

노광파장과 근접거리에 따른 두꺼운 감광막의 측면기울기 변화에 관한 연구

한창호^{†*} · 김 학* · 김현철* · 전국진*

^{†*}서울대학교 전기·컴퓨터공학부

A Study on Variation of the Sidewall Angle of a Thick Photoresist on the Wavelength and the Proximity gap

Chang Ho Han^{†*}, Hak Kim*, Hyeon Cheol Kim*, and Kuk Jin Chun*

^{†*}School of Electrical Engineering and Computer Sciences, Seoul National University

ABSTRACT

In this work, the variation of the sidewall profile of a thick photoresist on the wavelength and proximity gap was investigated. PMER P-LA900PM, DNQ (DiazNaphthoQuinone) novolac type photoresist, is used for experiments. The calculated results agreed well with the experimental results.

Key Words : Thick Photoresist, Contact Printing, Sidewall Angle, absorption, diffraction

1. 서 론

고형상비의 두꺼운 금속 구조물을 제작하기 위해 자외선 노광방법으로 감광막 몰드를 제작하여 금속도금을 하는 방법이 주로 쓰인다[1]. 이 때 감광막의 형상에 의해 구조물의 형상이 정해지기 때문에 감광막 몰드 형성 공정은 매우 중요하다. Fig. 1은 잘 형성되지 않은 감광막 몰드와 도금후의 금속 구조물의 전자현미경 사진이다.

엑스레이를 이용한 리가(LIGA)공정은 엑스레이의 높은 투과성 때문에 밀리미터이상의 매우 두꺼운 구조

물을 제작할 수 있는 반면 자외선을 이용한 감광막의 노광은 감광막의 투과도 및 빛의 회절로 인해 고형상비의 구조물 형성이 어렵다[3]. 본 논문에서는 novolac 레진과 DNQ(DiazoNaphtho-Quinone) 타입의 현상억제 물질로 이루어진 DNQ-novolac 감광막의 자외선을 이용한 접촉노광과 측면기울기에 영향을 주는 요소에 대해 다룬다.

2. 이 론

2.1. DNQ-novolac 감광막

DNQ-novolac 감광막은 1970년대에 Dill에 의해 처음 모델화되었다[2]. 이 모델은 현상억제 물질의 농도 M 에 따라 흡수계수가 변하고 이에 따라 깊이에 따른 광원의 세기가 달라진다는 것이다.

Dill모델은 다음과 같은 세 가지 식에 의해 설명할 수 있다.

$$\frac{\partial I(r, t)}{\partial r} = -aI(r, t) \quad \text{식(1)}$$

$$a = AM(r, t) + B \quad \text{식(2)}$$

$$\frac{\partial M(r, t)}{\partial t} = -CI(r, t)M(r, t) \quad \text{식(3)}$$

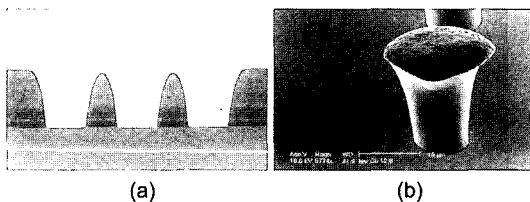


Fig. 1. (a) Sloped sidewall profile of photoresist and (b) Cu structure after removing photoresist.

[†]E-mail : id@mintlab.snu.ac.kr

노광에너지(I)와 현상억제물질의 농도(M)은 시간(t)와 표면으로부터의 깊이(r)에 따라 변하는데 식(1)은 빛의 일반적인 특성으로 노광에너지가 어떤 물질내에서 깊이에 따라 지수적으로 감소하는 것을 나타내고 식(2)는 DNQ-novolac 감광막의 특성으로 흡광도 a 가 농도 M 과 관계 있음을 보여준다. 식 (3)은 농도 M 이 노광에너지가 늘어남에 따라 상수 C 와 관련하여 줄어드는 것을 나타낸다. 여기서 A, B, C 는 감광막의 측정 가능한 상수로써 Dill 파라미터로 정의되고, 이 값은 감광막과 파장에 따라 다르다. 그리고 농도 M 은 0과 1 사이의 값을 갖는데 $t=0$, 즉 전혀 노광하지 않았을 때는 1이고 $t=\infty$, 즉 완전 노광 후 0이다.

식(1)~(3)을 이용하면 시간과 깊이에 따라 노광에너지의 세기와 농도 M 을 계산할 수 있다.

위의 방정식은 비선형방정식으로 정확한 해를 구할 수 없으므로 근사하여 풀면[3]

$$I(r, t) = \frac{\exp(-Br)I_{inc}}{1 + \exp(-CI_{inc}t)[\exp(Ar) - 1]} \quad \text{식(4)}$$

$$\ln M(r, t) = (-\exp(-Br) \cdot \ln(1 + \exp(-Ar)[\exp(CI_{inc}t) - 1])) \quad \text{식(5)}$$

와 같이 된다.

식(4)와 식(5)를 이용하면 감광막내부에서 노광에너지와 현상억제물질의 농도를 구할 수 있다.

2.2. 회절

2.2.1 회절

회절은 빛의 특성중의 하나로 마스크 패턴의 폭이 좁아질수록 그리고 감광막의 두께가 두꺼울수록 그 영향은 더 커진다. 회절의 영향으로 원하지 않는 부분까지도 노광이 된다. 다음 그림은 프레넬 수 u 에 대한 회절의 영향이다.

프레넬 수 $u = x\sqrt{2/\lambda r}$ 는 깊이(r), 파장(λ), 마스크 가장자리로부터의 수평거리(x)의 함수이다. Fig. 2에서

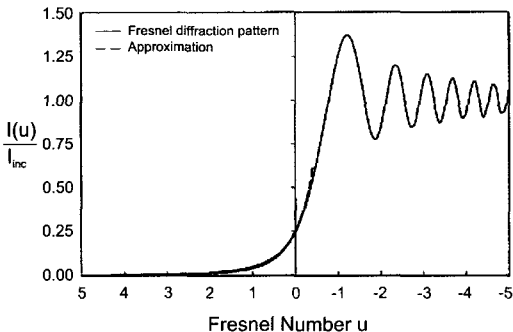


Fig. 2. Fresnel number vs. intensity [3].

보듯이 마스크 가장자리($x=0$)에서는 입사에너지의 25%가 전달되고 측면거리가 커질수록, 그리고 깊이가 깊어질수록 전달되는 노광에너지는 더 줄어든다. 식으로 표현하면 다음과 같다[3].

$$I(x, r) = \frac{I_{inc}}{4(0.5x\sqrt{2/\lambda r} + 1)^4} \quad \text{식(6)}$$

2.2.2 접촉 노광에서의 회절

마스크와 감광막의 접촉 노광의 경우는 기존의 연구 결과[3]로부터 다음과 같은 식(7), 식(8)을 연립하면 현상 후 감광막의 형상을 구할 수 있다.

$$\left(-1 = \frac{-\exp(-Br)}{4(0.5x\sqrt{2/\lambda r} + 1)^4}\right) \cdot \ln(1 + \exp(-Ar)[\exp(\tau) - 1]) \quad \text{식(7)}$$

여기서 $\tau = CI_{inc}t$ 로 시간의 함수이고

$$\tau = AT + 4e^{BT} \quad \text{식(8)}$$

이다. 여기서 A, B 는 앞서 설명한 값이고 T 는 두께이다.

2.2.3 근접 노광에서의 회절

두꺼운 감광막의 코팅은 높은 점도에 의해 얇은 감광막에서 고려하지 않았던 여러가지 문제점이 생긴다. 감광막 코팅 후에 생기는 웨이퍼 테두리의 수~수십um 높이의 비드(bead), 단차에 의해 달라지는 두께, 소프트 베이크 공정에서 생길 수 있는 표면 장력에 의한 감광막의 두께 불균일 등이 생긴다[4]. 비드에 관한 문제는 테두리의 감광막의 두께를 낮추어줌으로써 없앨 수 있지만 그 외의 문제들에 의해 접촉 노광할 때 마스크와 감광막사이에 근접거리가 생길 수 있다. 근접거리의 영향으로 표면에서의 패턴크기와 측면기울기가 달라지게 된다. 패턴크기의 변화 및 측면기울기로 인해 제작된 구조물의 특성이 바뀔 수 있고 또한 다음 공정에서 정렬오차가 생길 수 있다. 앞의 흡광, 회절 이론을 바탕으로 표면에서의 패턴 크기변화를 이론적으로 계산해보았다.

먼저 감광막 표면과 마스크가 거리 g 만큼 떨어져있다고 가정하고 마스크 가장자리로부터 x 만큼 떨어져 있는 곳의 노광에너지를 구하면

$$I_x = \frac{I_{inc}}{4(0.5x\sqrt{2/\lambda g} + 1)^4} \quad \text{식(9)}$$

가 된다. 이 때 I_x 는 시간에 따라 변하지 않는 값이므로 식(3)에 대입해서 풀면

$$M = \exp(-CI_x t) \quad \text{식(10)}$$

이 된다. 현상임계치인 $M = \exp(-1)$ 과 식(9), 식(10)을

연립하면

$$C \frac{I_{inc}}{4(0.5x\sqrt{2/\lambda r}+1)^4} t = 1 \quad \text{식(11)}$$

이 되고, 식(8)과 $\tau = CI_{inc}t$ 를 식(11)에 대입하면

$$\frac{1}{4(0.5x\sqrt{2/\lambda r}+1)^4} (AT + 4exp(BT)) = 1 \quad \text{식(12)}$$

가 된다. x에 관하여 풀면

$$x = \sqrt{2\lambda} g \{ (0.25AT + exp(BT))^{0.25} - 1 \} \quad \text{식(13)}$$

이 된다. 식(13)으로부터 표면에서 패턴크기의 변화는 파장, 근접거리, 파장과 관련된 A, B파라미터, 두께의 식임을 알 수 있다.

3. 실험

3.1. 실험 방법

양성 감광막인 PMER P-LA900PM(Tokyo Ohka Kogyo)를 이용하여 20 um 두께의 몰드를 형성하였다. 노광장비로는 MA6 aligner(SUSS, 365~436 nm)를 이용하였다. 소프트웨어는 핫플레이트에서 110°C 온도에서 6분 하였고 이 때 A, B 파라미터 값은 i-line(365 nm), g-line(436 nm)에서 각각 A(0.440, 0.033), B(0.074, 0.064)이다. 노광실험은 broadband(365~436 nm)와 filter를 이용한 g-line(436 nm) 광원으로 각각 진행하였다. 근접노광의 영향을 보기 위해 soft contact모드와 low vacuum contact모드를 이용하여 실험하였다. 앞에서 설명한 회절의 영향에 대한 파장별 계산은 MATLAB을 이용하였다.

3.2. 실험 결과 및 고찰

먼저 앞의 2절에서 설명한 이론을 바탕으로 계산한 접촉 노광에서의 회절의 영향은 Fig. 3에 나타나 있다.

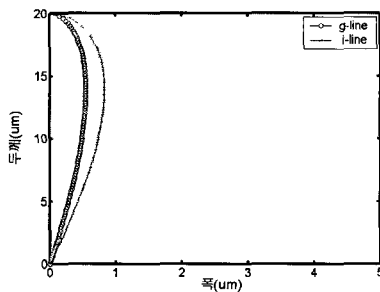


Fig. 3. Variations of thickness-width characteristic with diffraction for the contact printing condition.

접촉 노광에서의 회절의 영향은 i-line에서 최대 0.83 um, g-line에서 최대 0.55 um라는 값을 얻었다. 접촉 노광의 경우에 A, B파라미터가 작은 파장에서 더 좋은 결과를 얻을 수 있다.

다음의 Fig. 4는 근접 노광에서의 회절의 영향을 나타낸다.

근접 노광의 경우는 근접거리가 커질수록 회절의 영향을 많이 받기 때문에 패턴의 폭이 점점 커짐을 볼 수 있고 파장에 의한 영향으로 A, B파라미터가 작은 g-line에서 더 좋은 결과를 얻을 수 있다.

다음의 Fig. 5는 broadband와 g-line의 경우에 본 연구에서 얻은 그림을 나타낸다.

실험에 쓰인 감광막은 i-line에서 가장 활발히 반응하기 때문에 broadband에서의 실험결과는 i-line계산결과와 비교할 수 있다.

contact방법에 따라 표면에서 패턴크기는 broadband의 경우 약 3 um(1.5~4.5) 변화, g-line의 경우 약 0.6 um(1.7~2.3) 변화가 생긴다. broadband 혹은 i-line의 경우 g-line에 비해 근접거리의 변화에 더 민감하다. 실험결과와 Fig. 4에서의 계산 결과는 비슷한 경향을 얻었다. 결과값이 차이나는 이유는 contact모드에 따른 근접거리의 차이가 일정하지 않고 계산결과의 경우에는 초과노광(over-exposure) 및 현상(development)의 영향이 고려되어 있지 않기 때문이다.

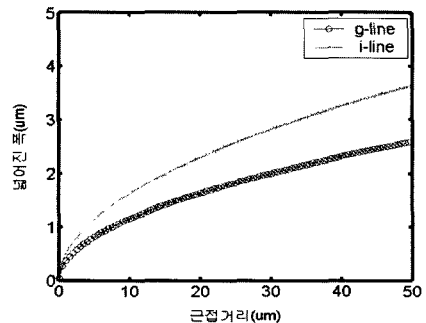


Fig. 4. Variations of width-proximity gap characteristic with diffraction for the proximity printing condition.

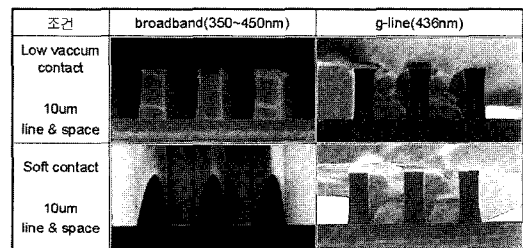


Fig. 5. Experimental results obtained in this paper.

4. 결 론

일반적으로 식각공정 마스크로 쓰이는 수 μm 이하의 얇은 감광막과 달리 MEMS공정, 특히 도금을 이용한 구조물 제작에 쓰이는 수십 μm 이상의 두꺼운 감광막은 깊이방향으로 완전히 노광을 하기 위해서 충분한 노광시간이 필요하다. 광원의 세기는 감광막의 깊이에 따라 지수적으로 감소하기 때문에 두꺼운 감광막은 광원에 대한 투과도가 좋아야 하고 패턴 왜곡을 줄이기 위해서는 근접거리를 줄여야 한다. 실험결과와 모델링 결과에서 모두 투과도가 좋고 근접거리가 0에 가까울수록 측면기울기가 수직에 근접하는 결과를 얻었다. 따라서 수직에 가까운 감광막 형상을 얻기 위해서는 투과도가 높은 파장의 광원을 이용해야 하고 근접거리를 줄여야 한다.

감사의 글

본 연구는 BK21사업단, 차세대 사업단, ERC사업단과 반도체공동연구소의 지원에 의해 수행되었다.

참고문헌

1. Seok, S., Nam, C., Choi, W., and Chun, K., "A high performance solenoid-type MEMS inductor", *J. of Semiconductor Technology and Science*, Vol. 1, No. 3, pp. 182-188 (2001).
2. Dill, F. H., Hornberger, W.P., Hauge, P.S. and Shaw, J. M., "Characterization of Positive Photoresist", *IEEE Trans. on Electron Devices*, Vol. 22, No 7, pp. 445-452 (1975).
3. Cheng, Y., Lin, C., Wei, D., Loechel, B., and Grutznet, G., "Wall Profile of Thick Photoresist Generated via Contact Printing", *IEEE J. of MEMS*, Vol. 8, No 1, pp. 18-26 (1999).
4. Chuang, Y., Tseng, F., and Lin, W., "Reduction of diffraction effect of UV exposure on SU-8 negative thick photoresist by air gap elimination.", *IEEE J. of MEMS*, Vol. 8, No 4-5, pp. 308-313 (2002).