Enhanced Inductively Coupled Plasma의 자화 주파수 의존 특성

라상호, 박세근, 오범환
인하대학교 전자 전기 컴퓨터공학부
반도체 전공
Tel: 032)860-7438/Fax: 032)875-5882

Magnetized Frequency characteristics of Enhanced Inductively Coupled Plasma

Sang-Ho Rha, Se-Geun Park, Beom-hoan O
imath@lycos.co.kr, obh@inha.ac.kr

Abstract

It is important to control the electron energy distribution to have high quality plasma process. A conventional inductively coupled plasma(ICP) source with 13.56MHz power is not adequate for low damage sub-half micron patterning process due to higher electron temperature. Only the pulsed plasma technique seems to provide low electron temperature, and thus low process damage. Recently, a novel method proposed by us, named as 'Enhanced-ICP', which uses periodic weak axial magnetic field added to a normal ICP source, has shown great improvement in etch characteristics. changes of plasma characteristics according to the frequency of time-varying axial magnetic field have been observed by probe-time-averaged Langmuir probe.

1. 서론

평탄형 코일에 수 MHz 의 RF 전력을 인가함으로써 플라즈마를 생성하는 Inductively coupled plasma(ICP)는 대면적화가 용이하고 장치의 구조가 간단하며 낮은 압력에서 높은 이온 밀도를 얻을 수 있는 장점을 지니고 있다. 반면에 저압에서 전력 전달 효율이 감소하며, 플라즈마의 전력 전달이 표피효과에 의하여 매우 좁은 영역에 제한적으로 전달되는 문제를 가지고 있으며, 플라즈마내 전자온도 및 이온에너지의 능동적 조절이 매우 어렵다.[1] 이러한 제반의 문제를 해결하기 위하여 패러데이 차폐의 사용, RF 안테나의 변형, 축방향 자기장의 인가등을 통하여 보다 우수한 성능의 플라즈마 소스 개발을 위한 연구가 이루어지고 있다.[2,3] 특히 플라즈마의 자화 특성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 본 연구진에서는 플라즈마의 자화주파수를 조절함으로써 매우 우수한 플라즈마 특성을 나타내는 Enhanced inductively coupled plasma (E-ICP)를 개발한 바 있다.[4]

본 논문에서는 E-ICP의 물리적 특성을 이해하기 위하여 자화 플라즈마의 분산 특성을 계산하였고, 이와 함께 Langmuir Probe를 이용하여 탐침 시간 평균된 플라즈마의 진단 실험을 수행 하였다..

2. 본론

코일에 수MHz의 RF전력을 인가함으로써 플라즈마를 생성하는 ICP는 축방향으로 진행하는 고주파로부터 에너지를 흡수하게 된다. 전자와 이온간의 질량차로 인하여 인가되는 대다수의 RF전력은 전자에 인가되며, 전자의 운동은 Langevin 방정식을 따르게 된다. 이로부터, 두 분산 방정식을 얻어낼 수 있다.[5]

$$\frac{c^2}{\omega^2}k^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega' + \Omega)} \quad \text{(L.C.Pol)} \quad (1\text{-a})$$

$$\frac{c^2}{\omega^2}k^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega' - \Omega)} \quad \text{(R.C.Pol)} \quad (1\text{-b})$$

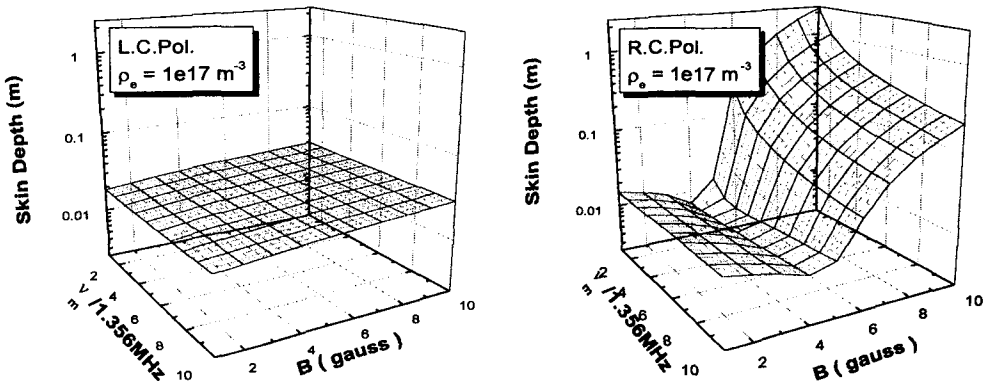

그림 1 충돌주파수와 자기장의 변화에 따른 투과깊이 변화

여기서, ν_m은 충돌 주파수, ω는 RF인가 주파수를 나타내고 있으며, $\omega' = \omega + i\nu_m$, $\Omega^2 = q^2 B_z^2 / m^2$, $\omega_p^2 = Nq^2 / \varepsilon_0 m$ 로 정의하였다.

자화플라즈마의 자기장 변화와 충돌 주파수 변화에 따른 투과 깊이 변화 양상을 그림 1.에서 보여주고 있다. 그림 1.에서 보여지는 바와 같이 자기장의 크기 변화는 RF 에너지의 투과 모드의 변화를 야기하게 된다.

ICP의 경우 플라즈마의 표피효과로 인하여 3㎝ 이내의 매우 짧은 투과 깊이를 가지고 있다. 그러나, 플라즈마에 축방향 자기장이 인가되면, 플라즈마에는 우원편광파와 좌원 편광파 두 개의 RF-에너지 투과 모드가 형성되며, 약 15 gauss 의 자기장이 인가되면 플라즈마는 RF전력을 효율적으로 흡수할 수 있는 충분한 투과 깊이를 갖게 된다. E-ICP는 축방향 자기장의 시변 변화를 펄스 파형의 형태로 주기적으로 변화시킴으로서 RF 에너지의 흡수 특성을 주기적으로 변화시켜 주게 된다. 이를 통하여 플라즈마의 에너지 흡수 특성의 변화를 야기시켜 줌으로써 플라즈마내의 이온 및 전자의 에너지를 조절 가능하게 한다. 그림 2.는 E-ICP의 기본 개념을 보여 주고 있다. 본 논문에서는 자화 주파수를 E-ICP 주파수로 정의하였다.

E-ICP 주파수가 플라즈마에 미치는 영향을 확인하기 위하여 Langmuir Probe를 이용하여 플라즈마 특성의 진단 실험을 수행하였다.[6] 20 mTorr의 압력하에서 600W의 RF 전력을 인가하였으며, O_2 가스를 진단하였다.

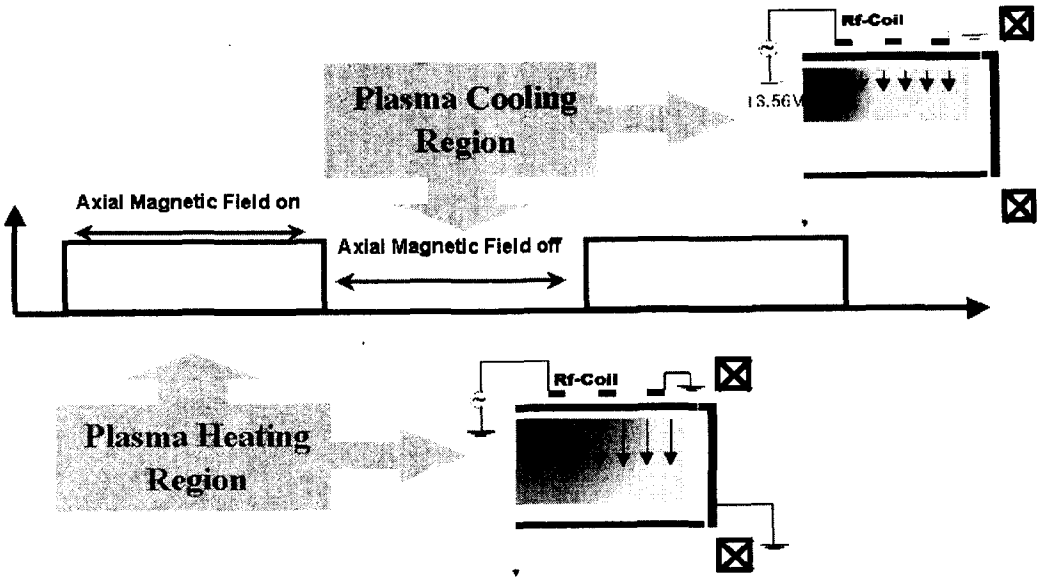

그림 2 E-ICP의 에너지 흡수 특성 개념도

식각 공정에서 가장 크게 영향을 주는 영역인 Substrate 근방에서 진단을 수행하였으며, E-ICP 주파수의 주기보다 긴 탐침 시간 평균된 I-V curve를 사용하였다.

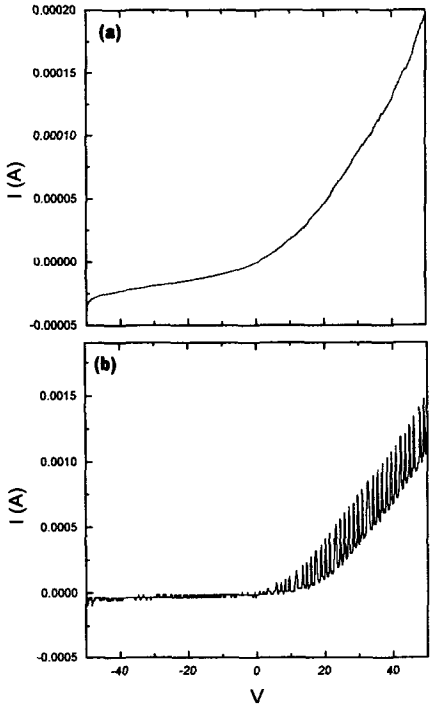

그림 3 측정된 I-V 곡선
(a) 탐침 시간 평균된 I-V 곡선
(b) 탐침 시간 평균되지 않은 I-V 곡선

그림 4. 과 그림 5는 E-ICP 주파수의 변화에 따른 전자 온도의 변화와 플라즈마 전위 및 이온 밀도의 변화를 보여주고 있다. 이온 밀도 및 플라즈마 전위는 E-ICP 주파수에 크게 의존하고 있지 않으나 전자 온도가 E-ICP 주파수 변화에 따라 선형적으로 변화하는 경향을 보여주고 있다. 탐침 시간 평균된 플라즈마 전위이나 이온 밀도가 CW-ICP의 특성과 많은 차이를 보이지 않는 것이 특이하며, 특히 기판 근처의 측정치임을 고려하면 플라즈마 중심부에서의 시간 분해된 특성 측정이 요구되고 있다.

그림 6은 E-ICP 주파수 증가에 따른 전자의 EEDF 변화 양상을 보여주고 있다. 탐침 시간 평균된 I-V 곡선의 2계 미분으로 얻어진 결과이므로 직접적인 특성 변화를 기술하고 있지는 않으나, 능동적으로 전자 에너지 분포를 바꾸어 줄 수 있음을 시사하고 있다.

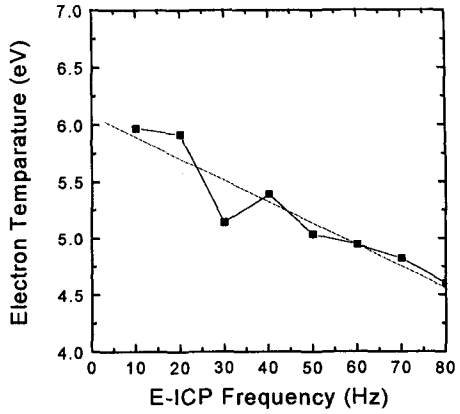

그림 4 E-ICP주파수 변화에 따른 탐침 시간 평균된 전자온도 변화

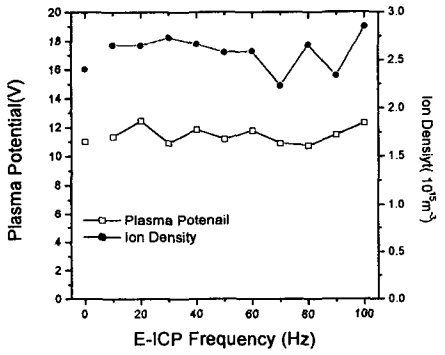

그림 5 E-ICP 주파수 변화에 따른 탐침 시간 평균된 이온 밀도 및 플라즈마 전위

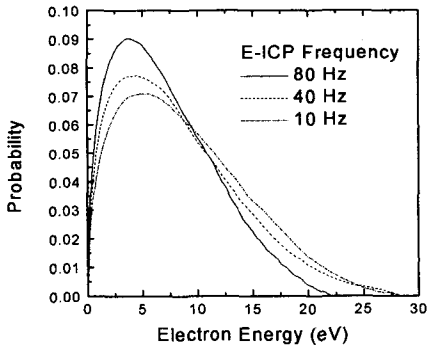

그림 6 E-ICP 주파수 변화에 따른 EEDF변화

즉, 축방향 시변 자기장의 주파수 변화에 따른 전자 에너지 분포를 변화시킬 수 있음을 보여주고 있으며, 이러한 현상은 플라즈마내에 생성되는 여기 입자종의 특성을 변화 시킬 수 있다. 또한 이를 이용하면 매우 용이하게 플라즈마의 특성 조절 및 공정 조건을 최적화 할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

자화 플라즈마의 투과 깊이를 이해함으로써, E-ICP 내부에 인가되는 RF-전력의 효과적인 흡수효과를 이해할 수 있었다. 이와 함께, 탐침 시간 평균된 제한적 진단이지만 시변 자기장의 주파수 변화에 따른 전자의 에너지 분포 곡선을 통하여, 인가되는 약한 축방향의 시변 자기장에 의한 플라즈마 특성 조절효과를 확인하였다.

참고 문헌

[1] 이호준, " 서울대학교 박사학위논문", 1996

[2] M. V. Malyshev and V. M. Donnelly, "Ultrahigh frequency versus inductively coupled chlorine plasmas: Comparisions of Cl and Cl2 concentrations and electron temperatures measured by trace rare gases optical emission spectroscopy", J. Appl. Phys. Vol. 84, Num. 3, pp 1222~1230, 1998

[3] Haruo Shindo, Takuya Urayama, Takashi Fum, Yasuhiro Horike and Syuitsu Fujii,"Electron Energy Control in Inductively Coupled Plasma Employing Multimode Antenna", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 38, pp. L1066~L1069, 1999

[4] Beom-hoan O, Jae-Seong Jeong, and Se-Geun Park, "Improment of ICP Plasma with Periodic Control of Axial Magnetic Field", Surface & Coating Technology, in press, Nov. 1999.

[5] Michael A. Liebermann, Allan J. Lichtenberg, "Principles of Plasma Discharges and Material Processing", A Wiley-Interscience Publication, 1994

[6]Ajit P. Paranjpe, James P. Mc Vittie, Sidney A. Self, "A tuned Langmuir Probe for measurements in rf glow discharges", J. Appl. Phys. 67(11), pp 6718~6727, 1990