

〈 연구논문 〉

평판형 유도결합플라즈마를 이용한 RF 스퍼터 식각반응로 제작 및 특성에 관한 연구

이원석 · 이진호* · 염근영

성균관대학교 공과대학 재료공학과

*한국전자통신연구소

(1995년 5월 17일 접수)

A Study on the Fabrication and Properties of RF Sputter Etch Reactor using Planar Inductively Coupled Plasma

Won-Seok Lee, Jin-Ho Lee* and Geun-Young Yeom

Department of Materials Engineering, Sung Kyun Kwan University, Suwon 440-746, Korea

*Electronics and Telecommunications Research Institute

(Received May 17, 1995)

요 약—최근에 연구되고 있는 저온, 저압 플라즈마를 이용한 식각기술 중 차세대 반도체 metallization 공정에 응용될 수 있는 가장 적합한 기술이라 사료되는 유도 결합형 플라즈마(Inductively Coupled Plasma : ICP)를 이용한 RF 스퍼터 식각 반응로를 제작하고 이에 대한 특성을 조사하였다. 유도용 주파수로서 13.56 MHz를 사용하였으며 유도결합을 일으키기 위해 3.5회의 나선형 평판형 코일을 사용함으로써 비교적 대면적에 균일한 고밀도 플라즈마를 얻을 수 있었다. 또한 기판에 독립적인 13.56 MHz RF power를 가해 DC 바이어스를 인가함으로써 기판으로 입사하는 하전입자들의 에너지를 조절하여 기판에의 손상을 최소화하며 SiO₂의 스퍼터 식각 속도를 극대화할 수 있었다. 따라서 이러한 특성을 갖는 유도 결합형 플라즈마 식각장치를 차세대 반도체의 RF 스퍼터 식각 공정에 응용할 수 있으리라 사료된다.

Abstract— An experimental RF sputter etch system using Inductively Coupled Plasma (ICP) that can be applied to the next generation semiconductor metallization processing among recent etching techniques using low temperature and low pressure plasmas was fabricated and its characteristics was investigated. An 13.56 MHz was used to induce the inductively coupled plasma and relatively large area and uniform high density plasmas could be obtained by using 3.5-turn spiral planar coil as an induction coil. Also, the damage subjected on the silicon wafers could be minimized and SiO₂ etch rates could be maximized by controlling the energy of charged particles on the substrate independently through the DC bias induced by a separate 13.56 MHz RF power supply. From the results, we conclude that inductively coupled plasma sputter etch system can be applied to the next generation semiconductor processing.

1. 서 론

최근 submicron 소자의 공정에 있어서 저온 저압의 플라즈마 식각에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데 이중 가장 연구가 많이 되고 있는 분야 중의 한 가

지가 플라즈마 식각시의 이온에 의한 재료의 손상이다. 플라즈마 식각시 재료의 손상을 최소화하며 또한 단시간에 요구되는 두께를 식각하기 위하여 최근에 많이 연구되고 있는 플라즈마 소스로는 전자 싸이클로트론 공명 플라즈마[1-6], 헬리콘 플라즈마[7-11], 유

도 결합형 플라즈마[12-19] 등이 있다. 이들은 모두 저압에서 고밀도의 플라즈마를 생성하고 플라즈마내 이온에너지를 낮추므로써 실리콘표면을 낮은 에너지 및 고밀도로 이온식각이 가능하며 반응로로부터의 오염을 최소화할 수 있도록 연구되었다. 그러나 이중 전자 사이클로트론 공명 플라즈마의 경우 공명조건을 위하여 필요한 875 가우스의 자기장의 균일도를 유지하기가 힘들며 실리콘 웨이퍼의 크기가 증가함에 따라 이 균일도를 유지하기 위한 비용의 증가가 문제시 되고 있는 실정이다. 이에 따라 새로이 연구되고 있는 플라즈마 소스가 유도 결합형 플라즈마이다. 이는 기존의 저렴한 13.56 MHz의 RF power를 이용하여 2.45 GHz를 사용하는 전자 사이클로트론 공명 플라즈마에 버금가는 낮은 이온에너지의 고밀도 이온을 생성할 수 있다.

본 연구에서는 위와 같은 장점을 지닌 유도 결합형 플라즈마 소스중 비교적 웨이퍼의 공정에 용이하며 대면적의 플라즈마를 얻을 수 있는 평판형 유도 결합 플라즈마(Planar ICP)원을 이용한 RF 스퍼터 식각 장비를 상용장비인 DRYTEK QUAD 483을 개조하여 제작 및 설치하고 이 장비의 기본적인 플라즈마 특성을 single Langmuir probe법[20]을 이용하여 측정하였고 SiO₂에 대한 식각속도 및 균일도를 구하였으며 실리콘 표면에 Schottky 다이오드를 형성하여 leakage current를 통한 이온손상정도를 예측하였다.

2. 실험방법

우선 본 연구에서 제조된 평판형 유도 결합 플라즈마 스퍼터 식각 장비에 대한 단면도를 그림 1에 나타내었다. 본 장비는 생산용 플라즈마 식각 장비인 DRYTEK QUAD 483 multichamber 식각 장비를 개조하여 제작한 것으로 유도 결합 소스로서 수냉이 가능한 평면형 Cu 코일을 12 cm 직경으로 3.5회 나선형으로 감았으며 유도 자장이 침투할 수 있도록 1.5 cm 두께의 석영창을 반응실 위에 설치하였다. 또한 이 Cu 코일에는 RF power를 전달할 수 있도록 변형된 matching network을 연결하였다. 석영창의 직경은 18 cm로서 형성되는 유도자장이 반응실내로 충분히 침투될 수 있고 또한 더 큰 직경의 Cu 코일을 사용시 수용할 수 있도록 고안하였다. 이 석영창으로부터 7 cm

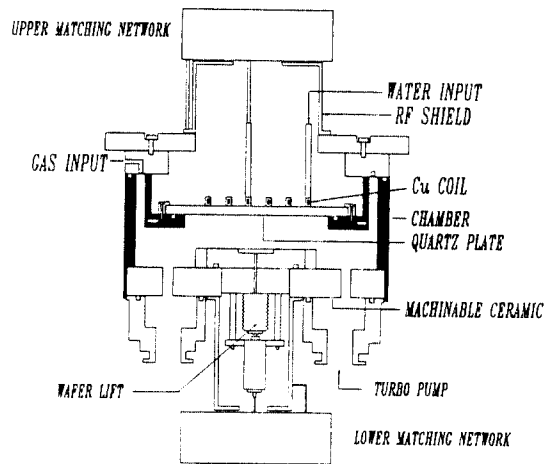


그림 1. 본 연구에서 제작된 평판형 유도 결합 플라즈마 식각 장치의 단면도.

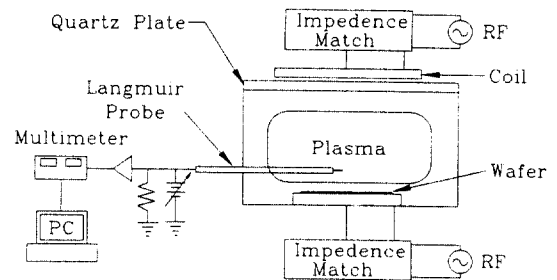


그림 2. 플라즈마 특성분석을 위한 실험장치 개략도.

떨어진 곳에 웨이퍼가 위치하며 이 간격은 spacer를 이용하여 조절할 수 있도록 하였다. 석영창 밑부분에는 원형의 개스링을 설치하여 반응실벽 주변으로 가스를 분사하도록 하여 반응실 부근의 균일도의 향상을 얻고자 하였다. 웨이퍼를 진공하에서 loading할 수 있도록 기존의 loadlock chamber를 그대로 이용하였으며 웨이퍼가 놓이는 전극은 5인치 웨이퍼를 수용할 수 있도록 제작되어 있고 입사하는 이온의 에너지를 조절하기 위한 DC 바이어스를 인가하기 위해 또 다른 RF power를 가하도록 matching network을 연결하였다. 진공 시스템은 240 l/sec의 배기속도를 갖는 터보 분자펌프와 700 l/min의 배기속도를 갖는 로터리 펌프를 직렬로 연결하여 초기진공도 10⁻⁶ Torr까지 배기한 후 mass flow controller를 이용하여 반응실내로 일정한량의 아르곤 가스를 주입하도록 하였다.

유도 결합 플라즈마의 특성분석은 Langmuir probe

를 이용하여 분석하였으며 그림 2에 실험장치의 개략도를 나타내었다. 본 연구에서 사용된 probe는 6 mm 직경의 알루미늄 튜브에 0.3 mm 직경의 텅스텐 선을 넣은 상태로서 노출된 부분의 길이가 1.4 cm 정도 되도록 하였다. 플라즈마 특성 분석은 이 probe를 웨이퍼로부터 약 1 cm 위에 위치한 곳에서 수평방향을 따라 이동하면서 측정하거나 웨이퍼의 중심부근에서 측정하여 얻어지는 I-V 특성을 분석함으로써 얻을 수 있었다. Probe에 가해지는 전압은 -60 V에서 +60 V이고 각 전압에서 얻어지는 전류는 컴퓨터로 연결된 digital multimeter(HP3440)를 이용하여 측정하였다. 이와 같이 측정된 플라즈마 상수로는 이온 밀도, floating 전위, 플라즈마 전위, 그리고 전자 온도이다. 본 연구에서는 주로 이온밀도를 위주로 분석하였다.

RF 스퍼터 식각특성은 1000 혹은 3000 Å의 산화물을 성장시킨 5인치 실리콘 웨이퍼를 사용하여 일정시간 ICP power와 bias power를 변화시키면서 스퍼터 식각한 후 nanospec을 이용하여 식각된 SiO₂의 두께를 측정함으로써 식각정도 및 식각 균일도를 측정하였다. 이온손상 정도는 각 ICP power와 bias power를 가한 조건에서 1000 Å의 SiO₂를 제거하는데 걸리는 시간 동안 실리콘 웨이퍼를 플라즈마에 노출시킨 후 각 웨이퍼의 표면에 Au Schottky 다이오드를 형성하여 HP4145 semiconductor parameter analyzer로 leakage current를 측정함으로써 그 이온손상 정도를 예측하였다. 이 Schottky 다이오드의 Au 접촉은 1 mm 지름의 Au dot를 약 1000 Å의 두께로 shadow mask를 이용하여 50~100 Ωcm의 비저항을 갖는 n형 실리콘 웨이퍼 표면에 증착하여 형성하였고 ohmic 접촉은 실리콘 웨이퍼의 뒷면에 Al을 증착하여 형성하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 유도 결합 플라즈마의 특성분석 결과

ICP power와 bias power의 변화에 따른 이온밀도의 변화를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 ICP power가 100 W에서 300 W로 증가함에 따라 이온밀도는 $1.7 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ 에서 $4.5 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ 로 3배 가까이 선형적으로 증가하는 반면 bias power의 증가에 따른 이온밀도의 증가는 크게 나타나지 않고 있다. 이온화 정도는 10 mTorr에서 아르곤 원자가 약 $3.5 \times$

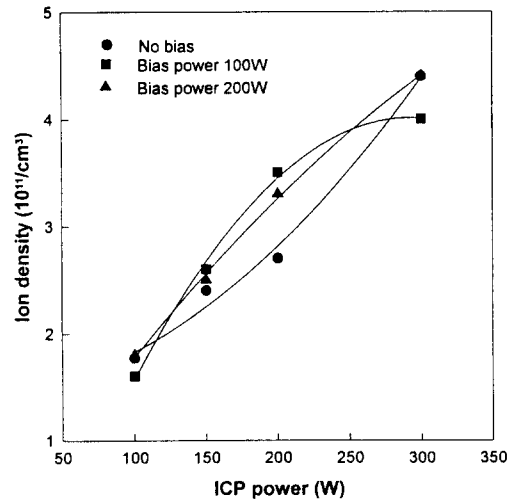


그림 3. ICP power와 bias power의 변화에 따른 이온밀도의 변화(Ar pressure : 10 mTorr).

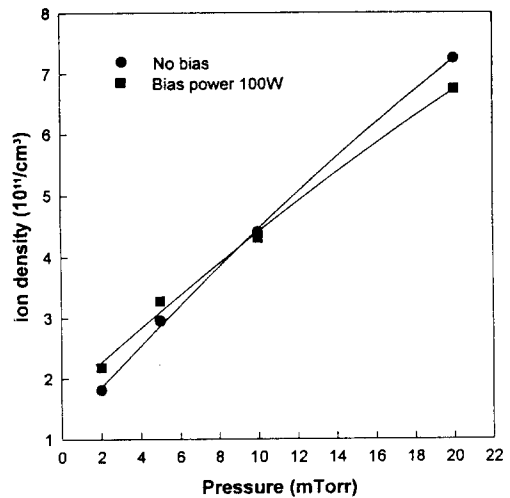


그림 4. Ar pressure에 따른 이온밀도의 변화(ICP power : 300 W).

$10^{14}/\text{cm}^3$ 정도 존재함을 감안할 때 약 10^3 정도의 이온화가 진행된 것을 알 수 있으며 이와 같은 이온화율은 다른 문헌에서 보고되고 있는 유도성 결합 플라즈마의 이온화율과 거의 일치하고 있다. 반면에 용량성 결합으로 얻어지는 이온화율은 문헌적으로 약 $10^5 \sim 10^4$ 정도로 알려져 있으므로 결과적으로 각각 같은 power를 가한 경우 코일에 의한 유도성 결합에 의해 발생된 플라즈마의 이온밀도가 웨이퍼가 놓이는 전극에 의한 용량성 결합에 의해 발생된 플라즈마의 이온

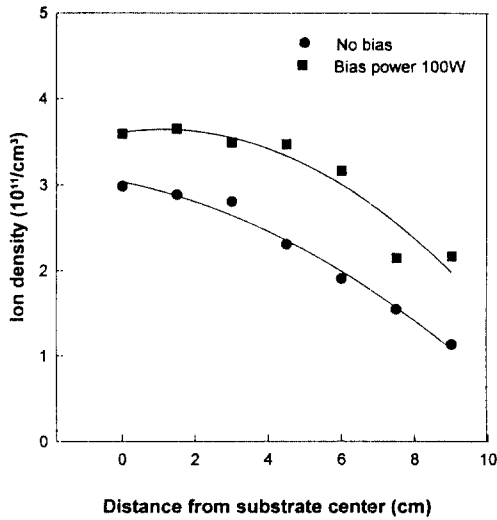


그림 5. 웨이퍼의 반경방향에 따른 이온밀도의 변화(Ar pressure : 10 mTorr, ICP power : 200 W).

밀도에 비해 상당히 큰 것을 알 수 있다. 따라서 그림 2에 보이는 바와 같이 이온밀도의 증가는 주로 ICP power, 즉 코일에 가한 power에 주로 의존하는 것으로 나타나게 된다.

그림 4에 일정 ICP power(300 W)하에서의 Ar pressure에 따른 이온밀도의 변화를 나타내었다. 압력이 증가함에 따라 이온화될 수 있는 아르곤 중성자의 양이 증가함으로 이에 따라 이온밀도가 증가하게 된다. 그러나 압력이 약 10배 증가할 때 이온밀도는 약 3.5배 증가하므로 이온화율은 압력이 증가함에 따라 떨어지는 것을 알 수 있다. 그림 5에는 일정한 ICP power(200 W) 하에서의 웨이퍼의 반경방향에 따른 이온밀도의 분포를 나타내고 있다. 웨이퍼 주변에서 중심으로 갈수록 이온밀도는 증가함을 보여주고 있는데 이와 같이 중심부에서 이온밀도의 최대치를 나타내고 있는 것은 반응로 내벽에의 이온들의 충돌로 인한 손실과 코일의 나선형 모양에 의한 영향으로 사료되며 이는 코일의 모양을 나선형이 아닌 중심부가 없는 1-turn 형태로 개조함으로써 이러한 현상을 방지하고 이온밀도의 균일도를 향상시킨 연구 결과가 보고되고 있다[19]. 또한 이온밀도가 bias power를 가하지 않은 경우가 중심으로부터 6 cm 지점에서 약 0.5배, 100 W를 가한 경우가 약 0.86배로 감소하고 있는 것으로 나타나고 있다. 따라서 bias power를 가한 경우에 있어

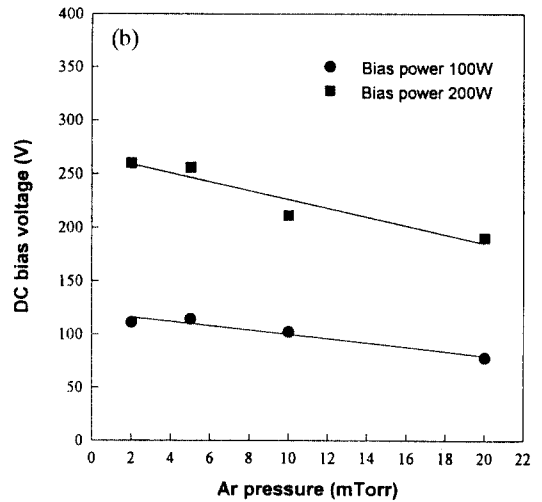
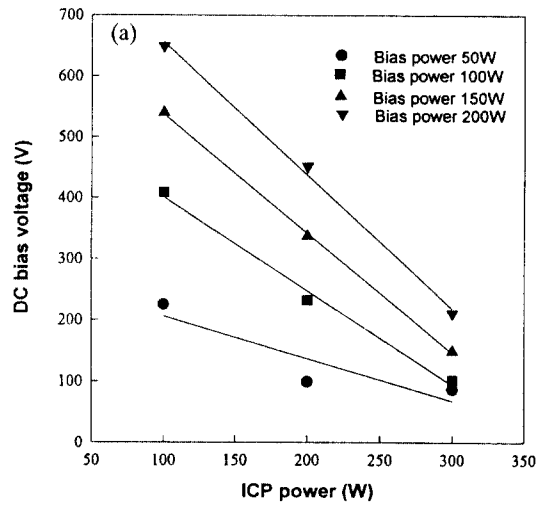


그림 6. (a) ICP power와 bias power에 따른 DC bias 전압의 변화(Ar pressure : 10 mTorr), (b) Ar pressure에 따른 DC bias 전압의 변화(ICP power : 300 W).

서 가하지 않은 경우보다 웨이퍼 주변의 이온밀도의 균일도가 우수하게 나타남을 알 수 있다. 이는 bias power를 가함으로써 생성되는 웨이퍼 주변의 전장으로 인하여 이온밀도가 균일화된 것이 아닌가 사료된다.

3.2. SiO₂ 스퍼터 식각 속도 및 균일도

식각 속도의 변화에 가장 큰 영향을 미치게 되는 요소로는 이온밀도의 변화와 DC self 바이어스 전압의 변화가 있다. 이중 DC self 바이어스 전압의 변화를

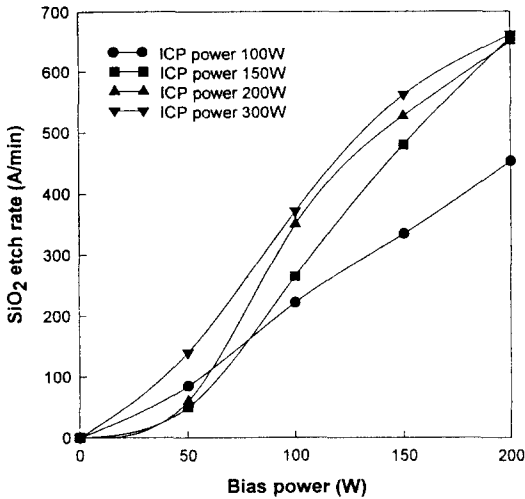


그림 7. ICP power와 bias power에 따른 SiO₂ 식각속도의 변화(Ar pressure : 10 mTorr).

high voltage probe(Tektronix P6015A)로 측정 한 결과가 그림 6에 나타나있다. 그림 6(a)에는 ICP power와 bias power의 증가에 따른 DC 바이어스 전압의 변화를 나타내고 있는데 그림에서 볼 수 있듯이 ICP power의 감소에 따라, bias power의 증가에 따라 DC 바이어스 전압은 선형적으로 증가함을 보이고 있다. 그림 6(b)에는 Ar pressure에 따른 DC 바이어스 전압의 변화를 보이고 있는데 ICP power와 bias power가 일정한 조건에서는 압력이 증가함에 따라 약간의 감소를 보이고 있으며 큰 변화는 나타나고 있지 않다. 이와 같은 DC 바이어스 전압의 변화는 기관에 입사하게 되는 하전입자의 에너지, 즉 기관과 충돌하는 이온 에너지에 큰 영향을 미치게 되므로 이온수상에 의한 leakage current의 변화에도 밀접한 영향을 미치게 된다.

ICP power 및 bias power 증가에 따른 SiO₂ 식각 속도를 그림 7에 나타내었고 그림 8에는 웨이퍼내 각 위치에 따른 SiO₂ 식각 속도의 변화와 이에 따른 균일도의 변화를 나타내었다. 그림 7에서 보듯이 bias power의 증가에 따라 식각 속도는 큰 증가를 나타내고 있으며 이는 그림 3에서 보듯이 bias power의 증가에 따른 이온밀도의 변화는 적으므로 그림 6(a)에 나타나 있는 DC 바이어스 전압, 즉 웨이퍼에 입사하는 이온 에너지의 증가에 의한 스퍼터 속도의 증가에 의한 것으로 사료된다. 또한 ICP power의 증가에 따라서도 어느

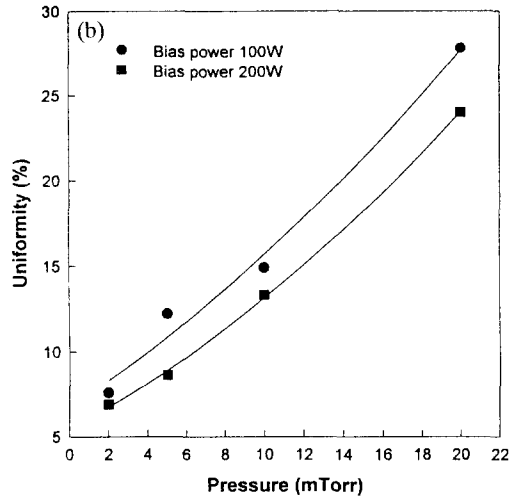
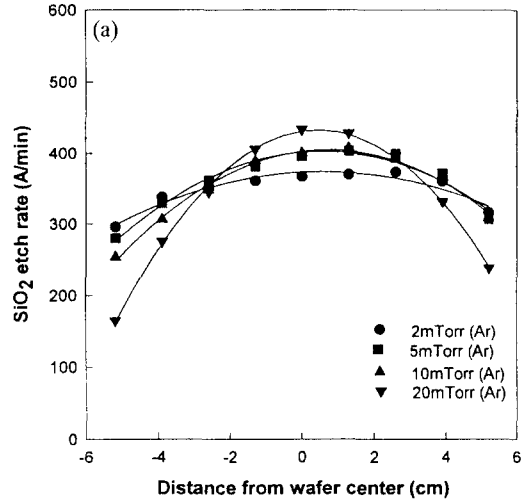


그림 8. (a) 웨이퍼의 반경방향에 따른 식각속도의 변화 (ICP power : 300 W, bias power : 100 W), (b) Ar pressure의 증가에 따른 균일도의 변화(ICP power : 300 W).

정도의 식각 속도의 증가를 볼 수 있는데 이는 그림 6(a)에서 보듯이 ICP power의 증가에 따라 DC 바이어스 전압은 감소하나 그림 3에 나타나 있는 이온밀도의 큰 증가, 즉 웨이퍼에 입사하게 되는 이온밀도의 큰 증가에 의한 것으로 사료된다.

그림 8(a)는 웨이퍼의 반경방향에 따른 식각 속도를 나타내었고 그림 8(b)는 균일도의 변화를 나타낸 것으로 Ar pressure가 낮을수록 또한 bias power가 증가할수록 식각 균일도가 향상되고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 식각 균일도의 변화는 그림 5의 웨이퍼의 반

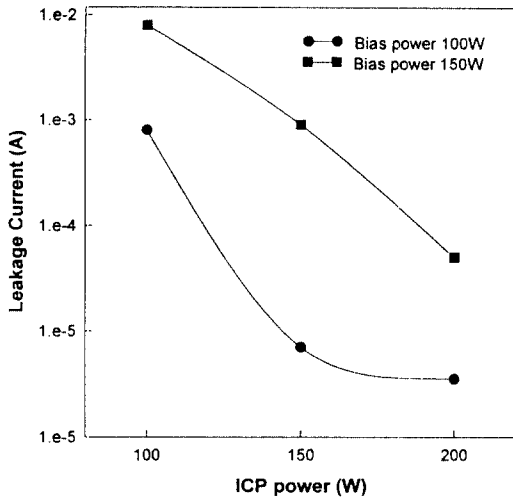


그림 9. ICP power와 bias power의 변화에 따른 leakage current의 변화(SiO₂ 1000Å 식각을 기준으로 각 조건에서의 식각 시간을 결정하였다. Ar pressure : 10 mTorr).

경향함에 따른 이온밀도의 변화와 일치한다. 따라서 웨이퍼 상의 SiO₂ 식각 균일도는 웨이퍼 바로 상단의 이온밀도를 균일하게 하여야만 향상시킬 수 있으며 이와 같은 균일한 이온밀도는 낮은 압력에서 얻어질 수 있음을 알 수 있다.

3.3. RF 스퍼터 식각에 의한 이온손상

위의 여러 조건에서 1000Å의 일정한 SiO₂를 식각하는 ICP power와 bias power 조합의 조건을 선별하여 n형 실리콘을 식각하고 이 식각된 실리콘 표면에 앞서 실험방법에서 논한 바와 같이 Au Schottky 다이오드를 제작하여 I-V 특성을 측정함으로써 실리콘 표면의 이온손상 정도를 측정하였다. 이온손상의 척도로서 Au Schottky 다이오드의 leakage current를 취하였으며 이에 대한 결과를 그림 9에 나타내었다. 그림에서 보듯이 ICP power를 증가함에 따라 leakage current는 지속적으로 감소하고 있음을 알 수 있으며 bias power가 낮을수록 역시 leakage current가 감소함을 알 수 있다. 그림 6(a)에서 볼 수 있듯이 이러한 leakage current의 변화는 DC 바이어스 전압의 변화와 밀접한 관계를 갖고 있음을 알 수 있다. 이는 DC 바이어스 전압이 증가하게 되면 스퍼터 식각시 웨이퍼에 입사하는 아르곤 이온의 에너지가 크게 증가하므로 이에 따라 이온손상의 정도도 증가하는 것으로 사료

된다. 따라서 실리콘 표면의 손상은 ICP power를 최대화하고 bias power를 최소화하는 조건에서 얻어짐을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 저온, 저압의 고밀도 플라즈마 소스의 한 종류인 평판형 유도결합 플라즈마 소스를 이용하여 RF 스퍼터 식각 장비를 제작하여 이의 플라즈마 특성을 분석하고 SiO₂ 식각 속도 및 균일도, 그리고 이온손상의 정도를 측정하였다. 연구결과 이 평판형 유도결합 플라즈마를 이용하여 최소한 1×10¹¹/cm³ 이상의 고밀도 플라즈마가 얻어짐을 알 수 있었고 이러한 유도결합을 일으키기 위한 ICP power와 웨이퍼에 이온에너지를 조절하기 위한 bias power를 변화시킴으로써 비교적 낮은 power에서 600Å/min의 높은 식각속도를 얻을 수 있었다. SiO₂ 식각 균일도는 Ar pressure를 낮춤에 따라 약 2 mTorr 정도에서 5% 주변으로 크게 향상되었고 이러한 식각 균일도는 웨이퍼 바로 윗부분에서 측정된 이온 밀도와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다. 또한 Au Schottky 다이오드를 제작하여 leakage current를 측정한 결과 ICP power를 최대화하고 bias power를 최소화하는 조건에서 이온손상이 가장 낮음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. M. E. Day, M. Delfino and W. Tsai, *Extended Abstracts*, Electrochem. Soc, Vol. 93-1, Spring Meeting (Honolulu, Hawaii, 1993), p. 1264.
2. M. Delfino, M. E. Day and W. Tsai, *Extended Abstracts*, Electrochem. Soc, Vol. 93-1, Spring Meeting (Honolulu, Hawaii, 1993), p. 1265.
3. T. P. Schneider, J. S. Montgomery, Y. L. Chen, D. M. Maher and R. J. Nemanich, *Extended Abstracts*, Electrochem. Soc, Vol. 93-2, Fall Meeting (NewOrleans, Louisiana, 1993), p. 538.
4. S. Salimian and M. Delfino, *J. Appl. Phys.* **70**(7), 3970 (1991).
5. M. Delfino, S. Salimian, D. Hodul, A. Ellingboe and W. Tsai, *J. Appl. Phys.* **71**(2), 1001 (1992).
6. F. P. Steiner, E. Beck and J. Ramn, *Proceedings of the ninth symposium on plasma processing*, ed. by G. S. Mathad and D. W. Hess, Electrochem.

- Soc., Vol. 92-18, (Pennington, NJ, 1992), p. 254
7. A. J. Perry and R. W. Bosewell, *Appl. Phys. Lett.* **55**(2), 148 (1989).
 8. A. J. Perry, D. Vender and R. W. Bosewell, *J. Vac. Sci. Technol.* **B9**(2), 310 (1991).
 9. R. Bosewell and D. Henry, *Appl. Phys. Lett.* **47**(10), 1095 (1985).
 10. R. Bosewell and R. K. Porteous, *J. Appl. Phys.* **62**(8), 3123 (1987).
 11. C. W. Jurgensen, R. S. Hutton and G. N. Tayler, *J. Vac. Sci. Technol.* **B10**(6), 2543 (1992).
 12. D. Flamm, *Solid State Technol.* March, 47 (1991).
 13. M. C. Vella, *Solid State Technol.*, September, 95 (1990).
 14. D. Henry, J. M. Fracou and A. Inard, *J. Vac. Sci. Technol.* **A10**(6), 3426 (1992).
 15. J. Amorim, H. S. Maciel and J. P. Sudano, *J. Vac. Sci. Technol.* **B9**(2), 362 (1991).
 16. J. S. Ogle, United States Patent 4,948,458, Aug. 14 (1990).
 17. J. Hopewood, C. R. Guarnieri, S. J. Whitehair and J. J. Cuomo, *J. Vac. Sci. Technol.* **A11**(1), 147 (1993).
 18. J. Hopewood, C. R. Guarnieri, S. J. Whitehair and J. J. Cuomo, *J. Vac. Sci. Technol.* **A11**(1), 152 (1993).
 19. T. Fukusawa, T. Nouda and A. Nakamura, *J. J. Appl. Phys.* **32**, 6076 (1993).
 20. B. N. Chapman, *Glow Discharge Processes* (John Wiley & Johns, New York, 1980).