

비정질 GeSe 박막으로의 은-광도핑에 대한 기관의존성

The Dependence of Substrate on Ag Photodoping into Amorphous GeSe Thin Films using Holographic Method

여중빈¹, 윤상돈², 이현용^{3,a}
(Jong-Bin Yeo¹, Sang-Don Yun², and Hyun-Yong Lee^{3,a})

Abstract

The dependence of substrate on the Ag photodoping phenomenon into amorphous (*a*-) GeSe thin film has been investigated using holographic method. A 442 nm HeCd laser was utilized as a light source for the holographic exposure and a 632.8 nm HeNe laser to measure the variation of diffraction efficiency (η) in real time. The films (Ag and *a*-GeSe) were thermally deposited on the substrates, *i.e.* p-type Si(100), n-type Si(100) and slide glass. The sample structures prepared were two types: type I (Ag/*a*-SeGe/substrate) and type II (*a*-SeGe/Ag/substrate). The η kinetics comprised to be three steps in which η initially increases, is saturated to be maximized (η_M), and then decreases relatively gradually. For the same substrate, the η_M values of the type II were higher than those of type I. In addition, the type II exhibited the highest η_M for p-type Si substrate, while that in type I was observed for n-type Si substrate. These tendency is explained by the diffusion of minority carrier in the films and the change of magnitude and direction in internal fields generated at the film interfaces. Atomic-force-microscope (AFM) was used to observe relief-type grating patterns.

Key Words : Holographic method, Ag photodoping, Amorphous GeSe, Substrate dependence

1. 서 론

최근 광학 연구 분야에서 특수하면서 우수한 광학 특성을 보이는 광자결정(photonic crystals; PCs)에 대한 많은 연구가 진행되고 있다[1,2]. 광자 밴드갭(photonic bandgap; PBG) 범위 내의 주파수를 갖는 전자기파(혹은 광파)의 전파를 금지시키는 특징을 갖는 PCs는 능·수동 광(통신)부품 및 광전자 단위소자 뿐만 아니라 광집적회로 등 많은 응용분야에 적용되고 있으며 점차 그 범위가 넓어지고

있다. 이러한 PCs의 형태학적 특징은 서로 다른 유전율(굴절률)을 갖는 물질의 주기적인 배열이다.

주기적인 배열을 만드는 간단하면서도 쉬운 방법 중의 하나가 홀로그래피 현상을 이용한 홀로-리소그라피 방법이다. 두개의 코히런스 평행빔의 간섭을 이용하는 홀로그래피는 레지스트의 주기적 격자를 형성하는데 활용된다. 그러나 레지스트에 옮겨지는 간섭 프린지의 세기가 공간적인 가우시안 분포를 가지며 이 결과로 생기는 격자의 모양은 계단형 보다는 경사형에 가까워진다[3]. 따라서 일반 폴리머 레지스트로 형성된 홀로그래피 격자는 광자결정 응용에 구조적으로 적합하지 못하다.

비정질(amorphous; *a*-) 칼코게나이드 박막은 하나 또는 여러 종류의 칼코젠 원소(S, Se, Te 등)와 다양한 금속성의 물질(As, Ge 또는 P, Sb, Bi, Si, Sn 등)의 결합이 포함되어 있는 무기질 재료로 헤테로극성 과 호모극성 결합을 포함하며 산화물 결합보다 약한 결합 특성을 갖는다. 이러한 비정질

1. 전남대학교 대학원 광공학협동과정
2. 전남대학교 대학원 신화학소재공학과
3. 전남대학교 응용화학공학과, 촉매연구소
(광주시 북구 용봉동 300)
a. Corresponding Author : hyleee@chonnam.ac.kr
접수일자 : 2007. 8. 24
1차 심사 : 2007. 9. 11
심사완료 : 2007. 9. 13

칼코게나이드 박막은 광축화, 광굴절, 광편광, 광결정화, 광도핑과 같은 많은 가역적, 비가역적 광유기 변화를 보여준다. 광도핑 현상은 칼코게나이드 박막에 광학적 밴드갭(optical bandgap; E_{op}) 이상의 에너지를 갖는 광을 조사하면 금속성 양이온(Ag, Cu, In 등)이 광 조사된 박막내부를 따라 도핑(또는 migration)되는 현상을 말한다. 이러한 광도핑 현상은 칼코게나이드 고유의 결합쌍인 가전자교번쌍(valence alternation pairs; VAPs) 및 광여기로 생성된 전자정공쌍(EHP)이 중요한 역할을 하는 것으로 생각되지만 그 메커니즘은 아직 완전히 이해되지 못하고 있다[4,5]. 또한 소멸간섭으로 빛이 조사되지 않은 박막 영역으로의 금속이온 특히 Ag의 도핑은 극히 제한적이다[6]. 특히, 일정영역광이 노출된 경우 중심뿐만 아니라 모서리 부근에서도 Ag 광도핑이 크게 발생하는 소위 edge-sharpening 효과를 보인다[7]. 이러한 Ag 광도핑은 칼코게나이드의 구조적 변화와 예칭 용해도의 변화를 유발한다. 일반적으로 칼코게나이드가 알칼리 용액에 민감한 반면, Ag가 도핑된 경우는 알칼리 용액에서 불용성(네거티브 형)의 현상 특성을 보인다. 따라서, Ag 광도핑을 보이는 비정질 칼코게나이드 박막을 무기질 레지스트로 이용한 홀로-리소그라피 방법은 계단형의 광자결정 구조 제작에 효과적으로 사용되어 질 수 있을 것으로 생각된다[8].

앞선 연구에서 우리는 이중-노출 홀로그래피 방법을 이용하므로 폴리머 레지스트 내에 dot-형뿐만 아니라 antidot-형의 2차원 주기구조를 신뢰성 있게 제작할 수 있으며 이 방법은 다양한 형태의 원시격자를 갖는 대면적 2차원 광자결정 제작에 효과적으로 이용될 수 있음을 보고하였다[3]. 본 연구에서는 무기질 $a\text{-GeSe}_{75}$ 박막으로의 Ag 광도핑 현상에 대한 시료의 구조(Ag/ $a\text{-GeSe}$ /substrate 및 $a\text{-GeSe}$ /Ag/substrate) 및 기판(p-type Si, n-type Si, glass) 의존성을 조사하였다. 이는 비정질 칼코게나이드 박막으로의 금속-광도핑의 메커니즘을 이해하는 데 중요 기초자료가 될 것이다. 홀로그래피 노출 동안의 광도핑의 정도는 실시간 회절 효율을 측정하여 평가하였으며 습식현상을 이용하여 relief-type 주기적 격자 구조를 제작하였다.

2. 실험

2.1 시편 제작

표면산화막을 제거한 순도 99.999%의 SeGe 시료를 전자천평에 의해 $\text{Ge}_{25}\text{Se}_{75}$ 의 원자량 비를 갖도록

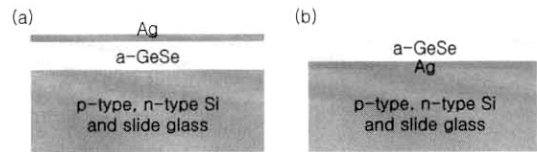


그림 1. 실험에 사용된 시료의 구조: (a) type I, (b) type II.

Fig. 1. Schematic diagram of sample structures prepared in this experiment: (a) type I and (b) type II.

평량하였다. 평량된 시료는 세정된 석영관(직경 $\Phi=10$ mm)에 넣고 약 1×10^{-4} Torr로 진공 봉입하였다. 봉입된 석영관을 220 °C에서 2시간, 650 °C에서 2시간, 1100 °C에서 24시간 동안 순차적으로 가열하였으며 이때 균일한 혼합을 위해 석영관은 모터를 이용하여 지속적으로 회전시켜 주었다. 이후 용융된 시료는 공기 중에서 약 5초간 냉각 후 차가운 물속에서 급랭시켜 벌크시료를 제작하였다. 박막 제작을 위한 기판으로는 p-type Si(100), n-type Si(100) 및 slide glass를 세척 후 이용하였다.

준비된 $\text{Ge}_{25}\text{Se}_{75}$ 벌크 및 Ag 시료를 약 2×10^{-6} Torr의 진공 하에서 열증착 방법으로 박막을 제작하였다. 이때 시료는 그림 1과 같은 2가지 형태로 제작하였다. type I은 그림 1(a)와 같이 기판 위에 $a\text{-GeSe}$ 과 Ag가 순차적으로 형성된 구조이고, type II는 그림 1(b)와 같이 기판위에 Ag와 $a\text{-GeSe}$ 이 형성된 구조이다. 각 박막의 두께는 $a\text{-GeSe}$ 는 200 nm, Ag는 10 nm로 동일하게 하였으며 증착속도는 약 $1\sim 3$ Å/s로 유지하였다.

2.2 격자 패턴 노광 및 회절효율의 측정

그림 2는 실험에 이용된 홀로그래피 노출 및 실시간 회절효율(η) 측정에 대한 개략도이다. 노출 광원으로는 HeCd 레이저(442 nm)를 사용하였으며 빛의 세기 조절은 ND(neutral density) 필터를 이용하였다. 노광 시간을 정밀하게 제어 할 수 있도록 전기적 셔터를 설치하여 이를 컴퓨터에 연결하여 구동시켰으며 여러 거울을 사용하여 광로를 조정하였다. 대물렌즈(N.A.=0.65), 핀홀(직경 10 μm) 및 콜리메이터(직경 100 mm)를 이용하여 빔을 평행광으로 확장하였으며 상기 광학 소자를 통과하는 빔은 마지막 부분에서 코히런스 빔을 이루도록 미세 정렬하였다. 이때 시료 표면에서의 광과위는 10 mW/cm^2

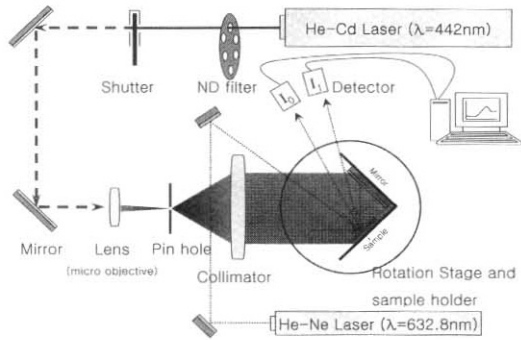


그림 2. 홀로그래피를 위한 노광장치와 실시간 회절효율 측정장치의 개략도.

Fig. 2. Schematic diagram of the holographic exposure system and the real-time diffraction efficiency measuring system.

으로 제어하였다. 이와 같이 얻어진 평행 빔을 한 부분은 거울면에 반사하여 샘플에 입사시키고, 다른 부분은 샘플로 직접 입사시켜 주었다. 두 빔이 샘플 계면에 입사하는 각도(θ)는 8° 로 동일하게 맞추어 주었다.

홀로그래피 광노출에 따른 시료의 노광 영역과 비노광 영역의 Ag 광도평의 정도는 실시간 반사형 회절효율을 측정하므로 간접적으로 평가하였다. 이는 Ag가 도핑되었을 때 광학적 특성(굴절률 등)이 변화하는 것과 홀로그래피의 패턴이 주기적이라는 점을 고려하므로 가능하다. 실시간 회절효율 η 의 측정을 위하여 632.8 nm의 파장을 갖는 HeNe 레이저 빔을 사용하여 0-order와 1st-order의 빔 세기를 측정하였다. η 는 $(I_1/I_0) \times 100\%$ 으로 정의되어 진다. 여기서 I_0 는 0-order 빔 세기이고 I_1 은 1st-order 빔 세기이다. 특히, type I의 경우 I_0 는 도핑후 남아있는 Ag 층으로부터의 표면 반사값을 포함한다. 따라서 type I과 type II의 회절효율 값을 정량적으로 비교하기 위해서는 보정을 필요로 한다. 최적의 조건을 갖는 시료에 대해 홀로그래피 노출 후 현상된 주기격자의 이미지는 AFM (atomic force microscope)으로 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 3은 기관종류를 달리하여 제작된 그림 1의 구조를 갖는 시료들에 대해 실시간으로 측정된 회절효율의 변화이다.

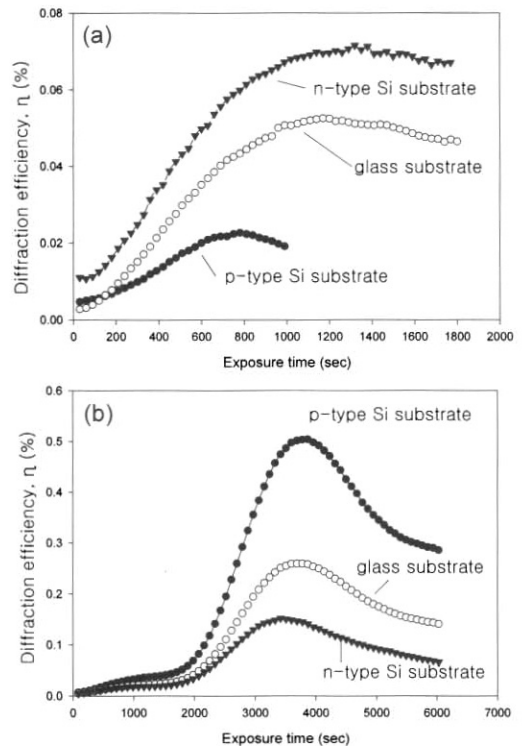


그림 3. 기관의 종류를 달리하여 제작된 (a) type I 및 (b) type II 시료에 대한 회절효율 변화.

Fig. 3. Exposure time dependence of the diffraction efficiency for (a) type I and (b) type II samples prepared on p-type Si (●), glass (○) and n-type Si (▼) substrates.

그림 3에서 보는 바와 같이 회절효율의 변화 속도 및 크기는 시료에 따라 차이가 있지만, 폴리머 레지스트[3]에서 보였던 것과 유사한 3단계의 경향을 보이는 것으로 생각할 수 있다. 즉, 초기, η 는 최대값(η_{11})까지 증가하며 포화되고 이후 상대적으로 느린 속도로 감소함을 알 수 있다. 특히, 그림 3(a)의 type I 시료의 경우는 이러한 폴리머 레지스트와 매우 유사한 경향을 보인 반면, 그림 3(b)의 type II의 경우는 초기단계에서 상당한 시간 ($t \sim 2000$ s) 동안 매우 느린 η 의 변화를 보이고 이후 η_{11} 까지 상대적으로 빠르게 증가하며 거의 구분은 어렵지만 매우 짧은 시간의 포화 후 감소하는 경향을 보였다.

초기단계에서 type I과 type II 간의 경향 차이를 설명하기 위해 우리는 다음과 같은 것을 고려

하였다. 즉, Ag 박막을 갖지 않는 α -GeSe 박막의 경우도, 광도핑과 비교할 때 그 정도는 매우 작지만 $h\nu > E_{Op}$ 의 광 노출에 대하여 흡수단이 장파장으로 이동하고 굴절률이 증가하는 광흑화(photo darkening) 현상을 보인다[9]. 또한, 광도핑은 칼코게나이드 박막에서의 광흡수뿐만 아니라 Ag 박막에서의 어느 정도의 광흡수를 필요로 한다[10]. 더욱이 α -GeSe 박막은 442 nm 파장 영역에서 흡수 계수 α 는 약 $1.34 \times 10^9 \text{ cm}^{-1}$ 정도이고[11], 약 10~20 nm 두께의 Ag 박막의 경우 442 nm 파장에 대해 약 50 % 정도의 투과도를 보인다[12]. 따라서, 그림 3(a)의 type I의 경우 HeCd 레이저 노출에 대해 맨 위층인 Ag 박막은 초기단계에서 충분히 광자를 흡수할 뿐만 아니라 α -GeSe 역시 광자를 흡수하므로 Ag 광도핑은 노출 직후부터 발생하는 것으로 생각할 수 있다. 반면에 그림 3(b)의 type II의 경우 맨 위층인 200 nm 두께의 α -GeSe는 흡수계수가 크기 때문에 충분한 광을 흡수하지만 아래에 놓인 Ag 박막에서의 광 흡수는 상대적으로 매우 미약하게 된다. 따라서 그림 3(b)에서 보이는 초기($t < 2000 \text{ s}$)의 η 변화는 광도핑보다는 광흑화에 의존한 결과로 생각할 수 있다.

type I의 경우 그림 3(a)에서 보는 바와 같이 n-type 기판에서 가장 높은 η_M 를 보인 반면 type II의 경우 p-type 기판에 대해 최대 η_M 를 보인다. 이것은 α -GeSe 및 Si 내부에서 생성되는 EHP의 박막내 소수캐리어의 확산과 이로 인한 계면 간의 내부전계 변화를 이용하므로 설명이 가능하다. 즉, Ag/ α -GeSe/substrate 구조인 type I의 경우 광노출 영역의 Ag 층은 Ag^+ (광흡수에 의한 빠른 열전자 방출)로 활성화되고 n-형의 경향을 갖는 α -GeSe 박막은 광노출로 EHPs를 생성하고 이중 소수캐리어인 정공이 비노출 영역으로 확산, 노출 영역은 음의 경향을 갖게 된다. 따라서 Ag/ α -GeSe 계면은 $\text{Ag} \rightarrow \alpha$ -GeSe 방향으로 전계가 발생하므로 α -GeSe 안으로의 Ag^+ 도핑을 촉진시킬 수 있다. 기판에 도달된 광 역시 Si 표면에서 EHPs를 생성하게 된다. n-type Si의 경우 소수캐리어의 주변 확산으로 노출 영역은 음으로, p-type Si의 경우 양의 퍼텐셜을 갖게 되고 glass의 경우는 중성으로 간주할 수 있다. 따라서 양의 퍼텐셜을 갖는 p-type Si를 기판으로 사용할 경우 substrate $\rightarrow\alpha$ -GeSe 방향의 계면전계로 인해 Ag^+ 이온 도핑이 방해받게 된다. 따라서, p-type Si이나 중성의 glass 보다는 음의 퍼텐셜을 갖는 n-type

Si 기판의 사용이 최대의 Ag 광도핑을 일으키게 된다.

이와 마찬가지로 α -GeSe/Ag/substrate 구조인 type II의 경우를 고려하자. α -GeSe/Ag 계면에서는 α -GeSe \leftarrow Ag 방향으로 전계가 발생하여 Ag^+ 이온의 칼코게나이드로의 광도핑을 증가시킨다. Ag/substrate 계면에 대해 중성의 glass를 사용할 경우 작지만 Ag \rightarrow substrate 방향의 전계가 발생하여 Ag^+ 의 칼코게나이드로의 도핑을 방해하며, 음의 퍼텐셜을 갖는 n-type Si를 사용할 경우 이러한 방해는 더욱 커진다. 따라서 양의 퍼텐셜을 갖는 p-type Si를 기판으로 사용이 최대의 Ag 광도핑을 일으킬 수 있다.

표 1은 기판을 달리한 type I과 type II 시료에 대해 얻어진 최대 회절효율 η_M 의 비교값이다. type I의 경우는 실측값과 입사 HeNe 레이저빔에 대한 Ag 층으로부터의 표면반사와 흡수를 고려한 보정값을 함께 나타내었다. 이때 보정계수는 1.871이다. 즉, 보정값 $\sim 1.871 \cdot$ 측정값.

그림 3 및 표 1에서 보는 바와 같이 기판에 상관없이 type II의 η_M 이 type I의 값에 비하여 상대적으로 높게 나타난 것을 알 수 있다. 즉, n-type Si 기판의 경우 η_M 은 0.120 %에서 0.150 %, glass의 경우 0.094 %에서 0.250 %, p-type Si의 경우 0.037에서 0.510으로 증가하였다. 특히, p-type Si의 경우는 약 14배의 차이를 보였다. 가장 큰 회절효율 차이를 보인 p-type Si 기판의 경우에 대한 두 type의 결과를 그림 4에 나타내었다. 여기서 type I에 대한 η 는 보정된 값이고, 내부 그림은 노출 시간 $t = 0 \sim 2000 \text{ s}$ 에 대한 회절효율을 준 로그 스케일로 표시한 그림이다.

표 1. 본 연구에 사용된 시료에 대한 최대 회절효율 값.

Table 1. Maximum diffraction efficiency for the samples utilized in this study.

Substrate	η_M (type I)		η_M (type II) (%)
	측정값(%)	보정값(%)	
n-type Si	0.065	0.120	0.150
glass	0.050	0.094	0.250
p-type Si	0.020	0.037	0.510

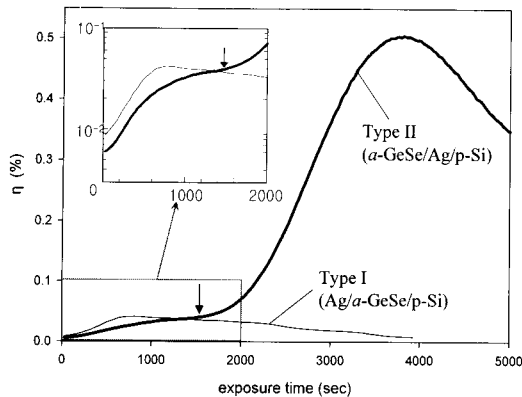
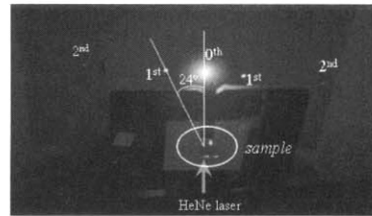


그림 4. p-type Si 기판을 사용한 type I과 type II 시료의 회절효율 변화. 내부 그림은 $t = 0 \sim 2000$ s에 대한 준 로그 스케일로 표시한 그림이다.

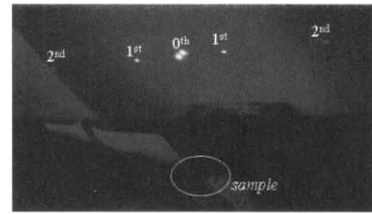
Fig. 4. Exposure time dependence of the diffraction efficiency for the type I and type II samples prepared on p-type Si substrate. The inset is semi-log scaled plot of exposure time versus η .

그림 3에서 설명하였던 바와 같이 type I은 전형적인 폴리머 계열 레지스트의 회절효율 변화를 보인다. 즉, 빠른 속도의 η 증가 $\rightarrow \eta_M$ 도달 후 포화 \rightarrow 상대적으로 느린 속도의 η 의 이완(relaxation). 그러나, type II의 경우는 type I과 달리 초기단계에서 긴 시간 동안 η 의 미세변동(그림 4의 화살표 부근 까지)을 보였으며, 이후 type I과 유사한 의존성을 나타내었다. 특히, 매우 큰 η_M 값을 갖는다. 이를 설명하기 위해 우리는 type I과 type II의 구조를 고려하여 다음과 같은 추론을 끌어내었으며 그림 4의 준 로그 그림은 이를 뒷받침한다.

type II의 맨 위층은 200 nm 두께의 α -GeSe이고 높은 α 를 갖기 때문에 아래에 놓인 Ag 층이 열전자를 방출할 정도의 충분한 광을 흡수하기 전에 광흡화 현상을 일으킨다. 즉, VAPs가 $2C_2^0 \rightarrow C_1^- + C_3^+$ 의 과정을 거쳐 생성된다[13,14]. 여기서 C는 칼코젠을 의미하며 위첨자와 아래첨자는 각각 전하상태와 배위수를 나타낸다. VAPs의 생성은 Ag의 도핑 없이도 칼코게나이드 박막 내 노출영역의 미세한 굴절률 증가를 일으키며 이것이 약 1600 s까지 진행된 것으로 보여 진다. 이후 Ag가 충분한 광자를 흡수하므로 Ag 광도핑이 진행된다. 그림 3에서 설명한 전체효과와 더불어 VAPs에 포함된 단일배위 음의 결합(C_1^-)이 Ag 광도핑을 촉진시킨다고 확신할 수는 없지만, 충분한 VAPs를



(a) 투과형 회절패턴



(b) 반사형 회절패턴

그림 5. type II 시료에 대해 η_M 에 도달된 시간 동안 홀로그래피 노출 후 측정된 회절 패턴 이미지: (a) glass 기판 시편의 투과형 회절패턴, (b) p-type Si 기판 시편의 반사형 회절패턴.

Fig. 5. Images of diffraction patterns measured for the type II samples exposed during sufficient time to reach η_M : (a) transmission pattern for glass substrate and (b) reflection pattern for p-type Si substrate.

포함하고 있는 칼코게나이드 박막으로의 광도핑이 그렇지 못한 경우(type D)보다 더욱 우세하게 일어나는 것으로 추론할 수 있다.

그림 5는 glass 및 p-type Si 기판을 갖는 type II 시료에 대해 η_M 에 도달된 시간 동안 홀로그래피 노출 후 측정된 회절 패턴 이미지이다. 그림 5(a)는 투과형 회절패턴이고 그림 5(b)는 본 실험에서 실시간 측정에 이용된 반사형 회절패턴이다.

그림 5에서 보는 바와 같이 0th order, 1st order 이외에도 2nd order가 관찰되었으며, 넓은 스크린 영역을 확인해 본 결과 3rd 및 4th order까지를 눈으로 식별할 수 있었다. 그림 5(a)의 투과형 회절패턴은 HeNe 레이저 빔을 시료에 수직 입사시킨 결과로 0th order와 1st order 회절 빔 간의 각도는 약 24°로 관찰되었다. 이를 이용하여 계산된 회절격자의 주기는 약 1.6 μm 이다.

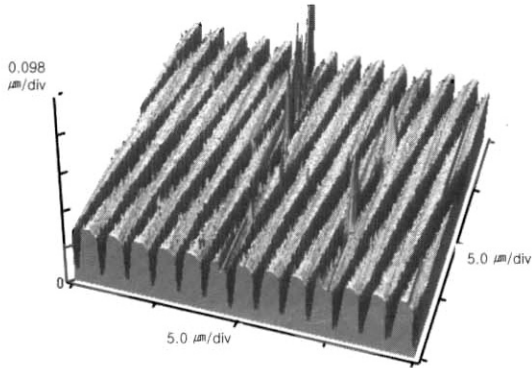


그림 6. 홀로그래피노출로 Ag 포토도핑 후 NaOH 습식식각으로 현상시킨 type II (α -GeSe/Ag/p-Si 구조) 시료의 요철 격자 모양 (AFM 이미지).

Fig. 6. Relief gratings of a type II sample (α -GeSe/Ag/p-Si structure) fabricated by Ag photodoping via holography exposure and development via NaOH wet etching.

그림 6은 그림 5(b)와 동일한 시편을 0.5 N NaOH 수용액을 이용하여 은-도핑되지 않은 비정질 GeSe를 습식 에칭에 의한 현상 후 패턴의 모양을 AFM 이미지로 측정된 결과이다.

그림 6에서 살펴볼 수 있듯이 격자 주기는 그림 5에서 관찰한 것과 마찬가지로 약 $1.6 \mu\text{m}$ 로 평가되었다.

4. 결론

집적광학의 필요성이 대두되고 있는 시점에서 이에 대한 기반기술로 인식되고 있는 광자결정 (phonic crystals)을 신뢰성을 가지고 대면적으로 제작 가능한 기술 중의 하나가 홀로그래피 기술이다. 단일 홀로그래피 노출을 통해 corrugated 형의 1차원 광자결정을 제작하며, 이중 및 삼중 노출로 다양한 원시격자 모양을 갖는 2차원 광자결정 제작이 가능하다. 특히 다중 홀로그래피 노출을 이용하므로 최근 연구되고 있는 특수 목적의 준-광자결정(phonic quasi-crystal)을 실현할 수 있다.

본 논문에서는 홀로그래피 법을 이용하여 광노출시키고 실시간으로 회절효율을 측정하므로 비정질 칼코게나이드 박막(α -GeSe)으로의 금속(Ag)-광도핑에 대한 기관의존성을 조사하였다. 본 연구

에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다. (1) Ag 광도핑은 α -GeSe 뿐만 아니라 Ag 층에서도 충분한 광흡수를 요구한다. (2) Ag/ α -GeSe/substrate (type I) 구조 보다는 α -GeSe/Ag/substrate (type II) 구조에서 광도핑이 더욱 효과적이다. 이를 설명하기 위해 우리는 다음과 같은 추론을 끌어내었다. 즉, α -GeSe 아래에 놓인 Ag 층이 충분한 광자를 흡수하여 광도핑이 시작되기 전에 맨 위층인 α -GeSe에서 광흑화 현상을 통한 가전자교변쌍 (VAPs)을 충분히 생성시켜주므로 광도핑을 크게 높일 수 있다. (3) type I의 경우는 기판으로 n-type 기판을 type II의 경우는 p-type 기판을 사용하므로 광도핑을 높일 수 있다. 이에 대한 설명으로 우리는 박막내의 EHP 생성과 소수캐리어의 비노출 영역으로의 확산 및 두 종류의 계면에서의 내부전계 효과를 적용하였다.

이상과 같이 비정질 칼코게나이드 박막 안으로 Ag를 효과적으로 광도핑시켜 주기 위하여 type II의 구조를 이용하고 노광시 전계를 어떻게 형성시켜주는가의 조건을 고려해야 한다. 현재, 비정질 칼코게나이드 박막으로의 Ag-광도핑에 대한 전계 효과를 좀 더 구체적으로 설명하기 위한 실험을 진행 중에 있으며, Ag 광도핑 메커니즘을 설명할 수 있는 모델링 작업을 진행 중에 있다.

감사의 글

본 연구는 차세대성장동력반도체사업 과제에 삼성전주식회사의 지원으로 수행되었음. 본 연구에 많은 도움을 준 교육인적자원부 BK21 기능성 나노 신화학소재 사업단에 감사의 말씀을 드립니다.

참고 문헌

- [1] E. Yablonovitch, "Photonic crystals", Journal of Modern Optics, Vol. 41, No. 2, p. 173, 1994.
- [2] J. Semmel, L. Nahle, S. Hofling, and A. Forchel, "Edge emitting quantum cascade microlasers on InP with deeply one-dimensional photonic crystals", Appl. Phys. Lett., Vol. 91, p. 071104, 2007.
- [3] 여종빈, 윤상돈, 이현용, "광자결정 제작을 위한 홀로그래피 공정연구", 전기전자재료학회 논문지, 20권, 8호, p. 726, 2007.

- [4] M. Kastner, D. Adler, and H. Fritzsche, "Valence-alternation model for localized gap states in lone-pair semiconductors", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 37, p. 1504, 1976.
- [5] K Hubner, "Valence-alternation-pair model for interface states, fixed oxide charges, radiation defecs, and impurities of the Si-SiO₂ interface", *J. Phys. C : Solid State Phys.*, Vol. 17, p. 6553, 1984.
- [6] 이현용, 정홍배, "비정질 Ge₂₅Se₇₅ 박막의 이온 침투현상 해석", *전기전자재료학회논문지*, 7 권, 5호, p. 389, 1994.
- [7] H.-Y. Lee and T. Yao, "Wet-etching selectivity of Ag-photodoped AsGeSeS thin films and the fabrication of a planar corrugated one-dimensional photonic crystal by a holographic method", *J. Vac. Sci. Tech. B* 20, Vol. 5, p. 2017, 2002.
- [8] 이현용, 김민수, 정홍배, "광노출에 따른 Ag 도핑 메카니즘 해석에 관한 연구", *전기전자재료학회논문지*, 8권, 4호, p. 472, 1995.
- [9] H.-Y. Lee, J.-W. Kim, and H.-B. Chung, "Evaluation for photo-inuced changes of photoluminescence and optical energy gap in amorphous Se_{100-x}Ge_x(x=5, 25 and 33) thin films", *J. Non-Crys. Solids*, Vol. 315, p. 288, 2003.
- [10] S. A. Lis and J. M. Lavine, "Ag photodoping of amorphous chalcogenides", *J. Appl. Phys.*, Vol. 42, p. 675, 1983.
- [11] H.-Y. Lee, S.-H. Park, J.-Y. Chun, and H.-B. Chung, "Photoinduced transformations in amorphous Se₇₅Ge₂₅ thin film by XeCl excimer-laser exposure", *J. Appl. Phys.*, Vol. 83, No. 10, p. 5381, 1998.
- [12] H.-Y. Lee, J.-K. Kim, and H.-B. Chung, "On Ag-doping in amorphous Sb₂S₃ thin film by HeNe and HeCd laser exposures and its optical characteristics", *J. Non-Crys. Solids*, Vol. 279, p. 209, 2001.
- [13] 장선주, 여철호, 박정일, 이현용, 정홍배, "Ag 편광광도핑에 의한 칼코게나이드 박막의 광유기 이방성(PA)", *전기전자재료학회논문지*, 13 권, 6호, p. 533, 2000.
- [14] D. Goldschmidt and P. S. Rudman, "The kinetics of photodissolution of Ag in amorphous As₂S₃ films", *J. Non-Crys. Solids*, Vol. 22, p. 229, 1976.