

# Sub-micron의 이온빔 직경을 가지는 축대칭 정전렌즈의 성능 해석 및 개선

## (Performance Analysis and Modifications of Axi-Symmetric Electrostatic Lens for Sub-Micron Ion Beam System)

李 鍾 汝\*, 裴 南 眞\*, 金 輔 佑\*

(Jong Hyun Ih, Nam Jin Bae, and Bo Woo Kim)

### 要 約

액체금속 이온원에서 추출된 이온빔을 웨이퍼위에 집속하기 위한 축대칭 정전렌즈(electrostatic lens)의 해석에 있어서 얇은 판형의 단일 전극에 대한 전위분포식을 이용하였다. 이 방법에 의한 computer code는 이온궤적, 수차 및 이온빔 직경등 정전렌즈의 광학 특성을 보다 짧은 계산시간으로 예측하게 하였으며, 예측된 광학특성은 Burghard의 결과와 잘 일치하였다. 또한 기존의 Orloff, Kurihara 렌즈에 있어서 aperture 직경을 변화시켜 색수차를 줄이면 이온빔의 직경이 20% 정도 감소됨을 알 수 있었다.

### Abstract

We analyzed electrostatic lens with axi-symmetric configurations using the analytic equation for a single apertured lens. The developed computer code afforded to estimate ion optical properties such as ion trajectories, aberrations and ion beam diameters, and was found to have advantages of a shorter calculation time. The calculated ion optical properties for several types of electrostatic lens were in good agreement with Burghard's ones and it was seen that 20% reduction of ion beam diameter could be obtained by the change of aperture diameters.

### I. 서 론

Sub-micron의 직경으로 집속된 이온빔을 이용하면 미세 패턴의 형성, 이온주입 및 에칭등의 반도체 공

정을 마스크없이 수행할 수 있으며<sup>1,2,3,4</sup> 또한 미세한 영역의 표면분석도 가능해 진다.<sup>5</sup> 최근 연구개발되고 있는 액체금속 이온원(liquid metal ion source: LMIS)은 에미터 선단의 매우 작은 영역에서 field evaporation 또는 ionization현상에 의해 고휘도의 이온이 추출됨으로써 위와같은 공정 및 분석의 실용성이 입증되고 있다.<sup>6,7,8</sup>

추출된 이온빔을 반도체 공정에 이용하기 위해서는 이온빔을 고밀도로 집속할 수 있는 이온 렌즈가

\*正會員, 韓國電子通信研究所 化合物半導體硏究部  
(Compound Semiconductor Department, ETRI)

接受日字: 1989年 2月 23日

(※ 본 논문은 1988년도 한국전기통신공사의 연구비 지원에 의해 이루어진 것임.)

필요하다. 전자(electron)의 집속에는 일반적으로 수차(aberration)가 작은 자기 렌즈(magnetic lens)가 사용되며, 전자에 비해 질량이 큰 이온(ion)의 경우에는 집속력이 강한 정전렌즈(electrostatic lens)가 많이 사용된다.<sup>9,10</sup> 정전렌즈의 수차 및 1차 광학특성은 축상의 전위분포로부터 계산되며 집속렌즈(condenser lens)와 대물렌즈(objective lens) 등으로 구성된 이온광학계를 설계<sup>12,13</sup> 또는 그 광학계의 최적화<sup>14</sup>를 하고자 할 때에는 많은 계산시간이 요구된다.

이와 같은 정전렌즈의 설계에 있어서 Szilagyí<sup>14</sup>는 최적화된 축상의 전위분포로부터 축대칭의 정전렌즈를 재현함으로써 저수차(low aberration) 렌즈를 실현하였다. 그러나 이것은 다중전극(multi-electrode) 구조로서 실제의 이온 렌즈로 사용하기에는 많은 수의 고전압 전원 및 feedthrough를 필요로 한다. Tang<sup>15</sup>은 한 전극에 단위전압이 걸리고 그 외의 전극에는 인가전압이 없는 상태에서의 전위분포를 유한요소법으로 구한 다음 각 전극에 걸린 전압을 변수로 하여 색수차의 최소화를 시도하였다. 그러나 이 방법 역시 전위분포로부터 전극을 재현해야 하는 어려움이 있으며, 각 전극의 aperture 직경을 설계변수로 사용할 수 없는 단점도 가지고 있다. 최근 Yokota<sup>16</sup>는 3개의 전극으로 이루어진 등전위렌즈의 전위분포에 대하여 변환함수(transformation function)를 이용하여 analytic formula를 유도하였으나 렌즈의 형태가 가운데 전극을 중심으로 대칭이어야 하고 또한 aperture의 직경과 전극의 간격사이에 함수관계가 있는 제약이 있다.

본 논문은 이와같이 축대칭 정전렌즈에 있어서 설계변수의 확대 및 계산시간의 절약을 위하여 단일 aperture lens에 대한 전위분포식을 이용하여 여러개의 전극으로 구성된 정전렌즈를 해석하는 방법을 제시하고자 한다. 설계변수는 전극사이의 간격, 두께, aperture 직경 및 빔에너지등이며, 이 방법의 정확도를 알기 위하여 다른 논문의 결과와 비교될 것이다. 또한 Orloff 렌즈 및 Kurihara 렌즈<sup>9,10</sup>에 있어서 aperture 직경의 변화를 통하여 보다 작은 이온빔 직경을 얻을 수 있는지에 대하여 논의하고자 한다.

## II. 이온광학계 해석

일반적으로 3차원 공간에 있어서의 전위분포는 (1)식과 같은 Poisson equation을 경계조건과 함께 풀어야 한다.

$$\nabla^2 v = -\sigma/\epsilon \quad (1)$$

$\sigma$  : charge density

$\epsilon$  : dielectric constant

그러나 축대칭의 편형 구조를 가지고 있는 정전렌즈에 대한 전위분포는 analytic formula를 이용하여 근사적으로 나타낼 수 있다. 즉 그림 1과 같이  $z=0$ 의 위치에 두께를 무시할 수 있고 aperture가 있는 축대칭 전극이 존재하여 양쪽의 두 uniform field를 나눌 때 그 축상의 전위는 다음 식으로 표현된다.<sup>17</sup>

$$\phi(z) = \frac{A}{R}z + \frac{B}{R}z \left( \tan^{-1} \frac{z}{R} + \frac{R}{z} \right) + V \quad (2)$$

$z$  : 광학축상의 좌표(전극의 위치:  $z=0$ )

$R$  : aperture의 반경

$V$  : 전극에 인가된 전위

$A, B$  : 경계조건으로 결정되는 상수

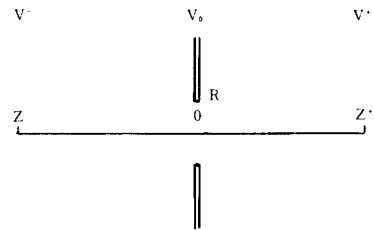


그림 1. 두께를 무시할 수 있고 aperture의 반경이 R인 축대칭의 전극.

Fig. 1. Axi-symmetric electrode with negligible thickness and a circular aperture of radius R.

이웃하는 전극에 인가된 전위를 고려하기 위하여 경계조건이  $z=z^-, z^+$ 에서 전위가  $V^-, V^+$ 라고 하면, 즉  $z=z^-$ 에서

$$\frac{A}{R} + \frac{B}{R} \left( \tan^{-1} \frac{z^-}{R} + \frac{R}{z^-} \right) = \frac{V-V^-}{-z^-} = E^- \quad (3)$$

$z=z^+$ 에서

$$\frac{A}{R} + \frac{B}{R} \left( \tan^{-1} \frac{z^+}{R} + \frac{R}{z^+} \right) = \frac{V^+-V}{z^+} = E^+ \quad (4)$$

와 같은 2원 1차 연립 방정식이 얻어지며, 이 식으로부터 상수 A, B는 쉽게 구해진다.

이와 같이 한 개의 전극에 대해 얻어진 전위분포에 관한 식은 여러개의 전극으로 이루어진 정전렌즈에도 이용될 수 있다.

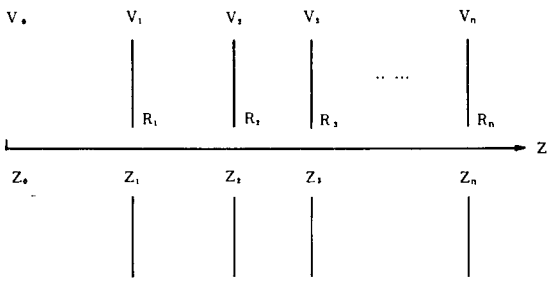


그림 2. 여러개의 관형 전극으로 이루어진 정전 렌즈 model에 있어서 전극의 위치, aperture의 반경 및 인가전압.

Fig. 2. The location, aperture diameter and focus voltage of electrostatic lens consisting of n electrodes.

그림 2.와 같이 n개의 전극으로 구성된 정전 렌즈의 전위분포는 각 단위전극에 대한 전위분포식인  $\phi(z)$ 를 모두 더하고 이웃하는 전극사이에서 중복적으로 더해지는 항을 빼내면 된다.

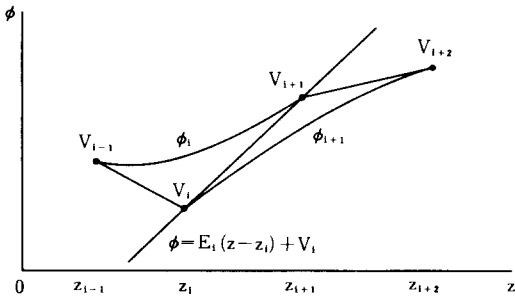


그림 3. 이웃하는 두 전극에 대한 전위분포의 계산을 위한 model.

Fig. 3. Computational model for the potential distribution due to the nearest neighbored electrodes.

즉 그림 3에서  $V_1, V_{1+1}$ 가 인가된 단위전극의 전위분포에 있어서  $\phi'_i(\infty) = \phi'_{i+1}(-\infty) = E_1$ 이므로 중복적으로 더해진 양인  $V_1$ 와  $V_{1+1}$ 를 잇는 직선의 식  $\phi = E_1(z - z_1) + V_1$ 이 제거되어야 옳은 전위분포를 얻을 수 있으며, 여기서

$$E_1 = \frac{V_{1+1} - V_1}{z_{1+1} - z_1} \tag{5}$$

$V_i$  : 전극에 인가된 전압  
 $z_i$  : 전극의 위치

이다.

따라서 정전렌즈 전체에 대한 전위분포  $\phi_z(z)$ 는 (6)식과 같이 표현되며, aperture의 직경이 전극사이의 거리와 같은 정도일 때 까지는 유효한 전위분포가 얻어진다.

$$\phi_z(z) = \sum_{i=1}^n \{ \phi_i(z - z_i) - E_i(z - z_i) - V_i \} + V_0 \tag{6}$$

여기서 두께를 무시할 수 없는 전극이 있는 경우에는 그 전극의 양 경계위치에 두께를 무시할 수 있는 두 전극으로 대치함으로써 전극의 두께가 설계변수로 고려된다. (3), (4)식의 경계조건으로는  $z = z^-$ 에서의  $V^-, V^+$ 대신  $z = -\infty, +\infty$ 에서의  $E_{i-1}, E_i$  조건으로 할수도 있으며, 위의 방법과 비교 할 때 전위분포는 거의 비슷하였으나 렌즈 외부영역에서 전위의 offset이 약간 있었다.

이와 같이 구해진 축상의 전위분포는 이온체적의 simulation에 사용되어 정전렌즈의 1차 특성을 결정하는 대물측, 상측의 두 초점거리와 수차등을 결정한다. 이온체적은 근축광선 방정식(paraxial ray equation)<sup>(18)</sup>에 의해 지배되며, 이온전류 자체에 의한 공간전하 효과(space charge effect)를 무시하는 경우에 (7)식으로 표현된다.

$$r'' + \left( \frac{\phi''}{2\phi} \right) r' + \left( \frac{\phi'}{4\phi} \right) = 0 \tag{7}$$

$r$  : 반경 방향의 좌표  
 $\phi$  : 광축축상의 전위

본 논문에서의 이온체적은 4차의 Runge-Kutta 방법으로 계산되었다.

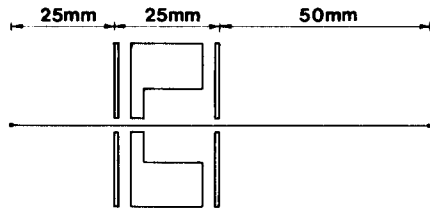
Sub-micron의 빔직경을 만들기 위한 정전렌즈의 설계에서 고려해야 할 수차로는 구면수차와 색수차가 있다. 구면수차(spherical aberration)는 축상에 있는 object에 대해서도 zero가 되지 않는 유일한 3차 order의 수차로서 광학축에서 벗어난 이온선일수록 더 심하게 집중되기 때문에 발생하며, 색수차(chromatic aberration)는 이온원에서의 에너지분포 및 집중전압의 변동으로 인해 에너지가 큰 이온빔이 더 심하게 집중됨에 따라 발생하는 수차이다.

이온빔 직경은 집중 이온빔 시스템에서 가장 중요한 성능변수이며 이를 정확히 예측하기 위해서는 상

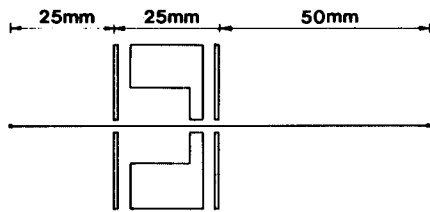
의 확대외에도 구면수차와 색수차의 영향을 고려해야 하며,<sup>[9]</sup> 미소전류일 경우에는 회절(diffraction) 효과도 무시할 수 없다. 따라서 이온빔 직경 D는 각 영향요소의 quadratic sum인 (8)식으로 계산된다.

$$D^2 = (M D_s)^2 + (0.5 M C_{s0} \alpha_0)^2 + \left( M C_{c0} \frac{\Delta V}{V_0} \alpha_0 \right)^2 + \left( M \frac{\lambda}{\alpha_0} \right)^2 \quad (8)$$

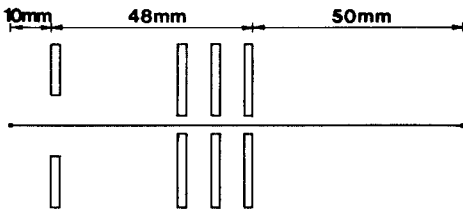
- $D_s$  : effective source size
- M : 배율
- $C_{s0}$  : 구면수차
- $C_{c0}$  : 색수차
- $\alpha_0$  : objective side의 입사각
- $\Delta V$  : 에너지 변화량
- $V_0$  : 입사 이온빔 에너지
- $\lambda$  : De Broglie 파장



(a) Orloff lens



(b) Orloff-reversed lens



(c) Kurihara lens

그림 4. 정전렌즈의 전산 model  
Fig. 4. Computational model for electrostatic lenses.

### III. 계산 결과의 비교검토

본 절에서는 2절에서 제안된 전위분포 식을 사용하여 그림 4와 같이 2개의 고전압 전원과 feedthrough를 요구하는 3가지 형태의 정전렌즈에 대하여 이온광학 특성변수를 계산하고 그 결과를 다른 논문과 비교 검토하고자 한다.

그림 5에는 전산모사의 흐름도를 보였으며, 계산에 사용된 computer는 IBM PC/AT로서 mesh size 0.02mm, 전체 광학거리 100mm일 때의 계산시간은 60 sec 정도였다. 이와 같이 analytic formula를 이용하여 전위를 구하면 FEM(Finite Element Method)이나 FDM(Finite Difference Method)에 비해 계산시간이 절약될 뿐만 아니라 복잡한 경계조건의 입력이 불필요하게 된다.

따라서 이 방법은 집속 이온빔 시스템의 최적 작동범위를 예측할 때, 또는 이온광학계의 최적설계와 같이<sup>[10]</sup> 많은 반복계산을 요구하는 경우에 있어서 시간적으로 매우 유리하다.

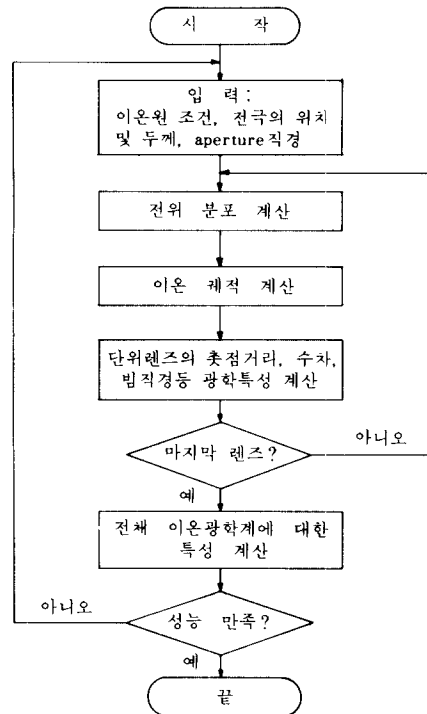


그림 5. 정전렌즈의 이온광학 특성을 계산하기 위한 전산 흐름도  
Fig. 5. Flow chart for the calculation of ion optical properties of electrostatic lens.

사용된 액체금속 이온원의 조건은 표 1과 같으며 정전렌즈로부터 상점까지의 거리가 50mm인 경우에 계산된 이온 광학 특성을 표 2에 나타내었다.

표 1. 액체금속 이온원의 조건.

Table 1. Parameters of liquid metal ion source.

parameter	symbol	value	unit
Ga <sup>+</sup> ion	m	69.72	amu
total current	i	1	nA
intensity	J	25	$\mu\text{A}/\text{sr}$
energy spread	$\Delta V$	10	eV
source의 크기	D <sub>s</sub>	50	nm
추출 에너지	V <sub>e</sub>	7.5	keV

표 2. a) Orloff 렌즈, b) 역 Orloff 렌즈, c) Kurihara 렌즈에 대해 계산된 이온광학 특성의 비교

Table 2. Calculated ion optical properties of a) Orloff lens, b) Orloff-reversed lens, and c) Kurihara lens.

energy mode parameter	5 keV		25 keV		50 keV	
	decel	accel	decel	accel	decel	accel
a) C <sub>S1</sub>	133.	20.8	66.2	227.	51.5	261.
C <sub>C1</sub>	0.664	0.151	1.23	1.08	1.27	1.96
M	2.69	2.16	1.41	2.03	1.10	1.65
m	0.456	0.567	0.388	0.269	0.351	0.235
dia.	2.18	0.628	0.690	0.438	0.328	0.347
b) C <sub>S1</sub>	36.1	22.7	46.8	21.9	40.8	65.4
C <sub>C1</sub>	0.387	0.134	0.449	0.411	0.482	1.32
M	1.42	1.25	0.828	1.36	0.741	1.44
m	0.860	0.982	0.662	0.402	0.523	0.268
dia.	2.43	1.06	0.526	0.248	0.226	0.264
c) C <sub>S1</sub>	42.2	11.1	42.3	9.58	39.5	9.03
C <sub>C1</sub>	0.426	0.143	0.429	0.166	0.446	0.208
M	1.35	1.33	0.960	0.977	0.912	0.931
m	0.908	0.921	0.571	0.561	0.425	0.416
dia.	2.85	0.960	0.395	0.146	0.158	0.079

\*C<sub>S1</sub> (m) : spherical aberration on image side  
 C<sub>C1</sub> (m) : chromatic aberration on image side  
 M : linear magnification  
 m : angular magnification  
 dia. ( $\mu\text{m}$ ) : beam diameter

원하는 위치에 하전입자를 집중하기 위한 집중전압(focus voltage)의 값은 일반적으로 1개 이상 존재한다. 따라서 전극이 3개이고 정전렌즈를 통과하기 전과 후에 있어서 하전입자의 에너지가 동일한 등전위 렌즈(equipotential lens)에서는 첫 구간에서 가속되고 다음구간에서 감속되는 경우를 가속모드(accel mode), 그 반대의 경우를 감속모드(decel mode)로 정의한다. 그러나 표 2에서 계산된 바와 같이 렌즈 전후에서의 에너지가 다른 immersion lens의 경우에는 집중전극의 전위가 양단 전위 사이에 있을 수 있으며 이 때는 mode의 정의가 모호해진다. 따라서 본 계산에서는 양단전위를 이용하여 interpolation하였을 때, 집중전압이 이 보다 클 때를 accel mode, 작을 때를 decel mode로 정의하였으며, 이는 등전위 렌즈의 경우에도 똑같이 적용된다.

이와 같이 계산된 결과를 Burghard의 논문<sup>10)</sup>과 비교할 때 이온빔 직경에 있어서는 잘 일치하고 있으나, Orloff렌즈와 Kurihara 렌즈의 decel mode에서 약간의 배율차이를 볼 수 있다. 역 Orloff렌즈(Orloff-reversed lens)에서도 이온빔 직경등 대부분의 특성변수가 잘 일치하고 있으나, 이온빔 에너지가 25keV의 accel mode에서는 큰 차이를 보이고 있어 추후 F-DM에 의해 계산된 결과와 비교검토할 예정이다.

IV. 정전 렌즈의 개선

3절에서의 여러 정전 렌즈에 대한 계산 및 비교 결과로부터 5 keV의 낮은 에너지를 갖는 이온빔에서는 Orloff lens의 accel mode가 유리하며, 50keV의

표 3. Orloff, Kurihara 렌즈에 있어서 배율, 구면수차, 색수차 및 회절이 상점에서의 이온빔 직경에 미치는 영향

Table 3. The effects of magnification, spherical aberration, chromatic aberration and diffraction on the ion beam diameter at image point.

type	에너지	(단위: $\mu\text{m}$ )				
		배 직경	상 확대	구면수차	색수차	회절
Orloff lens	5 keV	0.628	0.108	0.086	0.613	0.00002
	25 keV	0.438	0.102	0.101	0.414	0.00002
	50 keV	0.348	0.083	0.077	0.329	0.00002
Kurihara lens	5 keV	0.960	0.067	0.197	0.938	0.00002
	25 keV	0.146	0.049	0.038	0.132	0.00001
	50 keV	0.079	0.047	0.015	0.062	0.00001

표 4. 상점거리가 50mm 일 때, aperture 직경의 변화에 따른 Orloff 렌즈와 Kurihara 렌즈의 집속전압.

Table 4. Focus voltages of Orloff and Kurihara lens according to the variation of aperture diameters in case of image distance 50mm.

lens type	aperture diameter (mm)				ion beam energy		
	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	5 keV	25 keV	50 keV
Orloff	3	3	3		21.55	28.72	27.54
Orloff-I	6	3	3		24.02	37.44	37.78
Orloff-II	6	3	10		26.47	37.55	37.80
Kurihara	15	4	4	4	15.60	73.78	141.9
Kurihara-I	15	10	4	4	17.35	78.86	150.2
Kurihara-II	15	10	4	8	19.22	85.49	161.5

높은 에너지의 경우에는 Kurihara lens의 accel mode가 유리함을 알 수 있었다. 따라서 본 절에서는 작은 빔직경을 갖는 위 두 경우에 대하여 보다 작은 빔직경을 얻기 위한 방법을 모색하고자 한다.

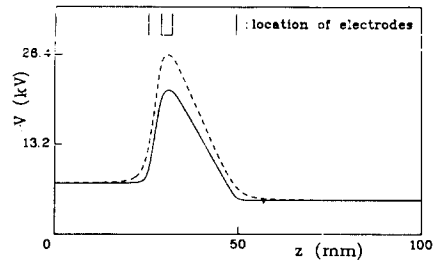
표 3 은 이 두 가지 형의 렌즈에 대하여 이온빔 에너지가 5, 25, 50keV일 때 이온원의 크기, 구면수차, 색수차 및 회절효과가 이온빔 직경에 미치는 영향을 보이고 있으며, 1nA정도의 이온 전류에 있어서는 색수차에 의한 영향이 지배적임을 보여 준다. 따라서 본 절에서는 전극의 aperture 직경의 크기와 색수차의 관련성을 조사하여 이온빔 직경을 줄이는 방법에 대하여 검토하기로 한다.

그림 6 - 11의 (a), (b), (c)는 Orloff 렌즈와 Kurihara 렌즈에서 5keV, 25keV, 50keV의 빔에너지에 대하여 전위분포, 이온궤적 및 색수차를 이온원으로 부터의 거리 z에 따라 계산하여 그린 것이며, 대물측의 색수차 C<sub>c0</sub>는 다음 식으로 계산되었다.<sup>20)</sup>

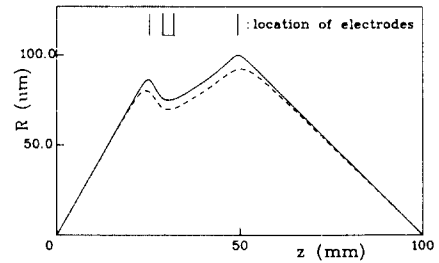
$$C_{c0} = \frac{3}{8} \sqrt{V_0} \int_{z_0}^{z_1} \frac{\phi'^2}{\phi^{5/2}} r^2 dz \quad (9)$$

여기서 r은 이온빔이 광축축으로 부터 떨어진 거리로서 r(z<sub>0</sub>)=0, r'(z<sub>0</sub>)=1의 경계조건을 만족하는 (7)식의 해이며, V<sub>0</sub>는 입사 에너지, z<sub>0</sub>, z<sub>1</sub>는 각각 objective, image point의 위치를 나타낸다.

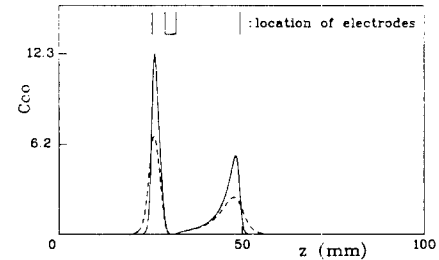
그림 6 - 11의 (c)로부터 개선전 렌즈의 전극 근처에서 색수차가 급격히 증가함을 알 수 있다. 이 수차를 줄이기 위하여 전극의 aperture 직경을 크게 하



(a)



(b)



(c)

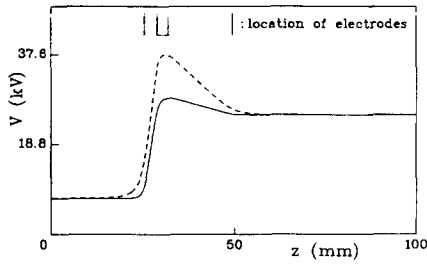
그림 6. Orloff 렌즈에서 빔에너지 5keV일 때의 이온광학 변수,

- (a) 전위분포, (b) 이온궤적 (c) 색수차
- (— : 기존의 Orloff lens, - - - - : Orloff lens II)

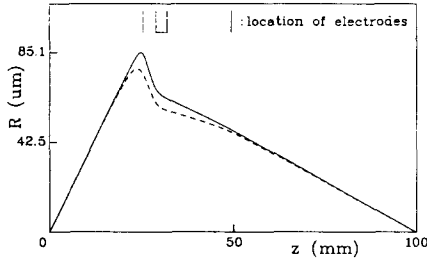
Fig. 6. Ion optical parameters of Orloff lens for 5keV beam energy.

- (a) potential distribution.
- (b) ion trajectory.
- (c) chromatic aberration.
- (— : suggested by Orloff, - - - - : Orloff lens II)

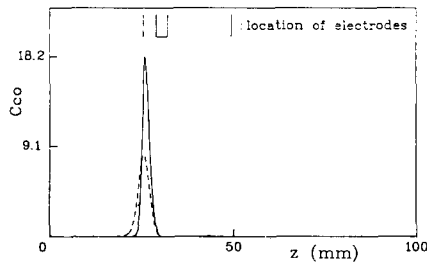
면 aperture에서의 전장 ϕ'가 작아져 상점(image point)까지의 거리가 길어진다. 또한 상점거리가 같은 50mm이기 위해서는 집속전압이 높아져야 하며 이로 인해 전위 ϕ가 커지게 된다. 이 두가지 효과는 적분식으로 표시된 (9)식에서 알 수 있는 바와 색수차 C<sub>c0</sub>



(a)



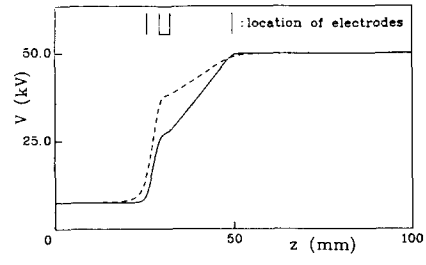
(b)



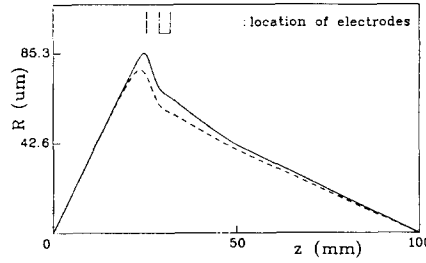
(c)

그림 7. Orloff 렌즈에서 빔에너지 25keV일 때의 이온광학 변수,  
(a) 전위분포 (b) 이온 궤적 (c) 색수차  
(— : 기존의 Orloff lens,  
---- : Orloff lens II)

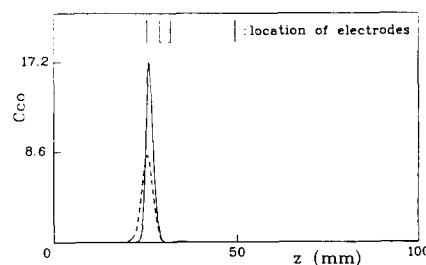
Fig. 7. Ion optical parameters of Orloff lens for 25keV beam energy.  
(a) potential distribution.  
(b) ion trajectory.  
(c) chromatic aberration.  
(— : suggested by Orloff,  
---- : Orloff lens II)



(a)



(b)



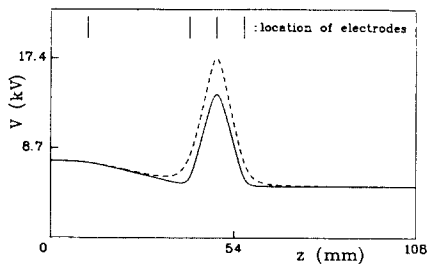
(c)

그림 8. Orloff 렌즈에서 빔에너지 50keV일 때의 이온광학 변수  
(a) 전위분포 (b) 이온 궤적 (c) 색수차  
(— : 기존의 Orloff lens,  
---- : Orloff lens II)

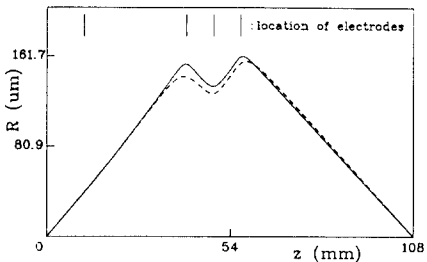
Fig. 8. Ion optical parameters of Orloff lens for 50keV beam energy.  
(a) potential distribution.  
(b) ion trajectory.  
(c) chromatic aberration.  
(— : suggested by Orloff.  
---- : Orloff lens II)

를 감소시키며 이는 그림 6 - 11의 (c)에서 확인된다. 따라서 aperture 직경의 변화에 의하여 배율과 색수차의 곱이 작아진다면 (8)식으로부터 이온빔 직경이 감소됨을 예상할 수 있다.

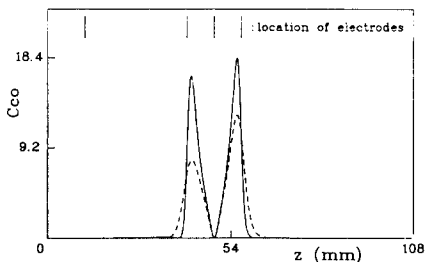
그림 12는 표 4에 따라 aperture 직경을 변화시켜 계산된 이온빔 직경을 보이고 있다. Orloff lens의 이온빔 직경은 전체 에너지 영역에 있어서 20% 정도 줄었으며, 첫째 전극보다 마지막 전극의 aperture 직경



(a)



(b)



(c)

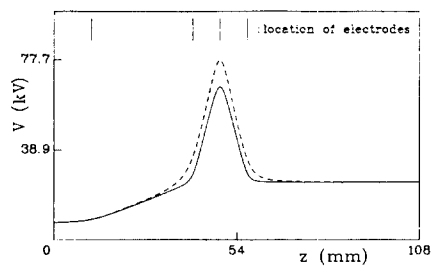
그림 9. Kurihara 렌즈에서 빔에너지 5keV일 때의 이온광학 변수

(a) 전위분포 (b) 이온 궤적 (c) 색수차  
 (— : 기존의 Kurihara lens,  
 ---- : Kurihara lens II)

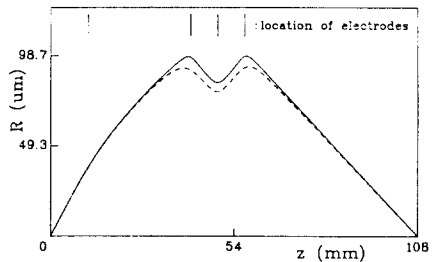
Fig. 9. Ion optical parameters of Kurihara lens for 5keV beam energy.

(a) potential distribution.  
 (b) ion trajectory.  
 (c) chromatic aberration.  
 (— : suggested by Kurihara,  
 ---- : Kurihara lens II)

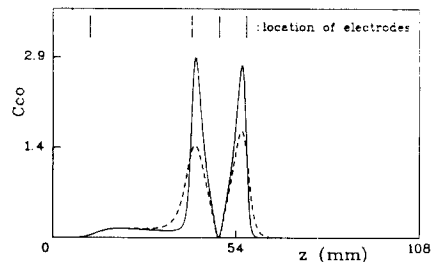
을 크게 하는 것이 보다 효과적이었다. Kurihara lens에 있어서는 색수차가 큰 두번째와 네번째 전극의 aperture 직경을 크게 함으로써 5keV의 낮은 에너지 영역에서 빔직경이 감소하였으나 50keV에서의 빔직



(a)



(b)



(c)

그림 10. Kurihara 렌즈에서 빔에너지 25keV일 때의 이온광학 변수

(a) 전위분포 (b) 이온 궤적 (c) 색수차  
 (— : 기존의 Kurihara lens,  
 ---- : Kurihara lens II)

Fig. 10. Ion optical parameters of Kurihara lens for 25keV beam energy.

(a) potential distribution.  
 (b) ion trajectory.  
 (c) chromatic aberration.  
 (— : suggested by Kurihara,  
 ---- : Kurihara lens II)

경은 줄지 않았다.

이와 같이 마지막 전극의 aperture 직경 증가는 특히 낮은 에너지 영역에서의 빔직경을 줄이지만 관구 효과(fringe effect)에 의해 전장(electric field)의 tail



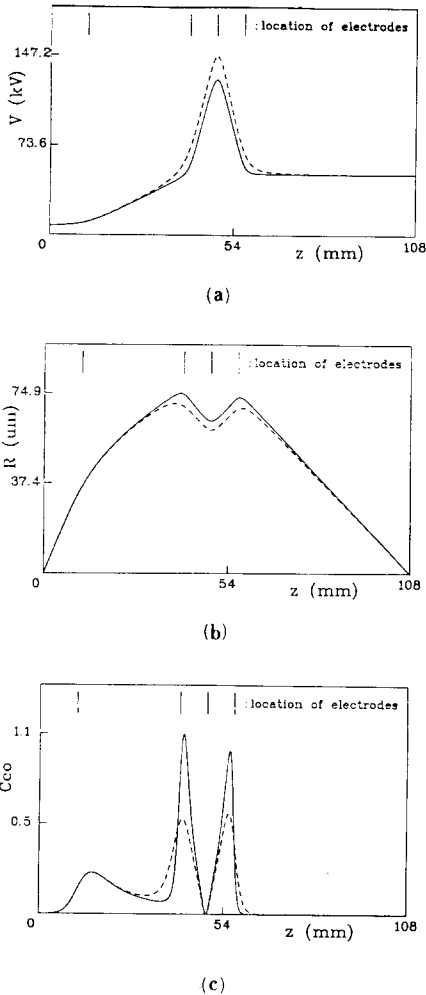


그림11. Kurihara 렌즈에서 빔에너지 50keV 일 때의 이온광학 변수  
 (a)전위분포 (b)이온 궤적 (c)색수차  
 (— : 기존의 Kurihara lens, --- : Kurihara lens II)  
**Fig. 11.** Ion optical parameters of Kurihara lens for 50keV beam energy.  
 (a)potential distribution,  
 (b)ion trajectory,  
 (c)chromatic aberration.  
 (— : suggested by Kurihara, --- : Kurihara lens II).

부분이 길어져 마지막 렌즈와 상점사이에서 집속전압의 영향이 없는 영역인 working distance가 실제적으로 짧아지는 문제점이 발생할 수 있다. 따라서 이온빔의 주사(scanning)를 위하여 scanner와 같은 모

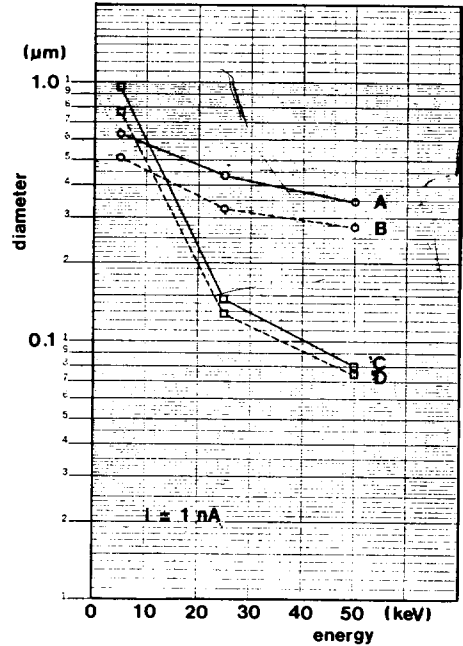


그림12. 기존 제안된 경우와 변형된 경우의 정전 렌즈에 대한 이온빔 직경  
**Fig. 12.** Estimated ion beam diameters of original Orloff, Kurihara lens and modified ones.  
 (A : Orloff lens, B : Orloff lens II, C : Kurihara lens, D : Kurihara lens II).

둘이 정전렌즈의 바로 다음에 위치할 경우에는 빔직경과 working distance 사이의 trade-off 을 고려하여 설계하여야 하며, 전극사이의 간격까지 설계변수로 포함하여 이를 최적화 할 필요가 있다.

반면, Orloff lens 첫 번째 전극과 Kurihara lens 두 번째 전극의 aperture 직경을 다른 전극보다 크게 하는 것은 다른 광학계에 영향을 주지 않고 이온빔 직경을 줄이는 장점이 있게 된다.

집속전압에 의한 진공 절연과파의 관점에서는 집속전압이 인가된 전극의 뒷 쪽에 치우쳐 있는 Kurihara lens보다 그 반대의 경우인 Orloff lens가 유리하였다. 50keV 이온 에너지의 Kurihara lens에서 최대 전장의 세기는 이론적인 절연과파의 임계값인 10kV/mm 에 이르렀으며 aperture 직경의 확장에 의하여 절연과파의 위험성이 심화되었다. 그러나 이온빔 시스템에 있어서 전기적 절연과파의 위험성은 전장의 세기 외에도 전극의 재료, 표면처리 및 오염등에 따라

크게 달라지며, 렌즈의 구조상 필요한 절연체의 표면조도(surface roughness) 및 전극과 절연체가 이루는 각(junction angle)에 의해서도 큰 영향을 받으므로 일반적으로 이론적인 임계 전위가 절연파괴의 기준은 되지 않는다.

## V. 결 론

축대칭 관형 전극으로 구성된 정전렌즈의 이온 광학 특성을 single apertured lens에 대한 전위분포를 이용하여 계산하였다. 개발된 computer code의 설계 변수는 전극의 간격, 두께, aperture 직경 및 빔에너지이며 계산과정에서 analytic formula를 사용하였기 때문에 여러 광학요소로 구성된 이온 광학계의 설계 또는 그 최적화와 같이 많은 계산시간을 요하는 경우에 특히 유리하였다.

본 code에 의해 계산된 여러 렌즈의 배율, 수차 및 이온빔 직경등 광학 특성은 Burghard 결과와 잘 일치하였으며, 또한 기존에 제안된 Orloff 렌즈의 마지막 전극과 Kurihara 렌즈의 두번째, 네번째 전극에 있어서 aperture 직경을 확대하여 새수차를 줄이면 이온빔 직경이 20% 정도 감소됨을 확인하였다.

향후의 연구로서 집속렌즈(condenser lens)와 대물렌즈(objective lens)를 갖는 이온광학계에 대한 전산 모사로부터 sub-micron의 빔직경을 갖는 이온빔 시스템을 설계 제작한 후 본 code의 결과와 실험적으로 비교 검토하고자 한다.

## 參 考 文 獻

- [1] H. Morimoto et al., "Submicron-gate MOSFET's by use of focused ion beam exposure and a dry development technique," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-34(2) pp. 230-234, 1987.
- [2] E. Miyauchi et al., "Maskless ion beam writing of precise doping patterns with Be and Si for molecular beam epitaxially grown multilayer GaAs," *J. Vac. Sci. Technol.*, B4(1), pp. 189-193, 1986.
- [3] Y. Ochiai et al., "Characteristics of maskless ion beam assisted etching of silicon using focused ion beams," *J. Vac. Sci. Technol.*, B4(1), pp. 333-361, 1986.
- [4] J. Melngailis et al., "The focused ion beam as an integrated circuit restructuring tool," *J. Vac. Sci. Technol.*, B4(1), pp. 176-180, 1986.
- [5] W. Drummond et al., "Small electron and ion beams in surface analysis: their optics, interactions and uses," *Vacuum*, vol. 31, no. 10-12, pp. 579-588, 1981.
- [6] D.R. Kingham et al., "Atheoretical model of a liquid metal ion source," *Vacuum*, vol. 34 (10/11), pp. 941-945, 1984.
- [7] L.W. Swanson, "Liquid metal ion source: Mechanism and applications," *Nuclear instruments and methods in physics research*, vo. 218, pp. 347-353, 1988.
- [8] W.M. Clark et al., "Long-lifetime, reliable liquid metal ion sources for boron, arsenic, and phosphorus," *J. Vac. Sci. Technol.*, B5(1), pp. 197-202, 1987.
- [9] K. Kurihara et al., "A focused ion beam system for submicron lithography," *J. Vac. Sci. Technol.*, B3(1), pp. 41-44, 1985.
- [10] R.A. Burghard et al., "Performance comparison of electrostatic lenses for field emission ion and electron sources," *J. Vac. Sci. Technol.*, A5(3), pp. 364-371, 1987.
- [11] R. Aihara et al., "Performance of a 20-200 kV focused ion-beam system with a new optical design concept," *J. Vac. Sci. Technol.*, B6(1), pp. 245-248, 1988.
- [12] M. Szilagyi, "Improvement of electrostatic lenses for ion beam lithography," *J. Vac. Sci. Technol.*, B1(4), pp. 1137-1140, 1983.
- [13] T.T. Tang et al., "Design of an electrostatic optical system for ion beam lithography," *J. Vac. Sci. Technol.*, B5(1), pp. 165-168, 1987.
- [14] H. Yokota et al., "analytic potential expression of a three-plane parallel-electrode system with special aperture," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-34, no. 2, pp. 486-489, 1987.
- [15] A.B. El-Kareh et al., *Electron beams, lens and optics*, vol. 1, pp. 23-53, Academic press, 1970.
- [16] A. Septier, *Applied charged particle optics*, part B, pp. 45-71, Academic press, 1970.
- [17] M.R. Smith et al., "A unified aberration theory for electrostatic round lenses, multipole lenses and deflectors," *Optik*, vol. 74, no. 1, pp. 7-16, 1986.
- [18] X. Jiye, *Aberration theory in electron and ion optics*, pp. 367-421, 1986.
- [19] L.L. Alston, *High-voltage technology*, Oxford University press, pp. 59-94, 1968.
- [20] R.J. Amos et al., "Optimization of the pro-

erties of a microfocused ion beam system,"  
*J. Phys. E : Sci. Instrum.*, vol. 21, pp. 86-91, 1988.

- [12] J. Orloff, "Comparison of optical design approaches for use with liquid metal ion sources," *J. Vac. Sci. Technol.*, B5(1), pp. 175-177, 1987.

### 감사의 글

본 논문의 작성에 많은 조언을 주신 한국전자통신 연구소 공정장비연구실 실원들께 감사드리며, 특히 프로그램 작성에 도움을 주신 이용일씨께 고마움을 느낍니다.

---

### 著 者 紹 介

---

#### 李 鍾 法 (正會員)

1958年 3月 13日生. 1981年 2月 서울대학교 기계설계학과 졸업 공학사 학위취득. 1983年 2月 한국과학기술원 기계공학과 졸업 공학석사 학위취득. 1986年 8月 한국과학기술원 기계공학과 졸업 공학박사 학위취득. 1986年 10月 ~ 현재 한국전자통신연구소 화합물반도체연구부 공정장비연구실 선임연구원. 주관심 분야는 음향학과 lithography 등 반도체 공정장비 분야임.

#### 金 輔 佑 (正會員) 第 26 卷 第 7 號 參照

현재 한국전자통신연구소 화합물반도체연구부 공정장비연구실 실장

#### 裴 南 眞 (正會員) 第 25 卷 第 11 號 參照

●  
 현재 한국전자통신연구소 화합물반도체연구부 공정장비연구실 연구원