

헬리콘 플라즈마 물성특성 및 식각응용에 관한 연구

이 병일, 도 현호, 양 일동, 황 기웅
서울 대학교 공과대학 전기공학과

A Study on the Propertities of Helicon Plasma and Application for Etching

Byoung Ill Lee, Hyun Ho Do, Ill Dong Yang, Ki Woong Whang
Department of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract

A high plasma density of 10^{12}cm^{-3} can be produced at the pressure of few mTorr with R.F input power of 300-400W. A radially uniform plasma to a radius of 7cm at the substrate was produced at the pressure of 1 mTorr. The electron density and temperature were confirmed with double Langmuir probe, μ -wave interferometer. It has been found that the dispersion relation $N/B = \text{constant}$ not be applied at the low R.F input power (<600W) but can be applied at high R.F input power (>600W).

1. 서론

오늘날 플라즈마를 이용한 반도체 제조 및 박막 증착의 분야는 활발히 발전 되어왔고, 고집적 소자 및 질 좋은 박막 증착을 생산 하는데 있어서 여러 제약 조건을 극복하는 것이 새로운 문제점으로 대두되고 있다.

식각 및 증착 중 도움을 주는 활성종의 밀도는 플라즈마 밀도 및 이온 에너지에 종속적이며, 기판 바이어스를 제어 할 수 있는 플라즈마 원(source)은 반도체 제조 및 박막 증착에 많은 장점이 있다.

현재 반도체 제조 및 박막 증착에 사용되는 반응성 식각 장치(RIE) 및 플라즈마 화학 기상 증착 장치(PECVD)는 플라즈마 밀도와 기판 바이어스가 서로 밀접한 관계를 가지고 있어 저압(10 mTorr)에서 식각율을 개선 하려면 높은 전력 및 높은 기판 바이어스가 필요하다. 높은 전력과 높은 기판 바이어스는 선택도를 낮게하고 웨이퍼 표면에 손상을 줌으로써 반응성 식각 장치(RIE) 및 플라즈마 화학 기상 장치(PECVD)는 식각율을 개선하는데 용이하지 않다.

헬리콘 플라즈마는 플라즈마 밀도($\sim 10^{13} / \text{cm}^3$) 이온 에너지 및 기판 바이어스를 넓은 범위에 독립적 제어가 용이하므로써, 차세대 반도체 제조 및 박막 증착 장치의 원(source)으로 사용될 수 있다. 본 논문은 헬리콘 플라즈마에 관하여 논한다.

2. 본론

2-1. 헬리콘 플라즈마 장치의 설계 및 구성

플라즈마 식각장치는 그림 1에 표시하였으며 반응실의 압력은 1×10^{-3} Torr까지 도달할 수 있다. 이 반응기는 두 동축 반응실로 구성되어 있으며 위 반응실(직경: 10cm, 높이: 30cm)은 플라즈마를 생성시키는 장소이고 아래 반응실(직경: 40cm, 높이: 30cm)은 웨이퍼를 식각하는 장소이다. 고밀도 플라즈마($ne \sim 10^{12} \sim 10^{13} \text{cm}^{-3}$)는 L-타입 매칭회로에 연결된 안테나와 지속에 의하여 발생된다. RF발전기는 1KW 까지 사용할 수 있으며 전자석은 1000gauss까지 사용이 가능하다. 위 반응실에서 생성된 플라즈마는 아래 반응실로 확산되며 1.5 mTorr압력 일때 플라즈마 균일도는 기판위 반경 방향으로 10cm되는 곳까지 $\pm 5\%$ 미만이다. 아래 반응실의 플라즈마 밀도와 전자 온도는

Double Langmuir probe로 측정하였으며, 위 반응실의 플라즈마 밀도는 Microwave Interferometer로 측정하였다. 이온 에너지 분포는 이온 에너지 분석기로 측정 하였다.

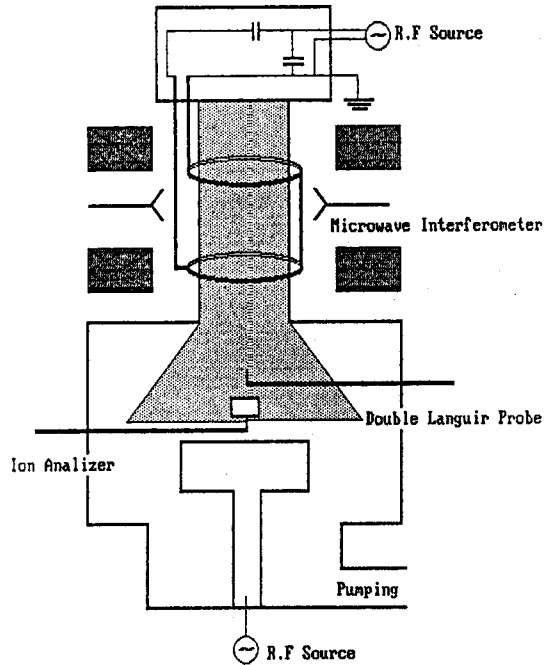


Fig.1 헬리콘 플라즈마 반응기의 계략도

2-2. 헬리콘 플라즈마의 온도 및 밀도 측정

Double Probe 방법은 접지를 정하지 않고 플라즈마와 Floating된 두개의 Probe사이 에 전압을 가면서는 방법을 사용한다. 전자의 온도 T_e 와 전자 밀도 n_e 를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\ln(2 I_{i1}/I_e - 1) = -q V_d / k T_e + \ln C$$

$$I_{i1} = S N_e g(T_e / m_i)^{1/2} \exp(-0.5)$$

I_{i1} : Ion Saturation Current
 I_e : Electron Current
 V_d : Probe applied potential
 T_e : Electron temperature
 N_e : Electron density
 m_i : Ion mass
 S : Probe area
 C : Constant dependent on each experimental condition

그림 2,3은 압력 1.5 mTorr일때 Langmuir double probe로 플라즈마 밀도를 측정한 것이다. 자속(B) 150gauss 일때 입력에 대한 밀도를 측정한 결과 R.F입력 300W에서 밀도가 갑작스런 증가를 하였으며, 자속(B) 250gauss 일때 플라즈마 밀도는 R.F입력 500W에서 갑작스런 증가를 하였다. 그리고 자속(B) 400gauss일때 플라즈마 밀도는 R.F입력 700W에서 갑작스런 증가를 하였으며, 자속(B) 550gauss일때 플라즈마 밀도는 어떤 입력 범위에서도 갑작스런 증가 현상은 나타나지 않았다. 본 실험은 R.F입력 700W 이상에서 분산 관계식($n/B=const.$)과 일치하는 경향성이 나타났으며, R.F입력 700W 미만에서 분산 관계식($n/B=const.$)과 일치하지 않는 경향성이 나타났다.

R.F입력은 축 방향 플라즈마 손실과 반경 방향 플라즈마 손실을 합한 것이며, 축 방향 플라즈마 손실과 반경 방향 플라즈마 손실을 비교할 때, 상대적으로 반경 방향 플라즈마 손실이 적으면 헬리온 플라즈마 밀도는 분산 관계식($n/B=const.$)과 일치하며, 상대적으로 반경 방향 플라즈마 손실이 크면, 헬리온 플라즈마 밀도는 분산 관계식($n/B=const.$)과 일치하지 않는다. 본 실험 장치에서 분산 관계식($n/B = const.$)과 일치하는 경향성이 나타나는 R.F입력은 700W 이상이며, 분산 관계식과 일치하지 않는 경향성이 나타나는 R.F입력은 700W 미만이다.

자속(B) 550gauss일때 플라즈마 밀도가 분산 관계식과 무관하게 나타났것은 헬리온 Mode가 형성하려면 적정 입력과 R.F입력 및 자속이 있어야 한다는 것이 본 실험에서 관측되었다.

그림 4는 기판위($Z=2.5cm$ $R=0\sim7cm$)에서 플라즈마 밀도 분포를 정규화 한것이며, 그림 4에서 볼수 있으시 기판이 플라즈마 생성기(위 반응실)에서 15~20cm 떨어져 있으면 기판위에서 플라즈마 분포는 균일하다.

그림 5는 전자의 온도를 표시한 것으로 전자의 온도는 5~7ev로 측정 되었다.

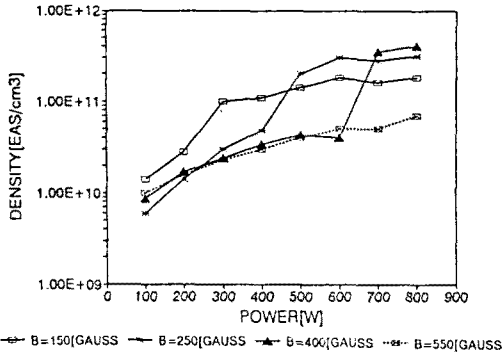


Fig. 2-1 플라즈마 밀도[Z=2cm: R=0cm: P=1.5mTorr]

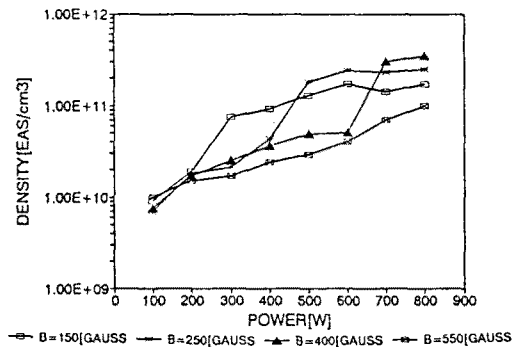


Fig. 2-2 플라즈마 밀도[Z=2cm: R=3cm: P=1.5mTorr]

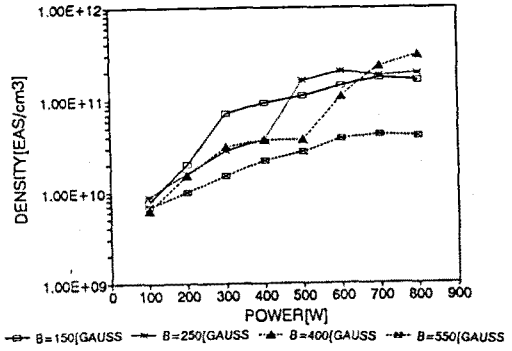


Fig. 2-3 플라즈마 밀도[Z=2cm: R=5cm: P=1.5mTorr]

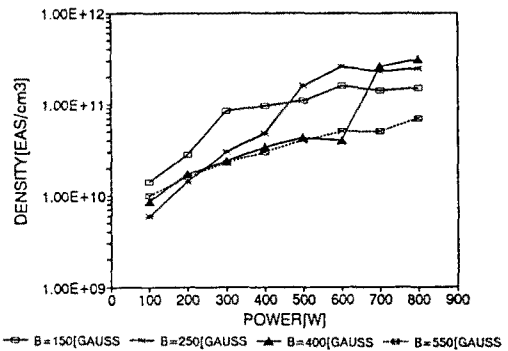


Fig. 3-1 플라즈마 밀도[Z=7cm: R=0cm: P=1.5mTorr]

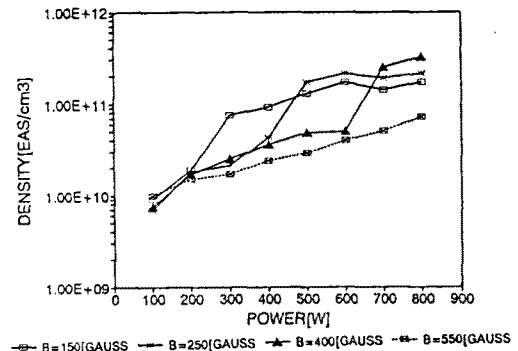


Fig. 3-2 플라즈마 밀도[Z=7cm: R=3cm: P=1.5mTorr]

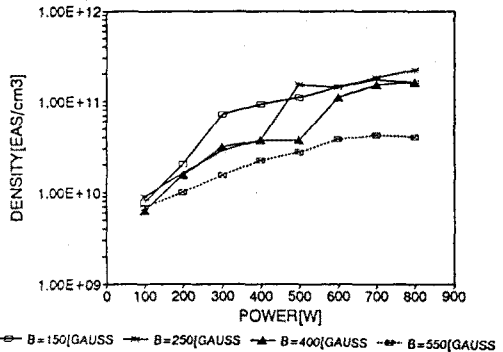


Fig. 3-3 플라즈마 밀도[Z=7cm: R=5cm: P=1.5mTorr]

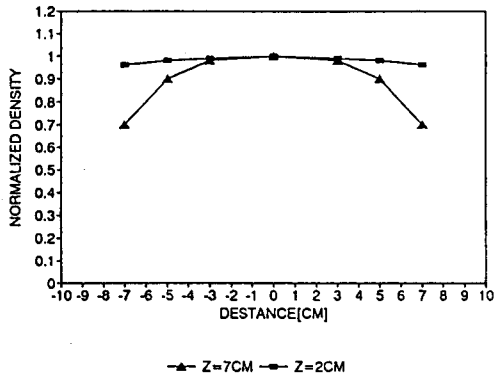


Fig. 4 변경 방향의 플라즈마 분포[P=1.5mTorr]

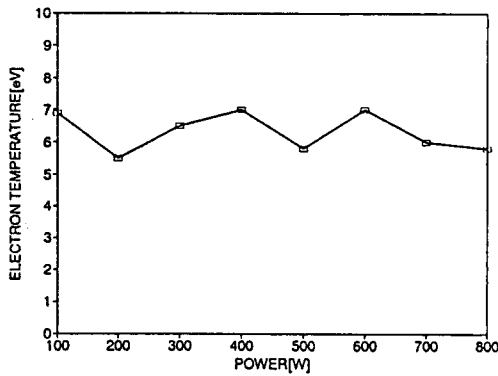


Fig. 5 전자의 온도[P=1.5mTorr]

2-3. Microwave Interferometer로 플라즈마 밀도 측정

Microwave Interferometer는 Microwave가 플라즈마 내를 통과한 후 Microwave의 phase shift차를 검출기로 측정하여 플라즈마 밀도를 측정하는 것이며 플라즈마 밀도는 다음과 같다.

$$n_e(m^{-3}) = 1.184 \times 10^8 f_0(Hz) [L_p(m)]^{-1} [CS^2(V)]^{-1} \Delta S_{0m}(V)$$

- n_e : 플라즈마 밀도
- L_p : Microwave가 통과한 플라즈마 길이
- f_0 : Microwave 주파수
- CS^2 : 상수
- ΔS_{0m} : 검출기로 측정된 Phase shift

반도체 제조 공정에 있어서 플라즈마 밀도 및 전자 온도를 정확히 측정하는 것은 중요한 문제이다. Langmuir Probe만으로 플라즈마 밀도를 정확히 측정 할 수 없으므로, Probe로 플라즈마 밀도 및 온도를 측정 한 후 Microwave Interferometer로 플라즈마 밀도를 보정하면 플라즈마 밀도 및 온도를 정확히 측정 할 수 있다. 본 실험 결과는 헬리콘 플라즈마 원(위 반응식)의 플라즈마 밀도를 Microwave Interferometer로 측정 한 것이다.

그림 7-1은 압력 1.5 mTorr일때 Microwave Interferometer로 플라즈마 밀도를 측정한 결과이며, 자속(B) 150gauss일때 입력 250W에서 플라즈마 밀도가 $10^{12}[cm^{-3}]$ 으로 측정되었다. 자속(B) 400gauss일때 입력 400W에서 플라즈마 밀도가 $10^{12}[cm^{-3}]$ 으로 측정되었다.

그림 7-2는 압력 10 mTorr일때 Microwave Interferometer로 플라즈마를 측정한 결과이며, 자속(B)과 압력 및 R.F 입력이 분산 관계식($n/B = const.$)을 만족하지 못하여 헬리콘 Mode가 형성되지 못하였다. 그림 7-2은 헬리콘 Mode 형성에 있어서, 압력이 중요한 변수로 작용하고 있는 것을 표시한다.

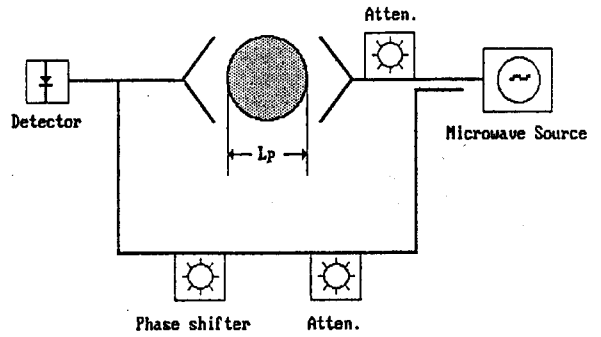


Fig. 6 μ -wave Interferometer의 개략도

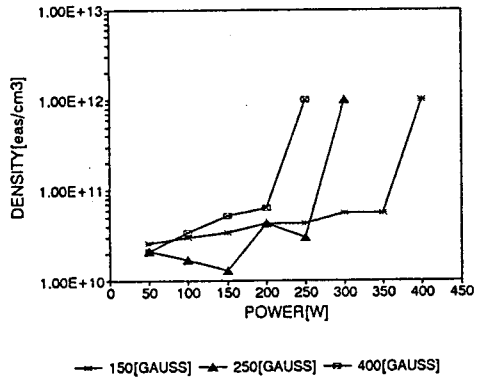


Fig. 7-1 플라즈마 밀도[P=1.5mTorr]

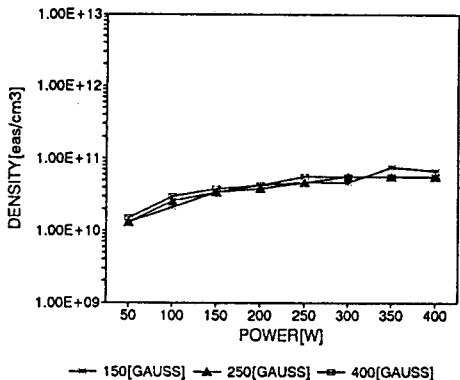


Fig. 7-2 플라즈마 밀도[P=10mTorr]

2-4. 이온 에너지 분석기로 이온 에너지 분포 측정

이온 에너지 분석기는 electron retarding electrode와 discriminator 그리고 collector로 구성된다. floating 되어 플라즈마와 직접 경계를 이루는 electron은 retarding electrode에서 높은 에너지를 갖는 일부의 전자들을 제외하고 대부분이 floating potential에 의하여 저지된다. 그 다음에 discriminating grid에 제어 전압을 인가하여 그 전위 장벽을 넘는 이온들만이 collector에 도달하게 된다. electron retarding electrode와 discriminator사이의 운모로 절연되어 있고 collector에는 -50Volt를 인가 하였다. collector에 도달하는 전류식 및 분포 함수식은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$I(\phi) = (q^2ST/m_i) f^2 \cdot f[V(\phi)] d\phi$$

$$f[V(\phi)] = m_i/q^2ST \cdot dI(\phi)/d\phi$$

q : Ion charge
 S : collecting area
 T : Transparency of mesh
 ϕ : discriminating voltage
 $V(\phi)$: Ion velocity

그림 8은 압력 1.5 mTorr일때, 이온 에너지 분포함수를 표시한 것이며 헬리콘 Mode가 형성되었을때 이온 에너지 분포함수와 헬리콘 Mode가 형성되지 않을때 이온 에너지 분포함수는 다른 형태로 나타났다. 이와같은 사실은 헬리콘 Mode가 형성되었을때 많은 전자 에너지가 이온에 에너지를 전달함으로써 이온은 여러 에너지 상태를 얻는다고 사료된다.

그림 9는 압력 10 mTorr 일때 이온 분포함수를 표시한 것이며, 높은 압력일때 이온은 중성분자와 충돌할 확률이 높아 이온이 가지고 있는 에너지는 중성분자에 전달하여 이온의 에너지가 손실된다고 사료된다. 그러므로 높은 압력에서 이온 분포함수는 좁아진다.

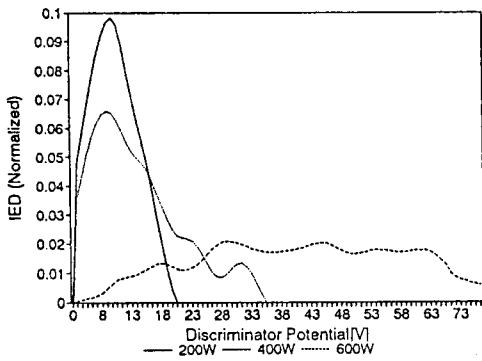


Fig. 8-1 이온 에너지 분포 [B=400Gauss, P=1.5mTorr]

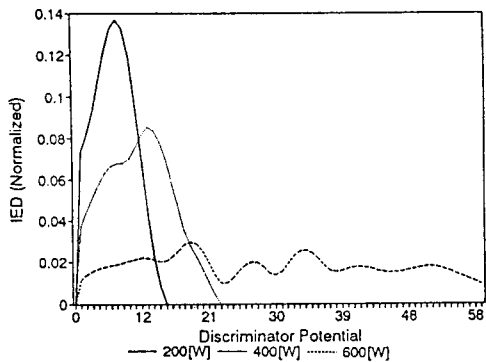


Fig. 8-2 이온 에너지 분포 [B=250Gauss, P=1.5mTorr]

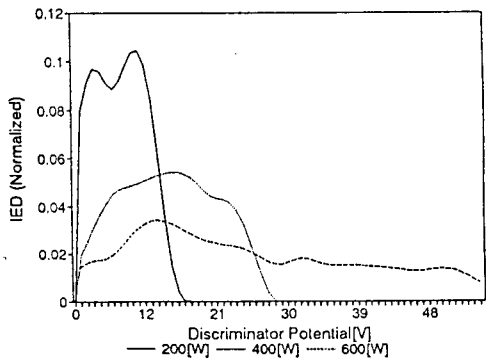


Fig. 8-3 이온 에너지 분포 [B=150Gauss, P=1.5mTorr]

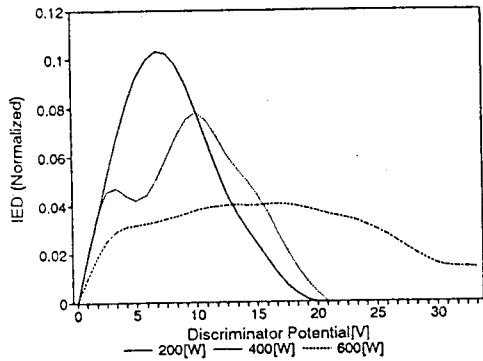


Fig. 8-4 이온 에너지 분포 [B=550Gauss, P=1.5mTorr]

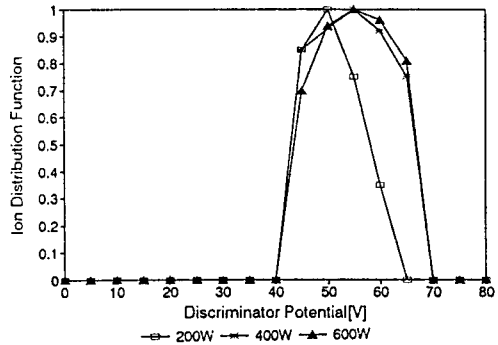
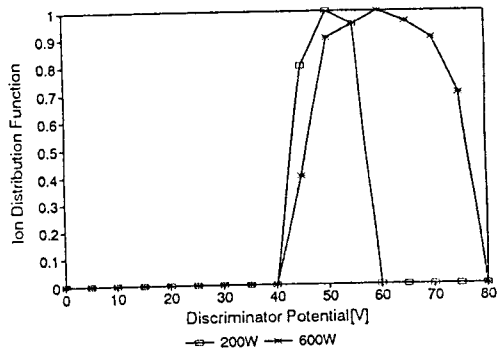


Fig. 9-1 이온 에너지 분포 [B=150Gauss, P=10mTorr]



이온 에너지 분포 [B=550Gauss, P=10mTorr]

3. 결론

헬리콘 플라즈마는 고밀도 플라즈마($10^{12} \sim 10^{13} \text{cm}^{-3}$)를 발생시키며, 위 반응실에서 15cm-20cm 떨어진 기판 위의 플라즈마 밀도는 균일하게 분포하는 것으로 측정되었으며, 건식 식각 및 박막 증착에 대응되는 문제점을 해결 할 수 있는 차세대 반도체 식각장치 및 박막 증착장치의 원(source)으로써 사용할 수 있다. 위 반응실의 플라즈마 밀도 분포를 더 균일하게 생성시키기 위한 안테나 제작이 가능 하다면, 헬리콘 플라즈마는 차세대 반도체 제조 공정에 이용되는 플라즈마원으로 이용될 수 있으리라 사료된다.

참고 문헌

- [1] BOSWELL R.W. (1970) Phys. Lett. 33A, 475
- [2] BOSWELL R.W. (1982) Plasma Phys. Contr. Fusion 26, 1147
- [3] CHEN F.F. (1991) Plasma Phys. Contr. Fusion 33, 339
- [4] A. KOMORI., ET AL. (1991) Phys. Fluids B, 3(4), 893