Dependences of the Optical and the Electrical Properties of 50 nm Thick Copper Films Deposited by Using an Electron Beam Evaporator on the Evaporator's Vacuum Conditions

Hyoung-Taek LEE · In-Hee LEE · Hyeong-Ryeol PARK*

Department of Physics, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

(Received 12 April 2018 : revised 11 June 2018 : accepted 14 June 2018)

Techniques to make metal films thinner and better remain an unexplored area of research that still has important technical problems. In particular, the fabrication of metal films is widely encountered in the field of nano-optics, and various surface plasmon phenomena, including light focusing, have been observed more in metal films with better conductivities. Here, we investigated how the qualities of the metal thin films were changed by varying the deposition conditions in an electron beam evaporator. We analyzed the metal films by using electrical and optical methods. In fact, the pumping time of the vacuum chamber had a greater effect on the quality of the metal film than the difference in the lowest vacuum pressure. For the production of a metal film with a conductivity as good as that for the bulk, an electron beam evaporator having a loading chamber in addition to a main chamber in which the vacuum pressure is always kept to a minimum value as low as 10^{-10} torr is required.

PACS numbers: 42.62.Fi, 41.20.Jb, 42.25.Bs

Keywords: Thin film, Metal deposition, Resistivity, Electron beam evaporator, Spectroscopy

전자 빔 증착기의 증착 조건에 따른 50 nm 두께 구리 박막의 전기적 특성 및 광학적 특성

이형택 · 이인희 · 박형렬*

충북대학교 물리학과, 청주 28644, 대한민국

(2018년 4월 12일 받음, 2018년 6월 11일 수정본 받음, 2018년 6월 14일 게재 확정)

박막의 제작은 다양한 연구 및 산업에서, 예를 들면, 반도체 기술 뿐 아니라 생명 공학적 기술에서 많은 응용이 되고 있다. 박막을 더 얇게, 그러면서도 품질이 우수하게 만드는 기술은 아직도 중요한 기술적인 문제들이 남아 있는 미지의 연구 분야이다. 특히 금속 박막을 만드는 기술은 나노 광학의 영역에서 많이 사용되며, 얇고 전도도가 크고 (비저항이 작고) 흡수율이 큰 (투과율이 작은) 금속 박막에서 광 집속 현상 및 다양한 표면 플라즈몬 현상이 보다 더 잘 관찰된다는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 나노 구조물 제작 등 다양한 분야에서 자주 사용되는 금속 박막의 증착 조건을 변화시켰을 때 금속 박막의 품질이 어떻게 달라지는지 전기적, 광학적 분석을 통해 알아보았다. 실제로, 진공도의 차이보다는 펌핑 시간이 박막의 품질에 영향을 크게 미쳤음을 알 수 있었다. 더 좋은 품질의 금속 박막 샘플을 제작하기 위해서는 항상

10^{-10} torr의 진공이 잡혀있는 메인 챔버 외에 추가로 시료를 위한 보조 챔버가 있는 전자 빔 증착기를 이용해야 한다.

PACS numbers: 42.62.Fi, 41.20.Jb, 42.25.Bs

Keywords: 박막, 금속 증착, 비저항, 전자 빔 증착기, 분광기

I. 서론

금속 박막에서 유전율(dielectric constant)과 형태적 특성(morphology)은 증착 조건에 매우 의존하는데, 특히 표면 분석을 하는 연구자들은 이 부분에 있어서 많은 연구들을 진행하여 왔다. 하지만 나노 광학(nano-optics) 및 표면 플라즈몬(surface plasmon) 연구자들은 대부분 금속 박막을 이용하여 다른 응용 기술을 개발하는 것에 집중하기 때문에, 금속 박막의 특성에 대해서는 소홀히 생각할 때가 많다 [1-4].

그동안 플라즈모닉스(plasmonics) 분야에서는 금이나 은 같은 산화가 잘 되지 않는 금속을 주로 이용해 왔지만, 빨리 산화되어 증착하기 힘들었던 알루미늄이나 구리도 자외선 플라즈모닉스(ultraviolet plasmonics) 등에서 수요가 급증함에 따라 이러한 금속 박막의 품질 개선에 대한 연구가 필요해 졌다 [5-7]. $10^{-6} \sim 10^{-7}$ torr의 고진공 영역에서 증착 속도(deposition rate)에 따른 박막의 품질에 대한 연구는 진행된 바 있다 [8].

고진공 영역에서 박막의 성질에 영향을 주는 가장 큰 요인은 잔류 가스의 대부분을 차지하는 수증기이다. 수증기가 증착되는 물질과 결합하게 되는 경우 결정 입도(grain size)를 작게 하며 박막의 품질을 나쁘게 한다 [9].

이 연구에서는 고진공 영역에서 구리를 증착했을 때 진공도에 따라 구리 박막의 비저항 및 투과율이 어떻게 달라지는지 확인해 보았다. 구리 박막을 증착하는데 사용한 장비는 전자 빔 증착기(electron beam evaporator)이다. 전자 빔 증착기를 사용한 이유는 기판위에 회로 패턴을 형성하거나 나노 금속 구조물을 제작하는 경우 리소그래피 기술을 사용하는데, 이때 전자 빔 증착기를 사용하여 증착된 박막은 증착물질들이 방향성 있게 기판 위에 증착되어 리소그래피 작업에 용이하기 때문이다.

구리 박막의 품질은 전기적 특성과 광학적 특성을 분석하여 확인하였다. 전기적 특성의 경우에는 실리콘 기판위에 증착한 세 시료들을 4탐침 면저항 측정 방법(4-point probe measurement)을 이용하여 분석하였고, 광학적 특성의 경우에는 슬라이드 글라스를 기판으로 사용한 세 시료들을 각각 가시광선 ~ 적외선 영역의 광학적 분광기(spectroscopy) 및 테라헤르츠 시분할 분광기를 이용하여 분석하였다.

Table 1. Deposition conditions for each sample.

Sample	Pumping time	Deposition time	Base pressure
1	15 hours	12 min.	6.0×10^{-7} torr
2	1 hour	12 min.	3.5×10^{-6} torr
3	15 minutes	12 min.	1.2×10^{-5} torr

Fig. 1. (Color online) Pictures of three thin copper films.

II. 시료 제작

실험에서 사용한 구리 박막의 증착 두께는 모두 50 nm로 유지하였으며, 구리 박막의 증착 조건은 Table 1에 나타내었다. 증착 시간(deposition time)을 12분으로 일정하게 유지하면서 비교를 위해 시작 진공도를 나타내는 초기 진공도(base pressure)에 차이를 주어 증착을 진행하였다. 기판은 전기적 특성 실험을 진행하기 위해서 두께 500 μm 의 실리콘 웨이퍼(Si wafer)를 사용하였으며 비저항은 0.005 [$\Omega\cdot\text{cm}$] 미만이다. 광학적 특성 실험을 진행하기 위해서는 슬라이드 글라스(slide glass)를 사용하였으며 두께는 1.0 mm 이고 굴절률은 Fig. 5에 나타내었다. 증착할 때 Si 기판과 슬라이드 글라스 기판을 함께 넣고 동시에 전자 빔 증착(electron beam evaporation)을 진행하였으므로 기판에 따른 증착 조건의 차이는 없다.

진공도에 따른 차이를 비교하기 위하여 각각 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} torr의 초기 진공도에서 박막들을 제작하였다(Fig. 1). 상용 전자 빔 증착기에서는 보통 10^{-6} torr 정도의 초기 진공도에서 증착 과정을 시작하는데, 10^{-7} torr의 경우에는 상당히 좋은 진공도를 나타내지만, 다른 진공도에 비해 펌핑 시간(pumping time)이 15시간으로 특히 길었다(Table 1 참조). 여기서 펌핑 시간이란 시료를 챔버 안에 넣고 진공을 잡기 위해 진공 펌프를 가동한 시간을 의미하는데, 펌핑하는 동안 불순물이 기판에 증착될 수 있기 때문에 중요한 변수가 될 수 있다. 그러므로 각 진공도를 만드는데 걸리는 시간이 다르기 때문에 초기 진공도 뿐만 아니라 그에 따른

*E-mail: hrpark@cbnu.ac.kr

Fig. 2. (Color online) Resistance measurement methods using (a) a digital multimeter and (b) a 4-point probe meter.

Fig. 3. (Color online) Resistivity values of the thin films (black square) and bulk (red dotted line) of coppers.

펌핑 시간의 차이도 각 시료들의 박막 특성의 영향을 미치는 요인으로 고려해야 한다.

III. 전기적 특성

일반적인 디지털 멀티미터는 Fig. 2(a)와 같이 일정한 전류를 가해서 양단의 전압을 측정하여 저항을 측정하는 방식이다. 하지만 리드선의 저항 값과 접촉 저항이 존재하여 이번 실험에서 사용하기에는 그 값들이 구리의 저항 값보다 매우 커서 적합하지 않다.

따라서 이번 실험에서는 저항 값을 면 저항으로 측정하는 Fig. 2(b)에서 보이는 4-탐침 면저항 측정기 (4-point probe meter)를 이용하여 측정하였다. 이러한 방법은 리드선의 저항 값과 접촉 저항을 무시할 수 있다. Fig. 3의 A와 D에 해당하는 탐침 (probe)에 전류를 흘린 후 B, C에 해당하는 탐침에서는 전압을 측정하여 면 저항을 계산하는 방식이다.

$$R = \frac{V_{BC}}{I_{AD}} [\Omega] \quad (1)$$

Table 2. Surface resistance and resistivity of the samples.

Sample	Surface resistance [Ω/sq]	Resistivity [$\times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$]
1	0.688	3.44
2	0.621	3.11
3	0.703	3.52

Fig. 4. (Color online) Multiple reflection modeling.

위 식을 통해 구한 값을 보정 계수 c 를 곱하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$R_{sheet} = c \times R [\Omega/\text{sq}] \quad (2)$$

여기서 사용된 단위 [Ω/sq]는 면 저항의 단위로 사용된다.

4-탐침 면저항 측정기를 이용하여 측정한 결과는 Table 2 및 Fig. 3과 같다. 여기서 구리 벌크 (bulk)의 비저항 (resistivity) 값은 $1.68 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 이다 [10].

위 실험의 결과로 구리 박막의 비저항을 비교해 보면 [시료 3 > 시료 1 > 시료 2]이다. 이는 ‘초기 진공도가 좋으면 박막의 비저항이 작을 것이다.’라는 일반적인 생각과는 다른 결과이다. 초기 진공도뿐만 아니라 전체 펌핑 시간에 따라서 박막의 품질이 결정될 수 있다는 사실을 알려준다. 우리는 추가적으로 광학적 특성에서는 증착조건에 따라 어떤 특징이 나타나는지 관찰해 보기로 하였다.

IV. 광학적 특성

광학적 특성의 경우에는 광학 분광기 (spectrometer) 장비를 이용하여 가시광선 ~ 적외선 영역의 투과 및 반사 실험과 테라헤르츠 시분할 분광기 (terahertz time-domain spectroscopy) 방법을 이용한 테라헤르츠파 투과 실험을 통하여 확인하였다.

Fig. 5. Refractive index of glass [13].

광학적 특성 실험을 진행하기 전에, 실험값과 비교할 구리 박막의 투과율과 반사율, 흡수율 값을 다중반사 모델링 (multiple reflection modeling)을 이용하여 구하였다 (Fig. 4). 계산에 사용한 구리 박막의 굴절률 값은 벌크 값을 이용하였다 [11].

위 모델링에서 사용한 변수는 다음과 같다. E_0 : 입사한 전기장의 크기 (amplitude), I_0 : 입사한 빛의 세기 (intensity), E_t : 투과한 전기장의 크기 (amplitude), I_t : 투과한 빛의 세기 (intensity), n_1 : 매질1(공기)의 굴절률, $\tilde{n}_2$: 금속 박막의 복소수 굴절률, n_3 : 기판의 굴절률, d : 금속 박막의 두께, t_{ab} : 매질 a 에서 매질 b 로의 투과계수, r_{ab} : 매질 a 에서 매질 b 로의 반사계수.

$$\tilde{k} = \frac{2\pi\tilde{n}_2}{\lambda}, \quad \tilde{n}_2 = n - ik \quad (3)$$

여기서 $\tilde{k}$ 는 복소수 파수 (wavenumber)를 나타낸다. $\tilde{n}_2$ 에서 n 값은 복소수 굴절률의 실수부를 나타내고, k 값은 굴절률의 허수부를 나타낸다.

수직으로 입사 ($\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0^\circ$) 하는 TM 모드 전자 기판의 경우, 프레넬 방정식을 이용하여 반사계수와 투과계수를 구하면 다음과 같다.

$$r_{ab} = \frac{\tilde{n}_a - \tilde{n}_b}{\tilde{n}_a + \tilde{n}_b} \quad (4)$$

$$t_{ab} = \frac{2\tilde{n}_b}{\tilde{n}_a + \tilde{n}_b} \quad (5)$$

여기서, $\tilde{n}_a$ 는 입사하기 전 물질에서 굴절률, $\tilde{n}_b$ 는 입사한 후 물질에서의 굴절률을 나타낸다.

위의 식들을 이용하여 투과계수와 반사계수를 구하면 투과율은 다음과 같이 계산할 수 있다 [12].

Fig. 6. (Color online) The real and imaginary values of the complex refractive indices of copper bulk as a function of wavelength [11].

매질 3까지 전기장을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tilde{E}_{t1} &= E_0 t_{12} t_{23} e^{-i\tilde{k}d} \\ \tilde{E}_{t2} &= E_0 t_{12} t_{23} r_{12} r_{23} e^{-i\tilde{k}3d} \\ \tilde{E}_{t3} &= E_0 t_{12} t_{23} (r_{12} r_{23})^2 e^{-i\tilde{k}5d} \\ &\dots\dots \\ \tilde{E}_{tN} &= E_0 t_{12} t_{23} (r_{12} r_{23})^{N-1} e^{-i\tilde{k}(N-1)d} \end{aligned} \quad (6)$$

따라서 투과 전기장은

$$\begin{aligned} \tilde{E}_t &= \sum_N E_0 t_{12} t_{23} (r_{12} r_{23})^{N-1} e^{-i\tilde{k}(N-1)d} \\ &= E_0 e^{-i\tilde{k}d} \left(\frac{t_{31} t_{12} t_{23}}{1 - r_{12} r_{23} e^{-2i\tilde{k}d}} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

투과한 빛의 세기는 다음과 같다.

$$I_t = \tilde{E}_t \tilde{E}_t^* \quad (8)$$

반사율은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tilde{E}_{r0} = E_0 r_{12} \quad (9)$$

공기에서 매질 2로 가면서 한번 반사하므로 식 (9)을 더해 주어야 하고, 매질 2 내부에서의 다중반사는 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} \tilde{E}_{r1} &= E_0 t_{12} r_{23} t_{21} e^{-i\tilde{k}2d} \\ \tilde{E}_{r2} &= E_0 t_{12} (r_{23})^2 r_{21} t_{21} e^{-i\tilde{k}4d} \\ \tilde{E}_{r3} &= E_0 t_{12} (r_{23})^3 (r_{21})^2 t_{21} e^{-i\tilde{k}6d} \\ &\dots\dots\dots \\ \tilde{E}_{rN} &= E_0 t_{12} r_{23} t_{21} (r_{21} r_{23})^{N-1} e^{-i\tilde{k}2Nd} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}\tilde{E}_r &= \tilde{E}_{r0} + \sum_N \tilde{E}_{rN} \\ &= E_0 \left(r_{12} + \frac{t_{12} r_{23} t_{23} e^{-i\tilde{k}2d}}{1 - r_{21} r_{23} e^{-i\tilde{k}2d}} \right)\end{aligned}\quad (11)$$

반사한 빛의 세기는 다음과 같다.

$$I_t = \tilde{E}_t \tilde{E}_t^* \quad (12)$$

흡수율은 다음과 같이 구한다.

$$A = 1 - T - R \quad (13)$$

다중반사 모델링의 결과와 Fig. 5의 유리 기판의 굴절률 [13] 및 Fig. 6의 구리 벌크의 굴절률 [11]을 이용하여 계산하면 Fig. 7과 같은 두께가 50 nm인 구리 박막의 광학적 투과, 반사 및 흡수 스펙트럼을 얻을 수 있다.

실제로 가시광선 ~ 적외선 영역의 분광기를 사용한 광학적 투과 실험을 진행한 결과는 Fig. 8과 같다. 실험결과, 투과율은 그 값이나 경향성이 이론 시뮬레이션 (simulation) 결과와 거의 일치하는 모습을 확인해 볼 수 있다.

실험 결과를 비교해 보면, 적외선 영역의 경우에는 세 시료의 투과율이 거의 비슷하므로 가시광선 영역에서의 투과율을 비교해 보면 [시료 3 < 시료 2 < 시료 1]이다. 이는 전기적 특성 실험의 결과와 달리 광학적 특성을 통한 구리 박막의 실험에서는 초기 진공도보다 펌핑 시간이 박막의 광학적 특성에 큰 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다. 이는 금속 표면의 전기 전도도를 주로 관찰하는 4-탐침 면저항 측정 방법에 비해 금속 박막 전체의 특성을 관찰해야 하는 광학적 투과도 측정 방법을 사용하면, 증착 전 기판 위에 펌핑 시간에 비례해서 쌓인 불순물의 양에 따라 금속 박막 전체의 광학적 투과 특성이 나빠지는 것이라고 볼 수 있다.

가시광-적외선 영역보다 더 장파장 영역인 테라헤르츠 (terahertz) 주파수 영역에서의 투과율을 관찰하기 위하여 테라헤르츠 시분할 분광기를 이용한 테라헤르츠파 투과 실험을 진행하였다. 0.3 THz 주파수에서 테라헤르츠파 투과 실험의 결과는 먼저 진행한 가시광선-적외선 분광기 실험의 결과와 동일하게 투과율이 [시료 3 < 시료 2 < 시료 1]이다 (Fig. 9). 가시광선-적외선 투과 실험에서 언급했듯이 테라헤르츠파를 이용한 투과 실험에서도 초기 진공도보다 펌핑 시간이 박막의 특성을 결정하는데 중요한 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다. 결국 펌핑하는 동안 불순물이 기판에 증착될 수 있으며 이 요인이 금속 박막의 광학적 특성을 결정하는데 중요한 변수가 될 수 있다는 것을 보여준다.

실제로 Table 1을 참고하면, 시료 1의 경우 10^{-7} torr의 좋은 진공도를 만들기 위해서 전날 밤부터 약 15시간 정도의 펌핑 시간을 가졌고, 기판에 가장 많은 불순물이

Fig. 7. (a) Transmittance, (b) reflectance, (c) absorbance of the 50 nm thick copper film using the theoretical multiple reflection modeling.

쌓였을 것으로 예상된다. 시료 2와 3의 경우 1시간과 15분의 차이는 그리 큰 차이가 나지 않기 때문에 기판에 불순물이 쌓인 정도는 큰 차이가 나지 않으며, 광 투과 특성 또한 상대적으로 큰 차이를 보이지 않는다.

이를 토대로 구리 박막의 전기적 특성 및 광학적 특성의 결과를 정리해 보면, 전기적 특성 실험은 박막의 표면의 표면저항만 측정하였고, 이는 기판에 쌓인 불순물의 영향을

Fig. 8. (Color online) Experimental optical transmittance spectra of the three copper films (red, green, and blue solid lines) and theoretical simulation spectrum (black dotted line), as shown in Fig. 7(a).

상대적으로 덜 받았음을 시사한다. 따라서 초기 진공도가 가장 좋지 않은 시료 3의 저항이 가장 컸고, 시료 2 비해 시료 1의 경우에는 압도적인 펌핑 시간으로 인해 기판에 쌓인 불순물이 영향을 끼칠 수 있을 정도로 쌓였을 수 있고, 이로 인해 시료 2의 비저항이 가장 낮게 측정되었다. 광학적 특성 실험은 박막 두께 전체가 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다. 실제로, 광 투과 실험의 결과를 보면, 구리 박막의 광학적 특성은 펌핑 시간이 짧을수록 박막의 투과율이 낮은 것으로 나타났다.

V. 결론

이번 실험에서는 전자 빔 증착기의 증착 조건에 따른 박막의 전기적 특성을 4-탐침 면저항 측정기를 이용하여 알아 보았고, 광학적 특성을 다중 반사 모델링을 통한 이론값과 함께 가시광선-적외선 영역의 분광기 및 테라헤르츠 시분할 분광기를 사용한 광 투과 실험을 진행하여 알아보았다.

각 실험들을 통해 우리는 초기 진공도가 낮을수록 더 좋은 전기적 및 광학적 특성을 가지는 박막을 증착할 수 있을 것이라는 기존의 생각과는 반대되는 결과를 얻게 되었고, 그 이유를 분석해 보았다. 상용 전자 빔 증착기의 경우 보통 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ torr 정도의 초기 진공도에서 증착 과정을 시작하는데, 10^{-7} torr 진공도를 만들기 위해서 너무 오랜 시간동안 펌핑을 하였기 때문에 더 높은 초기 진공도에서 만든 박막들에 비해서 특성들이 좋지 않았고, 이러한 요인은 상대적으로 광학적 특성에 더 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 9. (Color online) Experimental terahertz transmittance (black square) through the three copper films at 0.3 THz, and theoretical terahertz transmittance (red dotted line) through a copper thin film with the thickness of 50 nm and the refractive index from one reference [14] on the glass slide with the refractive index of 2.0 [15] at 0.3 THz using the multiple reflection modeling.

증착 중에 금속 박막의 품질은 증착 하고자 하는 금속과 수증기가 반응하는 정도에 따른 차이도 있겠지만 [16] 박막의 두께에 따른 차이도 있을 것이다. 예를 들어, 100 nm 이상의 두꺼운 금속 박막의 경우 펌핑 시간에 따른 불순물이 박막의 성질에 치명적인 영향을 주진 않겠지만, 50 nm 이하의 얇은 박막의 경우에는 펌핑 시간에 비례해서 생긴 불순물이 박막의 성질에 더 큰 영향을 줄 수 있다. 이번 실험의 경우 그 차이는 광학적 특성 실험에서 가장 낮은 초기 진공도에도 불구하고 시료 1의 투과율이 가장 높았다는 사실을 통해 알 수 있다.

박막이 증착되는 동안 수증기와의 영향을 줄이기 위한 방법으로는 초고진공 영역의 진공을 사용하는 방법이 있다. 초고진공을 구현하기 위해서, 증착 전 챔버에 열을 가하여 챔버 내의 수증기를 증발시키고 진공도를 10^{-10} torr 영역까지 좋아지게 할 수 있다. 그렇게 되면 고진공 영역보다 챔버 내에 수증기가 약 1000배 ~ 10000배 이상 적게 남아 있고, 훨씬 좋은 품질의 금속 박막을 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

금속 박막을 증착할 때 펌핑 시간을 줄이는 방법으로는 시료 삽입을 위한 또 하나의 진공 챔버 (loading dock chamber)가 설치된 전자 빔 증착기 시스템을 이용하는 방법을 생각해 볼 수 있다. 기존의 상용 챔버의 경우에는 시료를 증착하기 위해서 항상 진공을 뺐다가 다시 진공을 잡는 일을 반복하게 되는데, 진공을 깨고 다시 잡는다면 매번 좋은 진공도를 만들기 위해서 펌핑 시간을 오래 가져야 한다.

따라서 항상 진공이 잡혀있는 메인 챔버 이외에 보조 챔버 (loading dock)가 있다면, 초기 진공도와 상관없이 펌핑 시간을 극도로 줄일 수 있고, 더 좋은 특성을 가진 박막을 얻을 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

실제로, 충북대학교 물리학과에서 보유하고 있는 보조 챔버가 있는 전자 빔 증착기로 초기 진공도 10^{-6} torr에서 증착한 50 nm 두께의 구리 박막 시료의 경우, 펌핑 시간은 1분 이내였으며, 측정된 비저항 값이 $2.54 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 로 앞에서 상용 전자 빔 증착기로 쌓은 세 시료보다 훨씬 더 비저항이 작고 벌크와 가장 가까운 값을 얻었다.

펌핑 시간을 초기 진공도와 상관없이 극도로 줄였을 경우, 고진공과 초고진공 영역($10^{-6} \sim 10^{-10}$ torr)에서 박막을 증착했을 때, 초기 진공도가 낮을수록 더 좋은 전기적 및 광학적 특성을 갖는 금속 박막을 제작할 수 있는지에 대해서는 추후 실험을 통하여 확인해 볼 것이다.

감사의 글

이 논문은 2018년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 이공학 개인기초연구지원사업 (기본연구지원사업, 한국형 SGER)의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (NRF-2018 R1D1A1A02048923).

REFERENCES

- [1] B. A. Movchan and A. V. Demchishin, *Fiz. Met. Metalloved.* **28**, 653 (1969).
- [2] C. R. M. Grovenor, H. T. G. Hentzell and D. A. Smith, *Acta Metall.* **32**, 773 (1984).
- [3] J. A. Thornton, *J. Vac. Sci. Technol. A* **4**, 3059 (1986).
- [4] I. Petrov, P. B. Barna, L. Hultman and J. E. Greene, *J. Vac. Sci. Technol. A* **21**, S117 (2003).
- [5] C. Delacour, S. Blaize, P. Grosse, J. M. Fedeli and A. I. Bruyant *et al.*, *Nano Lett.* **10**, 2922 (2010).
- [6] S. Yokogawa, S. P. Burgos and H. A. Atwater, *Nano Lett.* **12**, 4349 (2012).
- [7] M. W. Knight, N. S. King, L. F. Liu, H. O. Everitt and P. Nordlander *et al.*, *ACS Nano* **8**, 834 (2014).
- [8] K. M. McPeak, S. V. Jayanti, S. J. P. Kress, S. Meyer and S. Iotti *et al.*, *ACS Photonics* **2**, 326 (2015).
- [9] D. M. Hoffman, *Handbook of Vacuum Science and Technology* (Academic Press, San Diego, 1998), Chap. 3.3, p. 335.
- [10] D. C. Giancoli, *Physics*, 7th ed. (Pearson, Seoul, 2014), Chap. 18.
- [11] H.-J. Hagemann, W. Gudat and C. Kunz, *J. Opt. Soc. Am.* **65**, 742 (1975).
- [12] E. Hecht, *Optics*, 5th ed. (Pearson, Seoul, 2017), Chap. 9, pp. 433-441.
- [13] Refractive index, <https://refractiveindex.info> (accessed May. 11, 2018)
- [14] W.-F. Sun, X.-K. Wang and Y. Zhang, *Chinese Phys. Lett.* **26**, 114210 (2009).
- [15] R. Rahman, D. K. McCarty and M. Prasad, *J. Geophys. Res. Solid Earth* **120**, 6219 (2015).
- [16] C. V. Thompson, *Annu. Rev. Mater. Res.* **42**, 399 (2012).