

고밀도 유도 결합 플라즈마 장치의 SiH₄/O₂/Ar 방전에 대한 공간 평균 시뮬레이터 개발

배상현, 권득철, 윤남식*

충북대학교, 전기공학과, 청주 361-763

(2008년 7월 7일 받음, 2008년 9월 10일 수정, 2008년 9월 12일 확정)

고밀도 유도결합 플라즈마 장치의 SiH₄/O₂/Ar방전에 대한 공간 평균 시뮬레이터를 제작하였다. 제작된 시뮬레이터는 SiH₄/O₂/Ar 플라즈마 방전에서 발생하는 전자, 양이온, 음이온, 중성종, 그리고 활성종들에 대해 공간 평균한 유체 방정식을 기반으로 하고 있으며, 전자기열 모델은 anomalous skin effect를 고려한 파워 흡수 모델을 적용하여 전자가 흡수하는 고주파 파워량을 결정하였다. 완성된 시뮬레이터에서 RF-파워와 압력 변화에 대한 하전입자, 중성종, 활성종들의 밀도 변화 및 전자 온도 의존성을 계산하였다.

주제어 : 고밀도 유도결합 플라즈마 장치, 공간 평균, Anomalous skin effect.

I. 서 론

현대 산업계에 응용되고 있는 플라즈마 기술은 나날이 그 필요성이 증대되고 어서 반도체 제작, LCD 등의 디스플레이 장치 제작, MEMS, 그리고 표면처리 등을 비롯한 여러 분야에서 응용되고 있다. PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition), sputtering, etching, stripping, 그리고 cleaning 등이 그 사용의 예이다. 플라즈마장치 중 ICP (Inductively Coupled Plasma) 장치는 구조의 간단함에도 불구하고 고밀도의 균일한 플라즈마를 낮은 공정 압력대에서 효율적으로 발생시켜 차세대 공정 장비로써 주목을 받고 있는 플라즈마원이다.

본 연구에서는 ICP장치에서의 산화막 증착에 사용되는 SiH₄/O₂/Ar 가스에 대한 플라즈마 방전에 대한 공간 평균 시뮬레이터를 제작하였다. 공간 평균 모델식에서 전자의 파워 흡수량은 anomalous skin effect를 포함한 2차원 전자기열 모델을 이용하여 결정하였으며 [1], 여러 조정 변수에 대한 주요 활성종과 중성종 밀도, 하전입자 밀도, 전자 온도, 플라즈마 저항, 그리고 파워 흡수 계수의 의존성을 조사하였다.

II. 본 론

2. 1 공간 평균 모델링

본 연구에서는 수송 방정식을 챔버 부피 내에서 공간 평균한 0차원 모델식들을 통해 전체적인 방전 특성을 조사하였으며, 사용된 모델식은 다음과 같다 [2, 3].

$$\frac{dn_i}{dt} = \sum_j k_{ij} n_e n_j + \sum_{j,k} k_{ij} n_j n_k - n_i v_{loss,i} - n_i (\sum_j k_{ij} n_e + \sum_{i,k} k_{jik} n_k) + \frac{Q_{flas}}{\Omega} - \frac{V_p}{\Omega} n_i, \quad (1)$$

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{2 P_{abs}}{3 n \Omega} - \sum_j k_{e,j} n_j \left(\frac{2}{3} \epsilon_{e,j} + T_e \right) - \frac{2}{3} \sum_j k_{dis,j} n_j \epsilon_{dis,j} - \sum_j k_{at,j} n_j \left(\frac{2}{3} \epsilon_{at,j} - T_e \right) - \left(\frac{2}{3} \epsilon_{loss} + T_e \right) v_{loss}, \quad (2)$$

$$v_{loss,i} = \frac{S}{\Omega} \sqrt{\frac{T_e}{M_i}}, \quad (3)$$

* [전자우편] nsyoon@chungbuk.ac.kr

$$\phi_f = -\frac{T_e}{e} \ln \left(\frac{n_e v_e^{th} / 4}{\sum_i n_i \sqrt{T_e / M_i}} \right), \quad (4)$$

$$\varepsilon_{loss} = e\phi_f, \quad (5)$$

$$A_{eff} = 2\pi R(Rh_L + Lh_R), \quad (6)$$

Table 1. Considered species for SiH₄/O₂/Ar discharges

Input gas	SiH ₄ /O ₂ /Ar
Neutral, radicals	Ar, H, H ₂ , SiH ₄ , SiH ₃ , SiH ₂ , SiH, O, O ₂
Charged species	Ar ⁺ , SiH ⁺ , SiH ₃ ⁺ , SiH ₂ ⁺ , SiH ⁺ , H ⁺ , O ⁺ , e

Table 2. Surface recombination probability for radical species

Species	Recombination probability	Reference
O	0.17	[6]
O*	0.17	[6]
O ₂ *	0.007	[6]
Ar	0.1	[9]

I. <Ar chemical Data> rate coefficient :

$$k = A(11600T_e)^B \exp(-C/(11600T_e)) \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \quad \text{Te : ev}$$

<Ionization>

	Reaction	A	B	C	Ref
k _{iz,1}	e + Ar → Ar ⁺ + 2e	7.07e-11	0.6	187120.0	[5]
k _{iz,2}	e + Ar* → Ar ⁺ + 2e	1.25e-07	0.1	60524.0	[5]
k _{iz,3}	Ar* + Ar* → Ar + Ar ⁺ + e	6.20e-10	0.0	0.0	[9]

<Excitation>

	Reaction	A	B	C	Ref
k _{ex,1}	e + Ar* → Ar + e	1.17e-08	0.0	138560.0	[5]

<De-excitation>

	Reaction	A	B	C	Ref
k _{ex,1}	e + Ar* → Ar + e	20e.0	0.0	0.0	[5]

<Neutral wall reaction>

	Reaction	Rate coefficient (s ⁻¹)
k _{nw,1}	Ar* → Ar	$\frac{1}{4} \frac{S}{\Omega} \gamma_{Ar} n_{Ar^*} v_{th,Ar^*}$

여기서 n_i, n_j, nk는 i종, j종, k종 입자의 밀도이고, n_e는 전자의 밀도이다. k_{ij}는 전자가 j종 입자와 충돌해 i종 입자를 생성시키는 반응의 반응계수, k_{ijk}는 j종 입자가 k종 입자와 반응해 i종 입자를 생성시킬 때의 반응계수이다.

2. <O₂ Chemical Data> rate coefficient :

$$k = AT^B \exp(C/T) \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \quad \text{Te : ev} \quad \text{Tg : kelvin}$$

	Reaction	A	B	C	Ref
k ₁	e + O ₂ → O ₂ ⁺ + 2e	9.00e-10	2.0	-12.6	[6]
k ₂	e + O ₂ ⁺ → O(³ P) + O(³ P)	2.20e-7	0.0	0.0	[6]
k ₃	e + O ₂ → O(³ P) + O ⁻	8.80e-11	0.0	-4.4	[6]
k ₄	e + O(³ P) → O ⁺ + 2e	9.00e-9	0.7	-13.6	[6]
k ₅	O ⁻ + O ₂ ⁺ → O(³ P) + O ₂	1.50e-7(300/T _g) ^{1/2}	0.0	0.0	[6]
k ₆	O ⁻ + O ⁺ → O(³ P) + O(³ P)	2.70e-7(300/T _g) ^{1/2}	0.0	0.0	[6]
k ₇	e + O ⁻ → O(³ P) + 2e	1.10e-7	0.0	-3.58	[6]
k ₈	e + O ₂ → O(³ P) + O(³ P) + e	4.2e-9	0.0	-5.6	[10]
k ₉	O(³ P) + O ⁻ → O ₂ + e	3.0e-10(300/T _g) ^{1/2}	0.0	0.0	[6]
k ₁₀	e + O ₂ → O ⁻ + O ⁺ + e	7.10e-11	0.5	-17	[6]
k ₁₁	e + O ₂ → O(³ P) + O ⁺ + 2e	5.30e-10	0.9	-20	[6]
k ₁₂	O ⁺ + O ₂ → O(³ P) + O ₂ ⁺	2.00e-11(300/T _g) ^{1/2}	0.0	0.0	[6]
k ₁₃	e + O ₂ → O(³ P) + O(¹ D) + e	5.e-8	0.0	-8.4	[10]
k ₁₄	e + O(³ P) → O(¹ D) + e	4.50e-9	0.0	-2.29	[6]
k ₁₅	O(¹ D) + O ₂ → O(³ P) + O ₂	3.00e-11	0.0	0.0	[6]
k ₁₆	O(¹ D) + O(³ P) → 2O(³ P)	8.10e-12	0.0	0.0	[6]
k ₁₇	e + O(¹ D) → O ⁺ + 2e	9.00e-9	0.7	-11.6	[6]
k ₁₈	e + O ₂ → O ₂ (a ¹ Δ _g) + e	1.70e-9	0.0	-3.1	[6]
k ₁₉	e + O ₂ (a ¹ Δ _g) → O ₂ ⁺ + 2e	9.00e-10	2.0	-11.6	[6]
k ₂₀	e + O ₂ (a ¹ Δ _g) → O ⁻ + O ⁺	2.28e-10	0.0	-2.29	[6]
k ₂₁	e + O ₂ (a ¹ Δ _g) → O ₂ + e	5.60e-9	0.0	-2.2	[6]
k ₂₂	e + O ₂ (a ¹ Δ _g) → 2O + e	4.20e-9	0.0	-4.6	[6]
k ₂₃	O ⁻ + O ₂ (a ¹ Δ _g) → O ₂ ⁻ + O(³ P)	1.10e-11(300/T _g) ^{1/2}	0.0	0.0	[6]
k ₂₄	O ₂ ⁻ + O ₂ ⁺ → 2O ₂	2.00e-7(300/T _g) ^{1/2}	0.0	0.0	[6]
k ₂₅	O ₂ ⁻ + O ⁺ → O ₂ + O(³ P)	2.00e-7(300/T _g) ^{1/2}	0.0	0.0	[6]
k ₂₆	e + O ₂ + O ₂ → O ₂ ⁻ + O ₂	2.26e-30(300/T _g) ^{1/2}	0.0	0.0	[6]
k ₂₇	O ⁻ + O ⁺ → O(³ P) + O(¹ D)	4.90e-10(300/T _g) ^{1/2}	0.0	0.0	[6]
k ₂₈	O ₂ ⁻ + O ₂ (a ¹ Δ _g) → 2O ₂ + e	2.70e-11(300/T _g) ^{1/2}	0.0	0.0	[6]
k ₂₉	O ₂ ⁻ + O(³ P) → O ⁻ + O ₂	3.31e-10(300/T _g) ^{1/2}	0.0	0.0	[6]
k ₃₀	e + O ₃ → O ⁻ + O ₂	9.30e-10/T _e 0.62	0.0	0.0	[6]
k ₃₁	e + O ₃ → O + O ₂ ⁻	1.e-9	0.0	0.0	[6]
k ₃₂	O ⁻ + O ₂ → O ₃ + e	5.00e-15(300/T _g) ^{1/2}	0.0	0.0	[6]
k ₃₃	O ⁻ + O ₂ (a ¹ Δ _g) → O ₃ + e	2.20e-11(300/T _g) ^{1/2}	0.0	0.0	[6]
k ₃₄	O ⁺ + O ₃ → O ₂ ⁺ + O ₂	1.00e-11(300/T _g) ^{1/2}	0.0	0.0	[6]
k ₃₅	O + O ₃ → 2O ₂	2.00e-11(300/T _g) ^{1/2}	0.0	0.0	[6]

2. <O₂ Chemical Data> rate coefficient :

$$k = AT^B \exp(C/T) \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \quad \text{Te : ev} \quad \text{Tg : kelvin}$$

	Reaction	A	B	C	Ref.
k _{,36}	$O^- + O_3 \rightarrow O_3^- + O$	$5.30e-10(300/T_g)^{1/2}$	0.0	0.0	[6]
k _{,37}	$O_3^- + O(^3P) \rightarrow O_2^- + O_2$	$3.20e-10(300/T_g)^{1/2}$	0.0	0.0	[6]
k _{,38}	$O_3^- + O(^3P) \rightarrow 2O_2 + e$	$3.0e-10(300/T_g)^{1/2}$	0.0	0.0	[6]
k _{,39}	$O_3^- + O_2^+ \rightarrow O_2 + O_3$	$2.00e-7(300/T_g)^{1/2}$	0.0	0.0	[6]
k _{,40}	$O_3^- + O_2^+ \rightarrow 2O + O_3$	$1.01e-7(300/T_g)^{1/2}$	0.0	0.0	[6]
k _{,41}	$O_2^- + O_3 \rightarrow O_2 + O_3^-$	$4.00e-10(300/T_g)^{1/2}$	0.0	0.0	[6]
k _{,42}	$O_2^- + O(^3P) \rightarrow O_3 + e$	$3.01e-10(300/T_g)^{1/2}$	0.0	0.0	[6]
k _{,43}	$e + O_3 \rightarrow O(^3P) + O_2 + e$	$1.00e-8(300/T_g)^{1/2}$	0.0	0.0	[6]
k _{,44}	$2O_2 + O(^3P) \rightarrow O_3 + O_2$	$6.4e-29(663/T_g)$	0.0	0.0	[6]
k _{,45}	$O_2 + 2O(^3P) \rightarrow O_3 + O(^3P)$	$2.15e-28$	0.0	345/600	[6]
k _{,46}	$e + O(^3P) + O_2 \rightarrow O_2^- + O(^3P)$	$1.00e-31$	0.0	0.0	[6]
k _{,47}	$e + O(^3P) + O_2 \rightarrow O^- + O_2$	$1.00e-31$	0.0	0.0	[6]
k _{,48}	$e + O_2^+ \rightarrow O(^1D) + O(^3P)$	$2.11e-7(300/T_g)^{0.7}$	0.0	0.0	[6]
k _{,49}	$O_2 + O(^1D) \rightarrow O_2(a^1\Delta_g) + O(^3P)$	$1.00e-12$	0.0	0.0	[6]
k _{,50}	$e + O(^1D) \rightarrow e + O$	$8.00e-9$	0.0	0.0	[6]
k _{,51}	$O_3 + O(^1D) \rightarrow O_2 + O + O$	$1.20e-10$	0.0	0.0	[8]
k _{,52}	$O_3 + O(^1D) \rightarrow O_2 + O_2$	$1.20e-10$	0.0	0.0	[8]

3. <SiH₄ chemical Data> rate coefficient :

$$k = AT^B \exp(-C/T) \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}, \quad \text{Te : ev}$$

<Ionization>

	Reaction	A	B	C	Ref.
k _{iz,1}	$e + SiH_4 \rightarrow SiH_3^+ + H + 2e$	3.06e-02	-1.3	184820.0	[5]
k _{iz,2}	$e + SiH_4 \rightarrow SiH_2^+ + H_2 + 2e$	2.69e-02	-1.2	179670.0	
k _{iz,3}	$e + SiH_4 \rightarrow SiH^+ + H_2 + H + 2e$	1.07e-03	-1.2	189440.0	
k _{iz,4}	$e + SiH_4 \rightarrow Si^+ + 2H_2 + 2e$	1.58e-03	-1.3	188260.0	
k _{iz,5}	$e + SiH_4 \rightarrow H_2^+ + SiH + H + 2e$	1.89e-22	-0.4	22610.0	
k _{iz,6}	$e + SiH_4 \rightarrow H^+ + SiH_2 + H + 2e$	9.49e-23	-0.4	20793.0	
k _{iz,7}	$e + SiH_3 \rightarrow SiH_3^+ + 2e$	2.25e-12	0.9	94804.0	
k _{iz,8}	$e + SiH_3 \rightarrow SiH_2^+ + H + 2e$	1.70e-11	0.6	133220.0	
k _{iz,9}	$e + SiH_2 \rightarrow SiH_2^+ + 2e$	9.16e-12	0.8	98701.0	
k _{iz,10}	$e + SiH_2 \rightarrow SiH^+ + H + 2e$	4.39e-11	0.6	146510.0	
k _{iz,11}	$e + SiH \rightarrow SiH^+ + 2e$	5.25e-11	0.6	92419.0	
k _{iz,12}	$e + SiH \rightarrow Si^+ + H + 2e$	1.33e-12	0.8	125980.0	
k _{iz,13}	$e + H_2 \rightarrow H_2^+ + 2e$	1.33e-13	1.1	197550.0	
k _{iz,14}	$e + H \rightarrow H^+ + 2e$	7.33e-12	0.7	169360.0	

<Dissociation>

	Reaction	A	B	C	Ref.
k _{dis,1}	$e + SiH_4 \rightarrow SiH_3 + H + e$	8.96e-03	-1.0	123500.0	[5]
k _{dis,2}	$e + SiH_4 \rightarrow SiH_2 + 2H + e$	1.83e-03	-1.0	123500.0	
k _{dis,3}	$e + H_2 \rightarrow 2H + e$	1.7e-8	0.0	119940	

<Ion-Neutral reactions>

	Reaction	A	B	C	Ref.
k _{in,1}	$H^+ + SiH_4 \rightarrow SiH_3^+ + H_2$	5.00e-09	0.0	0.0	[5]
k _{in,2}	$H_2^+ + SiH_4 \rightarrow SiH_3^+ + H_2 + H$	3.60e-09	0.0	0.0	
k _{in,3}	$SiH_2^+ + SiH_4 \rightarrow SiH_3^+ + SiH_3$	1.10e-09	0.0	0.0	
k _{in,4}	$O^+ + SiH_4 \rightarrow SiH_3^+ + O + H$	3.20e-11	0.0	0.0	
k _{in,5}	$O_2^+ + SiH_4 \rightarrow SiH_3^+ + H + O_2$	2.00e-10	0.0	0.0	
k _{in,6}	$O_2^+ + SiH_4 \rightarrow SiH_2^+ + H_2 + O_2$	1.00e-10	0.0	0.0	
k _{in,7}	$H_2^+ + Ar \rightarrow Ar^+ + H_2$	3.00e10	0.0	0.0	
k _{in,8}	$Ar^+ + H_2 \rightarrow H_2^+ + Ar$	1.30e-10	0.0	0.0	
k _{in,9}	$Ar^+ + SiH_4 \rightarrow Ar + SiH_3^+ + H$	1.70e-11	0.0	0.0	
k _{in,10}	$Ar^+ + SiH_4 \rightarrow Ar + SiH_2^+ + H_2$	3.90e-11	0.0	0.0	
k _{in,11}	$Ar^+ + SiH_4 \rightarrow Ar + SiH^+ + H + H_2$	8.00e-11	0.0	0.0	

<Neutral radical reactions>

	Reaction	A	B	C	Ref.
k _{neu,1}	$H + SiH_4 \rightarrow H_2 + SiH_3$	2.44e-16	1.9	1102.0	[5]
k _{neu,2}	$O + SiH_4 \rightarrow OH + SiH_3$	1.23e-10	0.0	1756.0	
k _{neu,3}	$Si_2 + M \rightarrow Si + Si + M$	1.66e-9	0.0	37460.0	
k _{neu,4}	$SiH_2 + SiH_2 \rightarrow Si_2H_2 + H_2$	1.08e-9	0.0	0.0	
k _{neu,5}	$Si + O_2 \rightarrow SiO + O$	2.70e-10	0.0	0.0	
k _{neu,6}	$H + Si_2H_6 \rightarrow SiH_4 + SiH_3$	1.11e-12	0.0	0.0	
k _{neu,7}	$H + Si_2H_6 \rightarrow H_2 + Si_2H_5$	2.16e-12	0.0	0.0	
k _{neu,8}	$SiH_3 + SiH_3 \rightarrow SiH_2 + SiH_4$	2.99e-11	0.0	0.0	
k _{neu,9}	$SiH_2 + M \rightarrow Si + H_2 + M$	4.98e-9	0.0	19244.0	
k _{neu,10}	$OH + SiH_4 \rightarrow SiH_3 + H_2O$	1.44e-11	0.0	48.0	
k _{neu,11}	$SiH_4 + SiH_3 \rightarrow Si_2H_5 + H_2$	2.94e-12	0.0	2214.0	
k _{neu,12}	$SiH_4 + SiH \rightarrow Si_2H_3 + H_2$	2.41e-12	0.0	1006.0	
k _{neu,13}	$SiH_2 + H \rightarrow SiH + H_2$	2.31e-11	0.0	0.0	
k _{neu,14}	$H_2 + Si_2 \rightarrow SiH + SiH$	2.56e-11	0.0	20128.0	
k _{neu,15}	$H + Si_2 \rightarrow SiH + Si$	8.55e-11	0.0	2667.0	
k _{neu,16}	$H_2 + O_2 \rightarrow OH + OH$	2.82e-11	0.0	24043.0	
k _{neu,17}	$OH + H_2 \rightarrow H_2O + H$	1.94e-15	1.3	1825.0	
k _{neu,18}	$O + OH \rightarrow O_2 + H$	6.64e-10	-0.5	0.0	
k _{neu,19}	$O + H_2 \rightarrow OH + H$	8.40e-20	2.7	3165.0	

	Reaction	A	B	C	Ref
k _{neu,20}	OH + HO ₂ → H ₂ O + O ₂	1.24e-11	0.0	0.0	
k _{neu,21}	H + HO ₂ → OH + OH	2.32e-10	0.0	540.0	
k _{neu,22}	O + HO ₂ → O ₂ + OH	2.33e-11	0.0	540.0	
k _{neu,23}	OH + OH → O + H ₂ O	9.96e-16	1.3	0.0	
k _{neu,24}	H + HO ₂ → H ₂ + O ₂	2.08e-11	0.0	0.0	
k _{neu,25}	HO ₂ + HO ₂ → H ₂ O ₂ + O ₂	3.32e-12	0.0	0.0	
k _{neu,26}	H ₂ O ₂ + M → OH + OH + M	2.16e-7	0.0	22896.0	
k _{neu,27}	H ₂ O ₂ + H → HO ₂ + H ₂	2.66e-12	0.0	1912.0	
k _{neu,28}	H ₂ O ₂ + OH → H ₂ O + HO ₂	1.66e-11	0.0	906.0	
k _{neu,29}	H + O ₂ + M → HO ₂ + M	9.95e-31	-0.7	0.0	
k _{neu,30}	H + H + M → H ₂ + M	2.76e-30	-1.0	0.0	
k _{neu,31}	H + H + H ₂ → H ₂ + H ₂	2.54e-31	-0.6	0.0	
k _{neu,32}	H + H + H ₂ O → H ₂ + H ₂ O	1.65e-28	-1.2	0.0	
k _{neu,33}	H + OH + M → H ₂ O + M	4.41e-26	-2.0	0.0	
k _{neu,34}	H + O + M → OH + M	1.71e-31	-0.6	0.0	
k _{neu,35}	Si + SiH ₂ → Si ₂ + H ₂	2.49e-10	0.0	0.0	
k _{neu,36}	Si + SiH ₄ → Si ₂ H ₂ + H ₂	2.49e-10	0.0	3669.0	
k _{neu,37}	SiH + SiH ₄ → H ₃ SiSiH + H	4.98e-10	0.0	4535.0	
k _{neu,38}	H ₃ SiSiH + H ₂ → Si ₂ H ₆ + SiH ₄	1.56e-10	0.0	2059.0	
k _{neu,39}	Reverse Arrhenius coefficients of k _{neu,38}	1.57e-13	1.1	2914.0	[5]
k _{neu,40}	H ₃ SiSiH + SiH ₄ → Si ₂ H ₆ + SiH ₂	2.87e-10	0.4	4478.0	
k _{neu,41}	Reverse Arrhenius coefficients of k _{neu,40}	4.40e-9	0.1	4264.0	
k _{neu,42}	Si + Si ₂ H ₆ → SiH ₂ + H ₃ SiSiH	2.16e-9	0.0	6340.0	
k _{neu,43}	SiH ₄ + O ₂ → SiH ₃ + HO ₂	3.32e-13	0.0	22141.0	
k _{neu,44}	SiH ₄ + HO ₂ → SiH ₃ + H ₂ O ₂	4.98e-12	0.0	2818.0	
k _{neu,45}	SiH ₃ + H → SiH ₂ + H ₂	2.49e-11	0.0	1258.0	
k _{neu,46}	SiH ₃ + O → SiH ₂ O + H	1.08e-9	0.0	1006.0	
k _{neu,47}	SiH ₃ + OH → SiH ₂ O + H ₂	8.30e-12	0.0	0.0	
k _{neu,48}	SiH ₂ + O ₂ → HSiO + OH	1.66e-10	0.0	1862.0	
k _{neu,49}	SiH ₂ O + M → HSiO + H + M	8.30e-8	0.0	38546.0	
k _{neu,50}	SiH ₂ O + H → HSiO + H ₂	5.48e-10	0.0	5284.0	
k _{neu,51}	SiH ₂ O + O → HSiO + OH	2.99e-11	0.0	1550.0	
k _{neu,52}	SiH ₂ O + OH ⇌ HSiO + H ₂ O	1.24e-11	0.0	86.0	
k _{neu,53}	SiH ₂ O + HO ₂ → HSiO + H ₂ O ₂	1.66e-12	0.0	4026.0	
k _{neu,54}	HSiO + M → SiO + H + M	8.30e-10	0.0	14593.0	
k _{neu,55}	HSiO + H → SiO + H ₂	3.32e-10	0.0	0.0	
k _{neu,56}	HSiO + O → SiO + OH	8.30e-10	0.0	0.0	
k _{neu,57}	HSiO + OH → SiO + H ₂ O	1.66e-10	0.0	0.0	

	Reaction	A	B	C	Ref
k _{neu,58}	HSiO + O ₂ → SiO + HO ₂	1.99e-10	0.0	2000.0	
k _{neu,59}	SiO + OH → SiO ₂ + H	6.64e-12	0.0	2868.0	
k _{neu,60}	SiO + O + M → SiO ₂ + M	6.89e-33	0.0	2199.0	
k _{neu,61}	SiO + O ₂ → SiO ₂ + O	1.66e-11	0.0	3271.0	
k _{neu,62}	SiH ₃ + O ₂ → SiH ₂ O + OH	6.02e-12	0.0	0.0	
k _{neu,63}	SiH ₃ + O ₂ → SiH ₃ O + O	2.02e-12	0.0	0.0	
k _{neu,64}	SiH ₃ + O ₂ → HSiOOH + H	3.56e-12	0.0	0.0	
k _{neu,65}	HO ₂ + M → O + OH + M	1.36e-2	-1.0	33161.0	
k _{neu,66}	SiH ₄ + SiH ₃ O → SiH ₃ + SiH ₃ OH	3.32e-13	0.0	2667.0	
k _{neu,67}	SiH ₄ + SiH ₃ O ₂ → SiH ₃ + SiH ₃ O ₂ H	1.83e-11	0.0	9309.0	
k _{neu,68}	SiH ₃ O ₂ + SiH ₂ O → SiH ₃ O ₂ H + HSiO	2.16e-13	0.0	3422.0	
k _{neu,69}	SiH ₃ O ₂ + HO ₂ → SiH ₃ O ₂ H + O ₂	6.64e-14	0.0	0.0	
k _{neu,70}	SiH ₃ O ₂ H + H → SiH ₃ O ₂ + H ₂	7.97e-11	0.0	4000.0	
k _{neu,71}	SiH ₃ O + SiH ₂ O → SiH ₃ OH + HSiO	1.99e-13	0.0	489.0	
k _{neu,72}	SiH ₃ O + SiH ₃ OH → SiH ₃ OH + SiH ₂ OH	2.49e-12	0.0	2667.0	
k _{neu,73}	SiH ₃ O + O ₂ → SiH ₂ O + HO ₂	1.66e-12	0.0	2264.0	
k _{neu,74}	SiH ₃ OH + H → SiH ₂ OH + H ₂	4.98e-11	0.0	2667.0	[5]
k _{neu,75}	SiH ₃ OH + O → SiH ₂ OH + OH	2.82e-12	0.0	871.0	
k _{neu,76}	SiH ₃ OH + OH → SiH ₂ OH + H ₂ O	6.64e-12	0.0	755.0	
k _{neu,77}	SiH ₃ OH + SiH ₃ → SiH ₂ OH + SiH ₄	2.99e-13	0.0	3724.0	
k _{neu,78}	SiH ₃ OH + SiH ₃ O ₂ → SiH ₂ OH + SiH ₃ O ₂ H	1.05e-11	0.0	7296.0	
k _{neu,79}	SiH ₃ OH + O ₂ → SiH ₂ OH + HO ₂	6.64e-11	0.0	22644.0	
k _{neu,80}	SiH ₃ OH + HO ₂ → SiH ₂ OH + H ₂ O ₂	1.05e-11	0.0	7045.0	
k _{neu,81}	SiH ₂ O + O ₂ → HSiO + HO ₂	6.64e-10	0.0	14845.0	
k _{neu,82}	SiH ₂ OH + O ₂ → HSiOOH + OH	1.66e-11	0.0	3522.0	
k _{neu,83}	HSiO + SiH ₃ O → SiO + SiH ₃ OH	1.66e-12	0.0	0.0	
k _{neu,84}	SiH ₂ O + H ₂ O → HSiOOH + H ₂	1.66e-11	0.0	0.0	
k _{neu,85}	SiH ₂ O + OH → HSiOOH + H	1.66e-11	0.0	0.0	
k _{neu,86}	SiH ₂ O + HO ₂ → HSiOOH + OH	1.66e-13	0.0	0.0	
k _{neu,87}	HSiOOH + O ₂ → SiOOH + HO ₂	2.82e-11	0.0	8051.0	
k _{neu,88}	SiOOH + O ₂ → SiO ₂ + HO ₂	1.66e-12	0.0	7196.0	
k _{neu,89}	SiOOH + H → SiO ₂ + H ₂	1.66e-12	0.0	4529.0	
k _{neu,90}	O ₂ + SiH → SiO + OH	1.70e-10	0.0	0.0	

Table 3. Gas-phase mechanism for SiH₄/O₂/Ar

Q_{flow} 와 V_p 는 각각 가스의 유입량과 Pumping speed이다. P_{abs} 는 흡수된 파워, $k_{iz,j}$ 는 j 종 입자의 이온화 반응계수, $\varepsilon_{iz,j}$ 는 이온화 에너지, $\varepsilon_{ex,i}$ 는 여기 에너지, ε_i 는 챔버 벽에서의 손실에너지, 그리고 v_{eth} 는 전자의 thermal

velocity를 나타낸다. k_{iz} 는 이온화 주파수, $v_{oss,i}$ 는 손실 주파수, ϕ_f 는 floating potential, Ω 는 챔버의 체적, 그리고 A_{eff} 는 반응로 내부와 sheath edge에서의 양이온 밀도 비율 h factor를 고려한 유효 표면적이다 [4]. T_e 는 전자의 온도, M_i 는 i 종 이온의 질량, 그리고 m_e 는 전자 질량을 나타낸다. SiH₄/O₂/Ar가스 데이터는 Meeks [5], Gudmundsson [6], Baeva [7], 그리고 Shane stafford [8] 등이 정리하였다. 고려된 종과 재결합 계수는 각각 Table 1과 Table 2와 같고 종들의 반응식은 Table 3와 같다.

2. 2 Power 흡수 모델

플라즈마에서 흡수한 파워는 입력된 파워에 비례하므로,

$$P_{abs} = \alpha P_{RF}, \tag{7}$$

이다. 여기서 P_{abs} 는 흡수된 파워, P_{RF} 는 안테나에 입력된 파워, α 는 파워 흡수 계수이다. 파워 흡수 계수 α 는 기생 임피던스 값들을 무시하면 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha = \frac{R_p}{R_a + R_p}, \tag{8}$$

여기에서 R_p 는 플라즈마 저항, R_a 는 안테나 저항이며, R_p 는 낮은 압력에서 비충돌 상황까지 고려된 2차원 전자

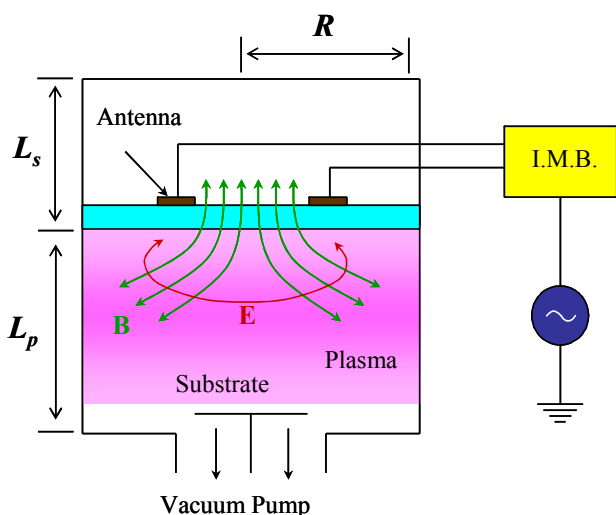


Fig. 1. Schematic diagram of the ICP discharge chamber.

가열 이론을 기반으로 계산되었다 [1].

2. 3 시뮬레이션 결과

Fig. 1은 ICP장치의 개략도이다. R = 25 cm, L_p = 10 cm, L_s = 40 cm의 원통형 반응로에서 시뮬레이션이 이루어졌고 가스 유입량은 Q_{o₂} = 50 SCCM, Q_{SiH₄} = 100 SCCM, Q_{Ar} = 100 SCCM이다.

2. 3. 1 압력 변화에 대한 의존성

Fig. 2는 1000 W의 파워에서 압력에 대한 중성 입자의 밀도 의존성을 나타내고 있다. 압력이 증가할수록 중성 입자 밀도가 증가함을 알 수 있고, 반응에서 H가 주된 중성 입자임을 알 수 있다. Fig. 3은 1000 W의 파워에서 압력 변화에 대한 하전입자 밀도 의존성을 나타내고 있다. 압력이 증가됨에 따라 Ar⁺와 SiH₃⁺의 밀도는 감소하지만 SiH⁺의 밀도는 증가함을 알 수 있어 반응에서 SiH⁺가 주된 입자임을 알 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 여러 파워에서 전자밀도와 전자 온도의 압력 의존성으로 압력이 증가 할수록 전자 밀도는 증가하고 전자 온도는 감소됨을 알 수 있다. 이는 일반적인 particle balance 관계와 잘 일치되는 것을 알 수 있다 [4].

Fig. 6과 7은 여러 파워에 대한 플라즈마 저항과 파워 흡수 계수의 압력 의존성을 나타낸다. 500 W의 파워에서

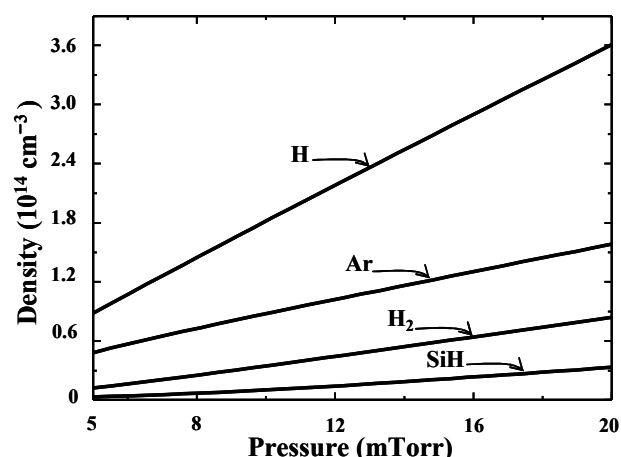


Fig. 2. Dependences of the neutral particles density on the pressure.

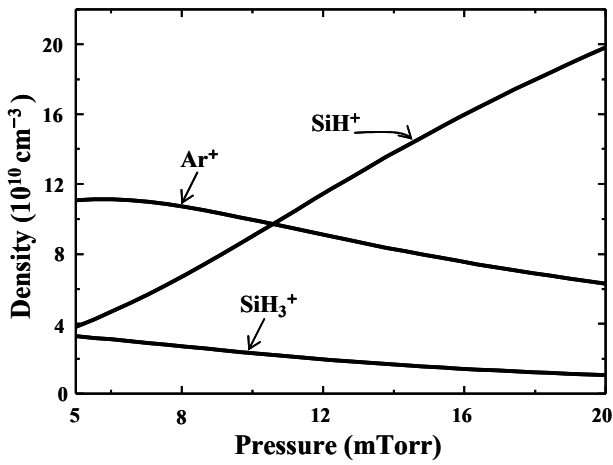


Fig. 3. Dependences of the charged particles density on the pressure.

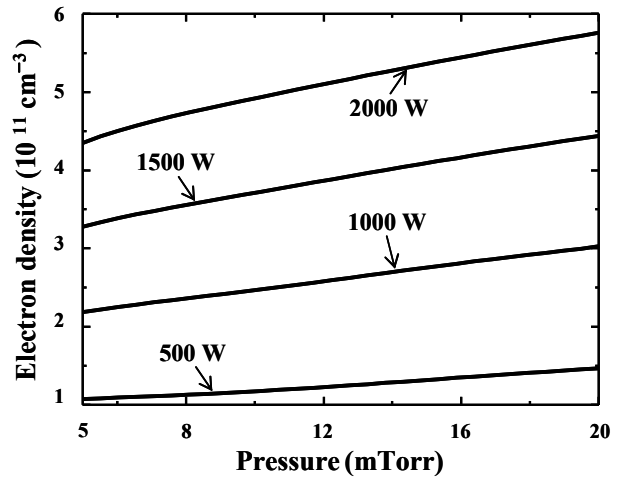


Fig. 4. Dependences of the electron density on the pressure for various values of the power.

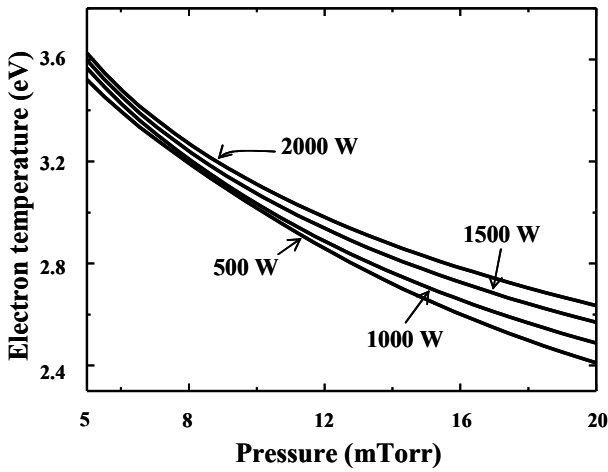


Fig. 5. Dependences of the electron temperature on the pressure for various values of the power.

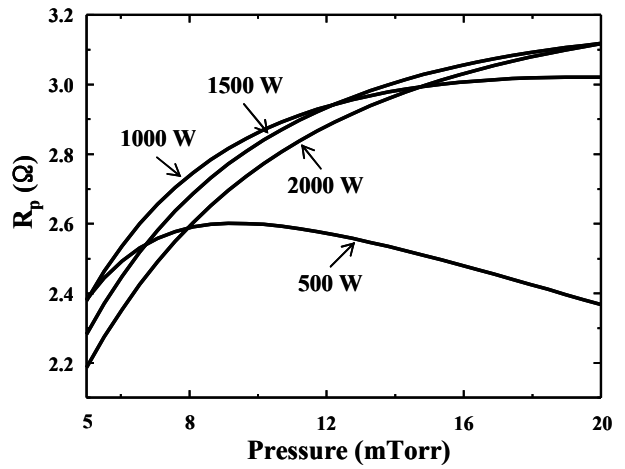


Fig. 6. Dependences of plasma resistance on the pressure for various values of the power.

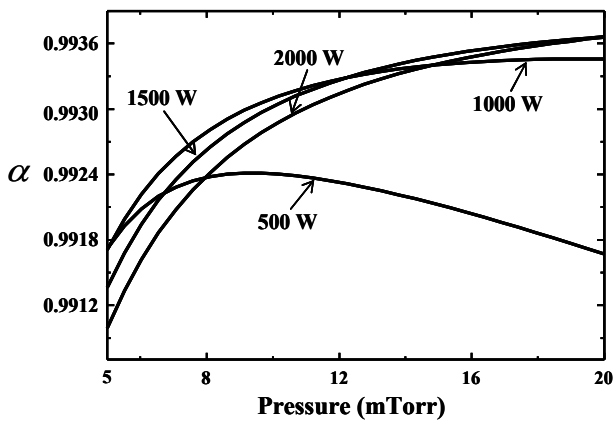


Fig. 7. Dependences of power absorption coefficient on the pressure for various values of the power.

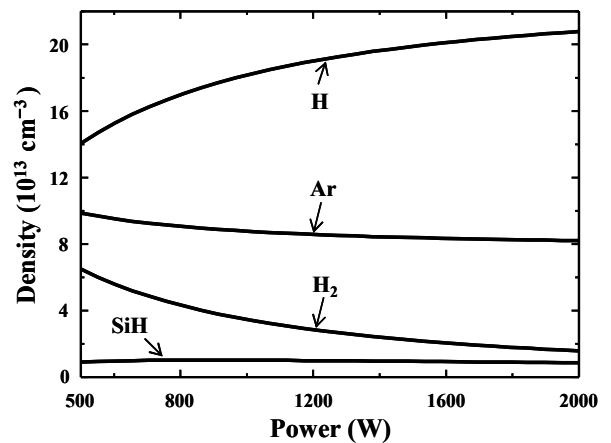


Fig. 8. Dependences of the neutral particles density on the power.

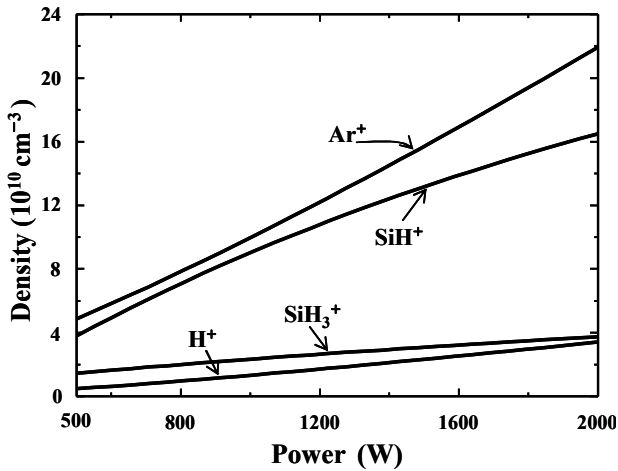


Fig. 9. Dependences of the charged particles density on the power.

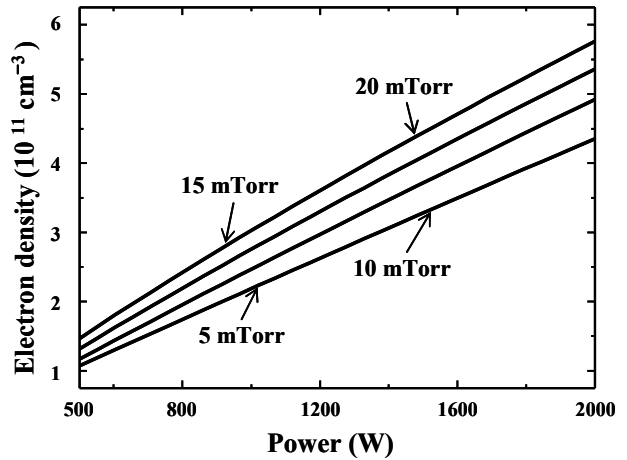


Fig. 10. Dependences of the electron density on the power for various values of the pressure.

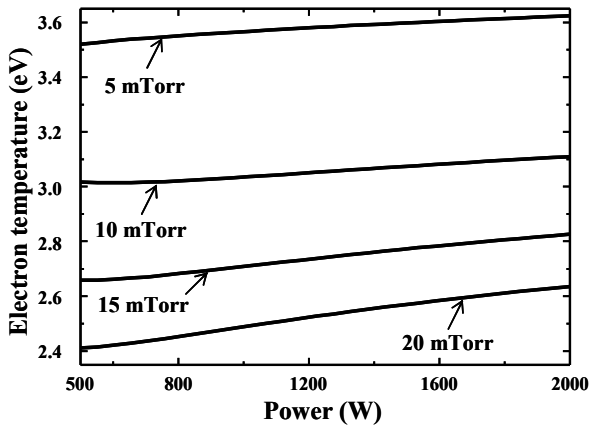


Fig. 11. Dependences of the electron temperature on the power for various values of the pressure.

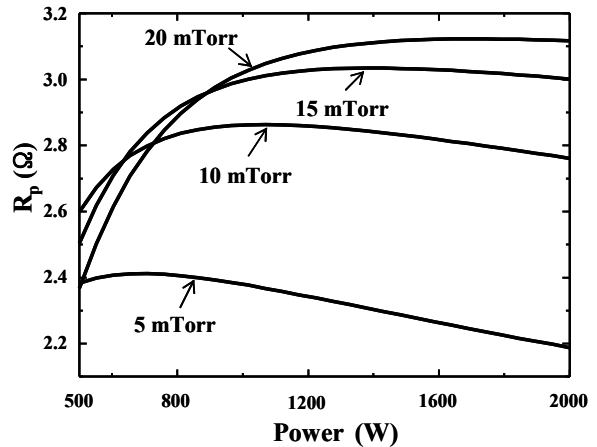


Fig. 12. Dependences of plasma resistance on the power for various values of the pressure.

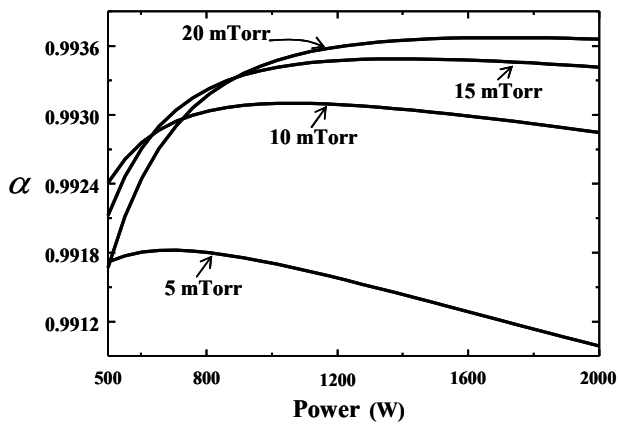


Fig. 13. Dependences of power absorption coefficient on the power for various values of the pressure.

는 압력이 증가할 때 플라즈마 저항이 증가하다가 감소하고 그 외의 파워에서는 증가하는 압력 의존성을 보이고 있다. 플라즈마 저항은 압력과 파워와 같은 외부변수와 전자 온도, 전자 밀도, 그리고 충돌 주파수와 같은 플라즈마 변수에 의존하는 함수인데 전자 온도, 전자 밀도, 그리고 충돌 주파수 또한 압력과 파워에 의존하는 함수이므로 Figs. 6과 7과 같은 비선형의 의존성을 보이는 것으로 판단된다.

2. 3. 2 파워 변화에 대한 의존성

Fig. 8과 9는 10 mTorr 압력에서 중성종 밀도와 주요 하전 입자 밀도의 파워 의존성으로, 중성종은 H, 하전입자는 Ar⁺와 SiH⁺반응의 주된 입자임을 알 수 있다. Figs. 10

과 11은 여러 압력에서 전자 밀도와 전자 온도의 파워 의존성으로, 파워가 증가 할수록 전자 밀도와 온도가 증가함을 알 수 있다.

Figs. 12와 13은 여러 파워에 대한 플라즈마 저항과 파워 흡수 계수의 파워 의존성으로 파워가 증가 할수록 플라즈마 저항과 파워 흡수 계수가 증가하다 감소함을 알 수 있다. 이는 2.3.1 절에서 언급했듯이 플라즈마 저항의 파워와 압력에 대한 비선형 의존성 때문인 것으로 판단된다.

III. 결 론

Anomalous skin effect를 고려한 파워 흡수 모델을 적용한 고밀도 유도 결합 플라즈마 장치의 SiH₄/O₂/Ar방전에 대한 공간 평균 시뮬레이터를 제작하였으며 RF-파워와 압력 변화에 대한 하전입자, 중성종의 밀도 변화 및 전자 온도 의존성을 계산하였다. 본 연구 결과를 바탕으로 (r, z) 2차원 시뮬레이터를 개발하는 연구, 개발 활동이 활발히 진행 중이다.

감사의 글

본 논문은 산업자원부가 지원하는 국가 반도체 연구개발 사업인 “시스템집적반도체기반기술개발사업 (시스템 IC2010)”을 통해 개발된 결과임을 밝힙니다.

참고문헌

[1] N. S. Yoon, S. M. Hwang and D. I. Choi, Phys.

Rev .E, **55**, 7536(1997).
 [2] N. S. Yoon, S. S. Kim, C. S. Chang and Duk-In Choi, J. Korean Phys Soc. **28**, 2, pp. 172(1995).
 [3] S. S. Kim, S. Hamaguchi, N. S. Yoon, C. S. Chang, Y. D. Lee and S. H. Ku, Physics of Plasmas, **8**, 1384(2001).
 [4] M. A. Lieberman and Lichtenberg A. J, *Principles of Plasma Discharges and Material Processing* (John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005), pp. 333-335.
 [5] E. Meeks, R. S. Larson, P. Ho, S. M. Han, E. Edelberg, E. Aydil, and C. Applett J. Vac. Sci. Technol. A **16**, 2, Mar(1998).
 [6] J. T. Gudmundsson, I. G. Kouznetsov, K. K Patel and M. A. Lieberman J. Phys. D Appl. Phys. **34**, 1100(2001).
 [7] M. Baeva, X. Luo, B Pflzer, T Repsilber and J. Uhlenbusch. Plasma Source Sci. Technol **9**, 128 (2000).
 [8] D. Shane Stafford and Mark J. Kushner J. Appl. phys., **96**, 51. Sep(2004).
 [9] Lee C and Liberman M A, J. Vac. Sci. Technol. A **13**, 368(1995).
 [10] T Kimura, A J Lichtenberg and M A Lieberman Plasma Source Sci. Technol. **10**(2001)430-439
 [11] 김형용, 윤남식, 권득철, 김정형, 정광화, 신용현, 한국 전기전자 재료학회(2005).
 [12] 김형용, 윤남식, 권득철, 한국 통신학회(2006).
 [13] 김형용, 민경민, 권득철, 윤남식, 대한전자공학회 및 대한전기학회 충북지회(2004).

Development of High Density Inductively Coupled Plasma Sources for SiH₄/O₂/Ar Discharge

S. H. Bae, D. C. Kwon, and N. S. Yoon

School of Electrical and Electronic Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763

(Received July 7 2008, Revised September 10 2008, Accepted September 12 2008)

A space averaged SiH₄/O₂/Ar simulator for the high density inductively coupled plasma sources for SiH₄/O₂/Ar discharge is developed. The developed simulator uses space averaged fluid equations for electrons, positive ions, negative ions, neutral species, and radicals in SiH₄/O₂/Ar plasma discharge, and the electron heating model including the anomalous skin effect. Using the developed simulator, the dependency of the density of charged particles, neutral particles, and radicals, the electron temperature, the plasma resistance, and the power absorption coefficient for the RF power and pressure is calculated.

Keywords : High density inductively coupled plasma sources, Space averaged, Anomalous skin effect

* [E-mail] nsyoon@chungbuk.ac.kr