

저에너지 집속이온빔리소그래피(FIBL)에 의한 미세패턴 형성 Micropatterning by Low-Energy Focused Ion Beam Lithography(FIBL)

이현용*, 김민수, 정홍배
광운대학교 전자재료공학과

Hyun-Yong Lee*, Min-Su Kim, Hong-Bay Chung
Dept. of Electronic Materials Eng., Kwangwoon Univ.

Abstract

The micro-patterning by a low energy FIB which has been conventionally utilized for mask-repairing was investigated. Amorphous $\text{Se}_{75}\text{Ge}_{25}$ resist irradiated by 9[keV]-defocused Ga^+ ion beam($\sim 10^{15}$ [ions/cm²]) resulted in increasing the optical absorption, which was also observed also in the film exposed by an optical dose of 4.5×10^{20} [photons/cm²]. The ~ 0.3 [eV] edge shift for ion-irradiated film was about twice to that obtained for photo-exposed. These large shift could be estimated as due to an increase in disorder from the decrease in the slope of the Urbach tail.

For Ga^+ FIB irradiation with a relatively low energy, 30[keV] and above the amount of dose of 1.4×10^{16} [ions/cm²], the irradiated region in a- $\text{Se}_{75}\text{Ge}_{25}$ resist was perfectly etched in acid solution for 10[sec], which is relatively a short development time. A contrast was about 2.5. In spite of the relatively low incident energy, ~ 0.225 [μm] pattern was clearly obtained by the irradiation of a dose 6.5×10^{16} [ions/cm²] and a scan diameter 0.2[μm], from which excellent results were expected for incident energies above 50[keV] which was conventionally used in FIBL.

1. 서론

이온빔 리소그래피 기술은 1980년대 초반부터 지속적 연구가 진행되어 왔으며 고전류밀도, 장시간 안정

성 및 고분해능을 갖는 액체금속이온원(liquid metal ion source : LMIS)의 개발과 더불어 차세대 소자 개발에 대한 최선의 선택으로서의 FIBL 기술은 그 중요성이 매우 크다. maskless 공정이 가능한 리소그래피 기술에는 전자빔 리소그래피(EBL)와 집속이온빔 리소그래피(FIBL)가 있으며, EBL의 경우 높은 분해능과 초집적으로 미세패턴을 형성할 수 있는 능력을 가지고 있으나 근본적으로 내재되어 있는 근접효과(proximity effect), 낮은 레지스트 감도, 고에너지 전자의 후방산란등이 문제가 되어 분해능 향상에 어려움이 있으며 이 문제를 해결하기 위하여 높은 영상대비도 (aspect ratio)가 요구된다. 이에 반하여 FIBL의 경우 측면퍼짐(lateral spreading)이 작고, 근접효과 및 후방산란은 무시할 정도이며, 레지스트의 높은 감도 그리고 깊이에 따른 일정한 에너지 흡수등의 장점이 있다. 특히, 적절한 레지스트의 선택으로 분해능 및 대비도를 상당히 향상시킬 수 있고 FIB의 빔직경이 곧바로 패턴의 선폭 크기를 좌우하므로 양자소자 개발에 효과적으로 이용될 수 있다. 이러한 FIBL의 기본 메카니즘은 높은 에너지의 이온빔이 기판 위에 형성된 레지스트에 직접 노출, 침투하여 그 에너지를 레지스트에 전달, 반응하므로 현상(development) 특성을 갖게 되는 것으로 고 에너지 이온빔 입사에 의한 기판으로의 원하지 않는 이온의 침투와 이로 인한 기판손상등이 문제가 될 수 있다. 무기질 칼코게나이드 레지스트는 일반적으로 전자빔, 스퍼터링 또는 열증착 방식으로 형성할

수 있고, 비교적 균일한 박막을 얻을 수 있어 선풍의 제어가 용이하다. 또한, 폴리머에 비해 변형이 일어나는 온도인 유리질전이온도가 비교적 높기 때문에 반도체 제조 공정상에서 발생하는 열에 대한 변형을 피할 수 있다. 본 연구진에 의해 연구되고 있는 무기질 $a\text{-Se}_{75}\text{Ge}_{25}$ 박막 레지스트는 광, 전자빔 및 이온빔에 대하여 positive-type 레지스트 특성을 보이며, g-line의 광원으로 0.8[μm] 미만의 미세 패턴 형성 가능성을 확인한 바 있다. 특히, FIBL에 적용시, 레지스트가 매우 dense 하고 이온빔에 대한 이온정지력이 비교적 크기 때문에 기판으로의 원하지 않은 이온침투에 의한 기판 훼손을 줄일 수 있으며 높은 영상대비도를 얻기 위한 효율적인 방법인 shallow imaging 형성이 가능하다. FIBL 관련 제반 문제의 해결, 미세패턴형성에 대한 정확성 및 신뢰성의 요구는 여러 접근방식의 전산모사 연구를 지속시켜 왔다. 국내외적으로 FIB 관련 기술에 대한 관심이 집중되고 있고 FIBL에 대한 기술 축적이 반도체 제조 분야의 국제적 경쟁력 향상의 기반으로 작용될 수 있다는 데 인식을 같이하고 있으며, 256M/1G DRAM 및 양자소자 기술에 중요한 영역으로 기대되고 있음에도 현재까지 국내의 FIBL에 대한 연구는 미약한 단계에 머물러 있다. 본 연구진은 최근 까지 비정질 칼코게나이드 박막의 이온유기 특성²⁾, LSS이론을 기본으로 한 수학적 분석³⁾, 고체내의 이온 산란 특성과 관련되는 충분한 정보를 얻을 수 있는 몬테카를로(Monte-Carlo:MC) 전산모사를 통하여 FIBL 특성을 고찰, 발표^{4,5)}한 바 있으며, 본 연구에서는 기존의 마스크복구(mask-repairing)에 이용되고 있는 저에너지 FIB에 의한 레지스트의 응답특성 및 미세패턴 특성을 고찰 하므로 비정질 칼코게나이드 박막 레지스트의 FIBL 이용 가능성을 확인하고 자 한다.

2. 실험

비정질 $\text{Se}_{75}\text{Ge}_{25}$ 의 벌크 시료 제조를 위하여 순도가 5N인 Se, Ge을 이용하여, Ge은 진공중에서 표면의 산화층을 제거한 후 전자천평(AIsep, MEV-198A)으로 0.1 [mg]까지 원자량비로 평량하였으며, 평량한 각 시료는 내경 10 [mm] 석영관에서 $\sim 1 \times 10^{-5}$ [Torr]로 진공봉입하였다. 이때의 석영관은 질산 용액으로 석영관 내의 무기물을 제거하고, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{SO}_4$ 의 세척 용액을 24시간 이상 채워 두어 내부의 유기물을 제거한 다음 증류수, 메탄올 순으로 세척, 진공 건조하였다. 진공 봉입한 석영관은 수평 실리콘트 전기로에 넣어 220 [°C]에서 2시간, 650 [°C]에서 2시간 동안 반응시킨 다음, 1000 [°C]에서 24시간 이상 가열하면서 균일한 혼합을 위해 30분 간격으로 흔들어서 주었다. $\text{Se}_{75}\text{Ge}_{25}$ 의 유리질 형성 능력은 우수하지만 용융체의 냉각 과정에서 GeSe_2 와 Se

결정이 생성될 가능성이 있으며 이를 제거하기 위하여 용융체는 공기중에서 냉각 후 물 속에서 급냉하였다. 레지스트 제작을 위해 사용한 기판은 coming glass-7059 (밀도 2.76[g/cm³], 50x50x1.2[mm])와 Si 웨이퍼(<111>, p-type)로 세척후 진공 건조하여 사용하였다. $\text{Se}_{75}\text{Ge}_{25}$ 박막은 열진공증착기를 이용하여 $\sim 1 \times 10^{-5}$ [Torr]의 진공도에서 Mo 보우트를 사용하였고 증착속도는 비정질상 박막을 얻기 위하여 5[Å/sec]를 유지하였다. 레지스트 박막의 두께는 30[keV] Ga 이온에 대하여 기판으로의 이온 투과를 최소로 할 수 있는 두께 조건⁶⁾인 500[Å]과 기존의 광 리소그라피에 이용시의 두께인 2000[Å]¹⁾이 되도록 제작하였다. 본 실험에서 사용한 이온빔은 defocused 9[keV]와 FIB 30[keV]였고 FIB 조사 방식은 실제 리소그라피 방식과는 달리, 주어진 노출 면적을 raster scan하는 방식을 취하였으며 조사시간, 면적, 전류밀도의 함수로 이온 dose를 계산하였다. 이온빔 조사후, 레지스트의 현상은 $\text{HNO}_3:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}=1:1:3$ 의 현상액을 이용하였으며 현상후 남은 레지스트의 두께는 nanospec을 이용하여 측정하였으며, 최종 패턴은 SEM으로 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1 비정질 $\text{Se}_{75}\text{Ge}_{25}$ 의 저 에너지 이온유기 특성

비정질 칼코게나이드 물질들은 광학적 에너지갭(E_{op})이하의 낮은 에너지에 대해 지수함수적인 흡수 꼬리(absorption tail)인 Urbach 꼬리를 보이며 더 높은 에너지에 대해서는 $(\alpha \hbar \omega)$ 가 $(\hbar \omega - E_{op})^2$ 에 비례하는 특성을 갖는다. 무질서도의 증가(polaron의 증가)에 따라 기울기는 감소하는 특성을 보이므로 비정질 $\text{Se}_{75}\text{Ge}_{25}$ 박막 레지스트는 광, 전자빔 그리고 이온빔의 에너지에 대해서 구조적 변화에 대한 가능성이 높게 된다. 광 노출 및 저에너지 이온빔 조사에 따른 레지스트의 유기효과를 비교, 고찰하기 위하여 흡수계수와 광 에너지갭을 구하였으며 그 결과는 그림 1과 같다. 그림의 내부에 보이는 흡수계수 α 는 투과도(T) 특성으로부터 $\alpha(\lambda) = \ln[T(\lambda)/z]$ 식을 사용하여 구하였다. 이때 기판은 coming glass를 사용하였고 z는 박막의 두께이다. 그림에서 보는 바와 같이 Ga 이온빔이 조사(9.3×10^{15} [ions/cm²] dose)된 박막의 경우, 특히 비정질 물질의 무질서도에 의해 나타나는 흡수단 부근의 Urbach 꼬리의 기울기가 거의 0에 가까운 값을 보였다. 이는 이온빔 노출로 인한 구조적인 무질서가 증가된 것으로 생각할 수 있다. 그림의 외부에 보이는 곡선은 광에너지에 대한 $(\alpha \hbar \omega)^{1/2}$ 곡선으로, 광 에너지갭 E_{op} 는 외삽하여 구할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 as-deposited 상태의 비정질 $\text{Se}_{75}\text{Ge}_{25}$ 박막 레지스트는 E_{op} 가 약

1.9[eV]의 값을 보였고 9.3×10^{15} [ions/cm²]의 이온 dose — 이것은 13.4 [J/cm²]에 대응 — 을 조사시킨 박막의 경우 약 0.3 [eV] 정도 장파장 쪽으로 이동한 흑화(darkening) 효과를 보였는데 이는 K.L.Chopra 등이 유기 효과를 높이기 위해 80°도로 증착한 Se₇₅Ge₂₅ 박막에 대하여, 본 실험에 비해 상대적으로 높은 에너지인 50[keV]를 갖는 2×10^{15} [ions/cm²] He⁺ 이온 dose — 16.0 [J/cm²]에 대응 — 로 조사시켰을 때 얻은 광에너지 갭 변화 값(0.2 eV) 보다 큰 값이다. 그림의 광노출은 수은등을 이용하여 레지스트 표면 출력은 16[mW/cm²]으로 하고 노출 시간은 충분한 광유기효과를 얻기 위해 150분으로 하였으며 이는 144 [J/cm²] — 4.5×10^{20} [photons/cm²]의 photon dose에 해당 — 의 입사 에너지에 대응되는 값이다. 광노출의 경우 도 레지스트의 흡수단이 장파장으로 이동(약 0.15 eV) 하는 광흑화(photo-darkening) 현상이 발생함을 알 수 있는데, 이 흡수단의 이동은 이온빔 조사에 의한 값의 반에 해당되는 값이다. 이러한 흡수단의 변화는 Se-Ge의 미세구조의 재배열(microstructural rearrangement)과 관련되며 단거리질서 내의 변화는 화학결합에 영향을 미치고 이것이 노출된 영역의 화학적 용해(dissolution)에 관련되어 큰 선택적 식각특성을 가능하게 하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 비정질 Se₇₅Ge₂₅ 박막 레지스트는 광에 대하여 민감한 특성을 보일뿐 아니라 이온빔에 대해 더욱 큰 감도를 가지므로 이온빔 레지스트로서의 가능성은 그만큼 크다고 판단된다.

3-2. 레지스트 두께의 결정

통상적으로 FIBL은 50[keV]를 기준으로 하여 보다 높은 에너지를 갖는 이온빔이 레지스트에 조사되므로 기판으로의 원하지 않는 이온침투가 발생, 기판 손상을 일으키며 이 결과는 단결정 실리콘의 전기적 특성을 저하시키는 치명적인 결과를 야기한다. 그러나 레지스트의 두께가 충분히 클 경우, 기판 손상을 줄일 수는 있지만 레지스트 두께의 증가는 그만큼의 미세 패턴형성의 어려움을 의미하므로 무조건적인 두께증가는 바람직하지 못하다. 따라서 레지스트내에서 이온 에너지의 충분한 흡수 즉, 기판으로의 이온 투과를 최소로 줄일 수 있는 최소의 두께(Z_{min})를 찾는 노력은 필수적이라 할 수 있다. LSS이론의 농도분포에 대한 보조오차함수로 근사되는 이온투과계수로 부터 레지스트내에서 약 99.99[%] 정도의 충분한 흡수(반사를 무시할 경우 $T < 10^{-4}$ 에 해당됨)를 얻기 위한 최소두께조건을 구할 수 있다³⁾. 표 1은 전형적인 FIBL 입사 이온에너지인 50 [keV] 이상 200 [keV] 이하의 에너지 범위와 10, 30[keV]의 저에너지에 대하여 계산된 이온범위 파라미터 $R_p, \Delta R_p, \Delta R_1$ 및 최소두께 Z_{min} 으로 실제 레지스트 두께는 Z_{min} 이상의 두께

로 제작하는 것이 타당하다.

그림 2는 1×10^{15} [ions/cm²] 이온 dose, 30[keV]의 입사 에너지를 갖는 Ga⁺ 이온빔을 Z_{min} 두께인 500[Å]을 갖는 비정질 Se₇₅Ge₂₅ 박막 레지스트/Si 기판에 조사시키는 경우의 단위 면적당 투과 이온수 변화를 나타내었다.

3.3. 레지스트 응답특성과 미세패턴 형성

30[keV] 저에너지 이온빔 노출에 따른 레지스트의 감도(sensitivity : S)와 대비도(contrast : γ)를 얻기 위하여 FIB장치(SMI-8100, Seiko Ins., Inc.)를 이용, 주어진 면적을 raster scan하는 방식을 취하여 노출 dose를 변화시켰다. 노출된 레지스트는 as-deposited 영역이 강한 식각저항성을 갖는 HNO₃:HCl:H₂O=1:1:3의 산성용액을 이용하여 10[sec]동안 수행하였다. 그림 3은 30[keV] Ga⁺이온빔에 대한 a-Se₇₅Ge₂₅ 레지스트의 노출 응답특성으로 10^{15} [ions/cm²]의 dose에 대하여는 불용성을 보이며 감도는 약 1.4×10^{16} [ions/cm²]이었으며 대비도는 2.5의 값을 나타내었다.

사진 1은 dose는 6.5×10^{16} [ions/cm²], scan 선폭을 0.2[μ m]로 한 FIB노출된 레지스트의 현상후 미세 패턴의 SEM 사진으로 현상후의 선폭이 약 0.225[μ m] 크기를 갖는다. 즉 약 250[Å] 정도의 미세한 측면 퍼짐이 발생하였다. 이 결과는 통상적 FIBL의 에너지 범위에 포함되는 80[keV] Ga⁺ FIB에 대하여 본 연구진에 의해 수행된 Monte-Carlo Development Simulation의 결과⁴⁾를 고려할 때 FIBL에서의 측면 퍼짐은 무시할 수 있을 것이라 생각된다.

4. 결 론

비정질 Se₇₅Ge₂₅ 박막 레지스트를 선택하여 LMIS Ga⁺ 이온빔 조사시 발생하는 박막의 이온 유기 변화를 UV 광에 의한 광학적 유기변화와 비교 고찰하였으며, 마스크 복구를 목적으로 하고 있는 저에너지 FIB system을 이용하여 미세 패턴을 형성하므로 레지스트의 저에너지 FIBL에 의한 미세 패턴 능력을 확인 하였다. 비정질 Se₇₅Ge₂₅ 박막 레지스트는 상당히 큰 이온유기변화를 보였다. 30[keV] Ga LMIS FIB 조사 및 현상 실험 결과, as-deposited 비정질 Se₇₅Ge₂₅ 박막 레지스트가 강한 식각저항성을 갖는 HCl:HNO₃:H₂O=1:1:3의 산성용액에 대하여 sensitivity는 $\sim 1.4 \times 10^{16}$ [ions/cm²], contrast는 약 2.5의 값을 보였다. 6.5×10^{16} [ions/cm²]의 노출 dose, 0.2[μ m] raster scan linewidth에 대하여 비교적 선명한 0.225[μ m]의 미세패턴을 얻을 수 있었다. 본 연구에 이용된 빔의 집속도는 약 0.05[μ m] 정도로 FIBL의 미세 패턴 능력이 이온원의 집속도 및 레지스트의 분해능에 강한 의존성을 보이는 것을 고려할 때 선폭은 상당히 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

- 1). 허훈, "미세패턴 형성을 위한 무기질 a-Se₇₅Ge₂₅ 포토레지스트 특성연구" 광운대학교 석사학위논문, 1987.
- 2). 이현용, 모연한, 정홍배, "저 에너지 이온빔 조사에 따른 비정질 Se₇₅Ge₂₅ 박막 특성", 한국전기전자재료학회 논문지, 7권 2호, pp.100~106, 1994.
- 3). 이현용, 정홍배, "비정질 Se₇₅Ge₂₅ 박막의 이온 침투 현상 해석", 한국전기전자재료학회 논문지, 제7권 5호, pp.389~396, 1994.
- 4). H.Y.Lee and H.B.Chung, " Monte-Carlo simulation of focused ion beam lithography in inorganic resist ", Synthetic Metals, Vol.71,pp.2043~2044,1995.

- 5). H.Y.Lee and H.B.Chung, " 3D-MC calculation of Ga⁺ ion penetration in a-Se₇₅Ge₂₅ thin film", Vol.78, No.9, Nov. 1995.

본 연구는 1995년도 서울대학교 반도체 공동 연구소의 지원 (Proj. No. : ISRC-95-E-4033)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

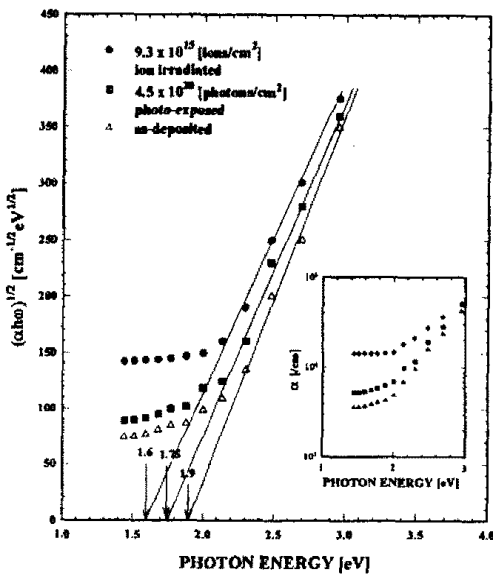


Fig. 1. The optical energy gap E_{op} and absorption coefficient α of a-Se₇₅Ge₂₅ resist with defocused-Ga⁺ ion beam irradiation and photo-exposure

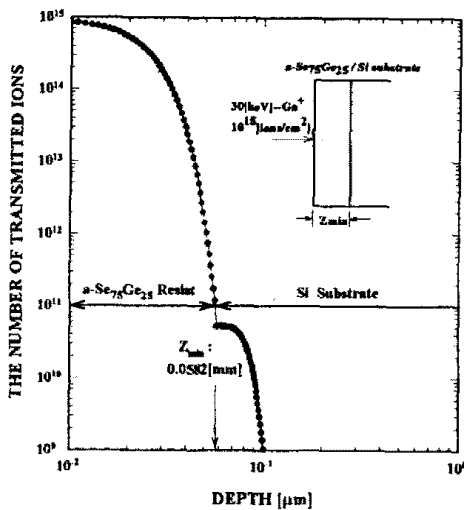


Fig. 2. The variation of the transmitted ion-numbers per unit area with the depth by Ga⁺ ion beam irradiation (ion dose: 1×10^{15} [ions/cm²], energy: 30[keV]) in 0.0582[μ m] thick-a-Se₇₅Ge₂₅ resist / Si substrate

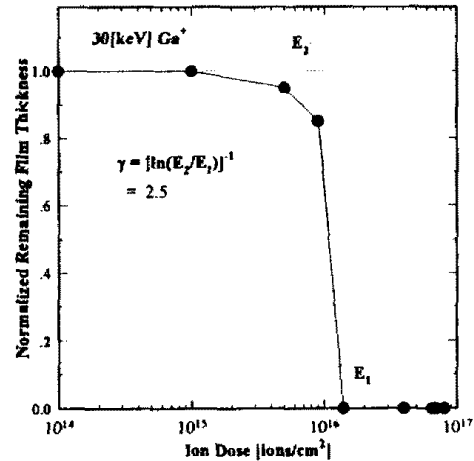


Fig.3. Exposure response curve of a-Se₇₅Ge₂₅ resist for 30[keV] Ga⁺ FIB

Table 1. Analytically calculated values of ion range parameters and the minimum thickness for Ga⁺ ions in a-Se₇₅Ge₂₅ resist

energy[keV]	projected range Rp[Å]	projected straggling ΔRp[Å]	lateral straggling ΔRl[Å]	minimum thickness Zmin[Å]
10	101	43	40	273
30	210	093	91	582
50	305	130	116	825
80	443	184	180	1180
100	530	232	211	1458
150	781	330	307	2101
200	992	411	390	2636

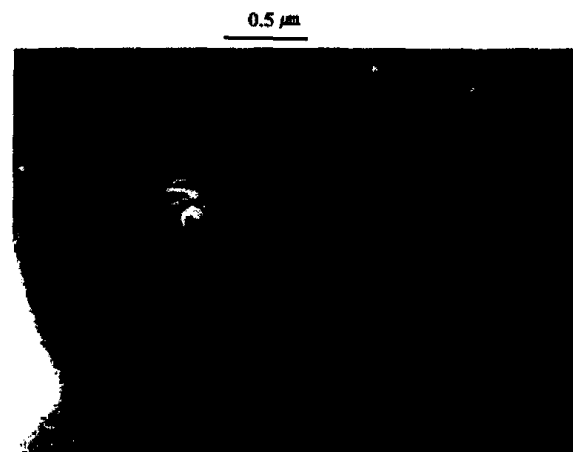


Photo.1. SEM photograph of after-development resist pattern with FIB irradiation(dose= 6.5×10^{16} [ions/cm²], scan linewidth=0.2[μ m])