

고진공 운송계에서의 정밀 압력제어장치의 설계 및 성능시험

장 원 익,* 장 기 호,* 정 기 료,** 이 종 현*

Design and Performance Evaluation of the Precision Pressure Control System for the High Vacuum Transport Module

Won Ick Jang,* Kee Ho Jang,* Ki Ro Jung,** Jong Hyun Lee*

ABSTRACT

In the cluster tool, it is necessary to precisely control the vacuum pressure for the wafer transportation between transport module and cassette or process modules with the range of 1×10^{-4} to 5×10^{-5} torr. So we have designed the pressure control system for the transport module of the cluster tool and have evaluated its performance. Digital PID is utilized with the weighted sum of both three previous errors and one current error. The feedback signal is put into the nitrogen mass flow controller using the transport module controller. This pressure control system can prevent the transport module from the particle generation and backstreaming of hazardous process gases of the process chamber.

Key Words : Cluster Tool, Transport Module, Digital PID, Pressure Control System

1. 서 론

반도체 제조공정의 통합화(integration)는 각기 다른 장비로 실행되는 복수의 연속 공정을 한 대의 클러스터 장비(cluster tool)로 통합하는 것을 말한다. 이러한 통합화 공정은 수율의 향상, 사이클 시간의 단축, 장비 구매가격의 감소, 청정실 면적의 축소로 인한 막대한 설비투자비의 절감 등 많은 장점을 제공하기 때문에 기술적인 필요성과 경제적인 요구로 인하여 필연적으로 통합화 방향으로 반도체장비 산업이 진행되고 있

다.⁽¹⁾ 또한 반도체 소자의 집적도가 증대함에 따라 최소 회로선폭이 더욱 미세화되고, 미세오염에 대한 허용수치도 매우 엄격해지고 있다. 이러한 미세오염의 근원인 particle defect도 Table 1에 보듯이 주위환경이나 시료취급에서 보다는 주로 공정과 장비에서 많이 발생되고 있다. 따라서 클러스터 장비내에서 웨이퍼를 다른 모듈로 이송하기 위해서는 사각 스톱밸브를 반드시 개폐하여야 한다. 이때 두 모듈 사이의 갑작스런 압력변화에 따른 흐름이 형성되고, 공정시 이미 발생된 먼지가 이 흐름에 따라 클러스터 장비내에서 이동하게 된

* 한국전자통신연구소 반도체연구단 기반기술연구부

** 코닉시스템(주)

Table. 1 Distribution of particle defects (>0.5μm) in DRAMs

particle origin	% distribution in DRAMs			
	1-M bit	4-M bit	16-M bit	64-M bit
tools	40	40	35	25
process	25	25	40	60
environment	25	25	15	10
handling	10	10	10	5

다. 이로 인하여 반응모듈이 한번 오염에 노출되면 향후 수율에 결정적인 영향을 미치게 된다. 마지막으로 반도체 제조장비의 throughput은 보통 한시간당 웨이퍼를 60장 이상 처리가 가능해야 하므로 최대한 1분 이내에 모든 작업이 종료되어야 한다. 따라서 클러스터 장비에서 정상적인 공정이 진행되는 경우에 웨이퍼의 장착, 이송 및 정렬시간, 공정시간 등을 고려해 볼 때, 반응압력에 도달해야 하는 시간은 반드시 10초 이내 완료되어야 한다. 본 연구소는 이와 같은 기술변화 요구에 따라 국제 SEMI/MESC 표준규격¹⁰⁾에 의한 클러스터 장비를 개발중에 있으며, 클러스터 장비의 청정도 향상과 공정시 nucleation, condensation 등에 의해 발생된 먼지로 인한 인접모듈간 오염방지와 throughput 달성을 위하여 고진공으로 유지되는 반응모듈에 대해 정밀 압력제어 기능이 요구되었다.

본 논문은 클러스터 장비의 반응챔버를 수초내에 $1 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-5}$ torr 범위의 고진공 반응압력으로 조절하기 위하여 진공센서에서 나오는 압력신호중 과거의 3개 오차값과 현재의 오차값인 4개의 오차값들을 적용하여 수정된 디지털 PID 압력제어 방법을 구현하였다. 출력신호는 질소의 미소유량을 조절하도록 자동 유량조절기

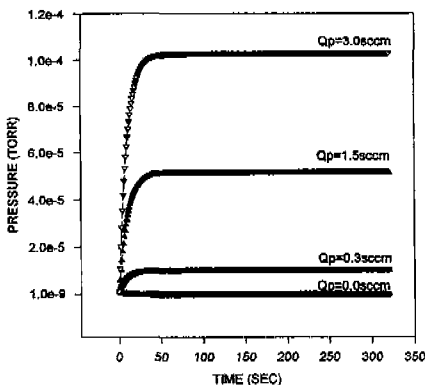


Fig. 1 The pressure variations for various values of constant flow rates

에 피드백(feedback)되도록 설계, 제작된 정밀 압력제어장치에 대한 성능시험을 수행하였다.

2. 이론적인 배경

클러스터 장비에 대한 고진공 정밀 압력제어 기능을 실현하기 위해 자동 유량조절기에 의해 미소유량을 반응챔버내에 주입하는 방법을 채택하였다. 시간에 따라 유량 Q_p 가 일정하다고 가정하여 자동 유량조절기에 의해 주입되는 유량을 예측하였다. 초기압력 P_i 에서 최종 도달압력 P 까지 배기하는데 걸리는 시간 t 와의 관계를 조사하기 위하여 Roth의 결과식을 이용하였다.¹¹⁾

$$P = (P_i - C_o) \cdot \exp\left[\frac{-V/S_t}{t} \{1 + (S_p/C)\}\right] + C_o$$

$$C_o = [1 + (S_p/C)]P_o + [1 + (S_p/C)](Q_p/S_t) \quad (1)$$

여기서 C 는 total conductance, V 는 반응챔버의 부피, S_p 는 펌프의 배기속도, S_t 는 펌프의 유효배기속도, P_o 는 펌프의 최저압력, Q_p 는 가스주입량이다.

유량 Q_p 가 0 sccm에서 3 sccm까지 변하는 경우, 시간에 따른 진공압력의 분포를 Fig. 1에 나타내었다. 반응챔버를 $1 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-5}$ torr 범위의 고진공 반응압력으로 유지하려면, 1.5-3.0 sccm 범위내에서 유량을 조절해야 하므로 자동 유량조절기의 full range는 5 sccm으로 선정하였다. 한편 반응챔버에 주입된 유량은 내부 및 외부의 누설량, 침투, 확산, 역류, desorption, vaporization 등을 모두 포함하기 때문에 실험결과와 다소 차이가 있다.

본 연구에 적용된 디지털 PID 압력제어 방법의 알고리즘(algorithm)에 대한 일반방정식은 다음과 같다.

$$O(t) = K[E(t) + (1/T_i) \int E(t) dt + T_d \cdot dE(t)/dt] \quad (2)$$

$O(t)$ 는 물리량을 조절하기 위한 시간에 따른 출력값(output), $E(t)$ 는 유지하고자 하는 물리량의 기준값과 실제값 사이의 차이인 압력오차이다. 여기서 K , T_i , T_d 는 Ziegler-Nichols tuning rule에 의해 다음과 같이 계산된다.¹²⁾

$$K = 1.2 / (Gr \cdot Lt)$$

$$T_i = 2Lt$$

$$T_d = Lt/2$$

여기서 Gr은 단위스텝(unit step)으로 입력을 가했을 때 측정되는 최대의 기울기, Lt은 단위스텝의 입력을 가한 순간부터 물리량이 증가하기 시작하기까지의 지연시간(lag time)이다. 이 값은 단위스텝 입력에 대한 시간대 물리량의 그래프에서 최대 기울기가 생긴 점에서 그 기울기에 해당하는 직선을 그었을 때, 이 직선이 시간축과 만나는 교차점으로 정의된다.

보통 디지털 제어기의 경우 유한한 메모리(memory)와 계산시간을 고려하여 현재로 부터 세개의 오차값만을 계산에 고려한다. 따라서 본실험에서 실제 사용된 클러스터 모듈 제어기의 출력계산에는 고진공 센서에서 나오는 마지막 3개의 오차값들과 현재의 오차값인 4개의 오차값들에 대한 weighted-sum에 의한 출력값이 자동 유량조절기에 피드백 되도록 하는 아래의 디지털 PID 알고리즘이 적용되었다.

$$O(k) = K_0 \cdot E(k) + K_1 \cdot E(k-1) + K_2 \cdot E(k-2) + K_3 \cdot E(k-3) \quad (3)$$

$$K_0 = aK$$

$$K_1 = \{b - (y-1)a\}K$$

$$K_2 = \{c + ay - (y-1)K_i\}K$$

$$K_3 = \{-yK_i - (y-1)K_2\}K$$

여기서

$$y = -\exp(-3Ts/Td)$$

$$a = 1 + Td/Ts$$

$$b = y - 1 + (Ts/Ti) - (2Td/Ts)$$

$$c = yTs/Ti + (Td/Ts) - y$$

이며, Ts는 제어동작의 주기이다. 이러한 PID제어는 연속적인 값을 갖는 출력수단에 의해서 역시 연속적인 값을 갖는 물리량을 제어하고자 하는 분야에 적용될 수 있다. 이때 입력값과 출력값은 모두 유한한 범위를 가져야 한다. 따라서 실제 고진공 압력제어 기능에 적용된 입력변수는 이온게이지(ion gauge)의 출력신호로 0-10V (10^{-10} - 10^0 torr)이고, 출력변수는 자동 유량조절기의 설정신호로 0-5V (0-5sccm)이다. 반응압력 범위는 3.1×10^{-4} torr 이하인 molecular flow이므로 초기값을 1×10^{-4} torr로 하였다. 최종값은 현재 부착된 공정모듈의 생산성을 고려하여, 진공배기계가 수십 또는 수백 mtorr의 공정압력에서 30 sec 이내에 배기할 수 있는 진공압력인 5×10^{-5} torr로 선정하였다.

3. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험장치는 Fig. 2와 같이 구성되어 있는 클러스터 장비이다. 즉, 웨이퍼를 자동으로 운

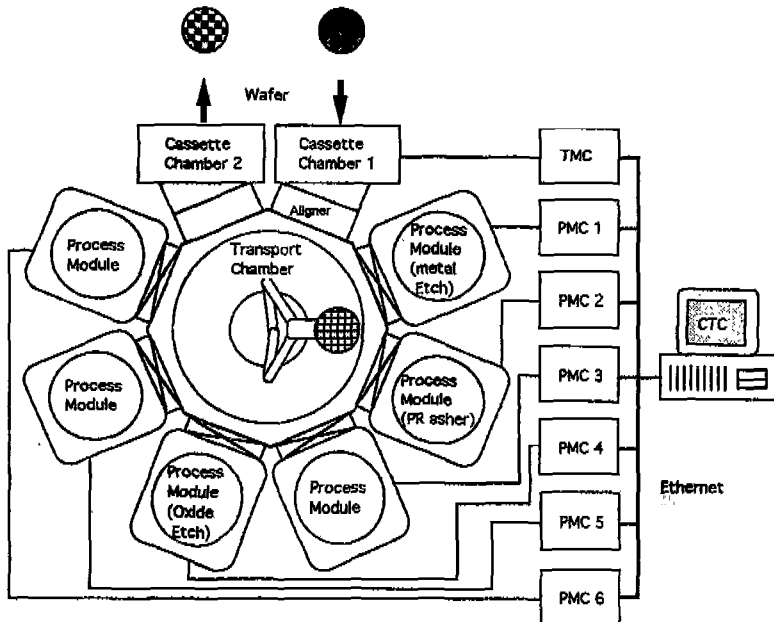


Fig. 2 The schematics of the cluster tool

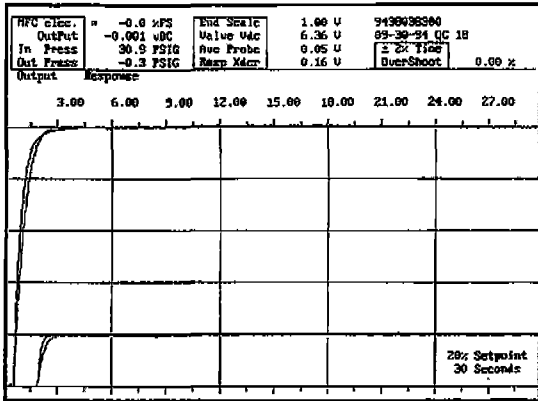


Fig. 4 Characteristic curve of the mass flow controller for the nitrogen gas

이며, 주의할 점은 자동 유량조절기 자체가 또하나의 closed-loop 제어기라는 점이다. 따라서 Fig. 4에 제시된 자동 유량조절기의 제어 특성곡선을 보면, 지연시간인 1초를 포함하여 설정값(setpoint)의 2% 이내로 안정화되는 시간이 약 4초 정도이다. 그러므로 제어초기에는 open-loop로 자동 유량조절기를 안정화시킨 다음, PID 제어 단계로 진입하는 것이 매우 중요하다. 여기에 사용되는 질소는 압력조절기, 흐름스위치(flow switch), 필터(filter)를 통해 40 psig의 압력으로 유입되어 질소 공급용 밸브, 자동 유량조절기를 지나 반응 챔버에 주입된다. 이때 이온게이지에서 나오는 압력신호는 반응모듈 제어기로 입력되며, 출력은 위에 기술된 디지털 PID 알고리즘으로 계산된다. 계산된 PID 출력값은 디지털 출력부를 거쳐 자동 유량조절기로 피드백되어 질소의 미소유량을 조절하는 방법에 의해 압력을 조절한다. 여기서 자동 유량조절기의 전원과 이온게이지의 전원 및 압력값은 MKS 146 제어기에서 공급된다.

4. 실험결과 및 고찰

제작된 고진공 압력제어장치를 반응모듈에 부착한 후, 짧은 시간내에 반응압력으로 안정하게 도달시키기 위하여 open-loop 시스템으로 Gr, Lt, Ts를 측정하는 예비실험을 수행하였다. 질소의 유량이 2 sccm 단위스텝인 경우, 그 실험결과를 Fig. 5(a),(b)에 나타내었다. 이때 반응챔버의 초기압력은 2.2×10^{-6} torr 이다. Gr 은 6.4×10^{-5} torr/sec, Lt는 1 sec 이하로 추정되지만 반응압력 조건에 따라 실제적으로 많은 차이를 보이고

있으며, Ts는 자동 유량조절기가 충분히 피드백될 수 있도록 반응압력 조건에 맞추어 조절하였다. 여러가지 Gr, Lt, Ts에 대한 많은 실험을 통하여 overshoot와 undershoot가 동시에 발생하는 경우, overshoot만 발생하는 경우, overshoot와 undershoot가 전혀 발생하지 않는 경우인 3부류의 실험결과를 얻었다.

반송압력은 5×10^{-5} torr로, N_2 의 초기유량은 1 sccm으로 설정했을때, 여러가지 Gr, Lt, Ts에 대한 시간에 따른 압력변화량을 Fig. 6에 나타내었다. Gr이 0.02 torr/sec, Lt가 0.1 sec, Ts가 0.25 sec인 경우, 안정화 시간은 20 sec, 안정화 후의 압력오차는 $\pm 5.0 \times 10^{-7}$ torr로서 설정값에 대해 $\pm 1\%$ 이며, 최대 및 최소 도달압력은 9.8×10^{-5} torr와 3.7×10^{-5} torr로 설정값에 대해 96% overshoot와 26% undershoot가

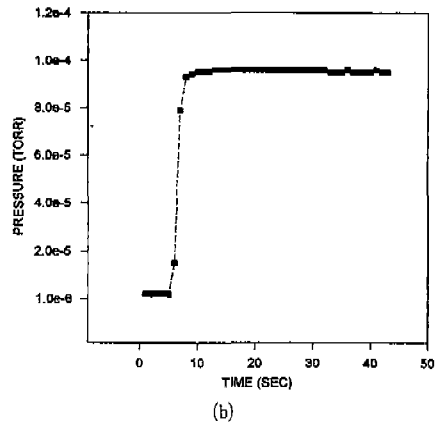
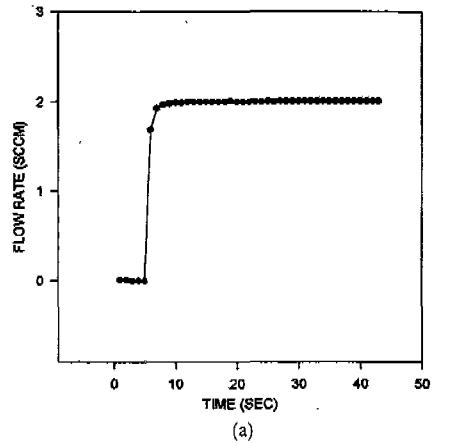


Fig. 5 Flow rate (a) and pressure (b) variations as a function of time for 2 sccm unit step input of the nitrogen gas

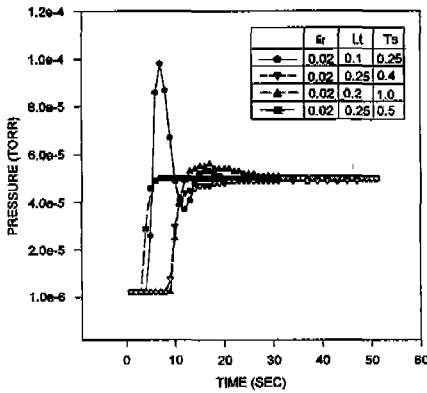


Fig. 6 Pressure variations as a function of time for various values of Gr, Lt and Ts. (transport vacuum = 5×10^{-5} torr)

동시에 발생하였다. Gr이 0.02 torr/sec, Lt가 0.2 sec, Ts가 1.0 sec인 경우, 안정화 시간은 25 sec, 안정화 후의 압력오차는 없었으나 최대 도달압력이 5.6×10^{-5} torr 로서 설정값에 대해 12% overshoot가 발생하였다. 이는 초기에 자동 유량조절기의 반응시간이 너무 늦어 압력의 변동량이 크므로 상하로 fluctuation 현상이 발생하였으며, 이것은 반응챔버 내부의 갑작스런 압력변동에 따른 기류로 인하여 먼지들이 발생될 수 있으므로 바람직하지 않다.⁶⁾ 이와 같은 시행착오법에 의해 PID gain을 조절하여 Gr이 0.02 torr/sec, Lt가 0.2 sec, Ts가 0.4 sec인 경우에 안정화 시간이 30 sec로 가장 우수한 결과를 얻었다. 그러나 이들 경우들은 자동 유량조절기 자체가 또한 하나의 closed-loop 제어기로 1초의 지연시간을 포함하여 설정값의 2% 이내로 안정화되는 시간이 약 4 sec 이상 소요되므로 너무 늦다. 따라서 본 연구에서는 안정화 시간을 최대한 단축하기 위해 이전 실험에서 구해진 초기유량을 일정한 값으로 일단 설정하고, 실제 설정값에 거의 도달하는 시간인 4초가 지난 후에 PID 제어를 시작하는 수정된 방법을 제시하였다. 그 결과, Gr이 0.02 torr/sec, Lt가 0.25 sec, Ts가 0.5 sec인 경우, 안정화 시간은 8 sec로 크게 향상되었다. 이때 압력오차는 $\pm 5 \times 10^{-7}$ torr로서 설정값에 대해 $\pm 1.0\%$ 이며, 최대 도달압력은 5.0×10^{-5} torr로 설정값과 동일하였다. 따라서 갑작스런 압력변동에 따른 fluctuation 없이 10초 이내에 안정화시킬수 있는 압력제어 방법을 구현하였으며, 기존의 방법보다 약 75% 정도가 개선이 되었다.

반송압력이 1×10^{-4} torr인 경우, 여러가지 Gr, Lt, Ts에 대한 시간에 따른 압력변화량을 Fig. 7에 나타내었다. Gr이 0.03 torr/sec, Lt가 0.15 sec, Ts가 0.5 sec인 경우, 안정화 시간은 31 sec, 안정화 후의 압력오차는 $\pm 1.0 \times 10^{-6}$ torr로서 설정값에 대해 $\pm 1\%$ 이다. Gr이 0.02 torr/sec, Lt가 0.2 sec, Ts가 0.5 sec인 경우, 안정화 시간은 30 sec, 안정화 후의 압력오차는 $\pm 5.0 \times 10^{-7}$ torr로서 설정값에 대해 $\pm 0.5\%$ 로 가장 우수하지만 안정화 시간이 역시 너무 늦다. 따라서 초기유량을 2.1 sccm으로 설정하고 4 sec후에 PID 제어를 시작하는 방법으로 Gr이 0.02 torr/sec, Lt가 0.15 sec, Ts가 0.5 sec인 경우, 안정화 시간은 9 sec이다. 안정화 후의 압력오차는 $\pm 5 \times 10^{-7}$ torr로서 설정값에 대해 $\pm 0.5\%$ 이며, 최대 도달압력은 1.0×10^{-4} torr로 설정값과 동일하다. 앞에서 시도된 기존의 방법보다 역시 약 75% 정도가 개선이 되었다.

이상의 결과를 종합하면, 초기압력인 2.1×10^{-6} torr에서 반송압력이 1×10^{-4} 이나 5×10^{-5} torr로 제어하기 위해서 질소의 초기유량을 각각 2.1 sccm, 1 sccm으로 설정하고 4초 후에 디지털 PID 제어를 수행하여야 10 sec 이내에 안정화되며, 안정화 후에 최대 압력오차는 설정값에 대해 $\pm 1.0\%$ 이내 제어가 가능함을 알 수 있다.

5. 결론

반도체 제조공정의 통합화를 위한 클러스터 장비용

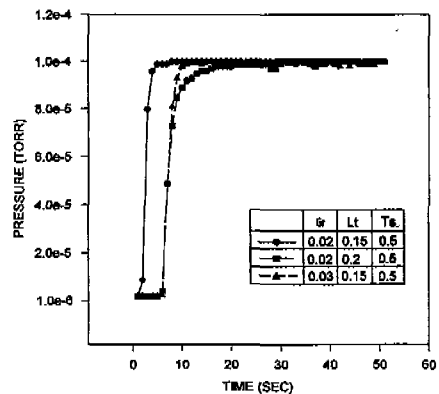


Fig. 7 Pressure variations as a function of time for various values of Gr, Lt and Ts. (transport vacuum = 1×10^{-4} torr)

반송모듈에 대해 디지털 PID 압력제어 방법을 적용하여 고진공에서의 정밀 압력제어장치를 구현하였다. 성능시험결과, 초기압력인 2.1×10^{-6} torr에서 반송압력인 1×10^{-4} 이나 5×10^{-5} torr로 제어하기 위하여 2.1 sccm 이하로 질소의 초기유량을 설정하고, 4초 후에 디지털 PID 제어를 시작하여야 10 sec 이내에 최대 압력오차가 $\pm 1.0\%$ 정도의 우수한 성능을 얻을 수 있었다. 이러한 고진공 압력제어장치는 카세트모듈이나 공정모듈과의 웨이퍼운송시 먼지발생이나 공정가스들의 역류에 의한 오염방지, 고가인 사각밸브의 수명유지에 기여하게 될 것이며, 결과적으로 공정성능이 향상되고 유지보수 시간이 절감되어 생산성이 증대될 것이다.

참고문헌

1. M.E.Bader, R.P.Hall and G.Strasser, "Integrated Process Equipment," Solid State Technology, pp.149-154, May 1990.
2. Semiconductor Equipment and Materials International, "SEMI International Standards 1994," 1994.
3. A.Roth, "Vacuum Technology," North-Holland Publishing Company, pp.60-146, 1976.
4. J. R. Leigh, "Applied Digital Control, Design & Implementation," Prentice Hall International Ltd., pp.130-132. 1992.
5. Techware System Corporation, PAL Customer Pascal Programming Kit for OS9, Ver.2.5, 1993.
6. D.Chen and S.Hackwood, "Vacuum particle generation and the nucleation phenomena during pumpdown," J. Vac. Sci. Technol. A, Vol.8, No.2, pp.933-940, Mar/Apr 1990.