FZM450 Elektro-Optik

2. Hafta

Işığın Elektromanyetik Tanımlanması-1:

Boşlukta Elektromanyetik Dalgalar

2. Hafta Ders İçeriği

- Maxwell Denklemleri
- Boşlukta Maxwell denklemleri ve çözümleri
- Işığı oluşturan elektrik ve manyetik alanlar arasındaki ilişki
- Faz ve grup hızları
- Işığın kuantumluluğu
- EM dalga ile iletilen enerji

Elektromanyetik Dalgalar-Maxwell Denklemleri

J. C. Maxwell, elektrik ve manyetizmaya yönelik çalışmaları birleştirerek ışığın elektromanyetik tabiatlı olduğunu göstermiştir

Maxwell denklemleri en genel olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir

$$\nabla \cdot \boldsymbol{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$
Gauss Yasası- Elektrik

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0$$
Gauss Yasası- Manyetik

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}$$
Faraday Yasası

$$\nabla \times \boldsymbol{B} = \mu_0 \boldsymbol{J}$$
Amper Yasası

$$\nabla \times \boldsymbol{B} = \mu_0 \left[\underbrace{\varepsilon_0 \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t}} + \boldsymbol{J} \right]$$
Maxwell'in katkısı ile Amper Yasası

Burada; **E** elektrik alan, **B** manyetik alan, ρ uzaysal yük yoğunluğu, **J** ise akım yoğunluğudur ε_o boş uzayın elektriksel, μ_o ise manyetik geçirgenliği olup sayısal değerleri

$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m (Boş uzayın elektriksel geçirgenliği)
$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-9}$ H/m (Boş uzayın manyetik geçirgenliği)

Boşlukta Elektromanyetik Dalga-1

"..And God said 'Let there be light: and there was light' "
Eski Ahid. Yaradılış 1:3

Boşlukta **J**=0 (akım yoğunluğu), ρ=0 (yük yoğunluğu) olacağından Maxwell denklemleri

(1) $\nabla \boldsymbol{.E} = \dfrac{\rho}{\varepsilon_0} \quad \Longrightarrow \quad \nabla \boldsymbol{.E} = 0$

(2) $\nabla \boldsymbol{.B} = 0 \quad \Longrightarrow \quad \nabla \boldsymbol{.B} = 0$

(3) $\nabla \times \boldsymbol{E} = -\dfrac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \quad \Longrightarrow \quad \nabla \times \boldsymbol{E} = -\dfrac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}$

(4) $\nabla \times \boldsymbol{B} = \mu_0 \left[\varepsilon_0 \dfrac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} + \boldsymbol{J} \right] \quad \Longrightarrow \quad \nabla \times \boldsymbol{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \dfrac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t}$

E ve **B** hem konumun hem de zamanın fonksiyonları olduğundan vektörel olarak en genel şekilde aşağıdaki gibi ifade edilebilir

$\mathbf{E}(x,y,z,t)=E_x(x,y,z,t)\hat{\mathbf{i}}+ E_y(x,y,z,t)\hat{\mathbf{j}} + E_z(x,y,z,t)\mathbf{k}$
$\mathbf{B}(x,y,z,t)=B_x(x,y,z,t)\hat{\mathbf{i}}+ B_y(x,y,z,t)\hat{\mathbf{j}} + B_z(x,y,z,t)\mathbf{k}$

Burada 6 bileşen (3 ***E*** alan, 3 de ***B*** alan bileşeni) ve 4 değişken (3 konum (x,y,z) ve zaman t) vardır

Boşlukta Elektromanyetik Dalga-2

Bu denklemleri nasıl eş zamanlı olarak çözeriz?

3. denklemin dönüsünü (curl) alıp, manyetik alan (curlB) yerine denklem (4)'yi koyarsak

$$\nabla \times \boldsymbol{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} \qquad (4)$$

$$(3) \quad \nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \quad \Rightarrow \quad \nabla \times (\nabla \times \boldsymbol{E}) = -\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times \boldsymbol{B})$$

$$\nabla \times (\nabla \times \boldsymbol{E}) = -\frac{\partial}{\partial t}\left[\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t}\right]$$

$$\nabla \times (\nabla \times \boldsymbol{E}) = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial t^2}$$

Vektörel eşitlik $\nabla \times (\nabla \times \boldsymbol{E}) = -\nabla^2 \boldsymbol{E} + \nabla.(\nabla.\boldsymbol{E})$ kullanıldığında

$$-\nabla^2 \boldsymbol{E} + \nabla.(\nabla.\boldsymbol{E}) = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial t^2}$$

Boş uzayda ρ=0 olduğu için $\nabla.\boldsymbol{E} = 0$

$$\nabla^2 \boldsymbol{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial t^2}$$

Boşlukta Elektromanyetik Dalga-3

Genel dalga Denklemi

$$\nabla^2\Phi = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \boldsymbol{E} = \mu_0\varepsilon_0 \frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial t^2}$$

şeklinde yazabiliriz.
Yukardaki denklem üç boyutta dalga denklemi formundadır.

$$\nabla^2 \boldsymbol{E} = \frac{1}{\mathrm{c}^2}\frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial \mathrm{t}^2}$$

* Işık hızı diğer hızlar gibi v ile değil de c ile gösterilir. Bu gösterim, latince "hızlı" anlamına gelen"celer" kelimesinden gelmektedir

Dalganın ilerleme hızı ise $c=1/(\varepsilon_o\mu_o)^{1/2}$ ve değeri:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{(4\pi x 10^{-7}).(8{,}85x10^{-13})}} = 2{,}99x10^8\, m/s$$

(Boş uzayda elektromanyetik dalganın (ışığın) yayılma hızı)

Boş uzayda elektromanyetik dalganın (ışığın) yayılma hızı

☺ ***Ödev 2.1: Manyatik alan içinde benzer dalga denklemini aşaşıdaki gibi sağladığını gösteriniz!***

$$\nabla^2 \boldsymbol{B} = \mu_0\varepsilon_0 \frac{\partial^2 \boldsymbol{B}}{\partial t^2}$$

Işık Hızı

$$c = 2,99x10^8 m/s$$

Işık, Dünya'dan Ay'a 1.2 saniyede gitmektedir.

http://en.wikipedia.org/wiki/Speed_of_light

Boşlukta Elektromanyetik Dalga-4

$$\nabla^2 \boldsymbol{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial t^2} \qquad \nabla^2 \boldsymbol{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \boldsymbol{B}}{\partial t^2}$$

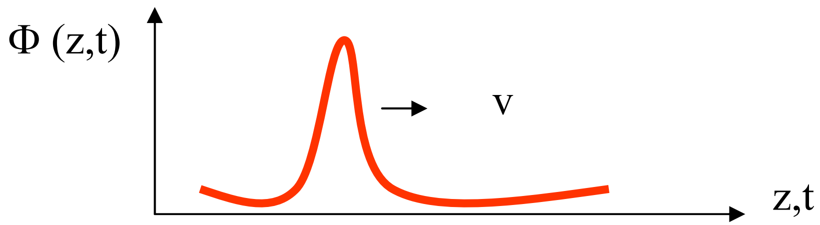
Bu denklemler $\nabla^2 \Phi = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}$ dalga denklemi formundadır

Burada $\Phi(x, y, z; t) = E, B$ $\qquad \frac{1}{v^2} = \varepsilon_o \mu_o$

Bu denklemlerin çözümleri nedir?

Basitlik olması açısından üç boyutta verilen bu dalga denklemini bir boyut için yazarsak

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \xrightarrow{\Phi (x,y,z;t) \Rightarrow \Phi(z;t)} \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

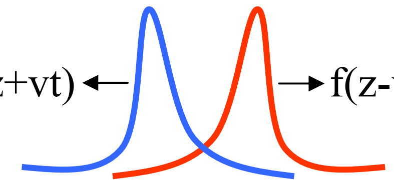


Burada, z dalganın ilerleyiş doğrultusunu, t zamanı, v ise dalganın yayılma hızını göstermektedir

Boşlukta Elektromanyetik Dalga-5

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial z^2}=\frac{1}{v^2}\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2}$$

Bu diferansiyel dalga denklemin en genel çözümü



$$\Phi(z,t)=f(z-vt)+g(z+vt)$$

formunda olması durumunda dalga denkleminin çözümünü sağlar

$$\frac{\partial\Phi}{\partial z}=\frac{\partial\Phi}{\partial(z-vt)}.\frac{\partial(z-vt)}{\partial z} \quad ==> \quad \frac{\partial\Phi}{\partial z}=\Phi^{'}.1 \quad ==> \quad \frac{\partial^2\Phi}{\partial z^2}=\Phi^{''}.1$$

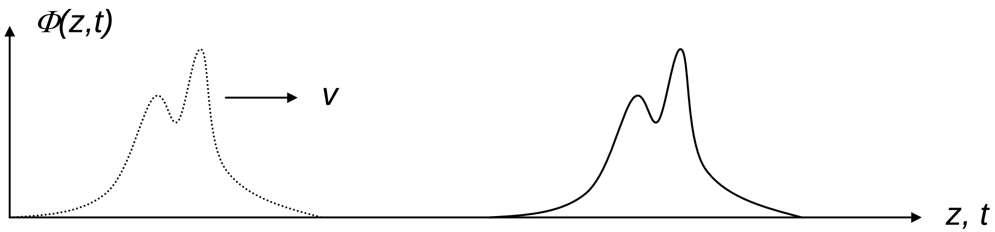
$$\frac{\partial\Phi}{\partial t}=\frac{\partial\Phi}{\partial(z-vt)}.\frac{\partial(z-vt)}{\partial t}=\frac{\partial\Phi}{\partial(z-vt)}.(-v) \quad ==> \quad \frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2}=\Phi^{''}.(v^2) \quad ==> \quad \frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2}=\Phi^{''}.(v^2)$$

$$\Phi^{''}=\frac{1}{v^2}\Phi^{''}(v^2)$$

Boşlukta Elektromanyetik Dalga-5

Yukarıdaki ifade bize argümanı (z±vt) olan herhangi bir f veya g fonksiyonunun dalga denklemini sağlayacağını söylemektedir (önemli olan f veya g'nin formu değil de argümanın (z±vt) şeklinde olması)

Örneğin aşağıdaki atma şekline sahip olan dalga x-ekseni boyunca v hızı ile ilerleyen dalga denklemini sağlayacaktır



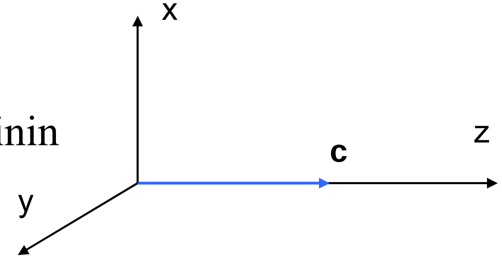
Ancak, $$f(z - vt) = 3\ln(z)e^{-vt}$$

fonksiyonu çözüm ***değildir*** çünkü (z-vt) ifadesi bu denklemde tam olarak (z-vt) şeklinde değildir!

$$f(z,t) = 3e^{-(z-vt)^2}$$

Boşlukta Elektromanyetik Dalga-7

Basitlik olsun diye yukarıdaki dalga denklemini tek boyutta çözelim



Yayılma doğrultusunu z-yönünde seçersek yukarıdaki denklemin çözümlerinin

f(z-ct) =E(x,y,z,t)=E(z-ct)

E(z,t) vektörel nicelik

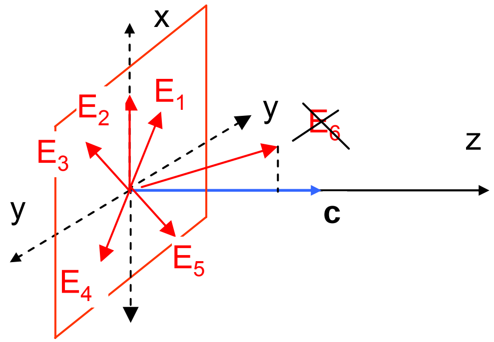
(1) $\nabla . \boldsymbol{E} = 0$ olması gerektiğinden $= \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0$

E(z,t), x ve y'nin fonksiyonu olmadığından $\frac{\partial E_x(z-ct)}{\partial x} = 0, \frac{\partial E_y(z-ct)}{\partial y} = 0$ ve

E(z,t), z'nin fonksiyonu olduğundan $\frac{\partial E_z(z-ct)}{\partial z} = 0 \Rightarrow E_z = 0$ olması gerekir

•Önemli Sonuç: E alanın yayılma doğrultusunda hiç bir bileşeni olmayacaktır, E alanı tümüyle z doğrultusuna dik bir düzlemde (xy-düzlemi) bulunacaktır

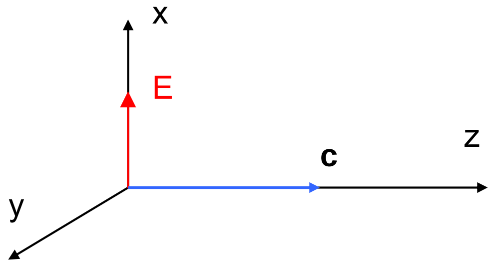
Elektrik alan ilerleme yönü olan z-doğrultusuna
dik yönde enlemesine (transverse) titreşim yapmaktadır
Yani ışık enlemesine bir dalgadır



Boşlukta Elektromanyetik Dalga-7

E_x için özel duruma bakalım E_x alanının x doğrultusunda olduğunu düşünelim

$E_y(x,y,z,t)=0$ (uygun koordinat sistemi seçerek bu koşulu sağlayabiliriz)



Dalga denkleminin çözümünün $E_x(x,y,z,t)=E_{ox}\sin[k(z-ct)]$ şeklinde olduğunu düşünebiliriz

Burada k bir sabittir ve fiziksel olarak ne anlama geldiği sonra detaylı olarak anlatılacaktır

t=0, z=0 da $E_x(x,y,z,t)=E_{ox}\sin[k(z-ct)]=0$ ki bu özel durumu gösterdiğinden k(z-ct) terimine ϕ gibi bir faz açısı ekleyerek t=0 ve z=0 da dalganın sıfırdan farklı bir değer almasını sağlayabiliriz

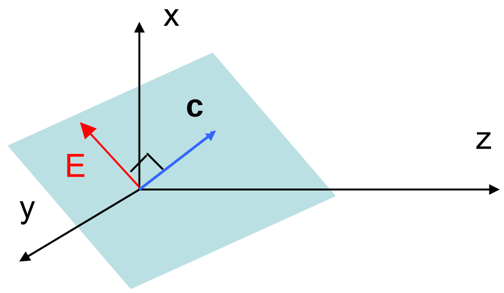
Dolayısı ile Maxwell denklemini sağlayan dalga denkleminin aradığımız çözümü

$$E_x(x,y,z,t)=E_{ox}\sin[k(z-ct)+\phi] \quad E_y=0 \; E_z=0$$

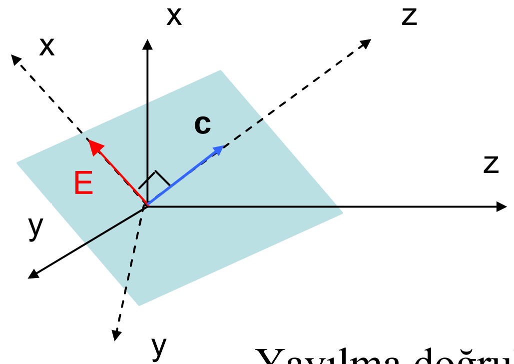
ϕ: faz açısı E_{ox}: genlik k: dalga vektörü z: yayılma doğrultusu c: yayılma hızı

Boşlukta Elektromanyetik Dalga-8

Yayılma doğrultusunu özel bir doğrultu(z) değil de genel olduğu duruma bakalım, yani yayılma doğrultusu z değil de herhangi bir yön olmuş olsun



Yayılma doğrultusu z



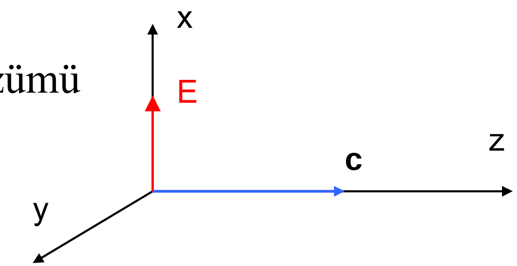
Yayılma doğrultusu r

Bu durumda dalga denkleminin çözümünün

$E_x(x,y,z,t)=E_{ox}\sin[k(r-ct)]$ şeklinde olduğunu düşünebiliriz

Dolayısı ile Maxwell denklemini sağlayan dalga denkleminin aradığımız çözümü

$$E_x(x,y,z,t)=E_{ox}\sin[k(z-ct)+\phi] \quad E_y=0,\ E_z=0$$



ϕ: faz açısı E_{ox}: genlik k: dalga vektörü z: yayılma doğrultusu c: yayılma hızı

Boşlukta Elektromanyetik Dalga-9

Bu dalganın uzaysal değişimine bakacak olursak (t=0)

$$E_x(x,y,z,t)=E_{ox}\sin[k(z-ct)+\phi]$$

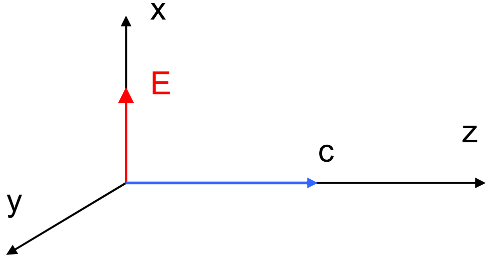
$$\left.\begin{array}{l} kz_1+\phi=\pi/2 \\ \\ kz_2+\phi=5\pi/2 \end{array}\right\}$$

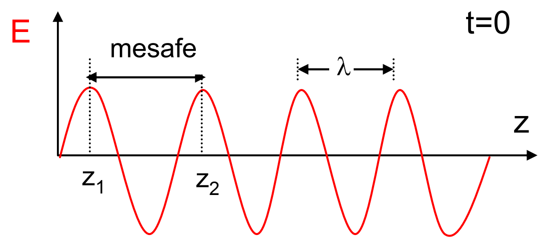
Ardışıl iki maksimum noktaya karşı gelmektedir

$$k(z_2-z_1)=5\pi/2-\pi/2=2\pi$$

$(z_2-z_1)=2\pi/k\equiv\lambda$ Dalgaboyu

$$k \equiv \frac{2\pi}{\lambda}$$ k dalga vektörü



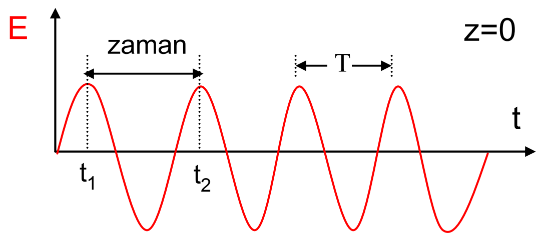


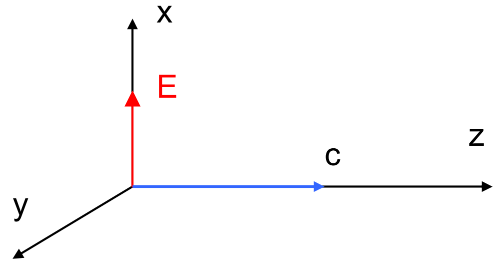
Boşlukta Elektromanyetik Dalga-10

Bu dalganın zaman içersindeki değişimine bakacak olursak (z=0)

$$E_x(x,y,z,t)=E_{ox}\sin[k(z-ct)+\phi]$$

$$\left.\begin{array}{l} ckt_1-\phi=\pi/2 \\ ckt_2-\phi=5\pi/2 \end{array}\right\}$$ Ardışıl iki maksimum noktaya karşı gelmektedir.





$ck(t_2-t_1)=5\pi/2-\pi/2=2\pi$

$(t_2-t_1)\equiv T$ Periyod

$ckT=2\pi$

Periyot (T) bir tam salınım için geçen süredir. Birimi saniyedir.

Frekans (ν) ise birim zamandaki salınım sayısıdır ve birimi 1/saniye=Hertz (Hz) dir.

Frekans ile peryod arasındaki ilişki

$$T=\frac{1}{\nu} \qquad T\equiv\frac{2\pi}{ck}=\frac{1}{\nu}\Rightarrow ck=2\pi\nu\equiv\omega$$

Açısal frekans

$\omega=2\pi\nu$

ω=açısal frekans (rad/s) ν=frekans(1/s)

$$T\equiv\frac{2\pi}{ck}=\frac{2\pi}{c(\frac{2\pi}{\lambda})}=\frac{\lambda}{c}$$

 Optoelektronik teknolojisinde kullanılan optik dalganın frekansı 10^{14}-10^{15} Hz

Boşlukta Elektromanyetik Dalga-11

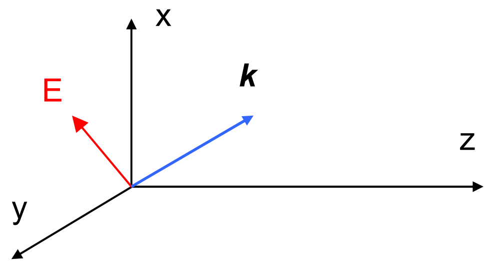
Dalgaboyu (λ) yerine vektörel nicelik olan dalga vektörünü (***k***) tanımlayalım

k $\begin{cases} \text{büyüklüğü} \quad \Longrightarrow \quad k = \dfrac{2\pi}{\lambda} \quad \text{(dalga sayısı)} \\ \text{yönü ise ilerleme yönü veya faz hızının doğrultusundadır} \end{cases}$

Seçtiğimiz koordinat sistemi için ***k***’yı yazarsak $\vec{k} = \dfrac{2\pi}{\lambda}\hat{k}$

Yukarıdaki çözümü yeni tanımladığımız nicelikler
(dalga vektörü ***k*** ve açısal frekans *ω*) cinsinden yazarsak dalga denkleminin
çözümlerini herhangi bir k doğrultusunda ilerleyen en genel çözümler şeklinde yazabiliriz

$$\boldsymbol{E}(x,y,z,t)=\boldsymbol{E}_o \sin[(\mathbf{k}.\mathbf{r}-\omega t)+\phi]$$



Boşlukta Elektromanyetik Dalga-12

B manyetik alanı için neler söyleyebiliriz? E alanı ile ilişkisi nedir?

$$\nabla^2 \boldsymbol{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial t^2} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{E}(z,t)=\mathbf{E}_{\mathbf{ox}}\sin[(\mathbf{k}.\mathbf{r}-\omega t)+\phi]$$

Manyetik alan, E alan için yapılan benzer işlemlerden sonunda B'nin de dalga denklemi formunda olduğu görülecektir

$$\nabla^2 \boldsymbol{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \boldsymbol{B}}{\partial t^2} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{B}(z,t)=\mathbf{B}_{\mathbf{o}}\sin[(\mathbf{k}.\mathbf{r}-\omega t)+\phi']$$

3. Maxwell denkleminden

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \qquad (3)$$

$$E_x(z,t)=E_{ox}\sin[kz-\omega t)+\phi]$$

$$\vec{\boldsymbol{E}} = E_{ox}\sin(kz-\omega t+\phi)\hat{i}$$

$$-\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} = +\omega B_o \cos(kr-\omega t+\phi')$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & 0 & 0 \end{vmatrix} = -\hat{j}\left[-\frac{\partial}{\partial z}E_x(z,t)\right] = \frac{\partial E_x}{\partial z}\hat{j}$$

$$-\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} = +\omega B_o \cos(kz-\omega t+\phi') = \frac{\partial E_x}{\partial z}\hat{j}$$

$$-\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} = +\omega B_o \cos(kz-\omega t+\phi') = \frac{\partial E_x}{\partial z}\hat{j} = -k\hat{j}E_{ox}\cos(kz-\omega t+\phi)$$

Boşlukta Elektromanyetik Dalga-13

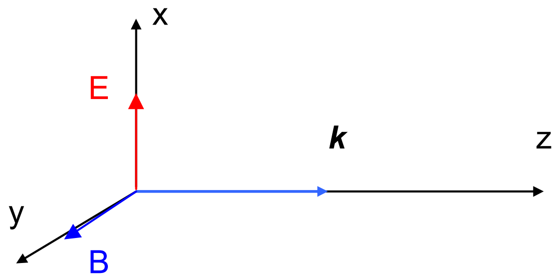
$$-\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} = +\omega B_o \cos(kz - \omega t + \phi') = \frac{\partial E_x}{\partial z}\hat{j} = -k\hat{j}E_{ox}\cos(kz - \omega t + \phi)$$

Yukarıdaki denklemin eşit olabilmesi için hem argümanlarının hem de katsayılarının eşit olması gerekmektedi

Argümanların eşitliğinden $kz - \omega t + \phi' = kz - \omega t + \phi$ ⇨ $\phi' = \phi$ (E ve B'nin fazı aynı)

Genliklerin eşitliğinden $\omega B_o = kE_{ox}\hat{j}$ ⇨

Dolayısı ile **B$_o$**, y-doğrultusunda olmak zorundadır



* E, x-doğrultusunda ise
B alanı MUTLAKA
y-doğrultusunda olmalıdır

$$\frac{E_{ox}}{B_{oy}} = \frac{\omega}{k} = \frac{2\pi\nu}{2\pi/\lambda} = \nu\lambda = c$$

E_{ox}, B_{ox} den 8 mertebe daha büyük!

☺ **Ödev 2.2:** xz düzleminde hareket eden düzlem dalganın k dalga vektörü k=2i+j ise;

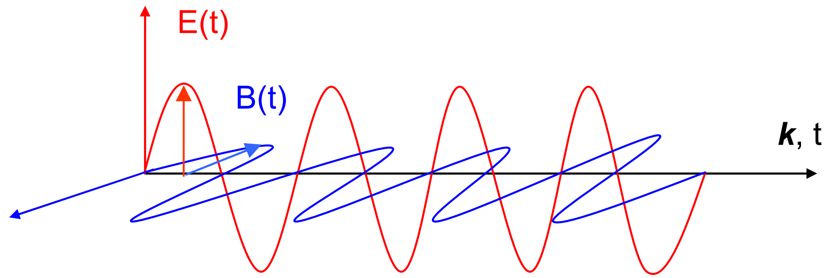
Buna göre

(a) Elektrik alan (E) ile k dalga vektörünün diklik koşlunu sağladığını

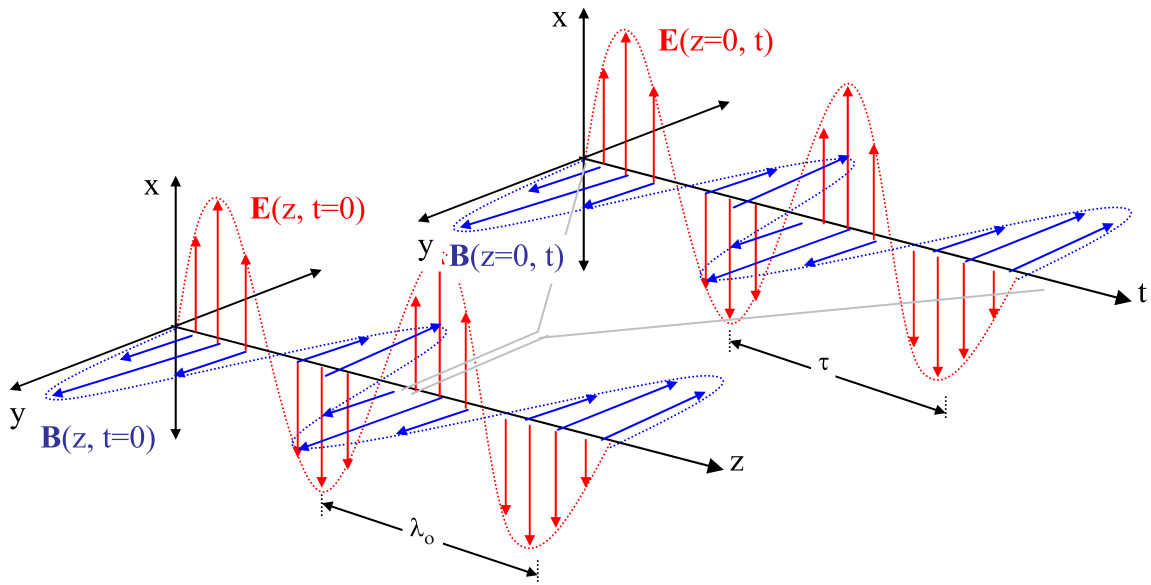
(b) Manyetik alan (B) ile k dalga vektörünün diklik koşulunu

(c) E ve B nin diklik koşulunu sağladığını gösteriniz.

Boşlukta Elektromanyetik Dalga-15



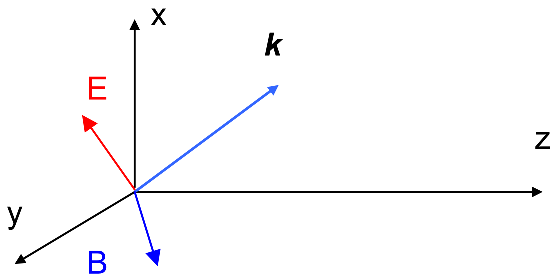
Elektromanyetik dalgayı oluşturan elektrik (**E**) ve manyetik(**B**) alan bileşenleri birbirlerine ve aynı zamanda dalganın ilerleyiş yönü olan ***k*** vektörüne diktir. Alan bileşenleri hem zaman içinde hem de konuma bağlı olarak periyodik bir değişim gösterir. Zaman içersindeki salınım ω, uzaysal konumdaki salınım ise ***k*** ile temsil edilir



Boşlukta Elektromanyetik Dalga-15

$$\boldsymbol{E}=\boldsymbol{E}_o sin[(\mathbf{k.r}-\omega t)+\phi]$$

$$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{B}_o sin[(\mathbf{k.r}-\omega t)+\phi]$$

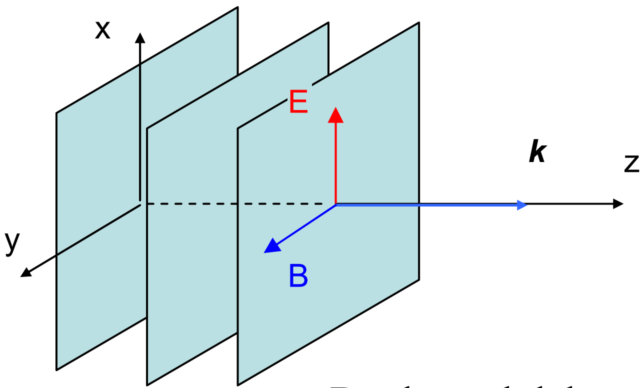


Dalga Denkleminin farklı gösterimi
Türetilen dalga denkleminin düzlemsel dalga çözümlerini daha şık bir şekilde kompleks gösterim kullanarak vektörel formda yazabiliriz.

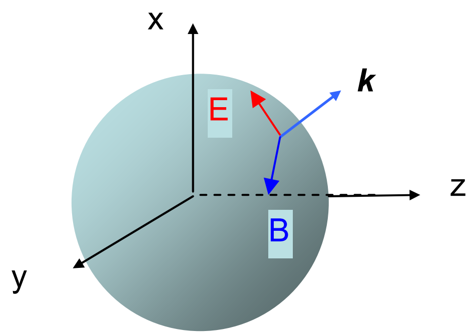
$$\mathbf{E}=\mathbf{E_o}e^{i(\mathbf{k.r}-\omega t+\phi)} \qquad B=B_{\mathbf{o}}e^{i(\mathbf{k.r}-\omega t+\phi')}$$

Burada k, dalga vektörü, *i* ise kompleks sayıdır.

Dalga Şekilleri

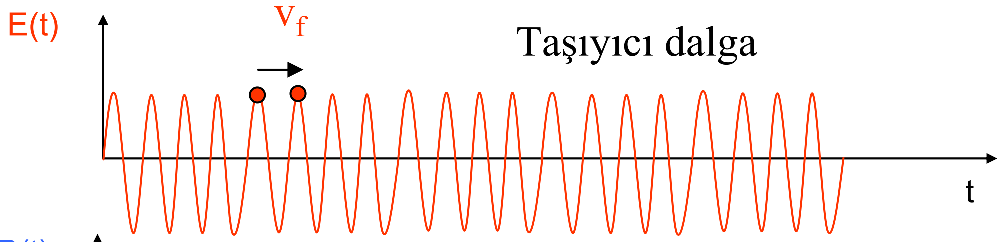


Düzlemsel dalga



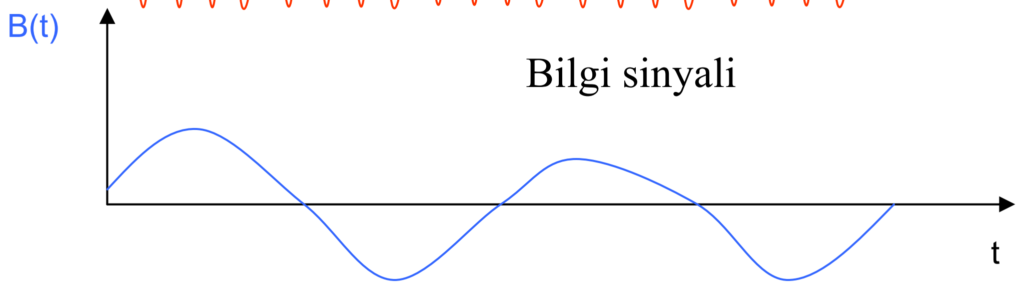
Küresel Dalga

Grup ve Faz Hızı-1

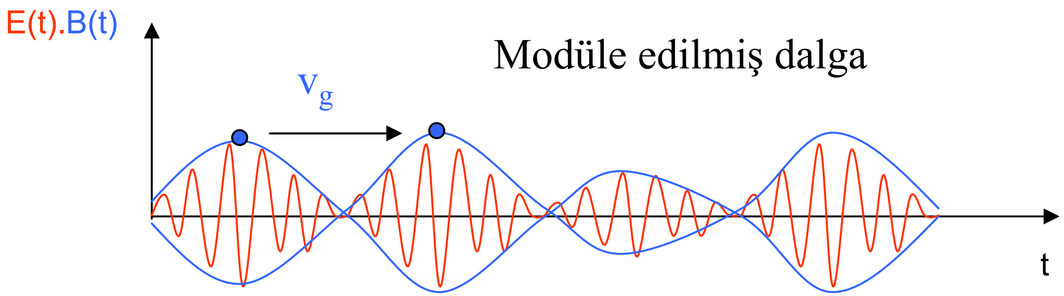


Modüle edilmediği için bilgi iletmez!

$$v_f = \frac{\omega}{k}$$



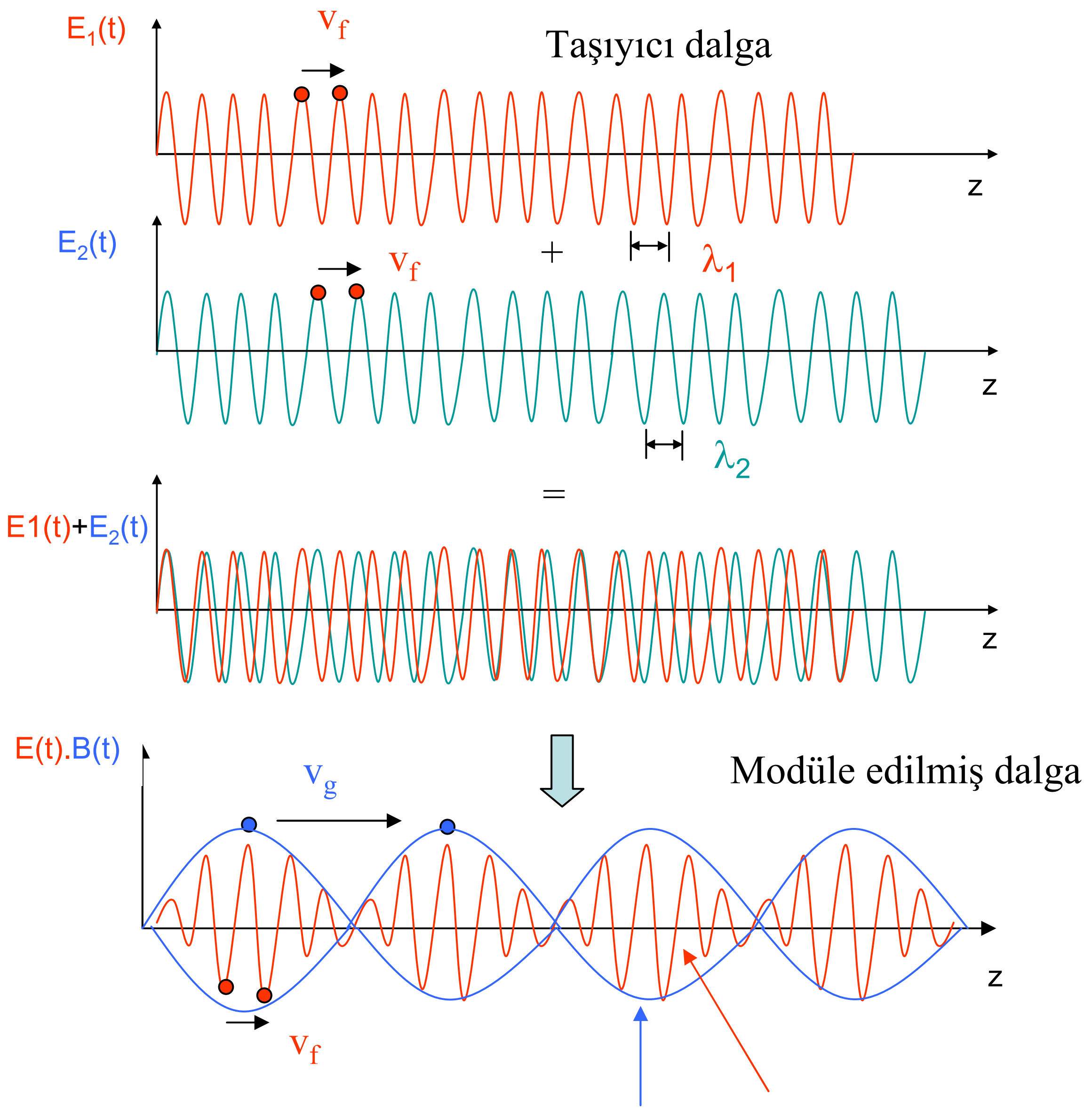
Bilgi sinyali



Bilgi iletimi

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k}$$

Grup ve Faz Hızı-2



$E(z,t)=E_{oz}(z,t)E_o\sin[k_f r-\omega_f t)+\phi]$

$E_1(z,t)=E_o\cos[k_1x-\omega_1t)]$

$$v_f=\frac{\omega}{k}=\frac{2\pi\upsilon}{\frac{2\pi}{\lambda}}=\upsilon\lambda \quad \text{Faz Hızı}$$

$E_2(z,t)=E_o\cos[k_2x-\omega_2t)]$

$k_m=(1/2)(k_1-k_2)$ $\quad$ $k_f=(1/2)(k_1+k_2)$

$\omega_m=(1/2)(\omega_1-\omega_2)$ $\quad$ $\omega_f=(1/2)(\omega_1+\omega_2)$

$E(z,t)=2E_o\cos(k_mx-\omega_mt)\sin[k_fx-\omega_ft)+\phi]$

$E(z,t)=E_{oz}(z,t)E_o\sin[k_f r-\omega_f t)+\phi]$

$$v_g=\frac{\partial\omega}{\partial k} \quad \text{Grup Hızı}$$

☺**Ödev 2.3:** SI birim sisteminde verilen düzlemsel elektromanyetik dalgayı (ışığı) düşünelim

$$E_x=0,\ \ E_y=2\cos[2\pi x10^{14}(t-x/c)+\pi/2]\ ,\ E_z=0$$

a) Bu dalganın
frekansı,
dalgaboyu,
hareket doğrultusu,
genliği,
faz açısı ve
polarizasyon doğrultusu nedir?

b) Bu dalganın manyetik alan (B) bileşenini için bir ifade türetin.

Elektromanyetik Alanda Depo Edilen Enerji-1

Elektromanyetik dalganın en önemli özelliklerinden biri de enerji taşıyabilmesidir

Elektrik ve Manyetik alanlarda depo edilen Enerji Yoğunluğu (birim hacım başına enerji)

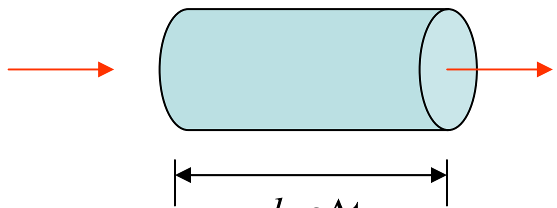
$$u_{EM} = \frac{1}{2}\varepsilon_o |E|^2 + \frac{1}{2\mu_o}|B|^2$$

Elektromanyetik alan durumunda E ve B ilişkili olduğu için

$$|E| = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_o \mu_o}}|B| \Rightarrow |B| = \sqrt{\varepsilon_o \mu_o}\,|E|$$

$$u_{EM} = \varepsilon_o |E|^2 = \frac{1}{\mu_o}|B|^2$$

Elektromanyetik enerji iletimini ifade edebilmek için birim yüzeyden birim zamanda iletilen enerjiyi simgeleyen S niceliği kullanılır   Enerji akısı=S=enerji/(alan-zaman)



l=cΔt

SI birim sisteminde birimi W/m^2 dir

$$|S| = \frac{u_{EM}(\Delta t c)A}{A\Delta t} = u_{EM}c = \varepsilon_o |E|^2 \frac{1}{2\varepsilon_o \mu_o} = \sqrt{\frac{\varepsilon_o}{\mu_o}}|E|^2$$

Elektromanyetik Alanda Depo Edilen Enerji-2

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_o}(\vec{E}x\vec{B}) = c^2\varepsilon_o(\vec{E}x\vec{B})$$

S vektörüne Poynting vektör denir EM dalganın birim zamanda birim yüzeyden ilettiği enerji akısının ölçüsüdür

$$|S| = \sqrt{\frac{\varepsilon_o}{\mu_o}}|E|^2 = c\varepsilon_o|E|^2$$

Enerji aktarım yönü dalganın yayılma (k) yönündedir

Düzlemsel dalgalar için |S|

$E(r,t)=E_o\cos[(kr-\omega t)+\phi]$ $\Rightarrow$ $$|S| = \frac{|E_o|^2}{\mu_o c}cos^2(kr-\omega t+\phi)$$

Enerji akısı |S|=enerji/(alan-zaman)

Işık algılayıcılar (dedektörler), ışığın frekansı çok yüksek olduğu için ($\omega \approx 10^{15}$ Hz) bu hıza ayak uyduramazlar. Gerçekde dedektörlerin algıladığı, bu kadar hızlı değişen ışık sinyalinin zaman ortalamasıdır

$<\cos(kr-\omega t+\phi)>=1/2$

$$\langle|S|\rangle = I = \frac{|E_o|^2}{2\mu_o c}$$

eski ismi Şiddet (Intensity)
yeni ismi Parlaklık (Irradiance)

$$\langle|S|\rangle = I = \varepsilon_o c\langle E^2\rangle$$

$$\langle|S|\rangle = I = \frac{c}{\mu_o}\langle B^2\rangle$$

Elektromanyetik Alanda Depo Edilen Enerji-3

Elektrik alan E, madde içindeki yüklere daha etkin şekilde kuvvet uygulayarak iş yapabildiği için EM dalgayı oluşturan E alanına optik alan denir ve optikte

$$\langle |S| \rangle = I = \varepsilon_o c \langle E^2 \rangle$$

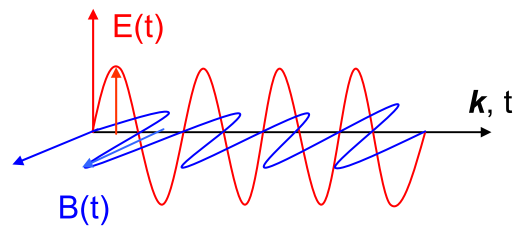
Niceliği tercih edilir

Elektromanyetik Dalga-Kesiklilik(Kuantumluluk)

Şimdiye kadar elektromanyetik dalgayı, yani ışığı, klasik olarak inceledik

Klasik olarak ışığı tanımlamak için

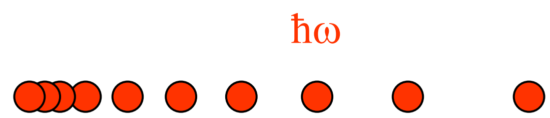
Elektrik alan	E
Dalga vektörü	k
Açısal frekans	ω
Parlaklık	I



Elektromanyetik alanın kuantalanmışdır ve alan kuantasına "foton" denir

Kuantun bakış açısından ışık

Durgun kütlesi	$m=0$
Momentum	$p=\hbar k$
Enerji	$E=\hbar\omega$
Akı	I=foton sayısı/(m^2-s)



Enerji=(Foton sayısı)x(foton enerjisi)=$N\hbar\omega$

I=watt/m^2=J/(m^2-s)=I/$\hbar\omega$=foton sayısı/(m^2-s)=parçacık akısı

Özet-1

• Işık, elektromanyetik tabiatlıdır

• Işık, elektrik (E) ve manyetik (B) alanın özel olarak salınımından oluşmaktadır

• Bu alanlar her zaman hem birbirlerine dik, hem de yayılma doğrultusuna diktir

• Elektromanyetik dalganın boşluktaki hızı boşluğun ε_o ve μ_o değerlerine bağlıdır
Boşluk için bu değer

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{(4\pi x 10^{-7}).(8{,}85x10^{-13})}} = 2{,}99x10^8 m/s$$

• Işığı oluşturan elektrik alanın büyüklüğü (E) manyetik alanın (B) büyüklüğünden dalganın yayılma hızı kadar daha büyüktür

$$\frac{E_{ox}}{B_{oy}} = \frac{\omega}{k} = \frac{2\pi\nu}{2\pi/\lambda} = \nu\lambda = c$$

Dolayısı ile ışığın madde ile olan etkileşmesinde elektrik alan bileşeni etkindir ve bu alana Optik Alan denir

Özet-2

- Faz hızı taşıyıcı dalganın, grup hızı ise modüle edilmiş dalganın(bilginin) hızıdır

- EM alan kuantalıdır ve kuanta birimine foton denir

- Işık, Poynting vektör ile verilen yön ve doğrultuda enerji taşır

- Dedektörler Poynting vektörün zaman ortalaması olan <|S|> değerini ölçerler bu da birim yüzey alanı başına düşen güç olan enerji akısıdır