



ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

Οπτικές επικοινωνίες – κυματοδηγοί

Διδάσκων: Τσορματζόγλου Ανδρέας

Κύματα

Κύμα: μια επαναλαμβανόμενη διαταραχή που διαδίδεται στον χώρο με ή χωρίς της χρήση ενός φυσικού μέσου. Είναι ένας τρόπος μεταφοράς ενέργειας από ένα σημείο σε ένα άλλο.

Παραδείγματα κυμάτων:

- φως
- κύματα σε υγρά
- ήχος
- ραδιοκύματα

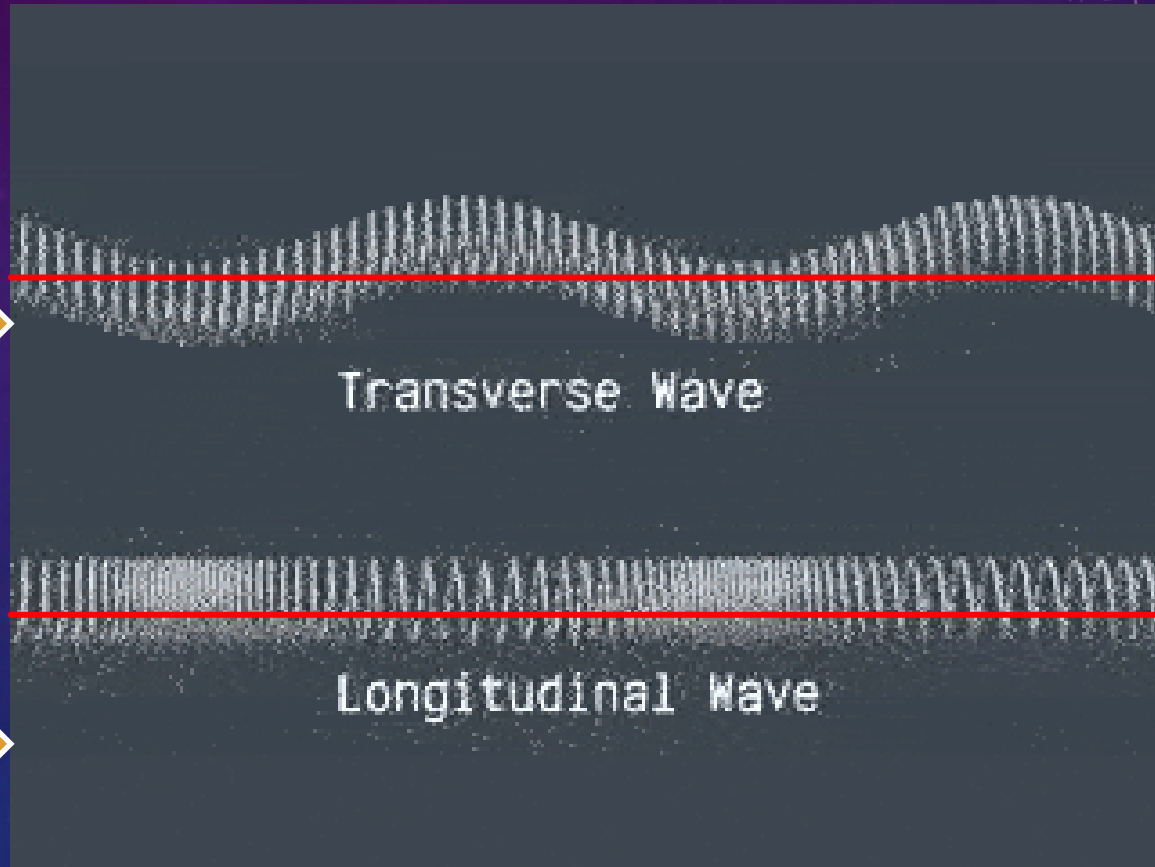
Ελεύθερος χώρος: χώρος χωρίς μαγνητικά πεδία, πεδία βαρύτητας, συμπαγή σώματα και ιονισμένα σωματίδια

Μέσο: Οποιοδήποτε υλικό (στερεό, υγρό, αέριο) εντός του οποίου διαδίδεται ένα κύμα.

Κύματα

Εγκάρσια – Διαμήκη Κύματα

- **Εγκάρσια** όταν η διεύθυνση ταλάντωσης είναι κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης
- **Διαμήκη** όταν η διεύθυνση ταλάντωσης είναι παράλληλη στη διεύθυνση διάδοσης



Διεύθυνση
Διάδοσης

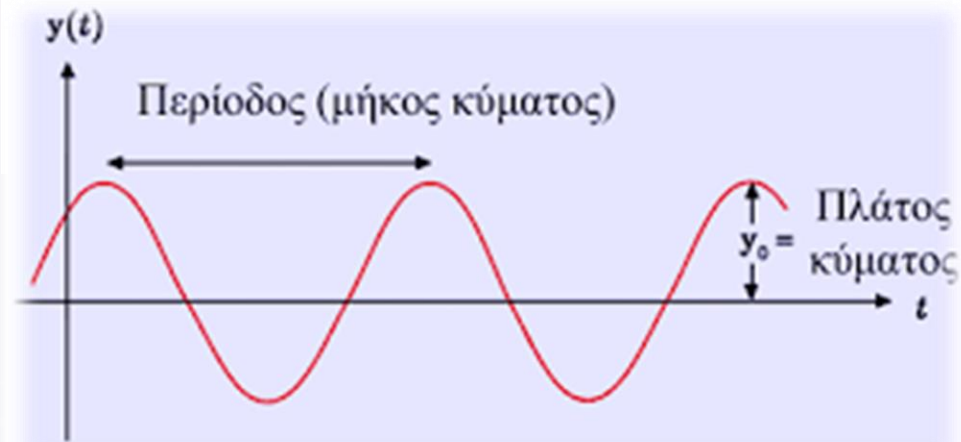
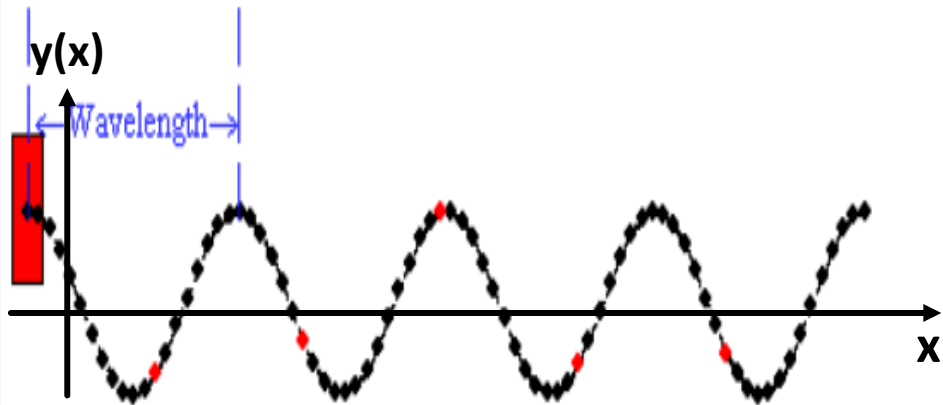
Διεύθυνση
Διάδοσης

Κύματα

Βασική Κυματική Εξίσωση

$$y=y(x,t)$$

$$v = \lambda f$$



■ Συχνότητα f :

- γνώρισμα της πηγής
- ανεξάρτητη από το μέσο μετάδοσης (Hz)

■ Μήκος Κύματος λ :

- απόσταση μεταξύ διαδοχικών κορυφών (ή κοιλάδων) του κύματος (m)

■ Ταχύτητα Διάδοσης v (m/sec)

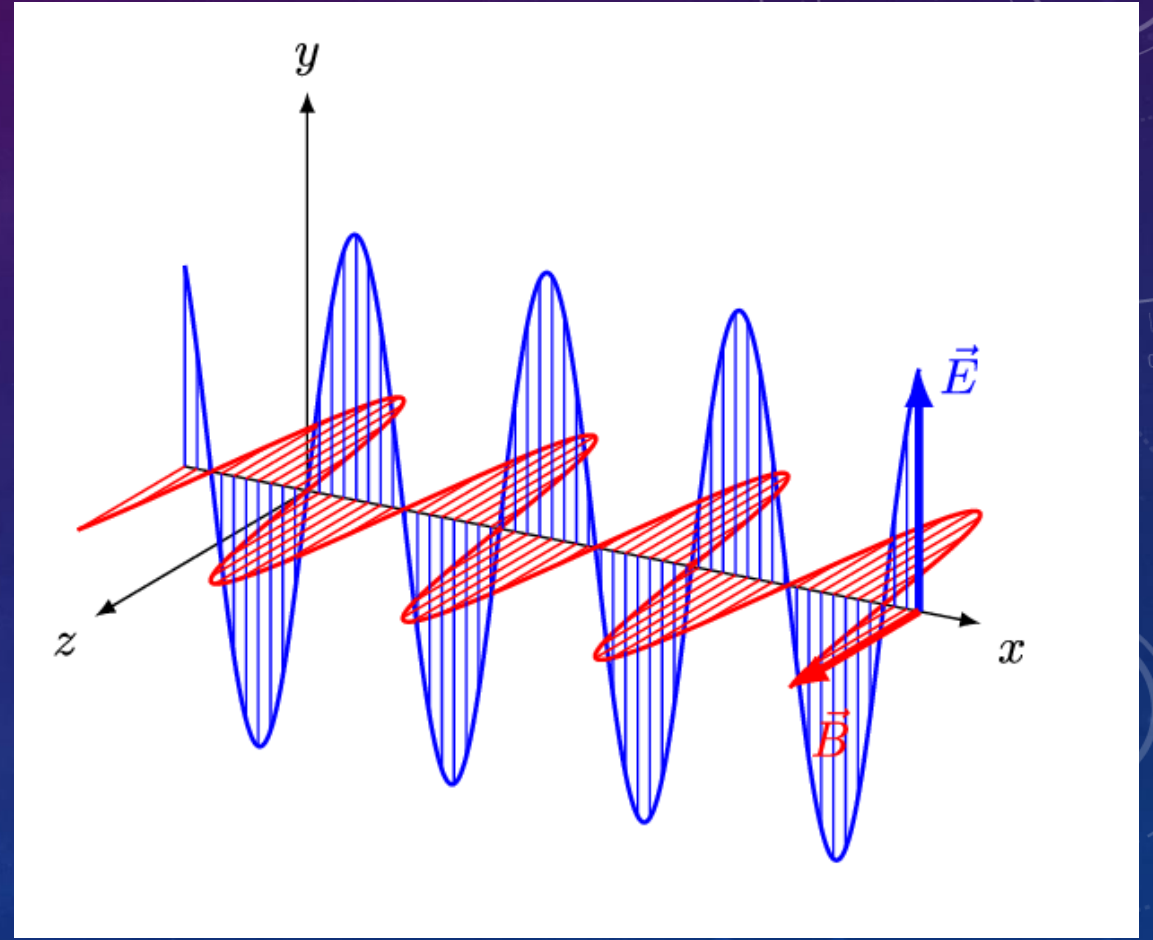
■ Περίοδος Κύματος:

- χρόνος για την εκτέλεση ενός κύκλου, μετά τη λήξη του οποίου το κύμα επαναλαμβάνεται (sec)

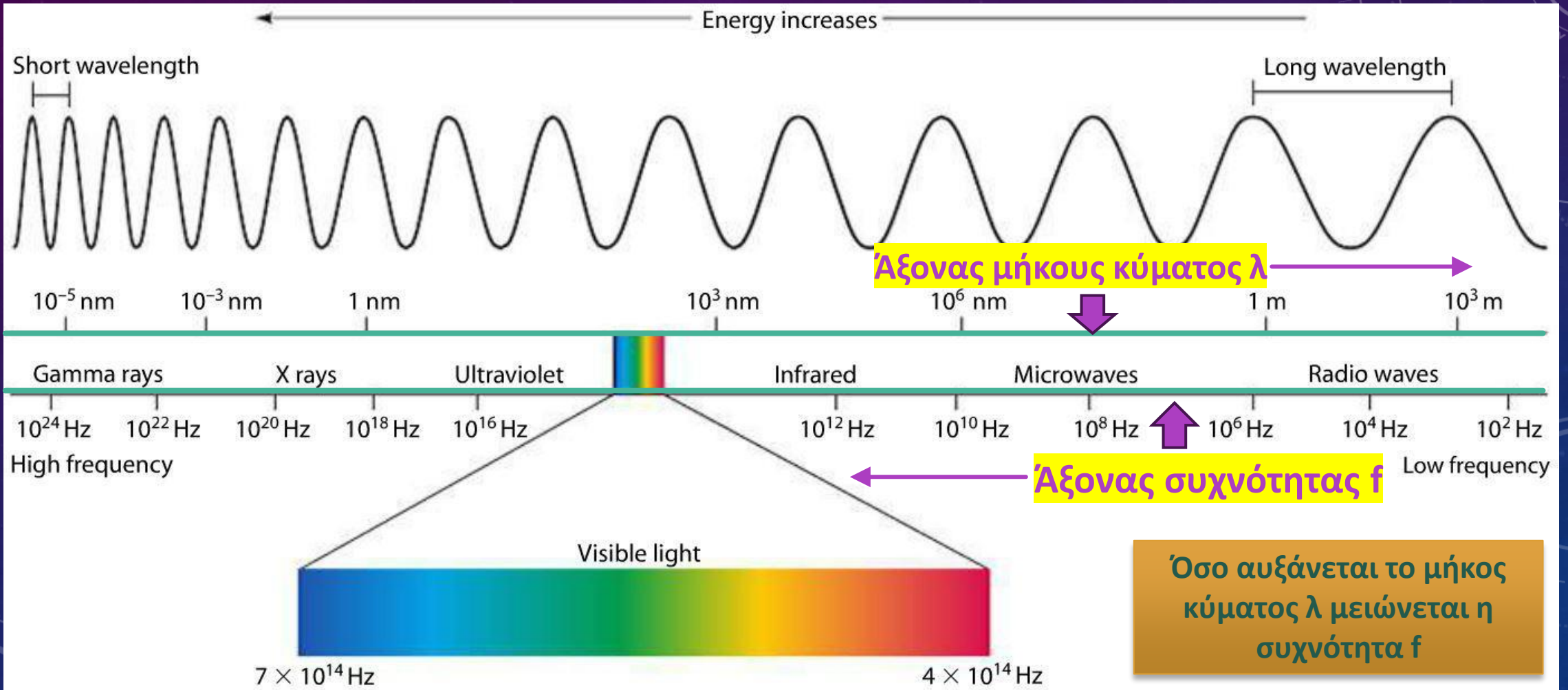
$$T = 1/f$$

Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

- Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι συγχρονισμένα ταλαντούμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία τα οποία ταλαντώνονται σε κάθετα επίπεδα μεταξύ τους και κάθετα προς την διεύθυνση διάδοσης.
- Διαδίδονται στο κενό με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα του φωτός αλλά και μέσα στην ύλη με ταχύτητα λίγο μικρότερη απ' την ταχύτητα του φωτός.



Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

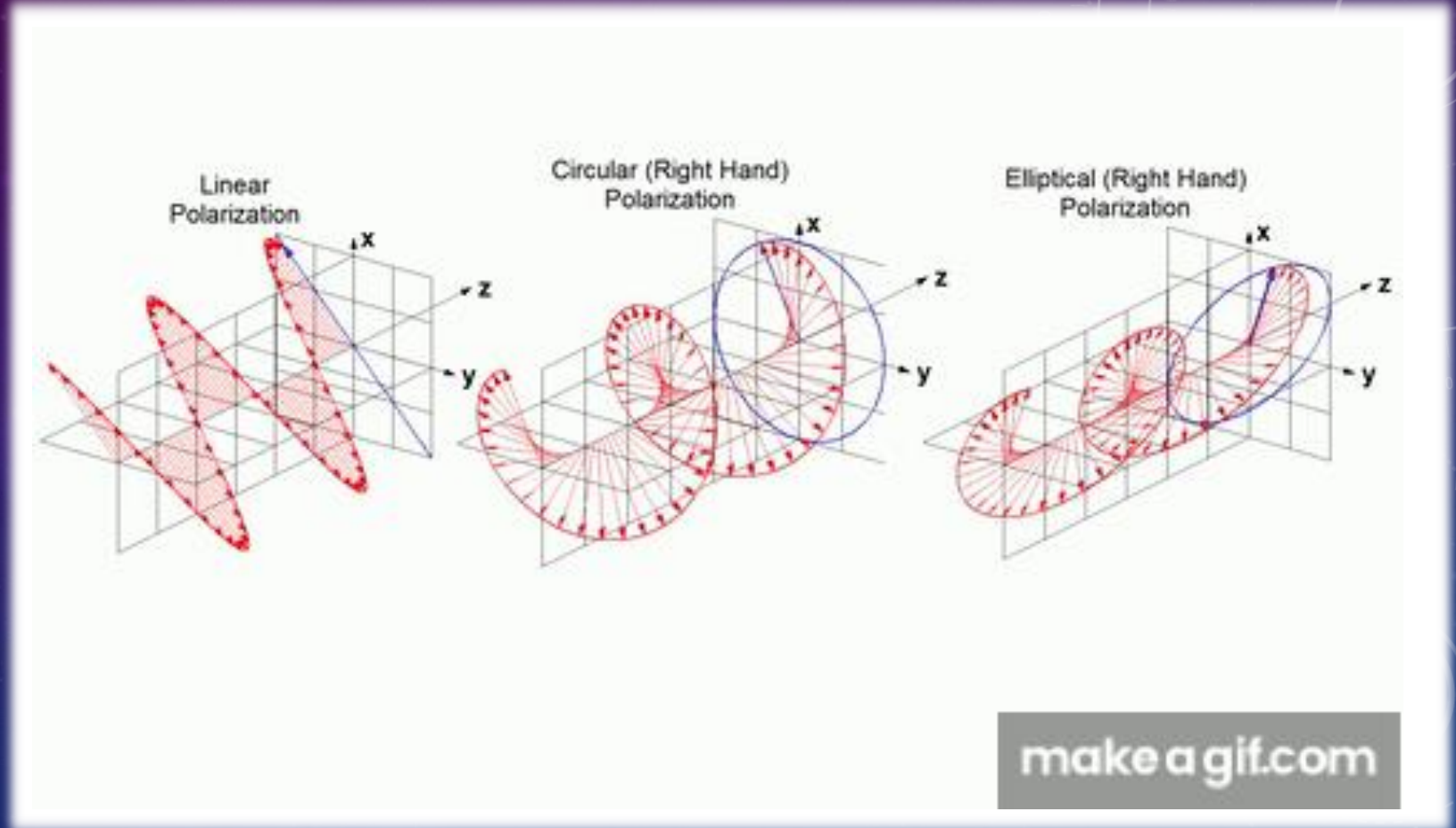


Πόλωση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων - 1

Γραμμικά πολωμένο κύμα: Τα πεδία E και B ταλαντώνονται σε ένα σταθερό επίπεδο και η κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου παραμένει σταθερή με το χρόνο.

Κυκλικά πολωμένο κύμα: Τα πεδία E και B **περιστρέφονται** σε επίπεδο κάθετο προς την κατεύθυνση διάδοσης, διαγράφοντας έναν κύκλο. Τα κυκλικά πολωμένα κύματα μπορεί να είναι είτε δεξιόστροφα είτε αριστερόστροφα.

Ελλειπτικά πολωμένο κύμα: Τα πεδία E και B ταλαντώνονται σε ελλειπτικό σχήμα. Το επίπεδο ταλάντωσης των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων έχει κλίση ως προς την κατεύθυνση διάδοσης.

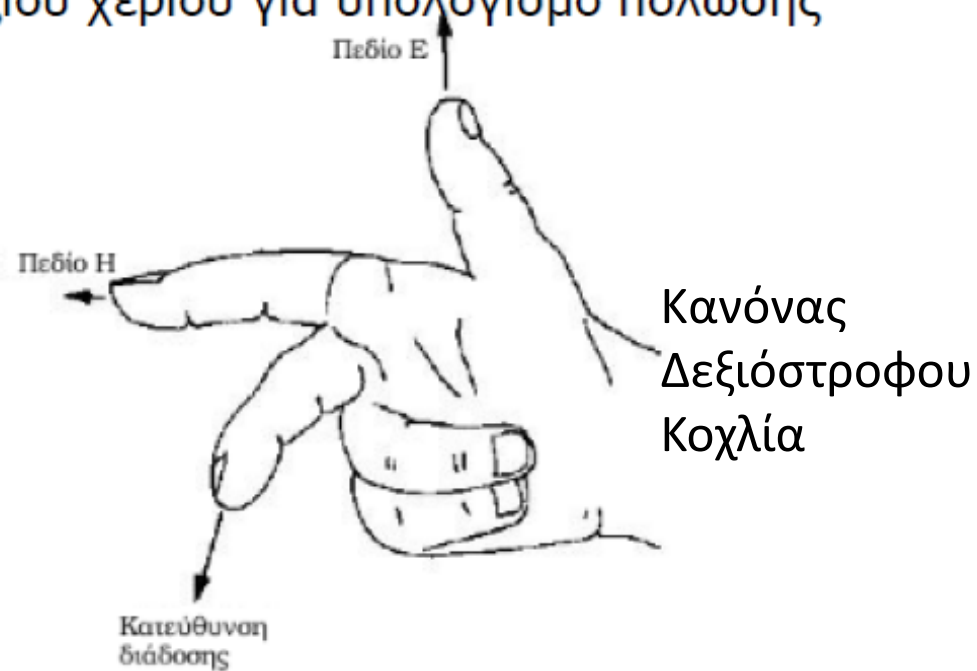


Στο σχήμα φαίνεται μόνο η ταλάντωση του ηλεκτρικού πεδίου. Το μαγνητικό πεδίο που εδώ δεν φαίνεται είναι πάντα κάθετο στο ηλεκτρικό πεδίο

Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Πόλωση ΗΜ κυμάτων

- Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη είναι η γραμμική πόλωση
- Η κατεύθυνση της πόλωσης είναι ίδια με την κατεύθυνση της κεραίας
 - κάθετη κεραία → κάθετη πόλωση
 - οριζόντια κεραία → οριζόντια πόλωση
- Κανόνας του δεξιού χεριού για υπολογισμό πόλωσης



Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ:

Πυκνότητες:

- Πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου (ρ)
- Πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος (J) (Πηγές του πεδίου)

Πεδιακά Μεγέθη:

- Ένταση ηλεκτρικού πεδίου (E)
- Πυκνότητα ηλεκτρικής ροής ή διηλεκτρική μετατόπιση (D) $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$
- Ένταση μαγνητικού πεδίου (H)
- Μαγνητική επαγωγή ή πυκνότητα μαγνητικής ροής (B) $\vec{H} = \mu_0^{-1} \vec{B} - \vec{M}$

Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ MAXWELL ΣΤΟ ΚΕΝΌ (FREE SPACE)

Name	Integral equations	Differential equations
Gauss's law	$\oiint_{\partial\Omega} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \iiint_{\Omega} \rho dV$	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$
Gauss's law for magnetism	$\oiint_{\partial\Omega} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
Maxwell–Faraday equation (Faraday's law of induction)	$\oint_{\partial\Sigma} \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = -\frac{d}{dt} \iint_{\Sigma} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
Ampère's circuital law (with Maxwell's addition)	$\oint_{\partial\Sigma} \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \mu_0 \left(\iint_{\Sigma} \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} + \epsilon_0 \frac{d}{dt} \iint_{\Sigma} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \right)$	$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$

Lorentz Force Law

$$\vec{F} = q \left(\vec{E} + \vec{v} \times \mu_0 \vec{H} \right)$$

Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ MAXWELL ΣΤΗΝ ΥΛΗ

Name	Integral equations (SI convention)	Differential equations (SI convention)
Gauss's law	$\oiint_{\partial\Omega} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \iiint_{\Omega} \rho_f dV$	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_f$
Ampère's circuital law (with Maxwell's addition)	$\oint_{\partial\Sigma} \mathbf{H} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \iint_{\Sigma} \mathbf{J}_f \cdot d\mathbf{S} + \frac{d}{dt} \iint_{\Sigma} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S}$	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_f + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$
Gauss's law for magnetism	$\oiint_{\partial\Omega} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
Maxwell–Faraday equation (Faraday's law of induction)	$\oint_{\partial\Sigma} \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = -\frac{d}{dt} \iint_{\Sigma} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$

Τρόποι μετάδοσης στην οπτική ίνα - 1

Κυματική εξίσωση που προκύπτει από τις εξισώσεις Maxwell.

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \mu \frac{\partial \vec{J}}{\partial t}$$

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

$$\nabla^2 \tilde{E} + n(\omega)k_0^2 \tilde{E} = 0$$

$$\tilde{E}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} E(t) e^{-i\omega t} dt$$

\tilde{E} ο μετασχηματισμός Fourier της έντασης E του ηλεκτρικού πεδίου

k_0 ο κυματαριθμός και $n = \begin{cases} n_1 & \rho < a \\ n_2 & \rho > a \end{cases}$

Τρόποι μετάδοσης στην οπτική ίνα - 2

- Τρόπος μετάδοσης ή οπτικός τρόπος μετάδοσης είναι μια συγκεκριμένη λύση της κυματικής εξίσωσης που ικανοποιεί τις οριακές συνθήκες της οπτικής ίνας.

Τρεις βασικοί τρόποι μετάδοσης:

- 1) Κυματοδηγούμενοι
- 2) Διαρρέοντες
- 3) Ακτινοβολίας

Λύση της κυματικής εξίσωσης:

$$\mathbf{E}_z = \begin{cases} AJ_m(p\rho)e^{im\varphi}e^{i\beta z} & \rho \leq a \\ CK_m(q\rho)e^{im\varphi}e^{i\beta z} & \rho > a \end{cases}$$

Τρόποι μετάδοσης στην οπτική ίνα - 2

J_m και K_m ειδικές συναρτήσεις Bessel και p, q παράμετροι που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του φωτός και της οπτικής ίνας. β είναι η σταθερά διάδοσης που υπό προϋποθέσεις μπορεί να ληφθεί ίση με τον κυματαριθμό

$$J_\alpha(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m! \Gamma(m + \alpha + 1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2m + \alpha}$$

$$AJ_m(p\rho)e^{im\varphi}e^{i\beta z} = AJ_m(p\rho)e^{im\varphi+i\beta z} = AJ_m(p\rho)e^{i(m\varphi+\beta z)}$$

$$e^{i\theta} = \cos(\theta) + i \sin(\theta) \quad (\text{Κανόνας Euler})$$

$$AJ_m(p\rho)e^{im\varphi+i\beta z} = AJ_m(p\rho)(\cos(m\varphi + \beta z) + i \sin(m\varphi + \beta z))$$

$$\text{Re}\left(AJ_m(p\rho)(\cos(m\varphi + \beta z) + i \sin(m\varphi + \beta z))\right) = AJ_m(p\rho)\cos(m\varphi + \beta z)$$

Τρόποι μετάδοσης στην οπτική ίνα - 3

$$E_z = AJ_m(p\rho) \cos(\beta z + m\varphi)$$

$$E_z = E_0 \cos(kz - \omega t)$$

$$E_z = \begin{cases} AJ_m(p\rho) e^{im\varphi} e^{i\beta z} & \rho \leq a \\ CK_m(q\rho) e^{im\varphi} e^{i\beta z} & \rho > a \end{cases} \quad \text{όπου} \quad p = k_0 \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{\lambda}$$

Μια σημαντική παράμετρος λαμβάνεται αν πολλαπλασιάσω το p με την ακτίνα του πυρήνα

$$V = ap = \frac{2\pi a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{\lambda}$$

Ο αριθμός V παίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της συνθήκης αποκοπής, δηλαδή πότε η ακτινοβολία διαφεύγει από την οπτική ίνα.

Ερωτήσεις

- Τι είναι ένα κύμα;
- Ποια κύματα ονομάζουμε διαμήκη και ποια εγκάρσια;
- Σε ένα διάγραμμα όπου στο y άξονα είναι το πλάτος ταλάντωσης και στον x άξονα ο χρόνος, τι συμβολίζει η απόσταση μεταξύ 2 διαδοχικών κορυφών;
- Σε ένα διάγραμμα όπου στο y άξονα είναι το πλάτος ταλάντωσης και στον x άξονα η μετατόπιση, τι συμβολίζει η απόσταση μεταξύ 2 διαδοχικών κορυφών;
- Τι είναι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα;
- Τι είναι η πόλωση σε ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα;
- Ποιες εξισώσεις περιγράφουν τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων;
- Οι εξισώσεις του Maxwell είναι οι ίδιες στο κενό και στην ύλη;
- Τι ονομάζεται τρόπος μετάδοσης σε μια οπτική ίνα;