

DLC 박막 코팅에 의한 IR window의 적외선 투과율 향상에 관한 연구

엄현석⁰, 박진석, 박성래*, 김규현*
 한양대학교 전기공학과, *(주)우경전광

The improved transmittance of an IR window by coating a DLC film

Hyun-Seok UHM⁰, Jin-Seok PARK, Sung-Lae PARK*, Kyu-Hyun KIM*
 Dept. of Electrical Engineering Hanyang University, *Woo Kyung Electro-Optics Corp.

Abstract - The diamond-like carbon(DLC) film, as an antireflection layer, is coated on a commercially used Ge window. DLC films are deposited by using an rf(13.56 MHz) plasma CVD. The optimal value of thickness and refractive index of DLC layer has been determined from the computer simulation.

IR-transmittances of DLC-coated Ge windows are estimated by measuring FTIR spectra in the wavelength range of 2.5 ~ 25 μm. By coating the DLC film on one side of the Ge window, the transmittance measured at a wavelength of 10 μm is about 60 %, while that of the bare Ge is lower than 50 %. Also, a higher transmittance up to about 90 % is obtained by coating the DLC film on both sides of the window. It may be suggested that the further improvement of the IR-transmittance can be achieved by more precisely controlling the thickness and the refractive index of DLC layer and also by adopting various multi-layer antireflection structures.

우 약 36 % 정도가 반사되며 이는 빛이 서로 다른 매질의 경계면을 통과할 때 일부가 반사되어 나가기 때문이다. 공기 중에서 굴절률이 n_s 인 매질로 빛이 입사하는 경우에 반사율(R)은 식 (1)과 같이 표현된다.^{(4),(6)}

$$R = \left(\frac{n_s - 1}{n_s + 1} \right)^2 \quad \text{--- (1)}$$

Ge의 굴절률이 4이므로 식 (1)에 대입하여 계산하면 입사한 빛의 36 %가 반사됨을 알 수 있다. 그러나 실제로는 표면에서 다중반사가 일어나기 때문에 투과율을 측정하면 47 % 정도에 지나지 않는다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 매질의 굴절률이 클수록 반사되는 빛의 양이 증가한다. 그러므로 적당한 굴절률을 갖는 물질의 코팅에 의해 공기와 기판 사이의 굴절률의 차이를 줄여줌으로써 반사를 줄일 수 있다.

Ge에 단일 코팅층에 의한 무반사 조건은 식 (2)와 같이 표현된다.⁽⁴⁾

$$n_c = \sqrt{n_s} \quad \text{--- (2)}$$

여기서, n_c 와 n_s 는 각각 코팅막과 기판물질의 굴절률이다. 즉, 굴절률이 4인 Ge의 경우 반사를 최소가 되게 하려면 굴절률이 2의 값을 갖는 물질을 코팅하여야 한다. DLC 박막은 증착변수들에 따라 다소 차이는 있으나 일반적으로 약 1.8 ~ 2.2 정도의 굴절률을 가지는 것으로 알려져 있기 때문에⁽⁵⁾ DLC 박막이 Ge의 무반사 코팅을 위한 이상적인 재료임을 알 수 있다.

또한, 반사를 최소가 되게 하는 조건에서 코팅막의 두께와 적외선 파장과의 관계는 식 (3)과 같이 표현된다.^{(4),(6)}

$$n_c t = \frac{\lambda}{4} \quad \text{--- (3)}$$

여기서, t 는 코팅막의 두께, λ 는 최대 투과율에서의 적외선 파장을 나타내고, 식 (3)을 만족하는 코팅막의 두께를 1/4(quarter-wave) 두께라고 한다. 따라서 굴절률 2인 DLC 박막을 코팅하는 경우 10 μm에서 최대의 투과를 얻기 위한 코팅막의 두께는 1.25 μm가 된다.

그림 1은 시뮬레이션을 통하여 Ge 위에 DLC 박막을 코팅하였을 때 예상되는 반사율을 계산한 것이다.

1. 서론

다이아몬드상 탄소(diamond-like carbon, DLC) 박막은 결정질 다이아몬드와 유사한 물성을 가지며, 구조적으로 sp^1 , sp^2 및 sp^3 의 탄소 결합을 모두 포함하고 있는 비정질(amorphous) 탄소 박막이다.⁽¹⁾ 이러한 DLC 박막은 우수한 경도, 내마모성, 화학적 안정성 및 적외선 영역에서의 높은 투과율 등의 성질을 이용하여 기계적, 광학적 코팅 재료로 많이 응용되고 있다.^{(2),(3)}

적외선 영역을 이용하는 열상장비의 window로 사용되고 있는 Ge은 굴절률이 높아서(~4) 표면에서의 반사가 36%나 되고 다중 반사를 고려하면 실제로 투과되는 양은 50% 미만이다.^{(4),(5)} 또한, Ge window가 외부에 노출되는 경우 화학적으로 오염되거나 습기 및 온도 등과 같은 주위 환경의 변화에 따라 투과율이 변화하는 문제점이 있다.

따라서 본 연구의 목적은 Ge 적외선 window의 투과율 향상을 위한 무반사 코팅 및 화학적, 기계적, 열적 보호 코팅 재료로서 DLC 박막을 채택하고, 이론적인 simulation 결과 및 다양한 실험 결과의 분석을 통하여 열상장비 window의 성능을 개선하는데 있다. 본 연구에서는 rf(13.56 MHz) PECVD(plasma-enhanced chemical vapor deposition) 장비를 이용하여 Ge 기판위에 DLC 박막을 코팅하였고, 시뮬레이션 및 실험결과 분석을 통하여 DLC 박막이 Ge window의 무반사 코팅 물질로 적합함을 보였다.

2. 본론

2.1 이론적 고찰

코팅하지 않은 Ge의 반사를 측정하면 수직 입사인 경

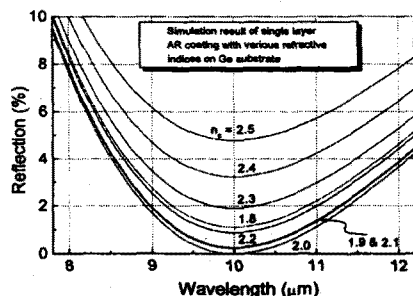


그림 1. 시뮬레이션 결과 (10μm의 파장에서 최소 반사율)

Ge의 굴절률을 4로 하고 DLC 박막의 굴절률을 1.8 ~ 2.5로 변화시키면서 10 μm의 파장에서 반사가 최소가 되도록 시뮬레이션 하였으며, DLC 박막에 의한 적외선의 흡수는 무시하였다. 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 굴절률이 2인 DLC 박막을 코팅하였을 때 가장 낮은 반사율, 즉 가장 높은 투과율을 보인다.

2.2 DLC 박막의 증착

그림 2는 DLC 박막의 증착에 사용된 수직형 PECVD 장치의 개략도로서, 반응실과 가스 공급부, 진공부 및 rf 전력 공급부로 구성된다.

지름 1 inch, 두께 5 mm인 Ge 기판을 반응실 음극 위에 장착하고, DLC 박막을 증착하기 전에 Ar 플라즈마를 이용하여 건식 세정을 수행하였다. PECVD 방법에 의한 기판의 건식 세정 및 DLC 박막의 증착 조건은 표 1에 요약한 바와 같다. 표 1에 나타난 박막의 증착시간은 식 (3)의 관계를 이용하여 여러번의 실험을 통해 얻은 박막의 증착률을 고려하여 정해진 것이다.

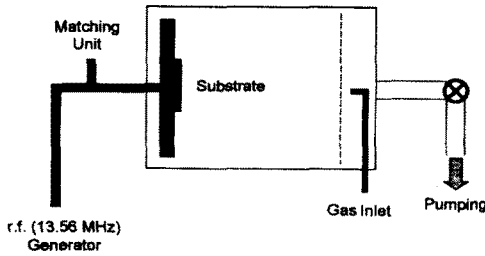


그림 2. PECVD 장치 개략도

표 1. Ge 기판의 건식세정 및 DLC 박막의 증착조건

	cleaning	deposition
base pressure (Torr)	5×10^{-6}	
working pressure (mTorr)	10	25
rf power (W)	1000	1000 ~ 2500
gas flow rate (sccm)	Ar, 20	CH ₄ , 50
working time (min)	20	65 ~ 80

그림 3은 PECVD 방법에 의해 Ge 기판위에 증착된 DLC 박막의 증착률을 rf 전력에 따라 나타낸 결과이다.

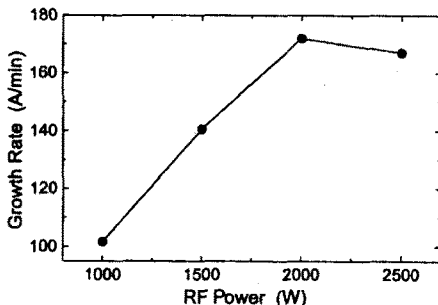


그림 3. DLC 박막의 증착률

DLC 박막의 증착률은 박막의 두께를 Surface Profilometer(DEKTAK3)로 측정하여 전체 증착시간으로 나눈 평균값으로 산출하였다. 박막의 증착률이 2000 W까지 선형적으로 증가하다가 그 이후에는 감소하는 경향을 보인다. 이는 CH₄ 가스의 이온화율이 2000 W에서 최대가 되어 증착에 참여하는 이온이 가장 많이 존재하기 때문이며, 더 높은 rf 전력에서 증착률이 감소되는 이유는 sputtering에 의한 박막의 식각 효과가 나타나기 때문이라고 사료된다.

2.3 실험결과 및 검토

DLC 박막이 증착된 Ge window의 적외선 투과율을 측정하여 그림 4에 나타내었다. 투과율은 Fourier Transform Infrared Spectroscopy(FTIR, Shimdu Corporation)를 이용하여 2.5 ~ 25 μm 파장의 범위에서 측정하였다. 4 ~ 12 μm의 파장에서 Bare Ge의 경우 47 %의 투과율을 보이던 것이 DLC 박막의 코팅에 의해 60 % 정도로 향상되었음을 알 수 있다.

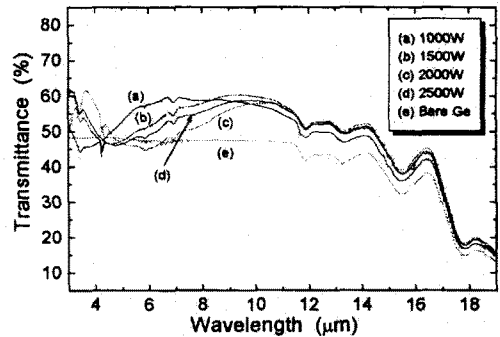


그림 4. Bare Ge과 DLC/Ge의 투과율

그러나 이론적인 계산 결과에 비하여 실험적인 측정에 의한 투과율의 결과가 더 작게 나타났는데 그 이유는 다음과 같이 생각할 수 있다.

첫째, PECVD에 의하여 증착된 DLC 박막의 굴절률이 정확히 2의 값을 갖지 않는다는 것이다. 식 (3)을 이용해 굴절률이 2인 이상적인 DLC 박막의 경우를 생각하여 증착하였지만, 굴절률은 박막증착시 반응가스의 압력이나 인가한 rf 전력의 크기 등 여러 가지 변수들에 의해 정확히 2의 값을 갖지 못한다. 식 (3)을 이용해 실제로 측정된 박막의 두께와 투과율이 가장 높게 나타나는 파장의 값을 대입하여 얻어진 굴절률을 그림 5에 나타내었다.

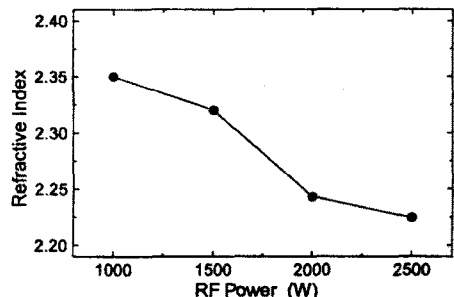


그림 5. DLC 박막의 굴절률

둘째, 입사된 빛이 Ge를 통과한 후 DLC 박막 내에서 흡수되었기 때문이다. 이론적인 계산에서는 DLC 박막층에 따른 흡수율을 무시했지만, 실제 FTIR 측정시 입사되는 빛의 방향에 따라 박막 내에서 흡수되는 양이 달라진다. 그림 6은 DLC 박막을 코팅한 Ge에 입사되는 적외선이 DLC 박막을 먼저 통과하는 경우(그림 (A))와 Ge를 먼저 통과하는 경우(그림 (B))와의 반사율을 비교한 것으로서, 각각의 반사율을 Ge 기판의 반사율을 기준으로 표시하였다. 입사하는 적외선은 Ge과 DLC 박막의 경계면과 Ge의 기판 표면에서 반사되고 이와 동시에 DLC 박막에서의 흡수가 발생하게 된다. (A)의 경우가 (B)의 경우보다 DLC 박막을 경유하는 횟수가 많아 이에 따른 흡수도 많이 존재할 것이라 사료된다. 즉, 그림 6에 나타낸 바와 같이 (A)와 (B) 경우에 있어서 반사율의 차이는 DLC 박막에서의 적외선 흡수량의 차이를 의미한다.

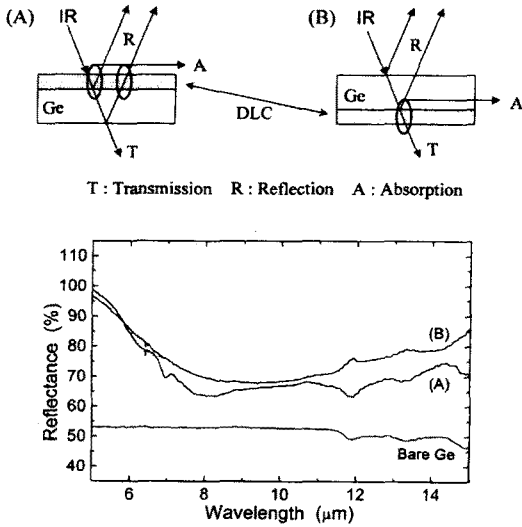


그림 6. 입사되는 빛의 방향에 따른 반사율 (rf power 1500W)

이러한 이유로 DLC 박막의 무반사 코팅의 경우에도 투과되는 빛의 양이 감소될 수 있다. 그림 7은 이러한 문제를 고려하여 Ge의 양쪽 면 모두를 코팅한 경우에 대한 투과율을 나타낸 것이다.

DLC 박막을 이용해 Ge의 양쪽면을 코팅할 경우 10 μm의 파장에서 90% 이상의 투과율을 보이며, 이는 시뮬레이션의 결과에 접근하고 있음을 나타낸다. Ge 기판의 양쪽면을 DLC 박막으로 코팅함으로써 Ge기판에서 발생하는 반사를 줄여 주었고, 이에 따라 박막내에서의 흡수도 줄일 수 있으므로 투과율이 향상된 것으로 사료된다.

또한, DLC 코팅막 테스트(Mil-C-48497)를 통해 Ge 기판에 대한 DLC 박막의 응착 특성(adhesion)의 우수함도 확인한 바 있다.

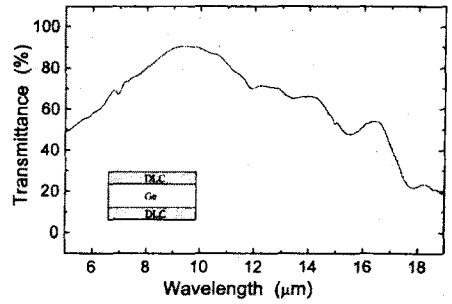


그림 7. Ge의 양쪽면을 DLC 박막으로 코팅한 경우의 투과율 (rf power 1500W)

3. 결론

본 연구에서는 Ge window에 DLC 박막을 코팅함으로써 무반사 효과에 의하여 투과율이 향상될 수 있음을 입증하였다.

Ge 기판의 한쪽면을 코팅함으로써 60% 이상의 적외선 투과율을 보였으며, 양쪽면의 코팅에 의해서 10 μm의 파장에서 90% 이상의 투과율을 얻을 수 있었다. 단일 무반사 코팅에 의해 높은 투과율을 보이지 못한 이유는 DLC 박막의 두께 및 굴절률이 이상적인 무반사 이론값과 차이가 있으며, 실제로 DLC 박막에 의한 적외선의 흡수가 존재하기 때문이다. 또한, DLC 박막의 굴절률 및 두께를 정확히 조절할 수 있는 증착조건의 확립과 IR window의 다층막 구조 무반사 코팅 실험을 수행한다면, 적외선 투과율이 더욱 향상된 매우 이상적인 IR window의 제작이 가능할 것으로 사료된다.

[참고 문헌]

- [1] C.J.Russell, "CVD diamond and related superhard materials", (Decision Resources, Inc., Waltham, MA, 1993)
- [2] H.C.Tsai and D.B.Bogy, "Characterization of diamondlike carbon films and their application as overcoats on thin-film media for magnetic recording", J.Vac.Sci.Technol.A, Vol.5, p.3287, 1987
- [3] M.Rubin, C.B.Hopper, N.H.Cho and B.Bhushan, "Optical and mechanical properties of dc sputtered carbon films", J.Mater.Res., Vol.5, p.2538, 1990
- [4] P.Klocek, "Handbook of infrared optical materials", (Marcel Dekker, Inc., 1991)
- [5] G.F.Zhang, L.J.Guo, Z.T.Liu, X.K.Xiu and X.Zheng, "Studies on diamondlike carbon films for antireflection coatings of infrared optical materials", J.Appl.Phys., Vol.76(2), p.705, 1994
- [6] A.Bubenzer, B.Dischler and A.Nyaiesh, "Optical properties of hydrogenated hard carbon thin films", Thin Solid Films, Vol.91, p.81, 1982

본 연구는 97년도 안산시 중소기업기술개발 지원사업 (과제번호 : 97-19)의 일부 지원에 의해 이루어졌음.