

새로운 반도체 제조장치의 구성법

= 저비용 · 고생산성 반도체 제조라인 실현을 목표로 =

平山 昌樹 · 大見 忠弘 | 일본 동북대학교

출 전 : 일본 클린룸테크놀로지, 1998. 11., pp. 21-30

번역 : 명 현 국 | 국민대학교

기계자동차공학부 부교수

E-Mail : myong@kookmin.ac.kr

1. 머리말

PC와 디지털 가전제품의 융합일체화와 글로벌네트워크(global network)화의 시대를 맞이하는 반도체 산업계는 문자 그대로 시스템온실리콘(system on silicon)을 구현하기 위해 다종다양한 집적화, 즉 고객 ULSI의 고효율생산방식의 확률을 강요당하고 있다. 월생산 수천 매 규모의 소규모 생산으로 충분히 경제성이 있는 소규모 생산라인 확립이 일본 반도체 산업계의 장래에 대한 활성화를 위해 절대적으로 불가결하다. 즉, 월생산 5000매 정도 규모의 생산라인을 200~300억엔(주: 우리나라 돈으로 환산하면 2000~3000 억원 정도)정도로 설치 가능하게 하고, 유연하게 상황변화에 신속하게 대처할 수 있는 생산방식을 확립하며, 매년 연속해서 진보된 기술을 조속히 채용한 소규모 생산라인을 순차적으로 증설하는 방향, 즉 병렬분산처리 생산방식이 반도체 산업의 앞으로의 모습이다. 또한 수년마다 못쓰게 된 생산라인의 갱신을 가능하게 하는 것이 바람직하다.

이 목적을 실현하기 위해서는 초소형의 매엽(枚葉)처리용 크러스터·툴(cluster·tool) 확립이 제일 먼저 요구된다. 동시에 구조가 간단(저가격으로 생산 가능하고 유지관리가 용이)하고, 충분한 공정

의 균일성을 가지며, 저온에서 고속, 고품질공정이 행해질 수 있어, 공정 결과에 영향을 미치는 모든 매개변수가 어떠한 경우에도 소정 값으로 정확히 제어된 공정장치가 위에 기술한 크러스터·툴에 집적화되어야만 한다.

본고에서는 현상의 크러스터·툴의 문제점과 새롭게 개발된 크러스터·툴에 대해서 기술한다. 또한, 그 구성요소인 새로운 플라즈마 공정장치 및 배기펌프에 관해 소개한다.

1. 현상의 크러스터·툴

플라즈마가 반도체 제조공정에 도입된 당초에는 한번에 복수 매(枚)의 웨이퍼를 처리하는 배치(batch)처리방식이 주류였다. 배치처리방식은 한번에 대량의 웨이퍼를 처리할 수 있기 때문에 높은 생산효율이 얻어지나, 반면에 공정성과 균일성에는 한계가 있다. 64kb DRAM 시대부터 공정기술의 고도화와 웨이퍼의 대규격화와 함께 배치처리방식으로 대응할 수 없는 공정이 나타나, 에칭장치를 시작으로 웨이퍼를 1매씩 처리하는 매엽(枚葉)처리방식이 도입되게 되었다.

현재에는 RIE (Reactive Ion Etching), PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) 을 시작으로 에싱(ashing), CVD, 열처리, 습식세정

등 다수의 공정에 매엽처리방식이 채용되고 있다.

그러나, 매엽처리방식에서는 보다 고성능 공정이 가능해서 균일성도 우수하나, 공정장치 단독으로는 생산효율이 낮다. 공정성능, 균일성 및 생산성을 양립시키기 위해 매엽처리 멀티챔버방식이 1980년대 후반에 제안되어 현재 주류로 되어 있다. 매엽처리 멀티챔버방식에서는 1대의 플랫폼에 복수의 공정 챔버 및 로드락(load lock) 챔버를 접속시킨 크러스터·톨로 동시에 복수 매의 웨이퍼를 처리할 수 있다. 또한, 웨이퍼를 클린룸의 대기에 노출시키지 않고 연속된 복수의 공정을 행할 수 있기 때문에 웨이퍼 반송시 대기로부터 웨이퍼 표면으로의 수분 및 유기물, 입자부착을 억제할 수 있다.

매엽처리 멀티챔버방식은 고성능 LSI 의 고효율 생산을 실현하는데 필요 불가결하여, 향후 점차 널리 도입될 것이나 현상의 크러스터·톨(그림 1 참조)의 구성법에는 다음과 같은 개선의 여지가 있다.

- ① 장치 후트프린트(footprint; 장치전유면적)가 크다.
- ② 공정 챔버가 축대칭 구조가 아니다.
- ③ 게이트밸브를 많이 사용하기 때문에 장치 비용이 많이 든다.

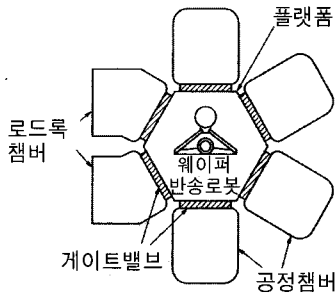


그림 1. 현상의 크러스터·톨의 구성

우선, ①에 관해 클린룸 중의 장치설치구역과 장치반송구역을 축소하기 위해 장치 후트프린트의 축소는 필수이다. 일반적으로 300 mm 웨이퍼 대응 공정장치의 후트프린트는 현상의 200 mm 웨이퍼 대응 공정장치의 1.4배 이하가 아니면 채산성이 없다고 한다. 현상의 크러스터·톨에서는 공정 챔버 및 로드락 챔버가 게이트밸브를 사이에 두고 플랫폼의 측면에 접속되어 있다. 이 때문에 크러스터·톨은 수평방향으로 벌어진 구조로 되어 후트프린트가 커지기 쉽다. 통상, 플랫폼의 하부에는 웨이퍼 반송로봇의 구동기구 및 플랫폼 내부를 진공으로 하기 위한 소형의 터보분자펌프밖에 존재하지 않아 비교적 넓은 공간이 비어 있다. 크러스터·톨의 중앙부 부근에 그와 같은 공간이 존재해도 유지관리 공간으로서는 그다지 의미가 없다.

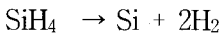
다음 ②에 관해서 웨이퍼는 원형이므로 공정의 균일성을 고려하면 공정 챔버 내면의 구조는 축대칭으로 되어 있는 것이 바람직하다. 축대칭으로 되어 있지 않으면 특히 챔버 크기를 축소할 경우, 플라즈마의 확산 및 챔버 벽면을 흐르는 고주파 전류의 불균일성에 따른 플라즈마의 편향 및 가스흐름의 불균일성에 따른 공정의 웨이퍼면 내 균일성이 손상된다. 현상의 크러스터·톨에서는 공정 챔버 측면에 웨이퍼를 반송하기 위한 긴 슬릿(slot)이 설치되어 있어 전혀 축대칭 구조로 되어 있지 않은 경우가 많다. 이와 같이 현상의 크러스터·톨에는 개선의 여지가 있기 때문에 향후 이 구조는 크게 변화될 것이다.

2. 플라즈마 공정장치가 만족해야만 하는 요소

반도체 플라즈마 공정의 역사는 아직 짧고, 플라즈마 공정장치도 장치고유의 여러 가지 문제를 내

재하고 있다. 따라서, 경험과 직관력에 크게 의존하면서 공정조건의 최적화를 행함으로써 고성능공정을 목표로 할뿐만 아니라, 장치상의 근본적인 문제는 무엇인가, 어떤 요건이 만족하지 않으면 안 되는가를 명확하게 한 후에 요구를 만족할만한 플라즈마장치를 조속히 개발해야만 한다.

CVD와 RIE에서는 웨이퍼의 대규경화 및 공정의 고속화와 함께, 웨이퍼 표면으로부터 단위시간당 방출되는 반응생성물로서의 가스량이 증가하기 때문에 충분한 주의가 필요하다. 일 예로서 Si 박막을 SiH₄ 가스를 원료로 해서 CVD에서 성막하는 경우를 고려하자. 그 반응식은



로 주어진다. Si 단결정 원자밀도는 5×10^{22} 원자/cm³ 이므로, Si를 2 $\mu\text{m}/\text{min}$ 로 성막하면 2×10^{19} 분자/cm²·min의 H₂가 발생한다. 300mm 웨이퍼를 상정하면 1.4×10^{22} 분자, 즉 523sccm의 H₂가 반응생성물로서 방출된다. 양호한 공정을 행하기 위해서는 적어도 5배 이상의 원료가스를 흐르게 할 필요가 있다. 게다가, 실제로는 기판 표면 부근을 흐르지 않고 직접 배기(排氣)되어 버리는 원료가스가 존재하므로 더욱 많은 원료가스를 흐르게 해야한다. 그러나, 감압하에서 이 만큼의 가스유량을 배기시키는 능력을 가진 소형 분자펌프는 존재하지 않는다.

한편, 공정공간의 간격이 넓으면, 기판 표면부근을 흐르지 않고 직접 배기되는 원료 가스량의 비율이 증가한다. 원료 가스의 유량은 펌프의 배기속도로 제한되므로, 공정공간의 간격을 가능한 한 좁게 해서 헛된 가스흐름을 배제시켜야한다. 공정공간의 간격은 CVD에서는 1~3cm가, RIE에서는 기판 중앙부와 끝 부분에서의 압력차이를 고려해서 300mm 웨이퍼에서는 3~5cm가 적당하다. 공정공간의 간격을 좁게 하면, 공정공간으로의 가스 도입법에도 신경을 쓸 필요가 있다. 공정의 균일성을 유지

하기 위해서는 원료가스 밀도 및 반응생성물 밀도가 웨이퍼면 내에서 균일할 것이 필수조건이다. 이 조건은 샤워플레이트를 사용한 웨이퍼면 내에서 균일한 원료가스공급⁽¹⁾과 웨이퍼 주변으로부터 균일한 가스 배기에 의해 비로써 실현된다. 웨이퍼 주변으로부터 균일하게, 게다가 대유량의 가스를 배기하기 위해서는 복수의 분자펌프 또는 배기구를 웨이퍼 주변의 축대칭 위치에 배치해서 공정공간과 펌프간의 가스컨덕턴스를 억제함 없이 배기를 행하는 “병렬배기방식”이 적합하다.

이와 같이 차세대 PECVD 및 RIE에 이용할 수 있는 플라즈마원(源)은 공정공간의 간격을 수 cm 이하로 해도 플라즈마의 균일성을 유지할 수 있고, 또한 샤워헤드를 사용한 가스도입이 가능한 것으로 한정된다. ECR(electron cyclotron resonance) 플라즈마원, 헬리콘과 플라즈마원, 유도결합 플라즈마원 등에서는 기판으로부터 떨어진 부분에서 국소적으로 높은 밀도의 플라즈마가 생성되어, 확산으로 웨이퍼 주변까지 수송된다. 확산에 의해 웨이퍼 주변의 플라즈마의 균일화를 도모하고 있기 때문에 균일성을 얻으려고 하면 공정공간의 간격을 넓힐 수밖에 없다.

다시 말하면 웨이퍼 근방에서 균일하게 플라즈마를 생성함으로써 확산 없이 웨이퍼 주변에 균일한 플라즈마가 얻어지는 것만이 장래의 대구경, 고속 플라즈마 공정용 플라즈마원의 후보로 될 것이다. 제 1 후보는 평행평판형 플라즈마원이다. 평행평판형 플라즈마원에서는 1cm 정도의 좁은 간격에서도 안정되고 비교적 균일성이 뛰어난 플라즈마가 얻어진다. 다른 하나의 후보로서는 레이디얼라인스롯 안테나(radial line slot antenna)^{(2)~(4)}를 이용한 마이크로파 플라즈마원이다. 본고에서는 후자의 플라즈마원과 그 실리콘 저온산화기술로의 응용에 대해서도 간단히 소개하고 싶다.

3. 배기펌프가 만족해야만 하는 요건

성막, 에칭을 시작으로 한 반도체 공정의 대다수는 수 mTorr~수 Torr 압력하에서 행하여지는 감압공정이다. 진공 중에서 행하여지는 공정은 이온 주입 및 FB 뿐이다. 고진공이 요구되는 공정에서는 분자펌프의 도달진공도가 넓고, 저압영역에서 배기 속도가 충분히 클 것이 불가결하다. 이것은 챔버압력이 챔버 내의 오염가스 방출량(챔버 내 탈가스량 + 배기계로부터 역확산되는 가스량)을 배기계의 배기속도로 나눈 값에 비례하기 때문이다. 고진공을 얻기 위해서는 감압율이 크고 도달진공도가 높은 종래형 터보분자펌프가 최적이다. 또한, 고진공 영역에서 터보분자펌프의 배기능력을 충분히 발휘시키기 위해서는 공정영역과 터보분자펌프간의 가스 컨덕턴스를 열화시키지 않는 장치설계가 불가결하게 된다. 챔버 내 표면을 고청정으로 유지함으로써 챔버 내 탈가스량을 억제해야만 하는 것은 말할 필요도 없다.

한편, 반도체 공정의 대부분을 차지하는 감압공정에서는 수 mTorr~수 Torr의 소정 압력에서 공정 분위기의 청정도가 충분히 높을 것이 요구된다. 공정 청정도는 공정 분위기에서 오염가스분자 밀도의 전체가스분자밀도에 대한 비율로 정의된다. 배기계의 배기속도가 가스분자의 종류에 의존하지 않는다고 가정하면 공정 청정도는 챔버 내로의 오염가스 방출량을 Q_c , 공정 가스유량을 Q_p 라 하면 $Q_c / (Q_c + Q_p)$ 로 나타내어 진다. 즉, 감압공정에서 공정 청정도를 향상시키기 위해서는 챔버 내로의 오염가스 방출량을 억제하여 할 수 있는 한 대유량의 공정가스를 흘려보내면 좋다.

공정 분위기의 오염원에는,

- ① 챔버 내 벽 등으로부터의 탈가스
- ② 기관상에 부착해서 들어오는 불순물(주로 수분)

- ③ 가스 배기계로부터 역확산되어 오는 불순물
- ④ 공정 가스중의 잔류 불순물
- ⑤ 공정에서 발생하는 반응생성물

이 예상된다. 이 중, 항목 ④~⑤는 공정을 행하고 있을 때에만 발생하는 오염원이다. 항목 ①은 부식 내성, 플라즈마 내성에 뛰어난 청정한 내면 처리를 행함으로써 줄인다. 항목 ②는 웨이퍼를 대기에 노출시키지 않고 전부 클린드라이에어(clean dry air)나 질소분위기 속을 반송하던지, 공정 챔버 내에 기관을 도입하기 전에 미리 승온(昇溫)에 의해 흡착 수분을 탈리(脫離)시킴으로써 제어할 수 있다.

항목 ③은 유일하게 펌프에 관한 사항이다. 보다 도달진공도가 높은 펌프를 채용하면 배기계로부터 역확산되어 오는 불순물을 줄일 수 있다. 이런 이유로 도달진공도가 높은 터보펌프가 개발되어, 에칭장치를 비롯하여 각종 공정장치에 채용되어 왔다. 그러나, 이 불순물의 역확산은 챔버 내에 가스를 흐르게 함으로써 억제할 수 있다. 예를 들어, He 등 가벼운 가스분자의 역확산에서도 2000 l/sec 클래스의 터보분자펌프에서는 100 sccm 정도의 N₂ 가스를 흐르게 함으로써 완전하게 억제할 수 있다.

따라서, 감압공정에서는 공정중의 불순물 역확산은 문제가 되지 않는다. 문제가 된다고 하면 공정을 행하고 있지 않을 때에 배기계로부터 역확산되어 온 불순물이 챔버 내 벽이나 웨이퍼 표면 등에 부착해서 오염을 일으키는 요인으로 되는 것이다. 그러나, 이것은 공정을 행하지 않고 있는 때에도 챔버 내에 미량의 가스를 흐르게 하는 것으로 해결된다. N₂ 가스를 사용하면 대단한 유지비 증가라는 이이지 않는다. 따라서, 감압공정에 있어서는 분자펌프의 도달진공도가 특히 높을 필요는 없다.

항목 ④에 대해서는 가스의 불순물 농도는 이미 1 ppb 이하가 달성되어 있어 통상 문제는 생기지 않는다. 단지, 특수재료 가스에 대해서는 수 ppm

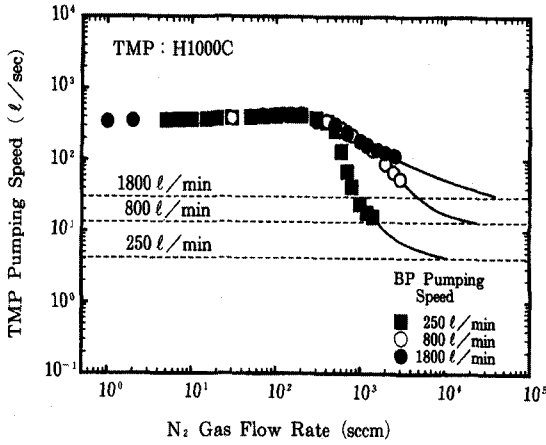


그림 2. 터보분자펌프의 배기특성

이상의 불순물을 함유한 경우도 있기 때문에 개선의 여지가 있다.

주의해야할 것은 백그라운드 진공도가 높은 장치가 공정 청정도가 높은 장치라고 생각하기 쉬우나, 가스를 흘리면서 공정을 행하는 감압공정에서는 백그라운드 진공도가 반드시 공정 청정도의 지표로 되지 않는다는 점이다. 이것은 터보분자펌프 등 분자영역에서 작동하는 펌프에서는 배기속도 및 불순물의 역확산량이 가스유량에 따라 크게 변화하기 때문이다.

그림 2는 공칭 배기속도 1000 l/sec의 터보분자펌프 (일본 세이코精機, H1000C)에 N₂ 가스를 흘려 보냈을 때의 실효 배기속도와 가스유량의 관계이다. 백펌프의 실효 배기속도를 3종류 변화시키며 측정하고 있다. N₂ 가스유량이 300 sccm 정도 이하 (챔버 내 압력으로는 10 mTorr 정도 이하에 상당)에서는 터보분자펌프의 실효 배기속도는 390 l/sec로 거의 일정하다. 실효 배기속도가 공칭 배기속도보다 작은 것은 챔버와 터보분자펌프간의 배관과 펌프 흡입공 부분에 설치되어 있는 보호용 금속망에 따른 가스컨덕턴스의 저하가 원인이다. 가스유

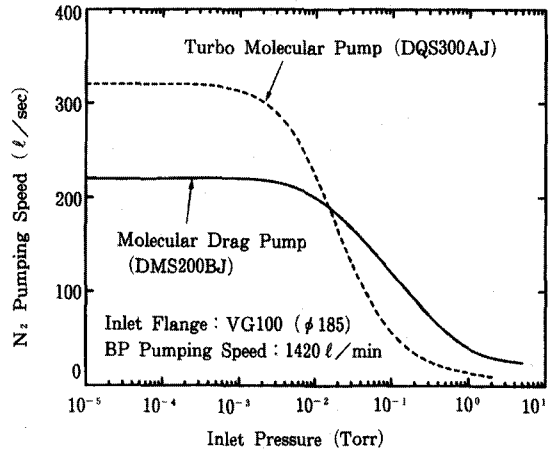


그림 3. 같은 흡기구 플랜지의 터보분자펌프 (turbo molecular pump)와 나사흡 펌프(molecular drag pump)의 배기특성 비교

량이 300 sccm을 초과하면 가스유량의 증가와 함께 실효 배기속도가 급격하게 저하하며, 10000 sccm (챔버내 압력으로는 10 Torr 정도 이하에 상당)의 가스를 흘리면 백펌프의 배기곡선에 거의 근접한다. 즉, 이 영역에서는 터보분자펌프는 하등의 능동적인 동작을 하지 않는다. 현상의 반도체 공정 장치에서는 대유량가스를 흘려보낼 필요성으로부터 펌프의 배기속도가 열화되어 있는 영역에서 사용되는 경우가 많다. 더구나, 웨이퍼가 대구경화되면 공정중에 웨이퍼 표면으로부터 발생하는 반응생성물의 방출량이 증가하기 때문에 보다 대유량 가스를 흘려보내야만 된다. 한편, 장치 소형화의 요청으로부터 펌프를 소형화할 필요가 있어 펌프의 배기속도가 상당히 열화되어 있는 영역에서 사용할 수밖에 없게 된다.

백그라운드 진공도를 향상시키기 위해서는 고진공 영역에서 배기속도가 크고, 도달 진공도가 높은 펌프가 필요하게 된다. 그러나, 백그라운드 진공도

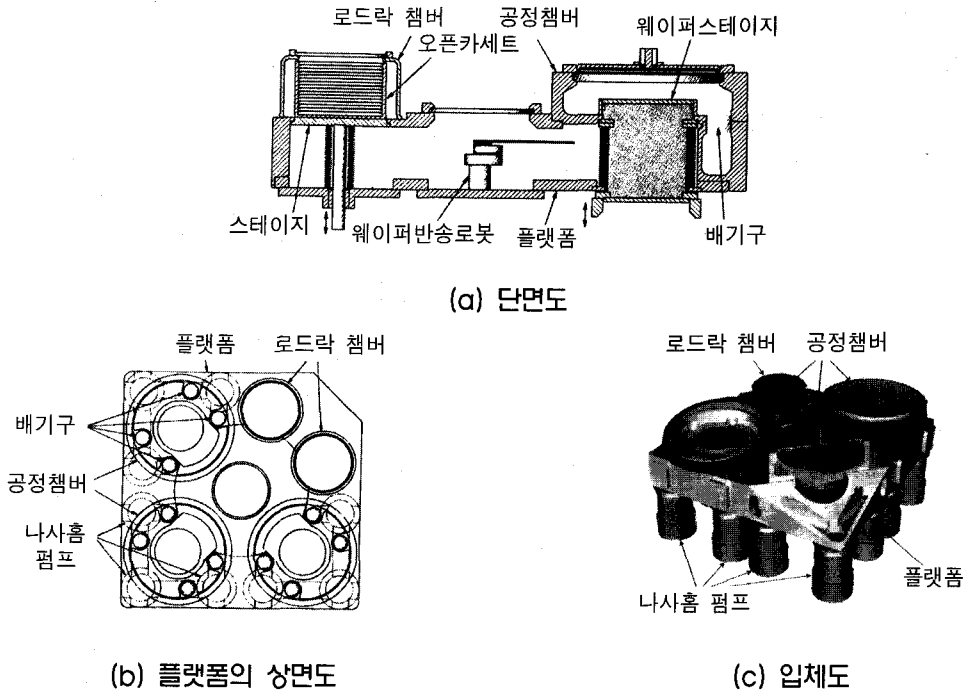


그림 4. 3차원 입체화 클러스터·툴(vertically integrated cluster tool)의 구조

를 향상시키는 것과 감압 공정에서 공정 청정도를 향상시키는 것과는 등가가 아니다. 감압 공정에서 공정 청정도를 향상시키기 위해서는 대유량의 가스를 흘려보낸 상태에서 실효 배기속도를 보다 크게 가질 수 있는 분자펌프가 요구된다.

그림 3은 거의 같은 치수의 터보분자펌프(일본 다이킨공업, DQS300AJ)와 나사흡펌프(molecular drag pump)(일본 다이킨공업, DMS200BJ)의 배기특성을 비교한 것이다. 같은 치수의 펌프를 비교하면 고진공 영역에서는 터보분자펌프 쪽이 실효 배기속도가 크다. 즉, 공칭 배기속도는 터보분자펌프 쪽이 크다. 그러나, 통상의 감압공정이 행해지는 10mTorr 정도 이상의 압력에서는 역으로 나사흡펌프 쪽이 실효 배기속도가 크다. 즉, 감압공정에서

는 나사흡펌프 쪽이 적합하다. 2~4 대의 소형 나사흡펌프를 웨이퍼에 대해 축대칭 위치에 배치해서 동시에 배기를 행하는 병렬배기방식을 도입하면 간결한 장치에서도 웨이퍼 주변으로부터의 균일하고 대유량의 가스배기가 동시에 실현된다.

4. 3차원 입체화 클러스터·툴(Vertically Integrated Cluster Tool)

그림 4에 저자들이 제창하고 있는 새로운 클러스터·툴의 구조도를 보인다. 종래의 클러스터·툴에서는 공정 챔버 및 로드락 챔버가 플랫폼의 측면에 접속되어 있었으나, 이 클러스터·툴에서는 공정 챔버 및 로드락 챔버가 플랫폼 상에 설치되어 있다.

종래의 크러스터·툴과 같이 챔버가 수평방향으로 접속되어 있지 않고, 종방향으로 집적화되어 있다는 의미로, 3차원 입체화 크러스터·툴(vertically integrated cluster tool)로 불리워지고 있다.

공정 챔버와 로드락 챔버의 웨이퍼 스테이지는 상하 가동으로 되어 있다. 웨이퍼 스테이지의 주위에는 O 링이 설치되어 있어, 웨이퍼 스테이지가 최상부에 위치해 있을 때 공정 챔버와 플랫폼 사이, 또는 로드락 챔버와 플랫폼 사이의 분위기는 이 O 링에 의해 사이가 벌어져 있다. 즉, 이 크러스터·툴에는 게이트밸브를 사용하고 있지 않다.

웨이퍼 반입시의 시퀀스는 다음과 같다. 우선, 웨이퍼를 탑재한 오픈 카세트를 로드락 챔버 측의 스테이지 상에 설치한다. 이 상태에서는 로드락 챔버 내는 대기, 플랫폼 내는 진공으로 되어 있다. 다음에, 로드락 챔버 하부의 배기구로부터 챔버내의 대기를 배기시킨다. 로드락 챔버내가 진공으로 되면 로드락 챔버 측의 스테이지를 소정의 위치까지 하강시킨다. 다음에, 플랫폼 중앙부에 설치된 웨이퍼 반송 로봇의 팔(arm)이 웨이퍼를 집으러 간다. 공정 챔버 측의 스테이지를 소정의 위치까지 하강시킨 후, 웨이퍼 반송 로봇 팔은 웨이퍼를 스테이지 상에 싣는다. 공정 챔버 측의 스테이지를 최상부까지 상승시킨 후, 공정을 행한다. 웨이퍼 반출시의 시퀀스는 이것의 역으로 된다.

종래의 크러스터·툴에 대한 3차원 입체화 크러스터·툴의 특징은 다음과 같이 집약된다. 우선, 후트프린트(footprint)가 매우 작다. 이것은 공정 챔버 및 로드락 챔버가 플랫폼 상부에 설치되기 때문에 공정 챔버 및 로드락 챔버의 면적이 더해지지 않고 플랫폼의 후트프린트가 거의 그대로 크러스터·툴의 후트프린트로 되기 때문이다. 또한, 배기용 분자펌프는 모두 크러스터·툴의 하부에 설치되기 때문에 분자펌프의 설치에 따른 크러스터·툴의 후트

프린트가 증가되지 않는다. 일 예로서 성막용 플라즈마 공정 챔버를 3대, 로드락 챔버를 2대 탑재한 200 mm 웨이퍼용 크러스터·툴의 후트프린트는 1032×1032 mm²으로 된다. 이것은 종래의 같은 구성의 크러스터·툴 후트프린트의 1/3 ~1/4 정도이다. 후에 기술하듯이 이 크러스터·툴에 적합한 새로운 감압밀폐 pod(BOUP)를 채용하면 고청정 분위기가 요구되는 클린룸 중의 웨이퍼 반송 구역이 불필요하게 되는 것과 함께 매우 간결한(compact) 제조라인을 저비용으로 구축할 수 있다.

이 크러스터·툴 개발 동기는 일본 동북대학(東北大學)의 클린룸에 장치를 설치하는 공간이 거의 없었음에도 불구하고 복수의 플라즈마 공정장치를 도입할 필요성이 있었기 때문이다. 그와 같은 상황에서 개발된 크러스터·툴의 후트프린트가 작은 것은 지극히 당연하다. 마치 “필요는 발명의 어머니”라고 말할 수 있다.

제 2의 특징은 공정 챔버가 완전 축대칭 구조를 가지고 있기 때문에 공정의 웨이퍼면 내 균일성이 얻어지기 용이한 점이다. 이 크러스터·툴에서는 스테이지의 상하에 의해 웨이퍼를 반송하기 때문에 공정 챔버 측면의 웨이퍼 반송 포트가 불필요하다. 이 때문에 축대칭인 공정 챔버가 실현되어, 공정 챔

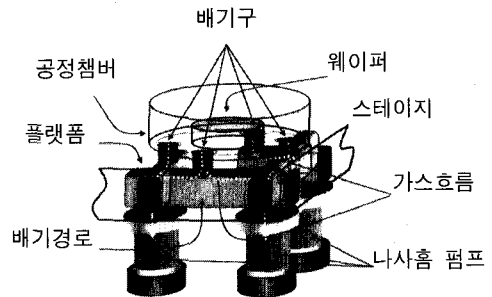


그림 5. 공정 챔버로부터 분자펌프까지의 가스배기경로

버 내의 가스 유동 및 챔버 벽면을 흐르는 고주파 전류 흐름의 불균일성 등에 따른 플라즈마의 편향이 생기지 않기 때문에, 챔버 내경을 웨이퍼 직경에 가깝게 해도 공정의 균일성이 깨지기 어렵다. 이와 같이 공정 챔버가 축대칭인 점은 간결한 플라즈마 공정장치를 실현하려고 하면 필수요건으로 된다.

그림 5는 공정 챔버로부터 분자펌프까지의 가스 배기경로를 나타내고 있다. 본 장치에서는 전술한 “병렬배기방식”이 채용되고 있다. 즉, 4개의 배기 포트가 챔버 저면(低面)의 거의 대칭인 위치에 배치되어 있어, 웨이퍼 주위로부터의 균일하고 대유량의 가스배기가 가능하게 되었다. 4개의 배기 포트가 완전하게 축대칭 위치에 배치되어 있지 않은 것은 플랫폼 내의 웨이퍼 반송과의 충돌을 방지하기 위해서이다. 챔버 저면의 배기포트는 플랫폼 상면의 포트에 연결되어 있다. 플랫폼 하부에는 컨덕턴스밸브를 개재해서 여러 개의 소형 나사흡펌프(200 mm 웨이퍼용 장치에서는 하나의 공정 챔버당 2대 또는 1대, 300 mm 웨이퍼용 장치에서는 3대 또는 2대)가 접속되어 있다. 플랫폼 내부에는 플랫폼 상면의 포트와 나사흡펌프를 연결하는 중형으로 나 있는 공동이 존재한다. 특히 저압공정을 행할 경우에는 이들 플랫폼 내부의 배기경로에서의 가스 컨덕턴스를 크게 취하도록 장치구조의 최적화를 행할 필요가 있다.

그림 6에는 2대의 나사흡펌프(일본 다이킨공업, DMS200BJ)를 그림4의 플랫폼에 설치하였을 때의 공정 챔버 내의 배기특성을 나타낸 것이다. 비교를 위해 펌프 자체의 배기특성도 그려져 있다(곡선 (b)). 공정 챔버와 펌프 사이의 가스컨덕턴스의 저하에 따른 배기속도의 감소는 예칭이 행해지는 30 mTorr 정도의 압력에서는 18% 정도, 플라즈마 CVD 공정이 행해지는 300 mTorr 정도의 압력에서는 3% 정도로 억제되어 있음을 알 수 있다. 이

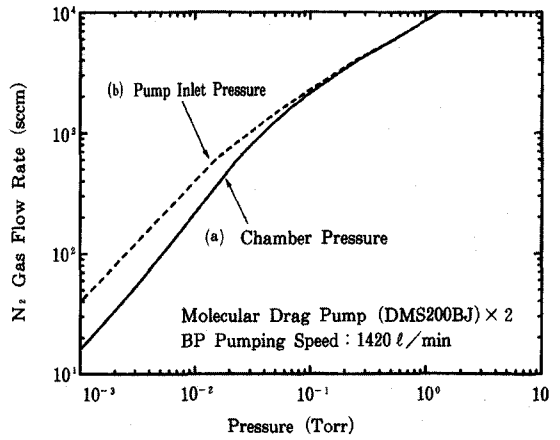


그림 6. 2대의 나사흡 펌프를 플랫폼에 설치한 때의 N₂ 가스유량과 (a) 챔버 압력, 및 (b) 나사흡 펌프 흡입구 압력과의 관계. 사용한 플랫폼은 200 mm 웨이퍼용. 분자펌

것으로 배기능력이 불충분하면, 플랫폼을 한층 크게 하여 플랫폼 내부 배기경로의 단면적을 넓히는 등의 대책이 필요할 것이다.

5. 새로운 감압밀폐 Pod · BOUP의 도입

300 mm 웨이퍼 시대의 반도체 제조공장의 레이아웃방식으로서 일반적으로는 베이(bay)방식이 주류로 될 것으로 예견되고 있다. 베이방식에서는 클린룸 분위기가 베이 내측의 웨이퍼를 반송하기 위한 청정영역과 베이 외측 장치가 설치되어 있어 유지관리를 행하기 위한 유지관리영역 및 운전자가 장치조작을 행하기 위한 운전영역으로 분리되어 있다. 모든 장치는 벽관통(through the wall)방식으로 설치되어 베이와 베이 사이 및 베이 내에서는 완전 자동화 웨이퍼 반송이 행해진다. 클린룸 청정도는 청정영역에서 클래스 0.1, 유지관리영역에서 클

래스 1000, 운전영역에서 클래스 10000 정도로 된다. 클린룸 분위기로부터 웨이퍼 표면으로의 수분 및 유기물 부착을 억제하기 위해 특정, 또는 모든 청정영역을 클린드라이에어(clean dry air) 분위기로 하는 것도 고려되고 있다.

다른 하나의 반도체 제조공장 레이아웃방식으로서 미니인바이런먼트(minienviroment) 내 웨이퍼 반송을 채용한 큰방 방식을 생각할 수 있다. 클린룸 분위기에 웨이퍼가 직접 노출되지 않기 때문에 클린룸 청정도는 클래스 1000 정도로 좋다. 미니인바이런먼트의 논의에서는 SMIF 등의 감압 밀폐 pod를 사용한 웨이퍼 반송 및 pod를 사용하지 않고 클린드라이에어 분위기의 터널 중에서의 웨이퍼반송 등이 제안되고 있다. SMIF pod는 밀폐용기이기 때문에 pod의 개폐를 자동적으로 행하기 위해서 복잡한 기구가 필요하게 되며, 공간도 필요하게 된다.

SMIF pod방식과 베이방식의 클린룸을 비교하면 SMIF pod방식 쪽이 초기투자비용이 더 든다. 이에 대해서 베이방식에서는 운전비용이 다소 많이 드나, 자동화 면에서는 종래의 오픈카세트를 그대로 유용할 수 있어서 싼 가격에 용이하게 실현할 수

있기 때문에, SMIF pod방식보다도 초기투자비용을 낮게 억제할 수 있다. 이 때문에 일반적으로 대규모 양산라인에는 베이방식 쪽이 적합하다고 여겨진다.

그러나, pod자체와 pod의 개폐기구가 단순하고 싼 가격인 감압밀폐 pod가 개발된다면 이야기는 달라진다. 이와 같은 pod의 도입에 의해 베이방식보다도 간결한 반도체 제조라인이 보다 저비용으로 실현될 가능성이 생긴다. 저자들의 연구그룹에서는 앞 절에서 소개한 크러스터·툴에 적합한 새로운 pod를 제안하고 있다.

그림 7에 Bottom Opening Unified Pod (BOUP)와 그 개폐기구의 개략도를 보인다. Pod는 완전 밀폐 용기로 되어 있어, 웨이퍼 반송 중에는 pod 내에 감압 N₂ 또는 클린드라이에어가 봉입된다. 이 때 pod 내의 압력은 수100 Torr로 되어, 대기압으로 눌러져 포드 저판(底板)과 뚜껑 사이의 O링(그림중의 O링 A)이 찌그러짐에 따라 밀폐된다. Pod 저판에는 웨이퍼 카세트가 고정되어 있다. 대규모 양산라인 대응장치에는 표준의 25매 또는 13매용의 카세트를, 소규모 다품종 생산라인 대응장치에는 3매 또는 5매용의 카세트를 사용한다. 그림 7의 예에서는 5매용의 카세트가 사용되고 있으나, 카세트의 웨이퍼 매수에 따라 pod의 높이는 변한다. BOUP을 3차원 입체화 크러스터·툴에 적용하는 경우에는 pod가 로드락 챔버의 기능을 겸하기 때문에 본래의 로드락 챔버는 불필요하게 된다. 또한, pod 저판 하부에는 자성체 판이 고정되어 있어, pod 개폐 시에는 전자석으로 흡착해서 pod 저판이 불잡혀지도록 되어 있다.

Pod재료에는 경량화를 위해 알루미늄, 또는 폴리 카보네이트를 사용한다. Pod를 봉지(封止)한 채로 방치하면, O링 및 pod 내 벽으로부터 탈가스에 의해 pod 내의 분위기가 악화하기 때문에, O링 및

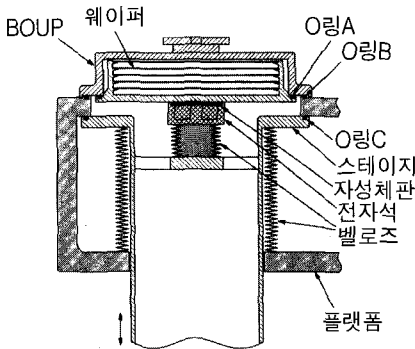


그림 7. 새로운 크러스터·툴에 적합한 bottom opening unified pod (BOUP)와 이것의 개폐기구

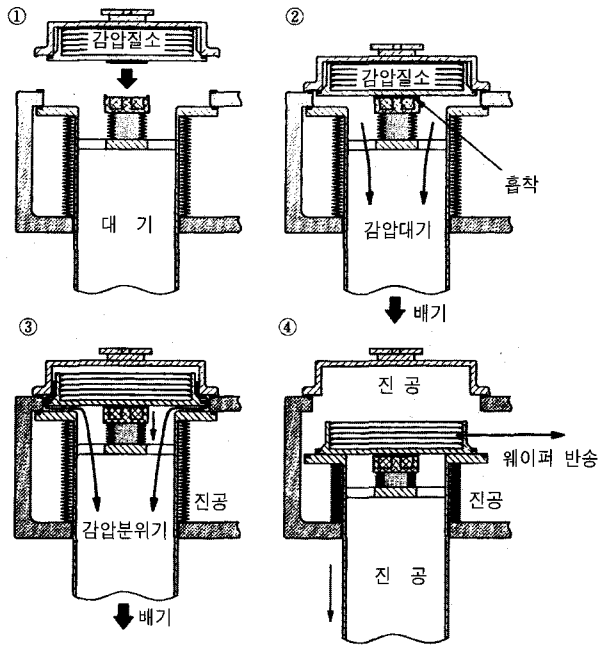


그림 8. BOUP를 사용한 경우의 웨이퍼 반입시의 시퀀스

pod 본체의 재료, 표면처리에는 충분히 주의를 기울일 필요가 있다. Pod에 따른 웨이퍼 반송은 장치 간의 비교적 단시간의 반송에 한정하고, 장시간 웨이퍼를 보관하는 경우에는 전용의 웨이퍼 스토커를 사용한다.

그림 8에 BOUP를 3차원 입체화 클러스터·툴에 적용한 경우의 웨이퍼 반입시의 시퀀스를 보인다. 우선, 공정을 행하는 웨이퍼를 세트시킨 pod를 클러스터·툴의 스테이지 상에 재치(載置)한다. 이상 상태에서는 pod 내에 감압 N₂ 등이 봉입되어 있다. 다음에 전자석으로 pod 저판을 잡은 후, pod 저판 하부의 대기를 스테이지 하부의 포트로부터 서서히 배기한다. Pod 내 압력과 pod 저판 하부 압력이 비슷한 정도로 되면, 전자석을 점차 하강시킨다. 그러면, pod의 뚜껑이 열린다. Pod의 뚜껑이 열린 뒤에

도 pod 내를 진공으로 될 때까지 배기를 계속한다. 이 때, 대기와 pod 내부의 분위기는 O링 B에 의해, pod 내부와 플랫폼 내의 분위기는 O링 C에 의해 간격이 떨어져 있다. Pod 내가 진공으로 되면, 스테이지를 소정의 위치까지 하강시켜, 플랫폼 중앙부에 설치된 웨이퍼 반송 로봇 팔로 웨이퍼를 반송한다. 또한, 교차오염(cross contamination)이 문제가 되는 경우에는 어느 것인가 한 개의 공정 챔버의 웨이퍼 스테이지가 하강상태에 있을 때, 그 외의 공정 챔버의 웨이퍼 스테이지와 pod 측 스테이지는 반드시 최상위에 위치하도록 웨이퍼 반송 시퀀스를 짠다.

그림 9에는 웨이퍼 반출시의 시퀀스를 나타낸 것이다. 그림 9①의 상태는 카세트에 처리후의 웨이퍼가 세트되어 있다는 점을 제외하면, 그림 8④의 상

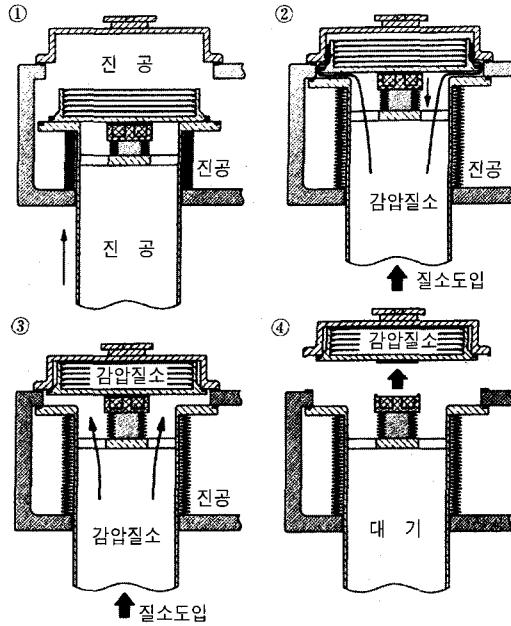


그림 9. BOUP를 사용한 경우의 웨이퍼 반출시의 시퀀스

태와 같다. 즉, 전자석은 pod 저판의 자성체에 흡착되어 있고, 플랫폼 내부는 O링 B에 의해 밀폐되어 있다. 우선 스테이지를 최상부까지 상승시켜 O링 C를 찌그러뜨린다.

다음에 스테이지 하부의 pod로부터 pod 내부에 질소가스 등을 도입한다. 소정의 압력(수 100 Torr)으로 되면 전자석을 상승시켜 O링 A를 찌그러뜨린다. 이와 함께 pod 저판 하부가 대기압으로 될 때까지 가스 도입을 계속한다. Pod 저판 하부가 대기압으로 되면, pod를 떼어낸다. Pod를 떼어낸 후에는 스테이지 상면에 먼지 등이 부착되지 않도록 별도의 뚜껑을 씌워준다.

BOUP는 미니인바먼트인 완전 밀폐 pod를 위해 클린룸 중에 웨이퍼 반송용의 클린영역이 불필요하게 된다. 클린룸은 초기투자비용이 싼 클래스 1000 정도의 큰방방식으로 된다. 클린룸 중의

BOUP 반송은 기본적으로 오버헤드셔틀(overhead shuttle)로 행한다. 오버헤드셔틀과 크러스터·톨 사이에 직접 pod를 주고받게 하는 것은 위치정밀도 등의 문제로 곤란한 것이 예상되기 때문에, 오버헤드셔틀과 크러스터·톨 사이의 BOUP의 주고받음에는 상하로 움직일 수 있는 간이 로봇을 개재시키는 것으로 될 것이다. 오버헤드셔틀을 장치상의 공간에 움직이게 하는 것도 가능하기 때문에, 유연한 클린룸 레이아웃이 가능하게 되어, 보다 간결하고 무리 없는 반도체 제조라인이 구축된다. 또한, BOUP를 채용하면 상기와 같이 매우 단순한 기구로 밀폐 pod의 뚜껑 개폐가 가능하게 된다.

한편, 그림 4와 같이 로드락 챔버와 오픈카세트틀을 사용한 경우와 비교하면 장치의 비용 및 후트프린트는 거의 변하지 않는다. 클린룸의 설비투자액이 낮은 점과 함께 초기투자비용이 낮게 억제된다.

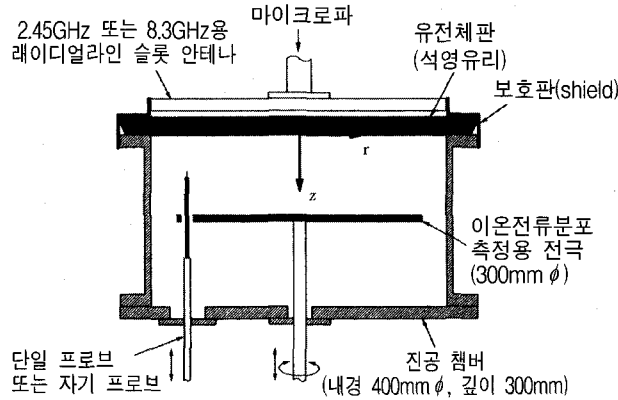


그림 10. 레이디얼라인 슬롯안테나를 사용한 마이크로파 플라즈마 장치 (플라즈마 계측용)

6. 레이디얼라인 슬롯안테나를 이용한 마이크로파 플라즈마 장치

레이디얼라인 슬롯안테나는 1980년에 원래 일본 동경공업대학의 後藤尙久에 의해 발명되었다⁽²⁾. 원래 위성방송수신용의 안테나로서 개발되어 이미 실용화되어 있다. 송신용 안테나로서 이용하면 균일성이 높은 원편파(圓偏波) 마이크로파를 방사시킬 수 있다. 저자들은 대(大)전력용으로 개량된 레이디얼라인 슬롯안테나를 마이크로파의 방사원으로 이용해서 직류자장을 사용하지 않고 균일, 고밀도 플라즈마를 생성하는데 성공하였다. 최근에는 이 마이크로파 플라즈마가 반도체 공정, 특히 박막형성공정에 최적임이 명확하게 되었다.

그림 10에는 실험에 사용한 플라즈마 계측용 장치의 구조도를 나타내고 있다. 진공 챔버 상에 진공과 대기를 격리시키는 유전체판이 놓여지고, 그 상부에 2.45 GHz 또는 8.3 GHz용의 레이디얼라인 슬롯안테나가 설치된다. 안테나로부터 방사된 균일한 원편파 마이크로파는 유전체판을 통해서 챔버 내에 도입되고, 마이크로파 전계에 의해 전자를 가열함

으로써 고밀도 플라즈마를 발생시킨다. 직류자장은 일절 사용되고 있지 않으나, 그림 11과 같이 10^{12} cm^{-3} 을 상회하는 높은 전자밀도의 플라즈마가 생성된다. 1600W(1.27 W/cm^2)의 비교적 높은 전자밀도의 마이크로파를 도입하면 마이크로파 입사면 부근 플라즈마 중의 전자밀도는 2.45 GHz 에서도 8.3 GHz에서도 마이크로파의 컷오프(cut-off)밀도 (2.45 GHz에서 $7.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 8.3 GHz에서 $8.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$)보다 상당히 크게 된다. 즉, 컷오프 모드로 되어 마이크로파는 플라즈마 중을 전반(傳搬)되지 않고, 플라즈마에 입사한 마이크로파는 지수함수적으로 감쇄한다. 그 진입장(進入長)은 2.45 GHz 에서도 8.3 GHz에서도 3 mm 정도로 된다. 즉, 마이크로파 입사면 부근의 매우 얇은 영역에서 마이크로파의 에너지가 전자로 이행해, 플라즈마 생성이 행해지는 것으로 된다. 그림 11과 같이 마이크로파 입사면에 근접함에 따라 전자밀도가 상승하는 것은 이 때문이다. 또한, 마이크로파의 주파수에 따라 전자밀도가 그다지 변하지 않는 것은 전자밀도가 컷오프 밀도보다 대폭적으로 상회하면 진입장이 주파수에 따라 그다지 변화하지 않기 때문이다.

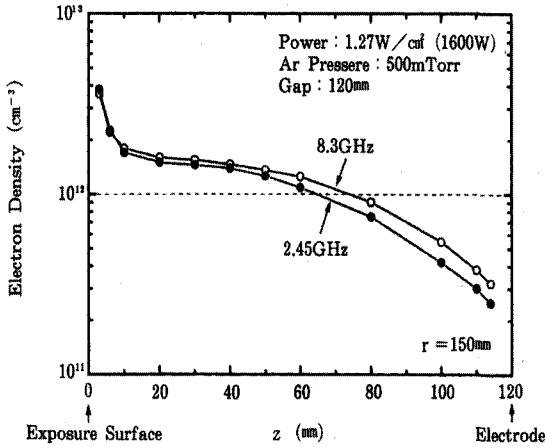


그림 11. 단일 프로브로 측정된 전자밀도의 축방향 분포

그림 10 중의 직경 300 mm 전극상의 이온조사량 분포가 상세하게 측정되었다. 이 결과 전극면 내의 이온 조사량의 편차는 플라즈마 공간의 간격을 30 mm 정도까지 좁은 간격으로 해도, $\pm 2\%$ 이하인 것이 알려져 있다. 플라즈마 챔버의 내경은 400 mm 이므로 전극단과 챔버 내 벽면의 거리는 50 mm 밖에 안 된다. 이와 같이 간결한 챔버를 사용해서 플라즈마 공간의 간격을 좁게 해도 놀라울 정도로 균일성이 얻어지는 것은 플라즈마 생성 자체가 균일하게 행해진 것으로 된다. 더욱이, 플라즈마 중의 전자온도를 상세하게 측정된 결과 다른 플라즈마원과 같은 압력에서 비교하여 전자온도가 낮다. 이 때문에 기판표면으로의 이온조사 에너지가 매우 낮게 되어 (120 mTorr 이상에서 7eV 이하), 박막형성공정에 응용하면 손상이 전혀 없는 고품질 박막형성이 가능하게 된다. 물론 웨이퍼에 고주파 바이어스를 인가해서 이온조사 에너지를 증가시키는 것이 용이하여, 이온조사 에너지의 최적값이 다른 각종 공정에도 유연하게 대응할 수 있다.

샤워플레이트를 사용한 균일한 가스도입은 샤워

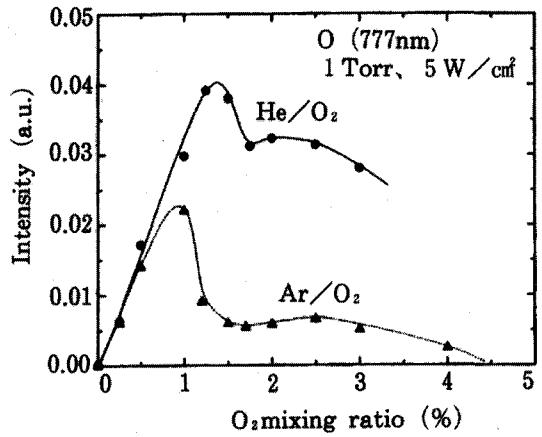
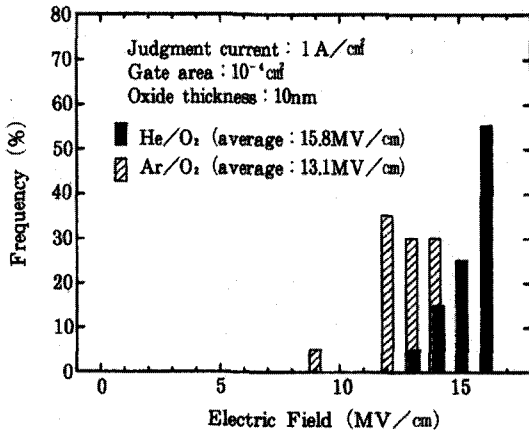


그림 12. $O^*(777nm)$ 발광강도의 O_2 혼합비의존성

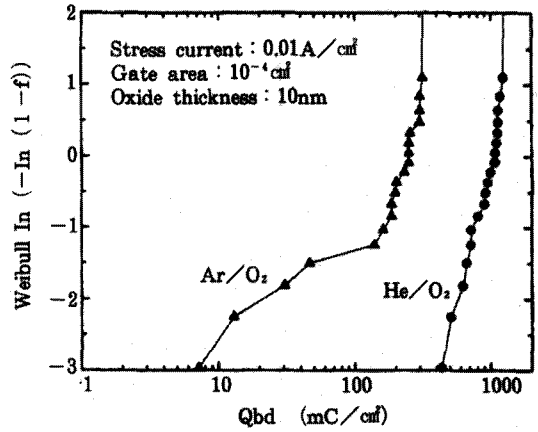
플레이트를 마이크로파에 대해서 투명한 절연체로 제작하는 것으로 가능하게 된다. 샤워플레이트 재료에는 유전 손실이 작고, 플라즈마에 대한 내성과 내열성이 높고 열전도가 좋은 절연재료가 요구된다. 필자들은 열전도가 좋은 세라믹인 AlN을 추천하고 있다.

7. 마이크로파 플라즈마를 이용한 실리콘 저온산화기술

필자들은 레이디얼라인 슬롯안테나를 사용한 고정장치를 개발해서, 실제로 실리콘 산화실험을 수행하였다. 박막형성 중의 웨이퍼 온도는 $430^\circ C$, 투입 마이크로파는 8.3 GHz, $5W/cm^2$, 가스 압력은 1 Torr로 통일시켰다. 그림 12로부터 He/ O_2 플라즈마 중의 O^* 발광광도($\lambda = 777 nm$)는 Ar/ O_2 플라즈마 중의 발광강도보다 큰 것을 알 수 있다. O^* 는 여기상태에 있는 준안정 상태의 Ar 또는 He 원자와 분자의 충돌에 의해 발생한다. O_2 분자의 해리 단면적은 에너지 증가와 함께 상승하기 때문에, 준안정



(a) 브레이크 다운(breakdown) 전계강도의 히스토그램



(b) TDDB 특성

그림 13. Ar/O₂ 또는 He/O₂ 플라즈마를 사용해서 형성한 SiO₂ 박막의 전기적 특성

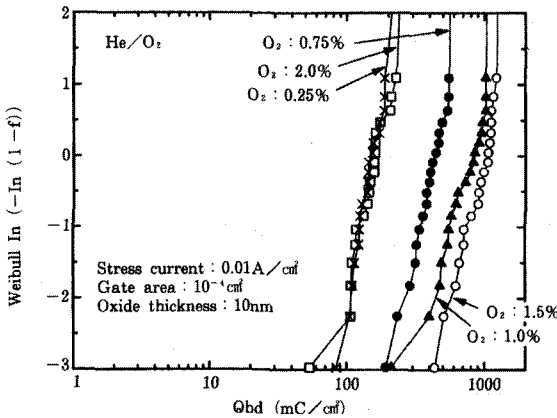


그림 14. He/O₂ 플라즈마를 사용해서 형성한 SiO₂ 박막의 TDDB 특성의 O₂ 혼합비 의존성

상태의 에너지가 큰 He/O₂ 플라즈마 쪽이 O* 밀도가 높게 되기 때문이다. O* 발광강도를 보면 He/O₂ 와 Ar/O₂ 플라즈마 중에서는 각각 혼합비가 1.5% 와 1% 부근에서 최대로 되어 있다.

그림 13(a), (b)는 각각 Ar/O₂ 또는 He/O₂ 플라

즈마를 사용해서 430°C라는 저온에서 형성한 SiO₂ 박막의 브레이크다운(breakdown) 전계 히스토그램과 TDDB (time dependent dielectric breakdown) 특성을 보인 것이다. O₂의 혼합비는 O*의 발광강도가 최대로 되도록, Ar/O₂ 플라즈마에서는 1%, He/O₂ 플라즈마에서는 1.5%로 하였다. 그림으로부터 SiO₂ 박막의 전기적 특성은 Ar/O₂ 플라즈마를 이용해서 형성한 것보다도 He/O₂ 플라즈마를 사용해서 형성하는 쪽이 우수한 것을 알 수 있다.

또한, 그림 14와 같이 Q_{bd} 값은 O*의 발광강도가 최대로 되는 O₂의 혼합비 1.5% 부근에서 최대로 되었다. 이들 결과는 산화종인 O*의 밀도가 높을수록 양호한 전기적 특성을 가지는 SiO₂ 박막이 형성되는 것을 시준하고 있다. 또한, 위에 기술한 결과는 게이트 전극으로서 Al를 사용한 경우의 결과이나, Ta를 사용하면 전기적 특성이 대폭적으로 향상된다. 그 후의 연구에 의해 Ta를 게이트전극으로 사용하면 평균내압이 14.2 MV/cm, 스트레스전류 0.1 A/cm²에서 50% Q_{bd} 값이 12.8 C/cm²에 도달하는 고

품질 SiO₂ 게이트 절연막이 형성될 수 있음을 알 수 있었다.

레이디얼라인 슬롯안테나를 사용한 마이크로파 플라즈마원의 특징을 요약하면, 다음과 같이 된다.

- 전자밀도가 높다 ($> 10^{12} \text{cm}^{-3}$).
- 플라즈마의 균일성이 높다 ($< \pm 2\%$).
- 전자온도가 낮기 때문에, 웨이퍼 표면으로의 이온 조사 에너지가 낮다 ($< 7 \text{eV}$).
- 플라즈마의 균일성을 유지한 채로, 공정공간의 간격을 3cm 이하까지 좁게 할 수 있다.
- 샤워플레이트를 사용한 균일한 가스공급이 가능.
- 장치가 단순하고 간결하다.

이 마이크로파 플라즈마원은 차세대의 대구경 고속 플라즈마 공정에 대한 엄격한 요구에 충분히 대처할 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 실리콘 산화 공정에 적용시킨 결과, 430°C라는 저온에서 열산화막에 필적하는 우수한 전기적 특성을 가지는 게이트 절연막의 형성에 성공하였다. 장래의 금속기판 SOI 및 Si 질화막 게이트 MISFET로의 응용이 기대된다.

8. 맺음말

산업계가 개발한 기술을 차용해서 약간의 개량을 추가함으로써 여기까지 발전해 온 반도체산업은, 지금 반도체산업 고유의 생산기술을 취입할 시기가 왔다. 오해의 소지가 있으나 대담하게 표현하면 본래의 반도체기술, 반도체산업은 지금부터 시작된다. 산학관이 일치 단결해서 본고에 소개한 것과 같은 유효한 신기술을 일본에서 다수 창출할 수 있을 것을 염원한다.

- 참고문헌 -

- (1) M. Nakagawa, submitted to J. Electrochem. Soc.
- (2) N. Goto, and M. Yamamoto, IEICE Jpn., Tech. rep., AP80 (1980), p.57.
- (3) M. Ando, K. Sakurai, N. Goto, K. Arimura, and Y. Ito, IEEE Trans. Antennas & Propag., 33 (1985), 1347.
- (4) M. Takahashi, M. Ando, and N. Goto, IEICE Trans. Commun., E76-B (1993), p.777.