

나노포토닉스 최신 연구 동향

한국과학기술연구원 나노포토닉스연구센터

책임연구원 권석준 (sjoonkwon0531@gmail.com, cheme@kist.re.kr)

1.3. Fresnel reflection

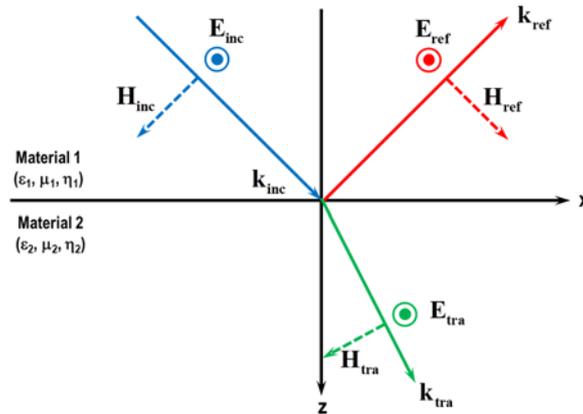


그림 1.7. TE 편광되어 입사되는 전자기파의 반사 및 투과 모식도

1회차에서는 맥스웰 방정식을 이용하여 계면에서의 광학 현상을 어떻게 해석할 수 있을지 알아보았습니다. 이제 2회차에서는 본격적으로 반사와 투과에 대해 알아보도록 합시다. 실제로 평평한 경계에서 얼마나 많은 에너지가 반사와 투과로 나뉘는지를 분석하기 위해서는 조금 더 일반적인 모형이 필요합니다. 그것의 대표적인 예가 바로 **프레넬 반사 (Fresnel reflection)**입니다. 지금까지는 입사 전자기파의 편광 방식 (polarization mode)를 고려하지 않았습지만, 사실 경계면이 평평한 평면이기 때문에, 전기장이 경계면에 수평인지 수직인지 여부는 전자기파의 반사와 투과에 꽤 많은 영향을 미칩니다.

먼저 그림 1.7에 나타난 바와 같이, TE 편광을 생각해 봅시다. 계면에서의 수평 성분 경계 조건을 고려하면 다음과 같은 관계식을 찾을 수 있습니다.

$$\begin{aligned}
E_{0i} + E_{0r} &= E_{0t}, \\
-H_{0i} \cos \theta_i + H_{0r} \cos \theta_i &= -H_{0t} \cos \theta_t \rightarrow \frac{(E_{0r} - E_{0i}) \cos \theta_i}{\eta_1} = \frac{-E_{0t} \cos \theta_t}{\eta_2}.
\end{aligned} \tag{1.13}$$

방정식 (1.13)를 정리하면 다음과 같은 관계식까지 얻을 수 있습니다.

$$\begin{aligned}
r_{TE} &= \frac{E_{0r}}{E_{0i}} = \frac{\eta_2 \cos \theta_i - \eta_1 \cos \theta_t}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t}, \\
t_{TE} &= \frac{E_{0t}}{E_{0i}} = \frac{2\eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t}.
\end{aligned} \tag{1.14}$$

물론 방정식 (1.14)은 비-자성물질 간의 계면을 가정하여, 아래와 같이 더 간략하게 쓸 수 있습니다.

$$\begin{aligned}
r_{TE} &= \frac{E_{0r}}{E_{0i}} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}, \\
t_{TE} &= \frac{E_{0t}}{E_{0i}} = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}.
\end{aligned} \tag{1.15}$$

다음으로 그림 1.8에 나타낸 바와 같이, TM 편광되어 입사되는 전자기파의 반사와 투과를 생각해 봅시다.

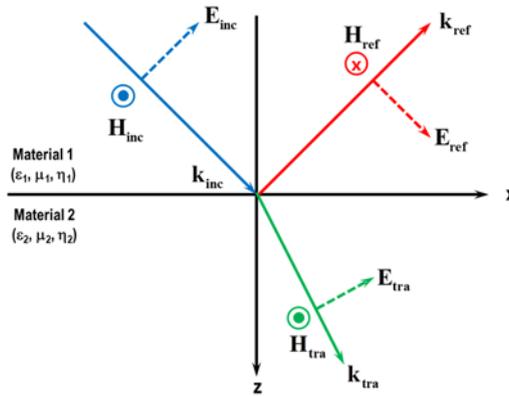


그림 1.8 TM 편광되어 입사되는 전자기파의 반사 및 투과 모식도

여기서 부호의 규약은 입사각이 0° 일 때, 전기장이 x-축의 양의 방향으로 정렬되는 상황으로 설정합니다. 그에 따라 오른손 법칙에 따라 자동적으로 입사광, 반사광, 투과광의

자기장 방향이 그림 1.8에 나타낸 바와 같이 설정됩니다. 특히 입사, 반사, 투과광의 자기장 부호에 주의해 주시기 바랍니다. 그림 1.8을 참고하여, 다음과 같은 수평 성분 전자기장의 경계 조건에 기반한 관계식을 찾을 수 있습니다.

$$\begin{aligned} H_{0i} - H_{0r} = H_{0t} &\rightarrow \eta_2 (E_{0i} - E_{0r}) = \eta_1 E_{0t} \\ E_{0i} \cos \theta_i + E_{0r} \cos \theta_i &= E_{0t} \cos \theta_t. \end{aligned} \quad (1.16)$$

방정식 (1.16)를 정리하면 TM 편광된 입사광의 반사 (r_{TM}) 및 투과 계수 (t_{TM})를 찾을 수 있습니다.

$$\begin{aligned} r_{TM} &= \frac{\eta_2 \cos \theta_t - \eta_1 \cos \theta_i}{\eta_1 \cos \theta_i + \eta_2 \cos \theta_t} \approx \frac{n_1 \cos \theta_t - n_2 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}, \\ t_{TM} &= \frac{2\eta_2 \cos \theta_i}{\eta_1 \cos \theta_i + \eta_2 \cos \theta_t} \approx \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}, \end{aligned} \quad (1.17)$$

방정식 (1.17)과 방정식 (1.14)의 모양이 상당히 비슷하니, 혼동이 없길 바랍니다. 만약 입사각이 0° 라면 어떨까요? (즉, $\theta_i = \theta_t = 0$) 그렇다면 이 경우에는 TE 혹은 TM 편광이 구분되지 않습니다. 따라서 방정식 (1.14)과 (1.17)은 같은 값을 가져야 할 것입니다. 실제로 $\theta_i = \theta_t = 0$ 를 방정식에 대입하면 $r_{TE} = r_{TM} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_1 + \eta_2}$, $t_{TE} = t_{TM} = \frac{2\eta_2}{\eta_1 + \eta_2}$ 임을 확인할 수 있습니다.

이제, 반사 계수 혹은 투과 계수가 어떻게 반사도나 투과도와 연결되는지 살펴봅시다. 이를 위해, 다시 한번 포인팅 벡터를 가져와 봅시다. 앞서 보았듯, 일단 $\langle \mathbf{S} \rangle = \mathbf{k} |\mathbf{E}| |\mathbf{H}| / 2 |\mathbf{k}| \approx \mathbf{k} |\mathbf{E}|^2 / 2 \eta k_0 |n|$ 입니다. 반사도 (R)와 투과도 (T)는 **에너지 비율**의 개념으로서, 각각 경계면에 수직인 포인팅 벡터의 성분의 절대값 비율인 $R = \left| \frac{\langle S_{ref} \rangle \cdot \hat{z}}{\langle S_{inc} \rangle \cdot \hat{z}} \right|$, $T = \left| \frac{\langle S_{tra} \rangle \cdot \hat{z}}{\langle S_{inc} \rangle \cdot \hat{z}} \right|$ 와 같이 정의됩니다. 그러면 매질 1과 2 모두 비-자성물질인 것을 가정하여, 아래와 같은 관계식을 찾을 수 있습니다.

$$\begin{aligned}
R &= \frac{\left| \frac{\langle S_{ref} \rangle \cdot \hat{z}}{\langle S_{inc} \rangle \cdot \hat{z}} \right| = \frac{\frac{|E_{ref}|^2 |k_{zr}|}{2\eta_1 k_0 |n_1|} = \frac{|E_{ref}|^2 k_0 |n_1| \cos \theta_i}{2\eta_1 k_0 |n_1|} = \frac{|E_{ref}|^2}{|E_{inc}|^2} = |r|^2, \\
T &= \frac{\left| \frac{\langle S_{tra} \rangle \cdot \hat{z}}{\langle S_{inc} \rangle \cdot \hat{z}} \right| = \frac{\frac{|E_{tra}|^2 |k_{zt}|}{2\eta_2 k_0 |n_2|} = \frac{|E_{tra}|^2 k_0 |n_2| \cos \theta_t}{2\eta_2 k_0 |n_2|} = \left(\frac{|E_{tra}|^2}{|E_{inc}|^2} \right) \frac{\eta_1 \cos \theta_t}{\eta_2 \cos \theta_i} = |t|^2 \frac{\eta_1 \cos \theta_t}{\eta_2 \cos \theta_i}, \quad (1.18)
\end{aligned}$$

위의 방정식 (1.18)는 TE 혹은 TM 편광과 상관 없이 적용되는 모형입니다. 당연히 반사도와 투과도는 모두 $0 \leq R \leq 1$, $0 \leq T \leq 1$ 의 범위를 가지며, 실제로 입사광, 투과광, 반사광의 에너지 혹은 강도 (power density)를 측정하여 계산된 값에 해당하는 물리량입니다.

프레넬 반사 모형에서 재미있는 현상을 몇 개 더 발견할 수 있습니다. 먼저 TE 편광된 전자기파를 생각해 봅시다. 만약 무반사 조건을 찾고 싶다고 합시다. 즉, $r_{TE} = 0$ 이 되려면 어떻게 해야 할까요? 무반사 조건을 위해서는, 방정식 (1.15)에서, $n_1 \cos \theta_i = n_2 \cos \theta_t$ 이어야 합니다. 또한, 스넬의 법칙 $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$ 에 따라, 두 관계식이 동시에 만족되려면, $n_1 = n_2$ 혹은 $\theta_i = \theta_t$ 이어야 함을 알 수 있습니다. 이는 1과 2는 광학적으로 같은 매질이라는 뜻이므로, 경계가 없는 것이나 마찬가지입니다. **따라서 TE 편광된 입사광에 대해, 반사 계수가 0인 조건은 물리적 의미가 없습니다.** 그렇다면, TM 편광은 어떨까요? $r_{TM} = 0$ 가 되려면 어떤 조건이 만족되어야 할까요? 먼저, 방정식 (1.17)에서, $n_1 \cos \theta_i = n_2 \cos \theta_t$ 이어야 합니다. 또한, 마찬가지로 스넬의 법칙과 연계하면 다음과 같은 관계식을 유도할 수 있습니다.

$$\begin{aligned}
&n_1 \cos \theta_i = n_2 \cos \theta_t, \quad n_2 \sin \theta_t = n_1 \sin \theta_i \\
&\rightarrow \cos \theta_t = \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \sin^2 \theta_i} \\
&\rightarrow n_1^2 \cos^2 \theta_t = n_1^2 \left(1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \sin^2 \theta_i \right) = n_2^2 \cos^2 \theta_i \\
&\rightarrow \left(\left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 - 1 \right) \left(\left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \cos^2 \theta_i - \sin^2 \theta_i \right) = 0 \\
&\rightarrow \tan \theta_i = \frac{n_2}{n_1}. \quad (1.19)
\end{aligned}$$

방정식 (1.19)의 마지막 관계식을 만족시키는 입사각을 **브루스터-각 (Brewster's angle)** $\theta_B = \tan^{-1}(n_2/n_1)$ 이라고 합니다. 위에서 살펴 보았다시피, TE 편광에서는 브루스터-각이라는 개념이 존재하지 않고, 오직 **TM 편광된 전자기파에서만 관측되는 각도**입니다. 예를 들어, 공기 중에서 수면을 향해 TM 편광된 가시광이 입사할 경우 ($n=1.5/1$), $\theta_B = 56.3^\circ$ 입니다. 즉, 이 각도로 입사된 빛은 반사 계수가 0으로 측정됩니다.

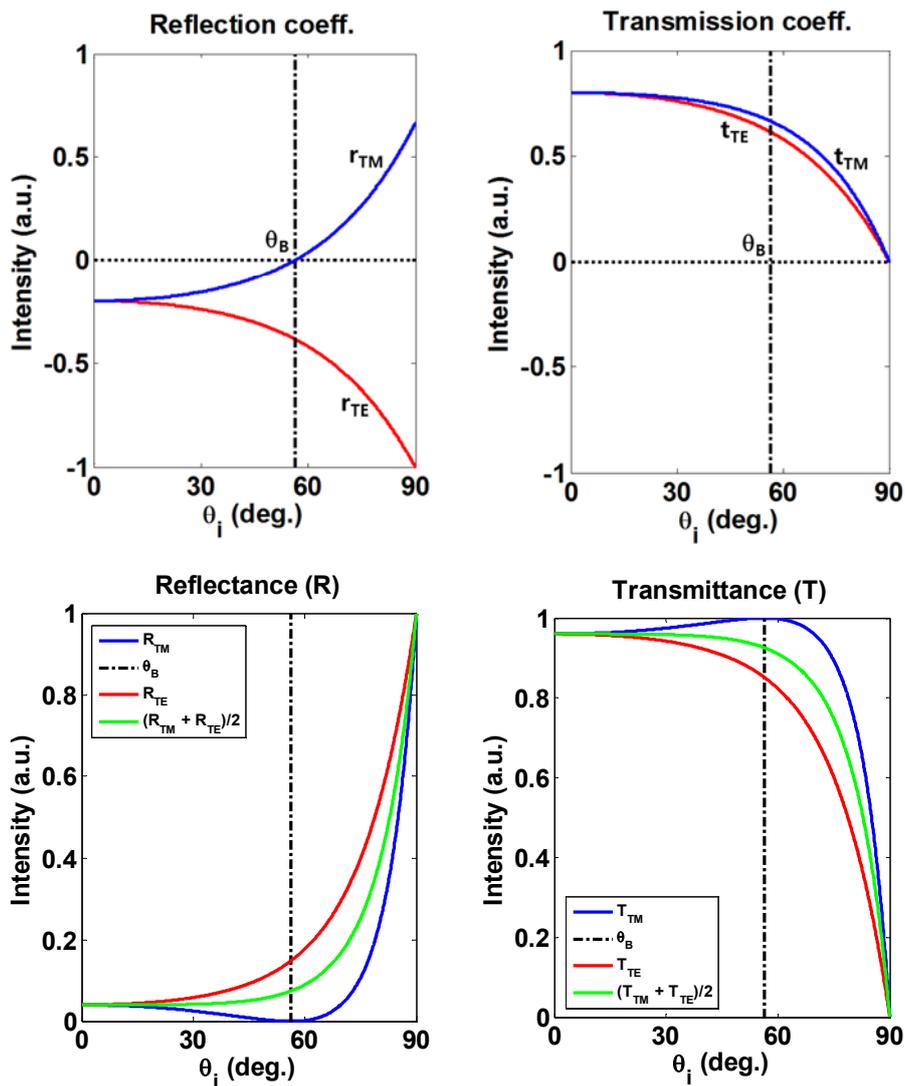


그림 1.9. (위) $n_2 = 1.5, n_1 = 1$ 인 경우, TE, TM 편광된 입사광의 프레넬 반사 및 투과 계수
(아래) 프레넬 반사 및 투과도

프레넬 반사 모형을 조금 더 상세하게 분석해 봅시다. 먼저 $n_2 > n_1$ 인 경우를 생각해 봅시다 (이러한 경우를 **external reflection**이라고도 합니다.). 그림 1.9의 위 패널은 프레넬 모형에서 $n_2 = 1.5, n_1 = 1$ 인 경우를 가정하여, 반사 및 투과 계수를 θ_i 의 함수로 계산한 결과입니다. 결과에서 보드시피, r_{TE} 는 θ_i 와 관계 없이 항상 음수이고, r_{TM} 는 $\theta_i = \theta_B$ 를 전후로, 부호가 음에서 양으로 바뀝니다. 반사 계수가 음수라는 것의 물리적 의미는, 입사광과 투과광의 전기장 위상이 180° 바뀐다는 뜻입니다 (즉, $\Delta\Phi = \pi$). 따라서 이 경우, TE 편광된 입사광은 항상 위상이 뒤집힌 반사광을 동반합니다. TM 편광은 반사 계수가 0이 되는 지점을 전후로 위상이 바로 섭니다. 투과광의 경우, 상대적으로 편광 방식에 상관 없이, 항상 양의 값을 보이고, 투과 계수가 θ_i 에 반비례하는 모습을 보여 줍니다. 따라서 이 경우, 투과광은 입사광과 항상 같은 위상을 항상 갖습니다. 그림 2.9의 아래 패널은 투과 및 반사 계수를 기반으로, 같은 경우에 대해, 프레넬 반사도 및 투과도를 계산한 결과입니다.

다음으로 $n_2 < n_1$ 인 경우를 생각해 봅시다. 앞서 살펴 보았듯, 이 경우는 전반사 조건에 해당합니다. 프레넬 모형에 따라 반사 계수를 계산한 결과를 그림 2.10에 보였습니다. 그림 1.11에는 같은 경우에 대해, 프레넬 반사도 및 투과도를 계산한 결과를 보였습니다. 그림 1.10에서 보드시피, $n_2 > n_1$ 인 경우에 비해, 반사 계수는 훨씬 복잡한 양상이 나타납니다.

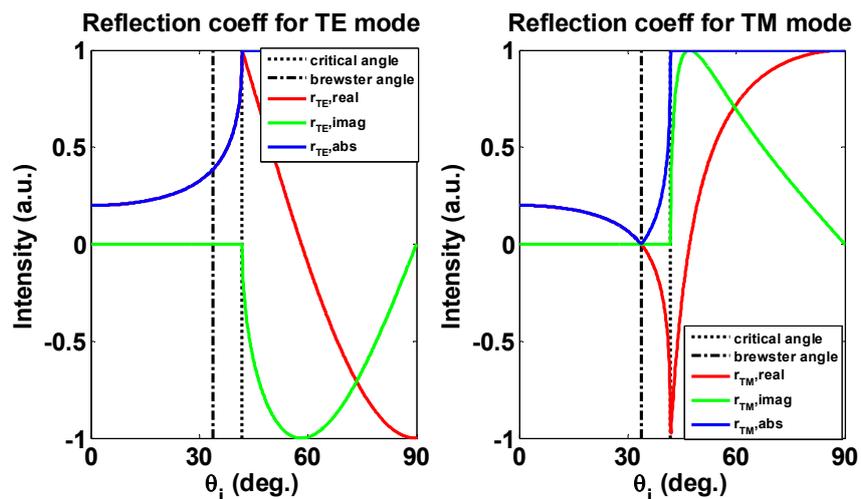


그림 1.10. $n_1 = 1.5, n_2 = 1$ 인 경우, TE, TM 편광된 입사광의 프레넬 반사 계수

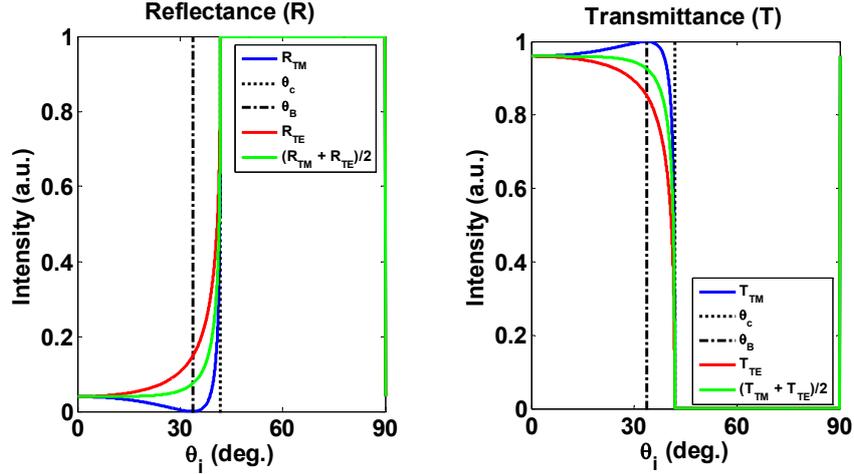


그림 1.11. $n_1 = 1.5$, $n_2 = 1$ 인 경우, TE, TM 편광된 입사광의 프레넬 반사도 및 투과도

그 이유는 반사 계수가 복소수가 될 수도 있기 때문입니다. 특히, 입사각이 임계각보다 커질 경우 (즉, $\sin \theta_i > n$), r_{TE} 는 아래와 같이 표현할 수 있습니다 (방정식 (1.15) 참조).

$$r_{TE} = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}} = \frac{\cos \theta_i - j\sqrt{\sin^2 \theta_i - n^2}}{\cos \theta_i + j\sqrt{\sin^2 \theta_i - n^2}}, \quad n \equiv \frac{n_2}{n_1}. \quad (1.20)$$

방정식 (1.20)에서 보듯이, r_{TE} 값은 복소수 값을 갖습니다. 복소수 반사 계수는 물리적으로 어떤 의미 일까요? 앞서 보았듯, r 값이 실수라면, 부호가 음인지 여부는 위상이 180° 바뀌는지 여부를 의미한다는 것을 기억할 것입니다. 하지만, 허수부가 0이 아니라면, 실수부의 부호뿐만 아니라, 허수부의 값으로 인해 반사광의 위상은 0° 과 180° 사이의 임의의 값 Φ_{TE} 을 가지며 **연속적으로** 변할 수 있습니다. 이를 더 자세하게 계산해 봅시다. 아래와 같은 수학적 장치를 활용해 봅시다.

$$\begin{aligned} r_{TE} &= \frac{\alpha - j\beta}{\alpha + j\beta} = \frac{\cos \theta_i - j\sqrt{\sin^2 \theta_i - n^2}}{\cos \theta_i + j\sqrt{\sin^2 \theta_i - n^2}}, \quad \alpha = \cos \theta_i, \quad \beta = \sqrt{\sin^2 \theta_i - n^2} \\ r_{TE} &\equiv \frac{\cos \psi - j \sin \psi}{\cos \psi + j \sin \psi} = \frac{\exp(-j\psi)}{\exp(j\psi)} = \exp(-2j\psi) = \exp(j\Phi_{TE}), \\ \rightarrow \tan \psi &= \tan\left(-\frac{\Phi_{TE}}{2}\right) = \frac{\sin \psi}{\cos \psi} = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{\sqrt{\sin^2 \theta_i - n^2}}{\cos \theta_i}, \\ \rightarrow \Phi_{TE} &= -2 \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{\sin^2 \theta_i - n^2}}{\cos \theta_i}\right). \end{aligned} \quad (1.21)$$

방정식 (1.21)과 비슷한 과정을 거쳐서, TM 편광에 대해서도 위상 변화 Φ_{TM} 를 아래와 같이 발견할 수 있습니다.

$$\Phi_{TM} = \pi - 2 \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{\sin^2 \theta_i - n^2}}{n^2 \cos \theta_i} \right). \quad (1.22)$$

방정식 (1.21)과 (1.22)을 이용하여, TE와 TM 편광에서의 입사광-반사광 위상차를 계산해 봅시다. 그림 1.10에 나타낸 바와 같이, TE 편광은 $\theta_i > \theta_c$ 인 조건에서, 위상이 점점 증가하여 마침내 $\theta_i = 90^\circ$ 가 되었을 때, 180° 로 뒤집힙니다. 이와는 반대로, TM 편광의 입사광은 일단 $\theta_i > \theta_B$ 가 되면 위상이 바로 180° 로 바뀌고, θ_i 가 더 증가하여 $\theta_i > \theta_c$ 가 되면 위상이 180° 부터 점차 감소하여, 마침내 $\theta_i = 90^\circ$ 가 되면 0° 도가 됩니다. 흥미로운 것은 위상차, 즉 $\Phi_{TM} - \Phi_{TE}$ 의 변화인데, $\theta_i > \theta_c$ 인 영역에서, 180° 부터 점차 감소하다가, 극소점을 지나, 다시 180° 로 돌아오는 양상입니다.

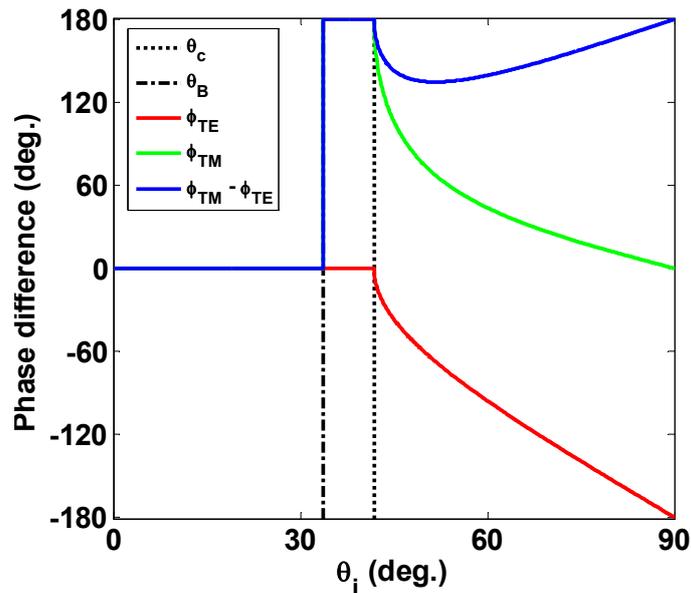


그림 1.12. $n_1 = 1.5, n_2 = 1$ 인 경우, 프레넬 반사에 의한 TE, TM 편광된 입사광-반사광의 위상차

이러한 성질을 이용해서 재미있는 광학 장치를 만들 수도 있습니다. 예를 들어 **프레넬 (평행사변형) 프리즘 (Fresnel rhomb)**을 생각해 볼 수 있습니다. 그림 1.13에는 프레넬 프

리즘이 어떤 모양인지 나타나 있습니다. 프레넬 프리즘을 만들기 위해서는, 공기보다 굴절률이 높은, 유리 같은 재료를 가지고, 그림 1.13 같이 특정한 각도를 가진 평행사변형을 설계해야 합니다. 이 각도는 TE와 TM 편광된 입사광의 반사광 위상차를 $3\pi/4$ 가 되도록 만드는 입사각에 해당합니다. 예를 들어, 그림 2.12에 나온 그래프 (파란선)에 따르면, 이러한 위상차를 이끌어 내는 입사각은 50.2° 혹은 53.3° 입니다. 이 각으로 전자기파가 프리즘에 들어 와서, 두 번의 내부 전반사를 거쳐, 프리즘을 빠져 나오면, TM과 TE 편광의 위상차는 $2 \times 3\pi/4 = 3\pi/2$ 가 됩니다. 이러한 위상차를 이용하려면, 애초 입사광이 TM과 TE 편광 성질을 동시에 가지고 있어야 합니다. 어떻게 만들 수 있을까요? 일단, 입사하는 전자기파를 선편광 (linear polarization)으로 만들어 입사시킵니다. 이 때, TE + TM 편광을 합친 효과를 내기 위해, 입사면에서 45° 로 배향된 선편광된 광원을 입사시킵니다. 45° 로 배향된 선편광은 $(LP_x + LP_y)$ 같은 선편광 벡터합으로 표시될 수 있습니다. 그러면 마치 TM 편광은 LP_x , 그리고 TE 편광은 LP_y 가 된 듯한 효과를 낼 수 있습니다. 두 번의 내부 전반사 후, TM+TE ($=LP_x + LP_y$) 편광되어 입사된 전자기파는 $LP_x - jLP_y$ 로 편광된 반사광이 되고, 이는 1장에서 살펴 본 것처럼, 원편광 (right circular polarization, RCP)에 해당합니다. 즉, 프레넬 프리즘은 전반사 효과를 이용한 선편광-원편광 변환 장치가 됩니다. 선편광 광원을 간단하게 원편광으로 바꿀 수 있는 것은 꽤 흥미롭고 유용한 개념입니다.

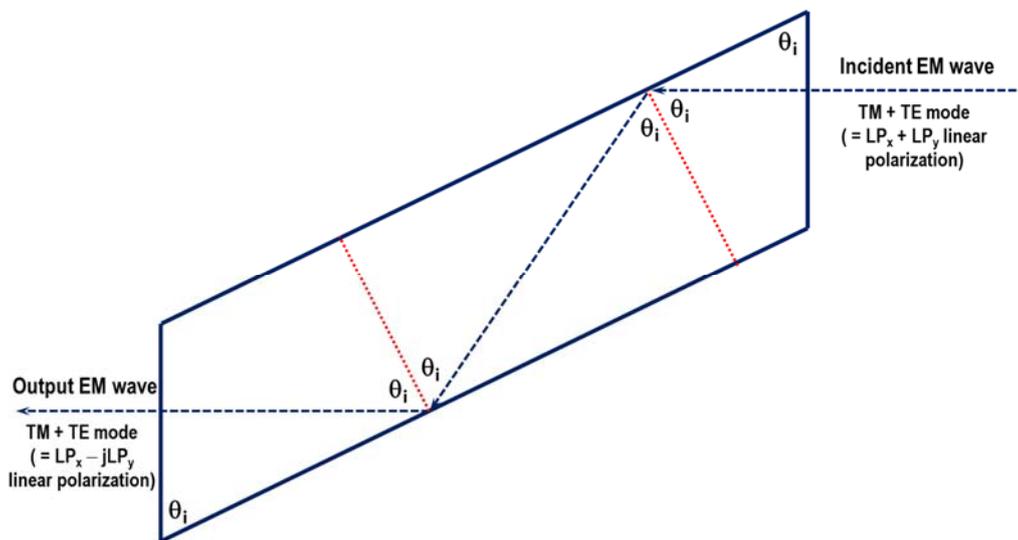


그림 1.13. 프레넬 프리즘의 개념도

마지막으로 금속 표면에서의 프레넬 반사 및 투과에 대해 알아 봅시다. 금속은 앞서 1장에서 살펴 보았듯, 가시광-근적외선 주파수 대역에서 대부분 복소수 형태의 유전 상수를 갖습니다. 따라서, 굴절률도 복소수 형태, $\tilde{n}_i = n_{iR} + jn_{iI}$ 를 갖습니다. 이를 고려하여, 방정식 (1.17)과 (1.20)을 참조하여, 다시 금속의 반사 계수를 표현해 봅시다. 그러면 아래와 같은 관계식을 찾을 수 있습니다 (입사 매질의 유전 상수는 실수로 가정).

$$\begin{aligned}
 r_{TE} &= \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\tilde{n}^2 - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\tilde{n}^2 - \sin^2 \theta_i}}, \quad \tilde{n} \equiv \frac{\tilde{n}_2}{n_1} \\
 r_{TM} &= \frac{\tilde{n}^2 \cos \theta_i - \sqrt{\tilde{n}^2 - \sin^2 \theta_i}}{\tilde{n}^2 \cos \theta_i + \sqrt{\tilde{n}^2 - \sin^2 \theta_i}}, \\
 t_{TE} &= \frac{E_{0t}}{E_{0i}} = \frac{2 \cos \theta_i}{\cos \theta_i + \sqrt{\tilde{n}^2 - \sin^2 \theta_i}}, \\
 t_{TM} &= \frac{2 \tilde{n} \cos \theta_i}{\tilde{n}^2 \cos \theta_i + \sqrt{\tilde{n}^2 - \sin^2 \theta_i}}. \tag{1.23}
 \end{aligned}$$

이 때, 금속의 반사도는 $R = |r|^2 = r \cdot r^*$ 이므로 양의 실수로 계산되지만, 투과도는 $T = (t \cdot t^*) \sqrt{n_R^2 - n_I^2 + (2jn_R n_I) - \sin^2 \theta_i} / \cos \theta_i$ 로 표현되기 때문에 복소수가 되어, 양의 실수로 정의할 수 없습니다. 그림 1.14에는 539 nm 파장의 외부 입사광이 금속성 갈륨 (Ga, $\tilde{n} = 3.7 + j5.4$)에 입사되었을 때, 입사각에 따른 반사도를 계산한 결과를 보여 줍니다.

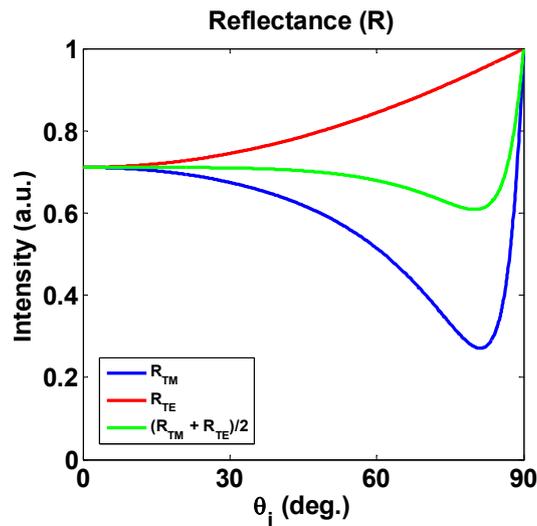


그림 1.14. 539 nm 파장의 TE, TM 편광된 입사 전자기파의 금속 갈륨 (Ga)으로부터의 반사도

입사각이 $\theta_i = 0$ 인 경우에는 편광 방식에 상관 없이, 금속의 반사 계수와 반사도는 아래와 같이 단순하게 표현할 수 있습니다.

$$r = \frac{1 - (n_R - jn_I)}{1 + (n_R - jn_I)}, R = \frac{(n_R - 1)^2 + n_I^2}{(n_R + 1)^2 + n_I^2}. \quad (1.24)$$

1.4. 맺음말

이번 장에서는 전자기파가 서로 광학적 성질이 다른 두 매질의 계면에서 어떻게 행동하는지에 대해 알아 보았습니다. 먼저 전자기파의 계면에서의 경계 조건에 대해 공부했고, 반사와 굴절, 투과에 대해 배웠으며, 그로부터 반사의 법칙, 스넬의 법칙을 유도했습니다. 전반사와 감쇠파, 그리고 투과 깊이에 대한 개념을 공부하였으며, 프레넬 반사 및 투과 계수, 반사도 및 투과도에 대한 모형을 공부했습니다. 이로부터 프레넬 프리즘 같은 장치의 원리를 익혔고, 복소수 유전상수를 갖는 금속의 반사도 모형에 대해서도 공부했습니다. 이번 회차에서는 계면이 주인공이었기 때문에, 두 매질의 두께는 무한하다고 가정하고 모형을 유도했습니다. 실제 현장에서는 박막 (thin film) 등이 많이 활용되고, 각종 패턴과 기하학적 나노-마이크로 구조체가 사용되기 때문에, 2장에서 배운 모형은 더욱 정교하고 수정되어서 정밀한 모형으로 탈바꿈할 것입니다. 다음 회차에서는 이러한 기하학적 형태를 고려하여 어떤 특성이 나올 수 있고, 그것을 어떻게 응용할 수 있을지에 대해 더 깊게 공부하도록 하겠습니다.