

반도체 산업에 있어서의 진공 펌프 소비 전력 절감 방안

주장현, 김효배, 김중조

에드워드코리아주식회사, 진공기술연구소

(2008년 7월 1일 받음, 2008년 7월 10일 수정, 2008년 7월 10일 확정)

반도체 소자 제조 공정을 진행하기 위해서는 수많은 진공 시스템이 사용되어야 하고 이로 인하여 많은 소비전력을 필요로 한다. 소비전력 문제는 환경 문제와도 연관되기 때문에 반도체 소자 제조업체들 입장에서는 깊은 관심을 가지고 해결해야 할 사항으로 여러 가지 방안들이 제안되고 있다.[1 ~ 4] 진공 펌프 제조업체들 입장에서는 진공 펌프의 설계/제작에 있어 소비 전력 절감을 감안하게 되지만[5, 7], 반도체 팹(fab)내부에서 소비 전력을 줄이기 위해서는 진공 펌프를 사용하는 사용자의 사용 방법 및 환경도 매우 중요하다.[6] 본 연구에서는 반도체 소자 제조 공정에 사용되는 진공 펌프의 소비 전력을 줄이는 여러 가지 방법들에 대해 간략하게 설명하고 반도체 산업의 기술 발전 방향이 진공 펌프 소비 전력에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

주제어 : 진공 펌프, 소비 전력, 에너지, 반도체 산업

I. 서 론

Fig 1은 반도체 소자 제조 공정에 사용되는 공정 장비 (Applied Materials Inc.)에 소요되는 에너지(소비 전력)을 항목별로 구분한 것이다. Fig 1에서 알 수 있듯이 공정 펌프(process pumps)가 이 공정 장비에 소요되는 소비전력의 52%를 소비하고 있다. 이러한 이유 때문에 반도체 fab내에서 에너지 절감을 논의할 때 항상 공정용 진공 펌프가 1 순위에 오를 수밖에 없는 것이다.

II. 진공펌프 소비 전력에 대한 이론적 고찰

진공 펌프의 소비전력에 대해 이론적으로 먼저 살펴보자. 진공 펌프의 배기 과정을 이상 기체의 이상적인 압축 행정으로 가정하면 Fig 2와 같이 흡입 → 압축 → 배기 과정이 진행되는 동안 진공 펌프가 하는 일(work)은 열역학 교과서처럼 식(1)로 주어진다.

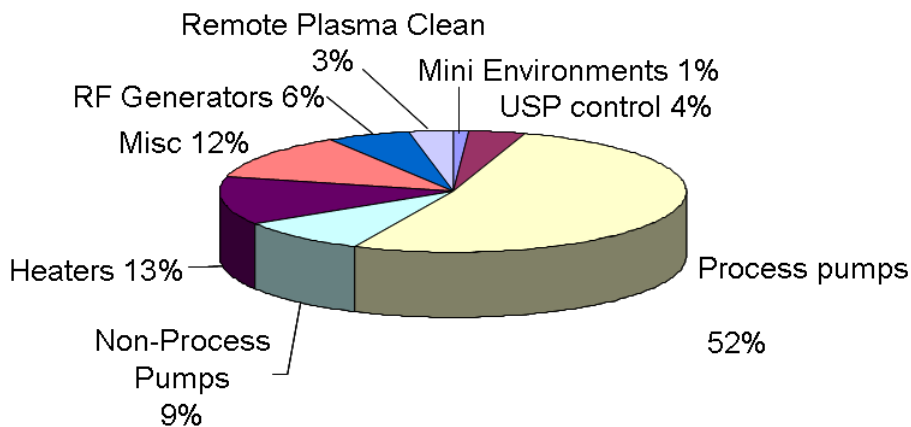


Fig. 1 Typical energy consumption status of a tool in a semiconductor fab(Source : 1997, 2000, and 2002 SEMATECH Energy Research)

* [전자우편] jh.joo@edwardsvacuum.com

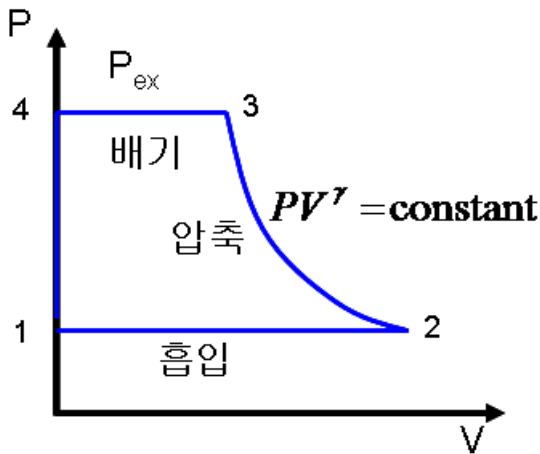


Fig 2. Ideal compression curve for idea gas

$$Work = \frac{\gamma}{\gamma+1} PV \left[\left(\frac{P_{ex}}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (1)$$

한편 각 흡입구 압력에서 진공 펌프의 체적 유량 (volumetric capacity)은 다음과 같은 식으로 표현된다. 즉,

$$S = S_0 \left(1 - \frac{P_0}{P} \right) \quad (2)$$

이다. 진공 펌프의 이상적인 압축 행정은 그림 1과 같으며, 압축이 진행되는 순서는 1 → 2 → 3 → 4 → 1이다. 공기는 일정한 흡입구 압력에서 선 1 → 2를 따라 흡입되고 선 2 → 3에서 압축되며 선 3 → 4를 따라 일정한 압력 상태 (P_{ex})인 배기구(exhaust)로 배기된다. Fig. 2에서는 실제 진공 펌프 내부에서 회전자(rotor)와 고정자(stator)에 생기는 간극(clearance 또는 gap)을 0으로 간주하였는데 이것은 진공 펌프의 배기 속도가 일정한 값을 유지한다는 것을 의미한다. 그러나 실제 진공 펌프 내부에서 회전자와 고정자 사이에 일정한 간극이 항상 존재한다. 또한 지수 gamma(γ)는 기체의 종류에 따라 달라지는 값으로 공기인 경우 1 ~ 1.4 사이의 값을 가지며, 1인 경우는 등온 과정(isothermal)을, 1.4인 경우는 가역 단열 압축(reversible, adiabatic compression)을 나타낸다.

Gamma 값을 재팽창(re-expansion) 과정에 대해 알 수만 있다면 간극(clearance) 효과를 식에 반영할 수 있다. 만일 압축과 재팽창 과정이 같은 법칙에 따라 이루어진다

고 가정하면 식 (1)의 체적 V는 간극 효과를 반영하기 위해 실제 배기하는 체적으로 대체되어야 한다. 이 경우 식(1)의 V는 식(2)의 배기 속도 S로 대체하면 진공 펌프의 소비 전력은 식(1)을 이용하여 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$Power = \frac{\gamma}{\gamma-1} S_0 (P - P_0) \left[\left(\frac{P_{ex}}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (3)$$

식(3)은 진공 펌프의 흡입구 압력 P의 함수로 압축 과정에 실제로 필요한 소비전력을 나타내고 있다.

이제 식(3)을 이용하여 진공 펌프의 소비전력(power)이 최대/최소가 되는 압력을 구해보자. 식(3)을 흡입구 압력 P에 대해 미분하고 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{dPower}{dP} = \frac{\gamma}{\gamma-1} S_0 \left[\frac{1}{\gamma} \left(\frac{P_{ex}}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - \frac{1-\gamma}{\gamma} \frac{P_0}{P} \left(\frac{P_{ex}}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (4)$$

식(4)에서 진공 펌프의 소비 전력에 대한 이해를 돕기 위해 식을 간단하게 만들기 위해 []안의 두 번째 항을 무시하고 최대/최소가 되는 압력을 구해 보면 다음과 같다.

$$\frac{dPower}{dP} = 0$$

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} S_0 \frac{1}{\gamma} \left(\frac{P_{ex}}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 0$$

위 두 식으로부터

$$\left(\frac{P_{ex}}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \gamma \quad (5)$$

을 얻게 된다. 식(5)의 양변에 자연 로그(ln)를 취해 주고, 정리하면 다음과 같은 결과를 얻게 된다.

$$\frac{P_{ex}}{P} = \gamma^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (6)$$

복잡한 계산 과정을 거치면 식(6)은 소비전력(power), 즉 식(3)이 최대가 되는 값에 해당하며 gamma(γ)값과 배기구 압력 P_{ex} = 760 Torr에 대해 식(4)에서 P₀/P가 매우 작은 값을 갖게 됨으로 식(4)에서 두 번째 항을 무시한 것이 합리적이었던 것을 알 수 있다. 따라서 식(4)는 다음

과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dPower}{dP} = \frac{\gamma}{\gamma-1} S_0 \left[\frac{1}{\gamma} \left(\frac{P_{ex}}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (7)$$

식(7)에서 진공 펌프의 소비 전력이 최대가 될 때의 압축비(compression ratio)를 얻을 수 있다. 소비 전력이 최대가 될 때의 압축비 값과 배기구 압력 $P_{ex} = 800$ Torr 일 때, 진공 펌프의 소비전력이 최대가 되는 흡입구 압력 구간을 계산해 보면 Table 1과 같다.

Table 1에서 알 수 있듯이 배기구 압력 $P_{ex} = 800$ Torr 일 때, 진공 펌프의 소비 전력이 최대가 되는 진공 펌프 흡입구 압력은 대략 200 ~ 300 Torr 사이인 것을 알 수 있다. 배기구 압력 P_{ex} 값에 따라 진공 펌프의 소비 전력이 최대가 되는 압력을 계산해 보면 Table 2와 같다.

Table 2에서 알 수 있듯이 배기구 압력이 낮아지면 진공

Table 1 Inlet pressure at maximum power consumption and compression ratio(no electrical control)

gamma (γ)	compression ratio(P_{ex}/P),	P_{max} (Torr),
	$\frac{\gamma}{\gamma^{\gamma-1}}$	$\frac{800}{\gamma^{\gamma-1}}$
1.4	3.247	246
1.3	3.117	256
1.2	2.986	268
1.1	2.853	281
1.0	2.718	295

Table 2 Pressure having maximum power consumption according to exhaust pressure(no electrical control)

gamma (γ)	배기구 압력 P_{ex} (Torr)				
	650	700	750	800	850
	소비전력이 최대가 되는 압력(Torr)				
1.1	227.8	245.3	262.9	280.4	297.8
1.2	217.7	234.4	251.2	267.9	284.7
1.3	208.5	224.6	240.6	256.6	272.7
1.4	200.2	215.6	231.0	246.4	261.8
1.5	192.6	207.4	222.2	237.0	251.9
1.6	185.6	199.9	214.2	228.4	242.7
1.7	179.2	192.9	206.7	220.5	234.3

펌프의 소비 전력이 최대가 되는 진공 펌프 흡입구 압력 역시 낮아지는 것을 알 수 있다.

식(6)에서 흡입구 압력 P 는 다음과 같이 주어지고,

$$P = \frac{P_{ex}}{\gamma^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}}$$

이것을 식(3)에 대입하여 진공 펌프의 최대 소비 전력을 구해보면 다음과 같다.

$$Power_{max} = \gamma S_0 \left(\frac{P_{ex}}{\gamma^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}} - P_0 \right) \quad (8)$$

식(8)에서 두 번째 항은 첫 번째 항보다 매우 작음으로 $Power_{max}$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Power_{max} \approx S_0 \frac{P_{ex}}{\gamma^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}} \quad (9)$$

식(9)에서 알 수 있듯이 진공 펌프의 최대 소비 전력은 각 펌프가 압축 과정에 사용하는 최대값(maximum) 소비 전력이 펌프마다 다르더라도 같은 배기구 압력에 대해서는 각 진공 펌프의 배기 속도 S_0 에 직접적으로 비례한다. 다시 말해서 배기 속도 S_0 가 큰 펌프를 원한다면 그 만큼 많은 소비 전력이 필요하다는 것을 감수해야 한다. 에너지 절감이라는 측면에서 살펴보면 진공 펌프의 소비 전력을 줄이기 위해서는 식(9)에서 알 수 있듯이 배기 속도 S_0 를 줄이거나 진공 펌프 배기구 압력 P_{ex} 를 낮추어야 한다.

진공 펌프의 소비 전력은 진공 펌프 내부의 구조를 어떻게 설계하느냐에 따라 달라지는데 Fig 3은 100m³/h의 배기 용량(pumping capacity)를 갖는 진공 펌프의 이론적 소비 전력 곡선이다.

여기서 V_r 은 체적비(volume ratio) 또는 배기용량비(displacement ratio)를 의미하며 진공 펌프에서의 체적비는 진공 펌프 흡입구 배기 용량 V_{inlet} 과 배기구 배기 용량 V_{outlet} 의 비로서 다음과 같다.

$$V_r = \frac{V_{inlet}}{V_{outlet}} \quad (10)$$

예를 들어 $V_r = 4.0$ 은 흡입구 배기 용량을 100m³/h로 설계한 경우, 배기구 배기 용량은 이 배기 용량의 1/4인 25m³/h임을 나타낸다.

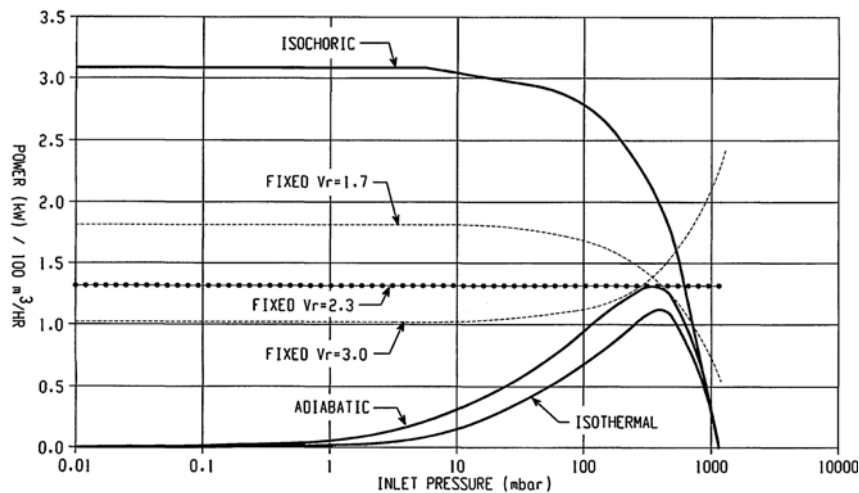


Fig 3. Theoretical power consumption vs. inlet pressure of vacuum pump(Leybold Patent, WO 02/33262A1)

체적비가 작아지면, 즉 흡입구 배기 용량과 배기구 배기 용량이 같아지면 최대 진공도(ultimate pressure)에서 소비 전력은 적어지고 체적비가 커지면 이 구간에서 소비 전력이 커지게 된다. “진공 펌프 소비 전력에 대한 이론적 고찰”에서 살펴보았듯이 진공 펌프의 소비 전력은 압력이 함수이지만, 압력에 따른 소비 전력 곡선 모양이 압력뿐만 아니라 진공 펌프 내부의 구조, 즉 체적비에 따라서도 달라진다는 것을 알 수 있다. 따라서 진공 펌프의 소비 전력을 줄이기 위해서는 진공 펌프 내부의 구조, 다시 말해서 흡입구와 배기구의 배기 용량에 대한 고려를 반드시 하여야 한다.

III. 진공 펌프 소비 전력 절감 방법

앞에서 살펴보았듯이 진공 펌프의 소비 전력(최대 소비 전력)은 진공 펌프의 배기 속도 S_0 와 진공 펌프의 배기구 압력 P_{ex} 에 비례한다. 따라서 진공 펌프의 소비 전력을 줄이려면 진공 펌프의 배기 속도를 줄이든지 아니면 배기구 압력을 낮추어야 한다. 그러나 진공 펌프 사용자 입장에서는 소비 전력을 줄이기 위해 진공 펌프의 배기 속도가 감소되는 것을 원하지는 않을 것이다. 따라서 진공 펌프의 배기 속도를 줄이지 않고 진공 펌프의 소비 전력을 줄일 수 있는 방법을 살펴보아야 한다.

반도체 소자 제조 공정에 사용되는 진공 펌프의 소비 전력을 줄이는 방법으로 제안된 것들은 다음과 같다.

- 낮은 배기구 압력(low exhaust pressure)

- 다단 펌프(multi-stage pump)
 - 인버터 구동 즉, 가변 주파수 구동(variable frequency drive)
 - 고효율 모터 사용(high efficiency motor)
 - 회전 속도 가변(variable speed at idle step)
 - 근접 배기(proximity pumping)
 - 마찰 감소(less friction)
 - 한 대의 보조 펌프로 여러 대의 고진공 펌프 보조(multi high vacuum pump with one backing pump)
- 이러한 여러 가지 소비 전력 절감 방안들 중 몇 가지를 좀 더 자세히 살펴보도록 하자.

3.1 낮은 배기구 압력(low exhaust pressure)

식(9)에서 설명하였듯이 진공 펌프의 배기구 압력을 낮추어 주면 진공 펌프의 소비 전력을 줄일 수 있다. 따라서 진공 펌프의 배기구 압력을 낮추는 방법을 살펴보면 현재까지 반도체 소자 제조 공정용 진공 펌프의 배기구 압력을 낮추는 방법으로 제안된 것들은 주 펌프(main pump) 배기구에 연결된 배관에 보조 펌프를 추가하는 방법, 주 펌프의 배기구에 이젝터(ejector)를 장착하여 배기구 압력을 낮추는 방법, 그리고 가스 정화 장치(gas abatement system 또는 scrubber)를 이용한 방법이다.

Fig 4는 카시야마 사에서 제안한 스크류 진공 펌프의 소비 전력 절감 방법을 보여 주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 스크류 진공 펌프의 배기구 단에 작은 보조 펌프를 장착

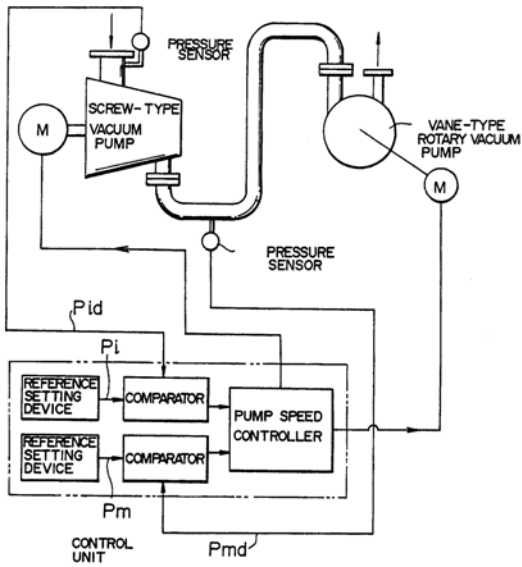


Fig 4. Auxiliary pump on exhaust line of main screw pump(Kashiyama Co.)

하여 스크류 진공 펌프의 배기구 압력을 낮추어줌으로써 스크류 펌프의 소비 전력을 감소시킬 수 있다.

Fig 5는 Ohmi 교수가 제안한 방법으로 스크류 진공 펌프 배기구에 에젝터(ejector)를 장착하여 스크류 진공 펌프 배기구 압력을 낮추어 줌으로써 스크류 진공 펌프의 소비 전력을 줄여 줄 수 있다.[16] 또한 Ohmi 교수 뿐만 아니라 여러 연구자들이 고정 피치(constant pitch) 방식의 스크류 펌프가 소비 전력이 많이 필요하다는 단점을 개선하기 위해 가변 피치(variable pitch) 방식의 스크류 펌프를 이용해 소비 전력을 줄일 수 있다는 것을 제안하였다.[5, 7, 17]

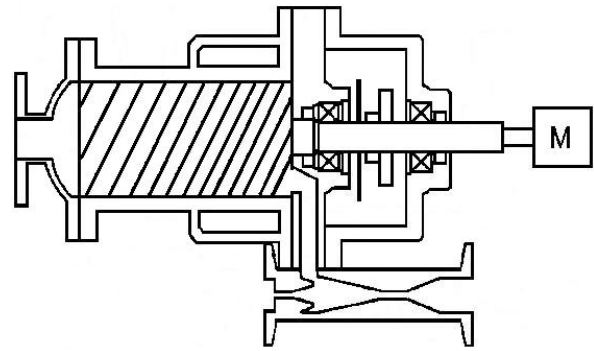


Fig 5. Ejector to reduce the exhaust pressure of a screw vacuum pump(Ohmi Tadahiro patent, US2006/0182638)[16]

이 밖에도 가스 정화 시스템, 스크러버 장치를 이용하여 진공 펌프의 배기구 압력을 낮추어 주는 방법, 반도체 fab 내 main duct의 압력을 낮추는 방법등이 제안되어 있다. 그러나 실제 현장 적용 여부는 현장 상황과 사용자의 의지에 따라 달라진다는 것을 명심하여야 한다.

3.2 다단 펌프(multi-stage pump)

Fig 6은 Ebara사의 다단 루츠 진공 펌프의 개략적인 단면도이다. 그림에서 알 수 있듯이 흡입구(inlet)로부터 배기구(outlet) 방향으로 갈수록 루츠 회전자의 두께가 점차 얇아진다. 첫 번째 단의 큰 체적 내부로 유입된 유체가 마지막 단의 작은 체적 내부로 들어가게 됨으로써 체적의 변화가 일어나고 이는 유체가 압축(compression)된다는

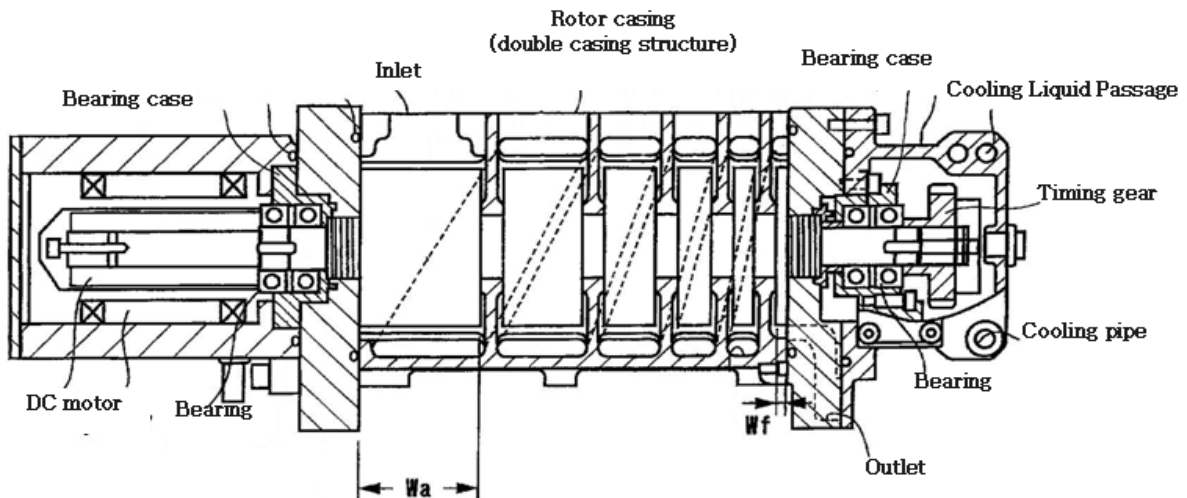


Fig 5. Multi-stage Roots vacuum pump(Ebara Co. WO 2004/083643 A1)

것을 의미한다. 이렇게 압축된 유체의 압력의 진공 펌프 배기구 근처의 유체 압력보다 크면 진공 펌프 내부의 압축된 유체가 진공 펌프 밖으로 배출되게 되는 것이다.

다단 루츠 진공 펌프의 각 단계에서의 소비 전력은 간극 (clearance)의 영향과 back leakage를 고려하지 않으면 다음과 같은 간단한 식으로 주어진다. 여기서 압력은 mabr 단위이고, 소비 전력은 와트(watt)이다.

$$Power = \frac{V_i}{3600} \times (P_{i+1} - P_i) \times 1000 \quad (11)$$

이 식을 이용하여 몇 가지 경우에 대해 다단 루츠 진공 펌프의 소비 전력을 계산/비교하여 보면 다음과 같다.

Table 3에서 알 수 있듯이 100m³/h 용량의 다단 루츠 펌프의 배기구 압력이 1000mbar일 때 단(stage)의 개수와 첫 번째 단의 배기 용량 변화에 따라 달라진다. 즉, 단 (stage) 개수가 증가되면 소비 전력이 감소하고, 첫 번째 단의 배기 용량이 커지면 소비 전력이 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 “진공펌프 소비 전력에 대한 이론적 고찰”에서 살펴 본 것과 일치한다.

3.3 인버터 구동 즉, 가변 주파수 구동(variable frequency drive) [8 ~ 10]

펌프, 팬(fan) 같은 회전기계에 인버터(inverter)를 결합하여 상품화되어 판매되고 있는 교류 전력 공급 장치(AC power supply)의 주파수와 전압을 원하는 주파수의 전압으로 바꾸어 다양한 속력으로 회전할 수 있도록 하는 방법이 광범위하게 실용화되어 있다. 인버터를 이용하여 펌프나 팬을 구동시키는 모터의 회전 속도를 바꾸어 가해지는 부하(load)에 맞게 회전 속도를 최적화할 수 있으므로, 정해진 속력으로만 동작하게 되어 있는 펌프나 팬에 비해 에너지를 절약할 수 있다.

인버터의 soft-start 기능은 자주 반복되는 정지와 기동 작업으로 인해 전류가 대량으로 급격하게 흘러 생기는 모터의 과열(overheating)을 막아주는 중요한 기능이다. Soft-start 기능을 통해 회전 속력을 점차 증가시킬 수 있고 이를 통해 배관 내부의 급격한 압력 변화를 줄여 주어 배관 부품들이 기계적 피로(mechanical fatigue)에 의해

Table 3. Example of power consumption of multi-stage Roots vacuum pump having 100m³/h pumping capacity (Arbitrary displacement at each stage and pressure)

Stage	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	6 th	Exhaust
Pumping speed (displacement), m ³ /h	100	50	25	10			
Pressure(mbar)	0.001	0.5	100	500			1000
Power consumption(W)	1.39	138.19	277.78	138.89			556.25
Pumping speed (displacement), m ³ /h	100	50	25	10	5		
Pressure(mbar)	0.001	0.5	100	500	700		1000
Power consumption(W)	1.39	138.19	277.78	55.56	41.67		514.59
Pumping speed (displacement), m ³ /h	100	50	25	10	5	1	
Pressure(mbar)	0.001	0.5	100	500	700	850	1000
Power consumption(W)	1.39	138.19	277.78	55.56	20.83	4.16	497.91
Pumping speed (displacement), m ³ /h	200	100	50	25			
Pressure(mbar)	0.001	0.5	100	500			1000
Power consumption(W)	2.77	276.39	555.56	347.22			1181.94
Pumping speed (displacement), m ³ /h	200	100	50	25	10		
Pressure(mbar)	0.001	0.5	100	500	700		1000
Power consumption(W)	2.77	276.39	555.56	138.89	83.33		1056.94

파손되는 것을 막을 수 있다. Soft-start 기능을 통해 과도한 초기 회전 토크(high starting torque)를 제거함으로써 샤프트나 회전자에 걸리는 피로 부하(fatigue loading)를 줄이는데 효과적이다. 또한 soft-start 기능은 모터와 펌프의 갑작스러운 정지를 막을 수 있고, 과전류 감지 장치(overcurrent detection means)를 통해 과전류가 감지되었을 때 inverter의 출력 전류를 감소시킬 수 있다.

과전류 방지 기능은 위급 상황에서 인버터에서 나오는 출력 전류를 낮추어 줌으로서 모터에 정상적인 전류를 초과하는 전류와 대량의 유체로 인한 부하로 인해 발생하는 파손을 막아 주고 동시에 모터에 과전류가 흐르지 않도록 하는데 효과적이다. 인버터를 통해 과전류가 감지되었을 때 인버터에서 출력되는 출력 주파수와 전압값을 줄여서 모터에 흐르는 전류를 미리 정해 놓은 표준 전류가 되도록 할 수 있다. 과전류가 감지되었을 때 유체 펌프가 모터와 인버터를 보호하기 위해 그 주파수를 낮추어 표준 전류값을 회복하도록 할 수 있다. 따라서 모터가 과부하를 받더라도, 펌프, 모터, 인버터는 인버터 출력 주파수를 낮추고 모터의 회전수를 줄여 줌으로서 손상받지 않게 할 수 있는 것이다.

이렇게 인버터의 여러 가지 기능을 통해 과부하 상태에 있거나, 과도한 소비 전력 상태에 오래 동안 있는 경우 펌프나 팬을 구동시키는 모터의 회전 속도를 바꾸어 가해지는 부하(load)에 맞게 회전 속도를 최적화할 수 있으므로, 진공 펌프에 소요되는 소비 전력(에너지)를 절약할 수 있다.

3.4 고효율 모터 사용(high efficiency motor)

진공 펌프의 회전자(rotor)를 구동하기 위해서는 모터를 사용하게 되는데 이때 모터의 효율 문제로 인하여 공급된 에너지가 100% 회전자로 전달되지 않고 일부가 소비되게 된다. 따라서 모터의 효율에 따라서 진공 펌프의 소비 전력이 달라지게 된다. 따라서 고효율의 모터를 사용하면 모터에서의 손실에 의한 소비 전력이 줄어들기 때문에 전체적으로 진공 펌프의 소비 전력이 감소하게 된다.

3.5 회전 속도 가변(variable speed at idle step) [11, 12]

반도체 제조 장비용 배기 장치에 사용되는 진공 펌프들은 일반적으로 속도 조절 장치가 없다. 따라서 진공 펌프가

구동된 이후에는 진공 펌프를 정지시켜야 할 필요가 이유가 없는 한 계속적으로 일정한 회전 속도 상태에서 구동하게 된다. 진공 펌프를 통해 배기하는 반도체 제조 장비가 그 구동을 멈춘다고 하더라도 진공 펌프는 통상적으로 계속 구동되고 있다. 반도체 제조 장비를 배기할 필요가 없을 때에도 진공 펌프를 계속 구동시키는 이유는 다음과 같다.

- 만일 진공 펌프를 멈추면, 고도의 청정 상태를 유지해야 하는 반도체 제조 장비쪽으로 오염물이 역류하게 되어 반도체 제조 장비를 오염시킨다.
- 진공 펌프가 정지하였을 때, 반도체 제조 장비를 재가동하기 위해 진공 펌프를 다시 돌려야 할 경우 가동하는데 걸리는 시간(start-up time)이 길어지게 되고 이로 인하여 반도체 제조 장비의 생산성(throughput)을 감소시키게 된다.
- 여러 가지 승화성 물질들이 evaporation, sputtering, CVD 공정 중에 발생하게 되는데 이것들은 지속적으로 진공 펌프에 의해 배기된다. 만일 진공 펌프를 정지시키게 되면 이러한 승화성 물질들이 진공 펌프 내부와 배관 등에 쌓이게 되고 이로 인하여 파이프가 막히거나 진공 펌프의 재가동을 불가능하게 만든다.

위에서 말한 이러한 이유들 때문에 진공 펌프를 계속 구동시킴으로서 다음과 같은 단점들이 생기게 된다. 반도체 제조 장비를 배기할 필요가 없을 때에도 진공 펌프를 언제나 일정한 속력으로 구동시킴으로 많은 전기 에너지를 소모하게 된다.

Fig 7에서 처럼 반도체 제조 장비를 배기할 필요가 없는 시기 동안 진공 펌프의 회전 속력은 idling상태의 회전 속력으로 줄어든다. 따라서 진공 펌프에 의해 소모되는 전력을 줄일 수 있으며, idling 상태에서도 진공 펌프는 계속 구동하고 있으므로 오일이나 다른 오염 물질이 반도체 제조 장비쪽으로 역류하지 않고 진공 펌프를 완전히 정지시키지 않기 때문에 반도체 제조 장비의 생산성을 떨어뜨리지 않으며, 진공 펌프를 완전히 정지시켰을 때 발생하는 진공 펌프와 배관에 승화성 물질이 쌓여 막히거나 진공 펌프가 회전하지 않는 문제를 막을 수 있다.

만일 진공 펌프가 DC 모터에 의해 구동된다면 DC 모터에 인가되는 DC 전압을 바꿈으로서 진공 펌프의 회전 속력을 쉽게 조절할 수 있다. 게다가 만일 진공 펌프의 idling 상태에서의 회전 속력이 조정 가능하다면, 반도체 제조 장비 operator는 idling 상태의 진공 펌프 회전 속력을 원하

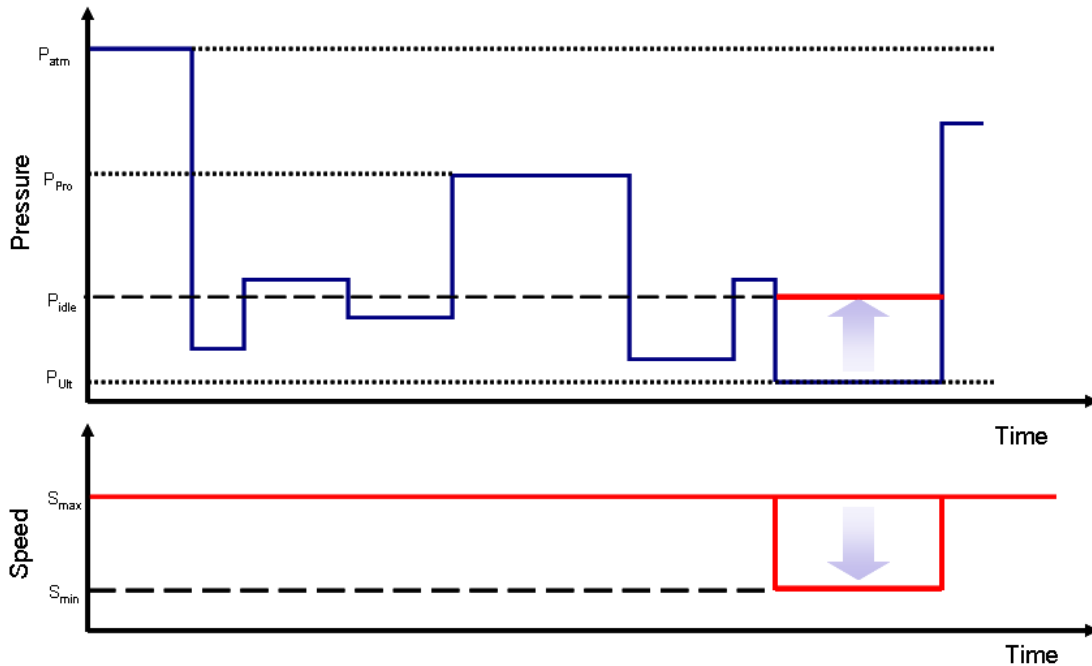


Fig 7. Change of pumping speed and pressure at an idle step

는 값으로 지정할 수 있다. Idling 상태의 진공 펌프 회전 속력은 전기 에너지 소모와 진공 펌프를 완전히 정지시켰을 때 발생하는 여러 가지 문제점들을 고려하여 적절하게 선택할 수 있다.

진공 chamber는 밸브를 통해 진공 배관에 의해 진공 펌프에 연결된다. 진공 펌프는 DC 모터를 사용하여 진공 chamber를 배기한다. DC 모터의 회전 속력은 DC 모터에 인가되는 DC 전압의 크기에 선형적으로 비례하여 변함으로 DC 모터의 회전 속력은 DC 모터에 인가되는 DC 전압의 변화에 따라 변하게 된다.

배기해야 할 진공 chamber는 회전 속도 변화 신호 출력 장치(rotational speed chaging signal output unit)와 연결되어 있다. 진공 chamber를 배기할 필요가 없는 시기에 회전 속도 변화 신호 출력 장치는 진공 chamber의 동작 상태에 반응하며 진공 펌프에 회전 속력을 낮추도록 하는 신호를 출력하게 된다. 따라서 진공 chamber가 대기압 상태가 되거나 더 이상 배기할 필요가 없을 때 회전 속도 변화 신호 출력 장치는 진공 chamber의 구동 상태에 따라 진공 펌프에 idling상태의 회전 속력이 되도록 하는 신호를 주게 된다. 회전 속도 변화 신호 출력 장치에서 나온 신호에 따라 DC 모터에 인가되는 전압은 변하여 진공 펌프의 회전 속력을 idling 상태의 회전 속력으로 줄이게 된다.

3.6 근접 배기(proximity pumping)

Fig 8에서 처럼 통상적인 반도체 제조 공장내에서는 공정 장비와 이에 사용되는 진공 펌프 사이를 연결해 주는 길이 5 m ~ 20 m인 배관(통상 foreline이라고 함)이 있다.[13] 그림 8의 왼쪽 그림이 통상적인 반도체 제조 공장내 진공 배관 구성이고, 진공 펌프는 부스터 펌프(booster pump)와 건식 펌프(dry pump)로 구성되어 있다. 부스터 펌프는 배기 메카니즘(mechanism)상 대기압 근처에서 작동시키거나 압력이 높은 상태에서 장시간 사용할 수 없고, 진공 시스템 내부의 유체 흐름이 중간류나 분자류 영역에서 제 기능을 발휘하기 때문에 공정 장비와 진공 펌프를 연결하는 배관의 컨덕턴스(conductance) 영향을 많이 받는다. 따라서 그림 8의 왼쪽 그림에서처럼 연결하는 경우에는 컨덕턴스 손실 문제를 보충하기 위해 배관의 직경이 큰 것이 좋다.

그러나 부스터 펌프의 이러한 특성으로 인한 문제를 줄이기 위해 만일 부스터 펌프를 Fig 8의 오른쪽 그림처럼 공정 장비 근처에 장착하는 경우, 배관이 짧아짐으로 컨덕턴스 손실이 줄어들고 따라서 부스터 펌프 자체의 배기 용량이 적어져도 공정 장비 내부의 진공도에 영향을 주지 않게 된다. 이렇게 부스터를 공정 장비 근처에 장착하는 경우 부

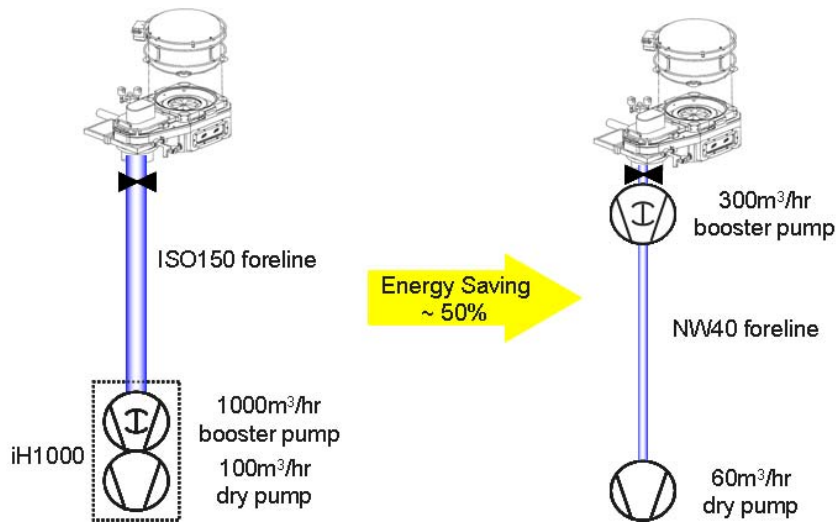


Fig 8. Smaller pumping capacity resulting in less power consumption by proximity pumping(Edwards)

스터 펌프와 건식 펌프 사이를 연결해 주는 배관의 직경도 ISO160(153 mm 내경)에서 NW40(41.5 mm 내경)으로 작게 만들 수 있다. 이처럼 진공 펌프를 공정 장비 근처에 장착함으로써 펌프의 용량을 줄일 수도 있고 배관의 직경도 짧게 만들 수 있기 때문에 진공 펌프의 소비 전력을 줄이고 배관 설치 비용도 줄일 수 있게 된다.

3.7 마찰 감소(less friction)

모터를 통해 진공 펌프에 공급되는 에너지, 즉 전력은 유체 압축, 마찰에 의한 소음과 열(heat), 진동(vibration), 냉각수를 통한 방출 등 여러 가지 경로를 따라 소멸된다.

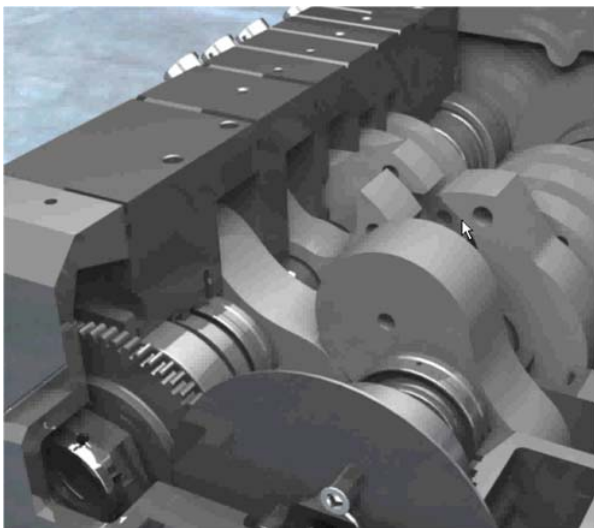


Fig 9. iGX pump(Edwards)

이때 다른 항목에 비해서 상대적으로 그 양이 적으나 베어링, 실(seal), 기어(gear) 등에서 생기는 마찰에 의해 소모되는 양이 있기 때문에 진공 펌프를 설계할 때부터 이 부분을 고려하여 만들어야 한다. Fig. 9는 마찰에 의해 소모되는 에너지를 최소화한 기술이 적용된 Edwards 사의 저소비 전력 건식 진공 펌프이다.

마찰에 의해 손실이 생기는 부분을 줄이기 위해서는 베어링을 어떤 사양으로 할 것인가, 실(seal)의 구조 및 샤프트에 닿은 부분에 대한 설계, 기어 구조, 기어 박스 내의 오일양 등을 모두 고려해야 한다. Fig. 10은 건식 진공 펌프에 공급된 에너지, 즉 전력이 어떤 형태로 소비되는지를 보여주는 개략도로서, 건식 진공 펌프에 공급되는 전체 전력은 모터의 효율에 의해 소비되는 양, 기어, 베어링, 실

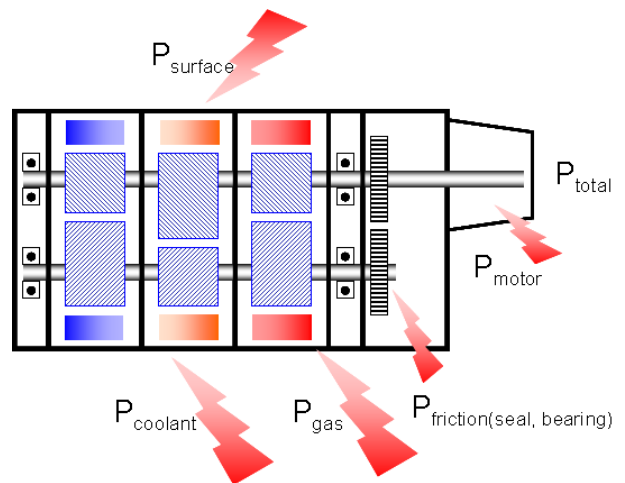


Fig 10. Heat balance of vacuum pump

(seal) 등에서 마찰에 의해 소모되는 양, 냉각 시스템을 통해 소모되는 양, 유체(기체)를 압축하는데 필요한 양, 그리고 압축 과정에서 발생하는 압축열 중 일부가 펌프 몸체 표면을 통해 대기로 방출되는 양 등으로 소비되게 된다. 따라서, 진공 펌프의 소비 전력을 줄이기 위해서는 각 항목별로 절감할 수 있는 방안을 찾아 제품 설계 및 제작시 반영하여야 한다.

$$Power = P_{motor} + P_{friction} + P_{gas} + P_{coolant} + P_{surface} \quad (12)$$

3.8 한 대의 보조 펌프로 여러 대의 고진공 펌프 보조(multi high vacuum pump with one backing pump) [15]

반도체 제조 공정에서 터보 분자 펌프를 이용하는 공정에서는 일반적으로 Fig 11과 같이 터보 분자 펌프 1대를 보조하기 위해 부스터 펌프와 건식 펌프가 직렬로 연결되는 것이 통상적이다. 이 경우 공정 chamber가 여러 대인 경우에는 각 chamber 마다 터보 분자 펌프가 장착되게 되고 각 터보 분자 펌프를 보조하기 위해 부스터 펌프와 건식 펌프가 1 : 1 로 장착되어야 한다. 그러나 실제로 공정 chamber에서 터보 분자 펌프로 유입되는 가스량은 부스터 펌프와 건식 펌프 입장에서는 압력 효과를 고려하는 경우(다시 말해서 throughput, 즉 에너지 측면) 무시할 만한 정도의 양이다. 따라서 각 공정 chamber에 장착된 터보 분자 펌프들을 하나의 부스터와 건식 펌프로 보조하더라도 가스 유량 측면에서는 문제가 되지 않는다.

여기서 Ohmi Tadahiرو 교수가 계산한 예를 들어 보면 200mm wafer 식각 공정의 경우 식각 가스로 Ar, CO, C₂H₆ 그리고 O₂를 사용하는 경우, 최대 가스 유량은 대략 1 atm L/min = 1000 sccm 정도이고 chamber 압력은 약 4.0 Pa(= 30mTorr) 정도이다. Chamber 내부 압력 P₁을 4.0 Pa(30mTorr)로 유지하고자 하는 경우, chamber 내부 구조물(baffle plate 등) 때문에 1,800 L/s이상의 배기 속도를 갖는 터보 분자 펌프가 필요하다. 이 경우 터보 분자 펌프의 배기 속도 S₁은 2,000 L/s 정도가 적합하고 이 터보 분자 펌프를 통해 배기되는 가스량은 약 1000 sccm 정도이다.[15]

터보 분자 펌프는 터보 분자 펌프의 성능이 제대로 나오기 전에는 배기구 압력에 허용 한계값(maximum allowable pressure)이 있다. 이 경우에는 터보 분자 펌프의 배기구

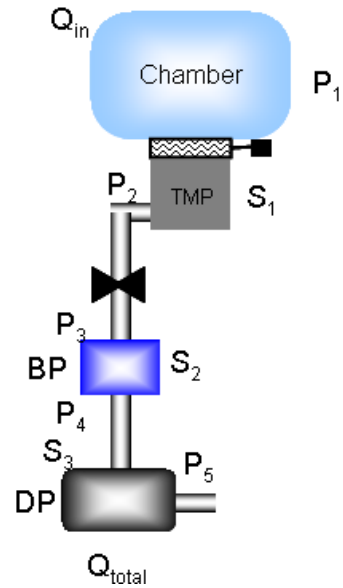


Fig 11. Typical pumping system for dry etch using turbomolecular pump and booster/dry pumps (Ohmi Tadahiرو)[15]

압력 P₂가 대략 0.4 Torr(53.55Pa)이며, 터보 분자 펌프와 부스터 펌프 S₂간의 배관에 의해 영향을 무시하면 P₃ = 0.4 Torr(53.55 Pa)가 되면, 터보 분자 펌프를 통해 배기되어야 하는 공정 가스 유량 약 1000 sccm이 부스터 펌프를 통해 배기되어야 함으로 부스터 펌프의 배기 속도 S₂는 대략 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.(1mbar L/s = 0.75 Torr L/s = 60 sccm)

$$Q = P \times S$$

$$1000 \text{ sccm} = 0.4 \text{ Torr} \times S_2(\text{L/s})$$

$$S_2 = 31.25 \text{ L/s} = 1875 \text{ L/min}$$

따라서, 부스터 펌프의 배기 속도 S₂는 최소한 1875 L/min이상 되어야 함으로 여기서는 1,900 L/min으로 가정 하자.

이 공정 장비의 공정 chamber의 숫자가 99개라면 터보 분자 펌프도 99개, 부스터 펌프도 99개가 되어야 한다. 따라서 99개의 부스터 펌프를 통해 배기되어야 할 총 가스 유량은 대략 99 X 1000sccm = 99000 sccm이며 부스터 펌프 배기구(건식 펌프 흡입구) 압력 P₄ = 50 Torr(6.67E+3 Pa) 임으로 S₃는 대략 1,485 L/min이 되어야 한다. 즉, 99개의 부스터 펌프를 보조하는데 있어 한 대의 건식 펌프만 있어도 된다는 것을 의미한다.

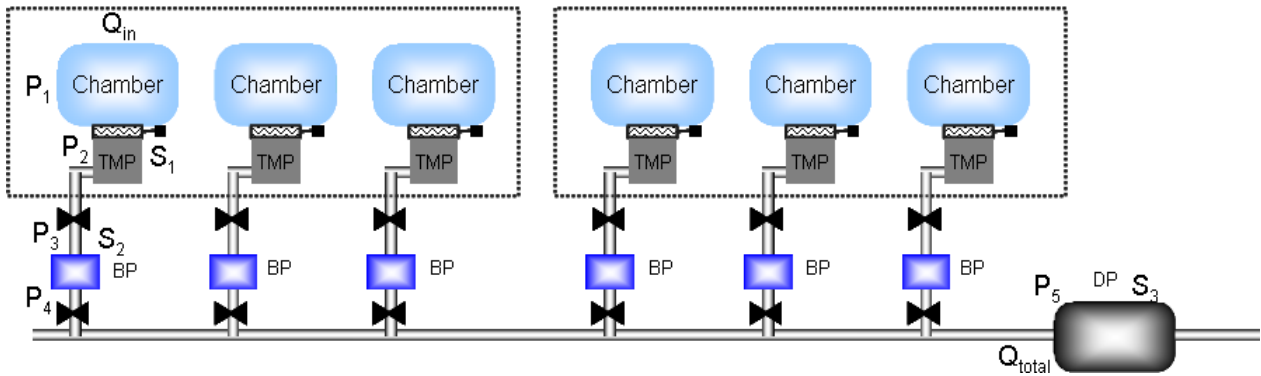


Fig 12. Backing system for turbomolecular pumps and booster pumps by just one dry pump(Ohmi Tadaihiro)[15]

따라서 반도체 공정에서 발생하는 공정 부산물 (by-products)로 인한 문제들을 고려하지 않고 소비 전력 절감 측면에서 살펴보면 Fig. 11과 같은 현재 방식을 Fig 12와 같이 한 대의 건식 펌프로 보조하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있다.

Fig 12처럼 99대의 터보 분자 펌프와 99대의 부스터 펌프를 한 대의 건식 펌프로 보조하는 경우 소비 전력을 계산하여 비교해 보면 다음과 같다.

- 99대의 터보 분자 펌프 소비 전력 : $680 \text{ W/pump} \times 99 \text{ pumps} = 67320 \text{ W}$
- 99대의 부스터 펌프 소비 전력 : $0.4 \text{ kW/pump} \times 99 \text{ pumps} = 39.6 \text{ kW}$
- 1대의 건식 펌프 소비 전력 : 3.7 kW

따라서 Ohmi Tadaihiro 교수가 제안하고 계산한 것처럼 건식 펌프를 1 : 1 로 연결하는 경우 총 소비 전력은 $67.32 \text{ kW} + 39.6 \text{ kW} + 366.3 \text{ kW} = 473.22 \text{ kW}$ 이나 99대의 터보 분자 펌프와 99대의 부스터 펌프를 1대의 건식 펌프로 보조하는 경우 총 소비 전력은 $67.32 \text{ kW} + 39.6 \text{ kW} + 3.7 \text{ kW} = 110.62 \text{ kW}$ 이다. 대략 전체 진공 시스템에 소요되는 소비 전력의 1/4 정도로 줄일 수 있게 된다.[15]

IV. 반도체 산업 기술 발전 방향이 진공 펌프 소비 전력에 미치는 영향

반도체 산업의 기술 발전 방향이 어떤 것인지 상세하게

알 수는 없지만, 대략적인 기술적 요구 수준과 방향을 진공 펌프 측면에서 고려해 보고 이러한 요구 수준과 방향이 진공 펌프의 소비 전력에 어떻게 영향을 줄 것인가 살펴볼 필요가 있다.

4.1 450mm wafer 도입

2012년에 450mm wafer를 도입하기 위한 일들이 진행되고 있는 상황에서 일반적인 예측은 웨이퍼 면적의 증가로 인한 공정 가스량의 증가, 450mm 웨이퍼를 장착하기 위한 대형 loadlock chamber의 도입과 장비 생산성 증대를 위한 더 짧은 배기 시간, 그리고 대량의 가스 사용으로 인한 대량의 공정 부산물 발생이 진공 펌프가 직면하게 될 문제이다. 이러한 상황들은 진공 펌프로 하여금 더 많은 질소 퍼지(N₂ purge)양을 필요로 하고 더 많은 에너지를 필요로 한다. 따라서 진공 펌프 입장에서는 향후 더 많은 소비 전력을 필요로 하게 될 것이다.

4.2 Design rule과 thermal budget

선폭의 감소는 단차비가 커지는 것과 함께 식각 과정에서 고밀도 플라즈마(high density plasma) 형성을 위해서는 지금보다 더 낮은 압력과 증가된 가스 유량이 필요하고, 웨이퍼 표면에서의 균일성을 유지하기 위해 chamber 내부 구조가 더 한층 복잡해 질수 밖에 없다. 복잡한 내부 구조로 인해 컨덕턴스 손실(conductance loss)이 많이 발생한다는 것을 의미하므로 이를 보상하기 위해 가스 유량과 공정 압력에 비해 더 큰 배기 용량을 갖는 펌프가 필요하다는

것을 의미한다. 아울러 더 낮은 공정 온도에서는 낮은 증착율을 보상하기 위해 가스 유량이 증가되어야 하고 더 많은 공정 가스 유량은 더 많은 공정 부산물을 유발하게 된다. 이는 결국 더 많은 질소 퍼지를 필요로 하게 되며 결국 이론적인 고찰에서 살펴 본 것처럼 더 큰 배기 용량을 갖는 진공 펌프로 인하여 결국 더 많은 소비 전력을 필요로 한다는 것을 의미한다.

4.3 신물질(new precursor) 도입

여러 가지 공정 조건과 소자의 특성을 실현하기 위해서 새로운 물질들이 도입되고 있으며 향후에는 더 많은 신물질들이 도입되게 될 것이다. 특히나 무기물이 아닌 유기물질의 지속적인 도입, 특히 액상의 신물질 도입은 점도가 높은 물질이 진공 펌프로 유입된다는 것을 의미하며 진공 펌프 입장에서는 점성이 높은 물질을 배기하기 위해서는 토오크가 커야 한다는 것을 의미한다. 결국 큰 토오크의 필요는 소비전력의 증가를 초래하는 것이다.

이처럼 반도체 산업 기술 발전 방향은 진공 펌프로 하여금 소비 전력을 더 많이 필요로 하게 만들 것이다. 따라서 진공 펌프에 소요되는 에너지 사용량은 진공 펌프 사용자들이 에너지를 사용하지 않는 또는 줄이지 않는 한 계속적으로 증가될 수밖에 없는데 이런 측면에서 진공 펌프에 필요한 소비 전력의 절대량을 감소시키는 노력보다는 에너지 소비 효율을 높이는 방향으로 논의가 되어야 한다.

V. 결 론

진공 펌프의 소비 전력에 대한 이론적인 고찰과 진공 펌프 소지 전력 절감 방법 등에서 살펴보았듯이 진공 펌프 사용으로 인한 소비 전력 문제를 해결하기 위해서는 진공 펌프 제조업체들이 할 수 있는 부분들 즉, pumping mechanism(Screw, Roots, Claw 등)과 흡입구와 배기구 간의 배기 용량비(체적비) 등에 대한 고려와 함께 사용 환경과 방법 등에 대한 고려도 필요하다.

반도체 산업 기술 발전 방향은 진공 펌프로 하여금 더 많은 에너지를 소모하게 할 것이지만, 환경 문제와 에너지 절감이라는 큰 명제를 위해서 진공 펌프 제조업체들과 진공 펌프 사용자들 간의 긴밀한 협력과 정보 공유를 통해 진공

펌프의 에너지 효율을 높이는 방향으로 연구 및 적용이 필요하다.

참고문헌

- [1] Phil Naughton, Freescale Semiconductor, "Greening our cleanrooms : Tools to help us improve cleanroom energy performance," Future Fab International, vol. 21, 1st, July (2006).
- [2] "The future of energy", Robert Haavind, Solid State Technology, November(2005).
- [3] "Measurement of conservation of energy by semiconductor manufacturing equipment and setting of targets for improvements," Philip Naughton, Semiconductor Fabtech, 29th ed.
- [4] "Watts Wrong With Pumps - Hidden Joules," Christopher Case, SEMI, April, 19th, (2006).
- [5] "Optimized 300mm vacuum pumping requires an understanding of choices," David J. Hilton(Busch Semiconductor Vacuum Group), Semiconductor Fabtech, 24th ed.
- [6] SEMI Workshop on Energy Conservation Ideas - Device Manufacturers, Equipment Manufactures, Sub-Systems & Component Suppliers : "Are you ready for SEMI Standards S23 & ITRS Energy Reduction Target ?", October, 25, 2005, Leuven Belgium.
- [7] Thomas Dreifert, et al., "ScrewLine Vacuum Pumps in Industrial Applications", 2005 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., KGaA, Weinheim(2005).
- [8] "Energy Solutions for California Industry : Ways to improve operations and profitability", The California Energy Commission and the U.S. Department of Energy, Office of Industrial Technologies Best Practice Present, August, 2001.
- [9] "Optimize Vacuum Systems, Increase Productivity and Save Energy", 2004 Wisconsin Focus on Energy BP3431-0904.
- [10] L. Kubina and S. Kovac, "Decreasing energetic demands for vacuum pumps being used in machine

- milking with utilization of a frequency converter", Res. Agr. Eng., 48(3), 103(2002).
- [11] SEMI S2 - Environment, Health and Safety Guideline for Semiconductor Manufacturing Equipment.
- [12] SEMI S23 - Guide for Conservation of Energy, Utilities and Materials used by Semiconductor Manufacturing Equipment : Purchase requirement for most device makers worldwide. Quantification of energy, utilities & materials consumption, as well as measurement, monitoring together with ongoing target settings for improvements.
- [13] SEMI E6 - Guide for Semiconductor Equipment Installation Documentation.
- [14] SEMI E51 - Guide for typical Facilities Services and Termination Matrix.
- [15] Ohmi Tadahiro and Hirayama Masaki, "Vacuum apparatus", US patents, US2004/0191079 A1, Sep. 30(2004).
- [16] Ohmi Tadahiro, "Vacuum device and vacuum pump", US patents, US2006/0182639 A1, Aug. 17(2006).
- [17] Ohmi Tadahiro, "Screw vacuum pump", US patents, US2006/0216189 A1, Sep. 28(2006).

How to reduce the power consumption of vacuum pump in semiconductor industry

J. H. Joo, Hyo Bae Kim and J. C. Kim

Edwards Korea Ltd. Chunan 330-290

(Received July 1 2008, Revised July 10 2008, Accepted July 10 2008)

For the semiconductor manufacturing processes, so many vacuum systems are needed with large power consumption for vacuum pumps. Semiconductor device manufacturing makers are concerned about the power consumption and have to address this because it is related with the environmental issues. So many solutions including the design and the control of them by vacuum pump manufacturers to reduce the power consumption of vacuum pump are proposed. However, how to use vacuum pumps by users and the conditions for vacuum pump to be used are also very important to reduce the power consumption. In this article, how to reduce the power consumption of vacuum pumps is explained briefly and what the impact of semiconductor technology trend on the power consumption is considered very briefly.

Keywords: vacuum pump, power consumption, energy, semiconductor industry

* [E-mail] jh.joo@edwardsvacuum.com