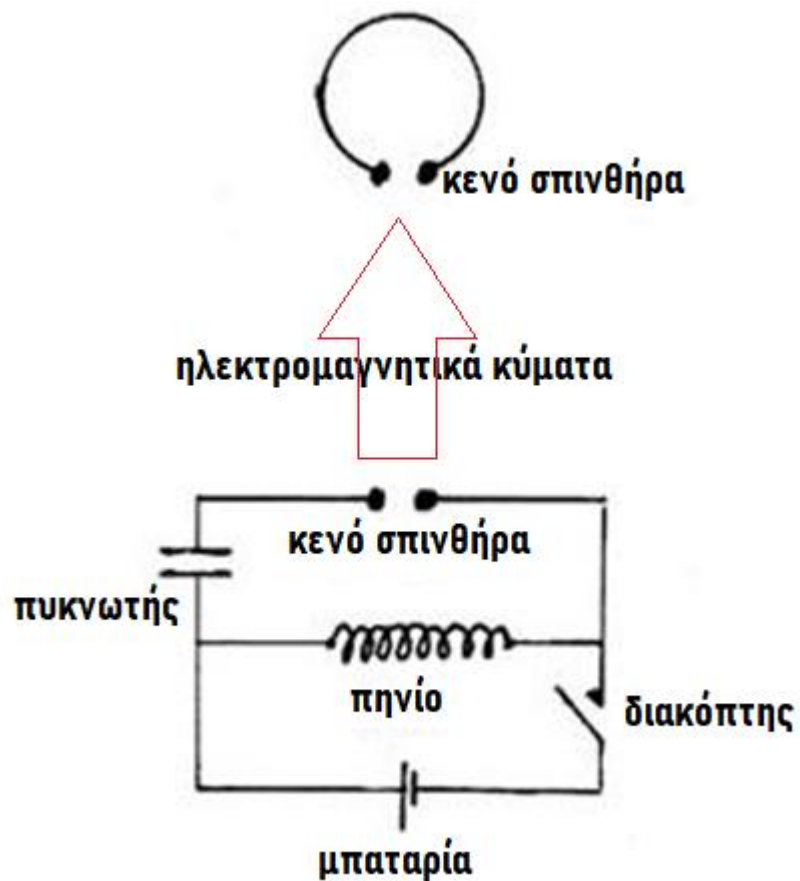


ΑΡΧΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

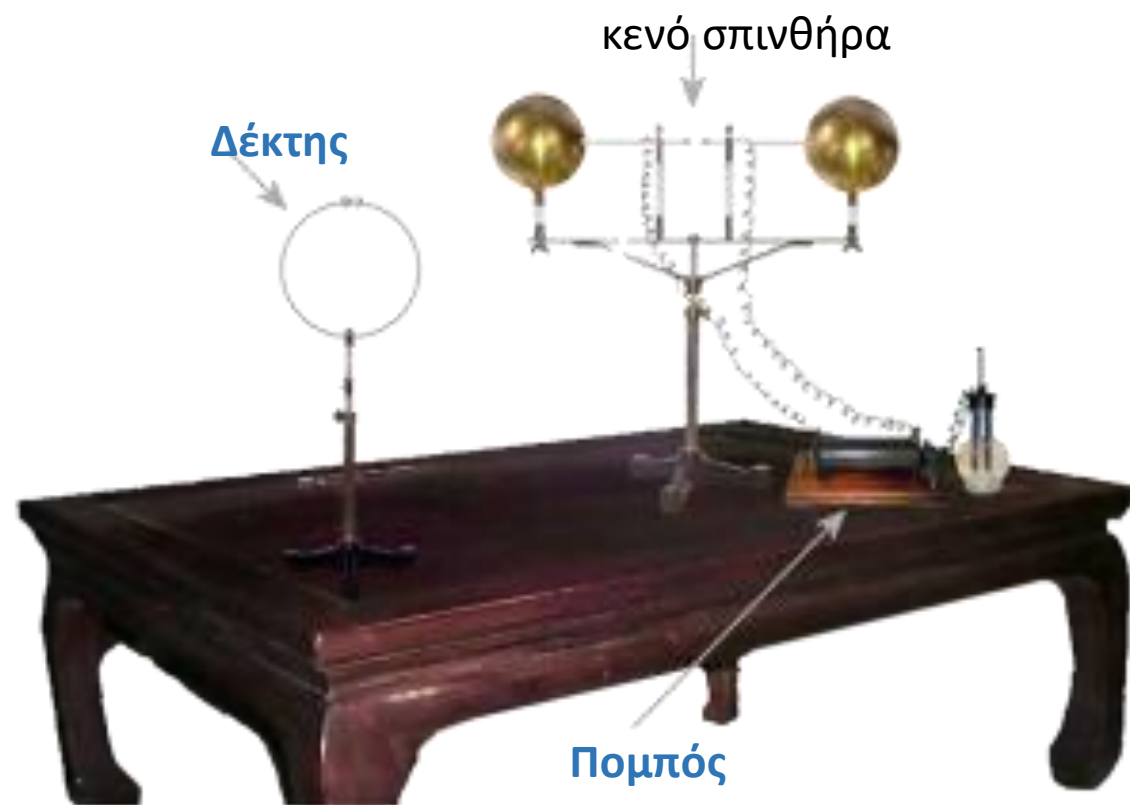
Παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Ο Γερμανός φυσικός Heinrich Rudolph Hertz πρώτος παρήγαγε και ανίχνευσε για πρώτη φορά στο εργαστήριο ΗΜ κύματα χρησιμοποιώντας κυκλώματα LC (1886).



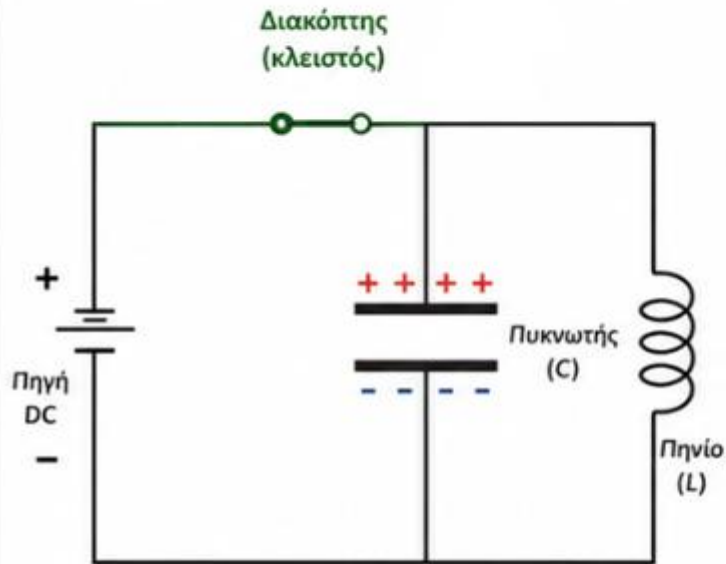
Δέκτης

Πομπός



Πείραμα του Hertz

- 1.** Ο διακόπτης είναι κλειστός και φορτίζεται ο πυκνωτής.

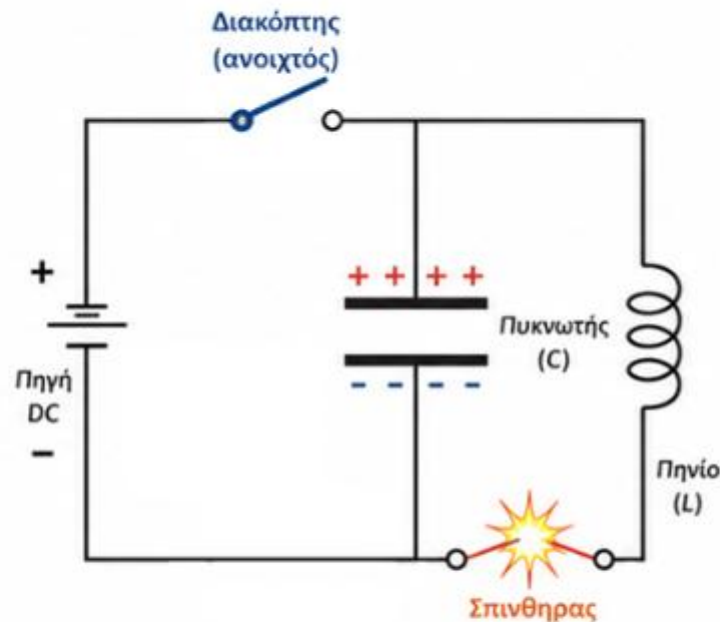


Ρεύμα από την πηγή φορτίζει τον πυκνωτή. Αποθηκεύεται ενέργεια στο ηλεκτρικό πεδίο του πυκνωτή.

Ενέργεια: Ηλεκτρική (στον πυκνωτή)

- 2.** Ο διακόπτης ανοίγει.

Σε πρώτο χρόνο, ο πυκνωτής είναι φορτισμένος και δημιουργείται σπινθηρας.

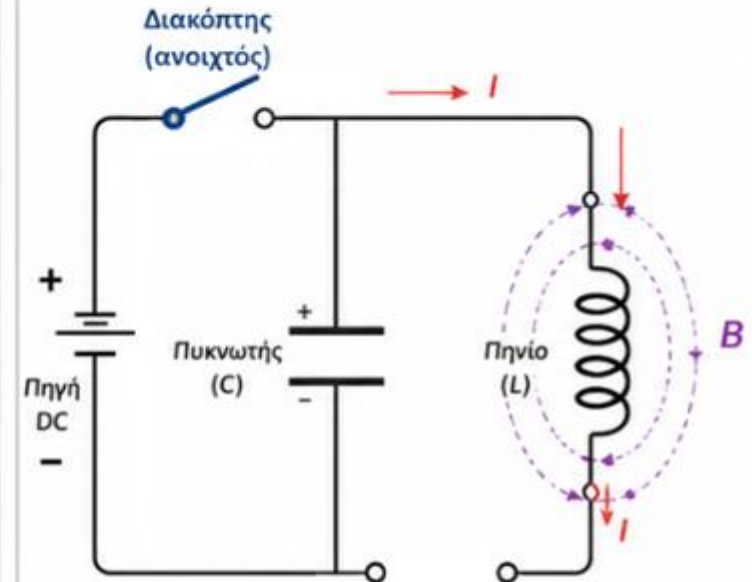


Η τάση του πυκνωτή είναι μέγιστη. Ο σπινθηρας κλείνει στιγμιαία το κύκλωμα και το ρεύμα αρχίζει να ρέει.

Ενέργεια: Ηλεκτρική (στον πυκνωτή)

- 3.** Αποθηκεύεται ενέργεια στο πηνίο.

Το ρεύμα αυξάνεται και δημιουργείται μαγνητικό πεδίο στο πηνίο.



Ο πυκνωτής εκφορτίζεται. Το ρεύμα στο πηνίο είναι μέγιστο και η ενέργεια είναι αποθηκευμένη στο μαγνητικό πεδίο του πηνίου.

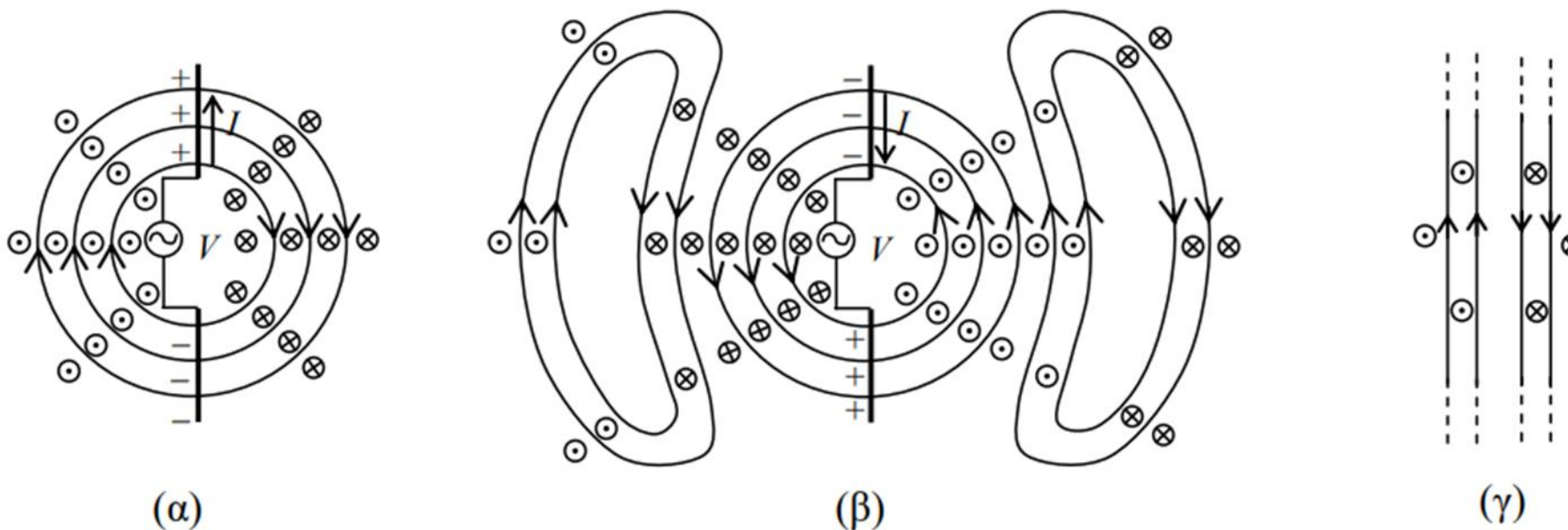
Ενέργεια: Μαγνητική (στο πηνίο)

Παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

- Ο Hertz δημιούργησε μια διάταξη που ονομάζεται «ταλαντωτής διάκενου σπινθήρα» που παρήγαγε ηλεκτρικούς σπινθήρες υψηλής συχνότητας και βασιζόταν σε ένα απλό κύκλωμα LC.
- Όταν ένας πυκνωτής φορτίζεται, αποθηκεύει ενέργεια σε ένα **ηλεκτρικό πεδίο** μεταξύ των πλακών του. Όταν ένα ρεύμα ρέει μέσω ενός πηνίου, αποθηκεύει ενέργεια σε ένα **μαγνητικό πεδίο** γύρω του. Σε ένα κύκλωμα LC, ο πυκνωτής και το πηνίο ανταλλάσσουν ενέργεια μεταξύ φορτίσεων και εκφορτίσεων του πυκνωτή (οι πλάκες φορτίζονται εναλλάξ θετικά και αρνητικά), ανάμεσα στο ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο, προκαλώντας την αλλαγή της φοράς του ρεύματος εναλλάξ προς τη μία και την άλλη κατεύθυνση σε μια συγκεκριμένη συχνότητα (ηλεκτρική ταλάντωση). Αυτή η συχνότητα καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του πηνίου και του πυκνωτή στο κύκλωμα και είναι γνωστή ως συχνότητα συντονισμού.
- Στη συνέχεια χρησιμοποίησε μια δεύτερη διάταξη, που ονομάζεται «δέκτης», που αποτελείται από ένα βρόχο σύρματος με ένα μικρό κενό μέσα.
- Όταν ο ταλαντωτής διάκενου σπινθήρα ενεργοποιήθηκε, παρήγαγε ηλεκτρομαγνητικά κύματα που ταξίδευαν στον αέρα και τα συλλαμβάνονταν από τον δέκτη.
- Ο Hertz μπόρεσε να ανιχνεύσει αυτά τα κύματα παρατηρώντας μικρούς σπινθήρες που εμφανίζονταν στο κενό στο βρόχο σύρματος του δέκτη.

Παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Έστω δυο αγώγιμοι ράβδοι που συνδέονται μεταξύ τους με μια εναλλασσόμενη πηγή ρεύματος. Έστω ότι η πάνω ράβδος έχει θετικά φορτία και η κάτω αρνητικά.



Δημιουργείται μαγνητικό πεδίο σύμφωνα με το ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό. Όταν αλλάξει η φορά του ρεύματος αλλάζει και το μαγνητικό πεδίο. Τα πεδία που δημιουργούνται εναλλάξ διαδίδονται στον χώρο.

Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μπορούν να διαδοθούν στο κενό επειδή αποτελούνται από ταλαντευόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που δημιουργούν το ένα το άλλο καθώς κινούνται στο κενό. Αυτή η αυτοσυντηρούμενη φύση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος του επιτρέπει να ταξιδεύει απεριόριστα χωρίς να χάνει ενέργεια ή να διαχέεται.

Από τις εξισώσεις Maxwell προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 \vec{E} \quad \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 \vec{B}$$

Τελεστής Laplace σε καρτεσιανές συντεταγμένες

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Αυτές είναι οι κυματικές (διαφορικές) εξισώσεις που εμπλέκουν χωρική και χρονική μεταβολή των πεδίων.

Εξισώσεις ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Οι λύσεις της κυματικής εξίσωσης που προκύπτουν για το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο έχουν τη μορφή:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \phi)}$$

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \vec{B}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \phi)}$$

- E_0 είναι το πλάτος του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου
- B_0 είναι το πλάτος του διανύσματος του μαγνητικού πεδίου
- $\vec{k}$ είναι το διάνυσμα κύματος (κυματαριθμός), **το οποίο δείχνει προς την κατεύθυνση διάδοσης** και έχει μέγεθος $2\pi/\lambda$, όπου λ το μήκος κύματος του κύματος
- $\vec{r}$ είναι το διάνυσμα θέσης ενός σημείου στο χώρο
- ω είναι η γωνιακή συχνότητα του κύματος, η οποία σχετίζεται με τη συχνότητά του f ως $\omega = 2\pi f$
- t είναι χρόνος
- ϕ είναι η σταθερά φάσης, που καθορίζει την αρχική φάση του κύματος.

Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο είναι ορθογώνια μεταξύ τους και προς την κατεύθυνση διάδοσης
Το κύμα ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός, η οποία δίνεται από την εξίσωση $c = \lambda f = \omega/k$.

Εξισώσεις ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Σε απλοποιημένη μορφή οι εξισώσεις του αρμονικού κύματος γράφονται ως

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$$

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \vec{B}_0 \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$$

Μέτρο
κυματάριθμού k : $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ Όπου λ το μήκος
κύματος της ΗΜ
ακτινοβολίας

$$\omega = 2\pi f \Rightarrow \omega = k\lambda f \Rightarrow \frac{\omega}{k} = \frac{\lambda}{T} = \lambda f = v$$

Το διάνυσμα του κυματάριθμου έχει διεύθυνση
τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος

Αν η διεύθυνση διάδοσης
είναι η x τότε

$$\vec{E}(x, t) = E_0 \cos(kx - \omega t) \hat{y}$$

$$\vec{B}(x, t) = B_0 \cos(kx - \omega t) \hat{z}$$

Αφού η διεύθυνση
διάδοσης είναι η x ο
κυματαριθμός γίνεται:

$$\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \hat{x}$$

Εξισώσεις ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Αν η διεύθυνση διάδοσης είναι η x τότε

$$\vec{E}(x, t) = E_0 \cos(kx - \omega t) \hat{y}$$

$$\vec{B}(x, t) = B_0 \cos(kx - \omega t) \hat{z}$$

Αν η διεύθυνση διάδοσης είναι η y τότε

$$\vec{E}(y, t) = E_0 \cos(ky - \omega t) \hat{z}$$

$$\vec{B}(y, t) = B_0 \cos(ky - \omega t) \hat{x}$$

Αν η διεύθυνση διάδοσης είναι η z τότε

$$\vec{E}(z, t) = E_0 \cos(kz - \omega t) \hat{x}$$

$$\vec{B}(z, t) = B_0 \cos(kz - \omega t) \hat{y}$$

- Αν η διεύθυνση διάδοσης είναι η x τότε υποχρεωτικά τα πεδία ταλαντώνονται το ένα στην y και το άλλο στη z διεύθυνση
- Αν η διεύθυνση διάδοσης είναι η y τότε υποχρεωτικά τα πεδία ταλαντώνονται το ένα στην x και το άλλο στη z διεύθυνση
- Αν η διεύθυνση διάδοσης είναι η z τότε υποχρεωτικά τα πεδία ταλαντώνονται το ένα στην x και το άλλο στη y διεύθυνση

Εξισώσεις ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων - παράδειγμα

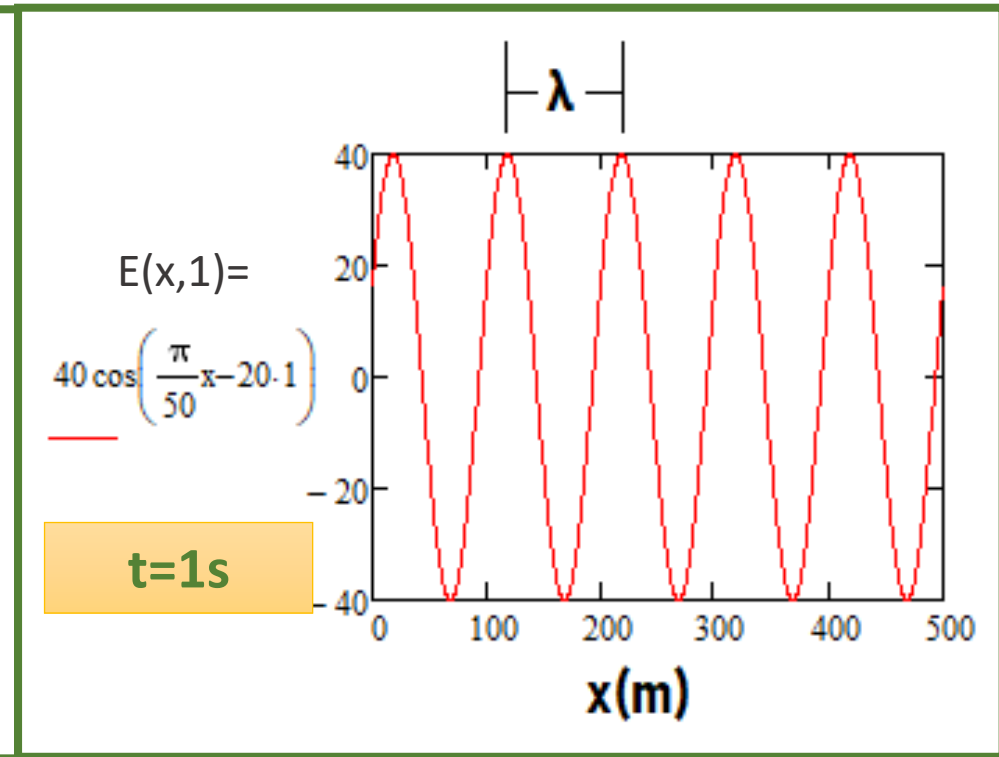
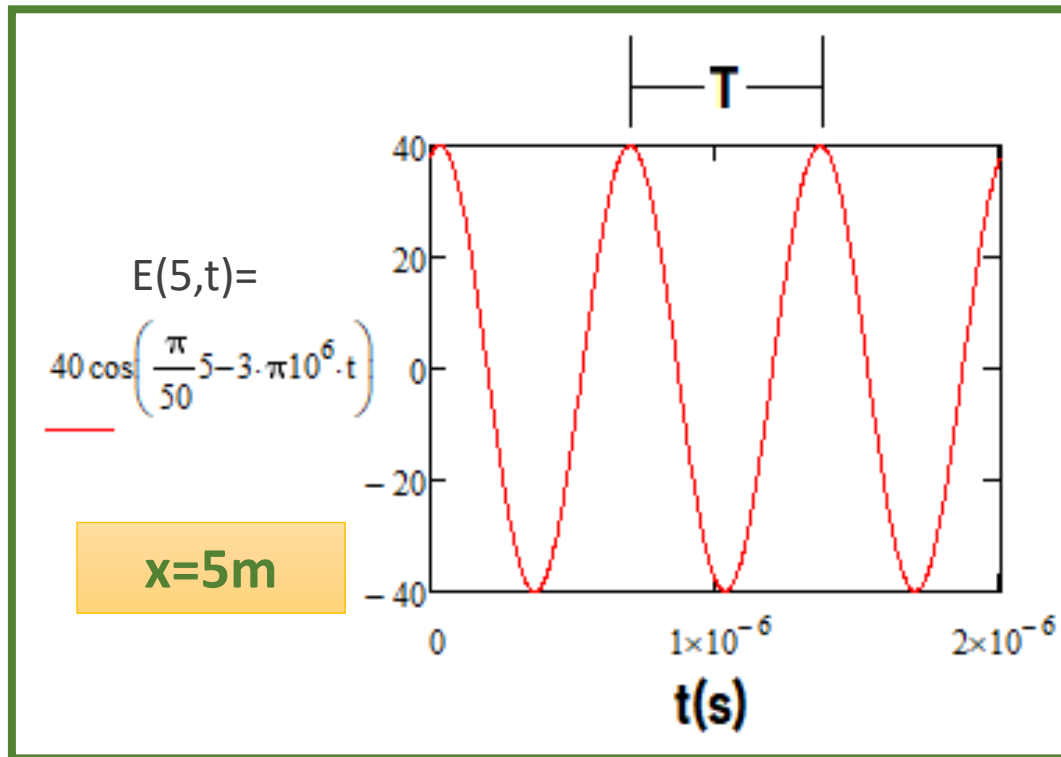
Έστω ότι η διεύθυνση διάδοσης ενός ΗΜ κύματος είναι η x τότε:

$$\vec{E}(x,t) = 40 \cos\left(\frac{\pi}{50}x - 3\pi 10^6 t\right) \hat{y}$$

$$\vec{B}(x,t) = 0.02 \cos\left(\frac{\pi}{50}x - 3\pi 10^6 t\right) \hat{z}$$

Οι εξισώσεις μας περιγράφουν πώς μεταβάλλονται τα διανύσματα του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου ως προς τον χρόνο και τον χώρο. Το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου ταλαντώνεται στον άξονα y και του μαγνητικού πεδίου στον άξονα z

- $E_0 = 40 \text{ N/m}$
- $B_0 = 0.02 \text{ T}$
- $k = \pi/50 \text{ m}^{-1}$
- $\omega = 3\pi 10^6 \text{ rad/s}$
- $\phi = 0$



Ταχύτητα του φωτός

Στο κενό

Ταχύτητα του φωτός στο **κενό**. Από τις εξισώσεις Maxwell προκύπτει ότι:

$$c^2 = \frac{1}{\mu_o \epsilon_o} \Rightarrow c = \frac{1}{\sqrt{\mu_o \epsilon_o}} \quad \text{Όπου } \epsilon_o \text{ και } \mu_o \text{ η ηλεκτρική και η μαγνητική διαπερατότητα στο κενό αντίστοιχα}$$

$$c = \sqrt{\frac{1}{4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}} \times 8.85 \times 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}}} \Rightarrow c = 3.00 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Στην ύλη

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}}$$

Όπου ϵ και μ η ηλεκτρική και η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού

Ο λόγος $n=c/v$ ονομάζεται δείκτης διάθλασης, είναι χαρακτηριστικός κάθε υλικού

Εξισώσεις ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Αποδεικνύεται ότι ο λόγος των πλατών του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι ίδιος με το λόγο των πλατών των στιγμιαίων τιμών τους.

Στο κενό

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$$

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \vec{B}_0 \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$$

$$\frac{E_0}{B_0} = \frac{E}{B} = c$$

Στην ύλη

$$\frac{E_0}{B_0} = \frac{E}{B} = v$$

Ερωτήσεις

- Σε τι μορφή αποθηκεύεται ενέργεια στον πυκνωτή στο πείραμα του Hertz για την παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων;
- Σε τι μορφή αποθηκεύεται ενέργεια στο πηνίο στο πείραμα του Hertz για την παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων;
- Από τι εξαρτάται η συχνότητα συντονισμού σε ένα κύκλωμα LC για την παραγωγή ΗΜ κυμάτων;
- Τι είναι η ηλεκτρική ταλάντωση που εκτελεί το κύκλωμα LC για την παραγωγή ΗΜ κυμάτων;
- Ποια είναι η διεύθυνση του διανύσματος του κυματαριθμού;
- Με τι ταχύτητα διαδίδονται τα ΗΜ κύματα στο κενό;
- Με τι ταχύτητα διαδίδονται τα ΗΜ κύματα στην ύλη;
- Πώς ονομάζεται ο λόγος της ταχύτητας του φωτός στο κενό ως προς την ταχύτητα του φωτός στη ύλη;