

마이크로 전자렌즈의 광학적 정렬과 조립

박종선 · 장원권[†]

한서대학교 컴퓨터응용물리학과
356-706 충남서산시 해미면 대곡리 306번지

김호섭

선문대학교 신소재과학과
330-150 충남 아산시 탕정면 갈산리 100번지

(2006년 7월 11일 받음, 2006년 8월 16일 수정본 받음)

전총으로 구성되는 초소형 전자렌즈의 실리콘 렌즈와 절연체인 파이렉스는 접합과 정렬을 동시에 수행하여야 한다. 이를 위한 방법으로 회절을 이용한 정렬과 레이저 접합을 이용하였으며, source 렌즈와 Einzel 렌즈의 정렬오차는 가장 큰 개구를 기준으로 최대 $\pm 4\%$ 이내에서 이루어졌다. 정렬 조건과 레이저 접합 조건을 제시하였으며, 접합을 견고히 하기 위한 양극 접합 방식을 기술하였다. 전류영 상화를 통해 선폭이 9 μm 인 Cu grid를 시험한 결과 완성된 전자렌즈는 감속모드보다 가속모드에서 분해능이 좋았으며, 작은 개구를 가진 렌즈의 정밀한 정렬과 조합으로 높은 분해능을 얻을 수 있었다.

주제어 : Micro-electron column, Optical alignment, Current image.

I. 서 론

1995년 IBM 연구소의 P. Chang 박사에 의해 처음으로 초미니 전자빔 기술의 개념이 소개된 이후,^[1] 이 기술은 멀티전자빔 기술, 미니 패키징, 시스템 제어장치 소형화기술 등의 발전으로 전자빔 리소그라피, CD-SEM, V-SEM, 전자현미경 기술 등에서 핵심기술로 이용되고 있다. 초소형 전자 칼럼은 길이가 300~1,000 mm에 이르는 기존의 전자빔 장비를 1/100 이상 축소하여 10 mm 이내의 크기로 제작하는 것으로 그림 1과 같이 전자 방출원(Emitter)과 전자 칼럼으로 구성되어 있으며, 전자칼럼은 전자렌즈(Source lens, Einzel lens), 절연체와 회절장치(Deflector)로 구성되어 있다. 전자 렌즈는 이미 잘 알려진 대로 텅스텐 tip을 사용하였으며, 전자렌즈는 전자빔의 양을 조절하는 source lens와 전자빔을 집광하는 Einzel lens로 구성되는데, 각각의 렌즈는 2 μm 두께의 실리콘 membrane에 직경이 수~수백 μm 의 원형 개구(aperture)를 형성하여 제작되며, 그림 1과 같이 적층 구조를 가진다. 실리콘 렌즈 사이의 절연체로는 파이렉스가 사용되며, 전자빔의 진로를 바꾸기 위한 회절장치는 몰리브덴(molybdenum) 선의 한 쪽 끝을 연마하여 만든 금속 회절 장치의 조합으로 구성된다. 기존의 전자렌즈 접합방식은 양극 접합(anodic bonding)으로 이루어지는데 양극 접합은 고온 팽창 및 수축으로 인해 열팽창 계수가 다른 재료의 접합의 경우 광학 부품이 파손되거나 접합에 의한 정렬상태를 유지시키기가 어려우므로 전

자 렌즈의 정렬과 동시에 사용할 수 없는 문제가 있다. 에폭시(epoxy) 접합 방식은 전자렌즈의 정렬과 동시에 접합을 수행할 수 있으나 에폭시가 굳는데 통상 1시간 정도가 걸려 렌즈 하나를 완성하는데 2시간이 넘게 소요되는 비효율적인 면이 있으며, 또한 실리콘 렌즈와 에폭시의 미세한 틈으로 에폭시가 스며들어 실리콘 렌즈의 평형 유지 및 정렬을 유지하는데 어려움이 있다. 따라서 파이렉스를 투과하여 직접 주사할 수 있고, 비접촉 방식인 레이저 접합 방식이 적합하다. 레이저 접합 방식은 순간 가열 방식으로 열에 의한 피가공물의 변형이 생기지 않고 레이저 접합 후 양극 접합으로 적층으로 구성된 렌즈의 구조를 견고히 할 수 있으며 정렬이 방해를 받지 않는다.^[2]

본 연구에서는 전자렌즈의 제작에 있어 실리콘 렌즈의 정렬과 접합 방법에 관한 다양한 시도를 수행하였다. 실리콘 렌즈의 정렬은 실리콘 렌즈의 개구를 통과한 단일 모드 레이

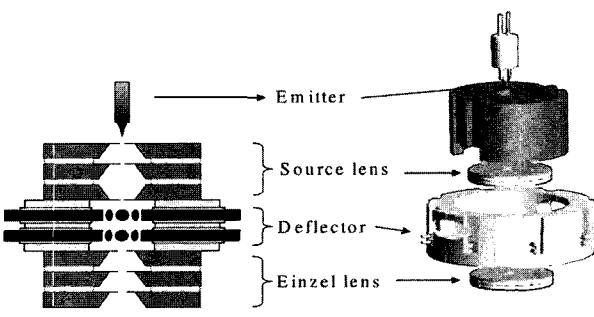


그림 1. 초소형 전자 칼럼 구성도.

[†]E-mail: jwk@hanseo.ac.kr

저 빔의 회절 무늬를 4분할 광다이오드에 입사하도록 하고 발생하는 미세전압을 증폭 연산하여 조절하였다. 접합방식은 Nd:YAG레이저를 이용하여^[3,4] 실리콘 렌즈와 파이렉스를 접합 후 양극 접합하는 방식을 택하였으며, 제작된 렌즈를 이용하여 구성한 전체 전자 칼럼으로 시험 시료에 대한 전류영상을 얻어 냅으로 그 성능을 확인하였다.

II. 레이저를 이용한 초소형 전자렌즈의 정렬 및 접합

전자 렌즈의 가공 상태와 정렬의 정밀도는 초소형 전자 칼럼의 분해능을 좌우하는 중요한 인자이기 때문에 10~200 μm 크기의 미세한 개구로 이루어진 전자 렌즈를 정렬하기 위해 본 연구에서는 레이저 빔의 회절 무늬를 이용한 정렬 방법을 사용하였다. 미세 전자 렌즈의 개구를 통과한 단일 모드 He-Ne 레이저 빔의 프라운호퍼 회절을 관찰하여 전자 렌즈의 개구 크기와 가공 상태를 검증할 수 있는데, 회절 무늬로부터 개구의 가공 상태와 크기를 알 수 있다. 이 방법은 비접촉 실시간으로 전자 렌즈의 상태를 간단하게 조사할 수 있는데 프레넬-카르히호프 공식에 의해 원형 개구를 통하여 스크린에 도달하는 레이저 빔의 진폭 U 는

$$U = \frac{2Ce^{ikr_0}\pi a^2 J_1(\rho)}{\rho} \quad (1)$$

이며,^[5] C 는 상수, k 는 파수, r_0 은 개구의 중심으로부터 스크린까지의 거리, $J_1(\rho)$ 은 1차 Bessel 함수이다. $\rho = ka \sin\theta$ 이며, a 는 개구의 반경, θ 는 광축으로부터 빔이 벗어난 각이다. 식 (1)을 이용하여 개구를 통과한 빛이 스크린에 도달하였을 때 $\theta = 0^\circ$ 인 광의 세기 I_0 와 광축으로부터 벗어난 각의 변화에 따른 빛의 세기 I 의 비를 구하면

$$\frac{I}{I_0} = \left(\frac{2J_1(\rho)}{\rho} \right)^2 \quad (2)$$

와 같이 된다. 그림 2는 원형 개구에 의해 생기는 Airy 패턴을 나타낸 것으로 원형 개구에 의한 Airy 패턴을 측정하면

가공된 렌즈의 모양이나 크기를 알 수 있다. 즉, 렌즈와 스크린 사이의 거리, 회절무늬의 간격을 실시간으로 측정함으로써 렌즈의 가공 상태를 확인할 수 있다. 즉, 렌즈와 스크린 사이의 간격을 R , 개구를 통과한 단색광의 파장을 λ 라 할 때 Airy 패턴의 첫 번째 어두운 무늬의 반경 q_1 은

$$q_1 = 1.22 \frac{R\lambda}{2a}$$

이 된다.^[5] 즉, CCD를 이용하여 첫 번째 어두운 무늬의 반경 q_1 을 측정하면 개구의 반경 a 를 알 수 있다.

그림 3은 4분할 광다이오드를 이용하여 He-Ne 레이저 빔의 세기 분포를 비교함으로 렌즈를 정렬하는 것을 나타낸 것이다. 이심률이 0이 아닌 개구를 통과할 경우 빛의 세기 분포를 비교하여 알 수 있도록 한 것으로 개구를 통과한 He-Ne 레이저 광이 광 다이오드에 주사되면 네 개의 광다이오드에서 출력된 값은 연산증폭장치에 의해 $a-c=X$, $b-d=Y$, $a+b+c+d=Z$ 값으로 출력된다. 광다이오드와 레이저 빔이 정확하게 정렬되면 X , Y 값은 0이 되고 Z 는 최대값이 된다. 따라서 개구를 통과한 빛이 그림 3과 같이 광다이오드의 어느 한

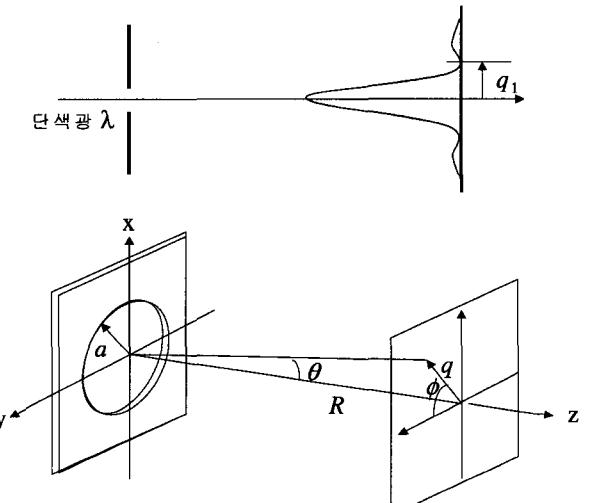


그림 2. 원형 개구에 의한 Airy 패턴.

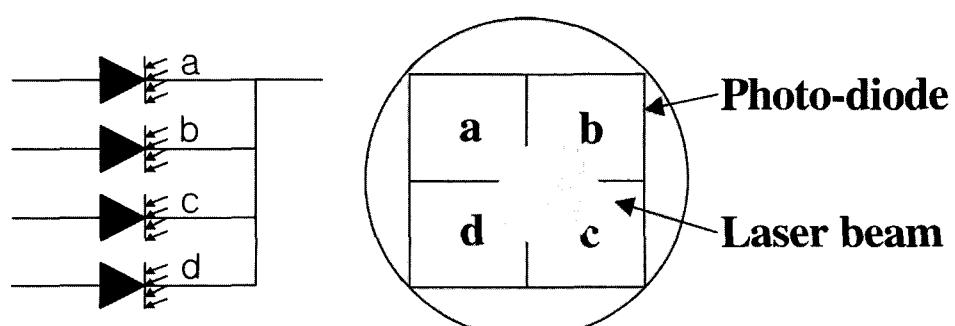


그림 3. 4분할 광다이오드에 입사한 레이저 빔.

쪽으로 치우치거나 개구의 중앙으로 입사하지 않을 경우 각각의 광다이오드로 입사하는 레이저광의 세기가 달라져 연산증폭기에서 나오는 X, Y가 0이 아닌 +나 -의 값이 출력되며, Z값은 최대값이 아니므로 정렬이 제대로 이루어지지 않은 것을 알 수 있다. 광원과 광 다이오드 사이에 놓이는 개구의 크기와 수에 따라 광다이오드에 입사하는 광의 분포도 달라지지만 사분할 다이오드에서 출력되는 값을 연산한 결과는 단일 개구의 경우와 동일하다.

전자렌즈에 사용된 실리콘 렌즈의 전체 크기는 그림 4(a)에서 보는 바와 같이 $10 \times 10 \text{ mm}^2$, 두께가 $350 \mu\text{m}$ 이고, 원형 개구 크기는 수십~수백 μm 이며, 실리콘 렌즈의 membrane 부분 크기는 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 이다. 그림 4(b)는 실리콘 렌즈 membrane의 단면을 SEM으로 촬영한 사진으로 두께가 $2 \mu\text{m}$ 이다. 절연체로 사용한 파이렉스는 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 로 실리콘 렌즈와 같은 크기에 두께가 $150 \mu\text{m}$ 이고 중앙에 전자빔의 진행 경로를 확보하기 위해 직경 2mm 의 구멍이 뚫려있다.

실리콘 렌즈의 개구 크기는 작게는 $20 \mu\text{m}$ 에서 크게는 $300 \mu\text{m}$ 까지의 다양한 크기를 가지므로 이러한 렌즈를 적층으로 정렬하여 조립하는 것은 매우 까다롭다. 본 연구에서는 He-Ne 레이저를 이용한 정렬장치를 구성하였다. 진공펌프를 이용하여 실리콘 렌즈를 고정한 상태에서 2축과 3축 이송장치로 정렬하며 레이저 접합하였다. 뚜렷한 회절무늬를 관찰하기 위해 집광렌즈를 사용하였으며, 회절무늬의 대칭성으로 정렬상

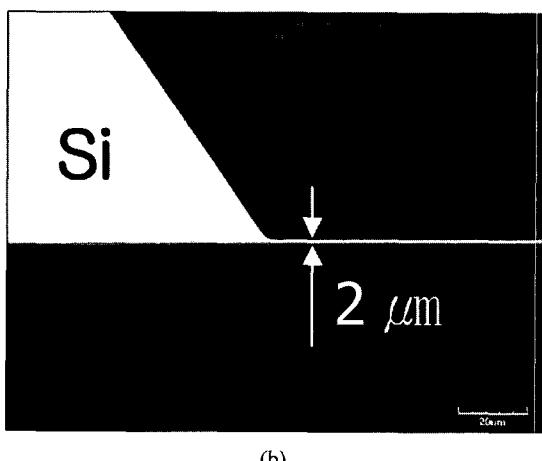
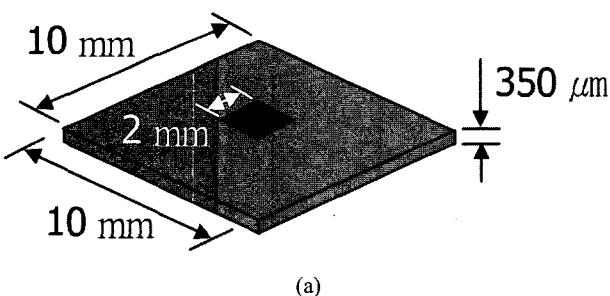
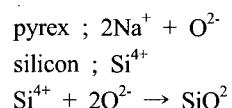


그림 4. 실리콘 렌즈 모양과 membrane 단면.

태를 확인하였다.

레이저 가공은 짧은 시간 동안 재료 표면의 일부분에 높은 광밀도를 형성하여 물리적인 힘이 가해지지 않은 상태에서 가공할 수 있는 비접촉 가공방식으로 재료와 레이저 발진 형태에 따라 다양한 가공형태가 가능하다. 그림 1에서와 같이 실리콘 렌즈를 적층으로 접합하기 위해 렌즈 사이에 절연체인 파이렉스를 차곡차곡 정확하게 정렬된 상태에서 접합하는 것이 필요한데 렌즈의 정렬상태를 흘트리지 않고 짧은 시간에 접합이 가능한 레이저 접합을 1차 접합방식으로 택하였다. 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용하였으며, 레이저 파장인 1064 nm 에 대한 실리콘의 흡수는 50%정도로 펄스 반복률을 크게 하고 레이저 출력을 적당하게 조절하는 것이 필요하다. 레이저의 출력은 18.6 W , 펄스 반복률은 20 kHz , 노출시간은 0.5초에서 가공이 가장 적절하게 이루어졌으며, 레이저의 출력이 증가하거나 펄스 반복률이 감소하면 펄스 에너지가 증가하여 충격에 의해 파이렉스가 깨지거나 접합상태가 고르지 못하였으며, 노출시간을 줄이거나 늘릴 경우 접합이 제대로 이루어지지 않거나 주변이 녹아있었다.

레이저 접합방식만으로는 모든 렌즈의 접합상태를 견고하게 할 수 없어 2차 접합 방식으로 양극접합(anodic bonding)을 하였다.^[6,7] 그림 5는 양극접합의 기본 개념을 나타낸 것으로 고온에서 실리콘과 파이렉스의 음이온과 양이온이 인가된 전기장에 반응하여 이동하는 현상을 이용한다. 즉, 실리콘과 파이렉스 면을 접착하여 고온 상태를 유지하면 파이렉스 면에서는 Na^+ 이온과 O^{2-} 이온들이, 실리콘에서는 Si^{4+} 이온의 활동이 활발해지고, 여기에 고전압을 가하면 이온들이 이동하게 된다.



양극접합을 할 때는 실리콘 면과 파이렉스 면 사이의 경계면

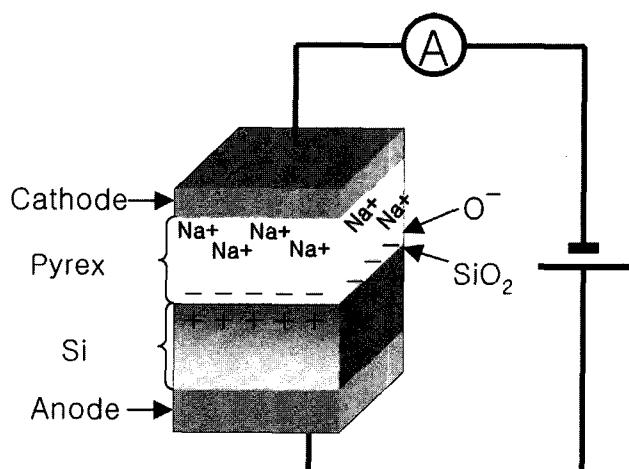


그림 5. 양극접합 원리.

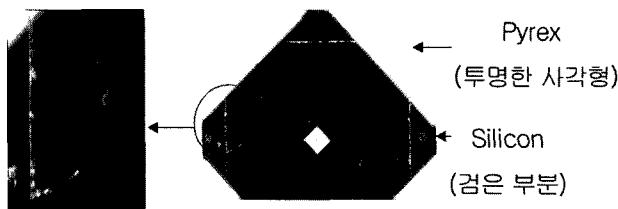
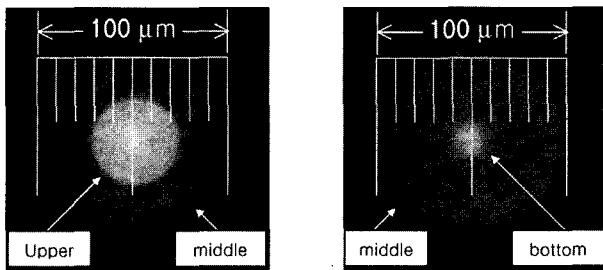


그림 6. 실리콘 렌즈와 파이렉스가 접합된 모습.

그림 7. 정렬된 source 렌즈($50-100-20 \mu\text{m}$)의 광학 현미경 사진.

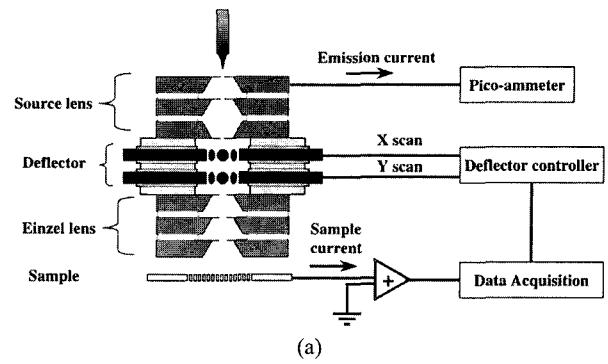
에 불순물이 잔류해 있을 경우 접합결과에 민감한 영향을 미치므로 실리콘은 BOE(buffered oxide etch)용액을 이용하여 세척 후 사용하였다. 양극접합 조건은 접합되는 표면의 거친 정도와 파이렉스의 두께에 따라 달라지는데, 실리콘의 두께가 $350 \mu\text{m}$, 파이렉스의 두께가 $150 \mu\text{m}$ 일 경우 480°C 의 온도에서 통전시 0.3 mA 까지 서서히 증가한 전류가 0.06 mA 이하로 감소하면서 더 이상 양극접합이 진행되지 않게 되었을 때 접합이 완료된다.

그림 6은 레이저 접합과 양극 접합을 통해 완성된 렌즈 사진이다. 검은 부분은 실리콘 렌즈를 나타내며, 투명한 부분은 파이렉스로 원형으로 표시한 곳은 작은 미세한 먼지가 있을 경우 양극접합이 제대로 이루어지지 않은 것을 나타낸 것이다. 사진에서 보는 바와 같이 매우 작은 먼지에 의해서도 비교적 넓은 부분에서 접합이 이루어지지 않은 것을 볼 수 있으므로 먼지가 없는 청정조건에서 세척과 접합이 이루어져야 했다.

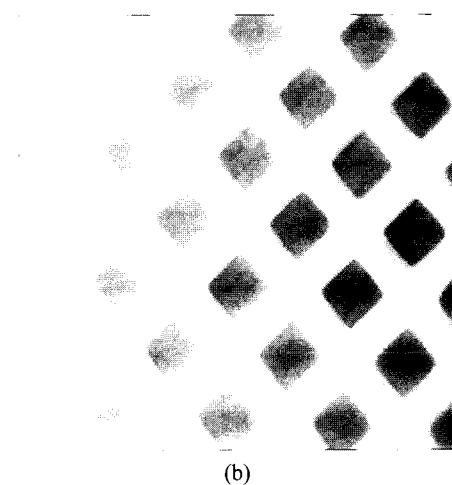
정렬된 전자렌즈의 접합상태는 광학현미경을 이용하여 확인할 수 있는데 그림 7은 정렬된 source 렌즈의 광학현미경 사진으로 각각의 개구 직경이 $50-100-20 \mu\text{m}$ 인 경우에 대한 것이다. 광학현미경의 초점을 조절하여 두 장씩 정렬상태를 비교하는 사진을 나타낸 것으로 가장 위쪽 렌즈($50 \mu\text{m}$)와 중간 렌즈($100 \mu\text{m}$)의 정렬오차는 $2 \mu\text{m}$ 이었고, 중간 렌즈($100 \mu\text{m}$)와 아래 쪽 렌즈($20 \mu\text{m}$)의 정렬 오차는 $3 \mu\text{m}$ 이었다.

III. 전류형상

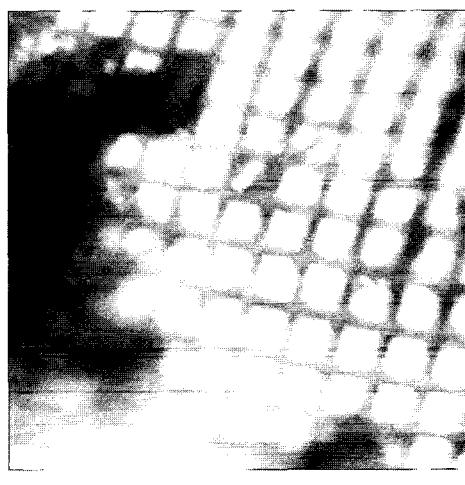
조립된 초소형 전자렌즈를 이용하여 시료에 전자빔을 주사하여 시료에 흐르는 전류를 형상화하는 실험을 수행하였다. 테스트에 사용된 시료는 Cu grid(1000 mesh-type)이며, 선폭이 $9 \mu\text{m}$ 이고 가로와 세로의 간격이 $16 \mu\text{m}$ 으로 Einzel 렌즈의 membrane에서 $850 \mu\text{m}$ 떨어진 곳에 위치하도록 설치되었다.



(a)



(b)



(c)

그림 8. (a) Cu 시료의 전류형상 수집 장치도, (b) 가속모드에서의 전류영상, (c) 감속모드에서의 전류영상.

Source 렌즈를 통과한 전자빔은 deflector를 통과하면서 x, y 방향으로 스캔하며 시료에 주사되도록 하였다. Einzel 렌즈로 인가되는 전압에 따라 전자빔의 초점거리를 조절하여 깨끗한 형상을 얻도록 조절되었다. 그림 8(a)는 Cu 시료로부터의 전류영상을 얻기 위한 장치도이다. 전자의 방출은 source 렌즈의 방출 전류로 조절되며, deflector에서 x, t 방향으로 스캔이 이루어진다. Einzel 렌즈를 통과한 전자빔은 시료에

주사되어 시료 전류를 발생시키며, 이 정보는 deflector의 스캔 정보와 함께 수집되어 시료의 영상을 구성한다. 이미지 측정은 Einzel 렌즈에 음의 전압을 인가하여 집광 렌즈 부분에서 전자들의 운동 속도를 감소시키는 감속 모드와 양의 전압을 인가하여 전자들의 운동을 가속하여 집광하는 가속 모드에서 각각 실험을 진행하였다. 그림 8(b)는 가속모드에서 얻은 영상으로 방출되는 전자의 에너지가 230 eV, source 렌즈에서의 방출 전류가 $-0.8 \mu\text{A}$, Einzel 렌즈에서의 집광 전압이 214 V일 때 얻은 영상이며, 그림 8(c)는 감속모드에서 얻은 영상으로 전자의 에너지가 140 eV, source 렌즈의 방출 전류가 $-0.5 \mu\text{A}$, Einzel 렌즈에서의 집광 전압이 -75 V일 때 얻은 영상이다. 각각은 가속과 감속 모드에서 얻은 최상의 영상이며, 감속 모드는 집광을 하기 위한 인가전압이 낮다는 장점을 가지고 있으나 분해능(resolution) 측면에서는 가속 모드가 더 우수한 특성을 보이는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

초소형 전자 칼럼은 동일한 성능을 가지면서 기존의 전자 빔원의 크기를 10 mm 정도로 축소한 것으로 매우 작고 가벼운 실리콘 전자렌즈를 적층 구조로 조립하는 정밀도가 그 성능을 결정한다. He-Ne 레이저와 4분할 광다이오드를 이용하는 방법으로 회절 무늬 분포를 관찰하여 정렬이 가능하였으며, 전자 렌즈의 개구가 작을 경우는 레이저 빔을 집속하여 사용하였다. 적층 구조를 가진 전자 렌즈의 정렬과 접합은 한꺼번에 이루어져야 하므로 1차 접합으로 레이저 접합을 하여 이동이 가능하도록 한 후 양극 접합으로 렌즈의 구조를 견고하게 하는 방식을 택하였다. 광학 현미경으로 정렬

상태를 확인한 결과 대부분의 경우 5% 이내의 오차에서 정렬과 접합이 이루어졌음을 알 수 있었다.

분해능을 증가시키기 위하여 개구를 작게 할 경우 본 연구에서와 같이 정밀한 정렬로 이루어진 렌즈의 조합으로부터 얻은 선명한 전류영상은 앞으로 이 분야의 연구와 응용을 가속할 것으로 사료된다.

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, pp. 3792-3796, 1996.
- [2] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, (4th ed. Springer-Verlag, Berlin, 1999), chap.5.
- [3] Albright. Co, *Laser Welding, Machining and Material Processing*, (IFS Publication, New York, 1996), chap. 1.
- [4] Kanaoka Masaru *레이저 가공기술*, (한국산업정보센타, 서울, 2000), Chap. 1, Chap. 5.
- [5] Nick Holonyak. Jr. *Contemporary Optics for Scientists and Engineers*, (Prentice Hall, New Jersey, 1976), chap. 1.
- [6] G. Wallis and D. I. Pomerantz, "Field Assisted Glass-Metal Sealing", *J. Appl. Phys.*, vol. 40, no. 10, pp. 3946-3949, 1969.
- [7] K. B. Albaugh, P. E. Chade and D. Rasmussen, "Machining of Anodic Bonding of Silicon to Pyrex Glass", Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Tech. Digest of IEEE, vol. 1, pp. 109-112, 1991.

Optical Assembly and Fabrication of a Micro-electron Column

Jong Seon Park, and Won Kweon Jang[†]

Dept. of Computer and applied physics, Hanseo University

Ho-Seob Kim

Dept. of Advanced Material Science, Sunmoon University

[†] E-mail : jwk@hanseo.ac.kr

(Received July 11, 2006, Revised manuscript August 16, 2006)

A silicon lens and an insulator of pyrex, components of a micro-electron column, should be assembled by aligning and stacking simultaneously. An optical alignment of a diffraction beam and a laser welding were employed for the assembly of a source lens and an Einzel lens with precision within $\pm 4\%$ for the maximum aperture size. The experimental condition for optical alignment and laser welding are explained. Anodic bonding was used to assist in stacking lenses. A micro-electron column of smaller apertures assembled with precise alignment and fabrication was tested with a current image of a Cu grid of $9\mu\text{m}$ in linewidth, and showed a higher resolution in acceleration mode.

OCIS code : 230.3990. 230.4000. 180.0180.