

Ver.2 설명

마이크로볼로미터(Microbolometer)와 같은 적외선 흡수체 구조는 전형적인 공진 캐비티(**Resonant Cavity**) 구조를 가집니다. 말씀하신 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ (MWIR) 대역에서 높은 흡수율을 얻기 위해서는 각 층의 광학적 두께와 금속층의 면저항(Sheet resistance) 최적화가 핵심입니다.

이러한 다층 박막 구조의 광학적 특성을 계산하기 위해 가장 널리 쓰이는 ****전달 행렬법(Transfer Matrix Method, TMM)****을 자바스크립트로 구현해 드립니다. 별도의 서버 없이 브라우저에서 바로 실행 가능한 코드입니다.

1. 전제 물리 공식 (TMM)

각 층 j 에 대한 전달 행렬 M_j 는 다음과 같이 정의됩니다.

$$M_j = \begin{pmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{pmatrix}$$

여기서 각 변수는 다음과 같습니다.

- $\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} (n_j - i k_j) d_j \cos \theta$ (위상 지연)
- $\eta_j = (n_j - i k_j) \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}}$ (수직 입사 시 복소 굴절률에 비례)
- d_j : 두께, n_j : 굴절률, k_j : 소멸 계수

3. 주요 설계 포인트

- Air Gap** 제어: $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 대역의 중심인 $4\ \mu\text{m}$ 에서 최대 흡수를 일으키려면, Air Gap의 두께는 대략 $\lambda/4$ 인 **1000 nm ($1\ \mu\text{m}$)** 전후가 되어야 합니다.
- Top Metal (TiN/NiCr)**: 이 층은 완전한 금속보다는 약 **377 Ω/sq** 정도의 자유 공간 임피던스와 매칭되는 얇은 박막(대략 5~15 nm)일 때 가장 높은 흡수율을 보입니다. (위 코드에서는 n, k 값으로 이를 모사합니다.) -> ver.2에만 해당. Ver.3는 비저항과 두께로 모사함
- VOx 및 Si3N4**: 이 층들은 물리적 지지체 및 온도 센싱 역할을 하며, 굴절률 변화에 따라 캐비티의 유효 광학 거리를 변화시킵니다.

WebAssembly 확장성: 현재는 간단한 1D TMM이지만, 복잡한 메타표면(Metasurface) 구조로 확장할 경우 계산량이 늘어납니다. 나중에 성능 최적화가 필요하다면 이 로직을 C++/Rust로 작성하여 WebAssembly로 컴파일해 연결하는 방식을 추천드립니다.

Ver.3 설명

금속 박막의 경우, 광학 상수를 직접 입력하는 것보다 공정 조건에서 익숙한 ****비저항 (Resistivity, ρ)****과 ****두께 (d)****를 사용하는 것이 훨씬 실용적입니다.

적외선 영역(MWIR)에서 금속의 복소 굴절률($\tilde{n} = n - ik$)은 **Drude** 모델 또는 **Hagen-Rubens** 근사를 통해 전기 전도도와 연결할 수 있습니다. 자바스크립트 코드 내에서 각 파장(λ)마다 비저항을 기반으로 n 과 k 를 동적으로 계산하도록 수정했습니다.

1. 물리적 변환 로직

전도도 $\sigma = 1/\rho$ 와 복소 유전율 ϵ 의 관계식을 이용합니다:

$$\epsilon(\omega) \approx 1 + i \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}$$

여기서 $\omega = 2\pi c / \lambda$ 이므로, $n - ik = \sqrt{\epsilon}$ 을 계산하여 전달 행렬에 적용합니다.

3. 설계 시 참고할 수치 (Engineering Tips)

- **TiN / NiCr 비저항:** 보통 스퍼터링으로 증착된 TiN은 공정 조건에 따라 **150 ~ 500 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$** 사이의 값을 가집니다. 이 값이 높을수록(더 얇거나 비저항이 클수록) 자유 공간과의 임피던스 매칭이 쉬워져 흡수율이 올라갑니다.
- **Bottom Reflector:** 알루미늄(Al)이나 티타늄(Ti) 등 두꺼운 금속층은 보통 **5 ~ 15 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$** 정도의 낮은 비저항을 가집니다. 이 값이 낮을수록 반사율이 완벽해져서 투과에 의한 손실(Transmittance)을 막아줍니다.
- **Air Gap**의 중요성: 파장이 3~5 μm 이므로, 기판과의 거리는 4배수 파장인 대략 **1 μm** 부근에서 최적의 **Quarter-wave cavity**를 형성합니다.

이제 비저항 수치를 조절해가며 타겟 파장(예: 4 μm)에서 흡수율이 피크를 찍도록 최적화해 보실 수 있습니다. 특히 5월 ECTC 발표 준비와 관련하여 mSAP 같은 미세 공정에서의 박막 두께 정밀도가 흡수율에 미치는 민감도(Sensitivity) 분석용으로 사용하시기 좋을 것 같습니다.

추가로 특정 파장에서의 ****수직 입사가 아닌 사선 입사($15^\circ, 30^\circ$ 등)****에 대한 특성 변화가 궁금하시면 말씀해 주세요. 코드를 확장해 드릴 수 있습니다.