

## 산소분위기의 상압플라즈마를 이용한 페로브스카이트 표면 처리 효과

김경보<sup>1</sup>, 이종필<sup>2</sup>, 김무진<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>인하공업전문대학 금속재료과 교수, <sup>2</sup>중원대학교 전기전자공학과 교수,  
<sup>3</sup>강남대학교 IoT전자공학과 교수

## Effect of Perovskite Surface Treatment Using Oxygen Atmospheric Pressure Plasma

Kyoung-Bo Kim<sup>1</sup>, Jongpil Lee<sup>2</sup>, Moojin Kim<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Professor, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Inha Technical College

<sup>2</sup>Professor, Department of Electrical and Electronic Engineering, Jungwon University

<sup>3</sup>Professor, Department of IoT Electronic Engineering, Kangnam University

**요약** 최근 페로브스카이트 반도체 물질에 대한 연구가 이루어지고 있고, 이 물질에 대한 표면 처리를 이용한 특성 평가는 후속 연구들의 기반이 된다. 따라서, 본 논문에서는 상압분위기에서 플라즈마가 형성되는 상압플라즈마 장비로 산소 플라즈마를 생성하여 공기중에 약 6개월정도 노출시킨 페로브스카이트 박막을 표면 처리한 결과에 대해 연구하였다. 6개월간 노출시킨 이유는 페로브스카이트 박막은 유기물과 무기물로 이루어져 있기 때문에 공기 중에 노출되면, 산소나 수증기와의 반응을 통해 표면이 변화된다. 따라서, 이러한 변화를 원래 막으로의 복원이 가능한지 알아보기 위함이다. 산소플라즈마 분위기에서 1초부터 1200초까지 공정 시간을 변화시켜 가면서 표면 형상과 원소들 비율을 분석하였다. 이러한 결과는 페로브스카이트 막이 시간에 따라 변화가 일어나더라도 플라즈마 처리를 통해 이를 해결하는 방안을 제공한다.

**주제어** : 상압플라즈마, 산소분위기, 페로브스카이트, 표면처리, 결정립

**Abstract** Recently, research on perovskite semiconductor materials has been performed, and the evaluation of properties using surface treatment for this material is the basis for subsequent studies. We studied the results of surface treatment of perovskite thin films exposed to air for about 6 months by generating oxygen plasma with an atmospheric pressure plasma equipment. The reason for exposure for 6 months is that the perovskite thin film is made of organic and inorganic substances, so when exposed to air, the surface changes through reaction with oxygen or water vapor. Therefore, this change is to investigate whether it is possible to restore the original film. The surface shape and the ratio of elements were analyzed by varying the process time from 1 s to 1200 s in an oxygen plasma atmosphere. It was found that the crystal grains change over a process time of 5 s or more. In order to maintain the properties of the deposited film, it is the optimal process condition between 2 s and 5 s.

**Key Words** : Atmospheric pressure plasma, Oxygen atmosphere, Perovskite, Surface treatment, Grain

\*Corresponding Author : Moojin Kim(moojinkim7@kangnam.ac.kr)

Received May 7, 2021

Revised May 26, 2021

Accepted June 20, 2021

Published June 28, 2021

## 1. 서론

모든 물질은 도체, 반도체, 반도체로 구별할 수 있으며, 이들을 이용하여 모든 전자소자를 제작할 수 있다. 알루미늄, 티타늄, 구리, 은, 크롬 등이 도체로 주로 사용되고 있으며, 산화막, 질화막 등은 반도체 물질들이다. 특히 반도체는 전자소자가 동작하기 위한 전자나 정공과 같은 캐리어가 움직이는 활성층(active layer) 역할을 하기 때문에 이 물질의 특성에 의해 제작된 소자의 성능이 영향을 미치게 된다. 따라서, 활성층으로의 역할을 할 수 있고, 비교적 쉽게 구할 수 있고, 역사가 비교적 오래된 반도체 소재로는 실리콘(Si: Silicon)과 갈륨아세나이드(GaAs: Gallium Arsenide), 게르마늄(Ge: Germanium)이 있다[1-3]. 화합물반도체라 불리는 GaAs는 직접 밴드갭 반도체로 두 개의 서로 다른 원소로 이루어진 화합물이며, 금지대폭( $E_g$ : Bandgap)은 상온에서 약 1.42eV다. 특히 이 소재는 LED나 레이저와 같은 광전자소자에 주로 사용되고 있으며, 빛으로 나오는 파장은  $\lambda[\text{nm}] = 1.24[\text{eV}] / E_g$ 로 표현되는 식으로부터 계산할 수 있으며, 이 물질을 이용하면 850nm의 파장을 가진 빛을 방출할 수 있는 광소자가 된다[4,5]. 또한, 전자의 이동도는 Table 1에서와 같이 낮은 도핑 농도에서  $8500\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 로 이 특성을 이용하여 소자를 제작하면, 고속 동작을 하는 회로를 만들 수 있다. 하지만, GaAs로 메모리나 시스템반도체로 사용되지 않는다. 그 이유로는 화합물반도체로 웨이퍼를 제작하기 위해서는 가격을 고려해야 하는데 제조 비용이 비교적 높다.

Table 1. Electron and hole mobility at room temperature (T = 300 K)

	Electron mobility ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )	Hole mobility ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )
Silicon (Si)	1350	480
Gallium arsenide (GaAs)	8500	400
Germanium (Ge)	3900	1900

단일 원소로 이루어진 Ge는 간접 밴드갭 반도체로, 전자 및 정공의 이동도가 각각  $3900\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $1900\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 으로 빠르기 때문에 광소자를 제외한 전자소자 제작에 적합하지만, 약 0.67eV의 작은 밴드갭으로 인해 제작된 소자에서 열에 의해 생성되는 캐리어의 농도가 높다. 이로 인해 누설 전류(leakage current)가 크기 때문에 오동작이 발생할 수 있는데,

예를 들면, 이 물질을 이용하여 박막트랜지스터를 만들어 LCD나 AMOLED 디스플레이의 구동 소자로 사용하면, 검은색 이미지가 화면에 나타나야 하는데, 누설 전류로 인해 완벽한 블랙 화면을 구현하는 것이 어렵다. 또한, DRAM에 적용될 때 커패시터에 신호 '1'에 대응되는 전하들이 충전되어 있는 상태고, 구동 소자는 off 상태일지라도, 누설 전류로 인해 커패시터의 전하가 트랜지스터를 통해 이동하게 되어 충분한 시간동안 데이터 '1'을 유지할 수 없다. 특히 온도가 상승하면 이러한 현상이 심각하게 나타난다.

원소 기호 14번인 실리콘 역시 간접 밴드갭 반도체로 전자의 이동도가 GaAs나 Ge보다 작지만, 정공은 GaAs보다 높다. 이 반도체는 상온에서 1.12eV의 밴드갭 값을 가지므로 비교적 낮은 캐리어 농도를 보이기 때문에 누설 전류 값이 작다. 또한, 우리 주변에서 쉽게 구할 수 있는 원소로 앞으로도 무궁무진하게 사용할 수 있고, 이 물질과 매우 계면 특성이 우수한 절연체인 실리콘 산화막을 형성할 수 있기 때문에 1950년대에 3단자 소자인 트랜지스터에 적용된 이후 간접 밴드갭 특성임에도 불구하고, 광소자인 태양전지의 활성층 물질로 사용되고 있으며, 20%이상의 광효율을 나타낸다. 이러한 이유는 실리콘 반도체 공정 기술의 발전으로 이를 이용한 제조 공정을 이용할 수 있어 비교적 공정 단가를 낮출 수 있어 관련된 연구가 많이 이루어졌고, 시뮬레이션 프로그램의 발달로 소자를 제작하기 전에 미리 컴퓨터로 구현하여 그 특성을 파악한 후 최적 공정 기술로 제작해도 시뮬레이션 결과와 동일한 특성을 얻을 수 있기 때문이다. 디스플레이 분야에서는 다결정 실리콘(Polycrystalline Silicon) 물질을 대체하기 위해 Fig. 1(a)에서와 같이 일본 Hosono 그룹에서 금속 산화물 반도체 GIZO (Gallium Indium Zinc Oxide)인 4개의 원소로 이루어진 비정질 박막을 이용하여 Fig. 1(b) 구조의 박막트랜지스터를 제작하였다[6,7]. 이후 양산을 위한 집중적인 연구가 삼성, LG 디스플레이에서 이루어졌으며, LG 디스플레이에서 판매중인 OLED 디스플레이[Fig. 1(c)]에 적용되었다. 이 금속 산화물질은 3eV이상의 밴드갭을 나타내므로 가시 광선 영역에서 투명한 광학적 특성 때문에 투명 플렉서블 디스플레이 제작이 가능하므로 현재 고가의 제품[Fig. 1(d)]으로 판매되고 있다. 즉, 디스플레이 분야는 금속 산화물이라는 물질의 발견으로 새로운 분야에 큰 변화를 주도하고

있다. 한편, 스틸 소재의 플렉서블 기판을 이용한 태양 전지에서는 비정질 실리콘(Amorphous Silicon)을 PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) 기술을 이용하여 모듈까지 구현된 소자의 효율이 10% 정도 나오는 상용화된 제품이 Fig. 2에서와 같이 소개되고 있다[8,9]. 디스플레이 기술은 후발주자인 중국하고 기술격차가 있지만, 태양전지에서는 저가로 태양전지를 공급하기 때문에 대부분의 태양전지 시장을 중국이 장악하고 있다. 하지만, 세계적인 기술을 보유하고, 우리나라의 산업에의 기여도가 매우 큰 메모리나 시스템 반도체에서는 소자 크기가 nm급으로 작아지고 있기 때문에, 우리가 지속적으로 반도체 시장 및 기술을 주도하기 위해서는 크기가 더 작아지는 반도체 공정 기술이 개발되거나, 새로운 물질을 개발해야 하는 상황이다. 즉, 반도체 분야에 혁명과도 같은 차세대 기술이 구현되거나 실리콘을 대체할 반도체 재료가 반드시 발굴되어야 함을 의미한다. 2000년 초반 400nm에서 800nm 정도의 파장을 가지는 가시광 영역의 빛을 잘 흡수하는 페로브스카이트 구조에 대한 막이 집중적으로 연구되었다[10-13]. Fig. 3에서 보여주는 페로브스카이트 물질은  $ABX_3$ 의 구조로 되어있고, 여기에서 A와 B는 양이온, X는 양이온과 결합된 음이온을 의미하며, 양이온 A는 12개 X 음이온과 분자식  $AX_{12}$ 로 구성되며, 이는 팔면체의 입방형을 이루고 있다. 또한, 양이온 B는  $BX_6$ 로 구성되고, 음이온 X 6개와 팔면형으로 형성된다. 이 물질을 이용하여 태양전지가 제작되었으며, 15년 정도의 단기간의 연구에도 불구하고 20% 이상의 효율을 가진 소자가 소개되고 있다[14]. 또한, 이와 같은 뛰어난 광학적인 특성 때문에 광소자, 즉 LED나 레이저에 대한 연구도 이루어지는 등 실리콘이나 화합물반도체가 대체를 이루고 있던 분야로 영역을 넓히고 있다[15]. 이러한 것은 페로브스카이트 박막이 비진공방식의 습식 식각 공정으로 비교적 쉽고 낮은 비용으로 제작이 가능하다는 장점 때문이다. 하지만, 코팅된 박막이 시간이 지남에 따라 특성이 변하며, 또한, 산소나 수증기와의 접촉에 의해서도 변성이 발생하는 문제점이 있다.

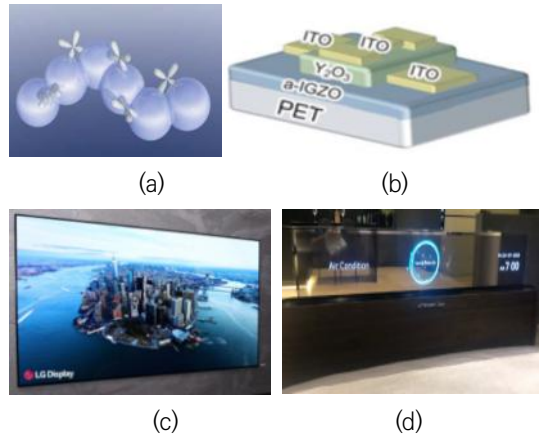


Fig. 1. (a) Structure of oxide semiconductor GZO, (b) Thin film transistor manufactured by GZO and semiconductor processes, (c) and (d) AMOLED display products using GZO-based Thin Film Transistor. Also, the (d) picture is a transparent display.

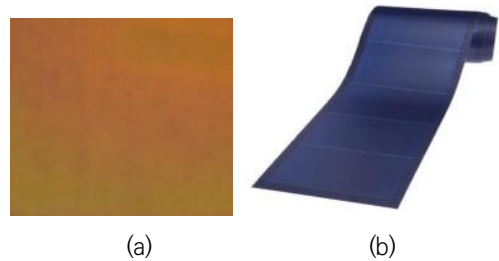


Fig. 2. (a) Image of amorphous silicon film deposited on steel substrate using PECVD equipment and (b) Flexible solar cell based on amorphous silicon film.

따라서, 페로브스카이트 박막의 표면 처리를 통해 변성을 해결할 수 있는 가능성을 제시함으로써 이 물질을 이용하여 전자소자를 제작하는 연구자들에게 향상된 물질 특성에 대한 정보를 제공하여 우수한 소자를 제작하는데 기여할 수 있도록 할 것이다.

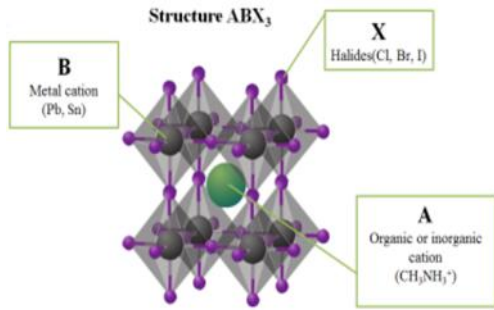


Fig. 3. Structure of perovskite semiconductor material

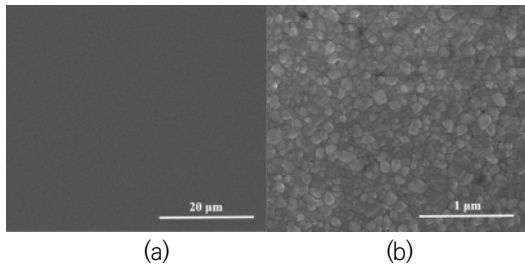


Fig. 4. SEM images of (a) low and (b) high magnification observed immediately after perovskite thin film formation.

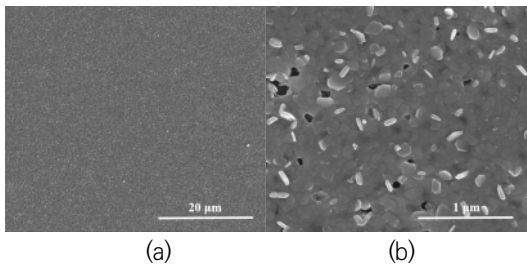


Fig. 5. (a) Low and (b) high magnification SEM images of the surface of the perovskite thin film after exposing the sample in Fig. 4 to air for about 6 months

본 논문에서는 반도체에서 사용되는 고진공 챔버내에서 공정이 진행되는 방법보다 진화된 상압분위기의 플라즈마가 형성되는 상압플라즈마 장비를 이용하여 산소 플라즈마에서 페로브스카이트 박막을 표면 처리하여 반도체 막 형상을 관찰한 내용에 대해 설명하고자 한다. 상압플라즈마 장비를 적용하는 이유는 상압에서 공정이 진행되기 때문에 샘플 설치 및 공정 후 샘플 탈착이 용이 하기 때문이다. 분석을 위해 10만배 이상 확대를 할 수 있는 표면 분석용 장비 SEM (Scanning Electron Microscopy, Nova NanoSEM 450, 30만

배 확대) 및 EDS (Energy- dispersive X-ray Spectroscopy, Nova NanoSEM 450)를 이용하였다.

## 2. 본론

연구진은 상압플라즈마 장비를 이용하여 수소 상압 분위기에서 페로브스카이트 박막에 대한 표면 형상을 연구하였으며, 그 관찰한 결과를 문헌에 발표하였다[10-12]. 연구내용은 수소플라즈마에 의해서는 CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> 반도체 물질은 시간에 따라 제거되는 것을 확인하였고, 이것을 이용하여 패터닝이 가능한 기술에 대한 것이다.

상기 수소 플라즈마뿐만 아니라, 상압플라즈마 기술을 이용하여 산소플라즈마를 형성할 수 있으며, 이러한 분위기는 유무기 페로브스카이트 막에 다른 영향을 주었으며, 그 내용을 설명하고자 한다.

### 2.1 실험 방법

페로브스카이트 박막을 형성하기 위하여 다음과 같은 공정을 진행하였다. 먼저 3cm×3cm 크기로 글라스를 잘랐으며, 이후 표면의 유기물과 파티클을 제거하기 위하여 아세톤과 메탄올, DI (De-ionized) 물(water) 순서로 용액 공정을 진행하였으며, 이후 120도의 핫 플레이트(hot plate)에서 글라스 표면에 남아있는 물을 완전히 제거한다. 다음으로 반도체 막을 코팅하기 위하여 디메틸 설포옥사이드 (Dimethyl Sulfoxide)와 감마-부틸로락톤( $\gamma$ -butyrolactone)가 포함된 용액에 CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>I와 PbI<sub>2</sub>가 첨가되어 제작된 용액을 고르게 글라스에 도포한 후 분당 4000회전(4000rpm)하는 속도의 스핀 코팅 기술로 1분 동안 진행한다. 4000rpm보다 속도를 줄이면 박막의 균일성이 나빠지고, 속도를 높이면 막의 두께가 얇아져서 반도체 물질로서의 역할을 하지 못하기 때문이다. 이어서 남아있는 디메틸 설포옥사이드를 제거하기 위하여 톨루엔을 떨어뜨린 후, 25초간 동일한 속도로 회전시킨다. 이후 용액에 있는 용매들을 완전히 증발시키기 위하여 120도 온도의 핫 플레이트에서 120분간 열처리를 진행한다. 약 200nm 두께의 균일한 막을 구현할 수 있다. 이러한 막을 형성하였을 때의 표면 형상을 5000배의 저배율과 100,000배의 고배율 이미지로 관찰하였으며, SEM 이미지는 Fig. 4와 같다. 표면 상태는 매우 깨끗하며, 완벽한 결정립으로 구성되어 있는 다결정 박막 페로브스카이트 물질이 코팅되었음을 확인할 수 있다. 이와 같은 박막

은 약 6개월 정도 상온, 상압 분위기에 노출시키면 Fig. 5와 같이 공기중의 산소나 수증기와 반응에 의해 표면의 형상이 변화한다. 막 표면 상태는 결정립이 들고 일어난 것도 있고, 곳곳에 비어있는 공간이 있는 형태가 된다.

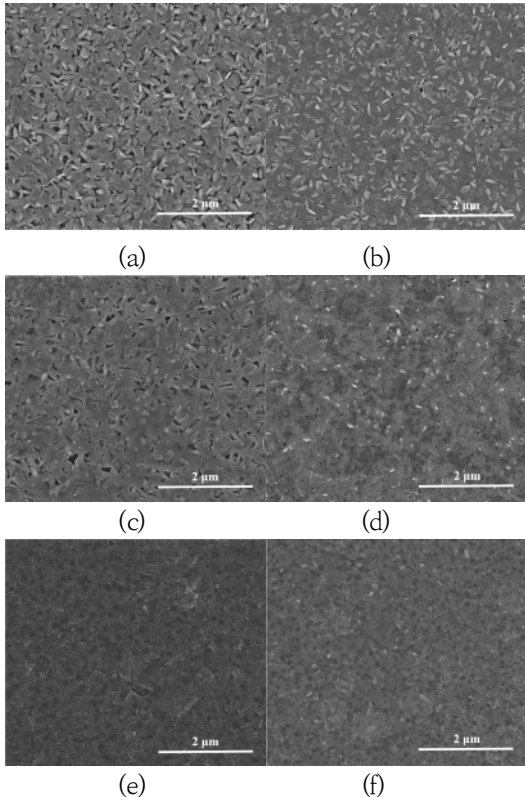


Fig. 6. Surface SEM images when the sample in Fig. 5 was carried out in the atmosphere of oxygen pressure plasma for (a) 1 s, (b) 2 s, (c) 5 s, (d) 10 s, (e) 30 s, and (f) 60 s.

### 2.2 상압 플라즈마 처리된 페로브스카이트 박막의 표면 특성

페로브스카이트 박막은 무기물과 유기물로 이루어져 있기 때문에 표면에 노출되었을 때의 반응은 피할 수 없다. 따라서, 반도체 박막 형성 후 후속 공정을 통한 다른 박막을 형성하거나 오래 공기중에 노출된 막은 후 처리를 통해서 최소한 표면에 뜬겨져 나간 결정립을 제거해야 할 필요성이 제기된다. 이를 위해 100W의 파워에서 상압의 산소플라즈마를 이용하여 시간에 따른 표면처리 공정을 진행하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

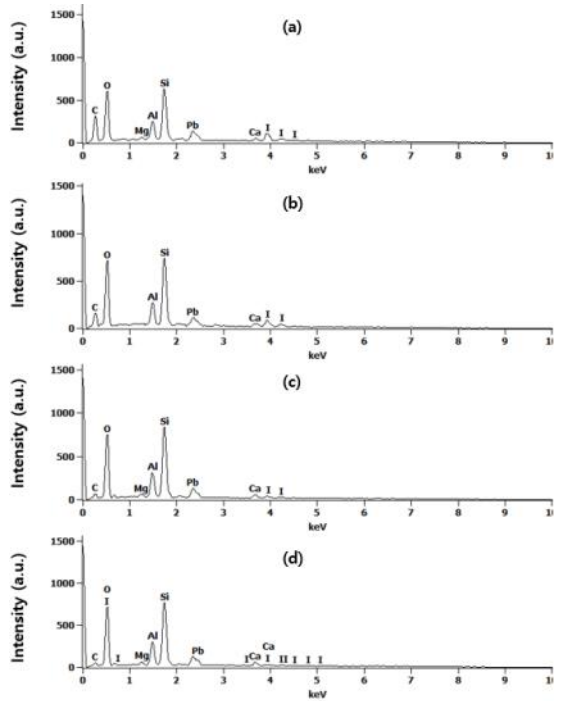


Fig. 7. EDS component analysis data when the sample in Figure 5 was processed for (b) 2 s, (c) 10 s, and (d) 60 s in an oxygen atmospheric plasma atmosphere. (a) is the EDS result for the sample in Fig. 5.

시간이 길어짐에 따라 비어있는 영역이 막으로 채워질 뿐만 아니라 표면에 뜬겨져 나간 결정립이 제거되는 것을 관찰하였다. 하지만, 5초 이상 공정이 진행된 샘플에서는 산소플라즈마에 의해 표면 결정립의 상태가 변화하였다. 따라서, 형성된 페로브스카이트 박막의 결정립 상태를 유지하기 위해서는 최소 2초에서 최대 5초 정도의 공정을 진행해야 함을 알 수 있다. 결정립 변화 원인을 파악하기 위해 화학적인 성분 변화 분석 기법인 EDS 측정을 진행하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 또한, 정량적인 성분 분석 결과를 Table 2에 표현하였다.

Table 2. Composition ratio of elements obtained from EDS data in Fig. 7.

W(igh t (%)	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	S-K	Ca-K	HL	Pb-M
Ref. (Nbr-t reated)	13.67	19.74	0.32	4.07	15.19	3.01	31.23	12.77
2 s	9.67	26.43	0	5.18	20.51	3.69	21.84	12.69
10 s	5.16	31.40	0.63	7.17	25.86	3.57	9.97	16.23
60 s	3.87	33.12	0.66	7.39	26.39	4.02	7.10	17.45
1200 s	2.92	45.60	0.69	7.87	28.10	4.08	0	10.73

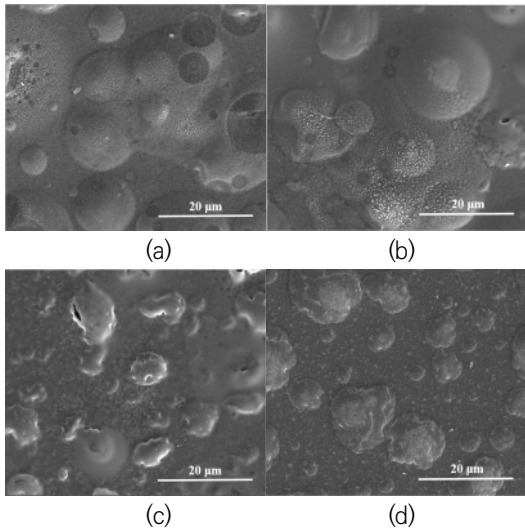


Fig. 7. Surface SEM images when the sample in Fig. 5 was carried out in the atmosphere of oxygen pressure plasma for (a) 180 s, (b) 300 s, (c) 600 s, and (d) 1200 s.

시간이 늘어남에 따라 산소의 양은 증가하는 반면, 탄소와 요오드는 줄어드는 경향을 보인다. 특히, 60초 처리된 샘플에서 요오드의 성분은 매우 적음을 파악할 수 있다. 산소 분위기에서 공정했기 때문에 시간에 따라 산소의 총량이 증가하는 경향은 예상이 되는 결과이다. 또한, 탄소와 요오드의 경우 산소와의 화학적인 반응에 의해 산소는 이산화탄소로 요오드는 산화이온으로 결합하여 공기중으로 사라지기 때문에 줄어든 당연한 결과라 할 수 있다. 추가로 검출되는 마그네슘, 알루미늄, 실리콘, 칼슘 성분들은 반도체 박막을 코팅하기 위해 사용된 글라스에 의한 성분들이다.

페로브스카이트 박막은 탄소, 질소, 납, 요오드, 수소가 이루어진 유기 화합물 반도체이기 때문에 증착된 반도체의 특성을 유지하기 위해서는 10초 이하로 진행할 필요가 있으며, SEM 결과에서는 2초에서 5초로 공정이 제한되어야함을 제시하였는데, EDS를 통해 이러한 공정 조건으로 진행해야 함을 추가로 확인할 수 있었다.

또한, 장시간 플라즈마 처리에 의한 영향성에 대해 검토하기 위하여 180초부터 1200초까지의 조건에서 추가 실험하였다. 표면 형상을 Fig. 9에 보였으며, Fig. 6의 표면과는 많은 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 대부분의 영역에서 박막이 부풀어 오르게 되고, 600초의 샘플에서는 부풀어 오를 부분이 터지는 현상도 발견

되었지만, 다시 기판과 접촉이 발생하고 있으며, 1200초에서는 다시 부풀어 오른 영역이 줄었음이 관찰되었다. 이러한 현상을 Table 2의 EDS의 정량적인 결과를 통해 설명할 수 있는데, 1200초에서는 박막에 요오드 성분이 없다. 이러한 결론으로부터 추정할 수 있는 것은 남아있는 박막의 성분과 글라 사이의 접착력이 증가하였고, 지속적으로 산소 플라즈마가 플라즈마 헤드로부터 공급되어 아래로 전달되기 때문에 이러한 미세한 압력으로 박막과의 접합이 발생하는 것으로 판단된다.

### 3. 결론

페로브스카이트 박막을 장기간 방치한 후에 산소 상압플라즈마에 의한 표면 거동을 살펴보았다. 처음 코팅된 막은 상당히 균일한 결정립이 형성되어 있으며, 약 6개월 정도 경과된 샘플은 공기중의 산소나 수증기와 반응에 의해 결정립이 들고 일어나거나 비어 있는 공간이 형성되었음을 알 수 있었다. 즉, 이러한 결함을 제거하기 위하여 산소분위기의 상압플라즈마 공정을 이용하여 1초부터 1200초까지 표면처리를 진행하였다.

시간이 지남에 따라 표면의 비어있는 공간의 크기가 작아질 뿐만 아니라 뜯겨진 결정립이 사라지는 것을 확인하였다. 하지만, 5초 이상의 시간에서 결정립이 변화되는 것을 발견하였으며, 이를 통해 증착된 막의 특성을 유지하기 위해서는 2초에서 5초 사이가 최적임을 알 수 있다. 박막의 광학적, 전기적 특성 분석을 통해 산소 플라즈마 처리 시간에 대한 최적 조건을 추가로 검증할 필요가 있다.

장시간 산소 플라즈마 처리에 따른 거동에 대해서는 박막이 부풀어 올랐다가 시간을 더 증가시키면 다시 가라앉는 현상이 나타났으며, 이는 요오드가 막에서 사라졌기 때문으로 판단된다.

### 4. 결과 및 고찰

연구결과는 페로브스카이트 반도체 물질이 시간이 경과함에 따라 열화되더라도, 이를 해결할 수 있는 방안으로 산소플라즈마처리라는 반도체 공정 기술을 제안하였고, 플라즈마의 최적 공정 범위를 제시하였다. 플라즈마 공정 조건을 변화시켜가면서 광 및 전기적 특성의 연관성을 통해 보다 체계적인 데이터 확보가 필요할 것이다.

이를 바탕으로 향후 산소 플라즈마 처리된 페로브스카이트 박막을 이용하여 태양전지나 다이오드와 같은 전자소자를 구현하여 융합화된 기술의 특성을 평가할 계획이다.

## REFERENCES

- [1] A. N. Thiessen, M. Ha, R. W. Hooper, H. Yu, A. O. Oliynyk, J. G. C. Veinot & V. K. Michaelis (2019). Silicon Nanoparticles: Are They Crystalline from the Core to the Surface?. *Chemistry of Materials*, 31(3), 678-688.  
DOI : 10.1021/acs.chemmater.8b03074
- [2] J. Talghader & J. S. Smith (1995). Thermal dependence of the refractive index of GaAs and AlAs measured using semiconductor multilayer optical cavities. *Applied Physics Letters*, 66, 335-337.  
DOI : 10.1063/1.114204
- [3] G. Scappucci, C. Kloeffer, F. A. Zwanenburg, D. Loss, M. Myronov, J.-J. Zhang, S. De Franceschi, G. Katsaros & M. Veldhorst (2020). The germanium quantum information route. *Nature Reviews Materials*.  
DOI : 10.1038/s41578-020-00262-z
- [4] G. Signorello, E. Lörtscher, P.A. Khomyakov, S. Karg, D.L. Dheeraj, B. Gotsmann, H. Weman & H. Riel (2014). Inducing a direct-to-pseudodirect bandgap transition in wurtzite GaAs nanowires with uniaxial stress. *Nature Communications*, 5, 3655.  
DOI : 10.1038/ncomms4655
- [5] K. B. Kim, J. P. Lee & M. J. Kim (2020). Optical and electrical properties of AZO thin films deposited on OHP films. *Journal of Convergence for Information Technology*, 10(9), 28-34.  
DOI : 10.22156/CS4SMB.2020.10.09.028
- [6] K. Nomura, H. Ohta, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano & H. Hosono (2004). Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors. *Nature*, 432, 488-492.  
DOI : 10.1038/nature03090
- [7] Hosono (2004). How we made the IGZO transistor. *Nature Electronics*, 1, 428.  
DOI : 10.1038/s41928-018-0106-0
- [8] K. B. Kim, J. P. Lee & M. J. Kim (2021). Characteristics by deposition and heat treatment of Cr and Al thin film on stainless steel. *Journal of Convergence for Information Technology*, 11(3), 167-173.  
DOI : 10.22156/CS4SMB.2021.11.03.167
- [9] K. B. Kim, J. P. Lee, M. J. Kim & Y. S. Min (2019). Characteristics of Excimer Laser-Annealed Polycrystalline Silicon on Polymer layers. *Journal of Convergence for Information Technology*, 9(3), 75-81.  
DOI : 10.22156/CS4SMB.2019.9.3.075
- [10] M. J. Kim (2021). Atmospheric Pressure Plasma Etching Technology for Forming Circular Holes in Perovskite Semiconductor Materials. *Journal of Convergence for Information Technology*, 11(2), 10-15.  
DOI : 10.22156/CS4SMB.2021.11.02.010
- [11] H. P. Kim, M. J. Kim, K. B. Kim, H. Khachatryan & J. Jang (2017). Properties of atmospheric hydrogen-plasma-treated  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  perovskite films. *Surface & Coatings Technology*, 330, 228-233.  
DOI : 10.1016/j.surfcoat.2017.09.002
- [12] H. Khachatryan, H. P. Kim, S. N. Lee, H. K. Kim, M. J. Kim, K. B. Kim & J. Jang (2018). Novel method for dry etching  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  perovskite films utilizing atmospheric-hydrogen -plasma. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 75, 1-9.  
DOI : 10.1016/j.mssp.2017.11.019
- [13] H. Khachatryan, Y. H. Kim, K. B. Kim, H. J. Yang & M. J. Kim (2019). Direct etching of perovskite film by electron-beam scanning. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 90, 171-181.  
DOI : 10.1016/j.mssp.2018.10.022
- [14] E. H. Jung, N. J. Jeon, E. Y. Park, C. S. Moon, T. J. Shin, T. Y. Yang, J. H. Noh & J. W. Seo (2019). Efficient, stable and scalable perovskite solar cells using poly(3-hexylthiophene). *Nature*, 567, 511-515.  
DOI : 10.1038/s41586-019-1036-3
- [15] G. Pacchioni (2021). Highly efficient perovskite LEDs. *Nature Reviews Materials*, 6, 108.  
DOI : 10.1038/s41578-021-00280-5

김 경 보(Kyoung-Bo Kim)

[정회원]



- 2000년 8월 : 포항공과대학교 신소재공학과(공학박사)
- 2000년 8월 ~ 2001년 5월: 포항공과대학교 신소재공학과(박사후연구원)
- 2001년 5월 ~ 2004년 8월 : 나이넥스(차장)

- 2004년 8월 ~ 2008년 12월 : 삼성디스플레이(책임연구원)
- 2009년 1월 ~ 2014년 11월 : 포스코(전문연구원)
- 2014년 11월 ~ 2016년 02월 : 한국생산기술연구원(전문위원)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 인하공업전문대학 금속재료과 교수
- 관심분야 : Solar Cell, Display, Metal processing
- E-Mail : kbkim@inhac.ac.kr

이 종 필(Jongpil Lee)

[정회원]



- 1999년 8월 : 광운대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2004년 8월 : 광운대학교 전기공학과(공학박사)
- 1991년 2월 ~ 2015년 5월 : 한국전기학원(Director)

- 2015년 6월 ~ 현재 : 중원대학교 전기전자공학과 교수
- 관심분야 : Solar Heat, Electric Car, Microgrid, Power System
- E-Mail : leejp@jwu.ac.kr

김 무 진(Moojin Kim)

[정회원]



- 2005년 2월 : 포항공과대학교 전기전자공학과(공학박사)
- 2005년 2월 ~ 2012년 8월 : 삼성디스플레이(책임연구원)
- 2012년 8월 ~ 2015년 3월 : 포스코(책임연구원)

- 2015년 4월 ~ 2020년 2월 : 중원대학교 전기전자공학 전공 교수
- 2020년 3월 ~ 현재 : 강남대학교 IoT 전자공학과 교수
- 관심분야 : Solar Cell, Display, Semiconductor, Laser
- E-Mail : moojinkim7@kangnam.ac.kr