Journal of the Korean Ceramic Society
Vol. 24, No. 2, pp. 170 ~ 178, 1987.

PECVD공정 조건의 질화실리콘 박막특성에 대한 효과

이종무 · 이철진*
인하대학교 공과대학 금속공학과
* 삼성반도체통신 주식회사
(1987년 2월 3일 접수)

Effects of PECVD Process Parameters on the Characteristics of SiN Thin Film

Chong-Mu Lee and Chul-Jin Lee*
Dept. of Metallurgical Eng., Inha Univ.
*Samsung Semiconductor & Telecommunications Co. LTD.
(Received February 3, 1987)

요 약

PECVD-SiN막의 증착공정 매개변수들에 따른 막특성의 변화경향을 조사하고 최적공정조건을 결정하였다.

SIN막의 굴절율은 기판온도와 압력의 증가, 그리고 rf-power, NH_3/SiH_4 가스비 및 전체가스유량의 감소에 따라 증가하였다. BHF 에칭속도와 증착속도는 대체로 굴절율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 막의 스텝카버리지는 증착속도와 압력에는 큰 영향을 받지않고 rf-power와 NH_3/SiH_4 가스비의 증가에 따라 두텁이 향상되었다.

또한 이들 막특성과 막두께의 균일도를 고려하여 최적 공정매개변수를 결정하였다. 이 조건하에서 증착된 막의 굴절율은 2.06이었다.

ABSTRACT

Changes of the properties of PECVD-SiN film with the variation of deposition process parameters were investigated and optimum process parameters were determined.

The refractive index of the film increased with increasing substrate temperature and pressure, and decreasing rf-power, NH_3/SiH_4 gas ratio and total gas flow. BHF etch rate and deposition rate show a decreasing tendency with increasing refractive index. The step coverage of the film was not affected much by deposition rate and pressure, but improved apparently with increasing rf-power and NH_3/SiH_4 gas ratio.

Also the optimum process parameters were determined by considering the characteristic properties as well as thickness uniformity of films. The refractive index of the film deposited under this condition was 2.06.

I. 서 론

질화실리콘(SiN)은 오늘날 반도체 소자의 표면 보호막 재료로 가장 각광받고 있는 재료중의 하나이다. 그동안 그러한 목적의 재료로 많이 사용되어 오던 SiO_2, PSG (Phosphosilicate Glass) 등에 비해 내습성, 기계적 강도, 유전강도, 알칼리 이온 침투 방지효과, 핀홀 등의 면에서 더 우수하므로[1~5] 차츰 표면보호막 재료의 대종을 이루어가고 있다. SiN막은 다른 CVD법으로도 증착(deposition) 할 수 있지만 표면보호막으로는 PECVD (Plasma Enhancement Chemical Vapor Deposition) - SiN를 가장 많이 사용한다. 그것은 PECVD법에서는 300℃ 정도의 저온에서 도포할 수 있어 상부배선층으로 주로 사용되고 있는 Al막에 영향을 적게 주기 때문이다. PECVD-SiN를 위한 가장 일반적인 반응물질은 SiH_4와 NH_3로서 이들을 보통 알곤이나 질소로 희석시켜 사용한다. HTCVD (High Temperature CVD) - SiN는

$$3\,SiH_4 + 4NH_3 \rightarrow Si_3N_4 + 12H_2$$

의 반응식에 따라 형성되므로 양론적인 Si_3N_4의 조성을 가진다. 그러나 PECVD-SiN에서의 Si/N비는 일정하지 않다. 보통 Si의 함량이 양론적인 비보다 더 많으며 15~30%의 수소를 함유하기 때문에 PECVD-SiN는 $Si_x H_y N_z$로 표시할 수 있다.[3,6]

SiN막질은 다른 절연막의 경우와 같이 절연내압, 경도, 스트레스 분포, 스텝카버리지(step coverage)등의 특성에 의해 평가할 수 있는데 이들 특성은 막의 굴절율, 증착속도, BHF산(buffered hydrofluoric acid) 에서의 에칭속도등에 간접적으로 반영된다. 그런데 굴절율, 증착속도, 에칭속도는 PECVD 공정에서의 rf-power, 압력, 가스유량, 온도와 같은 공정 매개변수에 따라 변하고 또 비교적 쉽게 측정될 수 있는 성질들이다.[3,7]

따라서 상기 공정 매개변수들의 변화에 따른 굴절율, 에칭속도, 증착속도등의 변화를 조사함으로써 우수한 막질을 위한 최적 증착공정 조건을 찾을 수 있을 것이다. 그런데 이러한 공정조건은 증착장비의 종류에 따라 상당한 차이를 보일 수 있다.[3] 1978년 Sinha 등이 웨이퍼(wafer)를 한 매씩 개별적으로 처리하게 되어 있는 bell jar type 장비를 사용하여 PECVD의 공정 매개변수들이 SiN막의 특성에 미치는 영향에 관해서 보고한 바 있다. 그러나 최근에 개발된, 웨이퍼 여러매를 한꺼번에 처리하는 batch type PECVD 장비에 대해서는 아직까지 그러한 내용에 관하여 보고된 바없다. 반도체 소자에서의 박막(thin film)의 질은 소자의 신뢰성에 큰 영향을 미치며, 장비의 구조나 막성장 방식의 차이에 따라 막질이 크게 달라질 수 있음을 생각할 때 batch type장비에 대해 이러한 내용을 새로이 조사하는 것은 큰 의의를 갖는 일이라 하겠다.

본보고서에서는 그 사용율이 일로 증가 추세에 있는 batch type PECVD 장비를 사용하여, rf-power, 압력, 기판(substrate) 온도, 가스유량비 및 전체 가스유량의 5개 공정 매개변수의 변화에 따른 BHF 에칭속도, 증착속도, 굴절율, 두께의 균일도 및 스텝카버리지의 5개 막특성의 변화 경향을 조사하고 이를 토대로 PECVD-SiN막의 최적 증착 공정 매개변수를 결정하였다.

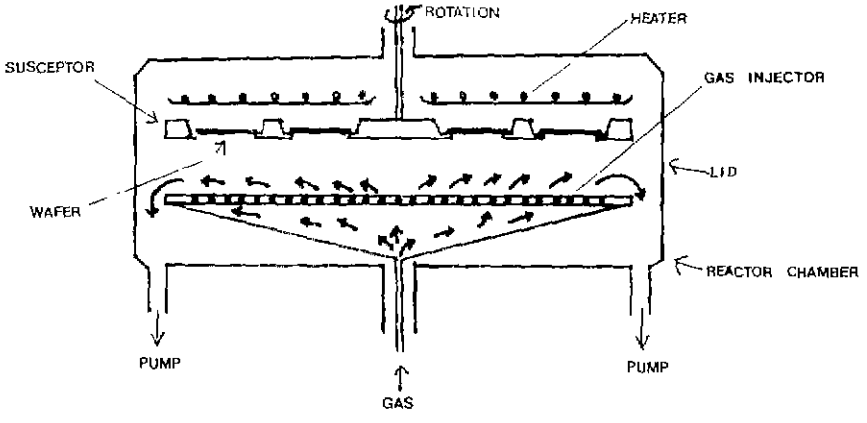

Fig. 1. Schematic of the system used for deposition of PECVD-SiN films.

Ⅱ. 실 험

본 실험에 사용한 PECVD 장비(VDS 5000)의 반응용기 구조는 Fig. 1과 같다.

반응로부에 설치된 고압의 전극은 상하구동기구에 의해 전극간격을 3.0～5.5 cm 범위내에서 조절 가능하다. susceptor 는 회전구동부를 가지고 있으며 1～5 rpm으로 임의의 설정이 가능하다. susceptor는 직경 74 cm의 원형판으로 내주를 따라 7개, 외주를 따라 13개의 4인치 웨이퍼를 장착할 수 있다. susceptor의 가열은 susceptor 뒷면에 부착되어 있는 고리형의 히터에 의해 행해진다. 히터는 세부분으로 나누어져 제어된다. 가스는 가스분출기에 있는 수많은 구멍을 통하여 반응로내에 도입된다. 웨이퍼는 표면이 아랫쪽을 향하도록 susceptor 내의 소정의 위치에 자동으로 올려진다.

먼저 직경 4인치의 Si 웨이퍼들을 장비내에 넣고 질소기체만을 사용하여 장비내부를 충분히 세척한 다음 SiH_4, NH_3 및 N_2 분위기내에서 약 1시간동안 증착하여 6000 Å두께의 SiN막을 얻었다. 이때 증착공정 매개변수들을 한가지씩 바꾸어 여러 종류의 시편을 준비하였다.

한편, 스텝카버리지 측정을 위한 시편들은 Fig. 2와 같은 스텝을 가진 금속배선의 pattern이 형성되어 있는 Si 기판위에 6000 Å두께의 PECVD-SiN막을 증착함으로써 준비하였다.

이렇게 증착된 SiN막들에 대한 굴절율은 Gaetner 사의 ellipsometer 로, 두께는 Nanospec 사의 nanometer 로 각각 측정하였다. 막두께의 균일도는 susceptor 의 내주에 위치한 웨이퍼를 임의로 선택 하고, 웨이퍼 내의 5개 지정된 위치에서 두께를 측정하여 결정하였다. 에칭속도는 30℃의 7 : 1 BHF 에서 에칭하여, 에칭전후간의 막두께의 차를 에칭시간으로 나누어 줌으로써 구하였다. 증착속도 역시 두께와 증착시간으로부터 구하였다.

한편, 스텝카버리지는 막들의 스텝에 대한 SEM 사진으로부터 자로 재어 측정하였다.

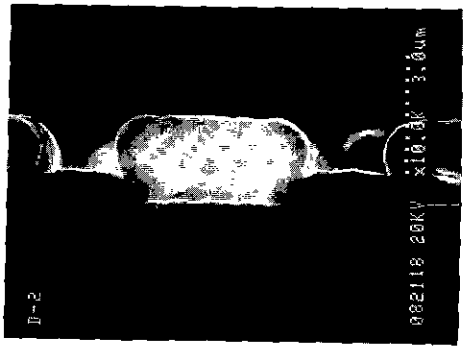

Fig. 2. SEM photograph of the step coverage by 6,000 Å thick SiN film on the Al line.

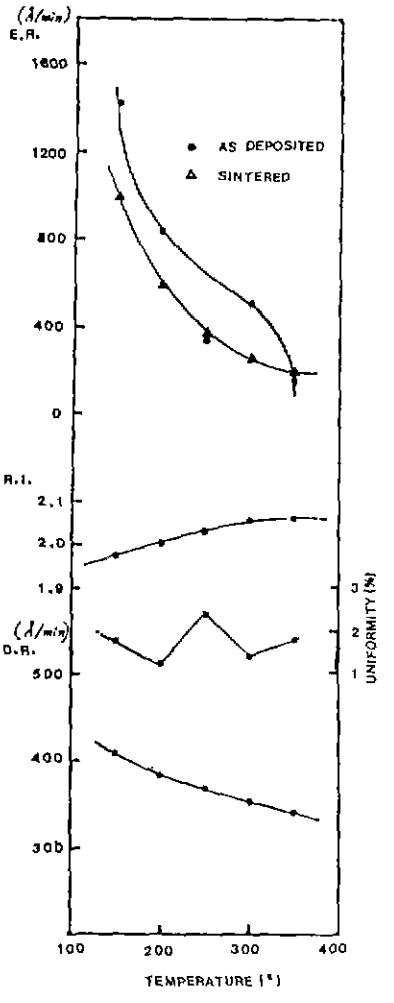

Fig. 3. Effect of temperature on the properties of PECVD-SiN films (E.R. : etch rate, R.I. : refractive index, D.R. : deposition rate, rf-power = 1.09 Kw, pressure = 0.35 torr, NH_3 flow rate = 200 SCCM, SiH_4 flow rate = 200 SCCM, N_2 flow rate = 1,900 SCCM).

Ⅲ. 결과 및 고찰

A. 공정 매개변수들의 효과

(1) 기판온도(substrate temperature)

조사된 기판온도* 범위는 150～350 ℃이다. 이때 rf-power는 1.09 kw, 압력은 0.35 torr, NH_3, SiH_4 및 N_2 유량은 각각 200, 200 및 1900 sccm으로 유지하였다.

Fig. 3은 기판온도에 따른 박특성의 변화를 보인 것으로 기판온도가 증가됨에 따라 에칭속도(E.R : etch rate)는 크게 감소하고, 증착속도(D.R : deposition rate)또한 직선적으로 저하하며 굴절율(R.I : refractive index)은 증가하는 반면, 박두께에서의 균일도는 확실한 경향을 파악하기 어렵다. 여기서 균일도는 두께의 균일한 정도를 나타낸 것으로 이 값이 낮을수록 더 균일함을 뜻한다.

As-deposited 시편의 경우, 기판온도가 150 ℃로 부터 350 ℃로 증가됨에 따라 에칭속도는 1410 Å/min로부터 150 Å/min로 무려 9배이상 떨어져 PECVD공정시 온도가 박특성에 미치는 영향이 얼마나 큰지를 잘 나타내 주고 있다. 에칭속도의 저하는 박특성이 치밀함을 의미하며, 증착속도가 저하하고 굴절율이 증가하는 것도 비슷한 의미를 갖는 일관성있는 변화경향이라 하겠다. 에칭속도, 증착속도 및 굴절율에서의 이와같이 큰 변화는 온도의 증가에 따라 막내의 수소함량이 감소하여 박특성이 더 치밀해지기 때문인 것으로 풀이된다. 다른 한 종류의 시편은 sintered 시편으로, 이것은 4.5% H_2와 95.5% N_2 분위기에서 400 ℃로 50분간 유지한 것이다.(이후의 sintered 시편들은 모두 동일한 열처리를 받은 것들임.) 조사된 전온도범위에 걸쳐 sintered 시편이 as-deposited 시편에 비해 대체로 더 낮은 에칭속도를 나타내며, 특히, 저온구간에서 차이가 더 크다. 이것 역시 소결 처리에 의해 막내의 수소함량이 저하된데 기인하는 것으로 생각된다.

Fig. 4는 기판온도의 변화에 따른 스텝 카버리지의 변화를 보인 것이다. 이 그림에서 원은 H_S/H_T 비, 삼각형은 H_C/H_T 비, 사각형은 H_B/H_T 비를 나타내며, H_T, H_S, H_C 및 H_B 각각은 trench의 윗면, 측면, 구석 및 바닥부분에서의 박두께를 나타낸다.(이후의 Figs. 6, 8, 10에서도 같음).. H_S/H_T, H_C/H_T 및 H_B/H_T 비가 1에 가깝고, 특히, H_C/H_T 비와 H_B/H_T 비가 서로 가까울수록 스텝카버리지가 더 좋다고 할 수 있다.

Fig. 4를 보면, 기판온도의 변화에 따른 스텝카버리지의 변화경향은 뚜렷하지 않다. 본 실험결과에 따르면, 실험오차의 범위내에서 스텝카버리지에 미치는 온도의 효과는 크지 않다 할 수 있을 것이다. 온도가 증가되면, 웨이퍼 표면에서의 원자의 확산이 더욱 활발해지므로 일반적으로 스텝카버리지가 좋아질 것이기 때문이다.[8] 그러나 150～400 ℃의 온도구간에서는 그러한 효과가 너무 적어 뚜렷한 경향이 나타나지 않는 것 같다.

(2) rf-power

rf-power에 따른 박특성의 변화는 Fig. 5에 도시된 바와 같다. 여기서 rf-power는 0.85 Kw (350 V) – 1.30 Kw (500 V)의 범위내에서 변화되었으며, 압력은 0.35 torr, 온도는 300 ℃, NH_3, SiH_4 및 carrier 가스 N_2의 유량은 각각 200, 200, 및 1900 sccm으로 유지되었다.

Fig. 5로부터 증착속도는 rf-power의 증가에 따라 거의 직선적으로 증가하는 반면, 다른 특성들은 뚜렷한 변화를 보이지 않음을 알 수 있다. 굴절율은 rf-power가 0.85 Kw로부터 1.00 Kw로 증가됨에 따라 약 0.6 정도 저하되었으나 rf-power를 1.0 Kw이상으로 증가시켰을 때에는 별다른 변화를 보이지 않았다. 에칭속도는 기판온도의 경우에서와 마찬가지로 전체 rf-power 구간에 걸쳐 sintered 시편이 as-deposited 시편에 비해 대체로 약간 더 낮은 값을 보였다.

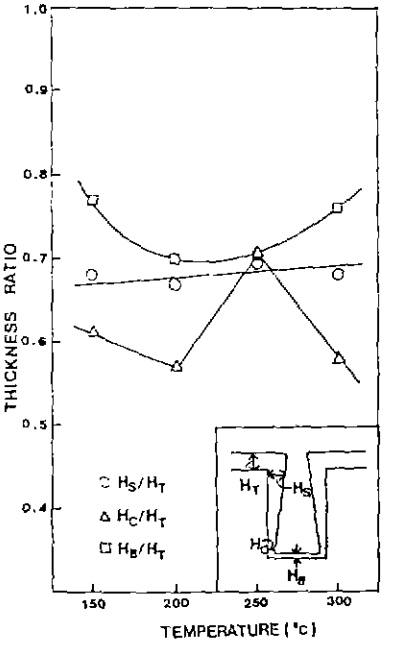

Fig. 4. Dependence of the step coverage on the deposition temperature.

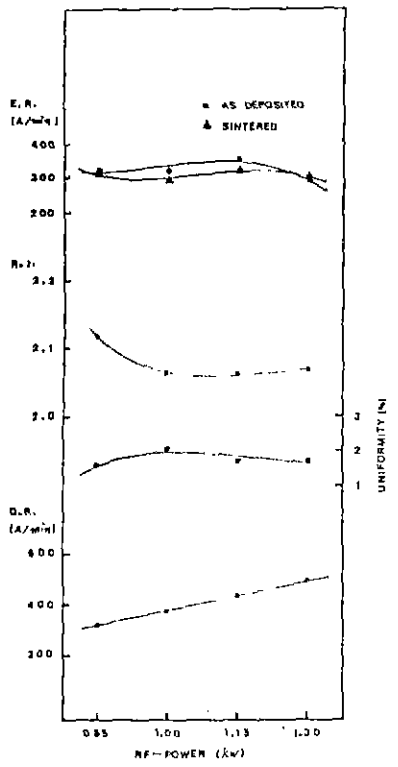

Fig. 5. Effect of rf-power on the properties of PECVD-SiN films.

Fig.6 은 rf-power에 따른 스텝카버리지를 보인 것으로 rf-power의 증가에 따라 스텝카버리지가 뚜렷이 향상됨을 보여주고 있다. rf-power는 반응기체가 플라스마 상태로 변하고, 플라스마를 구성하는 분자가 표면에 도달하는데 필요한 에너지를 공급한다. 따라서 rf-power가 증가됨에 따라 반응기체의 분자수가 증가하며 기체분자가 스텝의 구석진 부분에 도달할 확률이 증가되어 스텝카버리지가 향상되게 된다. 또한 rf-power의 증가에 따라 기체분자가 표면에 부딪히는 속도가 더 커지며, 따라서 표면에서 튀어나갈 가능성이 높아진다.(sticking coefficient < 1)[8] 기체분자가 잘 도달되지 않는 스텝의 구석부분에도 반응기체분자가 도달하게 되어 스텝카버리지가 향상되는 효과도 있을 것으로 생각된다.

(3) NH_3/SiH_4 가스비

Fig.7은 NH_3/SiH_4 가스비의 변화에따른 막특성의 변화를 나타낸 것이다. 이때 사용한 rf-power 는 1.09 Kw, 온도는 300℃, NH_3, SiH_4 및 N_2를 합한 총가스유량은 2,300 sccm이었으며, NH_3/SiH_4 가스

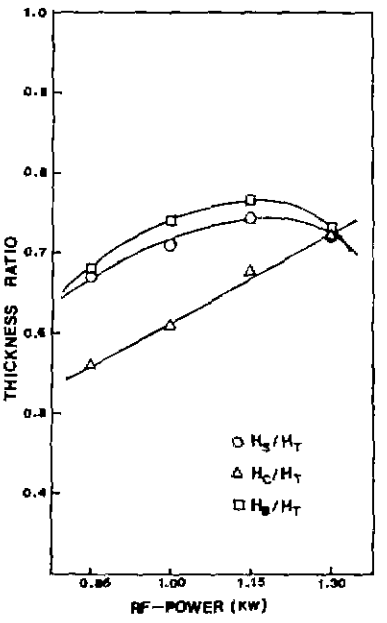

Fig. 6. Dependence of the step coverage on the rf-power

비는 0.5부터 3.0까지 0.5 단위로 변화시켰다.

에칭속도는 포물선적으로 뚜렷이 증가하는 반면, 증착속도에는 거의 변화가 없다. Sinha[3] 의 보고에 의하면, NH_3/SiH_4 비가 증가함에 따라 에칭속도는 증가하는 반면, 증착속도는 오히려 감소했다.한다. 굴절율은 에칭속도의 변화와 일관성있게 뚜렷한 감소경향을 나타내었다. SiH_4에 대한 NH_3 가스비의 증가는 Si/N 비의 증가를 의미하며, Si/N비는 막의 굴절율에 주로 반영되는 것으로 보인다. 막두께에서의 균일도는 그다지 변화하지 않으나 NH_3/SiH_4 비가 0.5일 때는 균일도가 약 1.4%로서 NH_3/SiH_4 비가 1.0-3.0인 범위에서의 균일도 0.7%에 비해 두배이다. 즉, NH_3/SiH_4 비가 너무 낮으면, 막두께의 분포에 대한 균일도가 나빠진다. NH_3/SiH_4 비 < 1 인 경우는 Si/N비가 Si_3N_4에 대한 Si/N 값인 0.75에 비해 매우 크다.(Si/N > 1.25). 이 조성의 막에서는 과잉의 Si이 석출되어 높은 굴절율과 낮은 에칭속도를 나타낸다.[9] 이러한 Si 함량이 높은 SiN 막은 반도체 표면보호막으로서는 부적합할런지 모른다. 그러나 높은 스트레스나 에칭속도 또는 우수한 산화특성을 필요로 하는 피복용도나 표면반사 방지용 피복(antireflection coating) 을 위한 굴절율을 얻는등의 특정한 목적에 적합하다. 또한 Fig.8 로부터는 SiH_4에 대한 NH_3 가스의 양이 상대적으로 증가됨에 따라 스텝카버리지가 향

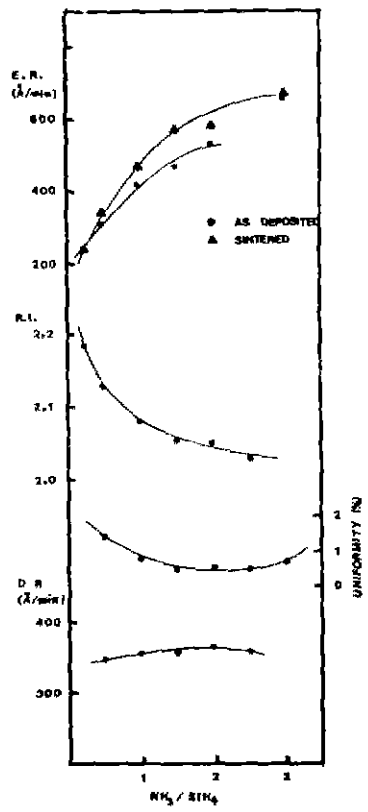

Fig. 7. Effect of NH_3/SiH_4 ratio on the properties of PECVD-SiN films.

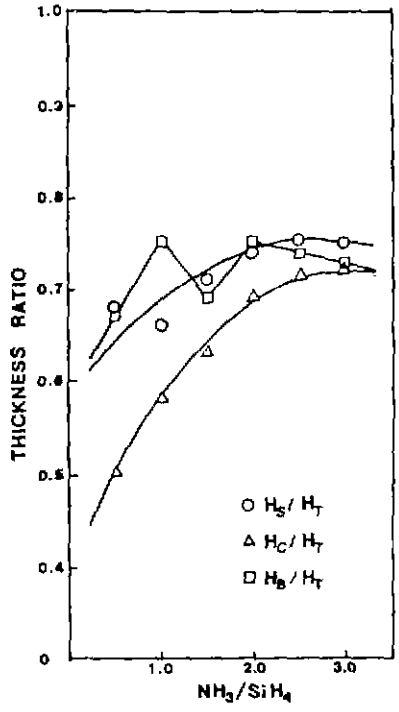

Fig. 8. *Dependence of the step coverage on the* NH_3/SiH_4 ratio

상됨을 알 수 있다.

(4) 압 력 (Pressure)

Fig. 9는 0.35 torr 부터 0.8 torr 범위에서의 압력의 변화에 따른 막특성의 변화를 나타낸 것이다. 이때 기판온도는 300 ℃, rf -power는 1.09 Kw, 총가스유량은 2,300 sccm 으로 유지되었다. 이 그림에 나타난 경향을 보면, 압력의 증가에 따라 에칭속도와 증착속도뿐만아니라 굴절율 또한 대체로 직선적으로 증가하고 있다. 온도나 NH_3/SiH_4 가스비와는 달리 증착속도에 비해 에칭속도의 변화율이 더낮은 것도 특이하다. 앞의 항들에서 본바와 같이 에칭속도 및 증착속도가 증가할 경우 굴절율은 감소하는 것이 일반적이고 보다 일관성있는 경향이다. Sinha [3] 도 압력의 증가에 따라 증착속도가 증가하고 에칭속도에는 별로 변화가 없으며 굴절율은 감소하는 것으로 보고한 바 있다. 그러나 본 연구에서는 실험을 여러차례 반복실시하였음에도 불구하고 Fig. 9에서와 같은 경향을 얻었다. 에칭속도, 증착속도 및 굴절율들이 막의 치밀도만으로 간단히 설명할 수 있는 특성이 아니며 에칭속도와 증착속도의 증가가 굴절율의 감소를 보장하는 것도 아닌 것 같다. 확실한 원인은 알 수 없으나, 이러한 특성 역시 PECVD 장비의 전극구조, 반응용기의 구조, 배기속도, 플라스마(plasma) 발생방식등과 관계있는 것이 아닐까 생각한다. 본 실험에 사용한 장비는 batch type 의 최신 장비인 반면, Sinha [3] 가 사용한 장비는 bell jar 형이고 1978 년이전에 제작된 것이다. 따라서 두 장비사이에는 전극구조, 반응용기의 구조 배기속도, 플라스마 발생방식등의 여러면에서 차이가 있다. 또한 장비의 성능면에서 후자가 전자에 비해 많이 떨어지며 실험 데이터의 정확성 역시 후자의 경우가 더 떨어짐을 지적하고자 한다. 본 실험에서의 SiN 막 균일도는 저압구간에서는 압력의 증가에 따라 증가하나 고압구간에서는 오히려 저하되는 경향을 보인다.

또한, Fig. 10 에 의하면 SiN 막의 스텝카버리지는 압력의 영향을 크게 받지 않는 것 같다. 반응로의 압력을 증가시키면, 반응기체 분자의 수가 증가하게 되며, 따라서 반응속도가 증가하게 된다. 또한, 압력의 증가에 따라 반응기체분자가 스텝의 측벽에서 충돌 반사할 확률이 더 높아진다. 이 두 효과는 스텝카버리지

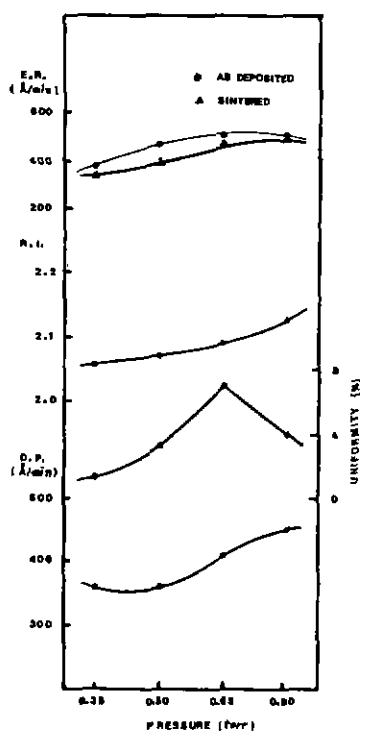

Fig. 9. Effect of pressure on the properties of PECVD-SiN films.

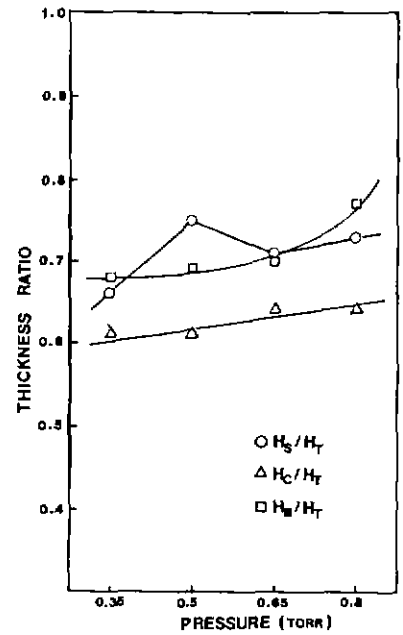

Fig. 10. Dependence of the step coverage on the pressure.

의 향상에 기여한다. 그러나 압력이 증가하면, 이와 동시에 반응기체분자의 평균 자유행로가 감소되는 효과도 나타나는데 이것은 스텝카버리지를 악화시키는 데 기여한다. 결국 상기의 두 상반된 효과가 복합되어 스텝카버리지는 전체적으로 압력의 변화에 크게 의존하지 않는 것으로 볼 수 있다.

(5) 총 가스유량(total gas flow)

Fig. 11은 NH_3, SiH_4 및 N_2를 합한 총 가스유량에 따른 막특성의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 온도는 300℃, 압력은 0.35 torr, rf-power는 1.09 Kw로 유지하고, carrier 가스인 N_2 만을 1600, 1900 및 2200 sccm으로 변화시켜 막특성을 조사하였다.

총가스유량의 증가에 따라 에칭속도와 굴절율은 약간씩 낮아지고, 막두께에서의 균일도는 더 향상되며, 증착속도는 미소하게 증가하는 경향을 보인다. 막특성들은 대체로 총가스유량의 변화에 의해 큰 영향을 받지 않는다고 할 수 있겠다.

또한 본실험에서 대부분의 에칭속도 값이 다른 문헌상의 값들보다 좀 더 큰데 그것은 본실험에서의 에칭액 온도(30℃)가 다른 실험들의 그것(25℃)보다 더 높기 때문으로 생각된다.

B. 도포 공정 조건의 결정

앞에서 5개 공정 매개변수에 따른 PECVD-SiN의 5개 막특성에 관하여 살펴보았다. 조사된 막특성중 에칭속도, 증착속도, 굴절율은 막의 치밀성과 관계되는 유사한 성질(압력의 변화에 대해서는 예외)이므로 편의상 굴절율로 대표하기로 하였다.

SiN에서의 Si/N의 조성비와 굴절율간에는 직선적인 비례관계가 있다. HTCVD(High Temperature Chemical Vapor Deposition)-SiN의 경우는 Si_3N_4의 양론적인 화합물을 이루며, 굴절율은 약 1.97을 나타낸다.[10] 한편, PECVD-SiN의 경우는 Si/N의 비가 일정하지 않으며, 수소의 존재로 인한 구조상의 취약점을 보완하기 위하여 더 높은 굴절율을 얻도록 공정 매개변수를 결정하는 것이 좋을 것이다. 따라서 우리는 굴절율이 가능한 한 높고 스텝카버리지가 우수하며 두께의 균일도가 좋은 공정 매개변수를 찾아야 한다.

그런데 PECVD-SiN막의 굴절율은 대체로 기판온도의 증가, rf-power의 감소, 압력의 증가, NH_3/SiH_4 가스비의 감소 및 총가스유량의 감소에 따라 증가한다. 반면 스텝카버리지는 증착온도와 압력에는 큰 영향을 받지 않고, rf-power와 NH_3/SiH_4 가스비의 증가에 따라 뚜렷이 향상된다. 이와같이 굴절율과 스텝카버리

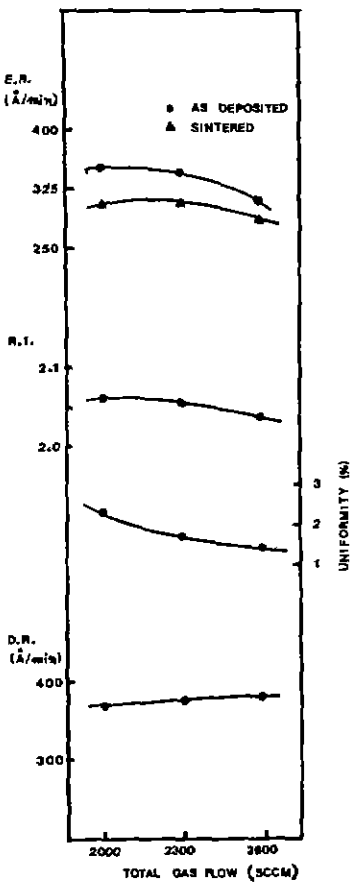

Fig. 11. Effect of total gas flow on the properties of PECVD-SiN films.

지의 두 특성은 서로 상반되는 경향을 나타내며, 증착 공정 매개변수의 결정은 이들 두 특성을 절충하는 선에서 이루어져야 한다. 이런 관점에서 결정된 굴절율은 2.06이며, 이 굴절율에 맞추어 결정된 공정 매개변수들은 다음과 같다.

rf-power = 1.09 Kw(2.08 Å) 기판온도= 300 ℃,
압력= 0.35 torr, NH_3 gas flow = 200 sccm
SiH_4 gas flow = 200 sccm
N_2 gas flow = 1900 sccm

그밖에, 두께의 균일도 면에서 특기할 점은, 조사된 범위내에서, 온도는 250℃, 압력은 0.65 torr, NH_3/SiH_4 비는 0.5, 총가스유량은 2000 sccm일때 균일도가 특히 좋지 않으므로 이 값들을 피하는 것이 좋겠다. 그러나, 앞에서 결정된 공정 매개변수 값들은 모두 두께의 균일도가 우수한 범위에 속한다.

Ⅳ. 결 론

Batch type PECVD장비를 사용하여 PECVD-SiN 막의 증착공정 매개변수들에 따른 막특성의 변화 경향을 조사하고 최적 공정조건을 결정하였다. 굴절율, BHF 에칭속도 및 증착속도의 세 막특성들은 대체로 같은 변화 경향을 나타내었으며, 스텝카버리지와는 상반되는 경향을 보였다. 이들 상반되는 특성들을 절충하여 결정한 공정조건은 굴절율 2.06에 해당하는 것으로 다음과 같다.

기판온도= 300 ℃
re-power = 1.09 Kw (2.08 Å)
NH_3 gas flow = 200 sccm
SiH_4 gas flow = 200 sccm
N_2 gas flow = 1900 sccm
압력= 0.35 torr

이 공정 매개변수 값들에서 얻은 막두께의 균일도 또한 우수하였다.

References

1. R.C.G. Swann, R.R. Mehta and T.P. Cauge, "The Preparation and Properties of Thin Film Silicon-Nitrogen Compounds Produced by a Radio Frequency Glow Discharge Reaction," *J. Electrochem. Soc.*, **114**, 713-717 (1967).
2. Y. Catherin and G. Turban, "Properties of Silicon Nitride Films Produced by r.f. Plasma-activated Chemical Vapor Deposition", *Thin Solid Films*, **41**, 57-60 (1977).
3. A.K. Sinha, H.J. Levinstein, T.E. Smith, G. Quintana, and S.E. Haseko, "Reactive Plasma Deposited Si-N Films for MOS-LSI Passivation", *J. Electrochem. Soc.* **125**, (4), 601-608 (1978).
4. M.J. Helix, K.V. Vaidyanathan and B. G. Streetman, "R.F. Plasma Deposition of Silicon Nitride Layers," *Thin Solid Films*, **55**, 143-148 (1978).
5. K.M. Mar and G.M. Samuelson, "Properties of Plasma Enhanced CVD Silicon Nitride;

Measurements and Interpretations," Solid State Technol., April, 137-142 (1980).
6. W. Kern and R.S. Rosler. *J. Vac. Sci. Technol.*, **14**, (5), 1082-1099 (1977).
7. M. Shibagaki, Y. Horike and T. Yamazaki, "Low Temperature Silicon Nitride Deposition Using Microwave-Excited Active Nitrogen", *Japan J. Appl. Phys.*, **17**, 215-221 (1978).
8. R.M. Levin, K. Evans-Lutterodt, "The Step Coverage of Undoped and P-doped SiO_2 Glass Films", *J. Vac. Sci. Technol.* B1, 1, 54-61 (1983).
9. H.J. Stein, V.A. Wells, and R.E. Hampy, "Properties of Plasma-Deposited Silicon Nitride", *J. Electrochem. Soc.*, **126**, (10), 1750-1754 (1979).
10. M.J. Rand and D.R. Wonsidler, "Optical Absorption as a Control Test for Plasma Silicon Nitride Deposition", *J. Electrochem. Soc.*, **125**, (1), 99-101 (1978).