



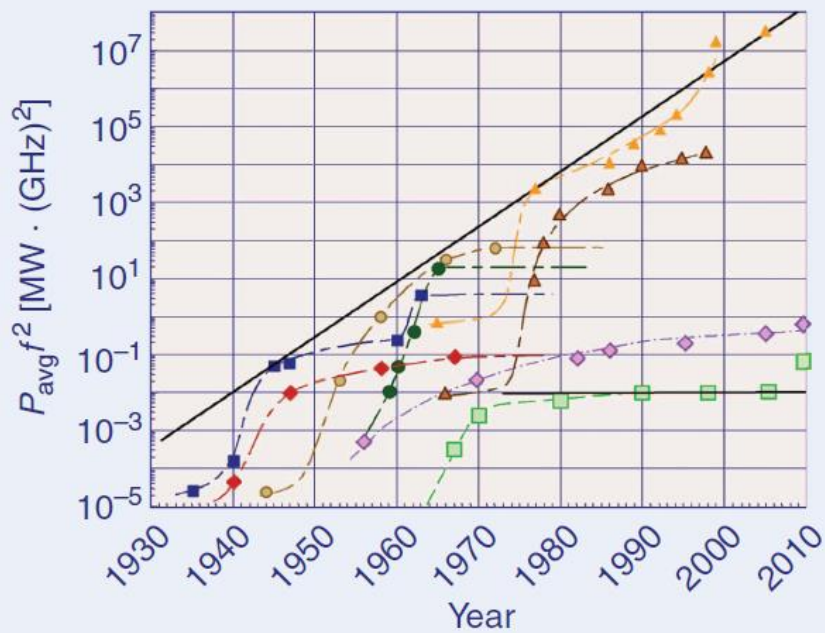
ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ ΡΑΔΙΟΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ (Ρ/Η)

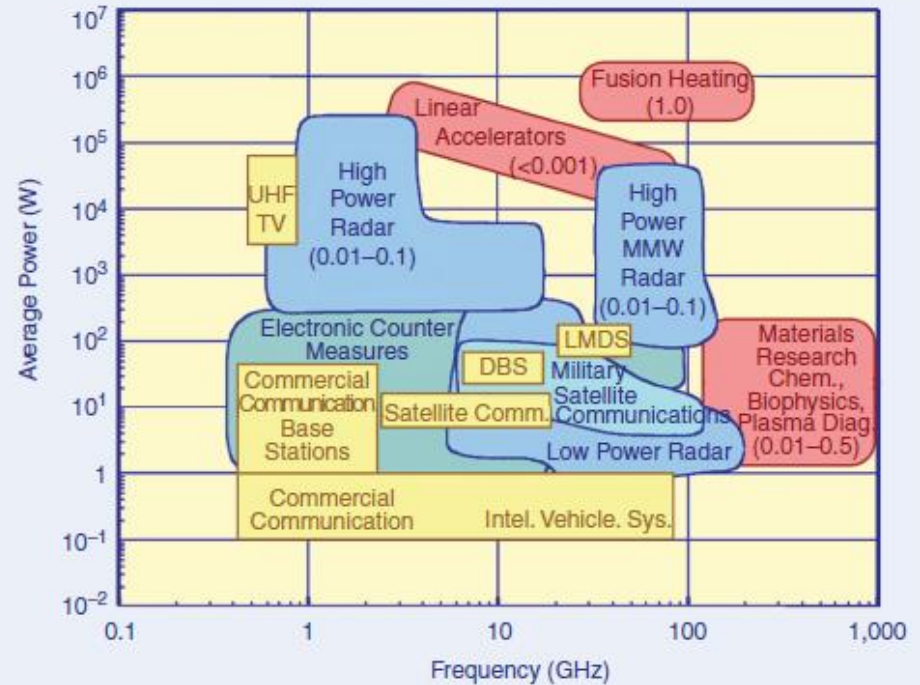
ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Γεώργιος Λάτσας

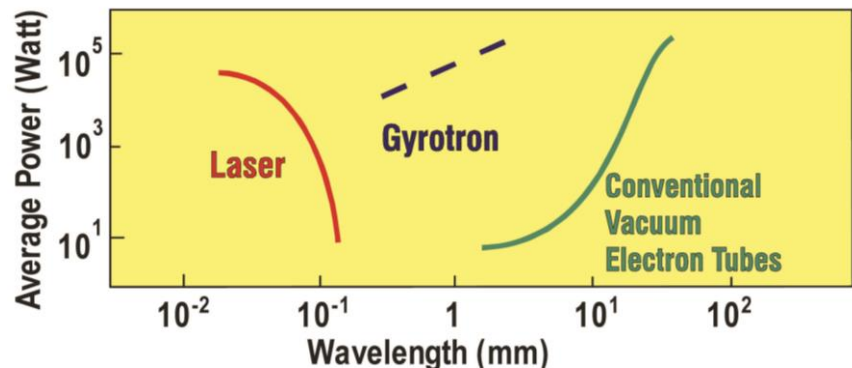
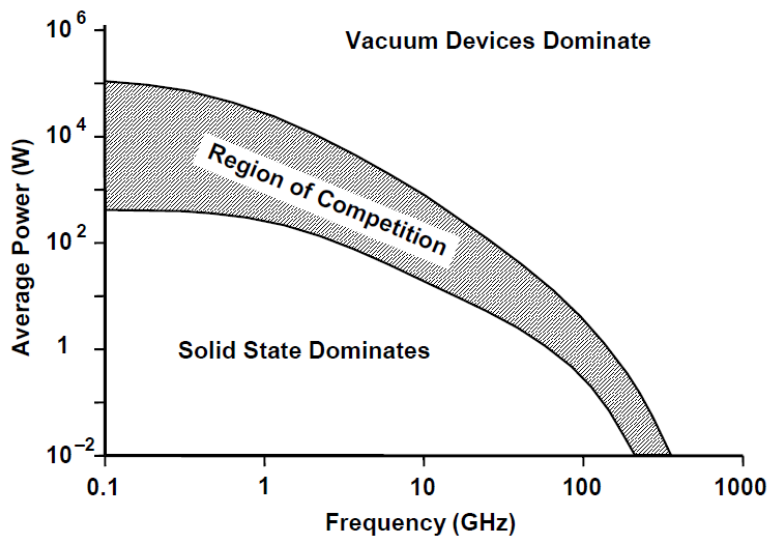
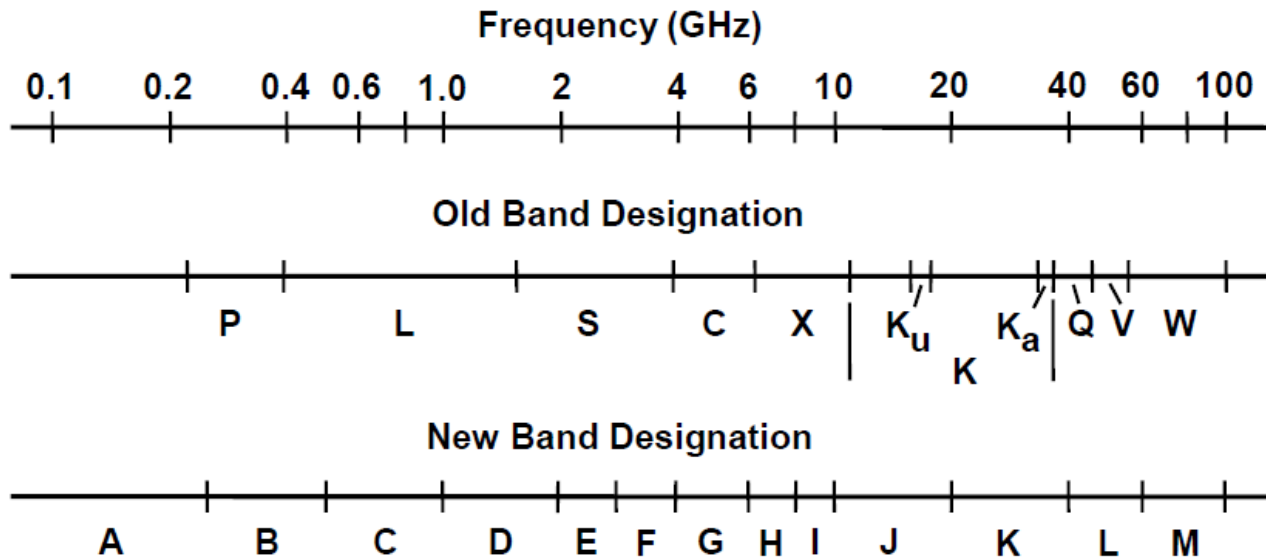
Μικροκυματικές Πηγές και Εφαρμογές



- | | |
|---------------------|-----------------------|
| ◆ Gridded Tubes | ◆ Helix TWT(PPM) |
| ■ Magnetron and CFA | ▲ Gyrotron |
| ● Klystron | ▲ Free Electron Laser |
| ● CC-TWT (Solenoid) | ■ Solid-State Devices |



Μικροκυματικό φάσμα και είδη πηγών

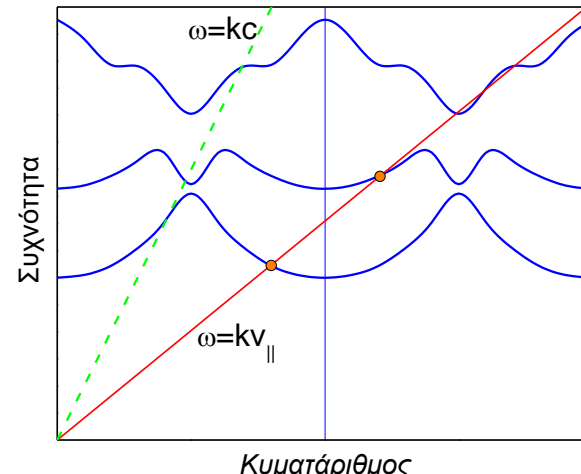
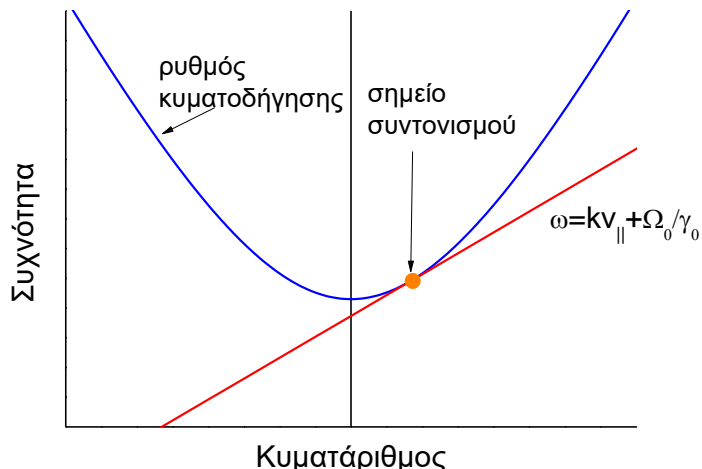


Γενικές Αρχές Μικροκυματικών Λυχνιών

- ◆ Δέσμη ηλεκτρονίων
- ◆ Αλληλεπίδραση με Η/Δ διάταξη (πχ. κοιλότητα)
- ◆ Μεταφορά ενέργειας από τα ηλεκτρόνια στο Η/Μ κύμα.
- ◆ Μέθοδοι μελέτης:
 - Εξισώσεις Maxwell – Εξισώσεις κίνησης ηλεκτρονίων
 - Στατιστική μελέτη (ως πλάσμα) – υπολογισμός πυκνότητας ρεύματος, Εξισώσεις Maxwell – Εξίσωση Vlasov
 - Χρήση ηλεκτρικών ισοδύναμων – αρνητική αντίσταση
- ◆ Ανάγκη χρήσης σχετικιστικής δυναμικής

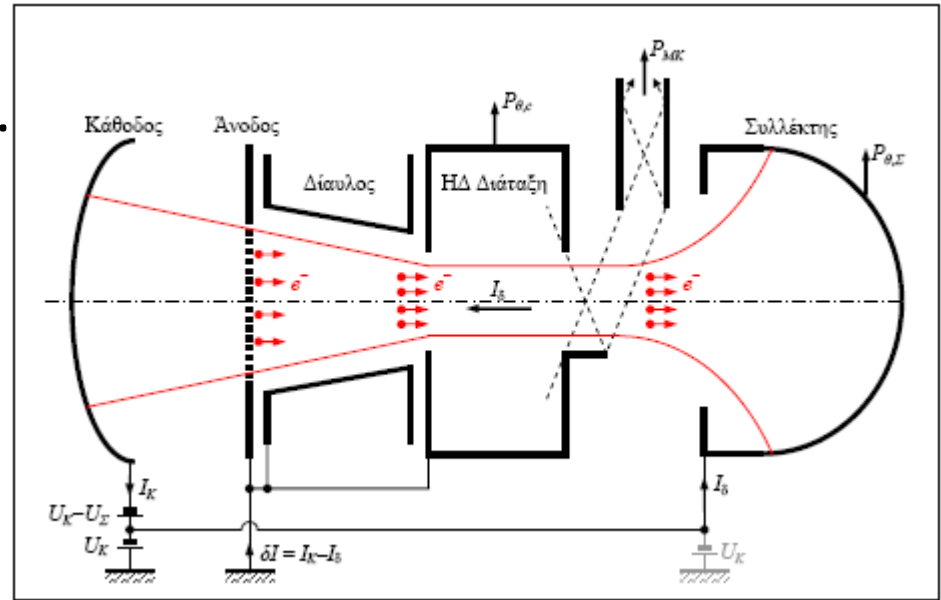
Αρχή παραγωγής μικροκυμάτων

- ◆ Ακτινοβολία δέσμης ηλεκτρονίων
 - Ισχύς δέσμης ηλεκτρονίων: $P_b = V_b I_b = (\gamma_0 - 1) mc^2 / e I_b$
- ◆ Μηχανισμοί ακτινοβολίας (συντονισμοί δέσμης)
 - Διαμήκης αλληλεπίδραση
 - συνθήκη συντονισμού: $\omega - kv_{\parallel} = 0$
 - Εγκάρσια αλληλεπίδραση δέσμης – κύματος
 - συνθήκη συντονισμού: $\omega - kv_{\parallel} = \Omega_0 / \gamma_0$
- ◆ Συντονισμός μικροκυματικής διάταξης.

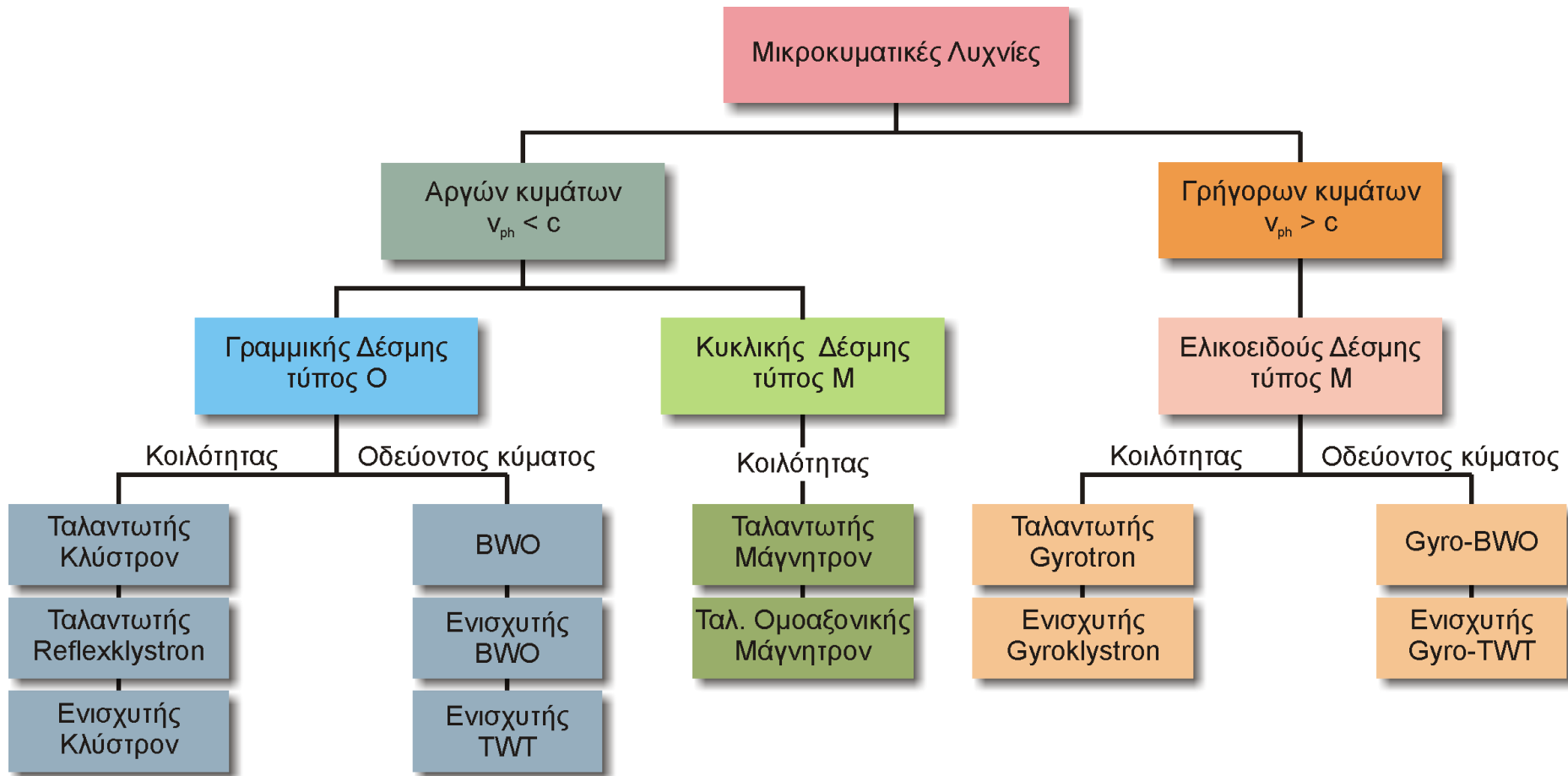


Βασική δομή μικροκυματικής λυχνίας

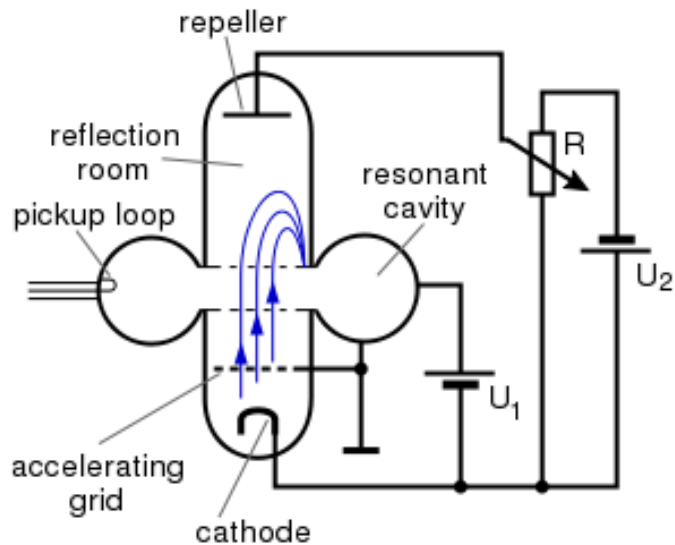
- ◆ Θερμιονική εκπομπή ηλεκτρονίων από την κάθοδο.
- ◆ Επιτάχυνση από διαφορά δυναμικού καθόδου-ανόδου.
- ◆ Όδευση στο διάυλο και διαμόρφωση τελικών χαρακτηριστικών.
- ◆ Αλληλεπίδραση με την ΗΔ διάταξη για παραγωγή μικροκυματικής ακτινοβολίας.
- ◆ Διαχωρισμός μικροκυμάτων από τη δέσμη.
- ◆ (Επιβράδυνση και) συλλογή της δέσμης στο συλλέκτη.



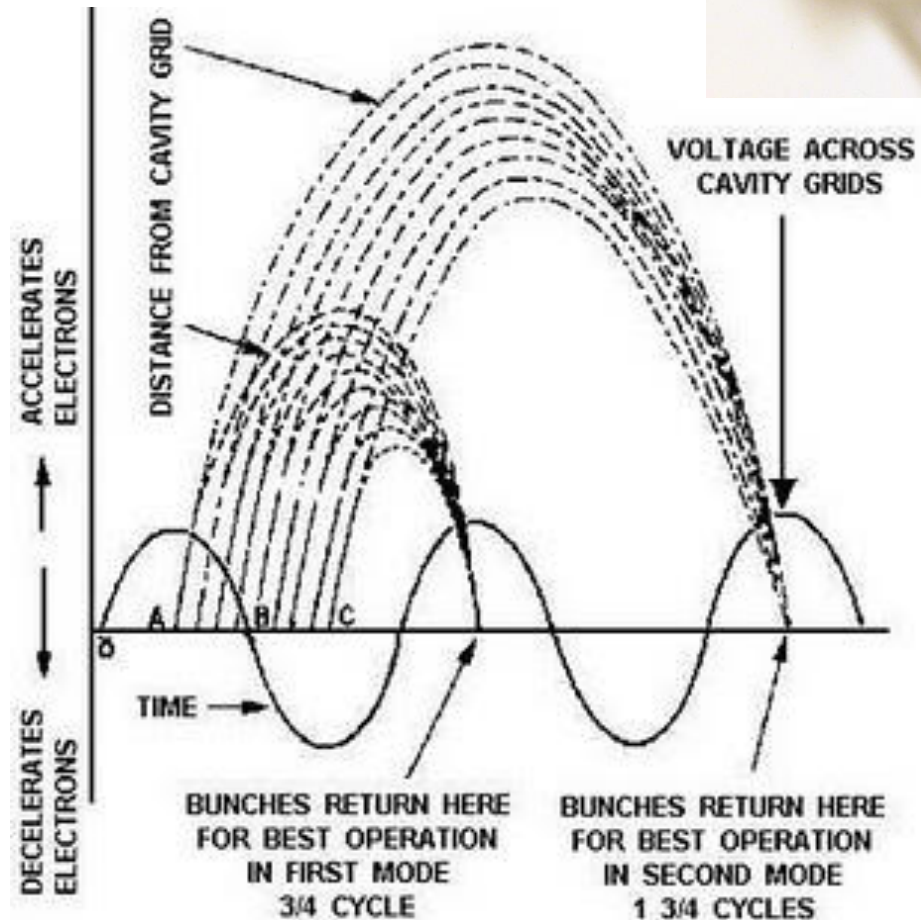
Ταξινόμηση Λυχνιών



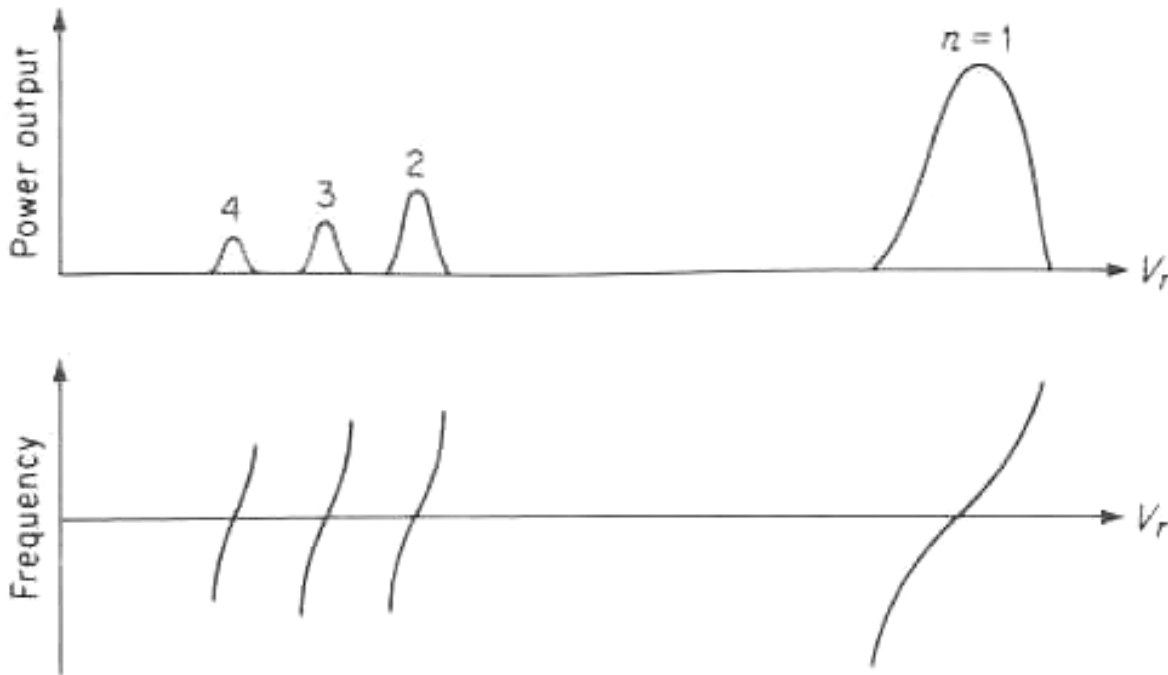
Λυχνία Κλύστρον Ανακλάσεως



- ◆ Διαμόρφωση ταχυτήτων λόγω υπάρχοντος σήματος
- ◆ Πακετοποίηση
- ◆ Επιβράδυνση πακέτου → ενίσχυση σήματος



Λυχνία Κλύστρον Ανακλάσεως



- ◆ Εξάρτηση ισχύος και συχνότητας από την τάση ανακλαστήρα.
- ◆ Διαφορετικοί τρόποι ταλάντωσης.

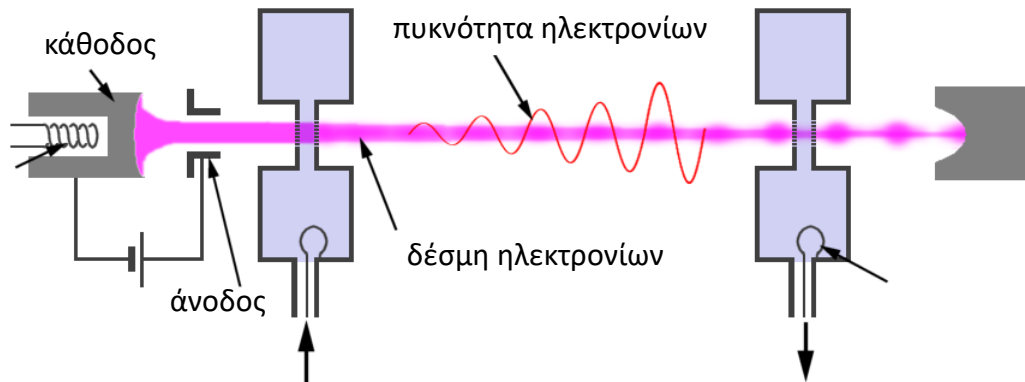
Επιδόσεις - εφαρμογές

- ◆ Συχνότητες: 1 – 30 GHz
- ◆ Ισχύς: 1W – 150 MW (pulse, relativistic)
- ◆ Απόδοση: 30% – 60%

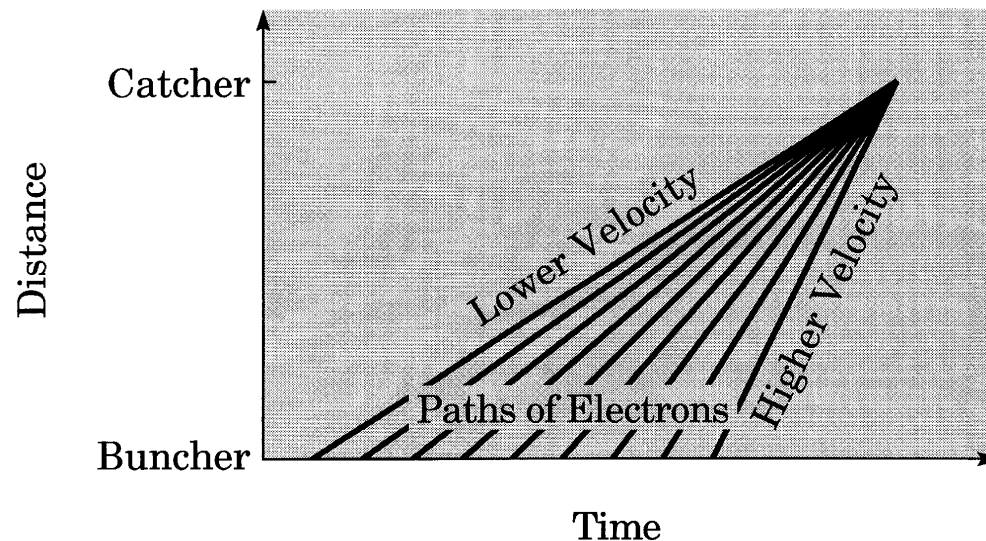
- ◆ Εφαρμογές
 - Ερευνητικά εργαστήρια
 - Επιταχυντές
 - Ραντάρ
 - Δορυφορικές επικοινωνίες
 - Επίγειες τηλεπικοινωνίες



Ενισχυτής Κλύστρον

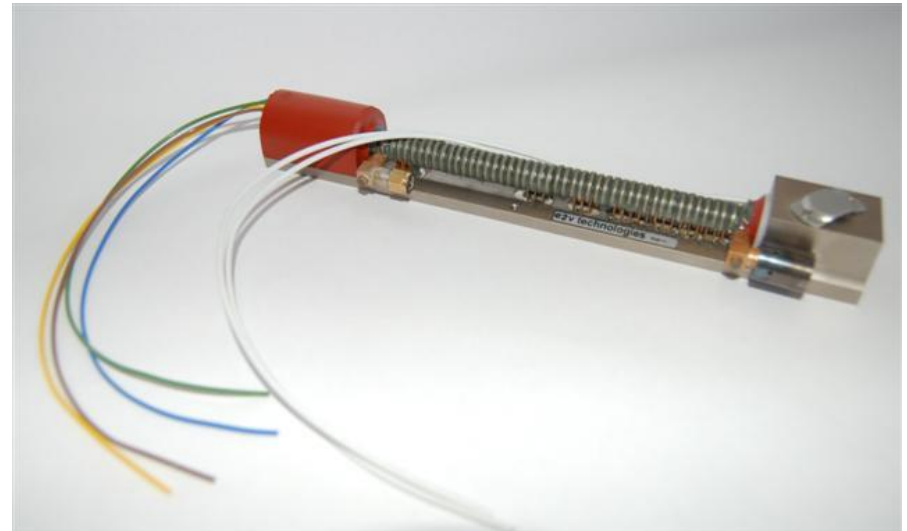
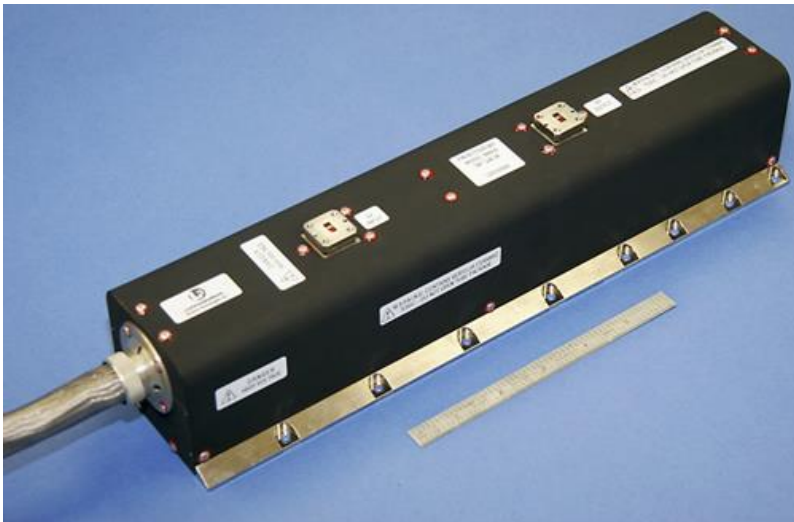


- ◆ Όμοια αρχή με ταλαντωτή κλύστρον.
- ◆ 1 ή περισσότερες κοιλότητες διαμόρφωσης ταχυτήτων από το ασθενές σήμα (πακετοποίησης).
- ◆ 1 κοιλότητα ενίσχυσης.



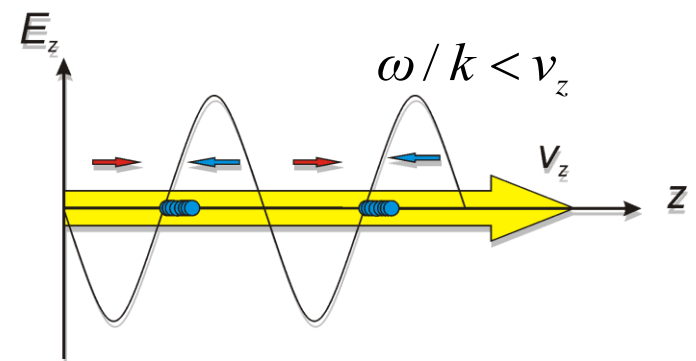
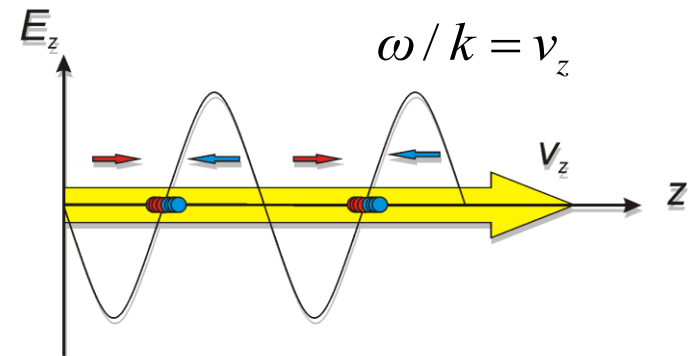
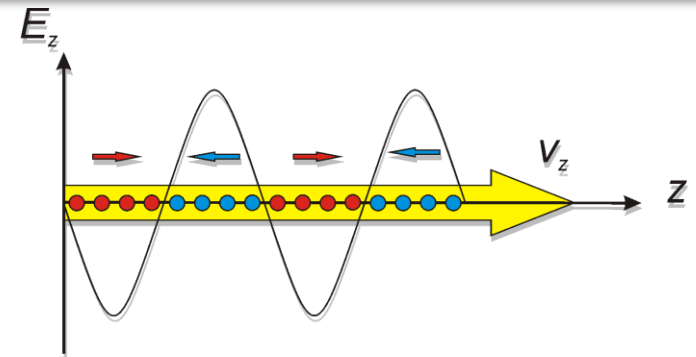
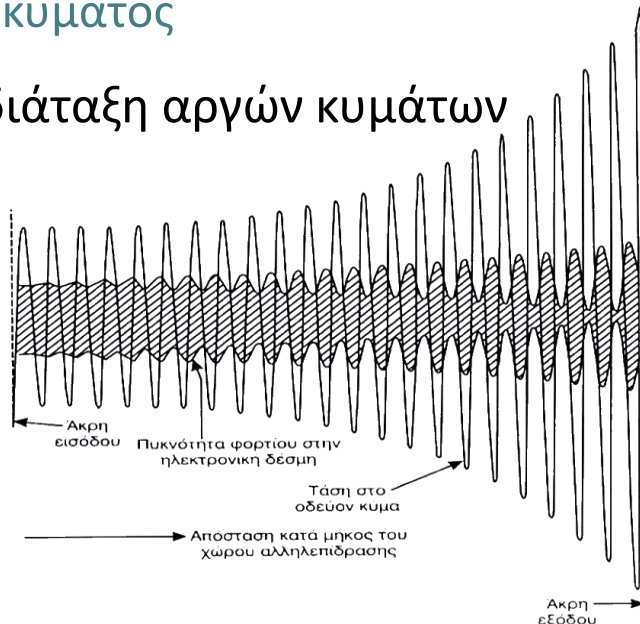
Λυχνία οδεύοντος κύματος (Λ.Ο.Κ.)

- ◆ Διάταξη ενίσχυσης μικροκυμάτων.
- ◆ Μεταφορά ενέργειας από δέσμη ηλεκτρονίων σε οδεύον κύμα (επιβράδυνση ηλεκτρονίων).
- ◆ Αλληλεπίδραση στο άξονα διάδοσης της δέσμης ηλεκτρονίων (μεταξύ E_z , v_z).



Αρχή παραγωγής μικροκυμάτων

- ◆ Συνθήκη: $u_\phi \approx u_z$
- ◆ Πακετοποίηση ηλεκτρονίων κοντά στα σημεία ισορροπίας.
- ◆ Αν $u_z > u_\phi$ τότε συνολικό ισοζύγιο ενέργειας θετικό για το κύμα.
 - Μεταφορά ενέργειας στο κύμα
 - Ενίσχυση κύματος
- ◆ Απαιτείται διάταξη αργών κυμάτων ($u_\phi < c$)



Λ.Ο.Κ. με έλικα

- ♦ Όδευση του κύματος σε έλικα.
- ♦ Η αξονική φασική ταχύτητα μικρότερη της ταχύτητας του φωτός.

$$v_{\phi} = \frac{c}{2\pi RN / L} < c$$

c : ταχύτητα φωτός

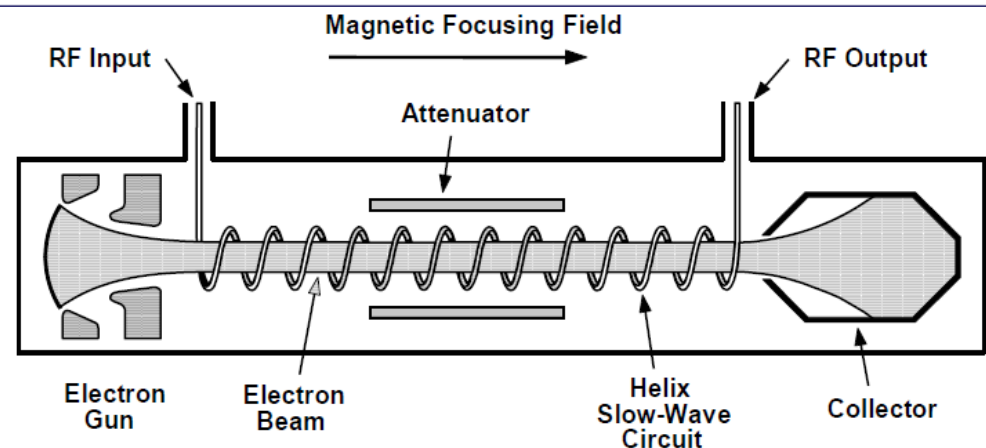
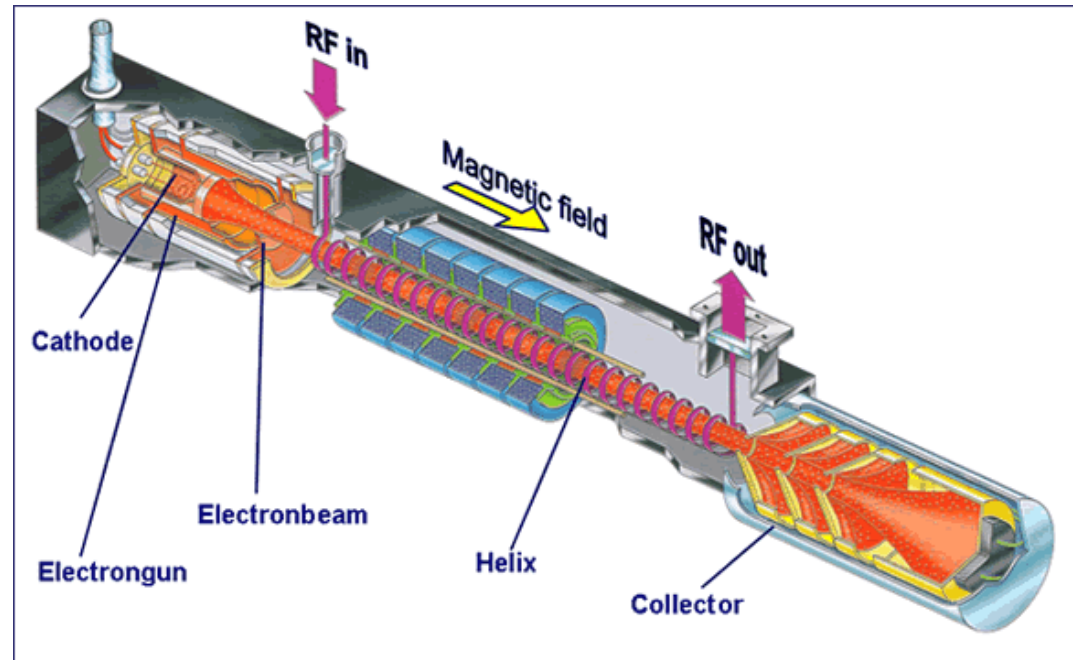
R : ακτίνα περιελίξεων

N : πλήθος περιελίξεων

L : μήκος έλικας

$2\pi R$: περιφέρεια μιας περιέλιξης

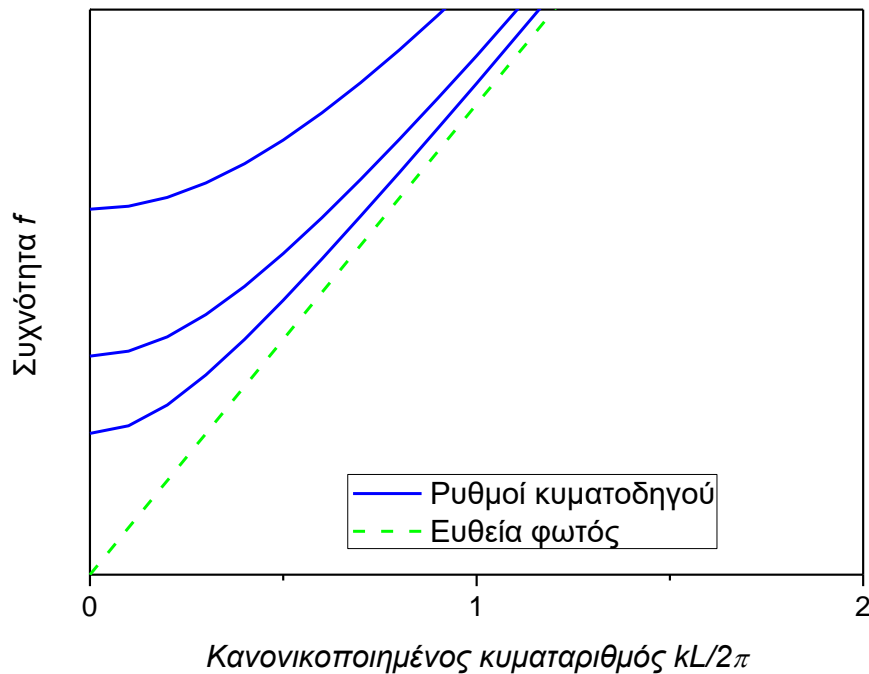
$2\pi RN$: συνολικό μήκος διαδρομής κύματος στην έλικα.



Διατάξεις αργών κυμάτων

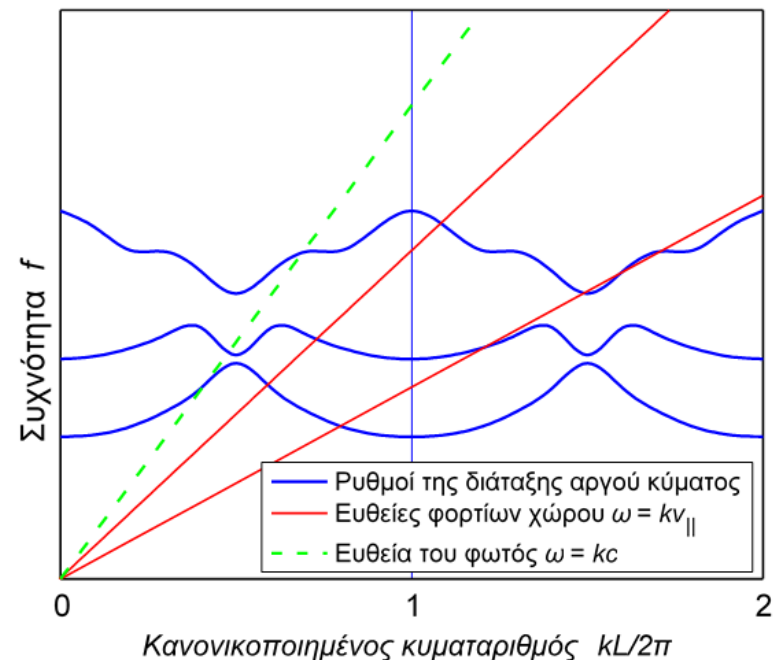
Λείος κυματοδηγός

- ◆ Υπερβολικές καμπύλες διασποράς.
- ◆ $U_\phi > c$



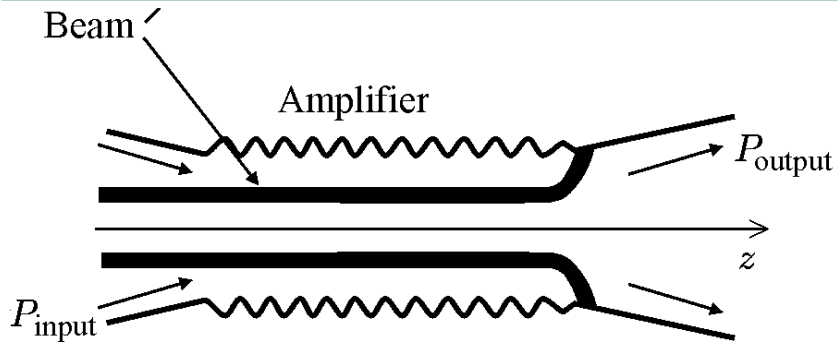
Περιοδική γεωμετρία

- ◆ Περιοδικές καμπύλες διασποράς.
- ◆ Υπάρχουν περιοχές με $U_\phi < c$

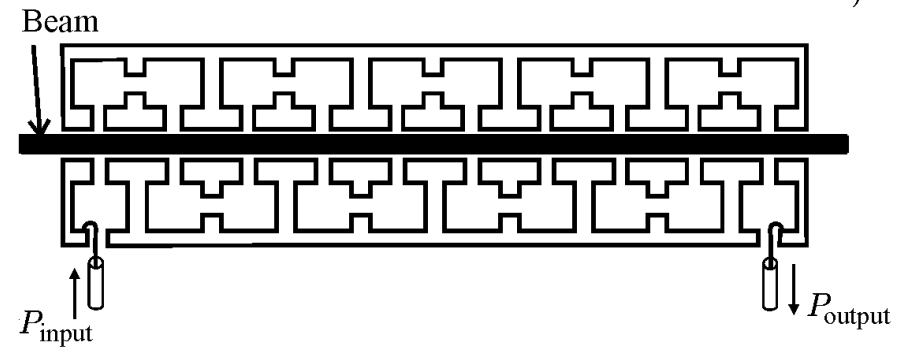


Άλλες μορφές Λ.Ο.Κ.

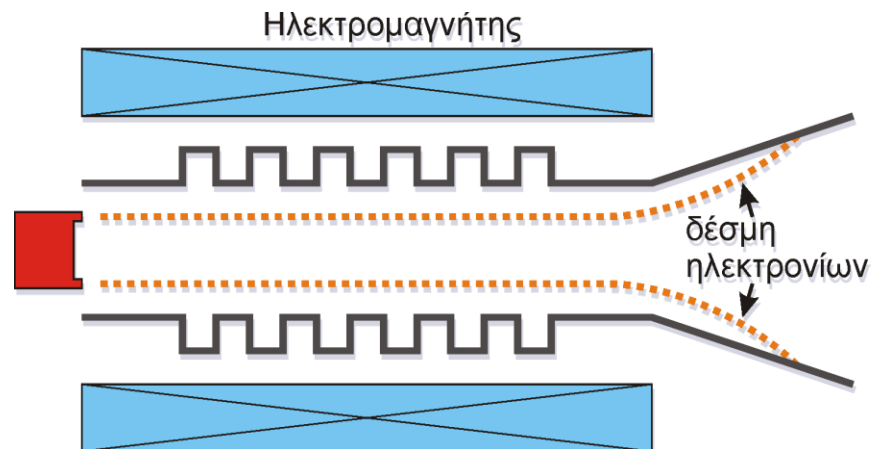
Αξονικές αυλακώσεις



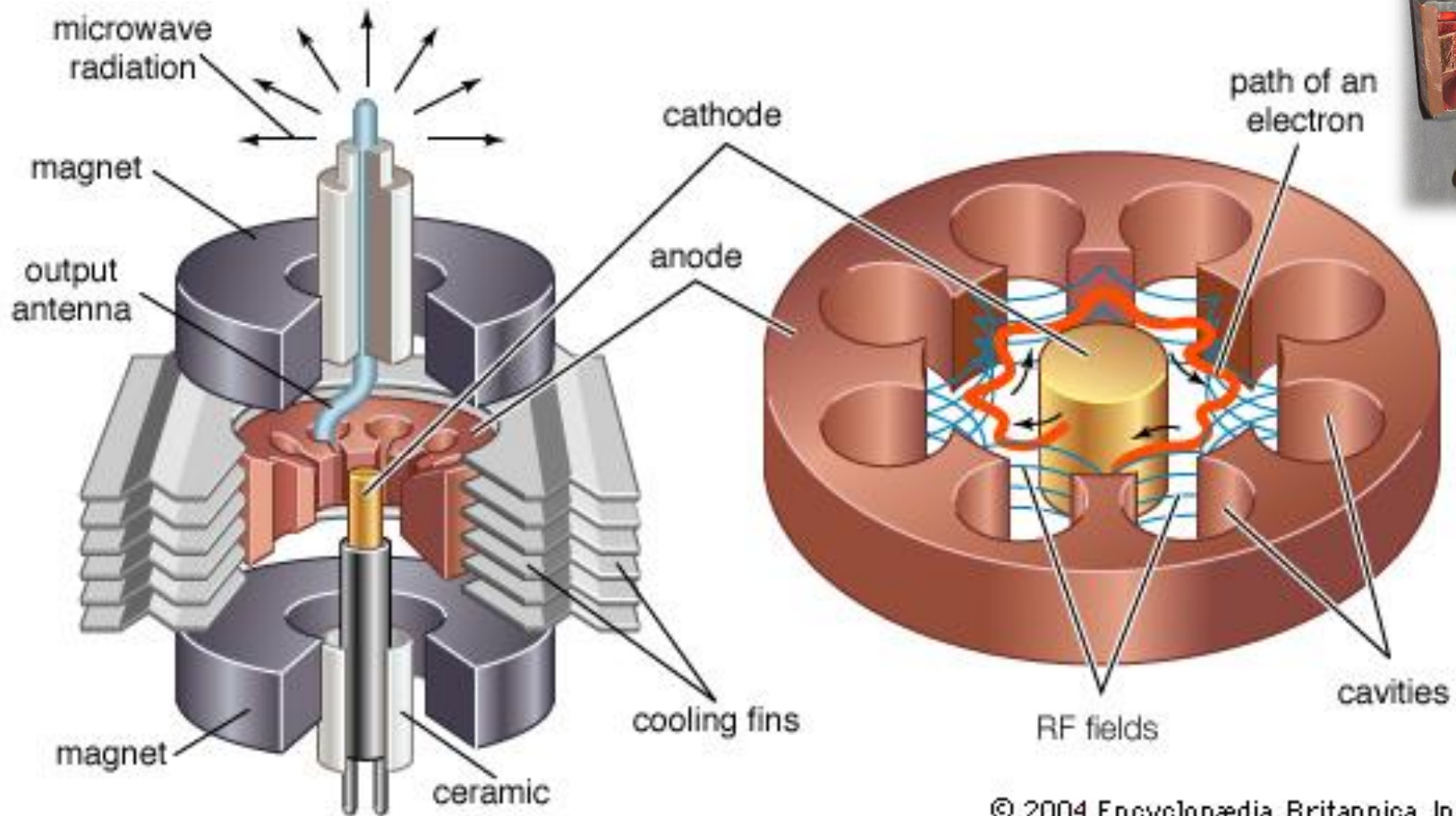
Συζευγμένες κοιλότητες



Η ΛΟΚ ως ταλαντωτής



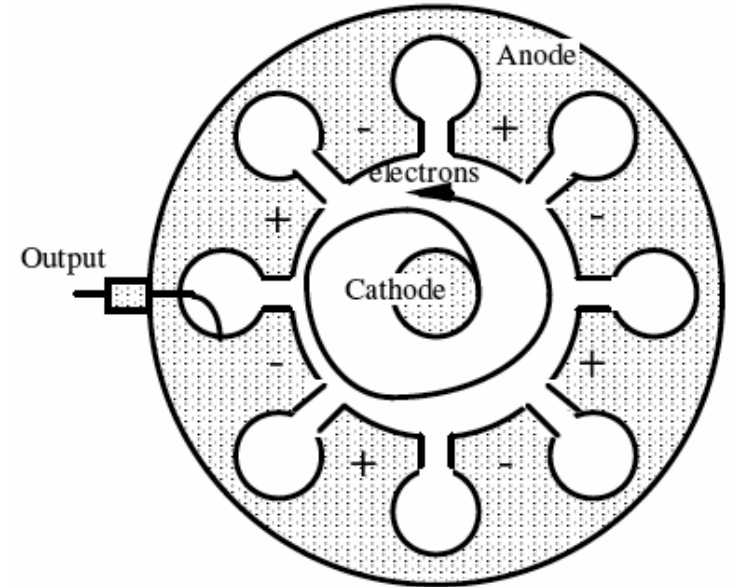
Λυχνία μάγνητρον



© 2004 Encyclopædia Britannica, Inc

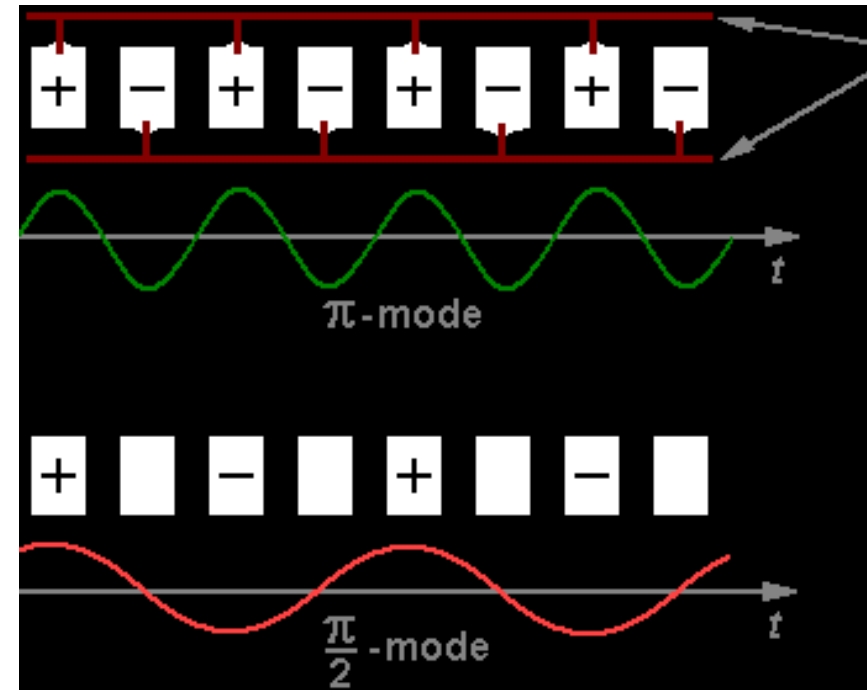
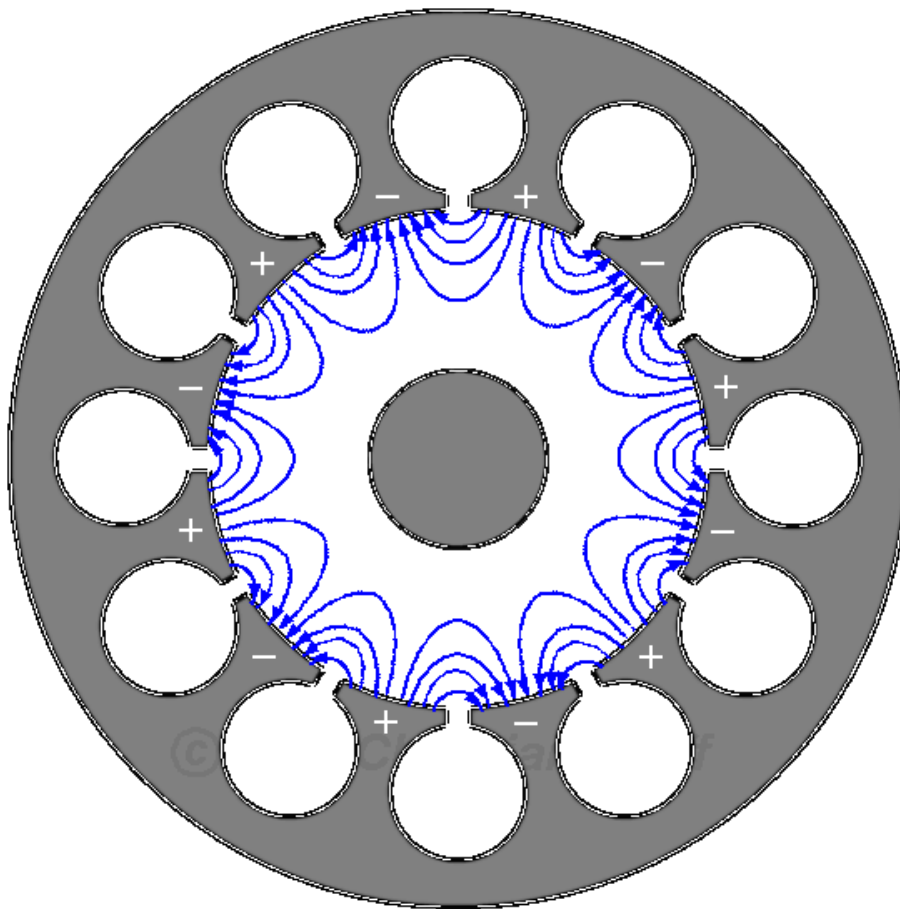
Αρχή λειτουργίας

- ◆ Ηλεκτρόνια επιταχύνονται από το δυναμικό καθόδου-ανόδου
- ◆ Εκτελούν κυκλικές κινήσεις λόγω κάθετου μαγνητικού πεδίου. Περιστροφική κίνηση σε φάση με το παραγόμενο πεδίο.
- ◆ Μετατροπή της ενέργειας των ηλεκτρονίων σε μικροκυματική (επιβράδυνση των ηλεκτρονίων από το πεδίο)



Τρόποι ταλάντωσης

$$\text{Αριθμός τρόπου ταλάντωσης } \mu = \frac{\text{Ολική ολίσθηση φάσης}}{2\pi}$$



Τροχιές ηλεκτρονίων (χωρίς σήμα RF)

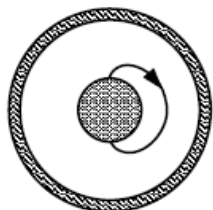
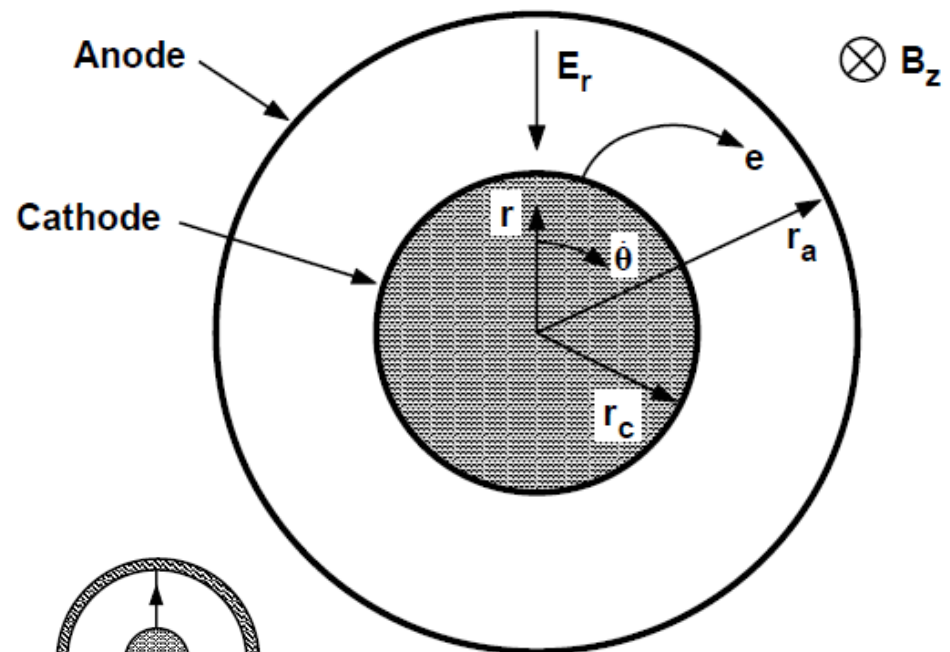
- Λόγω ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου τα ηλεκτρόνια εκτελούν κυκλική κίνηση.

- Ακτίνα Larmor: $r_L = \frac{mv}{eB}$

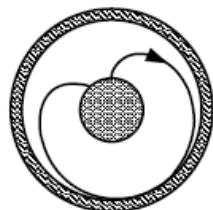
- Όμως $v \propto V$, οπότε

- ▶ $V \uparrow \Rightarrow r_L \uparrow$

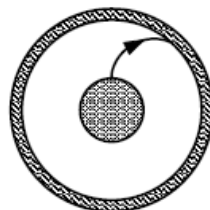
- ▶ $B \uparrow \Rightarrow r_L \downarrow$



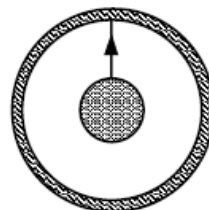
$V_a < V_H$



$V_a = V_H$



$V_a > V_H$



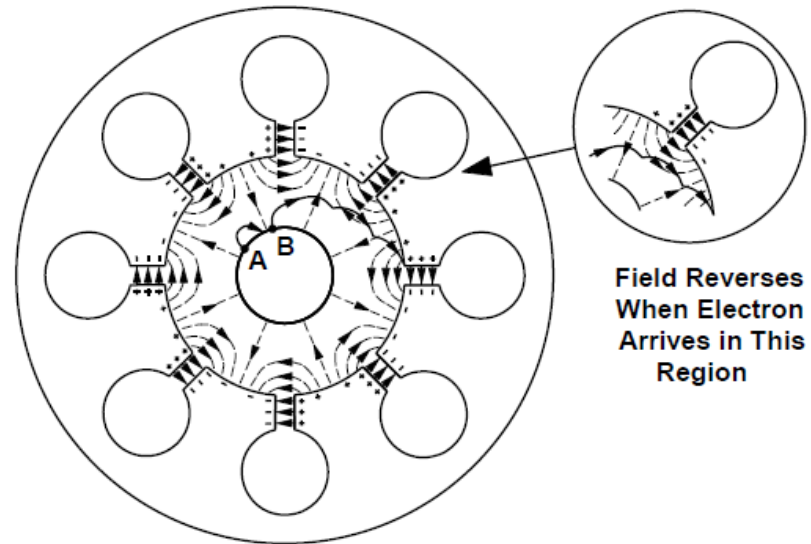
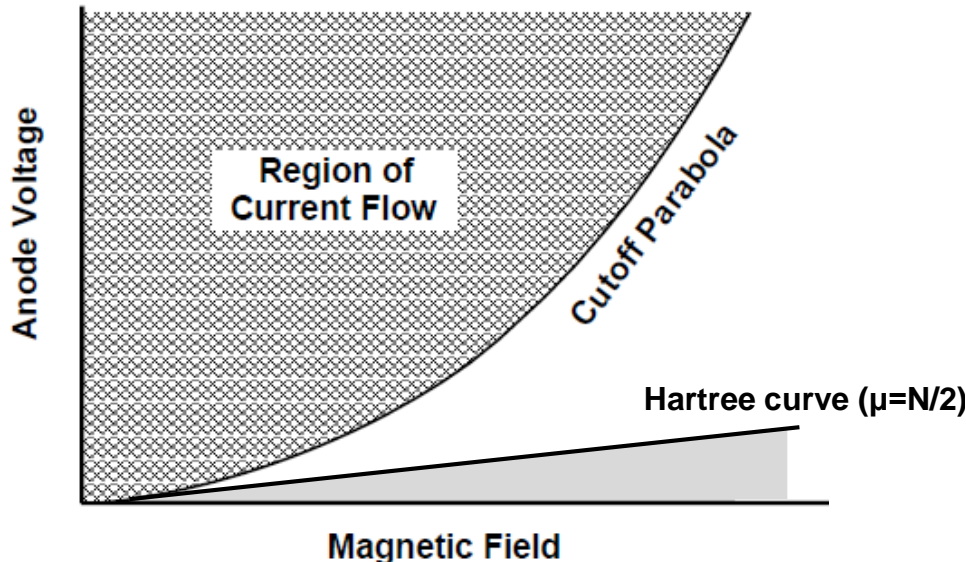
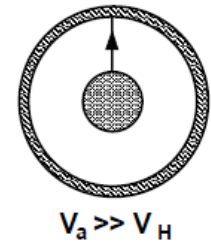
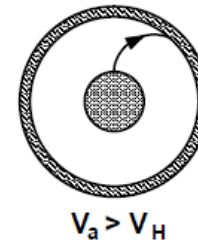
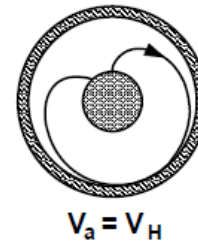
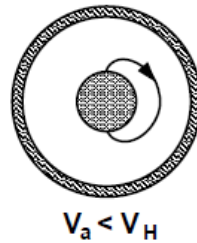
$V_a \gg V_H$

Συνθήκη ταλάντωσης

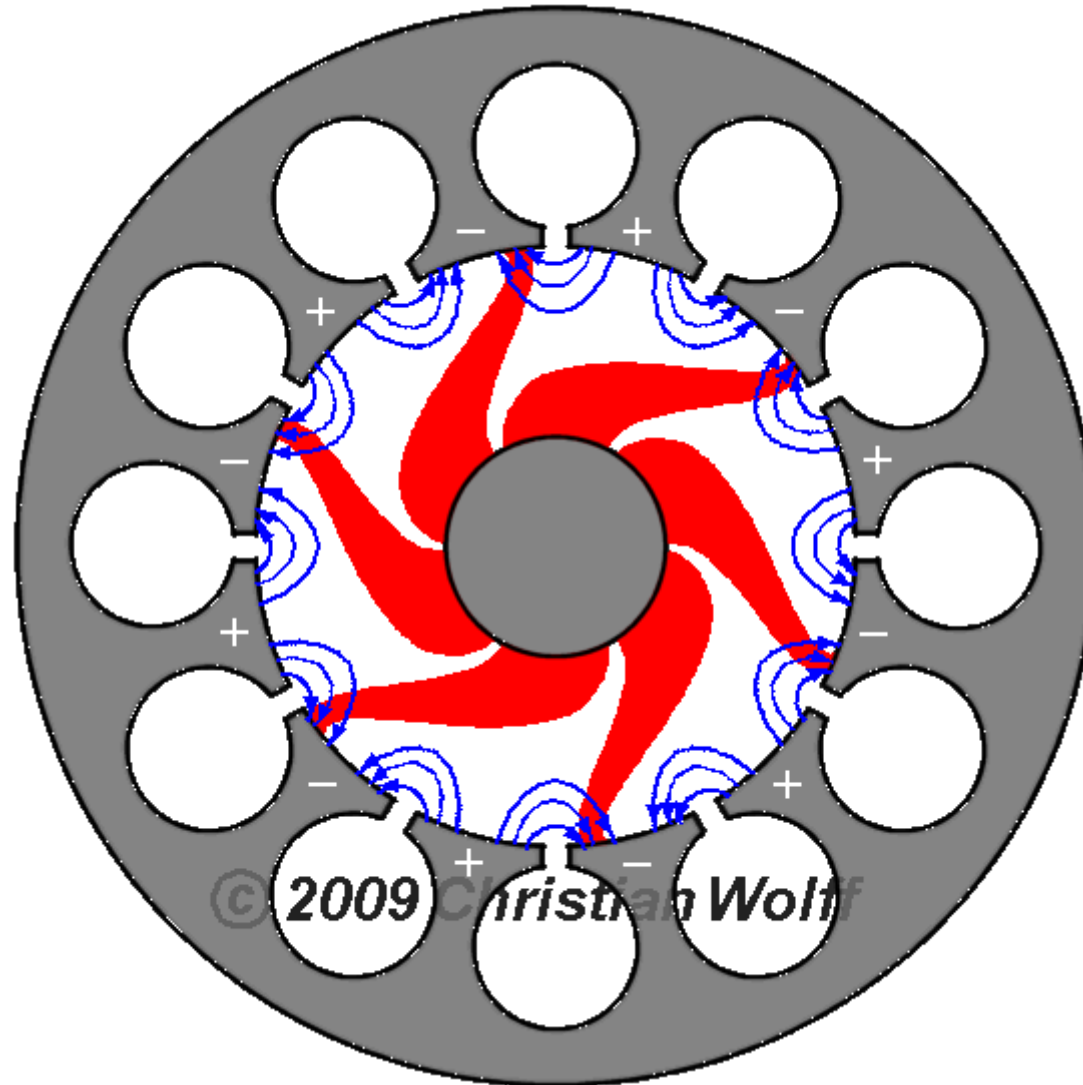
- Συνθήκη αποκοπής (Hull): $V_H = \frac{e}{m} \frac{B^2 r_a^2}{8} \left[1 - \frac{r_c^2}{r_a^2} \right]$
- Συνθήκη Hartree:

$$V_{hartree} = \frac{\omega_\mu (r_c - r_a)}{\mu} \left[B - \frac{\omega_\mu}{\mu \omega_e} \right]$$

με: $\omega_e = \frac{e}{m} B$

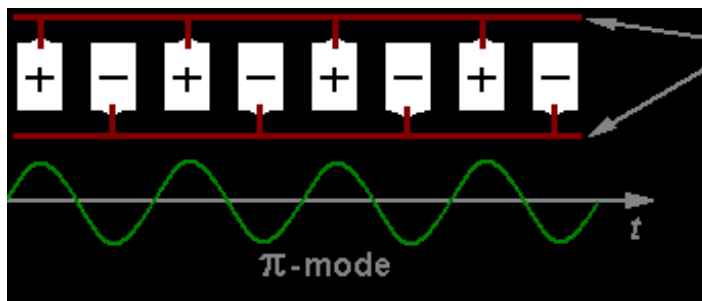
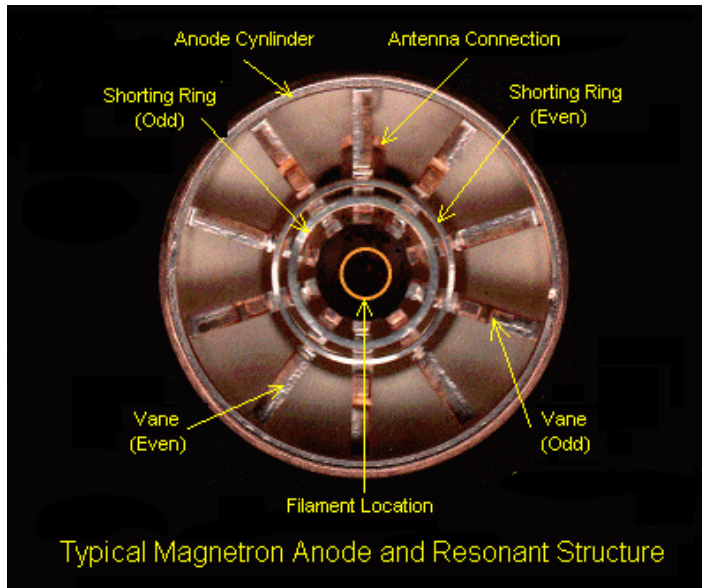


Πακετοποίηση ηλεκτρονίων

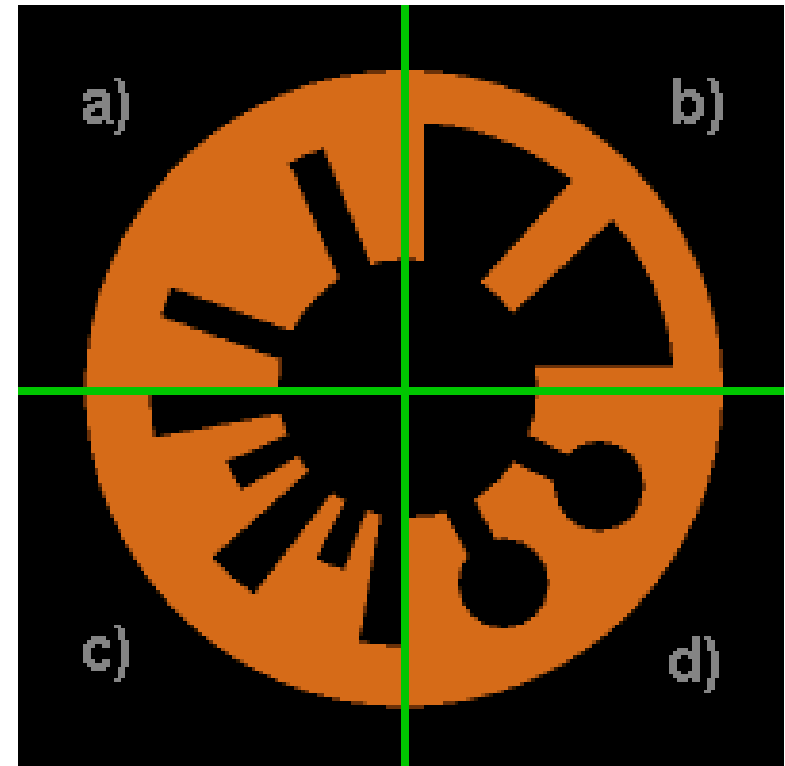


Τύποι μάγνητρον

Μάγνητρον με ραβδώσεις



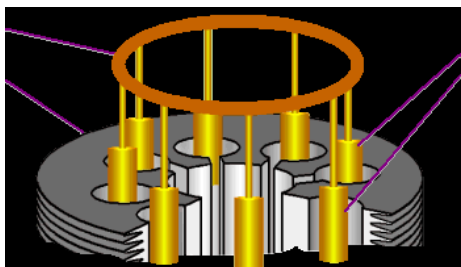
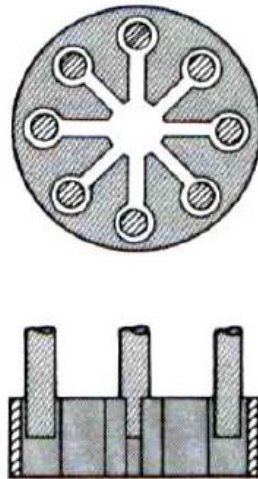
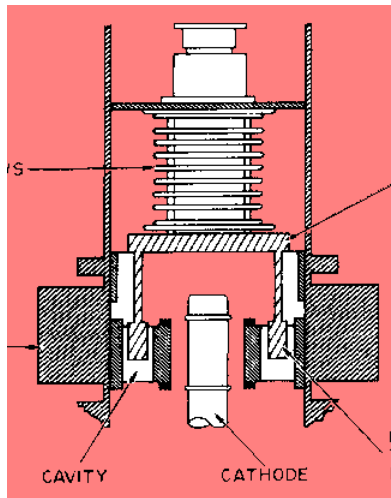
Μάγνητρον ανατέλλοντος ηλίου, κλπ.



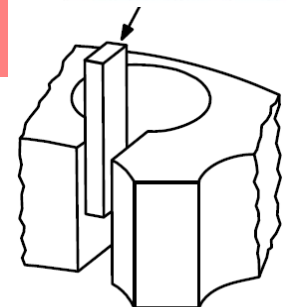
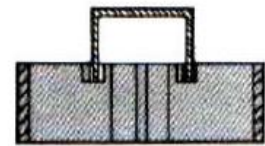
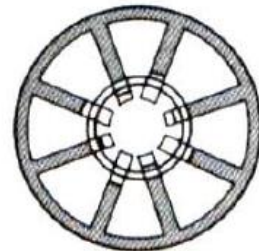
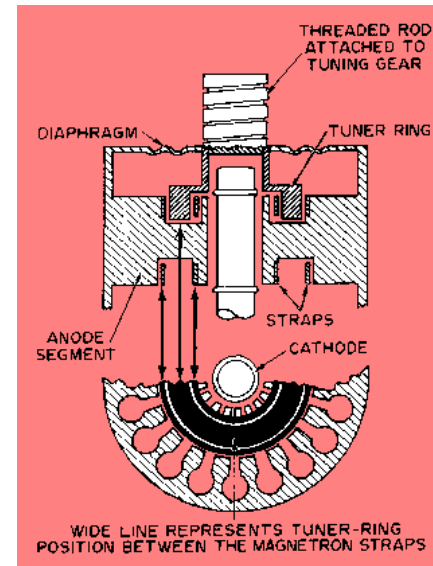
Ρύθμιση συχνότητας

- ◆ Ηλεκτρική (ρύθμιση ανοδικής τάσης)
- ◆ Μηχανική (επαγωγική, χωρητική)

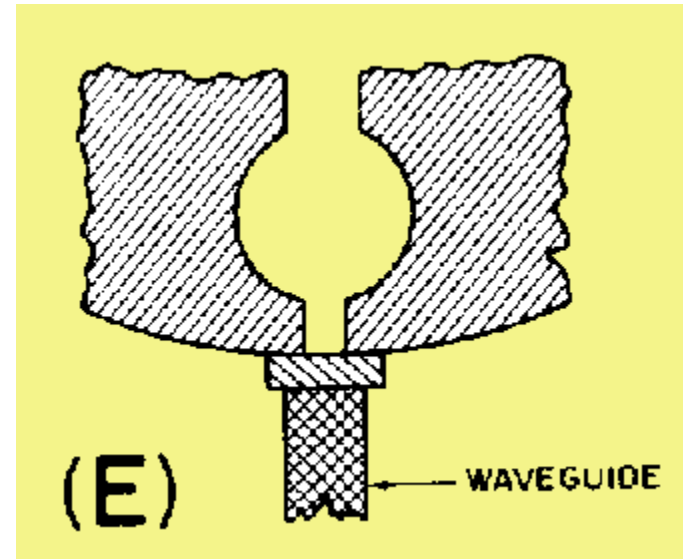
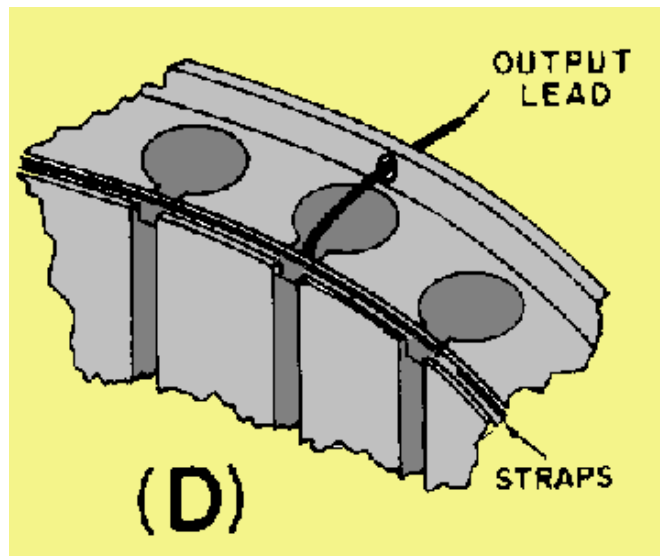
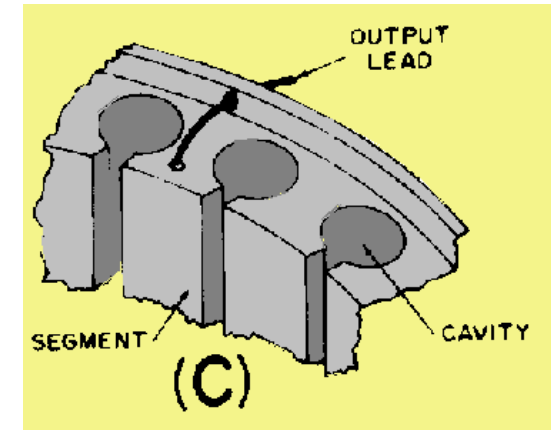
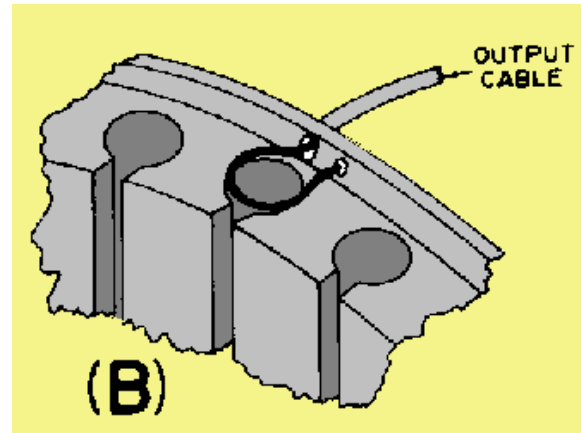
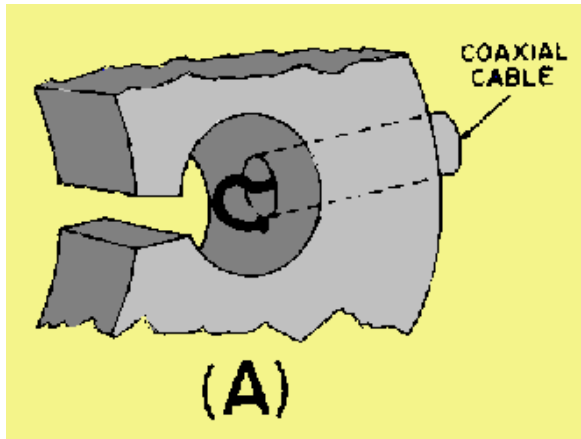
Επαγωγική



Χωρητική



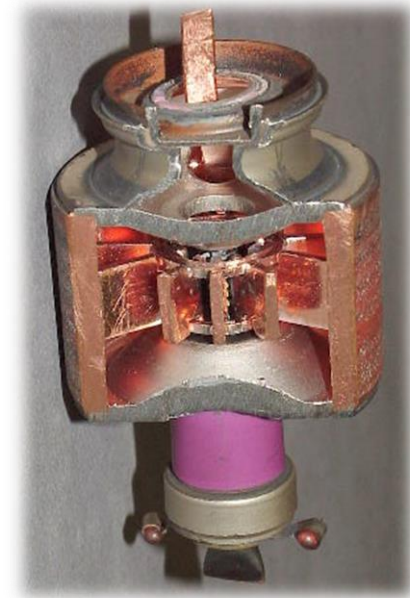
Απαγωγή παραγόμενης ισχύος



Μάγνητρον: Επιδόσεις - εφαρμογές

- ◆ Συχνότητες: <70 GHz
- ◆ Ισχύς: <10 MW (συμβατικές), -1 GW (σχετικιστικές)
- ◆ Απόδοση: 30% – 50%

- ◆ Εφαρμογές
 - Ραντάρ
 - Θέρμανση (φούρνοι μικροκυμάτων, επεξεργασία υλικών, κ.α.)

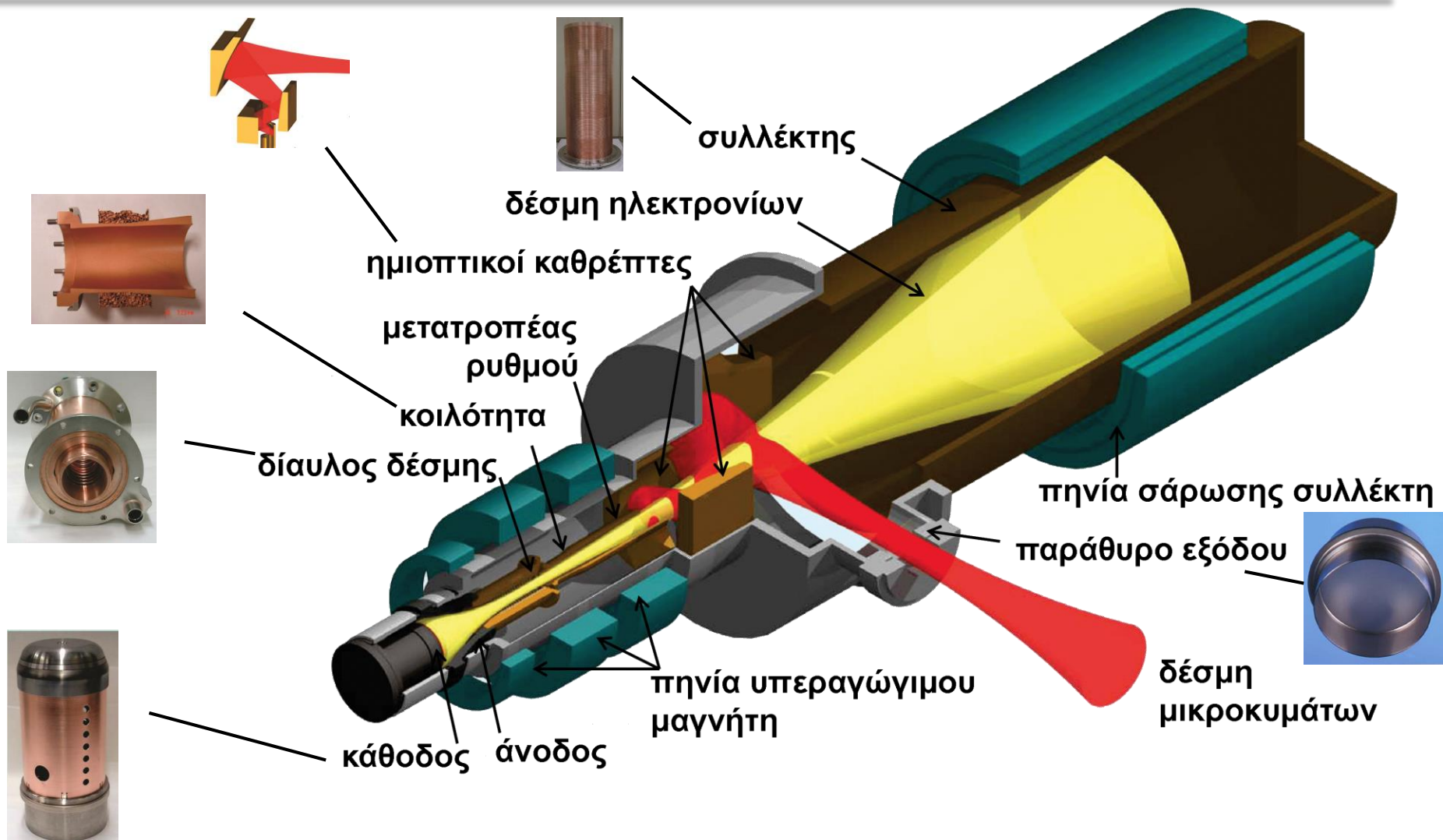


Γυροτρόνιο

- ◆ Απλή αρχή λειτουργίας
- ◆ Αξιοποιεί την κυκλοτρονική αλληλεπίδραση (CRM)
- ◆ Λειτουργία κοντά στην αποκοπή ($\omega \approx \Omega_c / \gamma$)
- ◆ Μεγάλο εύρος συχνοτήτων
- ◆ Υψηλή ισχύς ($\sim \text{MW}$)
- ◆ Υψηλή απόδοση ($\sim 50\%$)



Γυροτρόνιο



Κυκλοτρονική αλληλεπίδραση

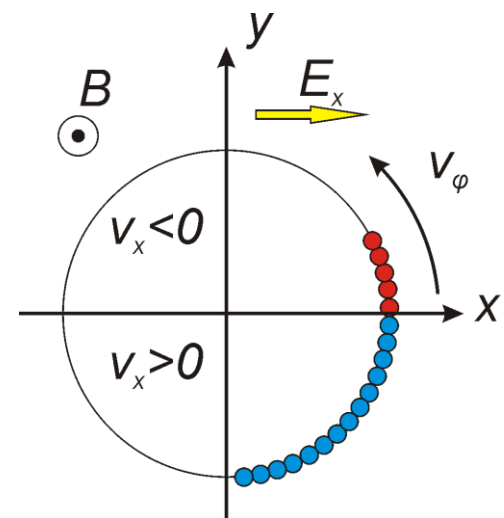
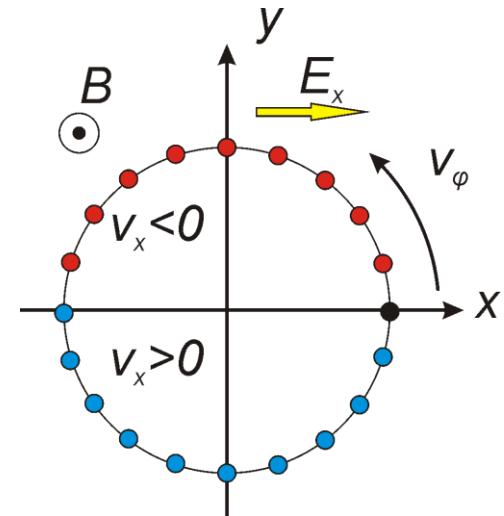
- ◆ Ομογενής ελικοειδής δέσμη ηλεκτρονίων σε ομογενές στατικό μαγνητικό πεδίο B με v_z, v_ϕ .
- ◆ Κύμα που διαδίδεται στον άξονα z με φασική ταχύτητα ω/k .
- ◆ Συνθήκη αλληλεπίδρασης:

$$\omega \approx \frac{\Omega_c}{\gamma_0}$$

- ◆ Κυκλοτρονική συχνότητα:

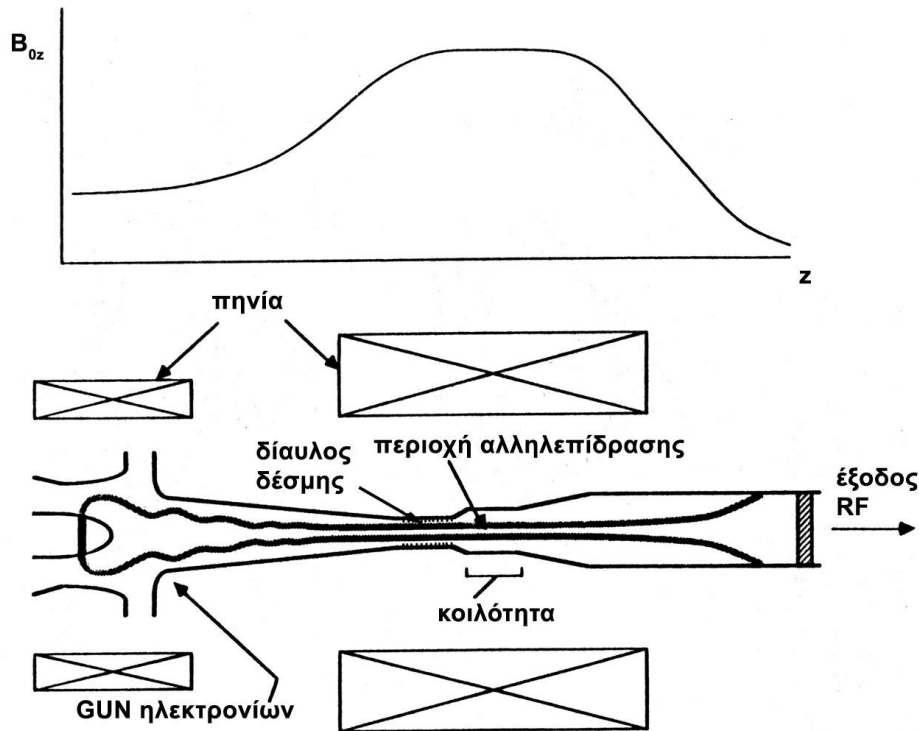
$$\Omega_c = \frac{eB}{m\gamma}$$

- Αν $\gamma \uparrow$ τότε $\Omega_c \downarrow$
- Αν $\gamma \downarrow$ τότε $\Omega_c \uparrow$

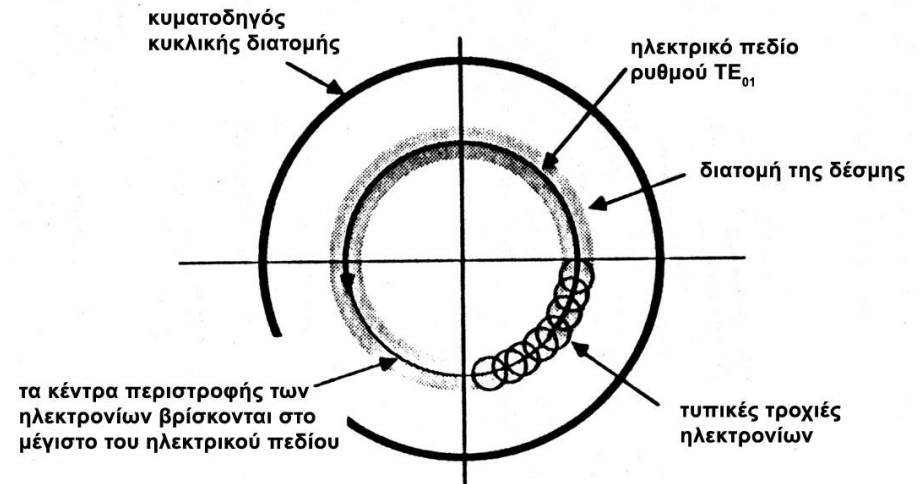


Γυροτρόνιο

Δομή

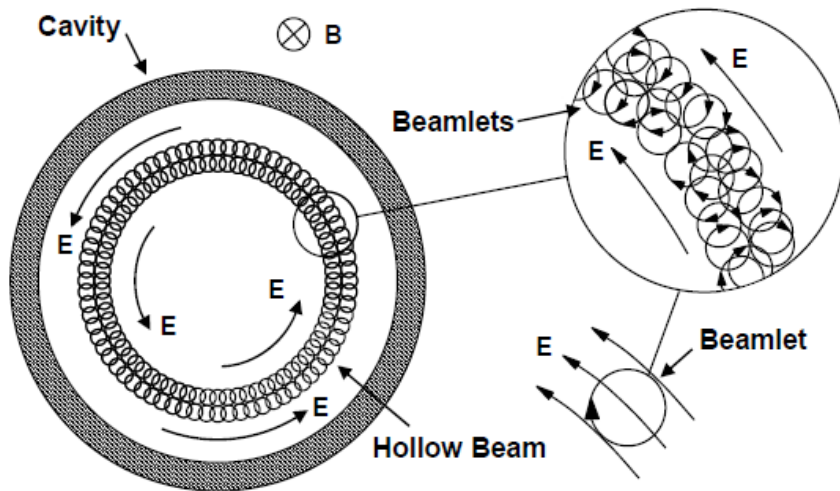


Τροχιές ηλεκτρονίων

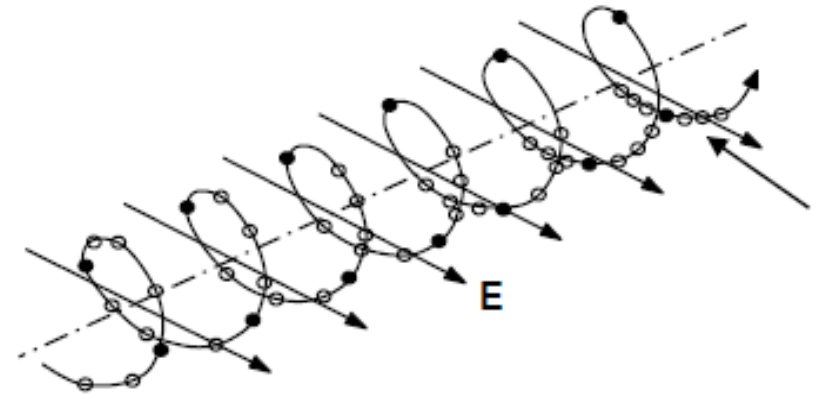


Κυκλοτρονική αλληλεπίδραση

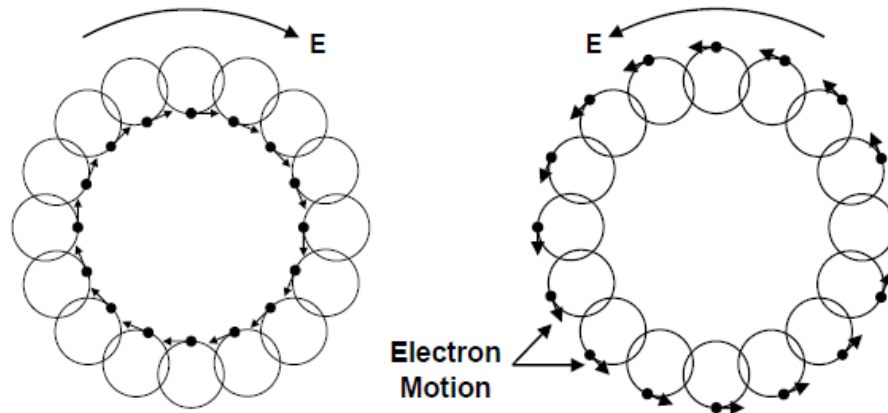
Μορφή ηλεκτρονικής δέσμης



Αλληλεπίδραση με ηλεκτρικό πεδίο



Συγχρονισμός



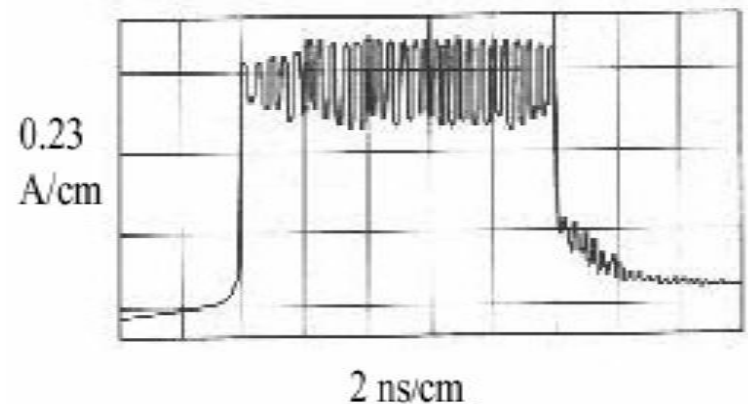
Επιδόσεις – Εφαρμογές

- ◆ Συχνότητα: 10 – 300 GHz
- ◆ Ισχύς: – 2 MW (συνεχής λειτουργία)

- ◆ Εφαρμογές
 - Θέρμανση πλάσματος (θερμοπυρηνική σύντηξη)
 - Επιταχυντές
 - Επεξεργασία υλικών
 - Φασματοσκοπία
 - Μικροκυματικά οπτικά συστήματα

Η δίοδος Gunn

- ◆ Ημιαγωγική πηγή μικροκυμάτων (GaAs).
- ◆ Βασίζεται στο φαινόμενο Gunn.
 - Προβλέφτηκε το 1961 (Ridby και Watkins) και 1962 (Hilsum).
 - Επιβεβαιώθηκε πειραματικά το 1963 από τον J. B. Gunn.
- ◆ Όταν η εφαρμοζόμενη τάση στον κρύσταλλο ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή ($E=1-2 \text{ kV/cm}$) εμφανίζεται ταλάντωση του ηλεκτρικού ρεύματος.
- ◆ Το φαινόμενο οφείλεται στην εμφάνιση αρνητικής διαφορικής αντίστασης.



Ενεργειακές ζώνες GaAs

◆ Ενεργειακές ζώνες GaAs:

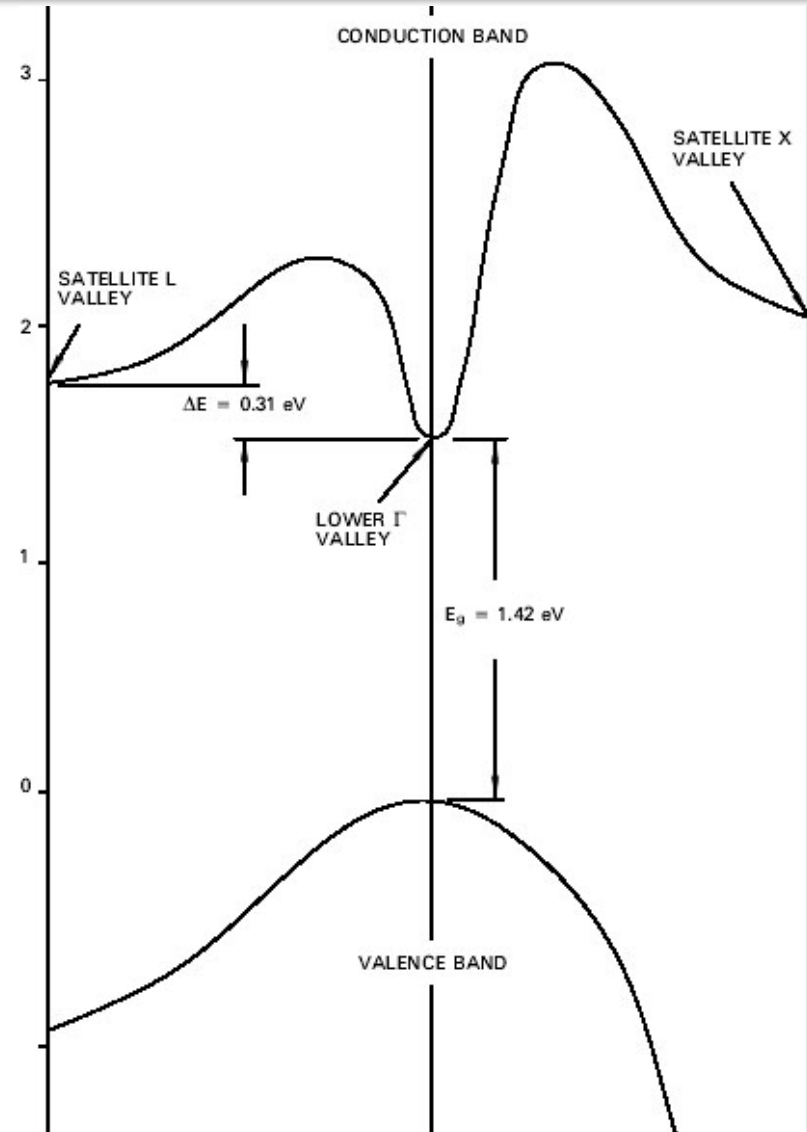
- 2 κοιλάδες στη ζώνη αγωγιμότητας.
- διαφορετική ενεργός μάζα m^* σε κάθε κοιλάδα.

Ενεργός μάζα: η μάζα που «φαίνεται» να έχει το ηλεκτρόνιο κατά την κλασική θεωρία:

$$m^* = \hbar^2 \frac{d^2 E}{dk^2}$$

- Μικρότερη ενεργός μάζα m^* στη κεντρική κοιλάδα, οπότε μεγαλύτερη ευκινησία:

$$\mu = e\tau/m^*$$



Ενεργειακές ζώνες GaAs

◆ Ενεργειακές ζώνες GaAs:

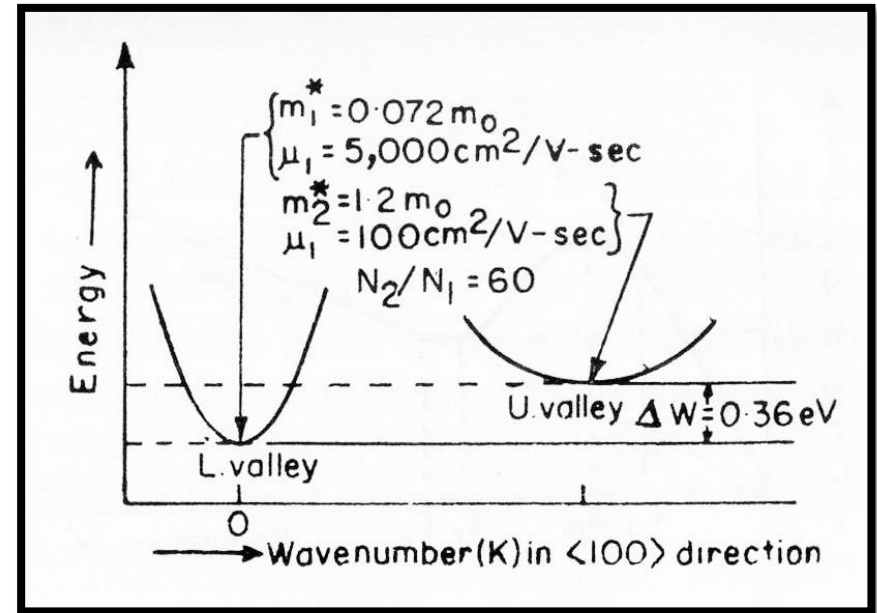
- 2 κοιλάδες στη ζώνη αγωγιμότητας.
- διαφορετική ενεργός μάζα m^* σε κάθε κοιλάδα.

Ενεργός μάζα: η μάζα που «φαίνεται» να έχει το ηλεκτρόνιο κατά την κλασική θεωρία:

$$m^* = \hbar^2 \frac{d^2 E}{dk^2}$$

- Μικρότερη ενεργός μάζα m^* στη κεντρική κοιλάδα, οπότε μεγαλύτερη ευκινησία:

$$\mu = e\tau/m^*$$



- Μεγαλύτερη ευκινησία → μεγαλύτερη αγωγιμότητα.
- Πυκνότητα ρεύματος παρουσία ηλεκτρικού πεδίου:

$$J = nev_d = ne\mu E$$

Περιοχή αρνητικής αντίστασης

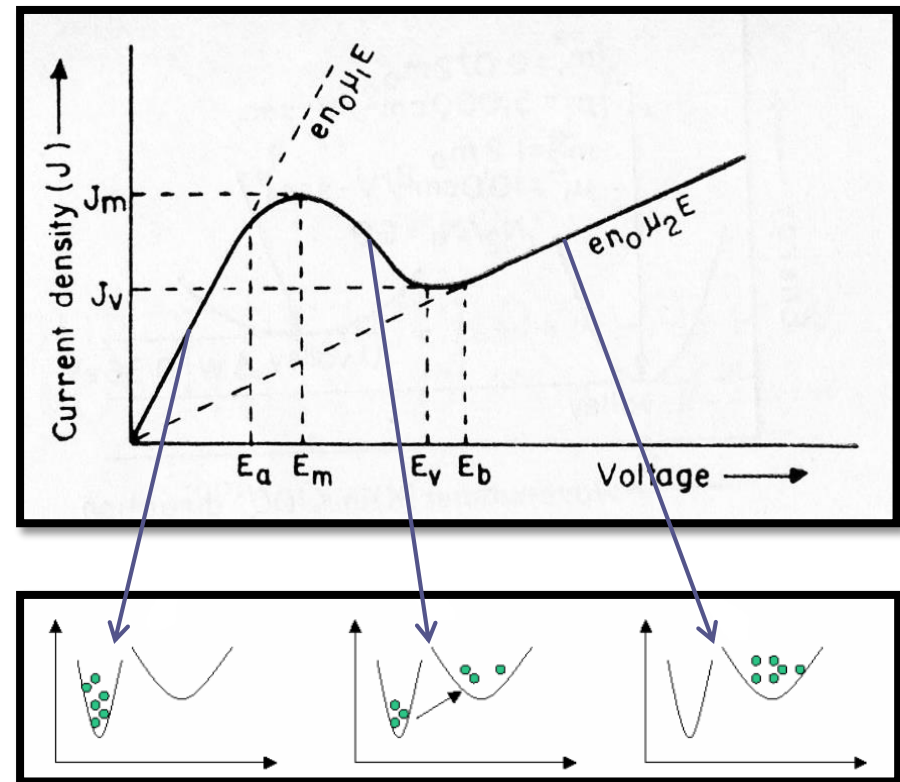
❖ Πόλωση διόδου ($E > E_T$): e^- μεταπηδούν στη δεύτερη (πλευρική) κοιλάδα:

- μείωση πλήθους e^- υψηλής κινητικότητας,
- αύξηση πλήθους e^- χαμηλής κινητικότητας,

$$J = e(\underbrace{\mu_L n_L}_{\downarrow} + \underbrace{\mu_U n_U}_{\uparrow}) E$$

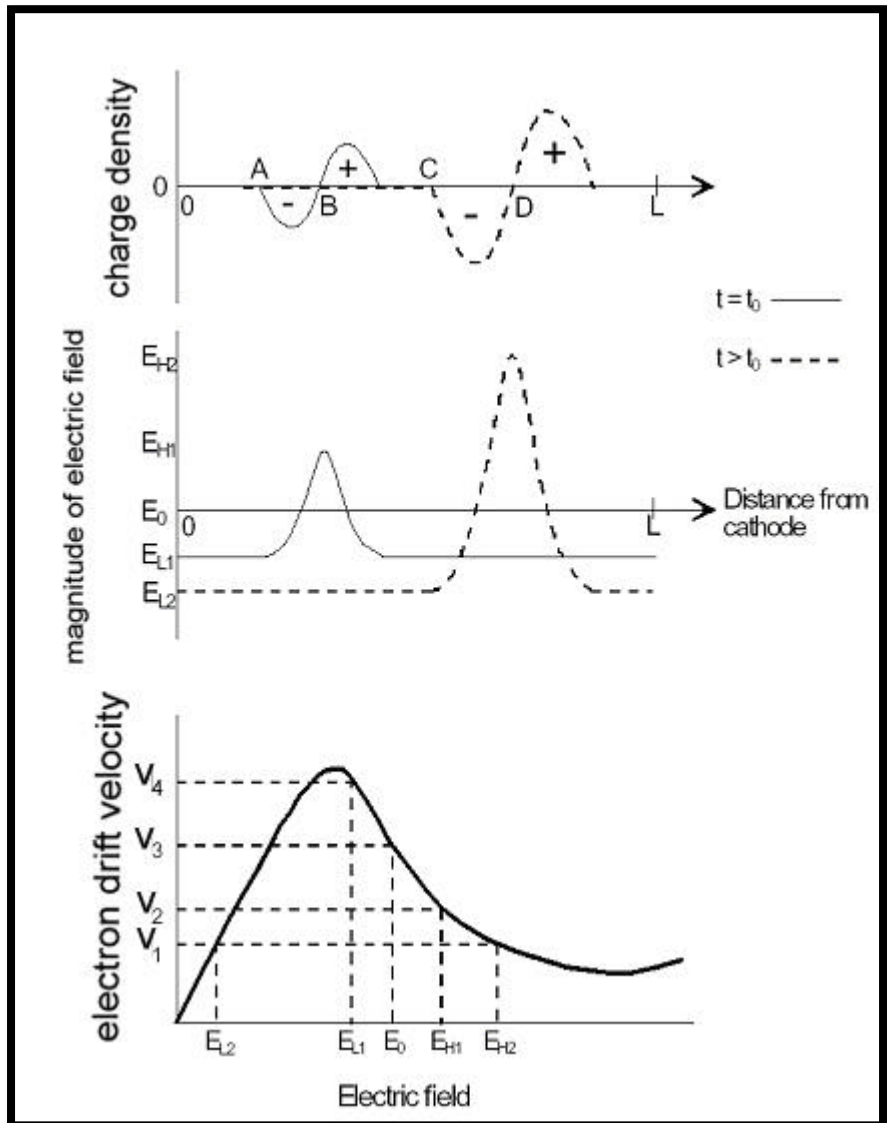
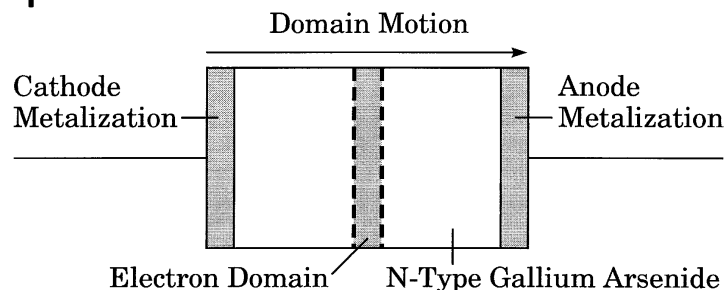
- συνολικά το ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο μειώνεται αφού

$$\mu_L > \mu_U$$



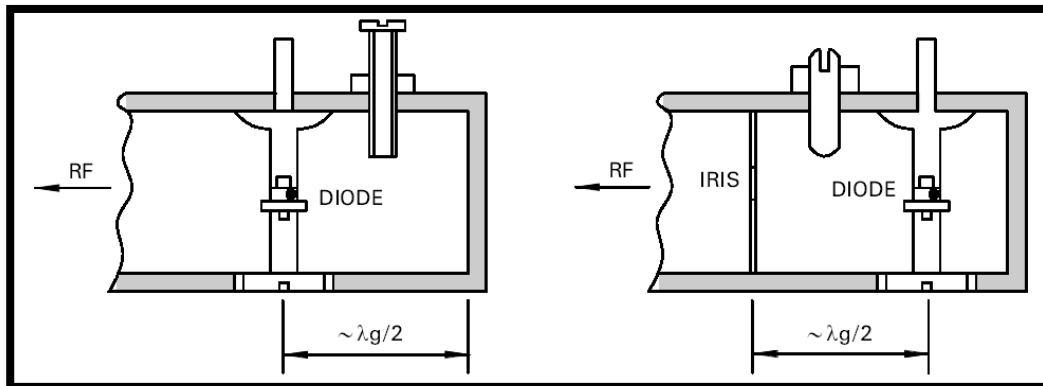
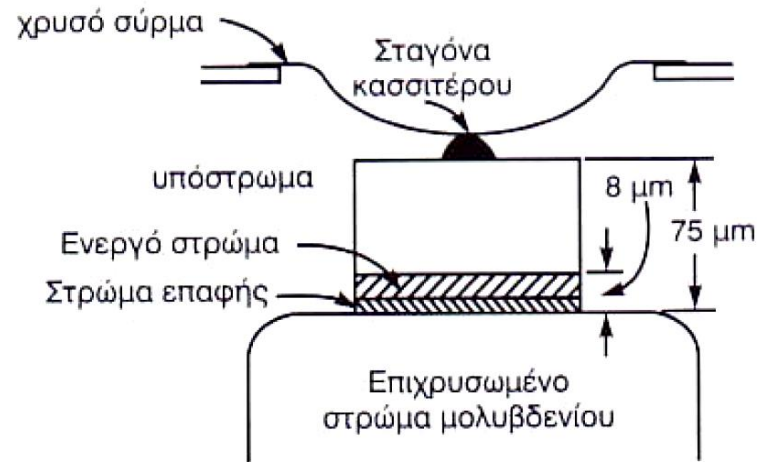
Δημιουργία ταλαντώσεων

- ◆ Στην κάθοδο δημιουργείται ένα πύκνωμα αρνητικού φορτίου.
- ◆ Τοπικά αυξάνεται η ένταση του πεδίου.
- ◆ Αρνητική αντίσταση:
 - ασθενές πεδίο -> υψηλή ταχύτητα
 - ισχυρό πεδίο -> χαμηλή ταχύτητα
- ◆ Δημιουργία παλμών ρεύματος που διαρρέουν τον κρύσταλλο.



Κατασκευή της διόδου Gunn

- ◆ Δεν αρκεί η δημιουργία παλμών ρεύματος για την παραγωγή ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών ταλαντώσεων.
- ◆ Ο κρύσταλλος τοποθετείται μέσα σε κατάλληλο αντηχείο.



Ρύθμιση συχνότητας διόδου Gunn

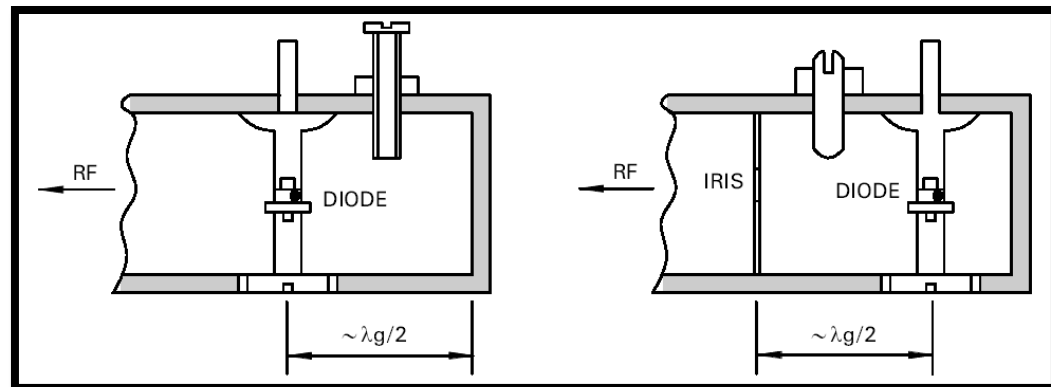
Μηχανική

- ◆ Μεταβολή διαστάσεων αντηχείου.



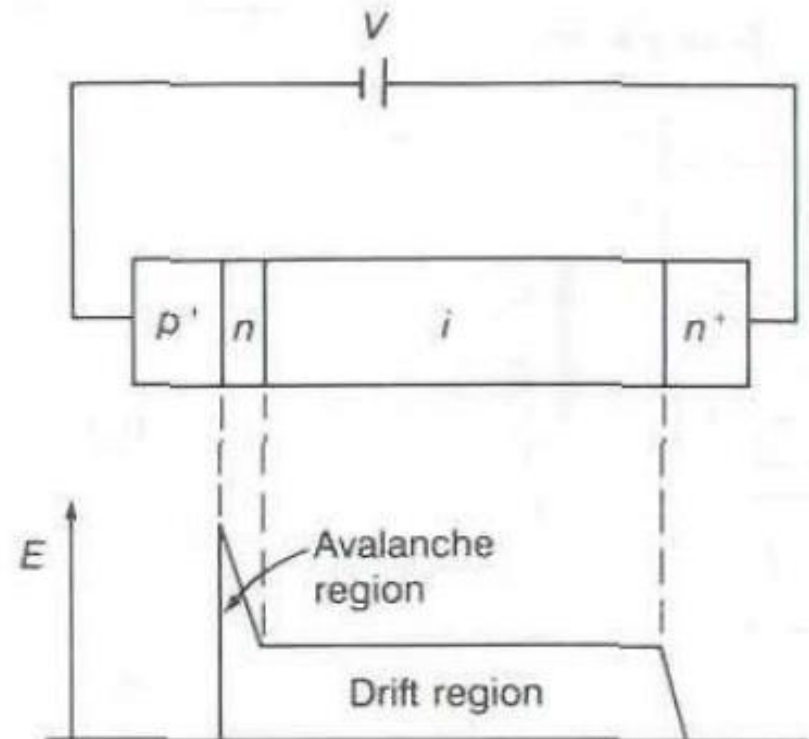
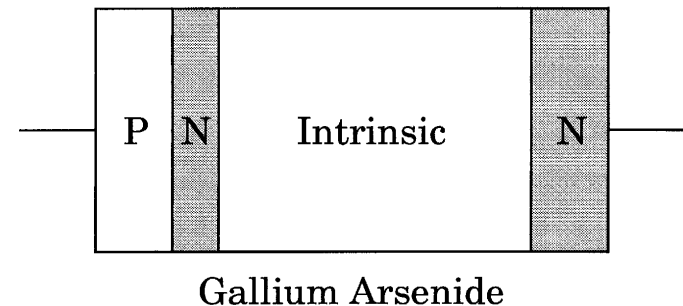
Ηλεκτρονική

- ◆ Με ρύθμιση τάσης διόδου.
- ◆ Με δίοδο Varactor στο αντηχείο.
- ◆ Με μαγνητικό υλικό YIG στο αντηχείο.



Δίοδος IMPATT (IMPact Avalanche Transit Time)

- ◆ Δύο περιοχές:
 - περιοχή χιονοστιβάδας
 - περιοχή ολίσθησης
- ◆ Πόλωση στο δυναμικό κατάρρευσης + σήμα υψηλής συχνότητας
 - Επιπλέον σήμα προκαλεί στιγμιαία κατάρρευση.
 - Παλμός ρεύματος ολισθαίνει στη διάταξη.
- ◆ Η συχνότητα ταλάντωσης εξαρτάται από το χρόνο όδευσης (μήκος επαφής).
- ◆ Τοποθετημένη σε αντηχείο χρησιμοποιείται ως ταλαντωτής.

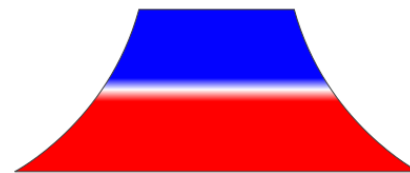
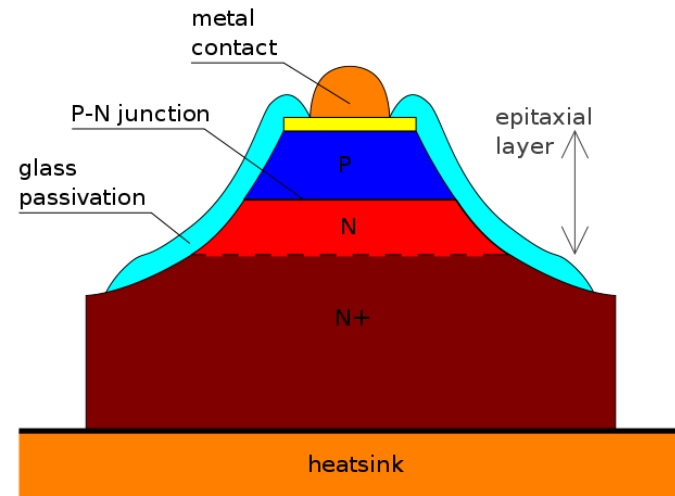


Η Δίοδος Varactor (Variable Reactance)

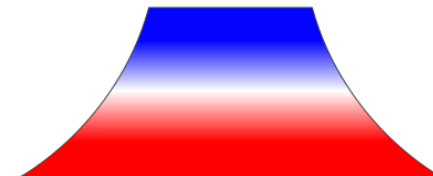
- ◆ Εμφανίζει μεταβλητή χωρητικότητα
 - Ανάλογα με την τάση ανάστροφης πόλωσης
- ◆ Χρησιμοποιείται ως:
 - Πολλαπλασιαστής συχνότητας (παραμετρικοί ενισχυτές)
 - Μικροκυματικός διακόπτης
- ◆ Χωρητικότητα επαφής:

$$C_j = \frac{K}{(V + \Phi)^n}$$

- K: σταθερά ανάλογη της συγκέντρωσης δοτών
- V: τάση πόλωσης
- $\Phi = 0.7 \text{ V}$ (silicon)
- $\Phi = 1.3 \text{ V}$ (gallium arsenide)
- n: σχετίζεται με το πόσο απότομη είναι η επαφή.



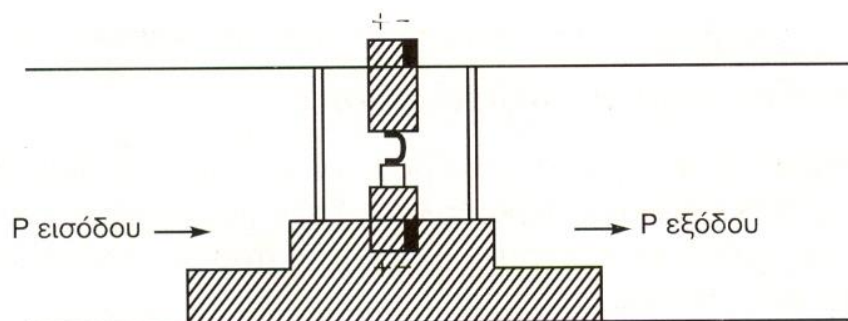
lower bias voltage,
narrower depletion zone,
higher capacitance



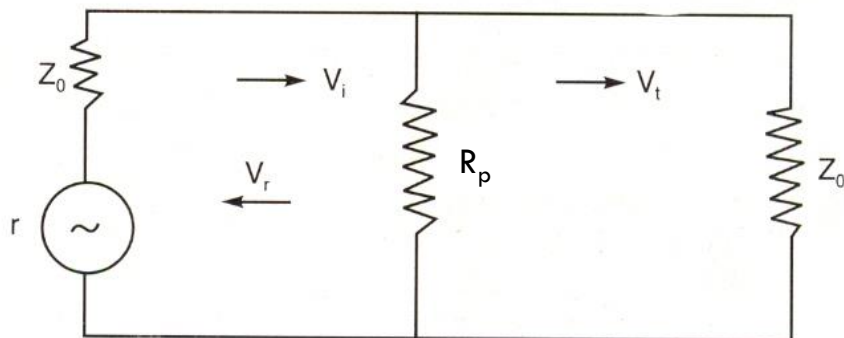
higher bias voltage,
wider depletion zone,
lower capacitance

Η Varactor ως μικροκυματικός διακόπτης

- ◆ Ανάστροφη πόλωση
 - Όλη η ισχύς ανακλάται.
 - Πρακτικά δεν περνάει σήμα προς το φορτίο.
- ◆ Ορθή πόλωση
 - Η ισχύς διέρχεται προς το φορτίο.

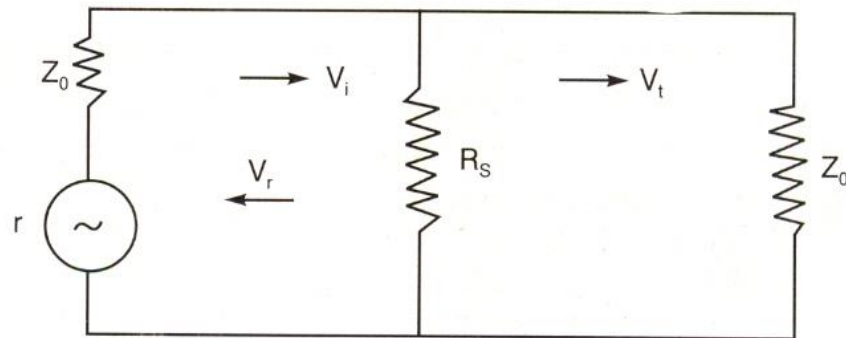


Ορθή πόλωση



R_p μεγάλο

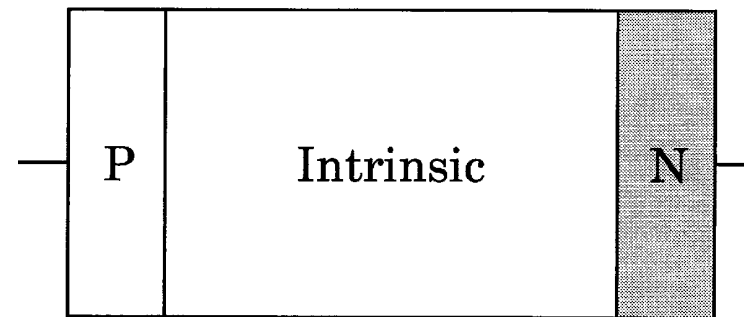
Ανάστροφη πόλωση



R_s μικρό

Η δίοδος PIN (Positive-Intrinsic-Negative)

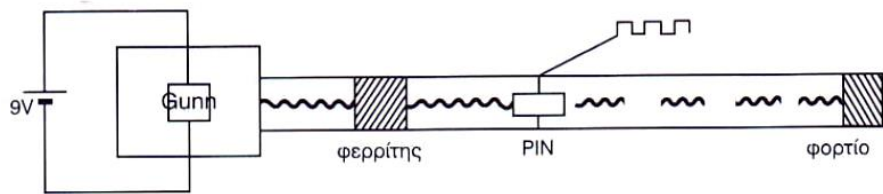
- ◆ Ανάστροφη πόλωση:
 - Μεγάλη αντίσταση
- ◆ Ορθή πόλωση:
 - Μικρή αντίσταση
- ◆ Χρησιμοποιείται ως:
 - Μικροκυματικός διακόπτης
 - Διαμόρφωση τετραγωνικών παλμών
 - Περιοριστής, εξασθενητής



Gallium Arsenide

Εφαρμογές της διόδου PIN

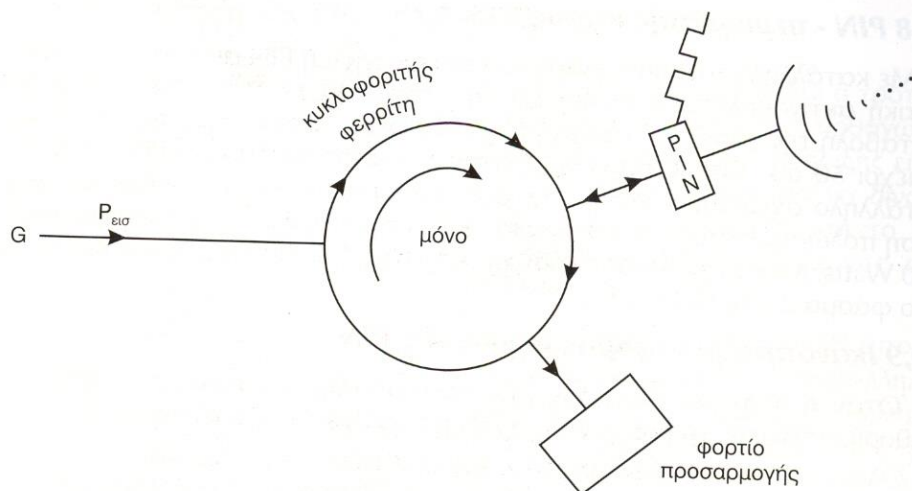
Διακόπτης - Διαμόρφωση



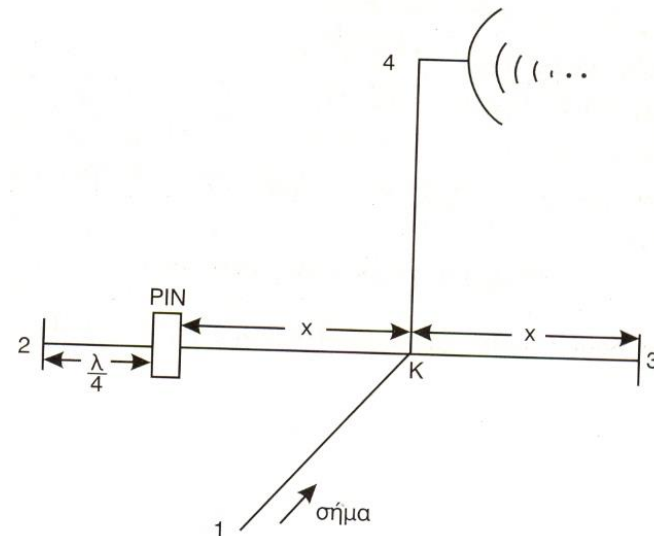
Η PIN ως περιοριστής

- ♦ Με κατάλληλη ρύθμιση της τάσης πόλωσης περιορίζεται η διερχόμενη ισχύς που παραδίδεται στο φορτίο.

Η PIN στο RADAR



Αλλαγή φάσης με PIN



MASER

◆ Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation

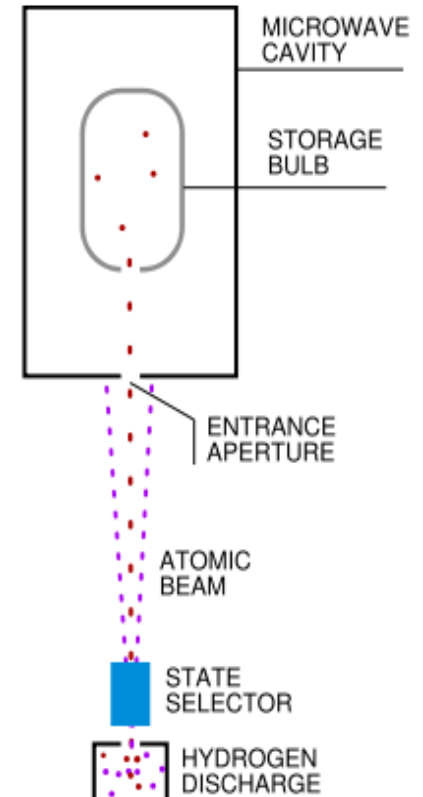
◆ Παραγωγή σύμφωνης ακτινοβολίας μέσω της ενίσχυσης με εξαναγκασμένη εκπομπή.

(Παρόμοια αρχή λειτουργίας με LASER)

- Αποδιέγερση υλικού (μετάπτωση σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη)
- Το ενεργειακό χάσμα να δίνει μικροκυματική συχνότητα.

◆ Τύποι:

- Δέσμης ατόμων
 - Αμμωνίας
 - Υδρογόνου
 - Ελεύθερων ηλεκτρονίων
- Στερεού σώματος
 - Ρουβινίου



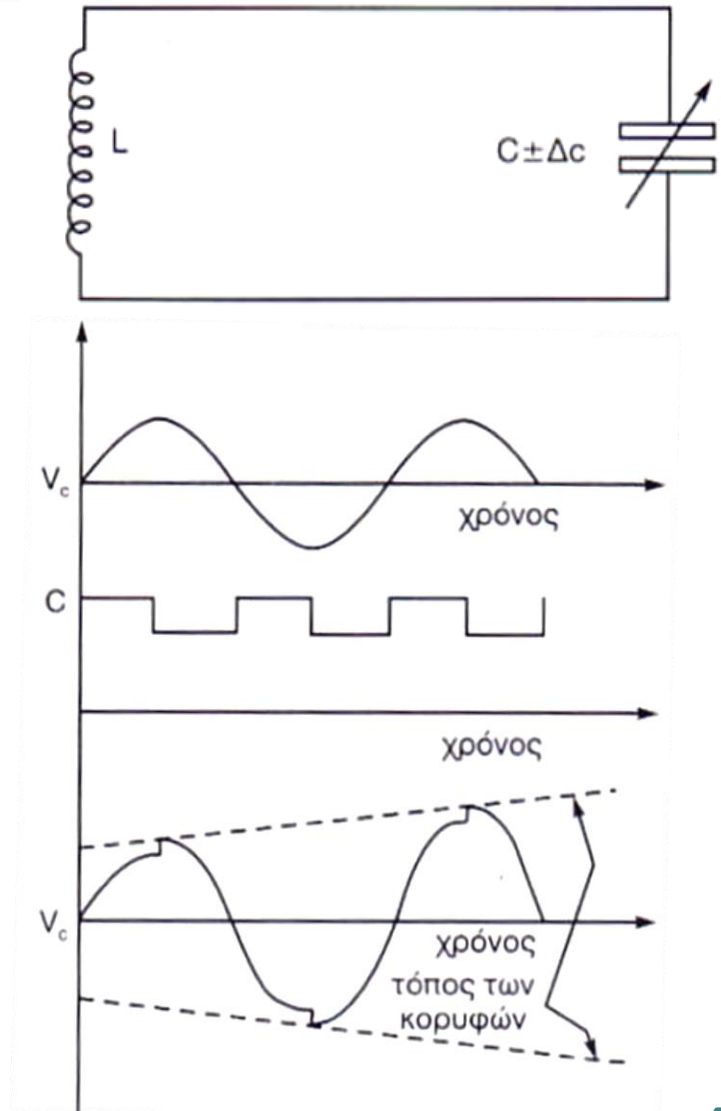
Παραμετρικός ενισχυτής



- ◆ **Παραμετρική:** Διάταξη της οποίας οι παράμετροι λειτουργίας μεταβάλλονται με το χρόνο.
- ◆ Συχνότητα εξόδου: $f_{mn} = mf_1 + nf_2$
- ◆ Περιπτώσεις:
 - **Παραμετρικός ενισχυτής:** $f_{mn} = f_1$. Ισχύς από την f_2 ενισχύει την f_1 .
 - **Μίκτης:** $|m|=1, n>1$. Τότε $f_{mn} > f_1$.
 - **Πολλαπλασιαστής συχνότητας:** $m>1, n=0$. Τότε η f_{mn} είναι πολλαπλάσια της συχνότητας εισόδου.
 - **Ενδοδιαμόρφωση:** $|m|>1, n>0$.
- ◆ Χρήση μη γραμμικών στοιχείων (π.χ. Varactor).

Παραμετρική Ενίσχυση

- ❖ Βασικό στοιχείο η μεταβλητή χωρητικότητα.
- ❖ Εάν η χωρητικότητα αλλάζει όταν η τάση V_C είναι σε ακρότατο, τότε προσφέρεται ενέργεια (παράγεται έργο).
- ❖ Η κατάλληλα συγχρονισμένη μεταβολή της χωρητικότητας προκαλεί ενίσχυση.
- ❖ Η μεταβλητή χωρητικότητα υλοποιείται από μια varactor.



Βιβλιογραφία

- ◆ Κ. Λιολιούση, *Μικροκύματα Ι*, Εκδόσεις Ίων, 2000.
- ◆ Ι. Λ. Βομβορίδη, *Μικροκυματικές Πηγές Ισχύος*, Εκδόσεις Συμεών, 2000.
- ◆ A. S. Gilmour, *Klystrons, Travelling Wave Tubes, Magnetrons, Crossed-Field Amplifiers, and Gyrotrons*, Artech House, 2011.
- ◆ M. L. Sisodia, G. S. Raghuvanshi, *Basic Microwave Techniques and Laboratory Manual*, John Wiley & Sons, 1987.
- ◆ R. Collin, *Foundations for Microwave Engineering, 2nd Edition*, McGraw-Hill, 1992.
- ◆ J. Benford, J. Swegle, *High-Power Microwaves*, Artech House, 1992.