Journal of the Korean Vacuum Society
Vol. 7, No. 4, November 1998, pp. 403~409

자장강화된 유도결합형 플라즈마를 이용한 산화막 식각에 대한 연구

안경준 · 김현수 · 우형철* · 유지범 · 염근영

성균관 대학교 재료공학과
*코리아 바큠테크(주)
(1998년 4월 16일 접수)

A study on the oxide etching using multi-dipole type magnetically enhanced inductively coupled plasmas

K. J. An, H. S. Kim, R. Woo*, J. B. Yoo and G. Y. Yeom

Department of Materials Engineering, Sung Kyun Kwan University, Suwon, 440-746, Korea
**Korea Vacuum Tech., Seoul, Korea*
(Received April 16, 1998)

요 약 – 본 연구에서는 자장강화된 유도결합형 플라즈마를 사용하여 이 플라즈마의 특성을 조사하고 또한 산화막 식각에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 자장 강화를 위해 4쌍의 영구자석이 사용되었고, 산화막 식각을 위해 C_2F_6, CHF_3, C_4F_8 가스 및 이들 혼합가스가 사용되었으며 첨가가스로 H_2를 사용하였다. 자장강화된 유도결합형 플라즈마 특성 분석을 위해 Langmuir probe 와 optical emission spectrometer를 이용하였으며 산화막 식각 속도 및 photoresist에 대한 식각 선택비를 stylus profilometer를 이용하여 측정하였다. 이온 밀도에 있어서 자장 유무에 따른 큰 변화는 관찰되지 않았으나 이온전류밀도의 균일도는 자장을 가한 경우 웨이퍼가 놓이는 기판 부분에서 상당히 증가된 것을 알 수 있었다. 또한 자장이 가해진 경우, 자장을 가하지 않은 경우에 비해 플라즈마 전위가 감소된 반면 전자온도 및 라디칼 밀도는 크게 증가되는 것을 알 수 있었으며 산화막 식각시에도 높은 식각 속도와 식각 균일도를 보였다. 산화막 식각을 위해 수소가스를 사용한 가스조합중에서 C_4F_8/H_2가스조합이 가장 우수한 식각 속도및 photoresist에 대한 식각 선택비를 나타내었으며 공정변수를 최적화 함으로써 순수 C_4F_8에서 4이상의 선택비와 함께 8000 Å/min의 가장 높은 식각속도를 얻을 수 있었으며, 50%C_4F_8/50%H_2에서 4000 Å/min의 산화막 식각 속도와 함께 15이상의 식각 선택비를 얻을 수 있었다.

Abstract – In this study, the effects of multi-dipole type of magnets on the characteristics of the inductively coupled plasmas and SiO_2 etch properties were investigated. As the magnets, 4 pairs of permanent magnets were used and, to etch SiO_2, C_2F_6, CHF_3, C_4F_8, H_2, and their combinations were used. The characteristics of the magnetized inductively coupled plasmas were investigated using a Langmuir probe and an optical emission spectrometer, and SiO_2 etch rates and the etch selectivity over photoresist were measured using a stylus profilometer. The use of multi-dipole magnets increased the uniformity of the ion density over the substrate location even though no significant increase of ion density was observed with the magnets. The use of the magnets also increased the electron temperature and radical densities while reducing the plasma potential. When SiO_2 was etched using the fluorocarbon gases, the significant increase of SiO_2 etch rates and also the increase of etch uniformity over the substrate were obtained using the magnets. In case of gas combinations with hydrogen, C_4F_8/H_2 showed the highest etch rates and etch selectivities over photoresist among the gas combinations with hydrogen used in the experiment. By optimizing process parameters at 1000 Watts of inductive power with the magnets, the highest SiO_2 etch rate of 8000 Å/min with the etch selectivity of 4 could be obtained for 100% C_4F_8 and the highest etch selectivity of over 15 with the SiO_2 etch rate of 4000 Å/min could be obtained for 50% C_4F_8/50% H_2.

1. 서 론

산화막의 건식식각공정은 실리콘 집적회로의 제작 뿐만아니라 광도파로와 같은 여러 다른 응용 분야에 있어서도 가장 중요한 공정중의 한가지이다[1, 2] 실제 산화막을 이용한 광도파로 제작을 위한 식각공정에 있어서는 산란 손실을 줄이기 위해 수직한 단면과 적은 측면 거칠기를 얻도록 하는 것이 중요하며 또한 10 μm이상 두께의 광도파로를 식각하기 위하여 높은 식각 속도 및 마스크 물질과의 높은 식각 선택비가 요구된다[3].

지금까지 실리콘 집적회로의 제작에 있어서 높은 산화막 식각 속도를 얻기위해 고밀도 플라즈마원 즉, ICP, Helicon, ECR 등이 연구되어 왔으며, 이중 일부의 고밀도 플라즈마원이 현재 실리콘 집적회로의 제작에 적용되고 있다[4-6]. 이러한 고밀도 플라즈마원의 특성으로는 기판에 독립적으로 전력을 전달함으로써 기판으로 입사되는 이온의 에너지를 조절할 수 있으며 낮은 공정 압력에서 반응성가스의 높은 분해율을 가지며 높은 이온밀도를 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러므로 광도파로 식각에 고밀도 플라즈마의 응용은 수직한 단면과 높은 식각 속도를 얻는데 상당히 유리할 것으로 믿어진다. 현재 광도파로 제작을 위한 산화막 식각시 주로 사용되는 마스크 물질로는 감광제에 대한 낮은 선택비로 인해 Al, Cr 그리고 비정질 실리콘 등이 사용되고 있으나, 감광제만으로 높은 식각선택비를 얻을 경우 공정단계를 줄이고 생산성을 증가시킬 수 있다는 장점이 있다[3, 7].

본 연구에서는 다극형 영구자석에 의한 자장강화된 유도결합형 플라즈마를 산화막 식각 공정에 적용하고자 자장 강화된 유도결합형 플라즈마 및 산화막 식각 특성에 대하여 연구하였다.

2. 실험 방법

Fig. 1(a)는 본 실험에서 사용된 자장 강화된 유도결합형 플라즈마의 장치 개략도를 나타내고 있다. 유도결합 플라즈마를 발생시키기 위해 13.56 MHz의 rf power를 구리로 5회에 걸쳐 나선형으로 감겨져 있는 코일에 인가하였으며 바이어스 전압을 발생시키기 위해 기판쪽에 역시 별도의 13.56 MHz rf power를 인가하였다. 또한 자석은 Fig. 1(a)와 같이 표면에서 2000Gauss의 자장세기를 갖는 10 cm길이의 4쌍의 영구자석이 챔버 주위에 등간격으로 놓이도록 배열하였다. 주요 공정 변수로 소스의 전력은 400W에서 1000W까지, 바이어스 전압은 0V에서 −150V까지, 공정압력은 5 mTorr에서 20 mTorr까지 변화시켰다. 자장유무에 따른 유도결합형 플라즈마 특성을 연구하기 위해 Ar 가스를 사용하였고, 산화막 식각 특성을 위해 C_2F_6, CHF_3, C_4F_8, H_2 등의 가스를 사용하였다. 자장유무에 따른 유도결합형 Ar 플라즈마의 이온 밀도, 플라즈마 전위, 전자온도 등은 Langmuir probe를 이용하여 측정하였다. 또한, 반응성 가스의 특성을 연구하기 위해 Langmuir probe를 이용하여 이온 전류 밀도를 측정하였으며, optical emission spectroscopy (SC Techonoly Inc : PCM-402)를 이용하여 F 라디칼의 정도를 측정하였다.

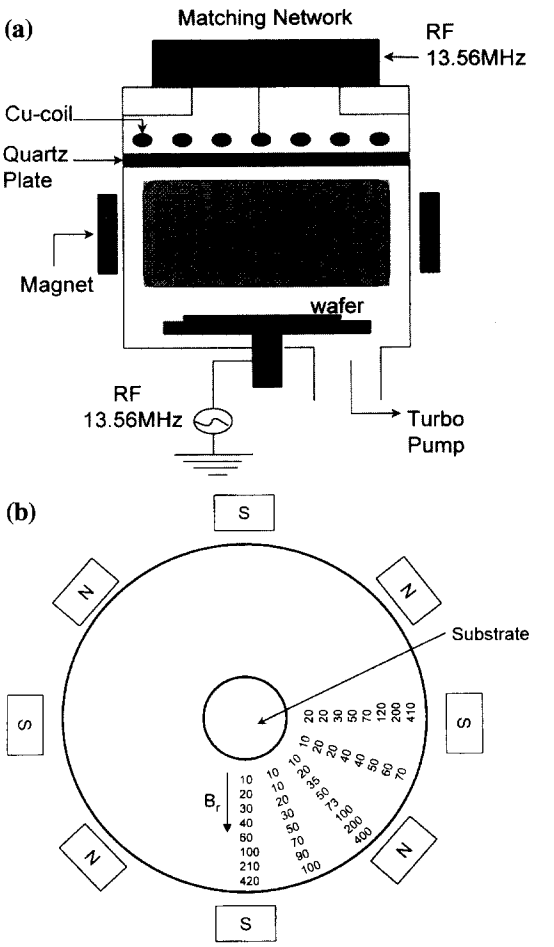

Fig. 1. (a) 본 실험에서 사용된 자장강화된 유도결합형 플라즈마의 식각 장비 개략도 (b) 가우스 메터를 이용하여 측정한 챔버내 자장세기의 분포.

산화막 식각특성을 연구하기 위해 실리콘 웨이퍼위에

2 μm두께의 산화막을 증착하였으며, 마스크 물질은 2.5 μm두께의 photoresist (S1400-37)를 패터닝하여 사용하였다. 식각속도 및 식각선택비는 stylus-profilometer를 이용하여 photoresist 제거 전후로 식각패턴의 step을 측정함으로써 계산하였다. 대부분의 산화막 식각은 소스의 전력은 1000W, 바이어스 전압은 −100 ~ −150V, 공정압력은 5~10 mTorr 그리고 기판온도는 25°C에서 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

본 실험에서 사용된 자장강화된 유도결합형 플라즈마의 특성을 연구하기에 앞서 가우스 미터를 이용하여 챔버 내부에 미치는 자장의 세기 및 분포를 챔버 반경을 따라 가로방향으로 측정하였으며 이에 대한 결과를 Fig. 1(b)에 나타내었다. 챔버 내부벽에서 측정된 자장의 세기는 400 Gauss정도이었으며 챔버 중앙으로 갈수록 또한 자석과 자석사이의 중앙부분으로 갈수록 자장의 세기는 지수적으로 감소하는 것을 알 수 있었다.

자장 유무에 따른 이온전류밀도의 균일도 차이를 측정하기 위해 챔버 반경을 따라 기판 위(bottom) 및 진공챔버와 유도코일을 분리시키는 quartz window 아래(top) 각각 1 cm 떨어진 부분에서 이온전류밀도를 측정하였다. Fig. 2(a)는 5 mTorr Ar, 소스전력 800 W와 1000 W에서 자장 유무시 기판 중심에서 챔버 반경을 따라 기판위 1 cm 위(bottom)와 quartz window 1 cm 아래(top)에서 각각 측정된 이온전류밀도를 나타낸다. 그림에서 보는 바와같이 자장을 가하지 않은 경우, 기판으로부터 1 cm위 상단에서 측정한 이온전류밀도는 기판 중앙 근처에서 가장 높았으며, 챔버 벽으로 갈수록 크게 감소하였다. 반면 자장을 가한 경우 챔버중앙 부분에서는 이온전류밀도가 거의 일정하였으나 챔버 벽 부분에서는 이온전류밀도가 급격하게 감소함을 알 수 있었다. 결과적으로 Fig. 2(b)에서 자세히 알 수 있듯이 챔버 전체에서 이온전류밀도의 균일도는 자장을 가하지 않은 경우가 더 높지만, 기판 반경 7 cm 까지만을 고려한다면, 자장을 가한 경우가 더욱 높다는 것을 알 수 있었다. 이와같이 자장을 가한 경우 기판주위에서의 이온전류밀도와 균일도가 증가하는 것은 플라즈마 특성에 영향을 미치는 전자의 챔버 벽면으로의 손실이 감소하였기 때문인것으로 사료된다. 만약 4쌍 이상의 자석이 챔버 주위에 더욱 촘촘히 부착된다면 챔버내 좀 더

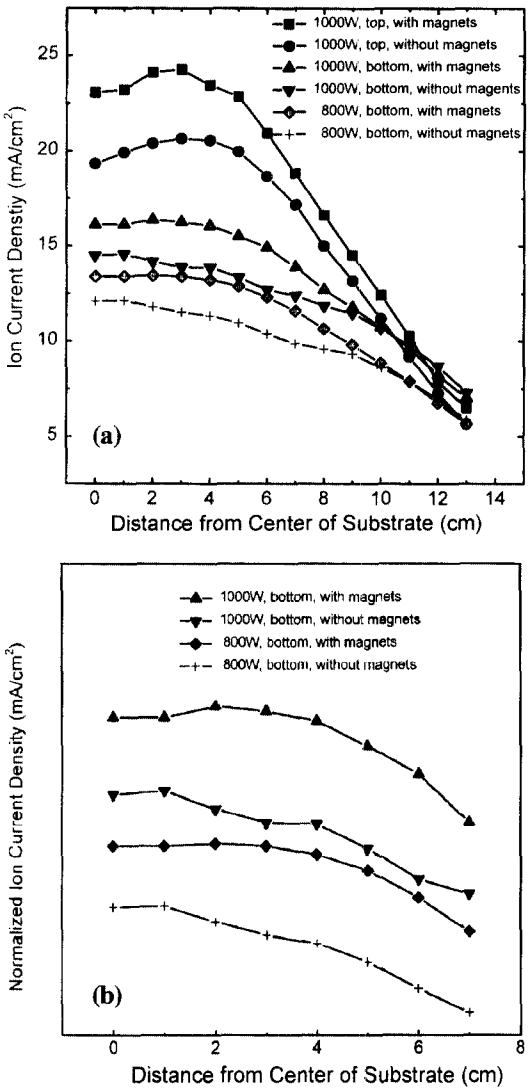

Fig. 2. (a) 자장 유무시 챔버 반경을 따라 Ar 플라즈마를 이용하여 기판위(bottom)와 석영창 아래(top)에서 각각 1 cm 떨어진 부근에서 측정한 이온전류밀도 (b) 기판반경 7 cm까지만을 고려한 Normalized 이온전류밀도(소스전력 : 800/1000W, 압력 : 5 mTorr).

넓은 범위까지 높은 균일도를 보일 것으로 사료된다. 또한 quartz window로부터 1 cm 아래(top)에서 측정한 이온전류밀도는 챔버 중심으로부터 4 cm정도 떨어진 곳에서 가장 높은 값을 나타내었는데, 이는 그 주변의 유도결합 코일로부터 유도된 강한 전계에 의한 것으로 사료되며 챔버 전체의 균일도 면에서는 기판 근처에서 보다 낮은 것을 알 수 있었다.

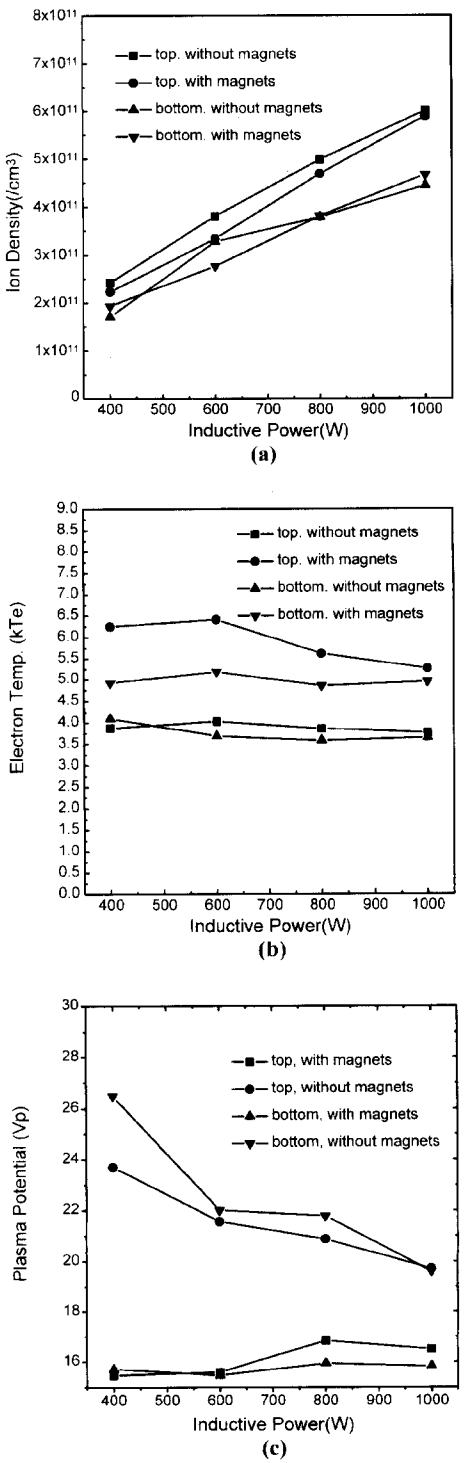

Fig. 3. 자장유무시 Ar 가스를 이용하여 소스전력에 따라 top과 bottom에서 각각 측정한 이온밀도 (a), 전자온도 (b), 플라즈마 전위 (c) (압력 : 5 mTorr).

Fig. 3은 자장 유무에 따라 챔버 중앙의 위(quartz window로부터 1cm 아래-top)와 아래(기판으로부터 1 cm 위-bottom)에서 각각 Ar 플라즈마로 측정한 Langmuir probe data를 이용하여 얻은 이온 밀도(a), 전자 온도(b), 그리고 플라즈마 전위값(c)을 나타낸다.

이온밀도는 소스전력이 400W에서 1000W까지 증가함에 따라 2×10^{11}/cm^{3}에서 6×10^{11}/cm^{3}까지 증가하였고, 기판위(bottom)보다 quartz 아래(top)에서 더 높은 이온밀도를 나타내었다. 이렇게 기판(bottom)보다 quartz부근(top)에서 더욱 높은 이온밀도를 나타내는 것은 일반적으로 기판과 플라즈마 발생 지역과의 거리가 멀어짐에 따라 플라즈마 밀도가 감소하는 경향과 일치하는 것으로 생각된다. 그러나 자장 유무에 따른 이온밀도의 큰 차이는 보이지 않았다. 한편, 플라즈마 전위와 전자온도는 소스 전력의 변화에 대해 큰 변화는 관찰되지 않았으나, 전자온도의 경우에 있어서는 자석을 배치한 경우(5eV~6eV)가 자석이 없는 경우(3eV~4eV)보다 높았으며, 플라즈마 전위에 있어서는 자석을 배치한 경우(15V~17V)가 자석이 없는 경우(20V~27V)보다 낮아 전자온도의 결과와는 반대의 결과를 나타내었다. 이와같이 자장을 가한 경우 높은 이온전류밀도에도 불구하고 이온밀도의 큰 차이가 관찰되지 않는 것은 상대적으로 전자온도가 증가하였기 때문으로 사료된다. 한편 이와 같은 전자 온도의 증가는 챔버 벽주위에 영구자석으로 자장을 가함으로써 전자를 chamber내에 구속하기 때문에 다소 증가한 것으로 사료된다.

자장 유무에 따라 Ar 가스를 이용하여 플라즈마 특성을 조사한 후 산화막 식각을 위한 반응성 가스를 사용하여 이들 플라즈마의 특성 및 식각 특성을 평가하였으며 이를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4는 C_2F_6/CHF_3가스 혼합비와 자장유무에 따라서 측정한 산화막 식각 속도, F radical intensity, 그리고 이온전류밀도를 나타내고 있다. 이때 공정조건으로 압력은 5 mTorr, 소스전력은 1000W, 바이어스 전압은 −100V이었다. Fig. 4(a)에서와 같이 C_2F_6/CHF_3의 가스 혼합비가 증가함에 따라 산화막 식각속도는 증가하였으며, 자장을 가한 경우에 식각속도가 크게 증가하였으며 가스 혼합비에 따른 식각속도의 증가정도 또한 큰 것을 알 수 있었다. 또 Fig. 4(b)의 경우, 가스혼합비에 따른 이온전류밀도의 큰 차이는 볼 수 없었으나, 자장을 가한 경우에 식각 속도에 있어서와 마찬가지로 이온전류밀도에 있어서도 약 2 배 정도의 더 높은

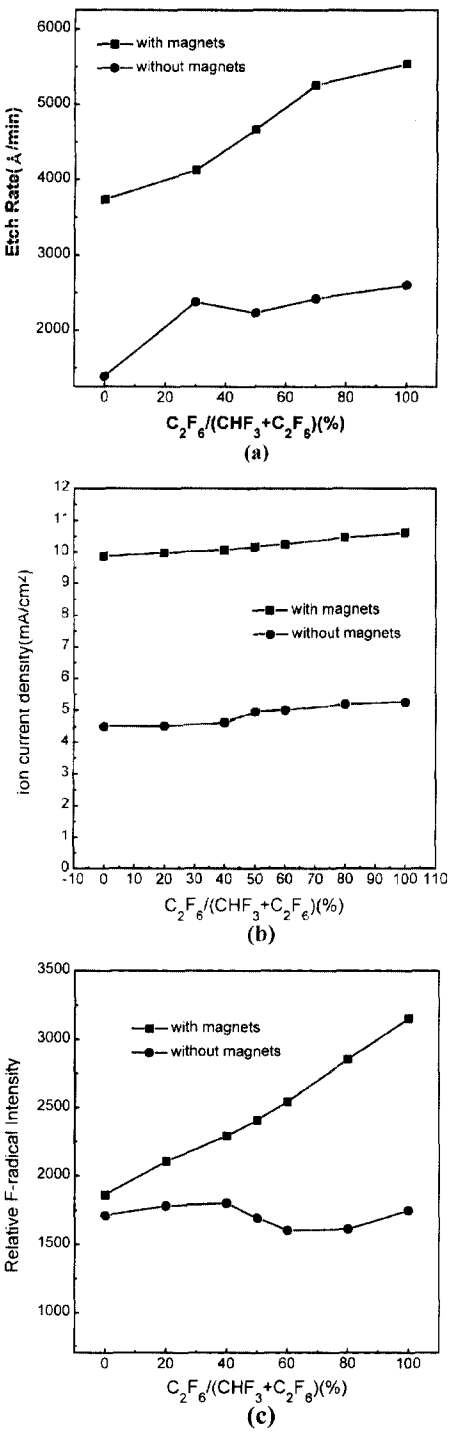

Fig. 4. 자장 유무시 $C_2F_6/(C_2F_6+CHF_3)$ 비율에 따른 플라즈마 및 산화각 식각 특성 (a) SiO_2 식각 속도 (b) 이온전류밀도 (소스전력 : 1000W, 직류자기바이어스전압 : −100V, 압력 : 5 mTorr)(c) F radical intensity.

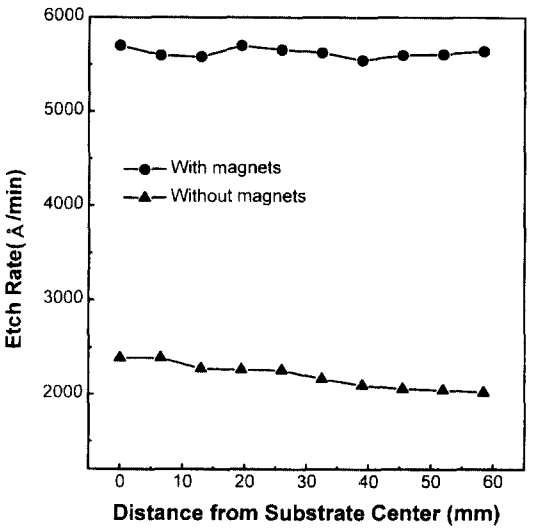

Fig. 5. 자장유무시 식각 균일도를 측정하기 위해 C_4F_8가스를 이용하여 기판중앙에서 반경을 따라 측정한 산화막 식각 속도 (소스전력 : 1000W, 직류자기바이어스전압 : −100V, 압력 : 5 mTorr).

와 같이 F 라디칼량은 C_2F_6/CHF_3혼합비가 증가함에 따라 증가하였으며, 자장을 가한 경우에 산화막 식각 속도의 경향과 유사하게 더욱 높은 F 라디칼 량을 나타내었다[8]. 결국 산화막 식각속도의 증가는 자장을 가함으로써 이온전류밀도의 증가로 인한 ion bombardment 효과와 F radical 증가에 따른 산화막과의 화학적 결합이 효율적으로 증가하였기 때문인 것으로 사료된다. 또한 그림에는 나타내지 않았지만, photoresist에 대한 식각 선택비를 일부의 경우에 대하여 측정한 결과 자장 유무에 따른 식각 선택비에는 큰 변화를 보이지 않았으며 C_2F_6에 CHF_3 첨가량을 증가시킴에 따라 다소 증가하지만 대체로 2 이하의 낮은 식각선택도를 나타내었다. 이와같은 낮은 식각선택도는 고밀도 플라즈마가 갖는 높은 가스분해율로 인한 F radical의 증가 뿐만아니라 높은 이온전류밀도로 인한 sputtering effect의 증가로 기인하는 것으로서 자장을 가한 경우의 더 높은 F radical과 이온전류밀도의 증가는 적절한 가스분해도를 지니는 식각가스의 조합없이는 높은 식각선택비를 얻기가 더욱 어렵게 할 것이 예측된다.

Fig. 5는 C_4F_8에서 자장유무시, 기판 중심에서 거리에 따라 측정한 산화막 식각 속도를 나타낸다. 이때 공정압력은 5 mTorr, 소스전력은 1000W, 바이어스 전압은 −100V이였다. 그림에서 보듯이 챔버 주위에 자장을 가

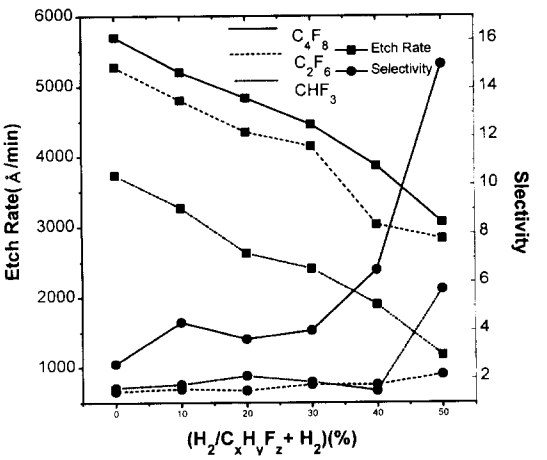

Fig. 6. 자장을 가한 경우, C_2F_6, CHF_3, C_4F_8의 각 가스에 대해 H_2 첨가량 변화에 따른 산화막 식각 속도 및 photoresist와의 식각 선택비 (소스전력 : 1000W, 직류자기바이어스전압 : −100V, 압력 : 5 mTorr).

한 경우에 식각 균일도가 증가한 것을 알 수 있었다. 그러므로, 자장유무에 따른 산화막 식각선택비의 큰 향상은 없었지만 자장을 가한 경우에 Fig. 4(a)에서와 같이 산화막 식각 속도가 증가하였으며 Fig. 5에서와 같이 산화막 식각 균일도가 증가한 것을 알 수 있었다. 또한 이러한 산화막 식각 균일도는 Fig. 2에 보였던 챔버 중심부분에서의 이온전류밀도 균일도의 경향과 유사한 것을 알 수 있었다.

식각 균일도를 측정한 후, 자장을 가한 경우에 대하여 photoresist와의 식각 선택비를 증가시키기 위해 식각 가스에 수소를 첨가하여 식각 속도와 식각 선택비를 측정하였다. Fig. 6은 공정 압력은 5 mTorr, 소스전력은 1000 W, 바이어스 전압은 −100 V의 공정조건 하에서, C_2F_6, CHF_3, 그리고 C_4F_8가스 각각에 수소 첨가량을 증가시킴에 따른 산화막 식각 속도 및 photoresist에 대한 식각 선택비를 나타낸다. 그림에서 보는 바와같이 실험에서 사용된 모든 식각 가스에 대해서 수소량이 증가함에 따라 산화막 식각 속도가 감소하는 것을 알 수 있었는데, 이것은 공정시 식각 가스의 부분압력의 감소와 F 라디칼과 수소와의 결합, 즉 HF 결합으로 인해 실제 F 라디칼의 밀도가 감소하였기 때문으로 생각된다[9]. 그리고 식각 가스중에서 CHF_3 가스의 경우가 같은 수소 첨가량에 대해서 C_2F_6가스에 비해 낮은 식각 속도를 나타내었다. 이러한 식각 속도의 차이는 Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이 C_2F_6가 CHF_3에 비해 더 많은 F 라디칼량을 발생시키기 때문인 것으로 생각된다[8]. 또한 그림에는 보이지 않았지만, 수소 첨가량에 따라 산화막 식각 속도가 감소하는 것과 유사하게 F 라디칼량이 감소되는 것을 알 수 있었다. C_4F_8가스의 경우에는 Fig. 6에서 보이는바와 같이 가장 높은 산화막 식각 속도를 나타내었다. Fig. 6은 photoresist에 대한 식각 선택비도 나타내고 있는데 식각 선택비의 경우, 각 가스에 대해서 수소 첨가량이 30%가 될 때까지는 식각 선택비의 증가는 관찰되지 않았으나 수소 첨가량을 30%이상으로 증가시킴에 따라 C_2F_6와 CHF_3에 있어서는 약간 증가하는 경향을 나타내었으며, C_4F_8에서는 크게 증가하는 것을 알 수 있었다. 이렇게 수소를 30%까지 첨가시 큰 변화를 보이지 않은 것은 고밀도 플라즈마에서 발생되는 과다한 F 라디칼 발생으로 인하여 photoresist의 표면이나 실리콘 위에 폴리머 생성을 위해 필요한 CF_x ($x \leq 2$) 라디칼이 상대적으로 부족하기 때문인 것으로 생각된다. 50% 수소 첨가시에는 C_4F_8/H_2에서 15이상의 가장 높은 식각 선택비를, CHF_3/H_2에서는 6 정도, 그리고 C_2F_6/H_2에서는 2정도의 식각 선택비를 각각 나타내었다. 이렇게 C_4F_8/H_2에서 가장 높은 선택비를 보인 것은 본 실험에서 사용된 다른 CF계 가스에 비해 CF_x ($x \leq 2$) 라디칼의 발생이 용이하기 때문인 것으로 사료된다[8].

결과적으로 자장을 가한 경우 공정압력은 5 mTorr, 소스전력은 1000 W, 바이어스 전압은 −100 V에서 15 이상의 높은 산화막 식각 선택비와 함께 3400 Å/min의 산화막 식각 속도를 $50\%C_4F_8/50\%$ H_2의 가스 조합에서 얻을 수 있었다. 또한 그림에는 나타내고 있지 않으나 다른 공정 변수는 유지시키고, 공정압력만을 10 mTorr로 증가시켰을 때 역시 15이상의 높은 식각 선택비와 함께 4000 Å/min의 산화막 식각 속도를 얻을 수 있었다. 반면 순수 C_4F_8 가스만을 사용하여 바이어스 전압을 −150 V으로 증가시켰을 때에는 4 정도의 식각 선택비와 함께 8000 Å/min의 산화막 식각속도를 얻을 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 자장 유무에 따른 유도결합형 플라즈마의 특성 및 산화막 식각 특성을 연구하였다. 자장 강화를 위해 4쌍의 영구자석이 사용되었으며, 산화막 식각 가스로는 C_2F_6, CHF_3, C_4F_8, H_2와 이들의 혼합가스를 사용하였다.

자장을 가한 경우, 이온 밀도의 큰 증가는 보이지 않았지만, 챔버 중앙 부분에서 이온전류밀도의 균일도를 증가시켰으며 플라즈마 전위는 감소한 반면 전자온도 및 라디칼 밀도가 증가하는 것을 알 수 있었다.

산화막 식각시에는 자장을 가한 경우에 식각 속도 및 식각 균일도의 큰 증가를 보였다. 실험에서 사용된 여러 가스중에서 가장 높은 식각 속도와 photoresist에 대한 식각 선택비는 C_4F_8/H_2에서 얻을 수 있었다. 소스전력이 1000 W에서 순수 C_4F_8만을 사용했을때, 공정 압력은 5 mTorr, 바이어스 전압은 −150 V에서 식각 선택비가 4와 함께 8000 Å/min의 높은 식각 속도를 얻을 수 있었으며, 공정압력은 10 mTorr, 바이어스 전압은 −100 V에서 50%C_4F_8/50%H_2를 사용한 경우 4000 Å/min의 식각 속도와 함께 15이상의 높은 식각 선택비를 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. Y. Yamada, H. Terui, Y. Ohmori, M. Yamada, and M. Kobayashi, *J. Lightwave Technol.* **10**, 383 (1992).
2. N. Takato, A. Sugita, K. Orose, H. Okazaki, M. Okuno, M. Kawachi, and K. Oda, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **2**, 441 (1990).
3. Achyut Kumar DUTTA, *J. Appl. Phys.* **34**, 365 (1995).
4. Y. D. Yang, H. J. Lee, and K. W. Whang, *Journal of the Korean Vacuum Society* **6**, 91 (1997).
5. G. S. Oehriein, Y. Zhang, D. Vender, and O. Joubert, *J. Vac. Sci. Technol. A* **12**, 333 (1994).
6. J. T. C. Lee, *Solid State Technology* **8**, 63 (1996).
7. Peter Singer, *Semiconductor International* **6**, 100 (1997).
8. Koji Miyata, Masaru Hori, and Toshio Goto, *J. Vac. Sci. Technol. A* **14**, 2343 (1996).
9. R. d1Agostino, F. Cramarossa, V. Colaprico, and R. d1Ettole, *J. Appl. Phys.* **54**, 1284 (1983).