

Hollow Cathode Discharge에서 플라즈마 특성에 관한 연구

윤만영[†], 신종순

[†]중부대학교 공과대학 정보통신학과, 중부대학교 공과대학 인쇄미디어학과
(2005년 10월 10일 접수, 2005년 11월 4일 최종 수정본 접수)

Study on Characteristics of Plasma in Hollow Cathode Discharge

Man-Young Yoon[†], Jong-Soon Shin

[†]Dept. of Information & Communications, College of Engineering, Joong-Bu University,
Dept. of Graphic Arts & Media, College of Engineering, Joong-Bu University
(Received 10 October 2005, in final from 4 November 2005)

Abstract

The measured plasma temperature of Ar hollow cathode discharge for several metal cathodes are about 620 ~ 780K at discharge current of 7 ~ 10mA. The optogalvanic signals were measured using hollow cathode discharge tube with argon as buffer gas at change of discharge currents. A change of ionization rate due to electron collision causes an increase or decrease of the electric conductivity. This change in electric conductivity generates the optogalvanic signal. We conclude that optogalvanic signal has close relation with the lowest metastable atoms density at low current

1. 서 론

방전은 오래 전부터 알려져 온 현상임에도 불구하고 아직도 형광등이나 네온사인
에서부터 반도체에 이르기까지 중요한 응용성을 지니고 있으며 그 때문에 현재에도
많은 연구가 이루어지고 있다.¹⁻³⁾ 미래는 첨단 반도체 시대로서 보다 작고 가벼우면서

도 여러 가지 기능이 일체화된 전자시스템을 구현하기 위한 새로운 기술이 요구되고 있다. 이러한 요구에 부응키 위하여 모든 부품들을 유리나 플라스틱 기판에 박막으로 제조하여 집적하는 기술이 반도체 전자산업 핵심기술로 떠오르고 있다. 그러나 기존의 고품질 박막은 700 °C 이상의 고온 공정에서 제조되기 때문에 반도체 소자의 도우핑 농도와 소자특성을 변화시킬 뿐만 아니라 유리나 플라스틱 기판사용에 어려움이 있다. 또한 반도체의 직접도가 급격히 높아짐에 따라 고단차(Aspect Ratio)에서 선풍 미세화에 대한 기술이 절실히 요구된다. 종래의 습식공정으로는 이러한 요구 조건을 만족시킬 수 없어, 비등방성이 가능한 플라즈마 공정 기술의 도입이 요구된다. 박막화에 관한 연구는 평판 전극을 이용한 방법에서부터 현재의 RF 전원 및 microwave을 이용한 방법까지 다양하게 발전되어 왔다. 이러한 어려움과 요구조건을 극복하기 위해 hollow cathode discharge (HCD)를 이용한 고밀도·저온에서 고품질 박막 제조할 수 있는 플라즈마 스퍼터링 대해 연구한다. Hollow cathode 플라즈마 스퍼터링에서 박막의 전기적, 화학적 특성 측면에서 기존 플라즈마보다 품질이 향상된 박막을 400 °C 이하의 저온에서 형성할 수 있다. Hollow cathode 플라즈마에서 음극 내부에서 전자의 반사효과에 의해서 고밀도 플라즈마 생성이 가능하며, 낮은 전압에서도 플라즈마 방전이 가능하므로 기존 플라즈마 방법에서 발생하던 고에너지 이온들에 의한 충격을 최소화할 수 있어 박막의 품질과 소자계면 특성이 개선된다. 또한 장기적으로는 21세기에 들어 요구되는 에너지, 신재료, 환경분야 등에서 플라즈마의 이용이 점점 더 늘어날 전망이다. 정보표시 및 처리 장치에도 hollow cathode 플라즈마 스퍼터링 기술로 성장한 박막을 이용하면 정보디스플레이 성능과 품질 개선이 가능하다. 따라서 고밀도 플라즈마를 이용한 박막 제조기술은 21세기 반도체 핵심기술로서 기여도가 높을 것이다. 따라서 본 연구에서 hollow cathode 플라즈마 시스템을 위한 온도, 균일성, 밀도 등과 같은 특성을 조사하였다.

2. 실 험

실험 장치는 Fig. 1과 같고 HCD tube(Cathodeon, model 3 QQAy/Dd)는 알곤 기체로 채워져 있으며 기체 압력은 5~8 mbar이다. HCD tube의 전원으로는 0~1 kV, 0~40 mA의 범위의 직류 전원 장치(Bertan Associates, Inc., model Series 105)를 사용하였으며, 10 k Ω 의 안정저항이 HCD tube안에 있는 두개의 전극에 각각 직렬로 연결되어 있다. Hollow cathode 금속으로는 가돌리늄(Gadolinium: Gd)을 사용하였고 내경은 2 mm이고 길이는 20 mm이다. 방전관에 공급한 전류는 10~30 mA이다. 광검류 신호의 측정을 위해 다이오드 레이저를 사용하였고, 다이오드 레이저빔은 630~850 nm 정도의 에너지를 가지고 있으므로 알곤 기체의 원자를 1s 준위에서 2p 준위로 들뜨게 하는데 적당하다.

중심 파장이 810 nm인 다이오드 레이저를 사용하였고, 방전관에 들어가는 레이저빔의 직경은 0.5 mm, 출력은 방전관의 바로 정면에서 0.1 mW이다. 레이저에서 나온 타원형의 빔은 anarmorphic prism pairs를 통과하여 원형의 빔이 되어 acousto-optic modulator를 통과한 후 직경 0.5 mm인 iris를 지나 hollow cathode 중심인 음극로우 영역을 통과한다. Acousto-optic modulator는 HCD tube에서 광검류 신호의 동적반응을 측정하기 위해 함수발생기에 연결되어 있고, 레이저빔의 세기를 변조(ON-OFF)하는데 사용하였다.

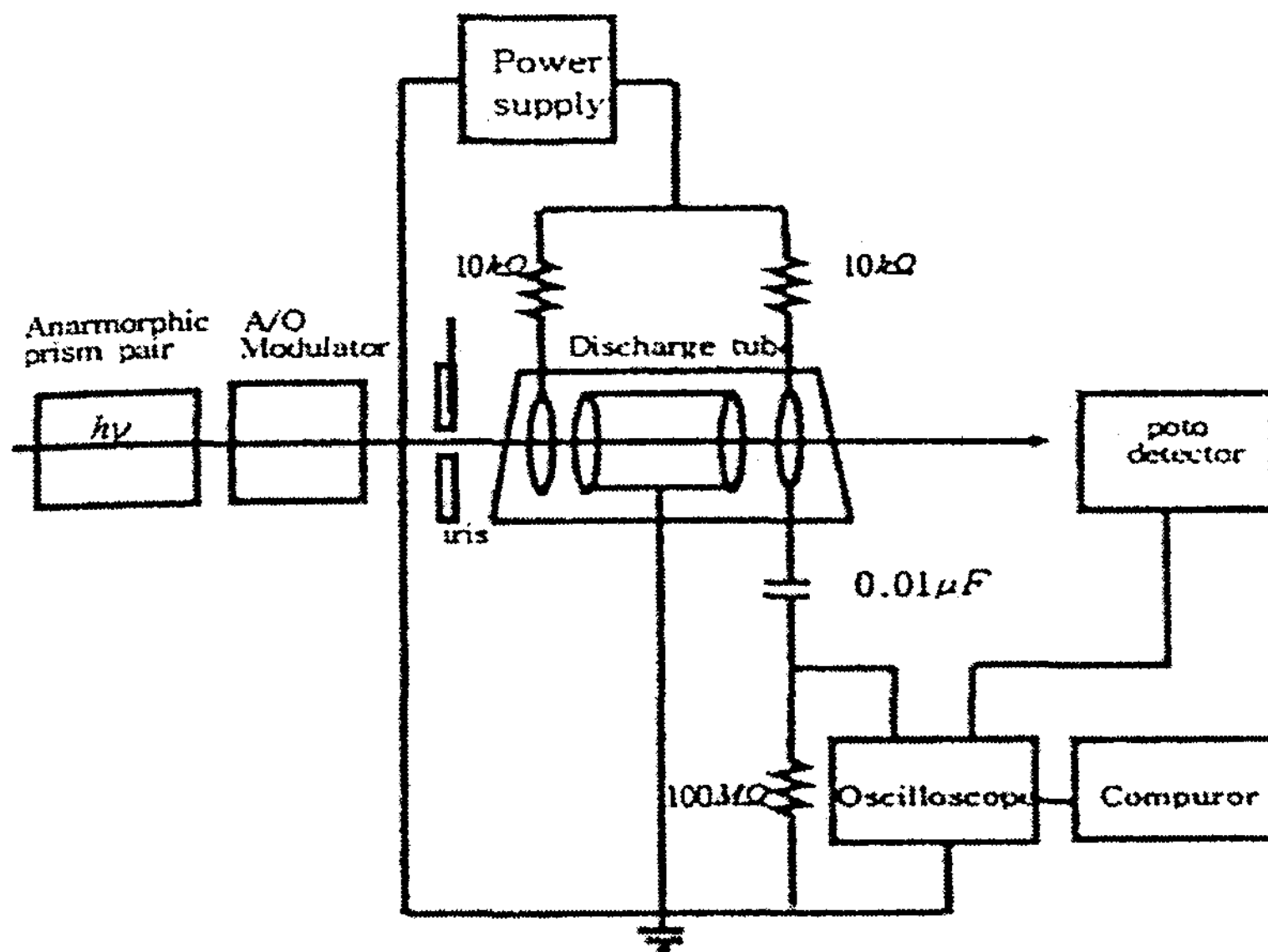


Fig. 1. Experimental setup for plasma characteristics of hollow cathode discharge.

3. 결과 및 고찰

3-1. 플라즈마 온도 측정

기존의 고품질 박막은 700 °C 이상의 고온 공정에서 제조되기 때문에 반도체 소자의 도우핑 농도와 소자특성을 변화시킬 수 있어 hollow cathode 플라즈마를 이용한 저온에서 고품질 박막 제조기술을 제안한다. 플라즈마의 온도는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta\nu_D}{\nu_0} = \left(\frac{8kT \ln 2}{Mc^2} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(1)$$

여기서 $\Delta\nu_D$ 는 doppler 선폭(FWHM), ν_0 는 전이의 중심 주파수, M은 원자의 질량, 그리고

c 는 빛의 속력이다. 선폭 $\Delta\nu_D$ 는 광검류 분광 신호로 측정된다. 선폭 측정의 정확성은 Fabry-Perot 에탈론의 선 너비(free spectral range)의 정밀도에 달려있다.

Table 1은 여러 hollow cathode을 사용하여 측정한 Ar 방전 플라즈마의 온도이다. hollow cathode 플라즈마 시스템은 400 ~ 500 °C의 저온에서 플라즈마를 형성하므로 박막의 전기적, 화학적 특성 측면에서 기존 플라즈마보다 품질이 향상된 박막을 만들 수가 있다. 또한 이와 같이 저온에서 효율성이 높고 안정적인 플라즈마를 발생시켜 면 높은 에너지의 이온들에 의한 기판 손실을 최소화 할 수 있다.

Table 1. Plasma Temperature

Cathode Elements	Translational Temperature (K)
La	684
Sm	710
Gd	625
Er	642
Yb	780

3-2. 플라즈마의 균일성 측정

웨이퍼 상에서 공정의 균일성을 확보하기 위해서는 플라즈마의 공간적 균일성을 확보해야 한다.

3-2-1. 방출세기 측정

방전 영역에 방전기체가 균일하게 분포되어 있기 때문에 완충 기체원자의 공간적 방출 분포가 방전에서 전자의 공간적 분포의 특성을 대략적으로 나타내 준다. Fig. 2는 hollow cathode의 각 전류별 방사 방향의 방출세기 분포이다. Fig. 2에서 보듯이 방전전류가 5 mA을 넘어서면 음저항 영역에서 방출세기가 일정하며 cathode벽에 가까울수록 선형적으로 감소한다. 다시 말하면 원자밀도가 음저항 영역에서는 균일하다는 것이다.

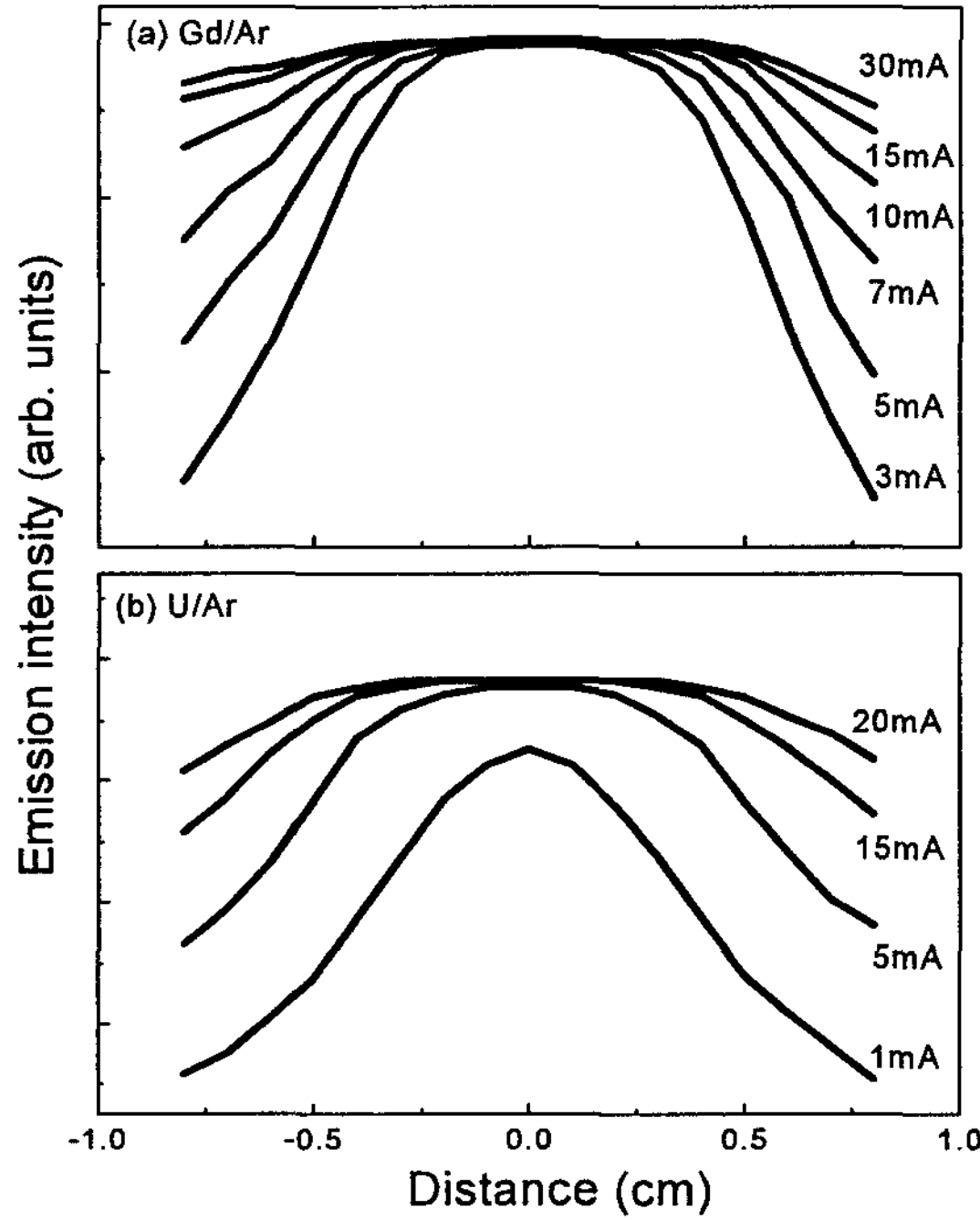


Fig. 2. Space distribution of discharge intensity.

3-2-2. 광검류 신호 측정

광검류 신호는 전자충돌 이온화에 의한 방전의 전기 전도도의 변화로 나타난다. 이온화율이 증가하면 전기 전도도도 증가하고 광검류 신호의 정상상태 (steady-state) 값은 작아진다. 반대로 이온화율이 감소하면 전기 전도도도 감소하고 광검류 신호의 정상상태 값은 커진다. 광검류 신호와 광검류 신호의 공간적 분포는 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 2에서 방출세기 신호가 감소하면 Fig. 3(b)의 OG 신호의 크기는 증가한다. OG 신호의 크기는 Fig. 3(a)에서 나타난 정상상태의 값으로 결정하였다. OG 신호가 원통형 음극의 중심에서보다 음극 암흑부에서 훨씬 더 크게 나타난 것을 설명하기 위해 전자밀도 분포를 생각할 필요가 있다. 음극벽 근처의 영역에서 전자는 음극로우 영역으로 가속된다. 그러므로 음극로우 영역의 전자밀도는 증가하고 음극 암흑부 영역의 전자밀도는 감소한다. 또한 준안정 준위의 원자밀도도 음극 암흑부 영역보다는 음극로우 영역에서 더 높다. 음극 암흑부 영역에서 전자밀도와 준안정 준위의 원자밀도가 낮기 때문에 이온화를 무시할 수 있어 OG 신호는 음극 암흑부에서 최대 진폭을 나타낸다. OG 신호가 음극로우 영역에서 최소값을 가지는 것은 전자밀도와 준안정 준위의 원자밀도가 높아 전자충돌에

의한 이온화가 증가하기 때문이다. 이와 같이 속이 빈 원통형 음극의 음극로우 영역에서 균일하고 밀도가 증가된 플라즈마를 생성할 수 있다. 이와 같이 방출세기와 광검류 신호를 측정 한 결과 hollow cathode 플라즈마 시스템은 방전 영역의 가운데(음극로우 영역)에서 균일한 전자분포를 얻을 수 있다.

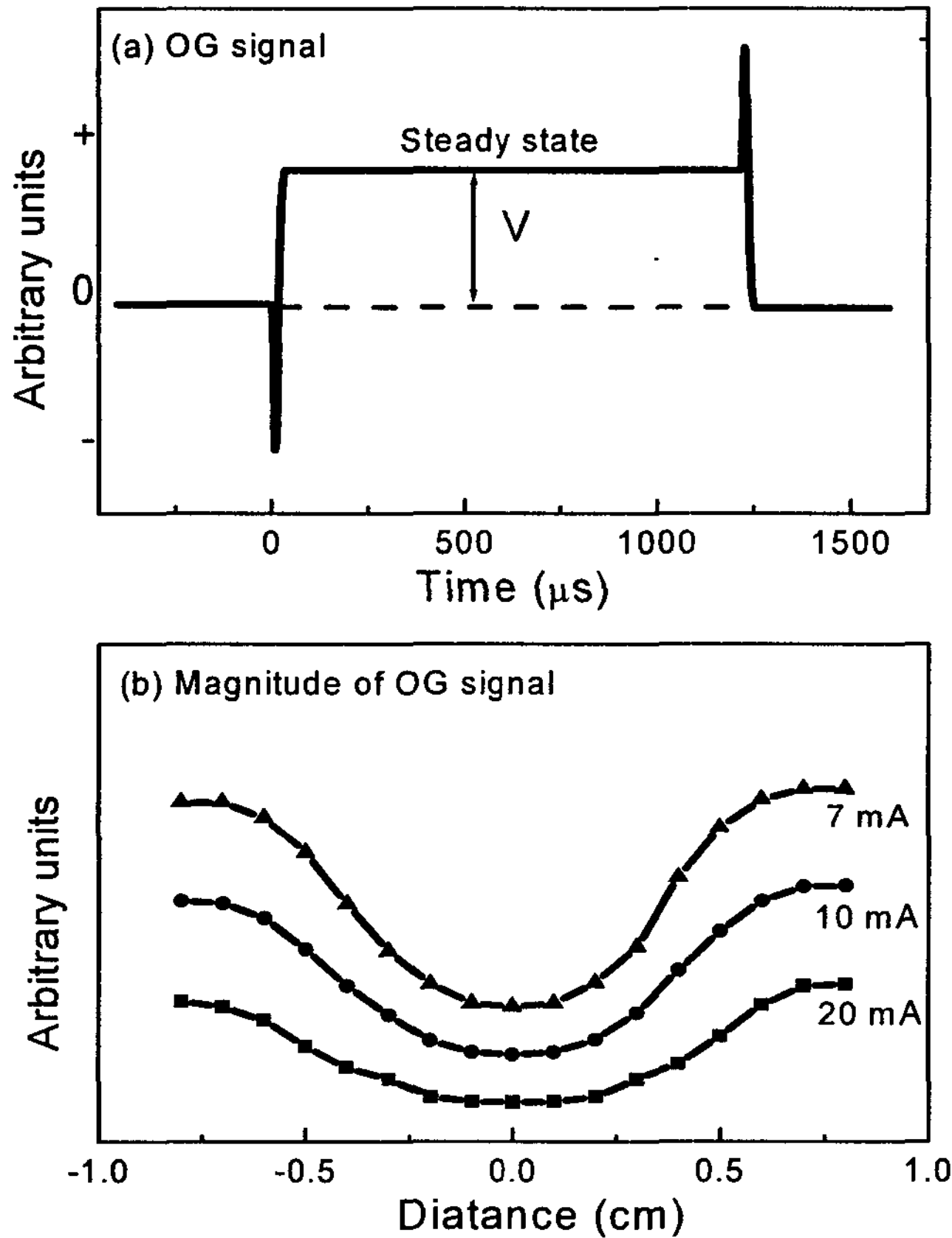


Fig. 3. Optogalvanic signal and space distribution of optogalvanic signal.

3-3. 플라즈마 밀도 측정

본 연구에서 사용할 hollow cathode 플라즈마 장치는 전극으로 평행한 평판을 사용하는 대신 속이 빈 원통형 음극을 사용하는 것으로 고밀도의 균일하고 안정된 플라즈마를 발생할 수 있다. 음극으로 속이 빈 원통형을 사용하면 원통형 음극 내부에서 플라즈마가 발생하며 두 평판 전극 사이에 여러 방전 영역이 생기는 축전결합 플라즈마 발생장치와는 달리 음극 내부에 고밀도의 균일한 방전영역을 만들 수가 있다. 전자충돌에 의해 증

가된 이온들은 음극표면으로 가속되어 충돌하므로 음극 표면에서 강한 전자방출과 스퍼터링이 일어난다. 이로 인하여 원통형 음극 내부에서 전자반사에 의해 전자증식이 일어나므로 전자밀도는 급속히 증가하게 된다. 충돌에 의한 이온화를 통하여 전자증식이 증가되므로 플라즈마의 밀도가 높다. 이와 같은 특징을 갖는 hollow cathode를 이용하면 이온화의 증가에 의해 많은 전자와 이온들이 생성되어 고밀도의 플라즈마를 만들 수 있어 증착이나 에칭을 위해 필요한 입자의 공급원으로 사용할 수 있을 뿐만 아니라, 방전관내에서의 이온화 과정의 증대를 위한 전자 공급원 역할도 한다.

기존의 스퍼터링 장치인 축전결합 플라즈마 장비는 낮은 공정압력에서 $10^9 \sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 의 저밀도를 갖는 글로우 방전(glow discharge) 플라즈마이다. 그러나 HCD 스퍼터링 장비는 고밀도를 갖고 있어 저온 hollow cathode는 낮은 압력에서 작용하므로 다음과 같은 장점이 있다. 높은 이온밀도($> 10^{12} \text{ cm}^{-3}$)로 인하여 반응율이 좋고 고에너지를 갖는 전자의 밀도를 줄일 수 있어 이온에너지의 조절이 가능하다. 일반적으로 손상은 웨이퍼 표면에서 고에너지를 갖는 이온충격에 의한 격자손상과 전기적 손상 등이 있다. 이러한 문제점들은 고밀도 플라즈마 발생 장치인 hollow cathode 시스템으로 개선할 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 플라즈마의 밀도를 계산하기 위해 흡수신호를 측정하였다. Fig. 4는 방전전류의 변화에 따른 플라즈마 밀도를 나타낸 것이다. 플라즈마 밀도는 다음의 식 (2)으로 측정하였다. 여기서 g_1 과 g_2 는 저준위(lower level)와 고준위(upper level) 각각의 통계적 무게이고, A 는 전이확률(transition probability), 그리고 α_ν 는 흡수계수(absorption coefficient)이다.

$$N = \left(\frac{8\pi}{\lambda^2} \right) \left(\frac{g_1}{g_2 A} \right) \int \alpha_\nu d\nu \dots\dots\dots(2)$$

방전전류가 2 mA에서 적분 흡수계수는 $\int \alpha_\nu d\nu$ 는 약 0.57 GHz/cm이고 계산된 플라즈마 밀도는 약 $7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 이다. 그림에서 보듯이 플라즈마 밀도의 범위는 $10^{11} \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 이다. 속이 빈 원통형 플라즈마 시스템은 $10^9 \sim 10^{11}$ 의 밀도를 갖는 축전 결합 플라즈마 시스템보다 플라즈마 밀도가 1~2 order가 크다.

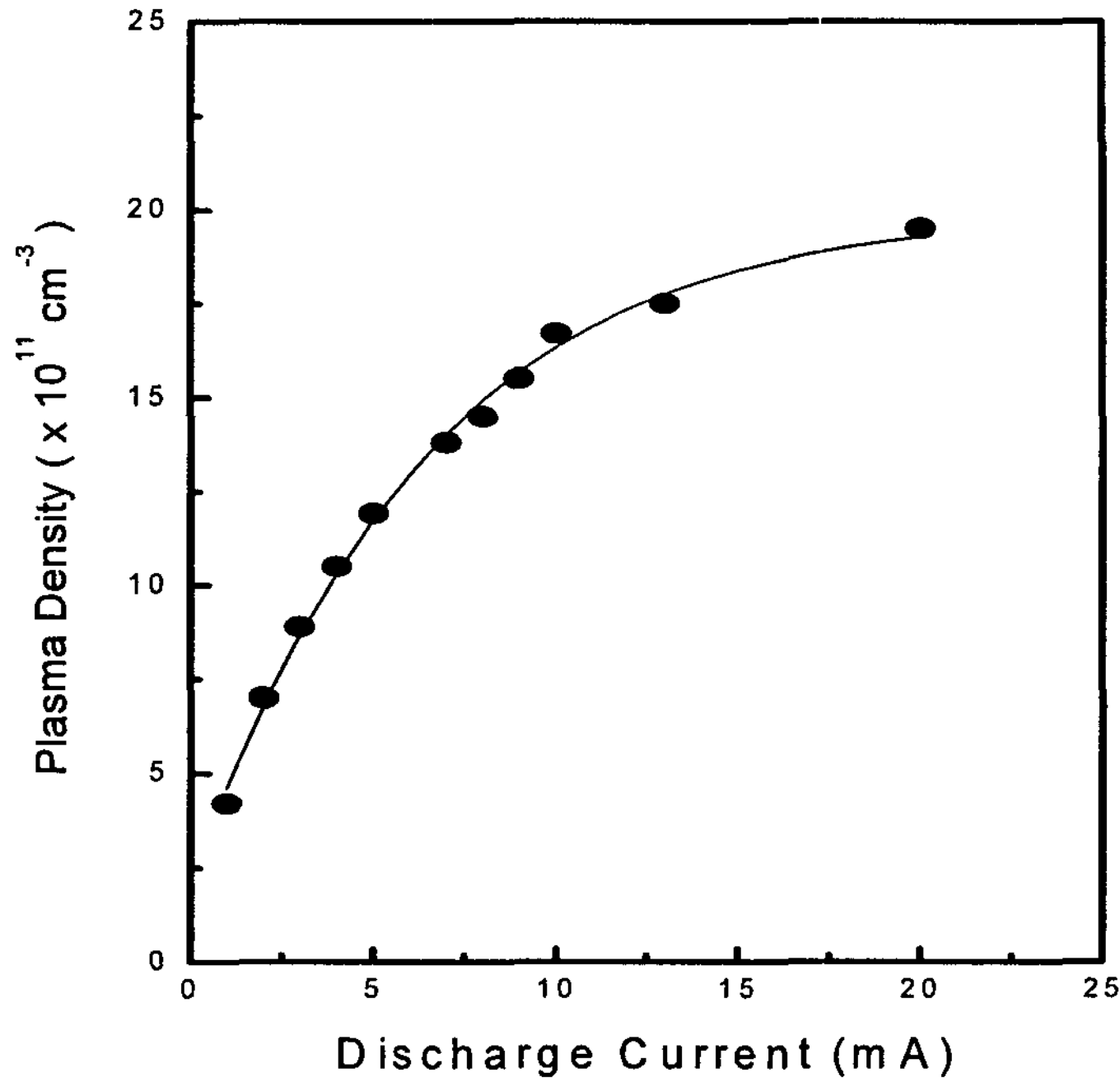


Fig. 4. Plasma density of various discharge current.

4. 결 론

Hollow cathode discharge에서는 방전전류가 증가하면 방전관내의 모든 방전 영역에서 전기 전도도가 증가하여 방전전압이 낮아진다. 이것은 이온화의 증가를 의미한다. 음극로 영역에서는 균일한 전자밀도를 나타내며 음극 암흑부에서는 전자밀도가 음극 벽에 가까울수록 선형적으로 감소한다. 광검류 신호는 균일한 전자밀도를 갖는 음극로 영역에서는 음전압의 신호가 나타나며, 모든 방전전류에서 음극 암흑부에서의 광검류 신호보다 작은 신호가 나타난다. 음극로우 영역에서 음전압의 광검류 신호가 나타난다는 것은 전자충돌에 의한 이온화가 증가했다는 것이므로 이 영역에서 전자밀도는 균일하고 높다.

속이 빈 원통형 음극의 중요한 특성은 전자밀도가 비교적 넓은 영역의 동작압력에서 사용되고, 전자밀도가 높기 때문에 이온 수도 필연적으로 매우 높다. 본 연구에서 측정 한 속이 빈 원통형 음극방전에서 플라즈마 밀도는 $10^{11} \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 이었다.

참고문헌

- 1) P. K. Marcus, "Glow Discharge Spectroscopies" (1990).
- 2) Y. P. Raizer, "Gas Discharge Physics" (1991).
- 3) S. Levesue, J-M Gange, and F. Babin, *J. Phys.*, B30, 1331 (1997).
- 4) E. C. Jung, J. M. Lee, and J. H. Lee, H. Cho, *J. Kor. Phys. Soc.*, 34, 209 (1999).
- 5) B. E. Warner, K. B. Persson. *J. Appl. phys.*, 50.
- 6) R. Shuker, A. Ben-Amar, and G. Erez, *Optics Comm.* 42, 29 (1982).
- 7) Y. Uetani, *Optics Comm.* 49, 258 (1984).
- 8) E. Miron, I. Smilanski, and J. Liram, S. Lavi, G. Erez, *IEEE J. Quant. Elec.* QE-15, 194 (1979).
- 9) D. E. Murnick, R. B. Robinson, and D. Stoebach, M. J. Colgan, F. A. Moscatelli, *J. Appl. Phys., Lett.* 54, 792 (1989).
- 10) J. P. Martinez, J. C. Amare, *J. Appl. Phys.*, 31, 312 (1998).