

論文94-31A-2-11

## 적외선 레이저의 간섭현상을 이용한 실리콘 웨이퍼의 온도 측정

## (Monitoring of Silicon Wafer Temperature by IR Laser Interferometry)

金在聲\*, 李皙賢\*, 黃琪雄\*

(Jae Seong Kim, Seok Hyun Lee and Ki Woong Whang)

## 要約

적외선 He-Ne 레이저(파장  $1.15\mu\text{m}$ )를 웨이퍼에 수직으로 입사시켜 반사된 빛의 간섭현상을 이용하여 ECR 저온 식각시 웨이퍼의 온도변화를 측정하였다. 실험변수로 RF 바이어스 전력과 초고주파 전력을 변화시키면서 각각의 경우 온도변화를 측정하였으며, RF 바이어스 전력과 초고주파 전력이 높은 경우 상당한 온도 상승을 관측하였다. 따라서, 플라즈마로 인한 웨이퍼 온도상승을 억제하기 위해서는 그에 적절한 기관 냉각이 필요함을 확인하였다.

## Abstract

We used IR laser interferometric technique for measuring the temperature of wafer during cryogenic ECR etching. Using this technique, the effect of RF bias power and microwave power on the wafer temperature during etching period is investigated. As the RF bias power and microwave power was increased, the temperature of the wafer considerably increased and we concluded that to prevent the increase of substrate temperature during etching period, an adequate wafer cooling is needed.

## 1. 서론

반도체 제조공정에서 웨이퍼온도는 반응에 가장 큰 영향을 끼치는 변수 중 하나이다. 그러나 실제로 웨이퍼의 온도는 관측과 제어가 용이하지 않다. 특히, 식각공정에서 웨이퍼온도는 식각속도, 비등방도 및 마스크 손상 등에 영향을 준다. 또한 최근에는 웨이퍼

의 온도를 낮추는 저온식각에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 이는 기관온도를 낮춤으로써 측벽의 식각반응을 억제하여 비등방식각을 얻는 방법으로, 그 결과가 좋은 것으로 보고되고 있다.<sup>1,2</sup> 이와 같은 경우 식각 중에 초기의 저온을 유지하는 것이 중요하다. 그러나 식각중에 플라즈마로 인한 웨이퍼의 온도상승은 상당한 것으로 추측하고 있다. 하지만 지금까지 그 정확한 값을 측정하지 못하였다.

지금 현재 쓰여지고 있는 웨이퍼온도 측정장치로는 thermocouple, fluoro optic probe,<sup>3</sup> IR laser interferometry 방법 등이 있다. 이중 thermocouple을

\* 正會員, 서울大學校 電氣工學科  
(Dept. of Elec. Eng., Seoul Nat'l Univ.)  
接受日字: 1993年 1月 20日

이용한 온도측정은 장치에 가해주는 RF 전력의 영향을 심하게 받고, fluoro optic probe방법도 웨이퍼에 센서 물질을 입혀서 실험하는 것으로 오염의 가능성이 있다. 이에 반해 IR laser interferometry방법은 웨이퍼와 직접적인 접촉이 없이 간접적으로 온도를 측정하는 방법으로 공정중 웨이퍼온도 측정용으로 가장 적합하다. <sup>5-10</sup> 이에 본 논문에서는 IR laser interferometry방법을 ECR저온식각 실험에 적용하여 식각 중 플라즈마로 인한 웨이퍼 온도변화를 관찰하였고, 이에 대한 대책을 논의하였다. 이는 웨이퍼 온도가 식각특성에 미치는 영향을 연구하는데 상당한 도움을 줄 것으로 기대된다.

또한 이 IR laser interferometry방법은 이제까지 주로 박막증착공정시 정확한 기판온도측정에 쓰여져 왔는데, 본 논문에서는 식각공정에 이 측정법을 이용함으로써 새로운 적용으로 의의가 있다.

### II. 이론

그림 1에서와 같이 두께가 일정한 물질에 빛을 조사하면 윗면에서 반사된 빛과 아래면에서 반사된 빛 사이에는 경로차가 생기게 된다. 온도가 일정하면 경로차( $\lambda'$ )는 일정하다. 그러나 굴절율( $n$ )과 두께( $d$ )가 온도에 따라 변하므로 온도가 증가(혹은 감소)함에 따라서 경로차( $\lambda'$ )는 변하여 상쇄,보강간섭을 일으킨다. 이때, 간섭현상에 상응하는 fringe가 그림2와 같이 생겨난다. fringe의 개수와 온도변화와의 관계는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda' = f(d, n) = 2nd \cos \theta, \quad (1)$$

여기서,

$\lambda'$  : 경로차 (optical path length difference)

$d$  : 두께 (=  $d_0(1 + \alpha T)$ )

$n$  : 굴절율 (=  $n_0(1 + \beta T)$ )

$d_0$  : 기준온도에서의 웨이퍼 두께

$n_0$  : 기준온도에서의 웨이퍼 굴절율

$\alpha$  : 두께의 온도계수

$\beta$  : 굴절율의 온도계수

이다.

$\alpha, \beta$  를 상수라 가정하면(실제로는 온도의 함수:  $\alpha(T), \beta(T)$ ) 온도변화로 인해 생긴 굴절율과 두께의 변화를, 그리고 경로차의 변화율은 각각 다음과 같다.

$$\Delta d = d_0 \alpha \Delta T, \quad \Delta n = n_0 \beta \Delta T \quad (2)$$

$$\Delta \lambda' = 2n_0 d_0 \cos \theta \left( \frac{1}{n_0} \Delta n + \frac{1}{d_0} \Delta d \right) \quad (3)$$

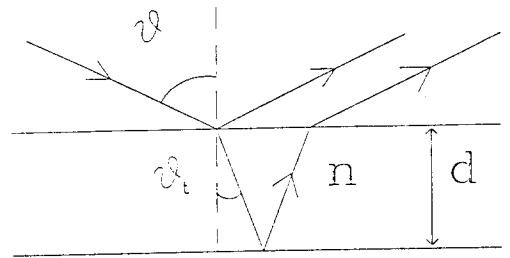


그림 1. 양면 가공된 웨이퍼의 반사와 투과한 빛의 간섭형태

Fig. 1. Interference geometry of reflection for a wafer polished on both sides.

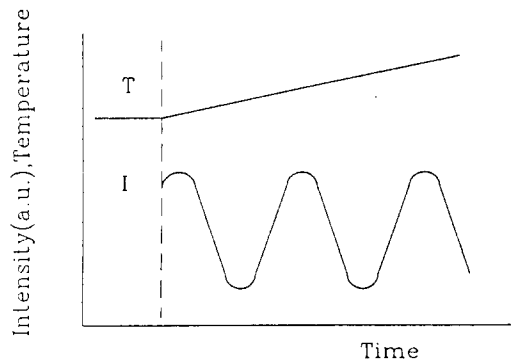


그림 2. 온도변화에 따른 간섭무늬의 개략도

Fig. 2. Schematic diagram of IR interferometric thermometry.

따라서, fringe의 개수 N은 다음과 같다.

$$N = \frac{\Delta \lambda'}{\lambda} = \frac{2n_0 d_0 \cos \theta}{\lambda} \left( \frac{\Delta n}{n_0} + \frac{\Delta d}{d_0} \right) = \frac{2n_0 d_0 \cos \theta}{\lambda} (\alpha + \beta) \Delta T \quad (4)$$

위 식을  $\Delta T = kN$  로 나타내면, k는 다음과 같다.

$$k = \frac{\lambda}{2n_0 d_0 \cos \theta (\alpha + \beta)} \quad (5)$$

위의 식 (5)에서 볼 수 있듯이  $\alpha, \beta$  가 상수이면 k는 상수로  $\Delta T = kN$ 에서 fringe의 개수 N으로부터 온도변화를 구할 수 있다. 그러나 실제로는  $\alpha, \beta$  가 온도의 함수이므로 식 (5)를 이용하기 위해서는  $\alpha(T), \beta(T)$ 를 알아야 한다. 그러나  $\beta(T)$ 에 대해서 우리가 사용한 파장과 온도범위( $\lambda = 1.15 \mu m, T = 150 \sim 100^\circ C$ )의 자료가 알려져 있지 않으므로, 식 (5)를 이용할 수 없다. 따라서 본 실험에서는 보정(calibration)데이터를 사용하여 온도변화량을 계산

하였다. 참고로 T = 300 K 일 때 Si, GaAs, InP 의  $\alpha, \beta$  값을 표 1에 나타내었다. 표 1에서 알 수 있듯이 온도에 따른 두께의 변화보다는 굴절률의 변화가 fringe수의 변화에 더 큰 영향을 끼침을 알 수 있다.

표 1. Si, GaAs, InP의  $\alpha, \beta$  값  
Table 1.  $\alpha, \beta$  of Si, GaAs, InP.

	$\alpha$	$\beta$
Si	$2.6 \times 10^{-6}$	$3.9 \times 10^{-5}$
GaAs	$5.7 \times 10^{-6}$	$4.5 \times 10^{-5}$
InP	$6.0 \times 10^{-6}$	$2.7 \times 10^{-5}$

Ⅲ. 실험장치 및 방법

실험에 쓰인 ECR 장비와 온도 측정 장치의 개략도는 그림 3과 같다. 이 ECR 시스템은 이전에 발표한 것과 같으며<sup>[3]</sup>, 반응 가스는 SF<sub>6</sub> 가스를 사용하였다. 특히 저온 식각을 위해서 전극을 액체 질소로 냉각하였고, 기판과 전극 사이에 He 가스를 흘려주어 기판 냉각을 수행하였다. 적외선 He-Ne 레이저(PMS model, 파장 1.15  $\mu$ m)에서 나온 빛을 기판에 수직으로 입사되게 하였으며, 기판에서 반사된 빛은 Photo-Detector(Germanium Photo Diode, EG&G)에서 받아들여 OP-Amp로 증폭한 후 PC에 인터페이스하였다. Thermocouple을 기판에 부착하여 웨이퍼의 초기 온도를 측정하였고, 웨이퍼는 아래면에서의 반사를 좋게 하기 위하여 양면이 가공된 실리콘 웨이퍼(p-type <100>, Resistivity 22-38  $\Omega$ -cm, 두께 0.5 mm)를 사용하였다. 실험 조건은 압력  $1 \times 10^{-4}$

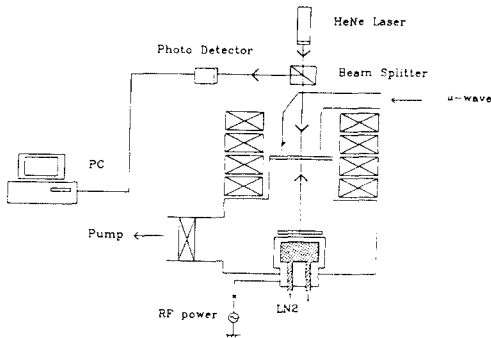


그림 3. 저온 ECR 장치 및 온도 측정 장치의 개략도  
Fig. 3. Schematic diagram of the measurement apparatus and cryogenic ECR system.

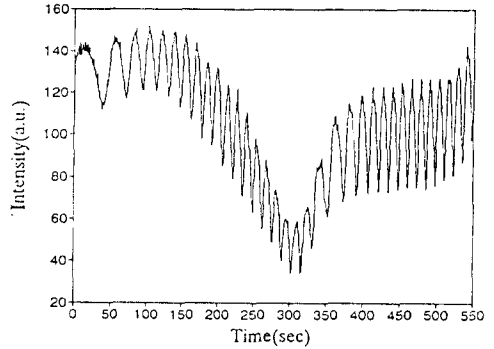


그림 4. 웨이퍼의 온도 증가에 따른 간섭무늬. 초기 온도 = -153  $^{\circ}$ C  
Fig. 4. Interferogram (laser intensity vs temperature) of a p-Si(100) wafer. Initial temperature -153  $^{\circ}$ C.

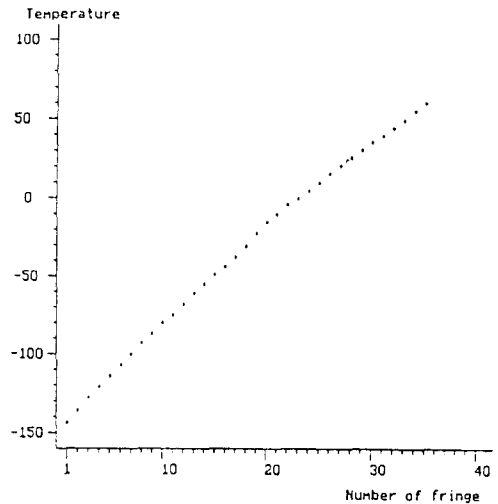


그림 5. 온도와 간섭무늬 개수와의 관계  
Fig. 5. Temperature vs fringe number : obtained from calibration measurements.

mbar, SF<sub>6</sub> 가스 유량 10 sccm, He 가스 유량 5 sccm으로 하였다.

보정(calibration) 데이터의 취득은 처음에 기판 온도를 -160  $^{\circ}$ C로 떨어뜨린 다음, 전극 안에 설치된 히터로 서서히 온도를 증가시키면서, Thermocouple로 측정된 온도 변화에 따른 IR 측정법에 나타나는 fringe의 개수를 헤아려 얻었으며, 측정된 fringe의 모양은 그림 4와 같다. 이것을 온도와 fringe 개수의 관계로 나타낸 것이 그림 5이다. 이 데이터를 나타낼

식은 최소자승법을 써서 다음과 같이 구하였다. <sup>11</sup>

$$N(T) = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4 + a_5 T^5 + a_6 T^6 \quad (6)$$

$$T(N) = b_0 + b_1 N + b_2 N^2 + b_3 N^3 + b_4 N^4 + b_5 N^5 \quad (7)$$

위 두 다항식의 계수는  $a_0=23.12$ ,  $a_1=0.1841$ ,  $a_2=5.561 \times 10^{-1}$ ,  $a_3=1.911 \times 10^{-6}$ ,  $a_4=-6.893 \times 10^{-8}$ ,  $a_5=-7.773 \times 10^{-10}$ ,  $a_6=-2.234 \times 10^{-12}$ ,  $b_0=-153.3$ ,  $b_1=9.464$ ,  $b_2=-0.4274$ ,  $b_3=2.868 \times 10^{-2}$ ,  $b_4=-9.065 \times 10^{-4}$ ,  $b_5=1.021 \times 10^{-5}$  이다. 식 (6)은 각각의 온도에 해당하는 fringe의 수를 나타내고, 식 (7)은 fringe의 개수에 상응하는 온도를 나타낸다.

위의 두 식을 이용하여 기판의 처음온도  $T_1$ 와 측정

한 fringe의 개수로 기판의 온도를 계산하는 것은 다음과 같다. 먼저 식 (6)을 이용하여 온도  $T$ 를 초기온도  $T_1$ 로 놓고 초기온도  $T_1$ 에 해당하는 fringe수  $N_1$ 를 구한 다음, 식 (7)에 아래 식 (8)의  $N$ 을 대입하여 최종온도를 구한다.

$$N = N_0 + N_1 \quad (8)$$

여기서,  $N_0$  : 온도변화로 인해 생긴 fringe 수

$N_1$  : 초기온도에 해당하는 fringe 수

이다.

여기서 주의해야 할 점은 온도변화로 인해 생긴 fringe 수  $N_0$ 를 얻는 방법인데, 그림 6. (a)의 수소 가스를 사용한 경우와는 다르게, 식각가스를 사용한 그림 6. (b)에서는 두번째 fringe 에서 빛의 강도가 감소하다가 다른 fringe 에 비해 중간정도에서 다시 증가하는 방향전환을 보이고 있다. 이는 측정된 fringe의 개수( $N_{obs}$ )에 온도변화로 인해 생긴 것( $N_0$ )과 기판이 식각되면서 두께변화로 생긴 것( $N_{ER}$ )이 복합되어 나타나기 때문이다. 즉 방향전환이전에는 온도 증가로 인한 fringe의 생성이 식각에 의해 생기는 fringe의 생성보다 커서, 온도증가로 인한 fringe의 생성이 주도하고 반대로 방향전환 이후는 식각에 의해 생기는 fringe의 생성이 주도하는 형상의 fringe가 생긴다. 따라서 식각으로 인해 생긴 fringe의 양을 고려해 주어야 하는데, 이는 동일 조건에서 Si 웨이퍼의 식각율이 일정하다고 가정하면, 기판이  $\lambda/2n$ 만큼 식각되면 1개의 fringe가 생긴다고 보고 보정하였다.

#### IV. 실험결과 및 검토

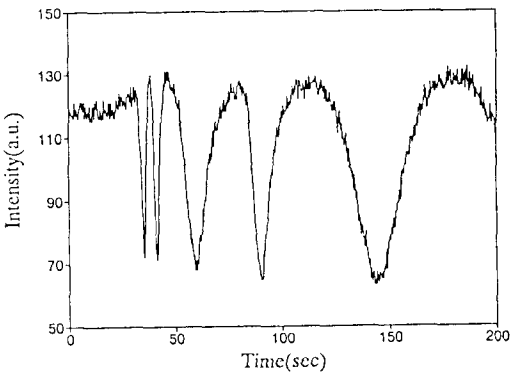
실험은 RF 바이어스 전력에 따른 온도변화와 초고 주파 전력에 따른 온도변화, 그리고 실제 저온식각시 나타나는 웨이퍼의 온도변화 순으로 행하였다.

실제로 측정된 fringe의 개수( $N_{obs}$ )에서 기판이 식각되면서 두께변화로 생긴 것( $N_{ER}$ )을 고려해 주기 위하여, 측정된 식각속도를 표 2에 나타내었다.

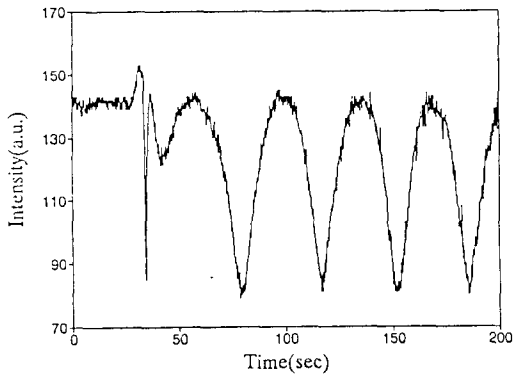
표 2. 각 실험조건에 따른 식각속도

Table 2. Etch rate of each experimental condition.

RF power(W)	$\mu$ -wave power(W)	Etch Rate( $\text{\AA}/\text{min}$ )
0	300	3280
20	300	4063
40	300	4667
60	300	5080
40	150	3980
40	450	5550



(a)



(b)

그림 6. 수소 가스와 식각 가스 각각의 간섭무늬 형태 (a)수소 가스 (b)식각 가스

Fig. 6. Interferogram(intensity vs temperature) of Si wafer for  $H_2$  gas and  $SF_6$  gas.

(a) $H_2$  gas, (b)  $SF_6$  gas.

1. RF 바이어스 전력에 따른 온도변화

초고주파 전력은 300 W로 고정시키고, RF 바이어스 전력(0W, 20W, 40W)에 따라 기관온도가 변화한 것을 그림 7에 나타내었다. 실험조건은 압력  $1 \times 10^{-3}$  mbar, SF<sub>6</sub> 가스 유량 10 sccm, He 가스 유량 5 sccm으로 위에 기술한 바와 같다. RF 바이어스 전력이 커질 수록 기관온도가 더 증가함을 알 수 있고, 식각 초기에는 급격한 온도 증가가 관찰되었고, 시간이 지남에 따라 일정한 기울기의 온도 상승이 일어났다. 이와같이 온도가 포화(saturation)되지 않고 계속 증가하는 이유는 플라즈마로 인한 전극 자체의 온도 상승에 기인한 것으로 사료된다.

기관온도의 상승은 식각시간 5분동안에 RF 바이어스 전력이 0 W일 때 약 15℃, 20 W일 때 약 18℃, 40 W일 때는 약 49℃정도이다.

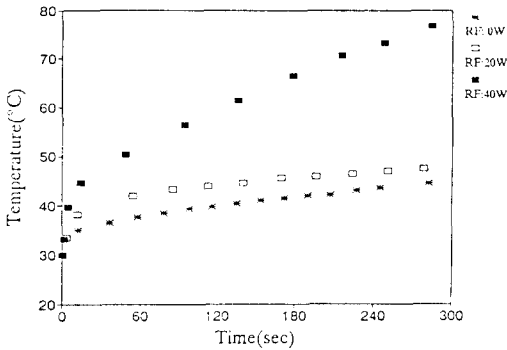


그림 7. RF 바이어스 전력에 따른 웨이퍼 온도변화  
Fig. 7. Temperature rise vs RF bias power.

2. 초고주파 전력에 따른 온도변화

그림 8는 초고주파 전력이 각각 150W, 300W, 450W일때 기관온도변화를 보인 것이다. 이때 RF

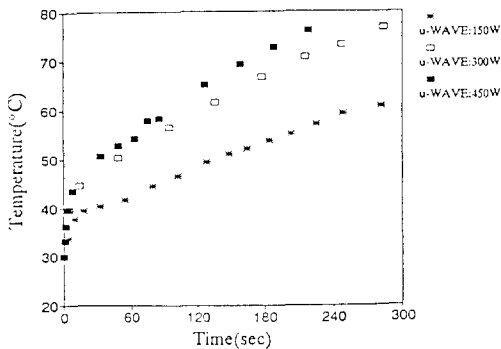
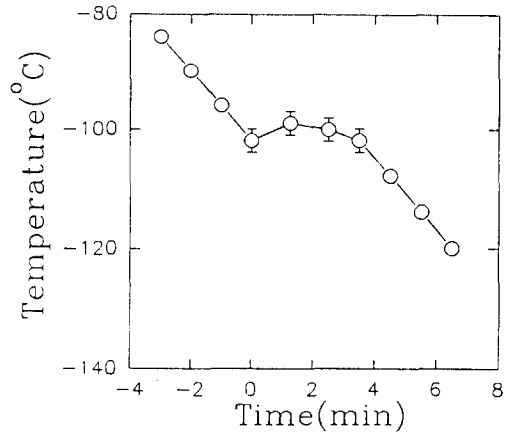
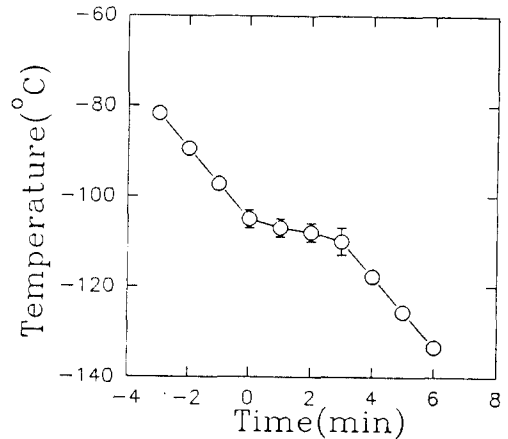


그림 8 초고주파 전력에 따른 웨이퍼 온도변화  
Fig. 8. Temperature rise vs microwave power.

바이어스 전력은 40 W로 고정하였다. 초고주파 전력이 커질수록 기관온도가 많이 증가함을 알 수 있다. 기관온도의 증가정도는 식각시간 5분동안에 초고주파 전력이 150 W일 때 약 33℃, 300 W일 때는 약 49℃, 450 W일 때는 약 55℃정도이다.



(a)



(b)

그림 9. 저온식각 중 웨이퍼 온도변화

(a) 냉각속도 6 °C/min

(b) 냉각속도 8 °C/min

RF 바이어스 전력 40 W, 초고주파 전력 300 W, 압력  $10^{-3}$  mbar

Fig. 9. Temperature change during cyrogenic etching.

(a) Cooling rate 6 °C/min.

(b) Cooling rate 8 °C/min.

RF bias power 40 W, microwave power 300 W, pressure  $10^{-3}$  mbar.

### 3. 저온식각시 온도변화

그림 9는 저온식각시(초기 웨이퍼 온도:  $-100^{\circ}\text{C}$ ) 웨이퍼의 온도변화를 나타낸 것이다. 실험조건은 초고주파 전력 300 W, RF 바이어스 전력 40 W, 압력은  $1 \times 10^{-3}$  mbar로 하였다. 그림 9 (a)는 웨이퍼의 냉각속도를  $6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 으로 한 것으로, 식각시간내 온도변화를  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 이내로 할 수 있음을 보여준다. 반면에 그림 9 (b)는 웨이퍼의 냉각속도를  $8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 으로 한 것으로, 플라즈마로 인한 온도상승보다 큰 냉각속도때문에 식각시간내 온도가 계속 감소함을 보여준다. 따라서 식각시 일정한 기판온도를 유지하기 위해서는 플라즈마로 인한 온도상승에 상응하는 기판냉각이 필요함을 알 수 있다.

## V. 결론

저온식각시 식각특성의 중요한 변수 중 하나인 기판온도를 일정하게 유지하기 위해서는 플라즈마에 기인한 온도상승과 이에 상응하는 기판냉각이 필요함을 알 수 있었다. ECR에 사용되는 초고주파 전력은 주로 이온밀도 증가에 기여하고, RF 바이어스 전력은 기판으로 입사되는 이온을 가속시키는 sheath전압 증가에 기여하며, 온도 상승은 주로 이온 충격에 기인하는 것이라고 볼 수 있다.

본 논문에서는 기판 온도 상승의 주원인이 되는 RF 바이어스 전력, 초고주파 전력에 따른 온도변화를 측정하여, 저온식각에서 균일한 웨이퍼 온도를 유지하기 위한 적당한 냉각 속도를 선택하여, 식각 공정 중 온도변화를  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 이내로 할 수 있음을 보여주고 있다. 이처럼, IR laser interferometry 방법이 웨이퍼와 직접적인 접촉이 없이 간접적으로 웨이퍼의 온도를 측정하기 때문에 공정중 웨이퍼 온도의 정확한 측정장치로 가장 적합하다고 사료된다.

## 參 考 文 獻

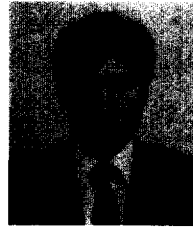
- [1] S.Tachi, K. Tsujimoto and S.Okudaira, "Low-temperature reactive ion etching and microwave plasma etching of silicon", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 52, p.616, 1988
- [2] S.Tachi, K. Tsujimoto, S. Arai and T. Kure, "Low-temperature dry etching", *J. Vac. Sci. Tech.*, vol. A9, no. 3, p. 796, 1991
- [3] K.W.Whang, S.H.Lee and H.J.Lee, "Cryogenic electron cyclotron resonance plasma etching", *J. Vac. Sci. Tech.*, vol. A10, no. 4, p.1307, 1992
- [4] I Hussla, K Enke, H Grunwald, G Lorenz and H Stoll, "In situ silicon-wafer temperature measurements during RF argon-ion plasma etching via fluoro-optic thermometry", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 20, p.889, 1987
- [5] V.M.Donnely and J.A.McCaulley, "Infrared-laser interferometric thermometry : A nonintrusive technique for measuring semiconductor wafer temperatures", *J. Vac. Sci. Tech.*, vol. A8, no. 1, p.84, 1990
- [6] R.A.Bond, S.Dzioba and H.M.Naguib, "Temperature measurements of glass substrates during plasma etching", *J. Vac. Sci. Tech.*, vol. 18, no. 2, p.335, 1981
- [7] R.J.Visser, "Determination of the power and current densities in argon and oxygen plasmas by in situ temperature measurements", *J. Vac. Sci. Tech.*, vol. A7, no. 2, p.189, 1989
- [8] T.R.Hayes, P.A.Heimann, V.M.Donnely and K.E.Strege, "Maskless laser interferometric monitoring of InP/InGaAsP heterostructure reactive ion etching", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 57, no. 26, p.2817, 1990
- [9] Katherine L.Saenger and Julie Gupta, "Laser interferometric thermometry for substrate temperature measurement", *Applied Optics*, vol. 30, no. 10, p.1221, 1991
- [10] H.Sankur and W.Gunnig, "Noncontact, highly sensitive, optical substrate temperature measurement technique", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 56, no. 26, p.2651, 1990

## 著者紹介



金在聲(正會員)

1968年 10月 20日生. 1991年 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 ~ 현재, 금성사 영상 DISPLAY 연구소 연구원.



李 哲賢(正會員)

1963年 2月 3日生. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 서울대학교 공학박사. 1993년 ~ 현재, 현대전자 반도체 연구소 선임 연구원.



黃 琪 雄(正會員)

1950年 7月 28日生. 1972년 서울대 공대 응용물리학과 졸업. 1976년 U.C.L.A 물리학 석사. 1981년 U.C.L.A 이학 박사. 1981 ~ 1982년 미국 U.C.L.A 플라즈마 Lab. 연구원. 1982 ~ 1983년 미국 Maryland 대학 플라즈마 Lab. 연구원. 현재 서울대 공대 전기공학과 교수.