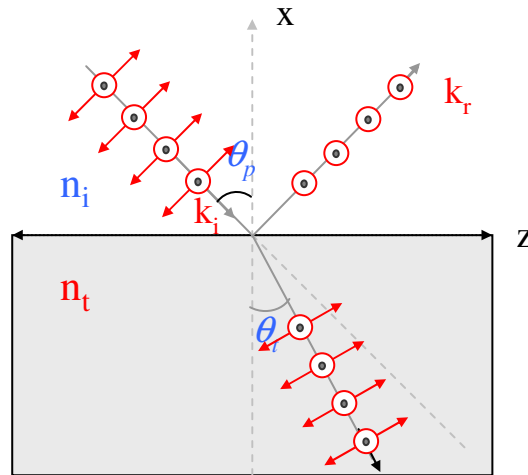


7. Ders

Fresnel Eşitlikleri



Bu bölümü bitirdiğinizde,

- Geliş düzlemi,
- s- ve p-kutuplu ışık,
- Fresnel katsayıları,
- Kutuplanma (Brewster) açısı,
- Yansıma ve geçirme katsayıları

konularında bilgi sahibi olacaksınız.

Bu bölümün önemi,

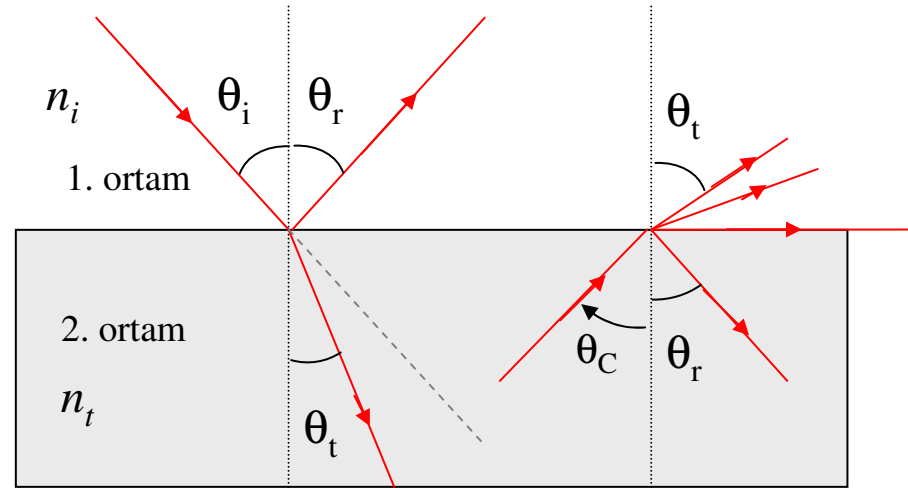
- Geometrik optik ara yüzeye gelen ışığın birinci ve ikinci ortama geçişini başarılı bir şekilde açıklamasına rağmen, yansıyan ve geçen ışığın yüzdeleri konusunda bir bilgi vermez,
- Ara yüzeyde ışığın davranışı dalga özeliğinden dolayı kutuplanması ile yakından ilgilidir,
- Işığın ara yüzeydeki davranışına dayanan bir çok optoelektronik uygulama vardır. Bunlar yansıma önleyici camlar, aynalar, filtrelerdir.

Yedinci Ders: İçerik

- Ara Yüzeyde Maxwell Denklemleri
- Fresnel Eşitlikleri
- Yansıtma Katsayısı
- Geçirme Katsayısı

Geometrik Optik-Özet

Kırılma indisleri farklı olan ortamların ara yüzeyinde ışığın davranışı nasıl olur?



Geometrik optik bilgilerimizden

Yansıma Yasası

$$\theta_i = \theta_r$$

Snell Yasası

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$$

İç Yansıma

$$\theta_C = \sin^{-1}(n_i/n_t)$$

Gelen ışığın ne kadarı yüzeyden geri yansır, ne kadarı 2. ortama geçer?

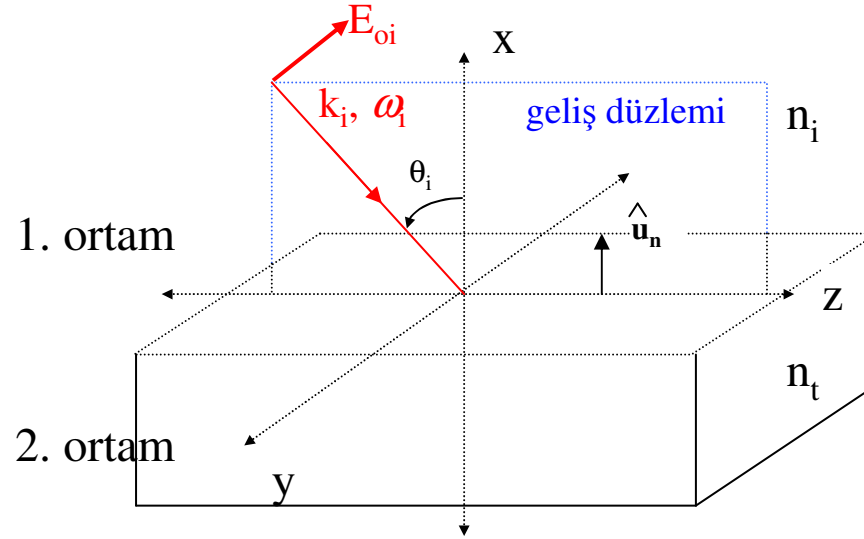
Işığın dalga özelliklerini kullanarak ışığın farklı kırılma indisine sahip ortam ara yüzeyindeki davranışını inceleyelim.

Geliş Düzlemi

Geliş düzlemi tanımı yapılarak ışığın, yüzeye göre kutuplanma doğrultusunu tanımlayabiliriz.

yz düzleminin, kırılma indisleri n_i ve n_t olan iki ortamı ayıran ara yüzey olduğunu kabul edelim.

Yüzey normaline θ_i açısı ile gelen bir elektromanyetik dalgayı (ışığı) düşünelim.



k_i = gelen ışığın dalga vektörü,

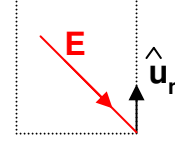
ω_i = ışığın açısal frekansı

E_{oi} = gelen ışığın genliği

k_i , ω_i ve E_{oi} değerlerini bildiğimizi kabul edelim.

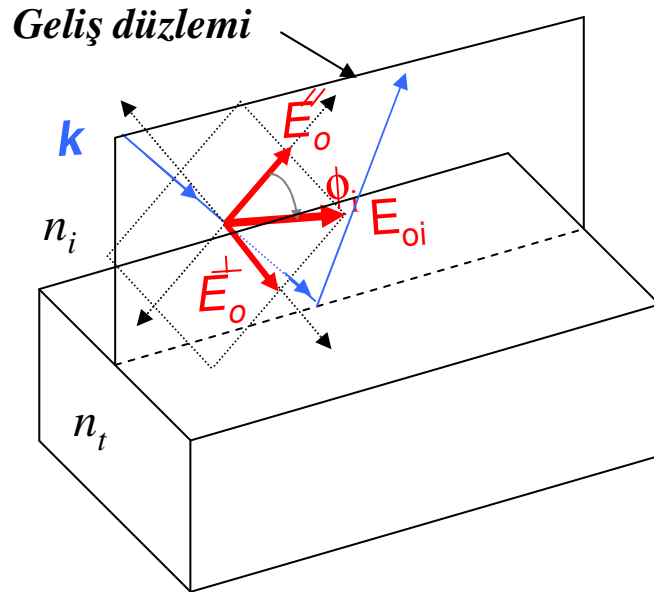
Geliş Düzlemi-2

Geliş Düzlemi: k_i ve düzlem normal vektörü \mathbf{u}_n ile tanımlanan düzlemdir.



E_i alanının yönelimi ϕ_i : Geliş düzlemi ile elektrik alan E_o 'nin yaptığı açı

Yüze gelen ışığın kutuplanma doğrultusu geliş düzlemine göre tanımlanabilir.



Herhangi bir doğrultuda olan alan genliği;
1-Geliş düzlemine paralel E_{oi}''
2-Geliş düzlemine dik bileşenlere E_{oi}^\perp
ayrılabilir

Alan genliği:

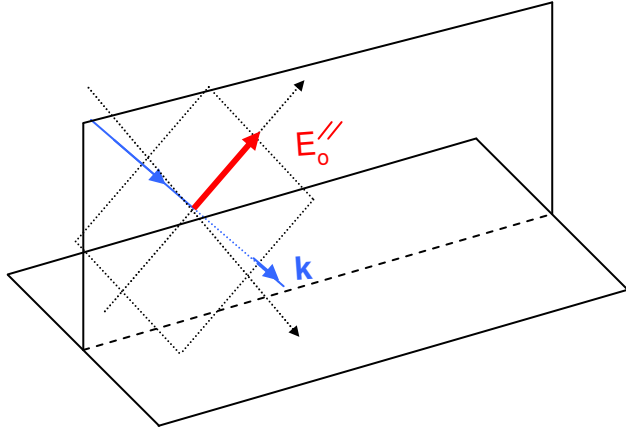
$$|\vec{E}_{oi}| = \sqrt{(E_{oi}'')^2 + (E_{oi}^\perp)^2}$$

Alanın geliş düzlemi ile yaptığı açı:

$$\tan \phi_i = \frac{E_{oi}^\perp}{E_{oi}''}$$

s- ve p-Kutuplu Işık

Durum-I: p-kutuplanması (alan vektörü (\mathbf{E}) geliş düzlemine paralel)

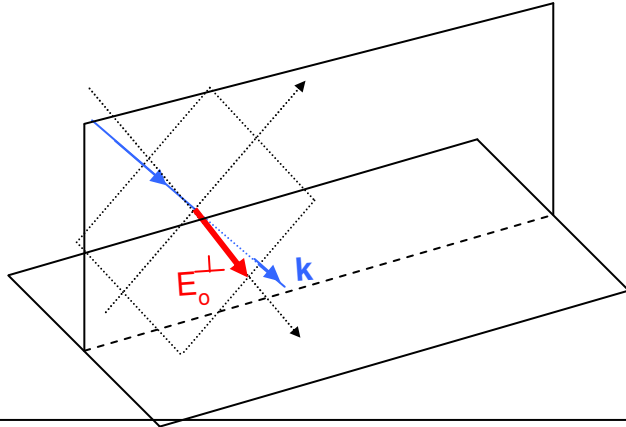


$$(E''_{oi} \neq 0, E^{\perp}_{oi} = 0)$$

$$E_o^p = E''_{oi}$$

Transverse Magnetic (TM Kutuplanması)

Durum-II: s-kutuplanması (alan vektörü (\mathbf{E}) geliş düzlemine dik)



$$(E''_{oi} = 0, E^{\perp}_{oi} \neq 0)$$

$$E_o^s = E^{\perp}_{oi}$$

Transverse Electric (TE Kutuplanması)

Geliş düzlemi ile herhangi bir açıda olan elektrik alan her zaman s- ve p- bileşenleri cinsinden ifade edilebileceği için gelen ışığın bütün durumları sadece s ve p-kutuplu ışık ile verilebilir.

$$\vec{E}_o = a\vec{E}_o^s + b\vec{E}_o^p$$

Fresnel Eşitlikleri

Geliş düzlemi ve olası kutuplanma doğrultularını tanımladıktan sonra ışığın ara yüzeydeki davranışı incelenebilir.

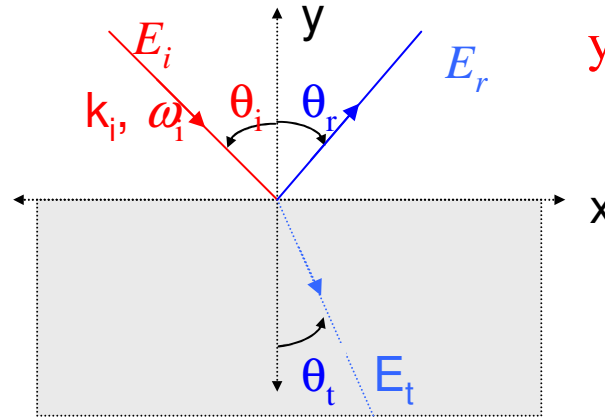
Ara yüzeye gelen (E_i), yansıyan (E_r) ve geçen ışık (E_t) için elektrik alan vektörleri:

$$\vec{E}_i = \vec{E}_{oi} e^{i(\vec{k}_i \cdot \vec{r} - \omega_i t)}$$

gelen ışık

$$\vec{E}_r = \vec{E}_{or} e^{i(\vec{k}_r \cdot \vec{r} - \omega_r t + \phi_r)}$$

yansıyan ışık



$$\vec{E}_t = \vec{E}_{ot} e^{i(\vec{k}_t \cdot \vec{r} - \omega_t t + \phi_t)}$$

geçen ışık

Analizi genelleştirmek için 1. ve 2. ortamdaki ışığın frekansı farklı olarak yazıldı. Doğrusal ortamda frekans değişmeyeceği için $\omega_i = \omega_t$ olacaktır ama en genel olarak doğrusal olmayan ortamda frekansların farklı olacağı söylenebilir.

Fresnel Eşitlikleri-2

E_r ve E_t alanlarını nasıl bulabiliriz?

Sınır değerlerden E_r ve E_t 'nin değerlerini bulabiliriz.

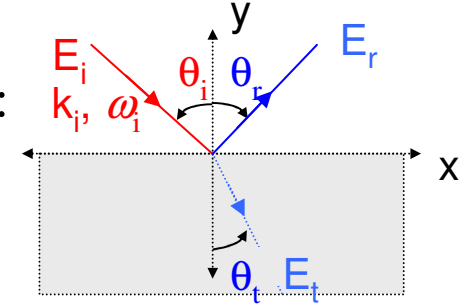
Elektromanyetik dalga için sınır değer koşulları:

- 1) Elektrik alanın E teğetsel bileşenleri iki ortamın sınırı boyunca süreklidir.
- 2) D manyetik akının normal bileşenleri iki ortamın sınırı boyunca süreklidir.
- 3) Manyetik alanın H teğetsel bileşenleri iki ortamın sınırı boyunca süreklidir.
- 4) B manyetik akının normal bileşeni iki ortamın sınırı boyunca süreklidir.

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \text{ve} \quad \vec{B} = \mu \vec{H}$$

Fresnel Eşitlikleri-3

Yukarıdaki şartları matematiksel olarak ifade etmeye çalışırsak:



Elektrik alanın sürekliliğinden

$$1) \quad \left[(\vec{E}_i + \vec{E}_r)_{y=0} \right]_{tegetsel} = \left[(\vec{E}_t)_{y=0} \right]_{tegetsel}$$

$$2) \quad \left[\epsilon_i (\vec{E}_i + \vec{E}_r)_{y=0} \right]_{normal} = \left[\epsilon_t (\vec{E}_t)_{y=0} \right]_{normal}$$

Manyetik alanın sürekliliğinden

$$3) \quad \left[\frac{1}{\mu_i} (\vec{B}_i + \vec{B}_r)_{y=0} \right]_{tegetsel} = \left[\frac{1}{\mu_t} (\vec{B}_t)_{y=0} \right]_{tegetsel}$$

$$4) \quad \left[(\vec{B}_i + \vec{B}_r)_{y=0} \right]_{normal} = \left[(\vec{B}_t)_{y=0} \right]_{normal}$$

Fresnel Eşitlikleri-4

\mathbf{E} ve \mathbf{H} alanlarını birbirleri cinsinden ifade edersek

$$\vec{\mathbf{H}} = \frac{1}{\mu_o} |\vec{\mathbf{B}}| = \frac{n}{c} |\vec{\mathbf{E}}|$$

v_m = ışığın madde içindeki hızı, n =kırılma indisi

$$\mu_i = \mu_r = \mu_t = \mu_o \quad \text{Ortamlar manyetik olmadığından (kabul ediyoruz)}$$

Yukarıdaki 3 ve 4 nolu denklemler yeniden yazılabilir:

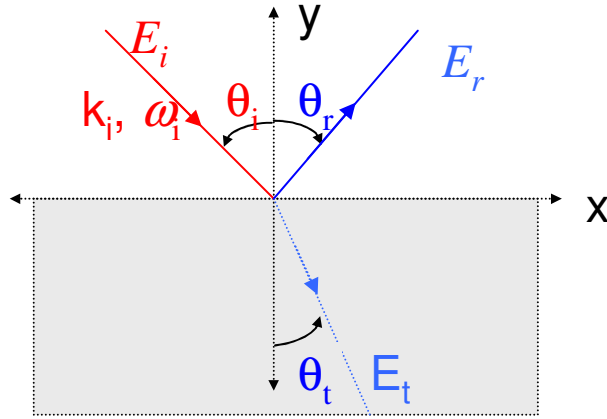
$$3) \quad \left[\frac{n_i}{c\mu_o} (\vec{\mathbf{E}}_i + \vec{\mathbf{E}}_r)_{y=0} \right]_{tegetsel} = \left[\frac{n_t}{c\mu_o} (\vec{\mathbf{E}}_t)_{y=0} \right]_{tegetsel}$$

$$4) \quad \left[\frac{n_i}{c} (\vec{\mathbf{E}}_i + \vec{\mathbf{E}}_r)_{y=0} \right]_{normal} = \left[\frac{n_t}{c} (\vec{\mathbf{E}}_t)_{y=0} \right]_{normal}$$

Fresnel Eşitlikleri-5

Ara yüzeyde gelen, geçen ve yansıyan dalgaların sınır şartlarını sağlanması gerekir.

Işık dalgası ifadesinde hem genlik hem de faz terimi olduğundan ara yüzeyde dalgaların sınır koşullarının her iki terimi de aynı anda sağlaması gerekir.



$$\vec{E}_i = \vec{E}_{oi} e^{i(\vec{k}_i \cdot \vec{r} - \omega_i t)}$$

gelen ışık

$$\vec{E}_r = \vec{E}_{or} e^{i(\vec{k}_r \cdot \vec{r} - \omega_r t + \phi_r)}$$

yansıyan ışık

$$\vec{E}_t = \vec{E}_{ot} e^{i(\vec{k}_t \cdot \vec{r} - \omega_t t + \phi_t)}$$

geçen ışık

Ara yüzeyde dalgaların sağlayacağı

Faz koşulu, geometrik optiğin sonuçlarını, yansıma ve kırılma (**Snell Yasası**)

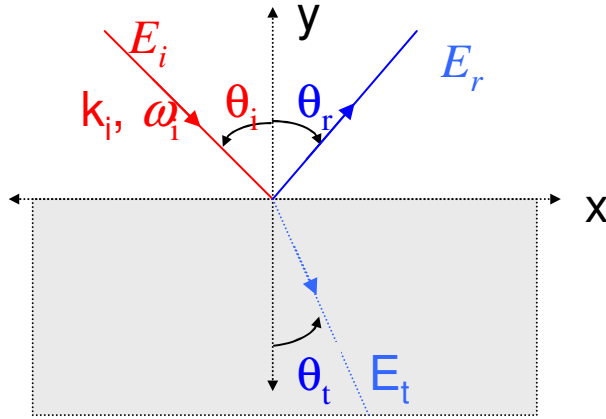
Genlik koşulu ise ortamlardaki enerji dağılımı (**Fresnel Eşitlikleri**)

bilgisini verir.

İlk yapılacak iş, faz eşleme koşulundan geometrik optiğin sonuçlarını türetmek, daha sonraki iş ise genlik eşlemesi koşulundan Fresnel katsayıları bulmaktır. ¹³

Faz Eşlemesi-1

Faz eşleme şartından ($y=0$ da gelen, yansıyan ve geçen dalganın fazları eşit olacağından)



$$\vec{E}_i = \vec{E}_{oi} e^{i(\vec{k}_i \cdot \vec{r} - \omega_i t)} \quad \text{gelen ışık}$$

$$\vec{E}_r = \vec{E}_{or} e^{i(\vec{k}_r \cdot \vec{r} - \omega_r t + \phi_r)} \quad \text{yansıyan ışık}$$

$$\vec{E}_t = \vec{E}_{ot} e^{i(\vec{k}_t \cdot \vec{r} - \omega_t t + \phi_t)} \quad \text{geçen ışık}$$

$$(\vec{E}_i + \vec{E}_r)_{y=0} = (\vec{E}_t)_{y=0}$$

Eşitliğin sağlanması için üstel ifadelerin eşit olması gerekmektedir.

$$(k_i \cdot r - \omega_i t)_{y=0} = (k_r \cdot r - \omega_r t + \phi_r)_{y=0} = (k_t \cdot r - \omega_t t + \phi_t)_{y=0}$$

Bu ifadenin önce zaman terimlerinin eşitliğine bakalım:

$$\omega_i = \omega_r = \omega_t = \omega \quad (\text{doğrusal ortam olduğu için frekans her ortamda aynı}) \quad 14$$

Faz Eşlemesi-2

$$(\vec{k}_i \cdot \vec{r} - \omega t)_{y=0} = (\vec{k}_r \cdot \vec{r} - \omega t + \phi_r)_{y=0} = (\vec{k}_t \cdot \vec{r} - \omega t + \phi_t)_{y=0}$$

Faz ifadesinin uzaysal kısmı-(Gelen ve Yansıyan Işık)

$$(\vec{k}_i \cdot \vec{r})_{y=0} = (\vec{k}_r \cdot \vec{r} + \phi_r)_{y=0} \Rightarrow [(\vec{k}_i - \vec{k}_r) \cdot \vec{r}]_{y=0} = \phi_r$$

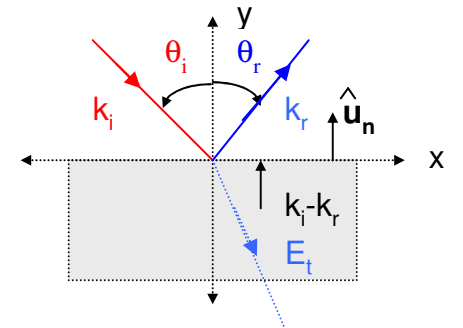
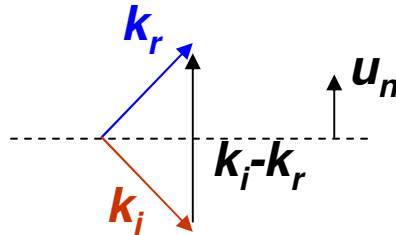
$$(k_i - k_r)_x \cdot x + (k_i - k_r)_z \cdot z = \phi_r$$

$$(k_i - k_r)_x = \text{sabit} = \alpha$$

$$(k_i - k_r)_z = \text{sabit} = \gamma$$

$$\alpha x + \gamma z = \phi_r$$

- $(\vec{k}_i - \vec{k}_r) = \Delta \vec{k}$ ara yüzeye diktir
- Dalga vektörü k nın büyüklüğü $|k| = 2\pi/\lambda$ dir. \mathbf{k}_i ve \mathbf{k}_r aynı ortamda olduğu için $|\mathbf{k}_i| = |\mathbf{k}_r|$
- \mathbf{u}_n birim vektörü x-z düzlemine dik olduğundan $(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_r)$, \mathbf{u}_n 'e paraleldir.



Faz Eşlemesi-3

Yüzey normali (\mathbf{u}_n) ve dalga vektörü $(\vec{k}_i - \vec{k}_r) = \Delta\vec{k}$ birbirine paralel olduğundan:

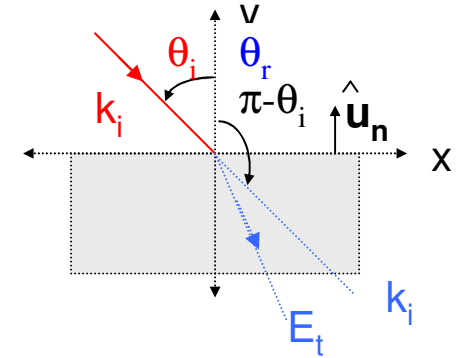
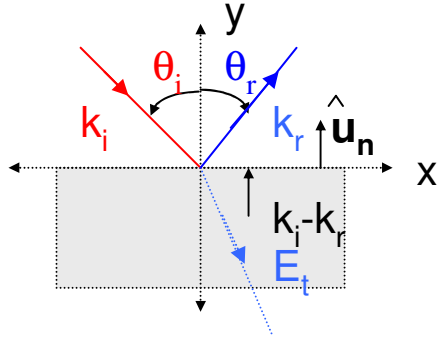
$$\hat{\mathbf{u}}_n \times (\vec{k}_i - \vec{k}_r) = 0$$

$$\hat{\mathbf{u}}_n \times \vec{k}_i = \hat{\mathbf{u}}_n \times \vec{k}_r$$

$$|\hat{\mathbf{u}}_n| \cdot |\vec{k}_i| \sin(\pi - \theta_i) = |\hat{\mathbf{u}}_n| \cdot |\vec{k}_r| \sin(\theta_r)$$

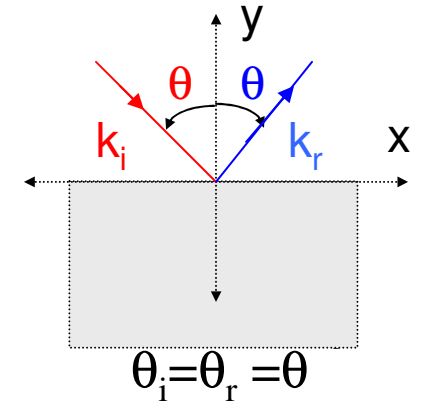
$$\sin(\pi - \theta_i) = \sin(\theta_r)$$

$$\sin(\pi - \theta_i) = \sin(\theta_r)$$



$$\sin(\theta_i) = \sin(\theta_r) \Rightarrow \theta_i = \theta_r \quad \text{Yansıma Kanunu}$$

Gelen ve yansıyan dalgaların ara yüzeyde sağlaması gereken faz koşulu, yansıma kanununu verdi. Bu sonuç, ara yüzeye gelen dalganın geliş açısı ile aynı açıda yüzeyden yansıyacağını, gelen ve yansıyan dalganın aynı düzlemde (geliş düzlemi) olacağını söylemektedir.



Faz Eşleşmesi-4

Faz ifadesinin uzaysal kısmı-(Gelen ve Geçen Işık)

$$(\vec{k}_i \cdot \vec{r})_{y=0} = (\vec{k}_t \cdot \vec{r} + \phi_t)_{y=0} \quad \Rightarrow \quad [(\vec{k}_i - \vec{k}_t) \cdot \vec{r}]_{y=0} = \phi_t$$

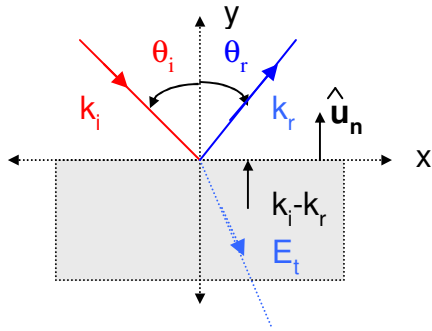
Yüzey normali (\vec{u}_n) ve dalga vektörü $(\vec{k}_i - \vec{k}_t) = \Delta\vec{k}$ birbirine paralel olduğundan

$$\hat{u}_n \times (\vec{k}_i - \vec{k}_t) = 0$$

$$\hat{u}_n \times \vec{k}_i = \hat{u}_n \times \vec{k}_t$$

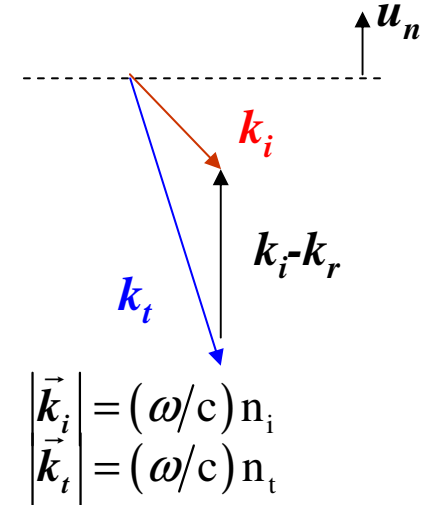
$$|\hat{u}_n| \cdot |\vec{k}_i| \sin(\pi - \theta_i) = |\hat{u}_n| \cdot |\vec{k}_t| \sin(\theta_t)$$

$$|\vec{k}_i| \sin(\theta_i) = |\vec{k}_t| \sin(\theta_t)$$



$$\boxed{\sin(\pi - \theta_i) = \sin(\theta_i)}$$

Ortamlar farklı olduğundan $|\vec{k}_i| \neq |\vec{k}_t|$

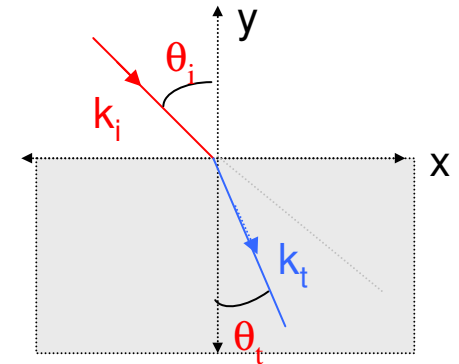


$$\begin{aligned} |\vec{k}_i| &= (\omega/c) n_i \\ |\vec{k}_t| &= (\omega/c) n_t \end{aligned}$$

$$\frac{\omega}{c} n_i \sin(\theta_i) = \frac{\omega}{c} n_t \sin(\theta_t) \quad \Rightarrow$$

$$\boxed{n_i \sin(\theta_i) = n_t \sin(\theta_t) \quad \text{Snell Yasası}}$$

Gelen ve ikinci ortama geçen dalgaların ara yüzeyde sağlaması gereken faz koşulu, Snell kanununu verdi. Bu sonuç, ara yüzeye gelen dalganın ortamların kırılma indisi ile orantılı olarak ikinci ortamda kırılacağını ve aynı zamanda gelen ve kırılan dalganın aynı düzlemde (geniş düzlemi) olacağını söylemektedir.



Genlik Eşlemesi-1

Genliklerin Eşitliği Şartından

s-kutuplu ışık:

$$1) \quad (\vec{E}_{oi}^s + \vec{E}_{or}^s)_{tegets\text{el}} = (\vec{E}_{ot}^s)_{tegets\text{el}}$$

$$2) \quad \hat{u}_n \cdot (\epsilon_i \vec{E}_{oi}^s + \epsilon_r \vec{E}_{or}^s) = (\epsilon_t \vec{E}_{ot}^s) \cdot \hat{u}_n$$

(s-kutuplanmış dalgada hiç normal bileşen yoktur)

Bir denklem ve iki tane bilinmeyen var. Dolayısı ile bir denkleme, ki bu da manyetik alanı içeren denklem olacaktır, daha ihtiyacımız olacaktır.

(H alanının teğetsel bileşeni sürekli olacaktır)

$$3) \quad -\frac{B_{oi}^s}{\mu_i} \cos \theta_i + -\frac{B_{or}^s}{\mu_r} \cos \theta_r = -\frac{B_{ot}^s}{\mu_t} \cos \theta_t$$

Ortamlar manyetik olmadığı için $\mu_i = \mu_r = \mu_t = \mu_o$

$$\left| \frac{\vec{E}_{oi}}{|\vec{B}_{oi}|} \right| = v_i = \frac{c}{n_i} \Rightarrow B_{oi} = \frac{n_i}{c} |\vec{E}_{oi}|$$

$$3') \quad -E_{oi}^s n_i \cos \theta_i + E_{or}^s n_i \cos \theta_r = -E_{ot}^s n_t \cos \theta_t$$

$$\theta_i = \theta_r \text{ olduğundan} \Rightarrow \cos \theta_r = \cos \theta_i$$

Genlik Eşleşmesi-2

Yansıyan ışığın gelen ışığın genliğine oranı

$$\frac{E_{or}^s}{E_{oi}^s} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t}$$

Benzer işlemler gelen ve geçen ışık için de yapılırsa

$$\frac{E_{ot}^s}{E_{oi}^s} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad \text{elde edilir.}$$

p-kutuplu ışık:

Benzer işlemler gelen ve geçen ışık için de yapılırsa

$$r_p = \frac{E_{or}^p}{E_{oi}^p} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t}$$

$$t_p = \frac{E_{ot}^p}{E_{oi}^p} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t}$$

s- ve p-Kutuplu Işık-1

Fresnel Katsayılarının Tanımı:

Fresnel Katsayıları *s-* ve *p-kutuplu* ışık için yansıtma ve geçiş katsayılarını verir.

s-kutuplu ışık

$$r_s \equiv \frac{E_{or}^s}{E_{oi}^s} \quad \text{s-kutuplu ışık için yansıtma katsayısı}$$

$$t_s \equiv \frac{E_{ot}^s}{E_{oi}^s} \quad \text{s-kutuplu ışık için geçirme katsayısı}$$

p-kutuplu ışık

$$r_p \equiv \frac{E_{or}^p}{E_{oi}^p} \quad \text{p-kutuplu ışık için yansıtma katsayısı}$$

$$t_p \equiv \frac{E_{ot}^p}{E_{oi}^p} \quad \text{p-kutuplu ışık için geçirme katsayısı}$$

s- ve p-Kutuplu Işık-2

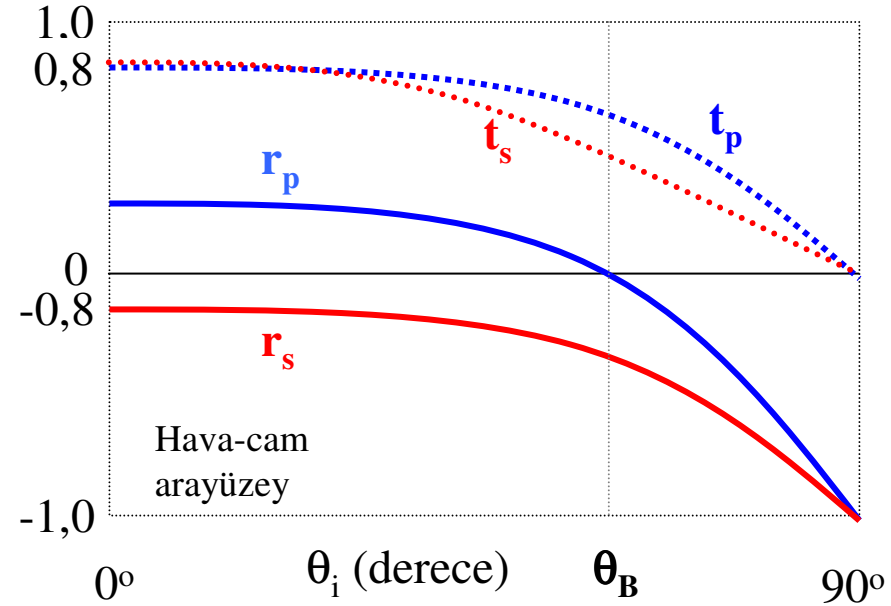
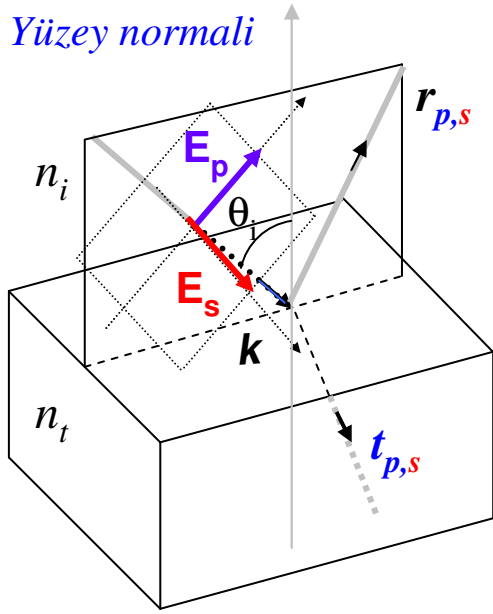
s-kutuplu ışık için Fresnel katsayıları:

$$r_s \equiv \frac{E_{or}^s}{E_{oi}^s} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t}$$
$$t_s \equiv \frac{E_{ot}^s}{E_{oi}^s} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i}$$

p-kutuplu ışık için Fresnel katsayıları:

$$r_p \equiv \frac{E_{or}^p}{E_{oi}^p} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t}$$
$$t_p \equiv \frac{E_{ot}^p}{E_{oi}^p} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t}$$

Fresnel Katsayıları



$$r_s = \frac{E_{or}^s}{E_{oi}^s} \quad t_s = \frac{E_{ot}^s}{E_{oi}^s}$$

s-kutuplu ışık

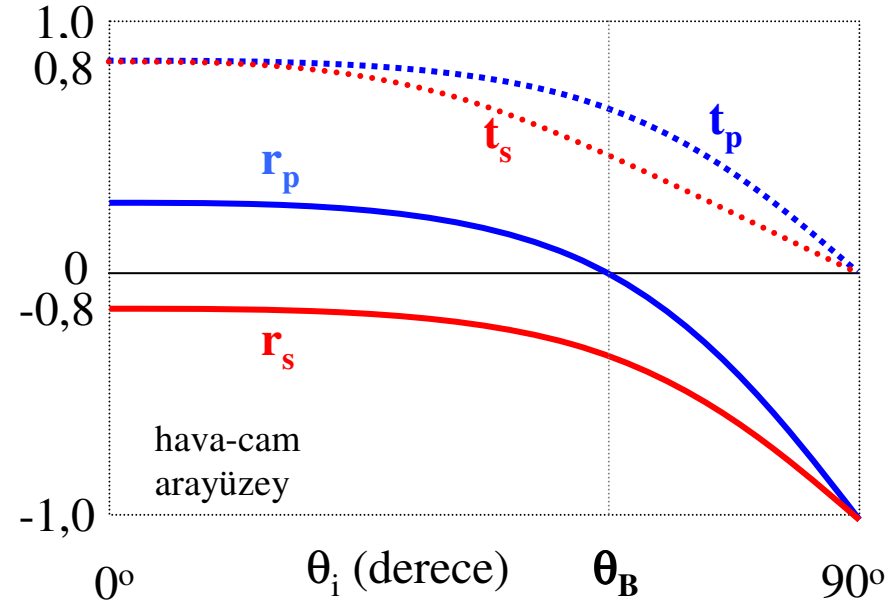
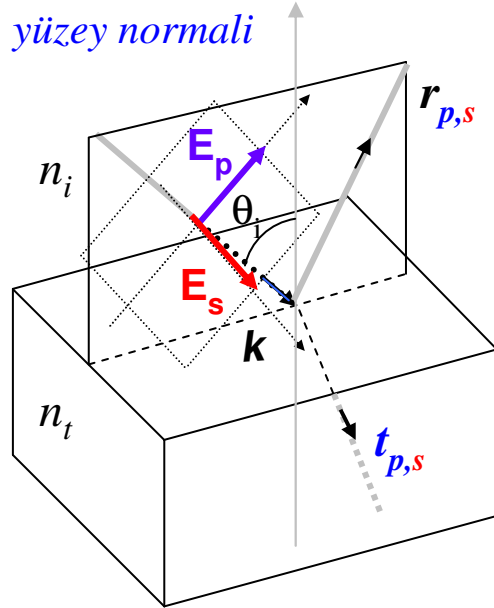
$$r_p = \frac{E_{or}^p}{E_{oi}^p} \quad t_p = \frac{E_{ot}^p}{E_{oi}^p}$$

p-kutuplu ışık

Hava-cam ara yüzeyi için Fresnel katsayıları geliş açısına göre grafiğe geçirilmiştir. Bu grafik, yansıyan ve geçen ışığın genlikleri, aynı zamanda kutuplanma doğrultuları hakkında bilgi vermektedir. s- ve p-kutuplu ışık için bu grafiği yakından inceleyelim.

s-Kutuplu Işık-1

s-kutuplu ışık (dış yansıma ($n_i < n_t$):



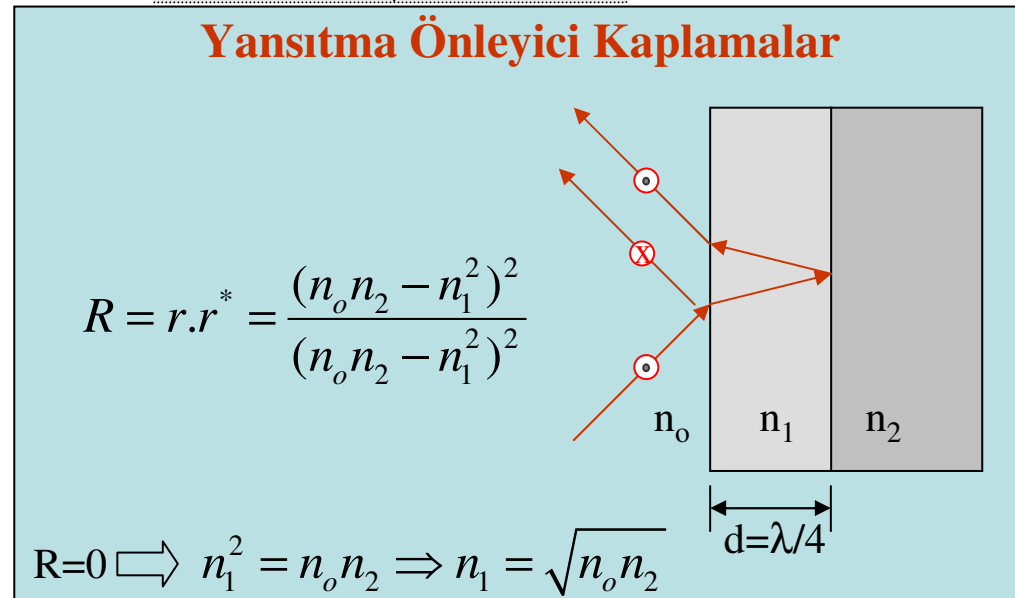
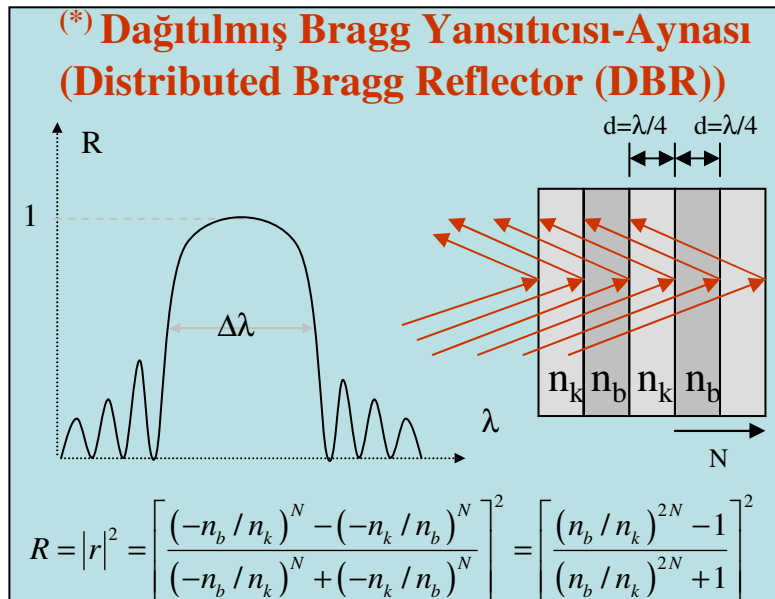
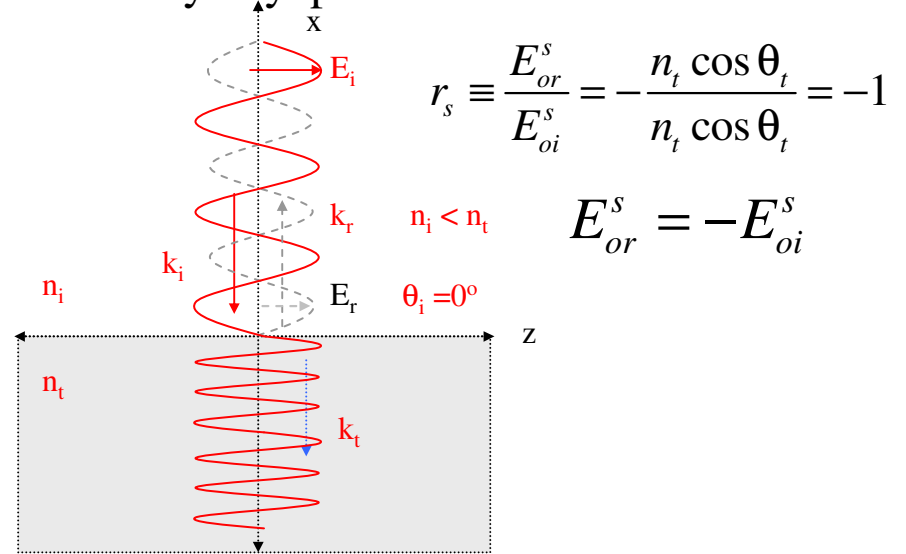
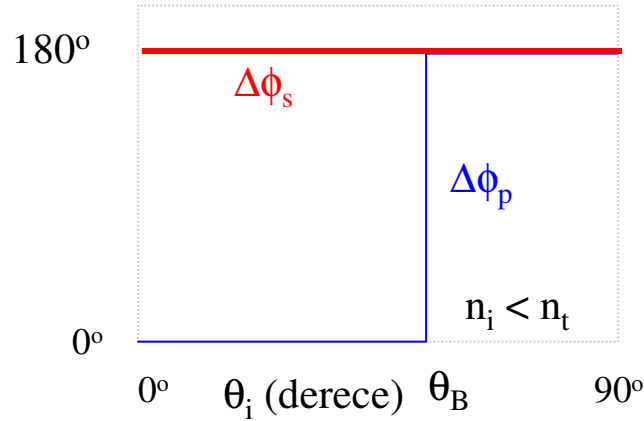
- r_s değeri (yansıyan ışığın genliğinin gelen ışığın genliğine oranı) $n_t > n_i$ olduğunda $\theta_i > \theta_t$ dir ve bütün θ_i değerleri için negatiftir.
- Negatif değer, gelen ve yansıyan ışık arasında 180° 'lik faz farkının oluşacağını, dolayısı ile yüzeyden yansıyan ışık ile gelen ışık arasında her zaman 180° faz farkı olacağını göstermektedir.

$$r_s \equiv \frac{E_{or}^s}{E_{oi}^s} = -\frac{n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i} = -1 \quad \Rightarrow \quad E_{or}^s = -E_{oi}^s$$

- t_s değeri ise bütün geliş açısı değerlerinde hep pozitiftir (gelen ve ikinci ortama geçen ışığın kutuplanma doğrultusu hep aynıdır), $\theta_i=90^\circ$ değerinde ise sıfır olur.

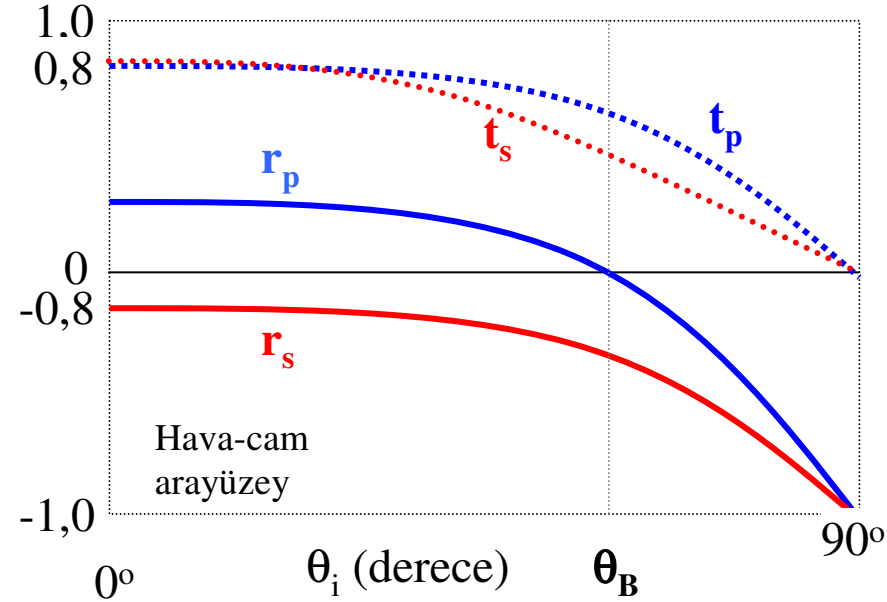
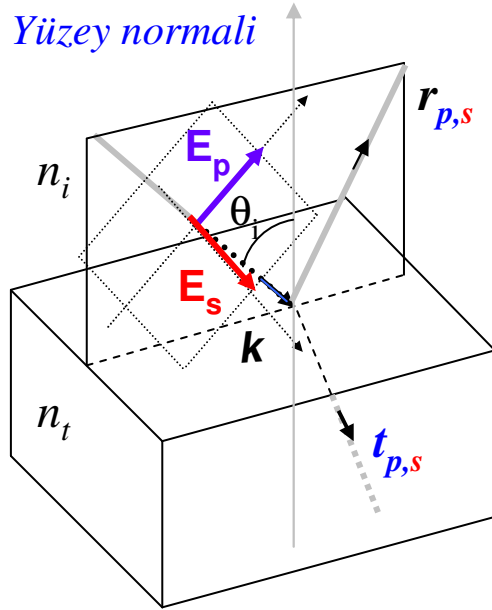
s-Kutuplu Işık-2

r_s katsayısı, geliş açısının bütün değerlerinde negatif olduğundan, s-kutuplanmış ışığın gelen ve yansıyan bileşenleri arasında her zaman 180° faz farkı vardır. Bu özellik optoelektronik teknolojisinde yansıtma önleyici kaplamalarda ve DBR^(*) ayna yapımında kullanılmaktadır.



p-Kutuplu Işık-1

p-kutuplu ışık (dış yansıma ($n_i < n_t$):



- r_p değeri, $n_t > n_i$ olduğunda $\theta_i=0^\circ$ da pozitif bir değerden başlayarak yavaşça azalır; özel bir geliş açısında (θ_B) sıfır olduktan sonra negatif değer alır ve $\theta_i=90^\circ$ da sıfıra eşit olur
- Bu özel açı değerine (θ_B) **Brewster Açısı** veya **Kutuplanma Açısı** denir. Bu özel açı değerinde $r_p=0$ olduğundan yansıyan ışığın bileşeni bulunmayacaktır.

$$r_p \equiv E_{or}^p / E_{oi}^p = 0 \Rightarrow E_{or}^p = 0$$

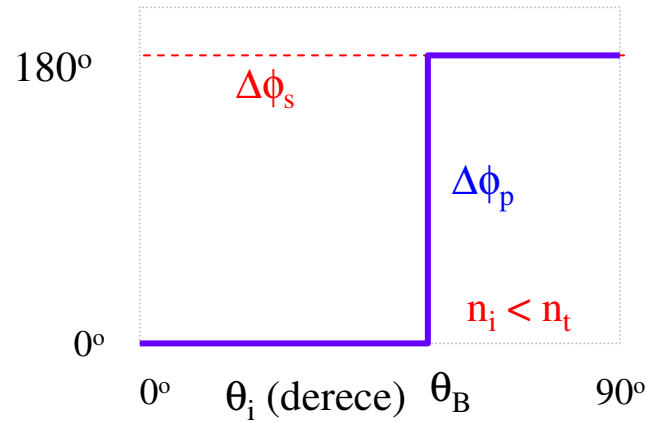
- Bu geliş açının üstündeki değerlerde ise yansıyan ışık ile gelen ışık arasında 180° faz farkı olacaktır.

$$r_p \equiv E_{or}^p / E_{oi}^p = -1 \Rightarrow E_{or}^p = -E_{oi}^p$$

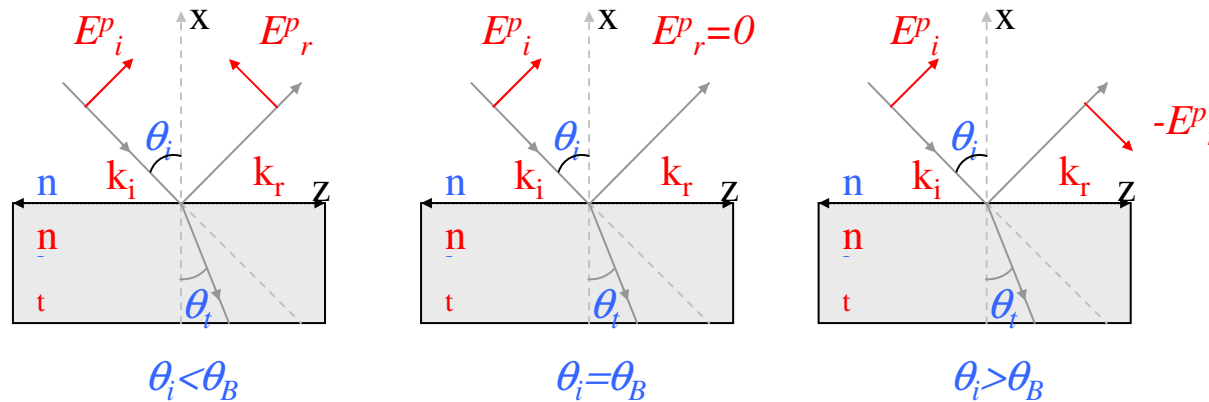
- t_p değeri ise bütün geliş açısı değerlerinde hep pozitiftir (gelen ve ikinci ortama geçen ışığın kutuplanma doğrultusu hep aynıdır), $\theta_i=90^\circ$ değerinde ise sıfır olur.

p-Kutuplu Işık-2

Faz (Yansıyan ışık)

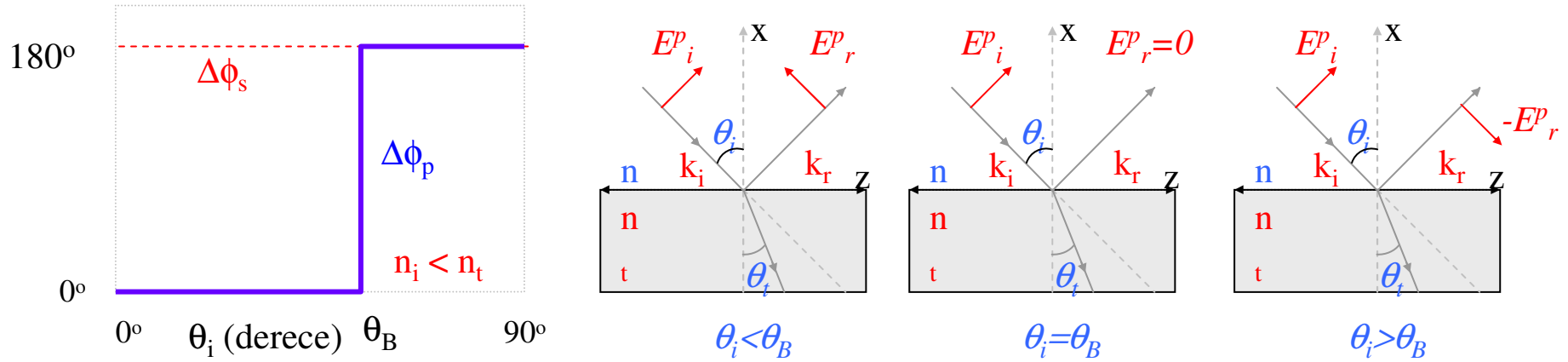


p-kutuplu ışık, Brewster açısının üstündeki geliş açısı değerlerde yansıyan ve gelen ışık arasında 180° faz farkı oluşur.



Brewster Açısı

r_p 'nin sıfır olduğu özel geliş açısına *kutuplanma açısı* (veya *Brewster açısı* (θ_B)) denir. Bu açı değerinde yansıyan ışık bileşeni bulunmaz. Bu özelliğinden dolayı bu açı değeri ışığı kutuplamada veya ışığı tümüyle 2. ortama geçirmek istendiğinde kullanılır.



The block contains two detailed diagrams and a legend. The left diagram shows a p-polarized incident ray at θ_B with no reflected ray. The right diagram shows an unpolarized incident ray at θ_B with a reflected s-polarized ray. The legend defines: \odot for unpolarized light, \circ for s-polarized (TE), and \rightarrow for p-polarized (TM).

θ_B açısında gelen p-kutuplu ışığın yansıyan bileşeni olmayacaktır.

θ_B açısında gelen kutuplanmamış ışık, yansıdıktan sonra kutuplanacaktır.

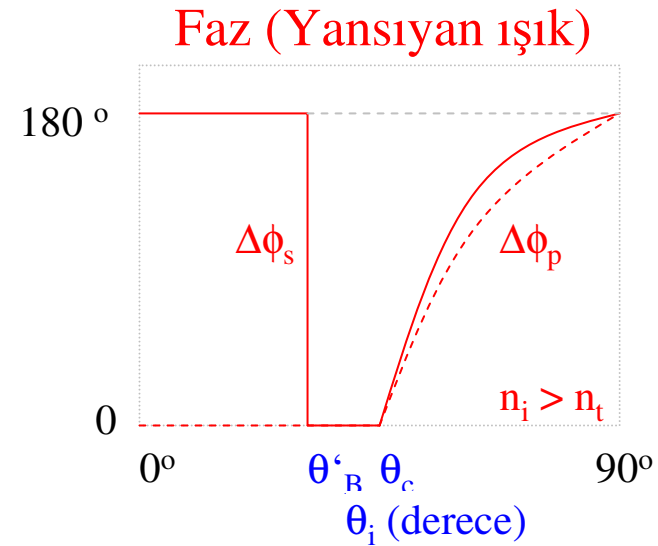
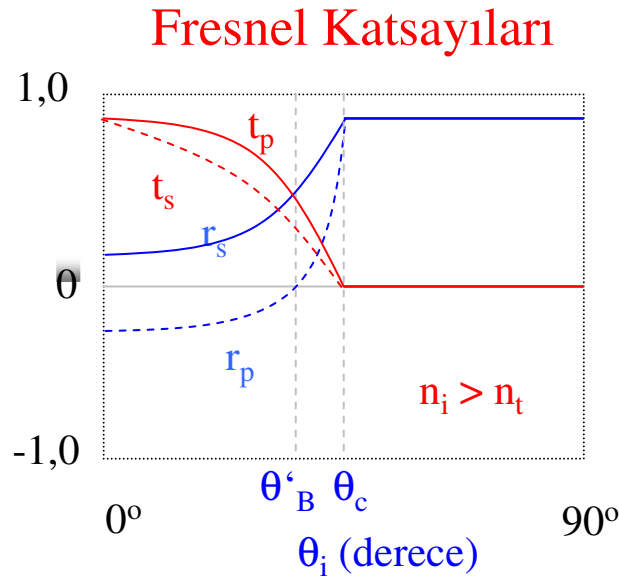
İç Yansımaya ($n_i > n_t$)

- 1. ortamın kırılma indisi ikinci ortamın kırılma indisinden daha büyük olduğu durumda iç yansımadan söz edilir ($n_i > n_t$).
- İç yansımada ışığın geliş açısının belli bir değerinin üstünde kırılma açısı sanaldır ve 2. ortama geçen ışık bulunmaz.
- Bu açı değerine kritik açı (θ_c) denir.
- İç yansımada da Brewster açısı tanımlanabilir. Bu durumda Brewster açısı

$$\theta'_B = \arctan\left(\frac{n_t}{n_i}\right)$$

- İç ve dış yansımadaki Brewster açıları birbirinin eşleniğidir.

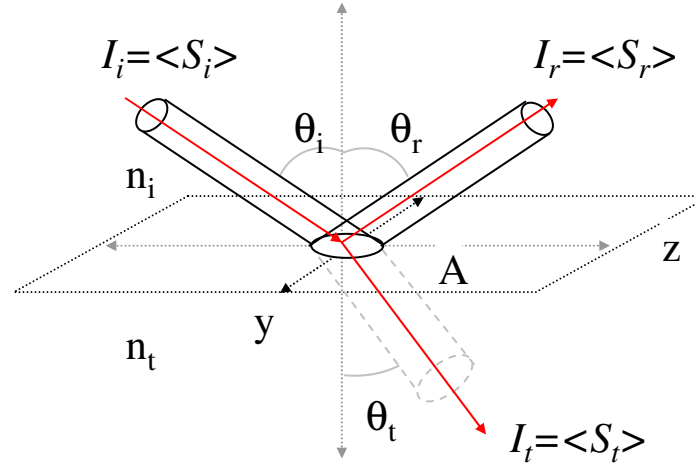
$$\theta_B + \theta'_B = 90^\circ$$



Yansıtma ve Geçirme-1

Yansıtma (r) ve geçirme (t) katsayıları, gelen, geçen ve yansıyan ışığın alan genlikleri (karmaşık vektör) hakkında bilgi verir. Pratikte ise ışığın alanını değil enerji akısını (Poynting vektör) ölçeriz.

Geçen ve yansıyan ışığın şiddeti (parlaklığı) hakkında ne söylenebilir?



Geçen ve yansıyan ışığın şiddeti (parlaklığı) ile Fresnel katsayıları arasındaki ilişki gelen, yansıyan ve geçen enerji akıları tanımlanarak bulunabilir.

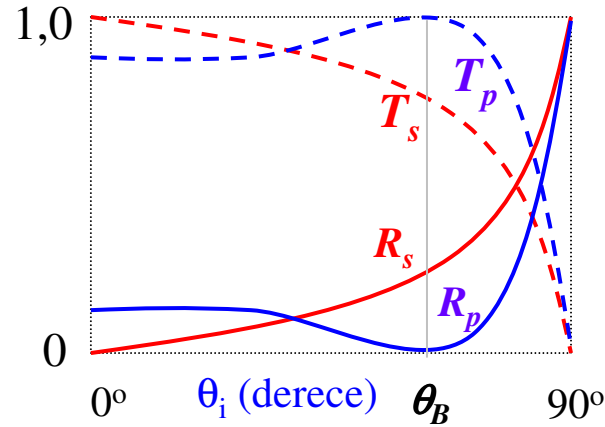
Yansıtma (enerji akı oranı)	$R \equiv \frac{I_r \cos \theta_r}{I_i \cos \theta_i} = \frac{I_r}{I_i} \implies R = r ^2$
Geçirme (enerji akı oranı)	$T \equiv \frac{I_t \cos \theta_t}{I_i \cos \theta_i} \implies T = \frac{n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i} t ^2$

Kırılma indisi farklı 2. ortama geçen ışık kırılacağından yüzey alan kesiti yansıyan ışıktan farklı olacaktır. Bu sebepten geçen ışığın şiddeti direk olarak Fresnel katsayısının karesini değil, kırılma indislerini ve açıları içeren bir katsayıyı da içermektedir.

Yansıtma ve Geçirme-2

Enerji korunumunda (gelen ışığın enerjisi 1'e normalize edilirse)

$$R + T = 1$$



Normal doğrultuda gelen ışık için ($\theta=0$) R_s ve R_p değerleri aynı değere yaklaşır:

$$r_p(\theta=0^\circ) = |-r_s(\theta=0^\circ)| = \left| \frac{n_i - n_t}{n_i + n_t} \right| \Rightarrow R(\theta=0) = R_s = R_p = \left| \frac{n_t - n_i}{n_t + n_i} \right|^2$$

Normal doğrultuda gelen ışık için ($\theta=0$) T_s ve T_p değerleri aynı değere yaklaşır:

$$t(\theta_i=0^\circ) = t_p = t_s = \frac{2n_i}{n_i + n_t} \Rightarrow T(\theta=0) = T_s = T_p = \frac{4n_i n_t}{(n_i + n_t)^2} \quad 30$$

Özet

Işığın ara yüzeydeki davranışı dalga özelliği göz önüne alınarak incelendi. Ara yüzeyde; gelen, yansıyan ve geçen dalgaların sınır şartlarının bir sonucu olarak uygun bileşenlerinin genlik ve fazlarının eşit olması gerekir. Faz eşitliği geometrik optiğin sonuçlarını elde etmemizi, genlik eşitliği ise gelen ışığın yüzde olarak ne kadarının yansıtılacağını ve ne kadarının geçeceğini bulmamızı sağlar. Bu bilgiler Fresnel katsayıları ile ifade edilir. Alan vektörünün, ara yüzey normali ile ışığın dalga vektörünün tanımladığı geliş düzlemine dik olduğu ışık s-kutuplu, paralel olduğu ışık ise p-kutuplu ışık olarak adlandırılır. Bu modlar için geliş açısına bağlı olarak Fresnel katsayıları:

$$\begin{aligned} \text{s-kutuplu ışık} \quad r_s &\equiv \frac{E_{or}^s}{E_{oi}^s} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} & t_s &\equiv \frac{E_{ot}^s}{E_{oi}^s} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i} \\ \text{p-kutuplu ışık} \quad r_p &\equiv \frac{E_{or}^p}{E_{oi}^p} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t} & t_p &\equiv \frac{E_{ot}^p}{E_{oi}^p} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t} \end{aligned}$$

Fresnel katsayıları, yansıyan ve geçen dalganın elektrik alan vektörleri ile gelen ışığın alan vektörü arasındaki ilişkiyi verdiği için direk olarak ölçülebilen bir nicelik değildir. Pratikte ışığın şiddeti ölçüldüğünden Yansıtma ve Geçirgenlik tanımları yapılır.

$$\text{Yansıtma (reflectance) } R \quad R = |r|^2$$

$$\text{Geçirgenlik (transmittance) } T \quad T = \frac{n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i} |t|^2$$

Enerjinin korunumundan gelen ışık (1 birim) yansıyan (%R) ve geçen (%T) ışığa eşit olacağından:

$$R + T = 1$$

Yüzeye dik gelen ışığın Geçirme ve Yansıtması ortamın kırılma indislerine bağlı olarak

$$R(\theta = 0) = R_s = R_p = \left| \frac{n_t - n_i}{n_t + n_i} \right|^2 \quad T(\theta = 0) = T_s = T_p = \frac{4n_t n_i}{(n_i + n_t)^2} \quad \text{verilir. 31}$$

UADMK - Açık Lisans Bilgisi

Bu ders malzemesi öğrenme ve öğretme yapanlar tarafından açık lisans kapsamında ücretsiz olarak kullanılabilir. Açık lisans bilgisi bölümü yani bu bölümdeki, bilgilerde değiştirme ve silme yapılmadan kullanım ve geliştirme gerçekleştirilmelidir. İçerikte geliştirme değiştirme yapıldığı takdirde katkılar bölümüne sadece ekleme yapılabilir. Açık lisans kapsamındaki malzemeler doğrudan ya da türevleri kullanılarak gelir getirici faaliyetlerde bulunulamaz. Belirtilen kapsam dışındaki kullanım açık lisans tanımına aykırı olduğundan kullanım yasadışı olarak kabul edilir, ilgili açık lisans sahiplerinin ve kamunun tazminat hakkı doğması söz konusudur.