조사분석

# 광역이온원의 구조 및 원리

심규환* 편광의* 강진영*

목 차

Ⅰ. 서 론
Ⅱ. 방 전
Ⅲ. 이온광학
Ⅳ. 음극
Ⅴ. 이온원의 작동
Ⅵ. 이온선 분포
Ⅶ. 맺음말

* 화합물반도체연구부

## Ⅰ. 서 론

이온선은 형성원리 및 용도에 따라 여러 에너지대와 형태로 개발되어 왔다.[1][2][3]반도체 공정분야에서는 열증착, 이온주입 등이 가장 널리 쓰여 왔으며, 삼차원 소자개발 등의 미세가공용으로 집속이온선 ( Focused Ion Beam ; FIB )에 대한 연구 등은 활발히 진행되고 있다. 그 중에서 광역이온선은 얇은막 증착,식각 등에 사용범위가 매우 넓고 효과적이므로 반도체공정 및 신소자의 개발에 점차 필요성이 부각되고 있다.[3]

광역이온원은 1954년 NASA 에서 Kaufman 등이 개발하기 시작하였으며, 1970년 이후 오염의 방지와 이온선 전류의 증대화를 개선시킨 End-Hall Effect 이온원이 개발되었다. 또한 이 이온원을 이용한 반도체기술로는 Ion Assisted Etch(IAE), 반응성 이온선 식각(Reactive Ion Beam Etch ; RIBE)과 Ion Beam Co-Deposition 등이 연구되고 있다. 한편으로는 1960년 이후 위성의 궤도수정용 추진기나 레이저반사경 등의 우주전략적 기술의 개발에 응용할 목적으로 주로 연구되어 왔다. 본 연구실에서는 화합물 반도체의

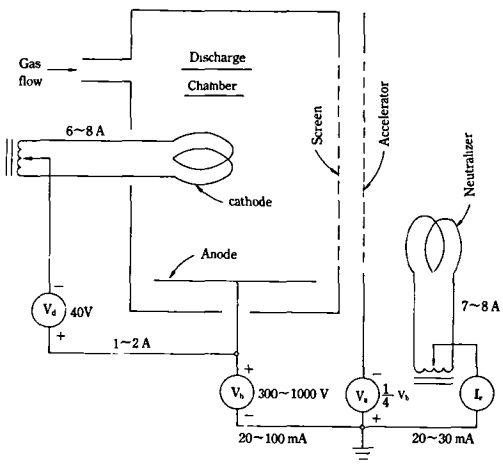
공정에 응용하기 위해 광역이온원이 3개 부착된 이온밀링 (ion milling) 장비를 구매하였다.

본 고는 제작사인 Commonwealth사의 기술보고[5]와 H.R Kaufman의 논문[1]을 주로 참조하였으며, 직경이 3cm인 집속형(focusing type) 이온원과 12cm인 비집속형(defocusing type)이온원의 이온선을 동작조건에 따라 측정한 결과를 간략히 살펴보았다. 광역이온선에 대한 근본적 이해는 이온밀링 장비를 이용한 증착 및 식각 공정연구에 많은 도움이 될것으로 고려된다.

# II. 방전

## 1. 방전방 (Discharge Chamber)

방전방의 대략적 구조는 〈그림1〉과 같다. 방전전압은 되도록 작은 것이 유리하나 너무 작으면 방전이 일어나지 않는다. 방전방에서 중성의 밀도는 전자나 이온의 밀도보다 10배 정도 높은 $10^{13}cm^{-3}$정도이다. 중성들은 벽의 평균온도와 일치하는 불균일한 에너지를 갖는다. 이온들은 경계로 가속되어 거의 이온의 음속에 가까운 속도로 된다. 즉,




〈그림1〉 이온원의 개략도

$$Va = ( kTe/m_i)^{1/2} \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

이며, 여기서 k는 볼프만 상수, Te는 전자의 온도(eV), $m_i$는 이온의 질량이다. 경계로의 이온속도는 중성의 평균속도보다 높다. 따라서 중성밀도 (neutral density)가 이온밀도보다 높지만, 이온의 추출률은 중성의 손실률보다 높거나 같다. 플라즈마 (plasma)의 포텐셜 (potential)은 방전방에서 수 볼트 이내로 균일하다.

대부분의 경우 이온들이 음극에서 나오고, 전자들은 거의 충분한 방전전압을 가지고 음극에서 플라즈마로 주입된다. 전자들은 대부분 중성의 이온화나 여기충돌에 의해 에너지를 잃는다. 이때 전자의 충돌에는 중성과의 충돌과 배경전자와의 충돌 (Maxwellian soft or Coulomb 충돌)이 있다.

초기전자는 15~20 eV 인데 쿨롬충돌단면적이 작으므로 배경전자에 의한 에너지 소모나 높은 에너지의 이온화에 대한 기여는 거의 없다. 초기전자는 전체전자의 10% 정도이며, 1~10 eV 인 Maxwellian 의 낮은 에너지의 전자가 대부분이다. 이온화에 필요한 초기전자의 평균 자유행정은 대개 방전관보다 크다. 이러한 초기전자를 방전관내에 보유하는 것은 방전방의 설계에 고려되어야 한다. 이를 위해서는 벽표면의 포텐셜을 거의 음극관의 포텐셜과 같게하거나 표면을 자기장으로 보호한다. 이 보호기능을 위해 음극과 양극사이에 필요한 이론적인 전체적 자기의 양은[1]

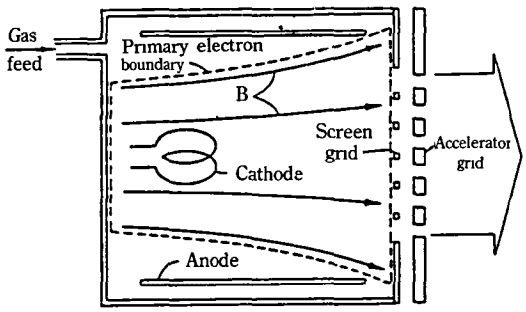
$$\text{Integral}( \vec{B} \times d\vec{X} ) = 6.74\times10^{-6}V_d^{1/2} \cdots (2)$$

이다. 이때 적분은 T.m 단위이고 방전전압 $V_d$는 volt이다. 이러한 초기전자 보유용 자기의 적분치는 때때로 매우 큰 값이다. 자기장은 Maxwellian 분포의 전자가 양극으로 이탈하는 것을 방지하는 경향이 있는데, 한편으로는 이러한

이탈은 방전회로를 구성하는데 필요하다. 따라서 자기적분치는 초기전자의 보유량과 Maxwellian 전자의 양극이탈을 적절히 조절하는 선에서 결정된다.

## 2. 방전용기의 형태

방전용기의 형태는 축방향의 자력선을 갖는 axial-field chamber 와 여러개의 자극을 갖는 multipole-type chamber 등이 있다. 〈그림2〉의 axial-field chamber는 방전용기의 초기형태로써 이온선의 균일성 문제가 남아 있지만, 아직 작은 크기의 이온원으로 사용되고 있다. 초기전자가 충돌없이 도달되는 영역인 초기 전자경계는 양극을 자르는 최내부 자기력선까지 이므로 방전방 부피의 60~70% 밖에 되지 않는다.

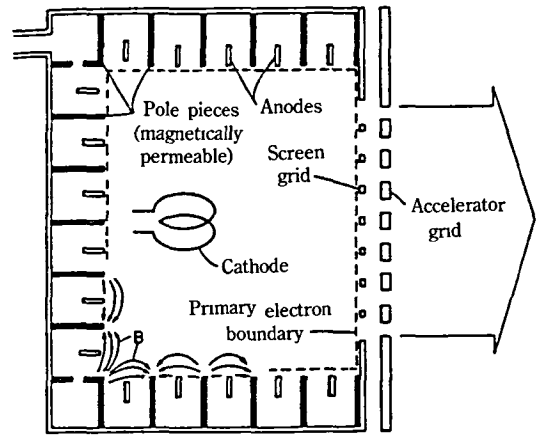



〈그림 2〉 Axial-field Chamber

이에 대해 〈그림3〉의 multipole-type chamber 형태는 벽부근에 자력을 집중시켜, 방전방내에 플라즈마가 균일하게 형성되게 한다. 또한 초기전자경계는 〈그림(3)〉에서 점선과 같이 존재하여 대략 방전방의 전체부피로 계산될 수 있는 장점이 있다.

## 3. 방전손실

방전방에서 생성된 이온들은 모든 방향으로




〈그림 3〉 multipole-type chamber

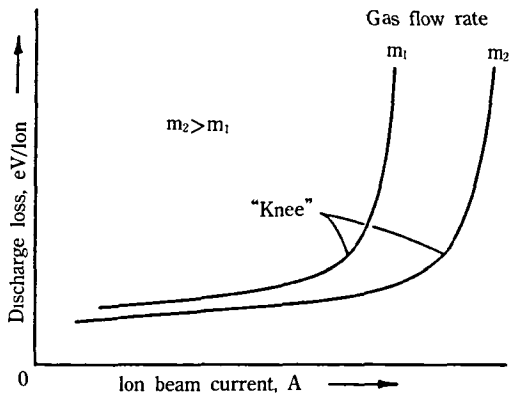
거의 동등하게 이동하므로, 방출량은 초기전자의 전체외부면적(Ap)과 방출면적 (Aex)의 비에 비례한다. 만일 이온을 만드는 에너지 (eV/ion)가 다른 이온원에서도 거의 일정하다면, 방전에너지는 Aex/Ap에 반비례할 것이다. 대략적으로 알곤가스를 사용하는 이온원의 경우 방전에너지 (방전손실)는

$$E = 50\frac{A_p}{A_{ex}} \text{ (eV/ion)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3)$$

이다. 방전에너지는 단위이온이 격는 방전전압이며, 이는 결국 방전전력 (W)과 이온선의 전류 (A)의 비이다. 식 (3)의 방전손실은 방전손실의 무릅(변화의 경계) 부분에서 사용될 때를 가정한 것이다. 〈그림 4〉에서와 같이 낮은 이온선전류에서 작동시 방전관내의 중성흐름이 방전손실을 줄이는데 큰 기여를 한다. 이온선전류( ion beam current : $I_b$) 가 증가함에 따라 처음에는 방전손실이 적지만 무릅부근을 지나면 약간의 전류변화에 대해서도 방전손실은 크게 영향 받는다.

만일 이온선전류를 증가시키려면 중성흐름의 증가와 동시에 방전전압을 증가시켜야 한다. 평상적으로 산업적 응용에 있어서 이온선전류는

높고, 배경압력(중성흐름)은 작은 것이 유리하다. 이러한 상대적 요구조건에 따라 방전손실무릅 부근에서의 작동이 최적이 되게 된다. 식 (3)에서의 방전손실은 적절히 설계된 이온원의 경우이다. 그러나 대개의 방전손실은 1.5배 보다 약간 큼에 따라 자기적분은 식 (2)의 이론치보다 1.5배 정도 되어야 한다. 스크린(screen)의 두께는 스크린 구멍의 직경에 20% 정도이어야 한다.




〈그림 4〉 이온선 전류에 따르는 전형적인 방전 손실 변화의 예

위에서 고려한 바와 같이 axial-field source에서 하향자기장의 강도는 상향자기장의 60~80% 이어야 하며, 음극은 최대자기장이 하향하는 위치에 있어야 한다. 이는 방전손실에 대해 추진연료효과가 있어서 대개±30% 이내의 영향이 있다.

스크린그리드의 상대적 두께는 방전손실에 큰 영향을 미친다. 이러한 손실의 변화는 semi-emperical 하게 스크린의 두께($t_s$)와 스크린의 직경($d_s$)에 대해

$$E \propto \exp(2\, t_s/d_s) \quad \cdots\cdots (4)$$

인 관계가 있다. $t_s/d_s=0$ 일때 식 (4)는 약 33인 반면, $t_s/d_s=0.4$ 일때 75로 증가함을 알 수 있다. 단일구멍의 이온원에 대해서도 2배의 한계내에서 위의 식들을 사용할 수 있는데, 단지 어려운 점은 초기전자영역을 정확히 추정하는 것이다.

## 4. 중성손실 (Neutral Loss)

이온광학에서 중성밀도는 앞에서 서술된 바와 같이 가스와 이온원이 동일할 때에는 비슷한 동작조건에서 거의 한 상수이다. 다른 이온원인 경우 비슷한 작동시 중성밀도는 초기전자영역의 면적(Ap)과 초기전자영역의 부피($\Omega_p$)의 비($A_p/\Omega_p$)에 의해 변한다. 중성소멸은 〈그림 3〉의 손실이 급히 증가하는 위치인 최대 이용점에서 처음 분석되었다. 이 방전손실무릅은 실질적으로 흥미있는 작동조건이다. 알곤을 이용한 무릅작동에 있어서 방전방의 중성밀도는

$$n_o \approx 1.4 \times 10^{17} \frac{A_p}{\Omega_p} \ (m^{-3}) \quad \cdots\cdots (5)$$

으로 얻어졌다. 최적 이용을 위한 중성밀도는 $n_o$의 절반정도 값이 된다. 다른 단일 원자가스인 경우 요구되는 중성밀도는 약 $1/\sigma\, m^{1/2}$ 에 비례한다. 여기서 $\sigma$는 최대이온화 겹침면적이고, m은 이온의 질량이다. 식 (5)의 중성밀도에 대해 간단히 두가지 설명을 할 수 있다. 첫째, 진공쪽의 외부압력이 밀도를 높일 수 있다. 중성손실만 존재할 때 (이온화되는 양의 부가적 공급이 없을 때) 방전관 농도를 적절히 하기 위해 필요한 외부의 압력 (torr)은

$$p \approx 6 \times 10^{-6} \frac{A_p}{\Omega_p} \quad \cdots\cdots (6)$$

이다. 그러므로 작동시 실제 필요한 외부압력은 $p_x$(전체흐름/중성손실)가 된다. 단, 전체흐름은 중성손실과 부가적 공급량의 합이다. 다른 가스를 사용할 경우 식 (6)의 압력은 $\sigma_{Ar} m_{Ar}^{1/2}\ \sigma\, m^{1/2}$로 보정되어야 하는데, 게이지 값을 대략 $(m_{Ar}/m)^{1/2}$으로 보정한다. 식 (6)에서 압력은 이온의 추

출률이 중성흐름에 비해 매우 작음을 가정한 것이다. 이러한 중성흐름에 비교해 이온선이 커지면 중성들이 이온화되면서 방전방으로의 중성흐름 또는 주변기기의 압력증가를 나타낸다. 식 (5)의 다른 간단한 설명은 이온광학의 압력이 0일 때 중성손실률은

$$N_o = 0.85\ A_o\ A_p\ /\ \Omega_p \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (7)$$

이며, $A_o$는 그리드의 날카로운 가장자리면적(sharp-edged orifice area : $m^2$)이다. 부가적 중성흐름률( 부가적 공급량, 이온선 추출량)은 일가로 이온화된 Ar 의 경우 각 빔의 단위전류(A)당 0.249 $cm^3$/sec이다. 이온광학계에서 날카로운 구멍면적 Ao의 계산은 매우 간략하다. 원통형 이온광학 구멍의 Ao는 그리드의 주사열림면적 곱하기 Clausing factor (Kc)이다. Kc는 원통의 길이와 직경에 비해 〈표 1〉과 같이 비례한다. 이온광학에서 스크린 구멍보다 가속구멍이 0.8배보다 작으면 가속그리드의 임피던스만 고려한다. 만일 da=ds이면 간격 lg를 무시하면서 두 그리드의 두께를 합해 전체적 t/d =(ts+ta)/ds를 고려한다.

〈표 1〉 Clausing-factor

| t/d | $k_c$ | t/d | $k_c$ | t/d | $k_c$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.1 | 0.909 | 0.6 | 0.632 | 1.2 | 0.471 |
| 0.2 | 0.834 | 0.7 | 0.597 | 1.4 | 0.436 |
| 0.3 | 0.771 | 0.8 | 0.566 | 1.6 | 0.406 |
| 0.4 | 0.718 | 0.9 | 0.538 | 1.8 | 0.381 |
| 0.5 | 0.672 | 1.0 | 0.514 | 2.0 | 0.359 |

## 5. 이가 이온의 생성

정상동작조건의 작은 이온원에서 이가이온의 분량은 상대적 겹침면적으로부터 대략 구할 수 있다. 알곤의 이가이온화에 필요한 단일전자 충돌시 에너지는 43 eV이다. 실제 10~15 cm 직경의 이온원에서는 40V 방전시 1~2%의 이가이온을 낸다. 더욱 큰 이온원의 경우 그 가능성은 더욱 증가하며, 이가이온은 플라즈마로부터 탈출전에 전자에 의해 충격을 받게 된다. 이온원에서 이가이온화를 방지하기 위해 일가이온화와 이가이온화의 중간에너지에서 방전해야 한다. 이가이온은 스퍼터결함을 유발시키므로 대개의 경우 일가이온만을 이용한다. 그런데 이가 또는 삼가이온의 양은 높은 방전전압과 최소의 중성손실부근에서 크게 증가한다. 즉, 이가이온의 양은 중성의 흐름 및 압력의 감소와 방전전압 및 전류의 증가에 의해 증가하므로, 적절한 동작조건을 선정하여야 한다.

## 6. 최소 방전전압

이가이온의 생성에 대한 고려에서 되도록 낮은 방전전압이 바람직함은 명백해졌다. 때때로 전압이 높지 못해 방전이 되지않는 경우가 있으므로 최소방전전압을 결정하는 과정은 반드시 이해되어야 한다.

유지되어야 되는 최소방전전압은 양극에 도달하는 Maxwellian 전자의 확산률에 의한 밀도의 기울기에 직접적으로 관련된다. 최소방전전압이 어떻게 전자확산에 관련되는가를 알기위해 이온당의 방전손실이 방전전압에 무관하다는 가정을 한다. 그리고 방전전압이 감소함에 따라 방전전류가 증가하여 일정한 이온선을 유지한다고 가정한다. 일정한 이온선전류가 추출되면 플라즈마의 전자온도나 밀도와 같은 조건도 거의 일정한 것이다. 어떠한 면에서는 비정상확산에 대한 Bohm 확산계수에 거의 일치하는데 밀도 기울기에 의한 확산으로 한계에 다다른다. 전자확산의 증가와 방전전압의 감소를 위해서는 방전방 내의 플라즈마보다 양극의 전압이 반드시 더욱 양으로 되어야 한다. 이러한 양극포텐셜은 불안정해서 방전이 정지되는 경우를 발생하기도

한다. 따라서 높은 방전전압에서의 작동은 작은 확산능력에 의해 한정되게 되므로 양극으로의 전자확산을 방지하는 한계가 방전전압을 최소화하는 한계로 나타나게 된다. 전자확산의 한계는 자기적분 뿐만아니라 확산을 위한 면적을 포함한다. 자기적분이 식 (2)의 1.5배 정도이면, 전자의 확산면적은 반드시 초기전자면적 (Ap)의 60~70% 가 되어야 한다. 비록 이 효과가 강하지 않더라도 더욱 가벼운 가스들은 전자확산에 대해 더욱 큰 Ap를 필요로 한다.

### 7. 설계 계산

설계의 예로 〈그림 2〉와 같은 구조의 직경 10cm, 길이 5cm인 이온원에 대해 고려했다. 중성의 탈출을 방지하는 것은 두께 1.0mm, 구멍의 직경 1.6mm, 구멍 중심간의 거리 ($l_c$) 2.5 mm인 가속 그리드이다. 이온의 추출은 두께($t_s$) 0.4mm, 직경($t_d$) 2.0mm인 스크린 그리드 구멍을 통하여 일어나게 되며, 이때 상대적 스크린의 두께 $t_s/d_s$는 0.4/2 이다. 〈그림 3〉의 방전손실 무릅부분에서의 방전손실을 식 (3)으로 구한다. 스크린그리드에서 구멍의 열림면적률은 정삼각형의 꼭지점에 60° 원이 있는 형태이므로 $0.9069x(d_s/l_c)^2$이다. 따라서 열린면적률은 $0.9069x(2.0/2.5)^2 = 0.580$이다. 그러므로 직경이 8cm인 이온선에서 추출면적(Aex) 은 $2.92x10^{-3}$ $cm^2$이 된다. 초기전자의 총 외부면적(Ap)는 길이 5cm에 10cm 직경이므로 $3.14\times10^{-2}m^2$이다. 그러므로 예상되는 방전손실은 식(3)으로부터 50(0.0314/0.00292)= 540 eV/ion 이 된다. 따라서 이온선전류가 0.1A 일 때는 54W의 방전전력이 필요할 것이다. 중성가스 손실에 대해서는 가속그리드의 유효열림면적이 필요하다. 구멍의 직경이 1.6mm이고 중간거리가 2.5mm일 때 유효열림면적비는 0.371 이다. 따라서 8cm 직경의 이온선에서 주사된 열림면적은 $1.86\times10^{-3}m^2$ 이다. 또한 1.6mm 직경의 구멍이 1.0mm 두께의 가속그리드를 통과하므로, 이때의 상대적 그리드 두께는 t/d=0.625 이고 〈표 1〉에서 Clausing factor는 0.623이 된다. 추출열림면적에 Clausing factor를 곱하여 sharp-edged-orifice 의 면적($A_o$)이 $1.16\times10^{-3}m^2$ 이 된다. 초기전자면적($A_p$)는 $3.14\times10^{-2}m^2$이고, 초기전자영역의 부피($\Omega_p$) 는 $3.93\times10^{-4}cm^3$이므로 배경적 중성흐름을 무시할 만한 진공조건에서 식 (7)을 이용하면 중성손실률($N_o$)은 0.079 $cm^3$/sec이다. 만일 이온선 전류가 0.1A 이면 암페어당 0.249 $cm^3$/sec의 이온을 추출하기 위해서는 $(0.1\times0.249)=0.025$ $cm^3$/sec 의 부가적 공급이 필요하게 된다. 그러므로 전체적인 가스흐름은 $(0.025+0.079)=0.104$ $cm^3$/sec 가 되어야 한다. 주위의 압력이 더욱 높아지면 방전방내의 중성손실분은 주변진공계의 배경에서 보충되게 된다. 식 (6)으로부터 필요로 되는 방전방의 압력은 $4.8\times10^{-4}$ Torr이다. 만일 배경흐름(전체흐름)의 전량이 0.1A에 대해 공급되어야 한다면 필요한 외부압력은 0.104/0.079의 비에 의해 $6.3\times10^{-4}$Torr에서 zero flow(배경적에서 전량공급) 사이에 연결계산이 가능하다. 이 계산은 두배까지 오차발생이 가능하며 동일한 이온원에서만 정확한 결과가 얻어질 수 있다.

## III. 이온광학

### 1. 이온광학

광학계를 통한 이온의 통로는 Poisson's 식에 의한 전위분포에 따라 흐른다. 일차원적인 해는 이온화입자의 발생면을 0의 전기장으로 보아[1]

$$j = \left(\frac{4E_o}{9}\right)\left(\frac{2q}{m}\right)^{1/2}\left(\frac{V^{3/2}}{l^2}\right) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (8)$$

이다. 이때 j는 전하입자의 전류밀도, q/m 은

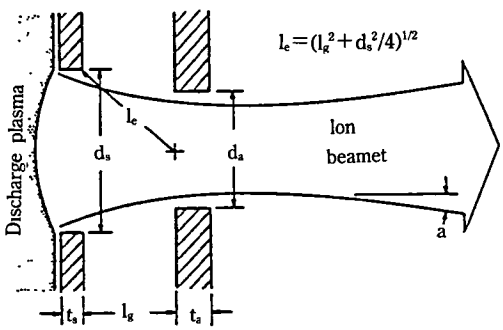
전하대 질량의 비, V는 전기장의 차이, l은 입자생성면과 전압이 다른면 사이의 거리이다. 원형구멍 ($\phi_d$)를 통한 전류의 대략적인 값을 얻기위해 $\pi d^2/4$의 면적을 곱하면

$$J = \left(\frac{\pi E_o}{9}\right)\left(\frac{2q}{m}\right)^{1/2}\left(\frac{V^{3/2}d^2}{l^2}\right) \quad \cdots\cdots (9)$$

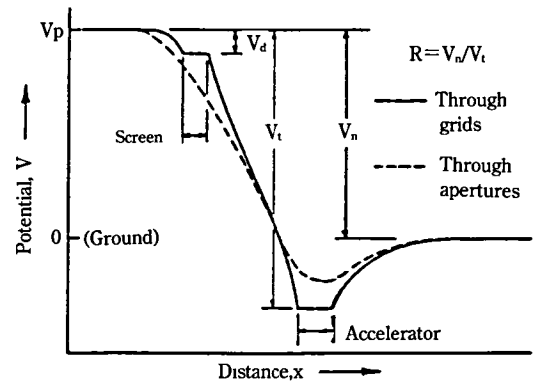
이 된다. 주어진 q/m과 d/l에서 J는 $V^{3/2}$ 에 비례한다. 〈그림 5〉와 같이 V=Vt(총전압), d=ds (구멍의 직경), l=1 (유효가속거리)일때 실험결과와 윗 식의 관계를 이용하면, 알곤가스($Ar^+$) 사용과 da ≈ ds 인 조건에서

$$\left(\frac{J}{V_t^{3/2}}\right)\left(\frac{l_e}{d_s}\right)^2 = 6.79\times10^{-9} \quad \cdots\cdots (10)$$

이 얻어진다. 여기서 $l_e$는 $(l_g^2+d_s^2/4)^{1/2}$이다. 가속구멍이 작을수록 식(10)의 오른쪽 상수는 작아지며, 가스의 종류가 다르면 $(q/m)^{1/2}$에 따라 변한다.

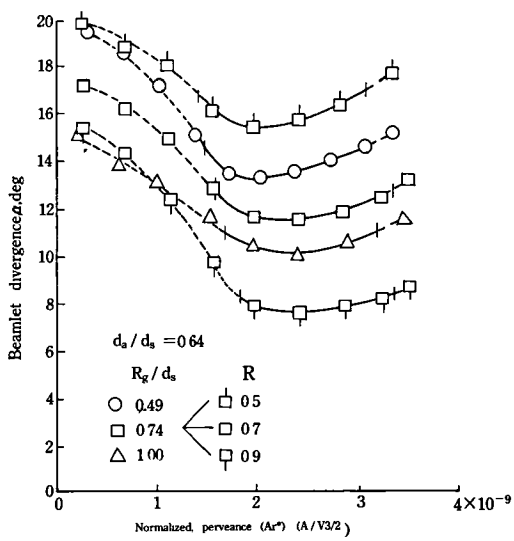



(a)




(b)

〈그림5〉 (a)이중그리드 이온광학의 기하학적 인수,(b) 이중그리드 식온광학의 전위분포.




〈그림6〉 표준화된 Perveance 의 변화에 따른 이온선의 벗어남($\alpha$)의 정도.

〈그림6〉은 Vd, Vt 일정할 때 $l_g/d_s$와 R(Vn/Vt)를 변화하며 측정한 경우 표준화된 Perveance ($J/V^{3/2}$)와 $\alpha$값과의 관계이다. 점선부근은 10% 이내에서 벗어나므로 $J/V^{3/2}$의 한계는 $1.5\times10^{-9}$ ~$3.4\times10^{-9}$ $A/V^{3/2}$이다.

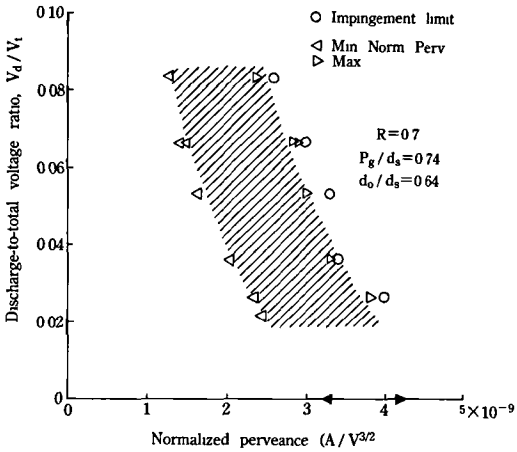
## 2. 이중 그리드 광학

전압변화는 〈그림 5b〉와 비슷하여 스크린 그리드는 플라즈마 포텐셜 $V_p$보다 $V_d$ 작고 가속그리드는 그라운드보다 최소 음의 값이어야 한다.[4] Va가 충분히 음이 아니면 중화된 이온선에 있는 전자들의 방전방 방향으로 되흐름이 일어나 이온선의 포텐셜을 높이고 잘못된 이온선 전류현상이 일어난다. R(Vn/Vt)은 전자의 되흐

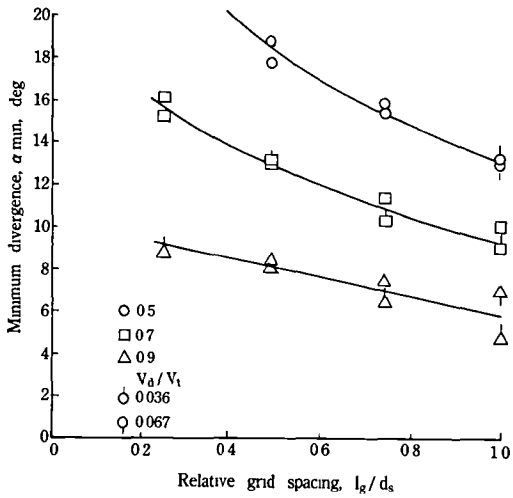
름이 일어나지 않는 한계에서 최대치 (Rmax)를 이용해야 〈그림 6〉에서 보이듯이 직선의 이온 빔이 발생한다. 이에 대해 Semi-empirical 유도로 구한 식은[1]

$$(1-\mathrm{Rmax})\frac{le}{da} \approx 0.2 \exp(-\frac{ta}{da}) \quad \cdots\cdots\cdots (11)$$

으로 매우 잘 맞는다. 〈그림 7〉은 $V_d/V_t$가 감소하면 표준화된 perveance가 증가함을 보인다. 〈그림 8〉은 R 과 $l_g/d_s$가 증가하면 $\alpha$가 10% 이내로 감소함을 보인다.

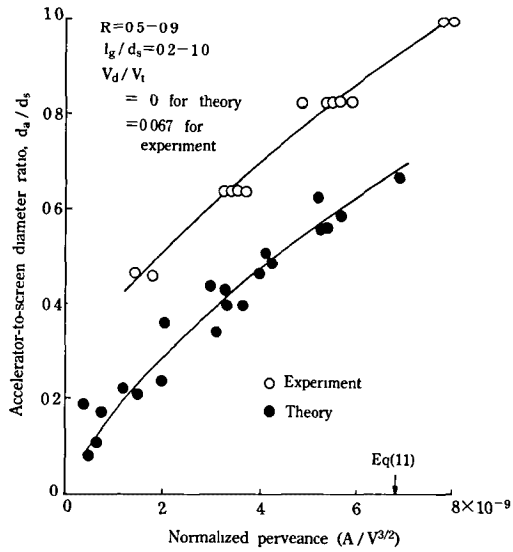



〈그림7〉 표준화된 Perveance에 미치는 방전 전압과 전체전압의 비의 효과.




〈그림8〉 그리드간격비가 벗어남($\alpha$) 에 미치는 효과.

〈그림 9〉는 $d_a/d_s$가 0.2에서 1.0까지 증가하면 표준화된 pervearance가 증가함을 이론과 실험치로부터 알수 있다. 이에 대한 자세한 이론 및 수치는 참고문헌 1에 나와 있다.




〈그림9〉 가속그리드의 구멍직경이 표준화된 Perveance 에 미치는 효과.

# IV. 음극

## 1. 방전방 음극

적절한 방전방음극의 동작은 주위 여건에 의해 영향을 받지만 대략 1A/cm²의 전자 방출의 전류밀도를 기준으로 고려한다. 음극용 재료중에서 Ta는 연성이 좋으나 늘어나기 쉽고, W 은 늘어나지 않으나 깨지기 쉽다. 요구되는 수명시간은 방전전압이 40 V일 때 직경이 0.25mm 인 경우 수십 시간은 되어야 한다. 그러나 반응성가스를 사용하면 한시간 정도로 줄어든다. 직경이 0.25 mm 인 텅스텐을 사용시 1A 를 내기 위해서는

12.5cm 길이 (음극 표면적이 약 1cm² 됨) 사용시 전류가 6.7A 이며 〈표 2〉와 같이 전압은 1.03 × 12.5가 필요하다. 그런데 접촉저항 등의 손실을 고려하여 7A, 15~20V가 필요하다.[5]

〈표 2〉 필라멘트의 전자방출 특성

| Wire dia, | mm | 0.25 | 0.38 | 0.51 | 0.64 | 0.76 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | in | 0.010 | 0.015 | 0.020 | 0.025 | 0 030 |
| Emission, | A/cm | 0.08 | 0.12 | 0 16 | 0 20 | 0.24 |
| Ta | A | 5.1 | 9 4 | 14.4 | 20.1 | 26.5 |
| (2480°K) | V/cm | 0.94 | 0.77 | 0.67 | 0.60 | 0.54 |
| W | A | 6.7 | 12.3 | 19.0 | 26 6 | 34.9 |
| (2640°K) | V/cm | 0.84 | 0.73 | 0.65 | 0.59 | |

## 2. 중성화용 음극

방출능력보다는 공간전하에 의한 전류의 한계가 더욱 중요하다. 양극의 반경(r)에서 동등한 전하밀도를 위해서는[5]

$$\frac{j_e}{j_i} = \left(\frac{m_i}{me}\frac{V_c}{V_n}\right)^{1/2} \quad \cdots\cdots (11)$$

이 된다. $V_c$는 중성화 전극화 이온선 사이의 전압, Vn는 net 전압, $j_i$는 국부적 이온 전류밀도이다. 중성화 전극에서 단위길이당 방출하는 전자의 농도는

$$\frac{J_e}{l_n} = 2\pi r j : \left(\frac{m_i}{m_e}\frac{V_c}{V_n}\right)^{1/2} \quad \cdots\cdots (12)$$

이 된다. 식 (8)의 child's law와 알곤 500 eV 이온선이 1mA/ cm² 일때를 가정한 유도로 부터

$$J_e/l_n = 758.4 \ r \ Vc^{1/2} \quad \cdots\cdots (13)$$

이 되어, 〈표 3〉과 같은 값의 관계를 나타낸다. 즉, 전체 중화용 전자의 전류가 0.1A 필요하면 coupling 전압이 5V 일때 20cm 의 길이가 필요하고, 10V 일때 9cm가 필요하다.

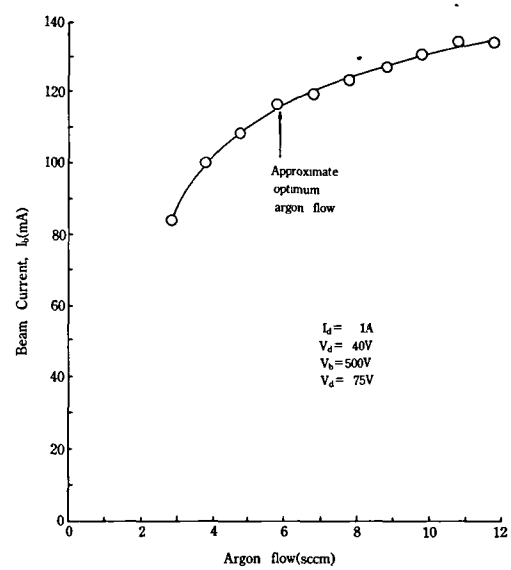
〈표 3〉 500 eV의 $Ar^+$ 이온전류가 1mA/cm² 일때 중화를 위한 인수.

| $V_c$,(V) | | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| r(mm) | | 0 31 | 0.44 | 0.62 | 0.98 | 1.39 |
| $J_e/l_n$ | A/cm | 0 005 | 0.011 | 0 021 | 0 053 | 0 105 |

# V. 이온원의 작동

## 1. 가스흐름

3cm 이온원의 동작시 조건으로 Id, Vd, Va, Vb 이 일정할 때 알곤의 유량 변화에 따른 이온선전류 (Id)의 변화는 〈그림 10〉과 같다. 유량이 6 sccm 이하에서 이온선 전류가 급히 감소하므로 적절한 알곤 유량은 7~8 sccm 으로 선정할 수 있다. 단, 작동압력은 $25\times10^{-4}$torr 일때 이다.

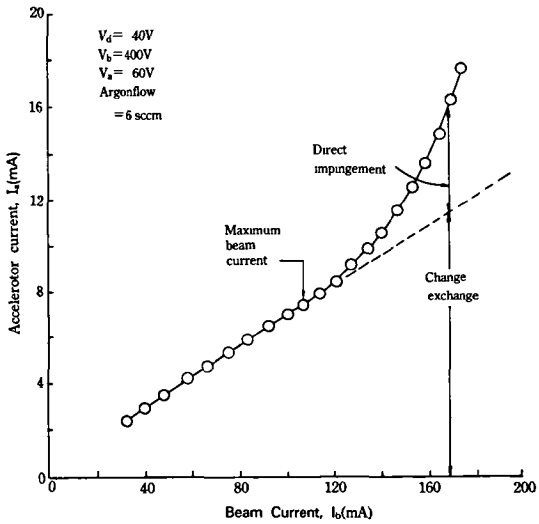



〈그림 10〉 적정한 알곤의 유량선정

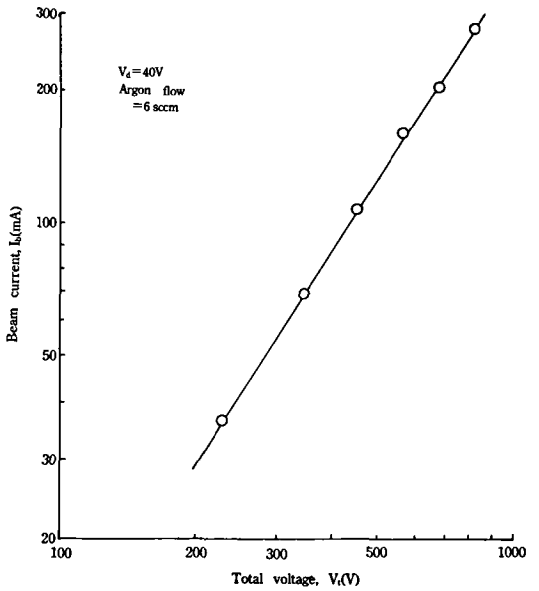
## 2. 최대 이온선 전류

최대 이온선전류는 가속된 이온이 가속그리

드와 직접적인 충돌을 하지 않을 때 까지이다. 이온선전류에 대한 가속그리드의 전류변화는




〈그림 11〉 최대 이온선 전류의 한계

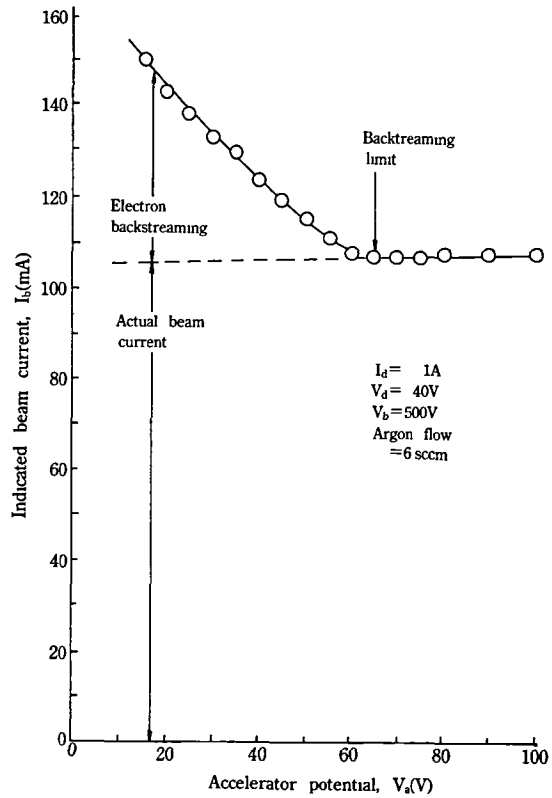



〈그림 12〉 집점용 흑연그리드의 사용시 총 전압변화가 최대 이온선전류에 미치는 영향

〈그림 11〉과 같이 Va, Vb를 일정한 상태에서 측정될 수 있다. 선형 부분에서의 가속그리드의 전류는 이온광학의 내부에서 전하의 교환에 의하며 곡선부분에서는 가속이온의 직접적인 충돌에 의한다. 이때 가속그리드는 가열을 받아 손상되므로 피해야 하며 최대 이온선전류의 한계를 나타낸다. 〈그림 11〉에서는 약 100 mA 까지 이온선전류를 사용할 수 있다. 그런데 이 최대 이온선전류는 또한 총전압 ( Vt = Va + Vb) 에 따라 변하게 된다. 〈그림 12〉는 조준되는 흑연그리드에서의 $I_b$ 와 $V_t$ 와의 관계이다. 식 (10)의 이론치와 마찬가지로 $I_b$는 $V_t$에 비례하므로 대수치 그래프의 기울기는 3/2 와 거의 같은 직선관계를 보인다. 다른 종류의 가스를 사용할 때 식 (9)에서와 같이 최대이온선전류는 질량의 −1/2 승에 비례하게 된다.

## 3. 전자의 되흐름

〈그림13〉은 가속전압과 이온선전류와의 관계 그래프이다. 높은 Va 에서는 $I_b$가 일정하며, 낮은 Va 에서는 Va 가 감소할수록 $I_b$가 증가한다.

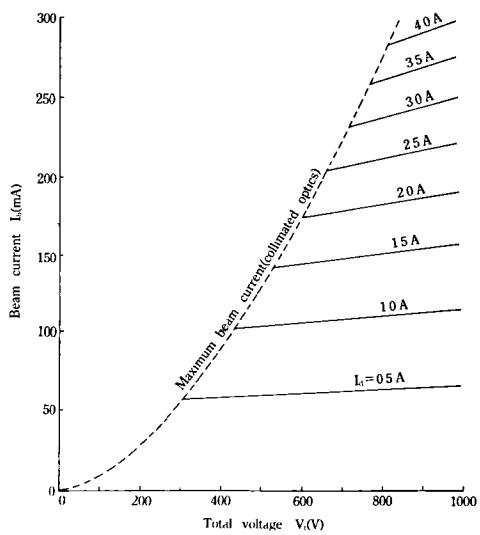



〈그림 13〉 전자의 되흐름이 일어나는 한계

즉, 낮은 Va 에서는 이온에 의해서가 아니라 전자의 되흐름에 의해 Ib 가 증가한다. 따라서 잘못된 이온선전류의 측정을 방지하기 위해 Va 는 충분히 커야한다. 그림에서 Va는 75V 보다 커야함을 보이고 있다. 즉, Va(그림에서 500V)의 최소 15% 이상이 되어야 한다. 이온원의 동작시 $Va \geq 0.15 \cdot V_b$는 주의해서 지켜져야 할 관계가 된다.

### 4. 방전전류

최대 이온선전류는 총전압 Vt 의 3/2승에 비례하여 〈그림 14〉 의 점선과 같은 관계를 보인다. 방전전류가 일정하면 이온선전류도 거의 일정하다. 방전전류의 최대한계는 6A로 그림에서는 0.4~4A 까지 조준되는 광학계에서의 추정되는 이온선전류를 보여준다. 만일 일정한 방전전류인데 이온선전류가 감소하면 이온원의 양극부분 등을 청소해야 한다. 단 양극의 위치나 가스의 유량 등에서의 오차를 고려하면 411 정도의 이온선전류 오차는 일어날 수 있다.

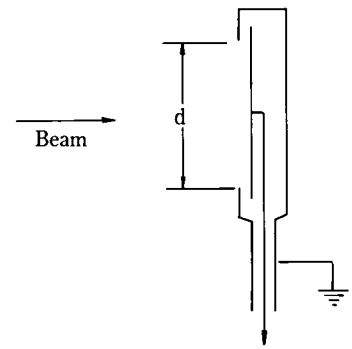



〈그림 14〉 총전압과 방선전류가 이온선 전류에 미치는 영향

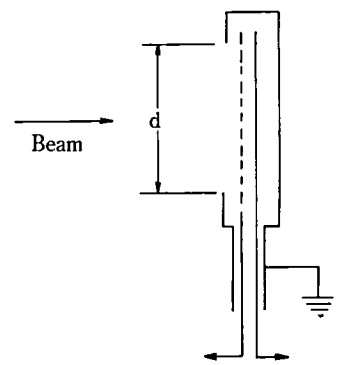
## VI. 이온선 분포

### 1. 전자선 및 이온선의 밀도측정

평면탐침은 〈그림 15〉와 같은 구조로 가장 널리 퍼져 있는 간단한 방법이다. 탐침을 이온선 내부에 위치한 후 접지하여 흐르는 전류를 측정하면 중성화된 이온선의 전류가 측정된다. 전자를 되튀겨 내어 순수한 이온의 전류만을 측정하기 위해 −15 ~ −30 V 의 전압을 탐침에 가하여 전류를 측정하면 정확히 이온빔의 전류를 측정할 수 있다. 〈그림 16〉은 차폐막을 이용해 전자의 흐름도 측정할 수 있으며, 주위에 존재하는 배경이온의 영향을 배제할 수 있는 구조의 탐침이다. 전자를 되튀길 때 차폐막의




〈그림 15〉 평면탐침 구조




〈그림 16〉 차폐막이 있는 탐침구조

전압은 −20 V 로 하며, 낮은 에너지의 이온을 되튀길 때는 20 V 로 하여 어느 일정 에너지 이상인 이온의 전류를 측정한다. 그런데 이온화된 알곤은 이동도중에 배경에 존재하는 알곤가스와 충돌하는 경우가 발생한다. 이러한 충돌에 의해 느린 $Ar^+$ 이온이 남고 중성 Ar이 계속 이동한다. 중성 Ar 은 스크린에 의해 되튀겨지므로 검출이 안된다. 따라서 더욱 정확한 측정을 위해서는 전류를 적분하여 값을 취해야한다.

## 2. 이온선의 측정예

가. 이온선 전압효과

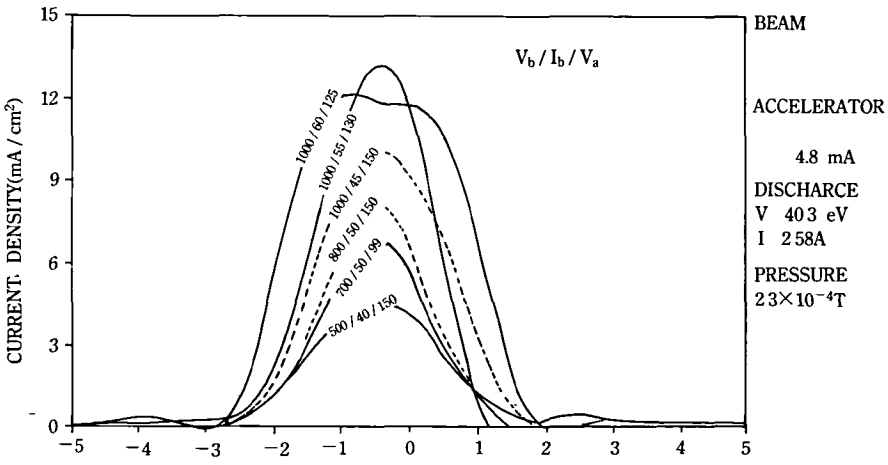
〈그림17〉은 Mo 그리드를 사용한 직경 3cm의 집속이온선엥 대해 여러 동작조건에서 측정된 이온선 분포이다. 이온선전압이 증가하여 1,000V 에서는 이온선전류밀도가 12mA 일때, 가속전압이 125V 로 적은 경우 선폭이 증가하면서 표준분포에서 벗어나는 왜곡현상을 보인다. 이온선전압이 500V 일 때 이온선의 최대 밀도는 4~5mA/cm² 인 완만한 분포를 보인다.

나. 이온선 전류효과

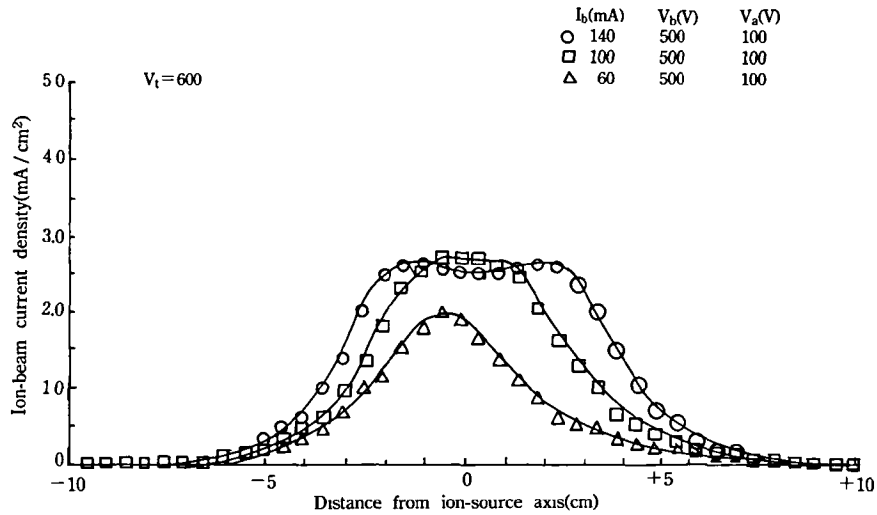
〈그림 18〉은 동일 이온선전압 및 가속전압 하에서 이온선 전류를 증가시킬때 이온선 분포의 변화이다. 이온선 전류가 60mA 로 증가했을 때는 선폭이 증가하면서 중간부분이 감소하여 왜곡된 분포를 보인다. 따라서 이온선전류를 적절한 값으로 선정하여야 균일한 이온선분포를 얻을 수 있다.

다. 이온선전압과 가속전압비 변화의 효과

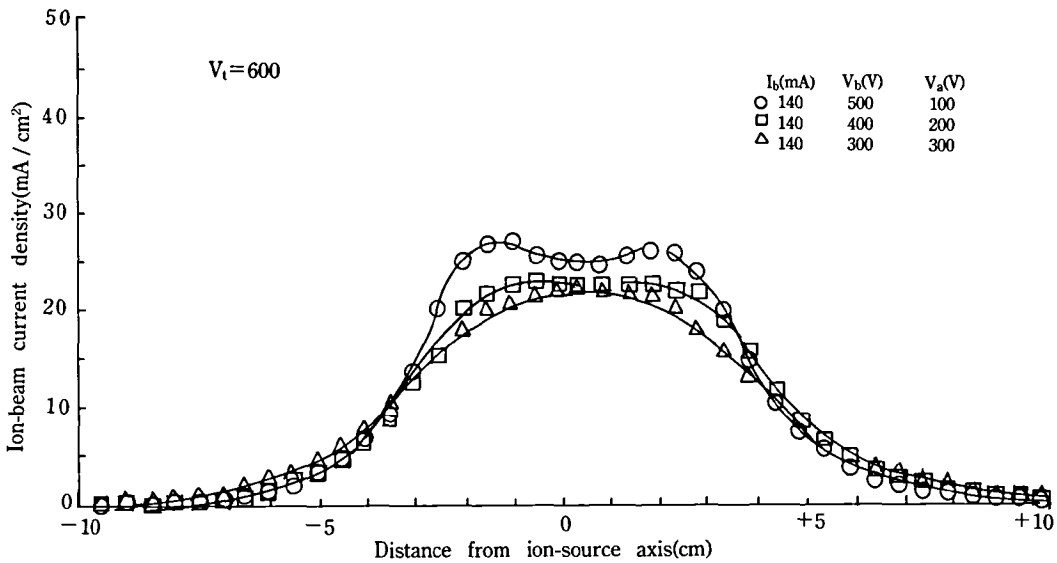
〈그림 19〉는 총전압(Vt)가 600V이고 이온선 전류가 140mA일 때 이온선전압과 가속전압비의 변화에 따른 이온선 분포의 변화이다. 이온선 전류의 차이는 별로 없으나 이온선전압에 비해 가속전압이 적을 때 〈그림 18〉 에서와 같이 이온선 중앙위치의 전류가 감소하여 왜곡된 분포로 되었음을 보인다. 즉, 이온선전류가 크고 가속전압이 작을 때 이온선의 왜곡이 일어남을 알 수 있었다. 앞절에서 〈그림 11〉과 〈그림 13〉과 같이 부적절한 조건에서는 직접적충돌 및 되흐름효과가 일어남을 설명한 바 있다.




〈그림 17〉 이온선 분포의 측정예. 3cm 직경의 이온원으로 집점형이고 Mo그리드를 사용했다. 측정거리는 그리드 밖으로 5cm 떨어져 있었다.



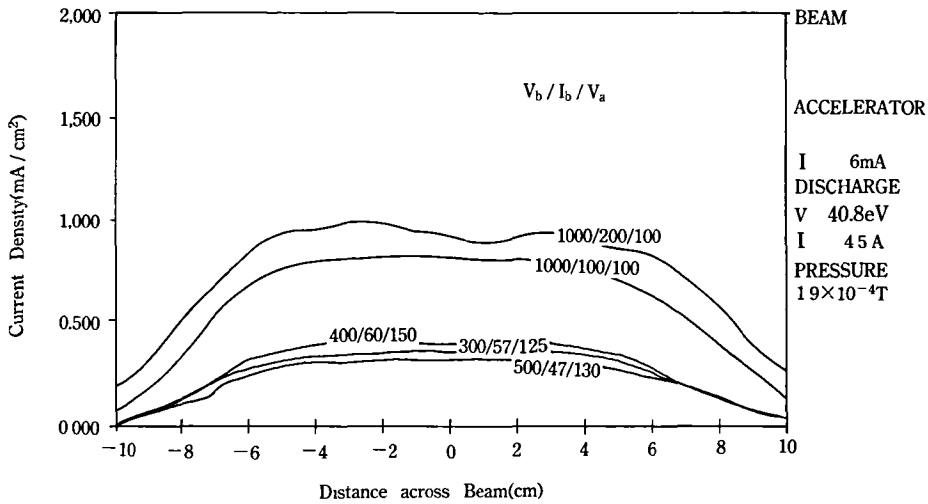

〈그림 18〉 이온선 분포의 측정예. 측정거리는 20cm이며·다른 조건은 〈그림 17〉의 설명과 동일함




〈그림 19〉 이온선 전압과 가속전압의 변화에 따른 이온선 분포의 예. 이온원의 조건은 〈그림 18〉과 같다.

라. 12cm이온원의 경우 (식각용)

〈그림 20〉은 Mo 그리드를 갖는 12cm 직경의 비집속형 이온원의 이온선특성이다. 이온선전압과 가속전압이 각각 1,000V와 100V 로 일정할 때 직경이 약 12cm 까지는 이온의 밀도분포가 균일하다.




〈그림 20〉 이온선 분포의 측정 예,
접점형 Mo 그리드 사용, 12cm 직경의 이온원으로 측정거리도 12 cm였다.

여기서 이온선전류가 200mA 로 증가하면 0.7 mA/cm²에서 1.0 mA/cm²으로 이온선전류밀도가 증가하였다. 그런데 3cm 이온원의 경우와 마찬가지로 이온선전류가 증가함에도 가속전압이 일정하게 유지됨으로 해서 중앙부분의 밀도가 약간 감소한 현상을 보인다. 이온선전류가 47 mA/cm²에서 60 mA 의 영역으로 비슷할 때 이온선전압이 300A 에서 500V 로 증가하여도 전류밀도 차이는 0.1mA/cm² 정도로 작다. 전류밀도는 이온선전압 보다는 이온선전류에 의해 더욱 의존함을 300V 와 500V 인 이온선전압의 경우에 대한 분포의 비교로부터 알 수 있다.

## VII. 맺음말

이상으로부터 얇은막의 증착 및 식각에 응용범위가 매우 넓은 광역이온선용 이온원의 구조 및 원리에 대해 서술하였다. 이온원의 동작조건은 증착 또는 식각되는 막의 균일도, 광학적성질 및 기하학적 구조에 영향을 미치게 되므로 적정한 동작조건이 선정되어야 한다. 국내에서는 처음으로 도입된 본 연구용 이온밀링 장비의 최적 활용을 위해서는, 이러한 이온원의 원리 및 특성에 대한 이해와 분석이 계속 진행되어야 하겠다. 한편으로 위성의 궤도수정용 추진기 또는 레이저반사막 등의 특수소재 개발 등에 사용되고 있는 다목적 광역이온원의 개발도 필요로 된다. 특히 반도체분야에서는 반응성이온선식각, ion assisted etch 및 co-deposition 등의 여러가지 공정을 동시에 행할 수 있으므로, 광역이온원이 부착된 이온밀링장치의 활용도는 계속 증대할 것이다.

## 참 고 문 헌

[1] H.R. Kaufman and R.S. Robinson, "Ion Source design for industrial applications," International Electric Propulsion Conference, April, pp.1-21, 1981.

[2] K.O. Nielsen, "The development of magnetic ion sources for an electromagnetic isotope-separator," *Nucl. Instrum.*, Vol.1, pp.289-301, 1957.

[3] I. Chavet and R. Bernas,"Experimental Study of an Ion source for electromagnetic isotope separation with a view to high efficiency operation," *Nucl. Instr. and Mech.*, Vol.51, pp.77-86, 1967.

[4] G. Aston, H.R. Kaufman and P.J. Wilbur, "Ion beam divergence characteristics of two-grid accelerator systems," *AIAA J.*, Vol.16, pp.516-524, May. 1978.

[5] H.R. Kaufman and R.S. Robinson, " Operation of broad-beam sources," Commenwealth Scientific Corporation, Alexandria, Virginia, 1987.