

반도체 Ash 공정용 PWM 제어 Plasma 발생방법

이정호, 최대규, 최상돈, 이병국*, 원충연*, 김수석**
 뉴파워플라즈마, 성균관대학교*, 서울산업대학교**

Plasma Generation Method using PWM Control for Ash Process

Joung-Ho Lee, Dae-Kyu Choi, Sang-Don Choi,
 Byoung-Kuk Lee*, Chung-Yuen Won*, Soo-Seok Kim**
 New Power Plasma Co., Sung Kyun Kwan Univ.*, Seoul National Univ. of Technology**

ABSTRACT

This dissertation discusses about a ferrite core plasma source using low operating frequency without sputtering problem by the stored electric field. Compared with the conventional RF power system with 13.56MHz switching frequency, the proposed plasma power system is only separated at 400kHz, so that it makes possible to use of low cost switching elements, PWM control and soft switching. Moreover, it could improve the coupling efficiency for plasma and antenna by using the ferrite core in order to transfer the energy of the load. This dissertation tried to analyze new plasma generation method for the plasma generation system by modeling the plasma load and grafting the concept of impedance matching in order to interpret it with the formula. This dissertation verified the ferrite core inductive coupling plasma source authorized for 400kHz of low frequency power by applying to the semi-conductor ash process thru the measurement of ash capacity and uniformed plasma distribution on the actual wafer.

1. 서론

반도체 공정에서 Ash 공정은 반도체 제조공정 중에서 건식 식각 공정의 일부분으로 구분되며 건식식각 공정은 웨이퍼 또는 웨이퍼 위에 증착된 박막을 선택적으로 제거함으로써 원하는 형태의 초미세 구조물을 형성하는데 사용되는 기술을 말한다. 웨이퍼 패턴을 만들 경우 Mask와 PR등으로 패턴을 형성하고 이 과정에서 원래 제거하려 하는 막을 식각하는 것이 Etch이고 Ash는 PR 제거의 목적을 가지고 있다. 현재 반도체 기술은 소자의 고집적화와 고속화를 위한 미세화와 더불어 생산성 향상을 위한 대면적 Wafer를 사용하는 방향으로 발전하고 있다. 이에 보다 세밀한 공정 수행이 가능한 대면적 고밀도 유도결합 플라즈마 발생장치에 대한 연구개발이 요구되고 있다.^[1]

본 논문에서는 기존의 플라즈마 발생방법에 비해 축전 전기장에 의한 Sputtering 문제가 거의 없고 저가의 스위칭 소자의 사용이 가능하고 페라이트 코어를 이용한 플라즈마 발생장치에 대한 기술이다. 본 논문에서 제안한 플라즈마 발생장치는 RF

전원장치와 페라이트 코어를 이용한 플라즈마 발생 챔버로 구성되어 있다. RF 전원장치는 기존의 13.56MHz 전원장치에 비하여 400kHz의 낮은 운전 주파수를 사용함으로써 PWM 제어 및 소프트 스위칭을 가능하게 하고 또한 페라이트 코어를 사용함으로써 플라즈마와 전원장치의 결합 효율을 향상시키고자 한다. 페라이트 코어에 의한 자기 결합과 유도 전기장의 페루프 형성으로 전기장을 유도하여 강력한 플라즈마를 발생시킬 수 있다. 발생된 고밀도 플라즈마를 반도체 Ash 공정장비에 적용하여 실제 웨이퍼 상에서의 Ash 공정능력을 확인하고자 하려는 플라즈마 부하에서의 400kHz 고주파 전원장치의 안정적인 동작과 페라이트 코어를 사용한 새로운 유도결합 플라즈마 발생방법의 유효성을 입증하기 위함이다.

2. 플라즈마 발생 시스템 구성

반도체 Ash 공정용 플라즈마 발생 시스템은 그림 1과 같이 400kHz 고주파 발생기, 임피던스 정합기, 페라이트 코어를 사용한 유도결합 플라즈마원과 프로세스 챔버로 구성된다.

본 논문에서는 유도결합 플라즈마 부하에서도 안정적으로 영전압 스위칭으로 400kHz 고주파 전력을 출력하는 출력장치와 임피던스 정합기 및 페라이트 코어 유도결합 플라즈마의 방전 모델을 결합하여 전기적으로 유도하므로써 상호 관계성을 수식적으로 해석하여 반도체 Ash 공정용 플라즈마 발생방법을 제안하고자 한다.

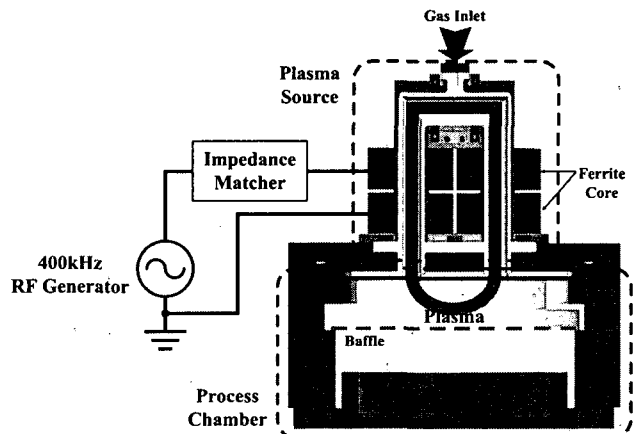


그림 1 반도체 Ash 공정용 플라즈마 발생 시스템
 Fig. 1 Semiconductor Ash Process Plasma System

2.1 페라이트 유도결합 플라즈마 방전 모델

평판형 유도결합 플라즈마 방전 모델은 그림 2의 공심변압기의 2차코일로 표현할 수 있다. 유도결합 플라즈마 방전을 위한 전극은 공심 변압기의 1차로 표현되었고 n턴의 인덕턴스 L_0 와 저항 R_0 로 표현하였다. 이때 Q factor는 $Q = \omega L_0 / R_0$ 이다. 실효치 V_i , 주파수 ω 의 RF 전압이 변압기 1차 권선에 공급되면 1턴으로 구성된 인덕턴스 L_2 와 플라즈마 저항 R_2 의 2차 권선에서 플라즈마 방전이 발생한다.^[2]

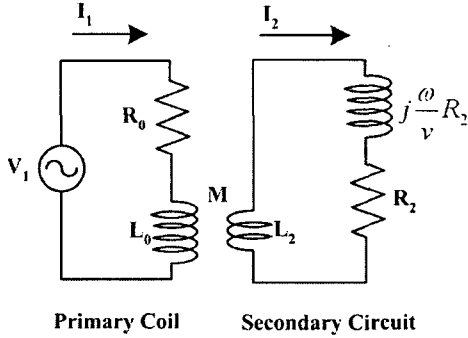


그림 2 공심 변압기 2차코일로 표현한 유도결합 플라즈마 방전 모델
Fig. 2 ICP discharge model as the secondary coil of air gap transformer

페라이트 코어 유도결합 플라즈마는 기존 유도결합 플라즈마 안테나에 강자성체인 페라이트 코어를 설치하여 플라즈마와 안테나와의 결합도를 높이었다.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

식 (1)에서 자기장 H는 안테나에 흐르는 전류(J_a)에만 비례하므로 유도되는 전기장($E \propto \mu \omega J_a$)은 구동 주파수와 상대 투자율에 비례함을 알 수 있다. 페라이트 코어 유도결합 플라즈마의 경우 구동 주파수가 낮기 때문에 유도 전기장이 약해지지만 상대 투자율이 높은 페라이트를 사용하면 같은 전류에 대해서 고주파에서 보다 훨씬 더 큰 전기장을 만들 수 있다. 보통의 페라이트 투자율은 1,000이상의 값을 갖는다. 그러므로 플라즈마를 발생시키는데 필요한 전기장은 거의 일정하므로 훨씬 낮은 전류에서도 플라즈마를 유지할 수 있게 되어 안테나에서 소모되는 고주파 전력도 동시에 급격히 줄일 수 있는 장점이 있다.

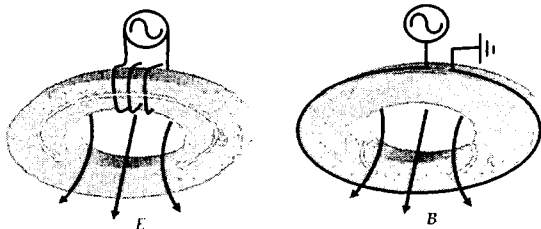


그림 3 페라이트 코어 유도결합 플라즈마 안테나 구성도
Fig. 3 Ferrite core ICP antenna constitution diagram

페라이트 코어에 안테나를 감는 방법은 그림 3과 같이 코어 측면을 따라 감는 것과 코어 안쪽으로 감는 방법이 있으며 본문에서는 그림 4와 같이 두 개의 페라이트에 의해 유도 전기장과 자기장이 발생하도록 안쪽으로 감는 방법을 적용하였다.

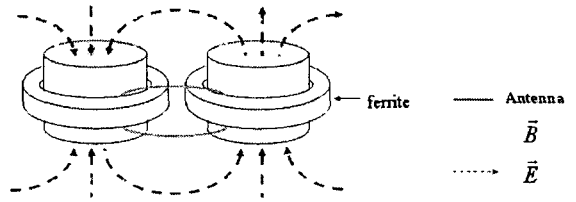


그림 4 두개의 페라이트를 이용한 페라이트 코어 유도결합 플라즈마
Fig. 4 Ferrite core ICP using two ferrite

그림 2의 방전모델에서 2차회로를 1차회로 전류향으로 표현하고 누설 인덕턴스를 고려한 변압기 등가회로를 결합하면 그림 5와 같은 페라이트 코어 유도결합 플라즈마 방전 모델을 얻을 수 있다.

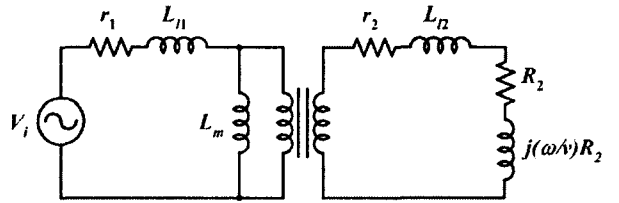


그림 5 페라이트 유도결합 플라즈마 방전 모델
Fig. 5 ICP discharge model as the ferrite transformer

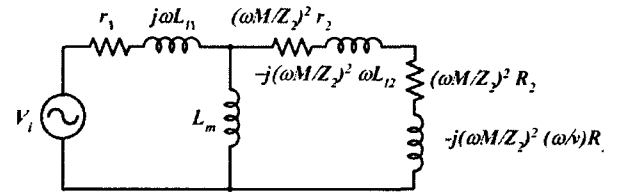


그림 6 2차 회로를 1차회로 항으로 표현한 페라이트 유도결합 플라즈마 방전 모델
Fig. 6 The secondary circuit has been transformed into a terms of the primary circuit

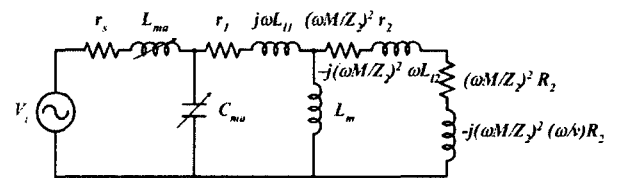


그림 7 정합회로를 고려할 경우 2차 회로를 1차회로항으로 표현한 유도결합 플라즈마 방전 모델
Fig. 7 The secondary circuit has been transformed into a terms of the primary circuit with impedance matching circuit

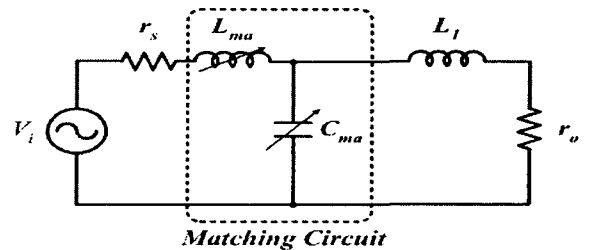


그림 8 정합회로를 고려할 경우 유도결합 플라즈마 방전 모델
Fig. 8 The ICP model with matching circuit

그림 5에서 2차측을 1차측으로 환산하면 그림 6과 같이 유도되며 임피던스 정합회로 정수 L_{ma} 와 C_{ma} 를 회로에 적용하면 그림 7과 같이 표현할 수 있다. 그림 8은 임피던스 정합회로를 고려한 페라이트 코어 유도결합 플라즈마의 방전모델이며 수식 (2), 수식 (3)과 같이 수식적으로 해석된다.

$$r_o = r_1 + \frac{\omega^2 k^2 L_{11} L_{12} r_2}{Z_2^2} + \frac{\omega^2 k^2 L_{11} L_{12} R_2}{Z_2^2} \quad (2)$$

$$L_1 = L_{11} - \frac{\omega k^2 L_{11} L_{12}}{Z_2^2} [\omega L_{12} + (\omega/\nu) R_2] \quad (3)$$

여기서 $M^2 = k^2 L_{11} L_{12}$, $Z_2^2 = [\omega L_{12} + (\omega/\nu) R_2]^2 + R_2^2$, k 는 결합 계수이다. 그림 8의 회로를 회로 해석하여 정리하면 식 (4)와 식 (5)와 같이 400kHz 운전 주파수에서 전리 r_s 와 부하 r_o 정합을 위한 정합기 회로정수의 유도가 가능하다.

$$C_{ma} = \frac{L_1 \pm [L_1^2 - (L_1^2 + r_o^2)(1 - r_o)]^{1/2}}{L_1^2 + r_o^2} \quad (4)$$

$$L_{ma} = \frac{C_{ma}(L_1^2 + r_o^2) - L_1}{(L_1 C_{ma} - 1)^2 + r_o^2 C_{ma}^2} \quad (5)$$

2.2 플라즈마 발생을 위한 전력회로

페라이트 코어 유도결합 플라즈마 발생을 위해서는 고출력의 고주파 전원장치가 요구되며 국내 산업계에서는 플라즈마 부하에서 안정적인 고주파 출력을 얻기 위하여 대용량 변압기 채용 직류 정류방식 컨버터부와 고주파 전력소자를 채용한 인버터부의 2단 구성을 사용하고 있으나 이는 전력효율이 현저히 떨어지는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 범용 전력소자를 사용한 인버터 1단구성을 통하여 플라즈마 부하에서도 안정적인 영전압 스위칭으로 운전되는 고주파 전력 변환 장치를 제안하고자 한다. 주 전력회로는 하프 브리지 PWM 인버터로 구성되어 있으며 2개의 주스위치 모두 영전압 스위칭으로 동작한다. 그림 9는 플라즈마 발생을 위해 요구되는 400kHz 고주파 전원 공급을 위한 고주파 출력장치의 구성도를 나타내었다.

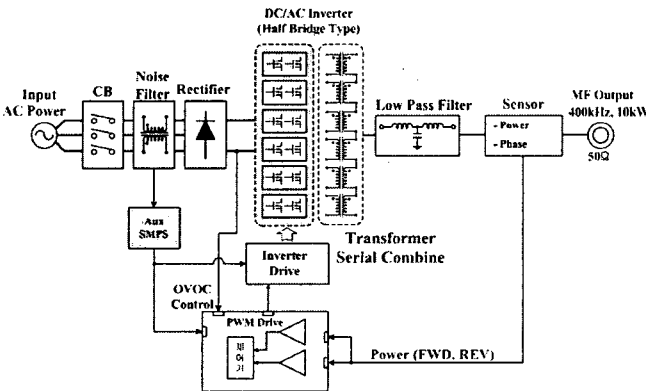


그림 9 400kHz 고주파 발생장치 구성도
Fig. 9 400kHz RF generator circuit block diagram

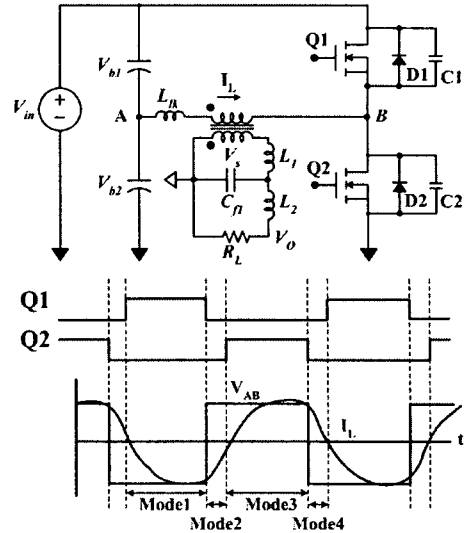


그림 10 하프 브리지 방식 인버터 전력 회로부
Fig. 10 Half bridge type power stage circuit using half bridge topology

그림 10은 4가지 모드로 동작되는 하프 브리지 인버터 전력 회로부로서 영전압 스위칭을 위한 변압기 1차측 전압 파형 V_{AB} 와 전류 파형 I_L 를 나타내었다.^[3] 인버터의 출력은 스위치 Q1, Q2의 게이트 신호의 시비를 변화시킴으로 제어할 수 있다 [5]. 그림 11은 설계·제작된 400kHz 10kW 고주파 출력 장치 내부외형이다.

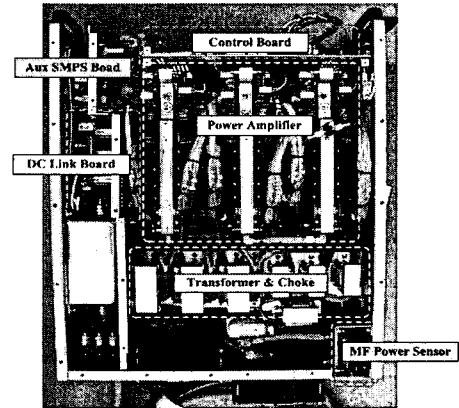


그림 11 400kHz 고주파 발생장치
Fig. 11 400kHz RF generator circuit block diagram

3. 실험 및 결과분석

플라즈마 Ash 공정용 플라즈마 발생장치의 성능을 검증하기 위하여 그림 11의 고주파 발생장치의 고주파 출력을 그림 12와 같이 구성된 페라이트 코어 유도결합 플라즈마 발생장치에 연결하여 플라즈마 발생실험을 진행하였다.

하프 브리지 방식 전력 회로부로 구성된 플라즈마 고주파 출력장치의 챔버 실험은 6.5kW 고주파 출력상태에서 특성 실험을 수행하였다. 그림 13은 모의실험 파형으로 주 스위치 Q1의 전압파형과 전류의 파형을 나타내었고 그림 14는 주 스위치 Q1의 전압파형과 전류의 실험파형을 나타내었다. 이 전압 전류 파형을 통하여 플라즈마 부하 상태에서도 안정적인 영전압 스위칭이 이루어짐을 확인 할 수 있다. 그림 15는 모의실험 파형

으로 고주파 출력 전압파형이며 그림 16은 고주파 출력 전압 실험파형을 나타내었다.

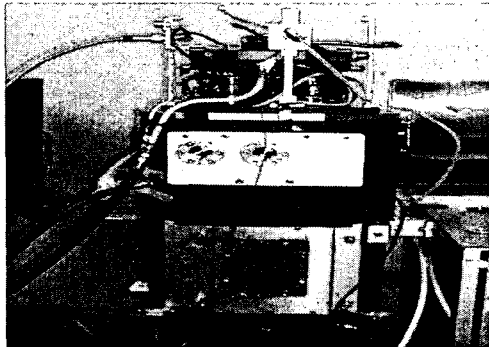


그림 12 플라즈마 발생 장치
Fig. 12 Plasma Generate System

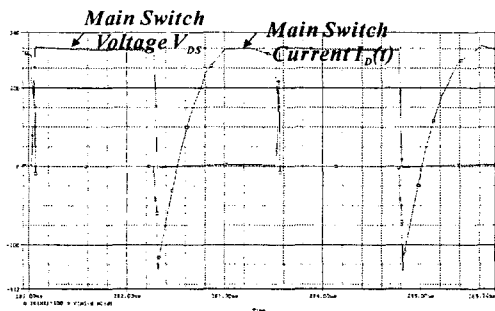


그림 13 스위치 Q1의 전압, 전류 모의실험 파형
Fig. 13 Voltage and current simulation wave forms of main switch Q1 [1 μ sec/Div]

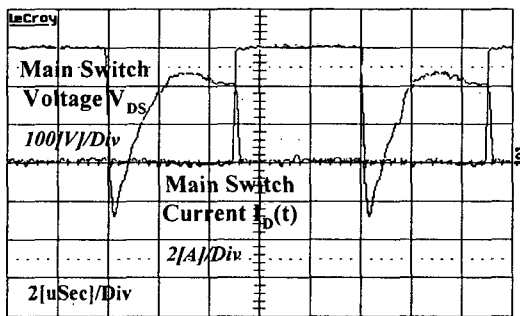


그림 14 스위치 Q1의 전압, 전류 실험 파형
Fig. 14 Experimental voltage and current wave forms of main switch Q1

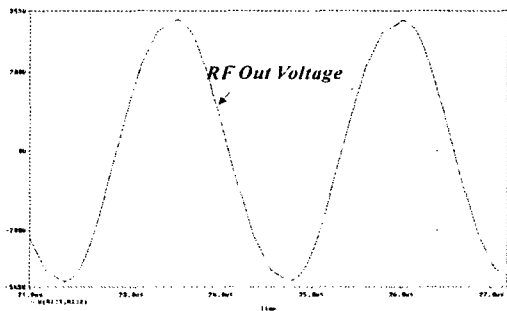


그림 15 고주파 출력 전압 모의실험 파형
Fig. 15 Simulation output voltage waveform of radio frequency supply

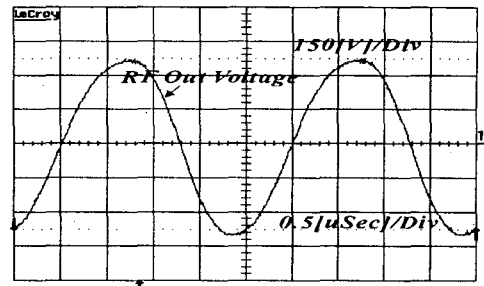


그림 16 하프브리지 방식 플라즈마 전원 시스템의 출력 전압 실험 파형 [0.5 μ sec/Div]
Fig. 16 Experimental output waveform of Plasma Power Supply using Half Bridge Topology. [0.5 μ sec/Div]

아르곤 (Ar) 가스를 사용하여 챔버 압력을 변화시키면서 플라즈마 특성을 확인하였다. 페라이트 유도결합 플라즈마 경우 역률이 거의 1에 가깝기 때문에 같은 고주파 전력에 대해서 전류와 전압이 기존 유도결합 플라즈마의 1/10이 될 수 있는 것이다. 그림 17에서 입력 전력이 증가함에 따라 역률이 크게 감소하는 것을 볼 수 있지만, 여전히 0.8 이상의 높은 값을 나타낼 수 있으며, 임피던스 정합에 사용된 변압기의 권선비를 조정하면 역률 또한 조정될 수 있음을 실험을 통해 알 수 있었다.^[4]

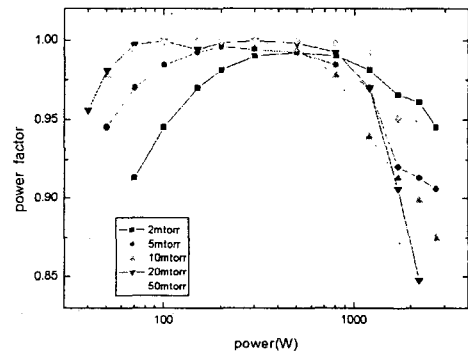


그림 17 440kHz 페라이트 유도결합 플라즈마의 역률
Fig. 17 Power Factor of 400kHz Ferrite Core ICP

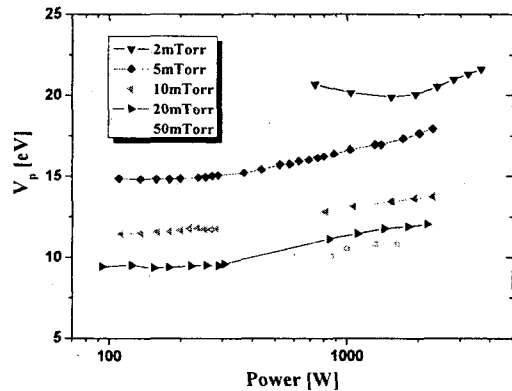


그림 18 400kHz 페라이트 유도결합 플라즈마의 플라즈마 전위
Fig. 18 Plasma Electric Potential of 400kHz Ferrite Core ICP

그림 18은 측정된 압력과 입력 전력에 따른 플라즈마 전위 변화를 나타낸다. 페라이트 유도결합 플라즈마의 경우 압력이 mTorr 단위에서는 기존 유도결합 플라즈마에 비해 약 7~8V 정도 낮은 수준이며, 압력이 높아질수록 약 절반 수준으로 떨어지는 것을 볼 수 있었다. 낮은 플라즈마 전위는 쉬스 양단의 전위차가 낮은 것을 의미하고, 이는 이온의 손실 에너지를 감소시켜 플라즈마의 밀도가 높아지는 결과를 갖는다.

그림 19는 200mm 실리콘 웨이퍼 Ash Rate 시험을 위한 웨이퍼 및 측정을 위한 13 포인트 위치로서 O2 350sccm, N2 250sccm, 2.5Torr 조건에서 실시하였으며 시험 결과 평균 245.675 A/min의 공정적용 Ash Rate를 측정하였다. 이는 400kHz의 전원을 인가하여 페라이트 코어에 의해 형성된 유도결합에 의하여 발생된 고밀도 플라즈마 형성에 의한 것으로 60,000~70,000 A/min의 기존 유도결합 플라즈마 발생방법에 비해 3배 이상의 우수한 결과를 얻을 수 있었다.^[5]

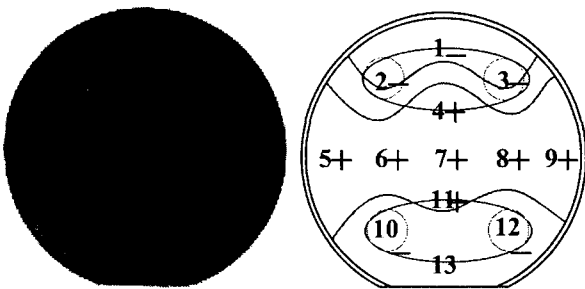


그림 19 Ash Rate 시험 웨이퍼 및 측정 포인트
Fig. 19 Experiment Wafer & Test Point

4. 결 론

본 논문에서는 기존의 방식에 비해 축전 전기장에 의한 스퍼터링 문제가 거의 없고 낮은 운전 주파수를 이용한 페라이트 코어 플라즈마 발생방식에 대하여 논하였다. 본 논문에서 제안한 플라즈마 전원장치는 기존의 13.56MHz의 RF 전원 장치에 비하여 400kHz의 운전 주파수를 사용함으로써 저가의 스위칭 소자를 이용한 PWM 제어 및 소프트 스위칭을 가능하게 하고 부하로의 에너지 전달을 위해 페라이트 코어를 사용함으로써 플라즈마와 전자기장의 결합 효율을 향상시킬 수가 있었다. 페라이트 코어에 의한 강한 자기결합과 유도 전기장의 페루프 형성으로 인해 플라즈마 내에 강한 전기장을 유도하여 플라즈마 생성의 효율을 높일 수 있었다. 안테나 전압이 기존 13.56MHz의 유도결합 플라즈마에 비해 1/10 수준으로 낮아서 기존 유도결합 플라즈마가 가지고 있는 유전체 스퍼터링 문제가 없음을 확인하였다.

한편 기존의 13.56MHz 유도결합 플라즈마 발생방법은 플라즈마와 안테나 사이에 절연체가 존재하는 구조로서 안테나에 걸리는 전압이 B-Field 이외에 접지축을 향한 전계가 존재하며 이로 인해 양질의 플라즈마 재현성 문제를 야기 시킨다. 본 논문에서 제안한 페라이트 코어 유도결합 플라즈마 발생방법은 페라이트 코어의 1차측 권선과 플라즈마 사이가 페라이트 코어가 존재하는 절연된 에너지 전달 구조로서 전기적으로 확실한 절연을 유지할 수가 있다. 이는 챔버 형상에 관계없는 독립적인 플라즈마를 발생시키므로 플라즈마의 높은 재현성을 확보하였다.

챔버 제작에 유전체를 사용하지 않고 모든 부분을 금속으로 제작할 수 있어서 고열에도 잘 견딜 수 있고, 특히 진공 시에 세라믹관이나 석영관으로 제작할 수밖에 없는 기존 ICP의 한계를 넘어 전기적인 차폐효과와 진공압력에 견딜 수 있는 범위를 크게 향상 시켰으며, 대면적화 하기가 편리하다는 장점이 있다. 안테나 냉각 장치가 따로 없다는 점, 저주파 신호의 파장이 길어 전압과 전류의 위상차가 거의 없어 역률도 아주 높다는 점도 장점으로 들 수 있다. 이에 따라 다음과 같은 연구 결과를 얻었다.

(1) 플라즈마 발생 시스템의 새로운 플라즈마 발생 방식을 수식적으로 해석하고자 플라즈마 부하를 모델링하고 임피던스 정합 개념을 접목하여 해석하였다.

(2) 본 논문에서 제안된 페라이트 코어 유도결합 플라즈마 발생방법은 일반적인 유도결합 플라즈마 발생방법과 비교하여 플라즈마 전위, 역률 면에서 제안된 발생방법의 우수성을 실험을 통하여 입증하였다.

(3) 400kHz 저주파 전력을 인가한 페라이트 코어 유도결합 플라즈마 발생기를 반도체 Ash 공정에 적용하여 실제 웨이퍼 상에서의 Ash 능력과 플라즈마 균일도 측정을 통해 확인하였다.

이 논문은 시스템 집적 반도체 기반기술개발사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] Dae-Kyu Choi, Soo-Seok Kim, "The Development of Low Frequency RF Generator for Dry Scrubber", ICOPS 2003 1E07, PP140, 2003, Jun.
- [2] R. B. Piejak, V. A. Godyak, and B. M. Alexandrobich, "A simple analysis of an inductive RF discharge", Plasma Sources Sci. Technol 1, pp. 179-186, 1992.
- [3] J.A Sabate, F.C.Lee, "Zero-Voltage Switching With Fixed-Frequency Clamped-Mode Resonant Converters", Proceeding of the VPEC, pp.83-91, 1989, September.
- [4] V. A. Godyak, R. B. Piejak, and B. M. Alexandrobich, "Experimental setup and electrical characteristics of an inductively coupled plasma", 1998.
- [5] Dae-Kyu Choi, " A Study on the Plasma Generation Method using PWM Control for Ash Process", A doctoral dissertation, 2005.