\mu\text{m}/\text{A}$ 의 변화율을 보이고 있다.

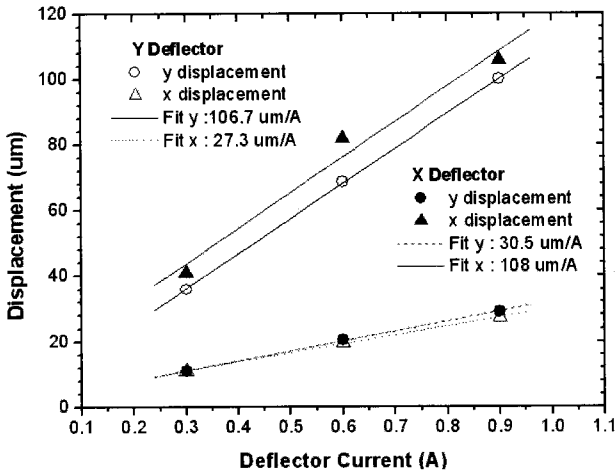


그림 7. 자기장 디플렉터의 전류 크기 변화와 변위 사이의 관계.

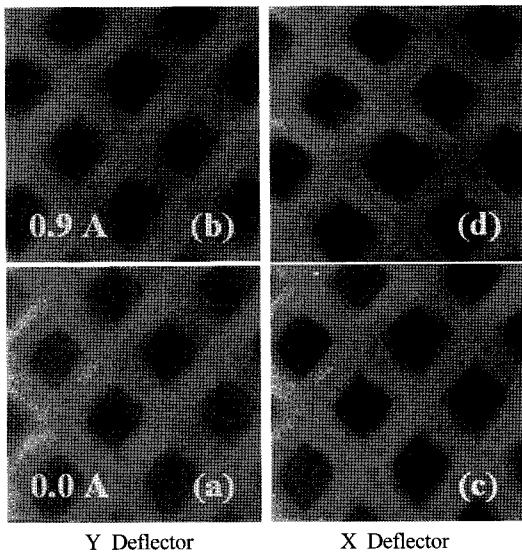


그림 8. X 디플렉터와 Y 디플렉터에 의한 편향된 이미지 비교.

터에 전류를 인가했을 때 P점의 y방향 변위와 x방향 변위이다. 이 경우에는 x방향으로는 108.0 $\mu\text{m}/\text{A}$, y방향으로는 30.5 $\mu\text{m}/\text{A}$ 의 변화율을 보이고 있다.

두 경우 모두 원하는 방향으로는 $\sim 100 \mu\text{m}/\text{A}$ 정도의 변화율로 이동하였고, 다른 방향으로는 27~30 $\mu\text{m}/\text{A}$ 정도의 변화율로 이동하였다. 이는 이미지 스캔 방향과 디플렉터 축 방향 사이의 미스얼라인먼트(misalignment), X 디플렉터와 Y 디플렉터의 상호 인덕턴스의 영향 등에 의한 것으로 생각된다.

여기서 X 디플렉터의 경우 전류의 크기가 0.6 A에서 0.9 A로 증가되었을 때 이미지 편향은 23.9 μm 로 0 A에서 0.3 A 및 0.3 A에서 0.6 A 사이의 $\sim 40 \mu\text{m}$ 에 비해 현저히 작은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 이미지의 변형에 의한 측정 데이터 왜곡 때문에 발생한 것으로 판단된다. 아래 그림에서 (a)와 (b)는 각각 Y 디플렉터에 전류가 흐르지 않을 때와 0.9 A의 전류가 흐를 때의 이미지이며, (c)와 (d)는 X 디플렉터에 전류가 흐르지 않을 때와 0.9 A의 전류가 흐를 때의 이미지이다. (b)와 (d)의 이미지를 비교하면 (d)가 (b)에 비해 상대적으로 이미지 왜곡이 심한 것을 알 수 있다. X 디플렉터에 큰 전류가 흐를 때는 진공도가 낮아지는 현상이 관측되었는데 X 디플렉터에 결함이 있어서 전류가 증가할 경우 코어가 발열되고 절연층이 아웃가싱(outgassing) 함으로써 진공도가 낮아진 것으로, 이와 함께 자기장이 왜곡되면서 이미지 왜곡이 심해진 것으로 추정된다. 한편으로 광축과 X 디플렉터의 미스얼라인먼트가 클 가능성도 있어서 추가적인 연구가 요구된다.

그림 7의 결과를 요약하면 초소형 전자칼럼에 포함된 자기장 디플렉터에 인가하는 전류의 크기 변화에 따라 편향되는 전자빔의 이동 변위는 약 100 $\mu\text{m}/\text{A}$ 정도인 것으로 정리할 수 있으며, 자기장 디플렉터에 의한 샘플 이미지의 이동 변화가 직선에 가까운 선형 특성을 보였으며, 이로써 디플렉터로서의 기능을 충분히 발휘할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

본 연구에서 초소형 전자칼럼에 사용가능한 마이크로 자기장 디플렉터를 개발하였다. 자기장 디플렉터는 10×10 mm 크기의 절연기판에 자기장 코일을 구성하고 코어는 나선형 코일 방식으로 제작하였으며 초소형 전자칼럼에 포함하여 스캔 영역 범위 및 성능을 평가하였다. 초소형 전자칼럼에서 정전기방식의 디플렉터는 100 V 이상의 고전압을 인가하여 전자빔을 편향시키는데, 이러한 고전압 방식은 스캔 속도를 증가하는데 제한 요소로 작용하게 된다. 이런 관점에서 저전류 방식의 자기장 렌즈는 고속 스캔이 가능할 것으로 예측된다.

또한 초소형 전자칼럼의 장점은 소형 칼럼을 여러 개 배열하여 멀티형 구조가 가능한 것이다. 이러한 멀티구조는 많은 배선이 필요하다. 정전기 디플렉터는 많은 고전압 배선을 사용하게 되지만, 자기장 디플렉터는 고전압 배선을 최소화 할 수 있는 장점을 가지게 된다.

참고문헌

- [1] E. Kratschmer, H. S. Kim, M. G. R. Thomson, K. Y. Lee, S. A. Rishton, M. L. Yu, S. Zolgharnain, B. W. Hussey, and T. H. P. Chang, "Experimental evaluation of a 20×20 mm footprint microcolumn," *J. Vac. Sci. & Technol.*, Vol. B14, No. 6, p. 3792, 1996.
- [2] T. H. P. Chang, M. G. R. Thomson, E. Kraschmer, H. S. Kim, M. L. Yu, K. Y. Lee, S. A. Rishton, B. W. Hussey, and S. Zolgharnain, "Electron-beam microcolumns for lithography and related applications," *J. Vac. Sci. & Technol.*, Vol. B14, p. 3774, 1996.
- [3] Ho Seob Kim, Dae-Wook Kim, Seungjoon Ahn, Young Chul Kim, Jaewon Cho, Sang-Kook Choi, and Dae-Yong Kim, "Arrayed microcolumn operation with a wafer-scale Einzel lens," *Microelectronic Eng.*
- [4] 박종선, 장원권, 김호섭, "마이크로 전자렌즈의 광학적 정렬과 조립", *한국광학회지*, 17권, 4호, p. 216, 2006.
- [5] M. G. R. Thomson and T. H. P. Chang, "Compression of field-emission angular distribution using a cathode shield," *J. Vac. Sci. & Technol.*, Vol. B13, p. 2445, 1995.

Magnetic Micro-Deflector for a Microcolumn System

Youngchul Kim, Dae-Wook Kim, Seung-Joon Ahn, and Ho-Seob Kim[†]

Dept. of Physics and Advanced Materials Science/Center for Next Generation Semiconductor Technology, Sun Moon University, ChungNam 336-708, Korea

[†]*E-mail: hskim3@sunmoon.ac.kr*

Seong-Soon Park, Kyoung Wan Park, and Nam-Woo Hwang

CEBT Co. Ltd, ChungNam, Asan 336-708, Korea

(Received August 2, 2007, Revised manuscript October 30, 2007)

We have fabricated a magnetic micro-deflector for a microcolumn system and tested its performance by operating it in the low energy region. The micro-deflector is composed of Cu coils around cylindrical cores with 500 μm diameter. The diameter of the Cu coil itself is 100 μm. Two pairs of deflectors designed for a 2-dimensional scan, that is X and Y deflection, are fixed on an insulating plate. The low power performance of a magnetic micro-deflector attached to a microcolumn system has been tested and the magnitude of deflection is measured to be ~100 μm/A, which offers the possibility for practical applications of the magnetic micro-deflector.

OCIS code : 110.0110, 110.3960, 180.0180, 180.5810.