

점착방지를 위한 승화건조기의 설계방법

김종팔, 이상우, 전국진, 조동일
서울대학교 전기공학부

Design Method for Sublimation Drying System for Prevention of Stiction

Jongpal Kim, Sangwoo Lee, Kukjin Chun, Dongil Cho
School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - The stiction phenomena poses a design constraint in surface micromachining by reducing the releasable size of the microstructure. This problem occurs during the fabrication process of surface micromachined microstructures during the wet etch of sacrificial layers. For the prevention of the sticking problem, the microstructure is released by sublimation after the substitution of the sacrificial layer etchant with a sublimation material heated above its melting temperature. In the sublimation drying method, the sublimation materials such as p-dichlorobenzene, t-butyl alcohol, and cyclohexane are used. In this paper, a method for designing a sublimation drying system is developed, and its performance is experimentally evaluated.

p-dichlorobenzene이 다시 고화되어 진공펌프를 손상시키는 것을 방지하기 위하여 청정실의 냉각수를 이용하여 미리 고화시키며 분해 소제가 가능하도록 하였다. 오일역류방지장치는 승화건조챔버가 진공중 펌프가 멈췄을 때 펌프오일이 역류하지 못하도록 펌프흡입단이 자동으로 벤트되도록하는 장치이다. 시편장착을 위한 벤트시 미소입자나 수분의 최소화를 위해 필터를 공기벤트단에 설치하였다. 수분제거를 위한 승화건조분위기조성때나, 승화건조공정후 질소를 서서히 흘러 벤트시킨다.

1. 서 론

점착현상은 표면미세가공법에서 희생층 습식식각후 건조시 표면장력으로 인한 모세관힘(capillary force), 반데르발스힘(van der Waals force), 정전기력(electrostatic force) 그리고 솔리드브릿징(solid bridging)등의 원인에 의하여 미세구조물이 바닥으로 붙는 현상을 일컫는다[1]. 이는 부유길이를 제한시킴으로써 미세구조물 설계시 제약조건중의 하나이다. 이러한 점착현상을 극복하기 위한 공정법중 한 방법이 승화건조법이다. 승화건조법은 희생층습식식각후 식각액을 초순수에 세척한 후 액화시킨 승화물질과 대치시켜 승화건조시킴으로써 미세구조물을 부유시키는 방법이다[2]. 승화물질로는 p-dichlorobenzene, t-butyl alcohol, cyclohexane 등이 쓰인다[3~6]. p-dichlorobenzene은 빠른 고화시 구조물을 파괴하고 진공장비를 필요로 하는 단점을 가지고 있으며, t-butyl alcohol은 승화속도가 빠른 반면 진공장비와 열판 그리고 냉각기가 동시에 필요하며, cyclohexane은 진공장비가 필요 없는 반면 냉각장비와 질소를 필요로 한다. 이 중 본 논문에서는 승화물질로 p-dichlorobenzene을 사용한 승화건조장치를 설계, 제작하였다.

2. 본 론

2.1 개념설계

승화건조기제작시 고려해야할 사항은 승화건조챔버의 크기, 진공펌프의 용량, 콜드트랩(cold trap), 압력제어, 진공펌프 오일 역류방지장치등으로 그림 1 과 같은 개념을 가진다. 승화건조챔버는 4인치 실리콘 웨이퍼크기의 시편이 공정 가능하도록 지름 14cm, 높이 10cm의 값을 갖도록 하였다. 승화챔버내의 압력을 일정한 값으로 유지시키기 위하여 압력센서와 트로틀밸브를 이용하여 압력제어시스템을 갖췄으며 콜드트랩은 승화된

2.2 상세설계

2.2.1 진공챔버출력단 배기속도

진공챔버출력단에서 필요한 배기속도를 계산해보면 다음과 같다. p-dichlorobenzene이 4" wafer에 2mm 두께로 고화되어 있다면 그 체적은

$$V = \frac{\pi 0.1^2}{4} \times 2 \times 10^{-3} m^3 = 15.71 ml$$

가 되고, 20℃에서 밀도가 $\rho = 1.25 g/ml$ 이므로, 챔버내에 존재하는 p-dichlorobenzene의 질량은

$$m = \rho V = 1.25 g/ml \times 15.71 ml = 7.14 g$$

이다. 한편 p-dichlorobenzene의 분자량은 147 g/mol 이므로 p-dichlorobenzene 질량 7.14g 은

$$\frac{7.14}{147} = 48.57 \times 10^{-3} mol$$

에 해당되고 모든 기체는 표준상태에서 1 mol 당 22.4l의 부피를 가지므로 0.5 Torr에서는 다음과 같은 부피를 가지게 된다.

$$V_2 = V_1 \times \frac{P_1}{P_2} = \frac{22.4 l \times 760 Torr}{0.5 Torr} = 34 \times 10^3 l$$

따라서 승화건조되어야할 p-dichlorobenzene의 기체부피는 다음과 같다.

$$\frac{34 \times 10^3 l}{1 mol} \times 48.57 \times 10^{-3} mol = 1.65 \times 10^3 l$$

만약 10분의 승화 건조시간을 원한다면 최소한

$$\frac{1.65 \times 10^3 l}{600 sec} = 2.75 l/sec = 165 l/min$$

의 펌프배기속도가 필요하다.

2.2.2 자유행정거리

진공배기통로의 자유행정거리는 다음과 같으며 컨덕턴스 계산에 이용된다(7).

$$\lambda = \frac{1}{\beta \delta^2 \pi \sqrt{2}} = \frac{V}{n N_A \delta^2 \pi \sqrt{2}}$$

n은 몰수를 의미하며, β 는 리터당 가스분자수를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{n N_A}{V} = \frac{N_A P}{RT} = \frac{6.023 \times 10^{23} P}{8314.4 T} \\ &= 7.24 \times 10^{19} \left(\frac{P}{T} \right) \text{ molecules/l} \end{aligned}$$

$$\lambda = \frac{R}{N_A \delta^2 \pi \sqrt{2}} \left(\frac{T}{P} \right)$$

δ 는 충돌과정에서의 가스분자의 유효지름을 의미하며, 질소나 산소에 대해서는 $\delta = 3.7 \text{ \AA}$ 의 값을 가진다. 따라서 293K에서 압력값(0.5Torr=66.6Pa)에 따른 질소 혹은 산소의 자유행정거리는 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{6.65 \times 10^{-3}}{P} [m] = 0.10 \text{ mm}$$

2.2.3 배기통로의 컨덕턴스

최종적으로 필요한 펌프의 배기용량을 알기 위해선 중간에 존재하는 관의 저항정도를 계산하여야한다. 이를 위해 우선 유체의 흐름이 점성흐름(viscous flow)인지 분자흐름(molecular flow)인지를 Knudsen number를 정의하여 다음과 같이 구분한다.

$$\text{Knudsen number } K_n = \frac{\lambda}{D}$$

- D : internal diameter
- viscous flow if $K_n < 0.01$ (i.e. $D > 100 \lambda$)
- molecular flow if $K_n > 1.0$ (i.e. $\lambda > D$)
- transitional flow if $0.01 < K_n < 1.0$
- λ : mean free path

승화건조장비의 배기통로를 최소한 20mm이상의 지름으로 제작을 한다면, $D \sim 20 \text{ mm}$ 그리고 $P \sim 66.6 \text{ Pa}$ (0.5 Torr)이므로 $D \approx 20 \text{ mm} > 100 \lambda = 10.0 \text{ mm}$ 로서 점성흐름에 속한다고 볼 수 있다 점성흐름이 있을 때의 실린더의 컨덕턴스 C_{in} 는 다음과 같다.

$$C_{in} = 1.5 \times 10^{-9} \left(\frac{D^4}{\eta L} \right) P_{av} \text{ l/min}$$

$$P_{av} = \frac{P_{bi} + P_{bo}}{2}$$

- D : diameter of the tube (mm)
- L : length of the tube (m)
- η : gas viscosity

$$\eta \approx 500 \left(\frac{\rho \sigma \lambda}{\delta^2} \right) = 2.7 \times 10^{-26} \left[\frac{\sqrt{MT}}{\delta^2} \right]$$

- for air $M = 29 \text{ g/mol}$, $T = 293 \text{ K}$,
- $\delta = 0.37 \times 10^{-9} \text{ m}$
- $\eta = 1.82 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

$$\therefore C_{in} = 8.2 \times 10^{-5} \left(\frac{D^4}{L} \right) P_{av} \text{ l/min}$$

예를 들어 배기관 지름, 길이, 평균압력이 각각 $D = 20 \text{ mm}$, $L = 3 \text{ m}$, $P_{av} = 66.6 \text{ Pa}$ (0.5Torr)이라면 배기관의 컨덕턴스는 $C_{in} = 291 \text{ l/min}$ 이다.

2.2.4 진공펌프의 필요 배기량

진공챔버출력단의 필요배기량과 배기관의 컨덕턴스를 바탕으로 펌프의 필요배기량을 그림 2를 참고로 구하면

$$S_p \approx \frac{Q}{P_p}$$

$$S_e \approx \frac{Q}{P_c}$$

$$\frac{1}{C} = \frac{P_c - P_p}{Q} = \frac{P_c}{Q} - \frac{P_p}{Q} = \frac{1}{S_e} - \frac{1}{S_p}$$

$$S_p = \frac{S_e C}{C - S_e} = \frac{291 \times 165}{291 - 165} = 381 \text{ l/min}$$

의 값을 얻을 수 있다.

2.2.5 배기시간

그림 3과 같을 때 펌프의 배기속도가 S, 챔버의 부피가 V이고, 압력이 P_0 에서 P까지 떨어지는데 걸리는 시간은

$$\left(\frac{dm}{dt} \right)_{\text{system}} = \frac{d}{dt} \left(\int_{c.v.} \rho dV \right) + \int_{c.s.} \rho (V_r \cdot n) dA$$

$$0 = \dot{m} + \rho A v = \dot{m} + \rho S, \quad m = \frac{PV}{RT}$$

$$0 = \dot{P} + \frac{\bar{R}T}{V} \rho S = \dot{P} + \frac{\rho S}{V} \frac{PV}{m}$$

$$m = \rho S$$

$$0 = \dot{P} + \frac{S}{V} P \quad S = S(P)$$

$$\int \frac{dP}{S(P)P} = - \int \frac{dt}{V}$$

S(P)가 상수라 가정하면

$$P = P_0 e^{-\frac{S}{V}t}$$

$$\therefore t = \frac{V}{S} \ln \frac{P_0}{P}$$

Chamber 내경이 14cm이고 높이가 10cm이므로,

$$V = \pi d^2 h = 6.2 \text{ l}$$

$$\therefore t = \frac{V}{S} \ln \frac{P_0}{P} = \frac{6.2}{S} \ln \frac{760}{0.5} = \frac{45.4}{S} \text{ sec}$$

배기속도 $S = 700 \text{ l/min}$ 의 상용진공펌프를 이용할 경우 압력을 대기압에서 0.5Torr 정도로 떨어뜨리는데 걸리는 시간은 $t = 3.9 \text{ sec}$ 가 된다.

3. 결 론

개념설계를 통하여 승화건조장비의 챔버크기, 콜드트랩, 진공펌프 오일역류방지장치와 에어필터등의 필요한 요소들을 첨가하였으며, 치수설계를 통하여 승화건조장비의 챔버출력단에서의 배기용량, 배기관의 컨덕턴스 및 펌프의 필요 배기용량을 계산하였으며 그림 4 는 제작된 승화건조기를 그림 5 는 승화건조된 외팔보를 보여준다.

4. 사 사

본 논문은 통상산업부와 과학기술처에서 시행한 선도기술개발사업(표면미세가공 기반기술개발)의 연구비 지원에 의해서 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. L. Alley, G. J. Cuan, R. T. Howe, and K. Komvopoulos, "The Effect of Release-Etch Processing on Surface Microstructure Stiction", Solid-State Sensors and actuator Workshop, Hilton Head, SC, pp.202-207, 1992.
- [2] John Y. Kim and Chang-Jin Kim, "Comparative Study of Various Release Methods for Polysilicon Surface Micromachining", Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, pp.442-447, 1997.
- [3] D. Kobayashi, T. Hirano, T. Furuhashi and H. Fujita, "An integrated lateral tunneling unit", Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, pp. 214-219, 1992
- [4] N. Takeshima, K. J. Gabriel, M. Ozaki, J. Takahashi, H. Horiguchi and H. Fujita, "Electrostatic parallelogram actuators", Tech. Dig. Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators, pp. 63-66, 1991
- [5] R. Legtenberg, H. A. C. Tilmans, "Electrostatically driven vacuum-encapsulated polysilicon resonators : part 1. design and fabrication", Sensors and Actuators A-1, 41, pp. 57-66, 1994
- [6] 이상우, 한아름, 조동일, "P-dichlorobenzene 승화 건조기를 이용한 폴리실리콘 구조물의 부착 방지", 대한전기학회 MEMS 연구회 학술발표회 논문집, pp. 131-142, 1997
- [7] Audrey M. Glauert, "Practical methods in electron microscopy", PORTLAND PRESS, 1994

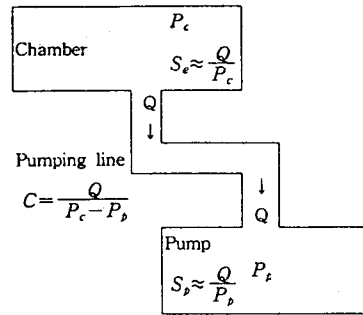


그림 2. 펌프의 배기속도

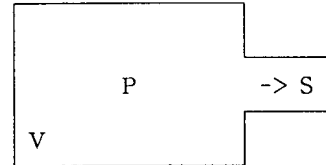


그림 3. 펌프의 배기시간

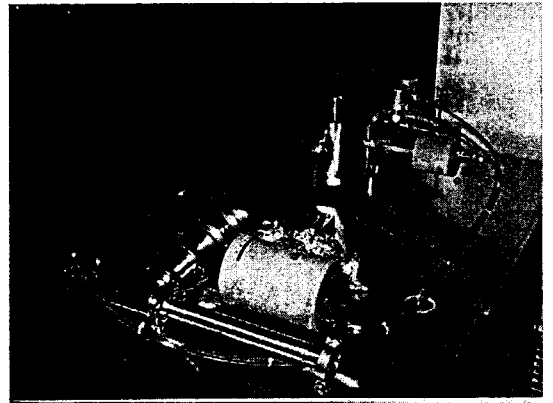


그림 4. 제작된 승화건조기의 모습

Releasing System Concept Drawing

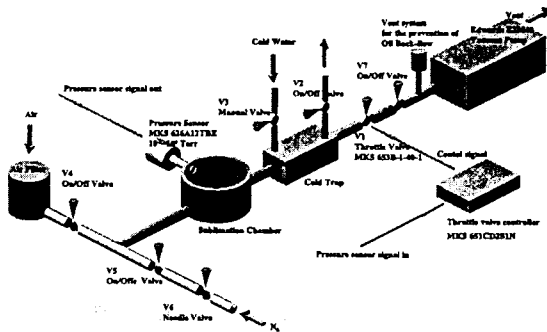


그림 1. 승화건조장치의 개념도

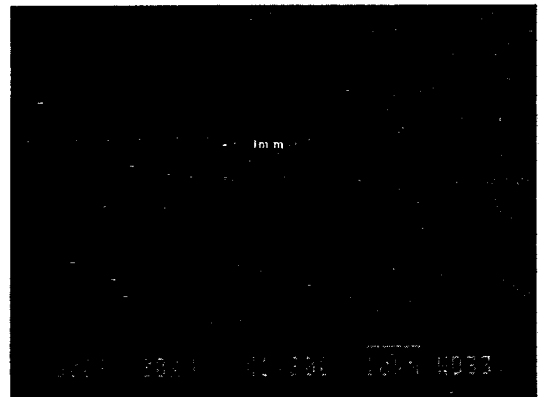


그림 5 승화건조된 외팔보 (두께 3μm, 폭 10μm, 바닥과의 간격 2μm, 길이 1mm)