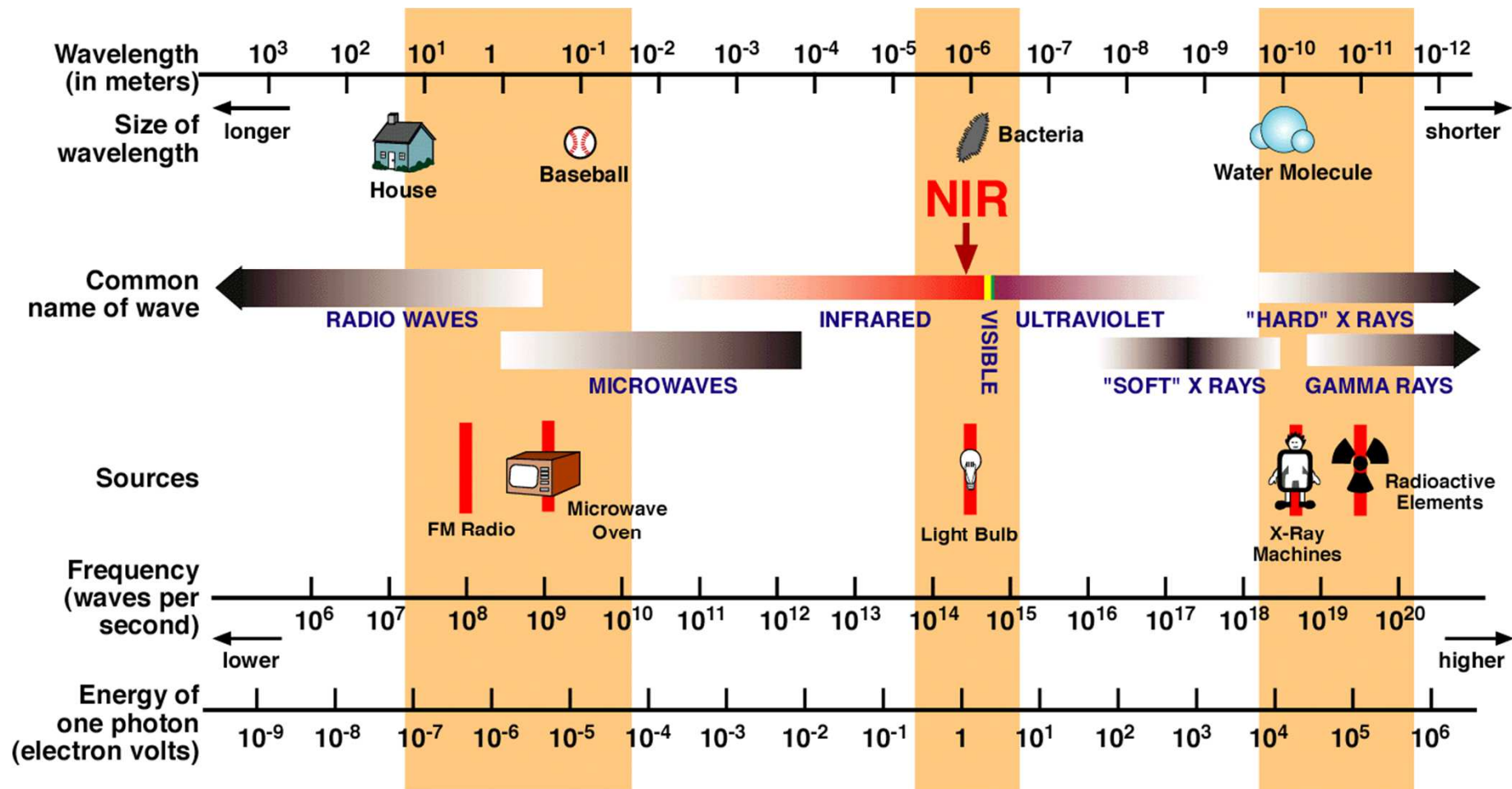




Πηγές φωτός, Ανιχνευτές, και Ακτινοβόληση

Εισαγωγή

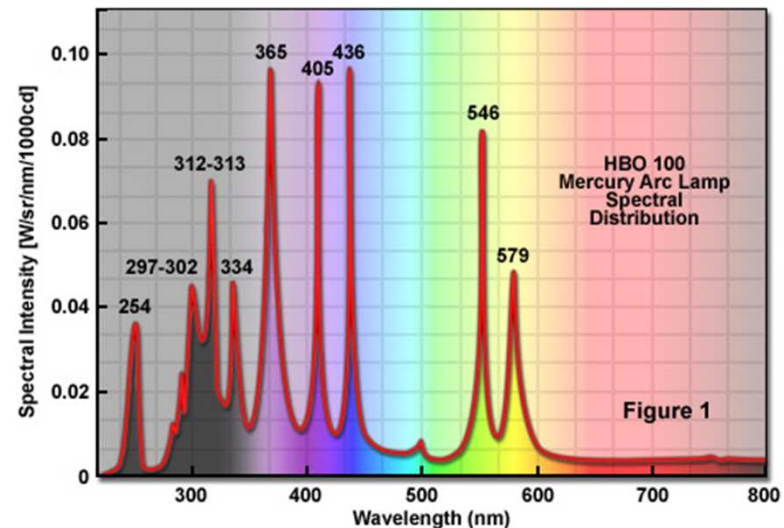
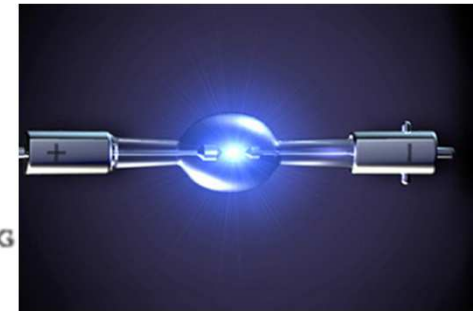
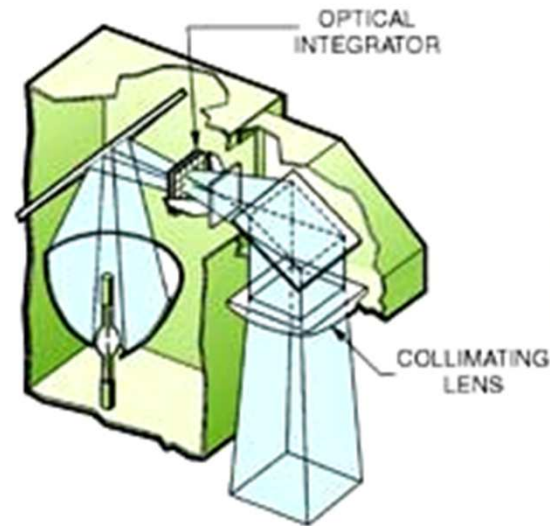


Πηγές φωτός (μη-λέιζερ)



- **Λυχνίες τόξου υψηλής πίεσης (High-Pressure Arc Lamps)**

- Υψηλής έντασης κατά προσέγγιση συνεχές (quasi-continuum) φάσμα που κυμαίνεται από την υπεριώδη στο εγγύς υπέρυθρο
- Ένα αέριο (συνήθως Ξένο (xenon), Υδράργυρος (mercury), ή μείγμα αυτών) έγκλειστο σε χαλαζία με δύο ηλεκτρόδια βολφραμίου (tungsten).
- Μια τάση που ιονίζει το αέριο → ένα φωτεινό τόξο μεταξύ των ηλεκτροδίων
- Λίγα watt μέχρι πολλά kilowatt.
- Η λυχνία τόξου με Ξένο χρησιμοποιείται ευρέως στη φασματοσκοπία
 - Ομοιόμορφο φασματικό προφίλ μεταξύ 250 και 700 nm
 - Φίλτρα για επιλογή του μήκος κύματος
- Ισοτροπική πηγή → υπερκατευθυντική (omnidirectional)
- Παραβολικά και ελλειψοειδή κάτοπτρα για συλλογή και εστίαση

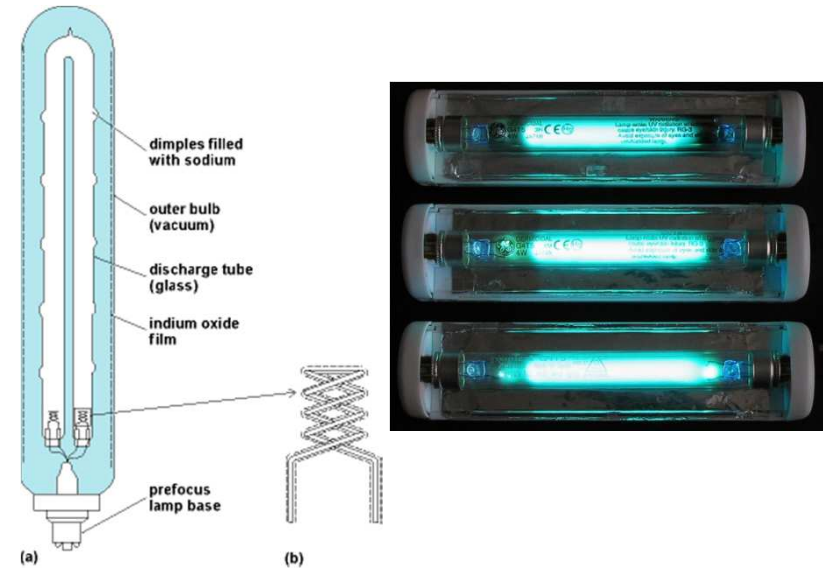


Πηγές φωτός (μη-λείζερ)



- **Λυχνίες ατμού χαμηλής πίεσης (Low-Pressure Vapor Lamps)**

- Εκκένωση στο αέριο παρόμοια με λυχνίες τόξου υψηλής πίεσης
- Λιγότερο πολύπλοκες
- Υψηλής έντασης, σταθερές φασματικές γραμμές (κάθε στοιχειώδης αέριο παράγει μια γνωστή ομάδα από χαρακτηριστικές γραμμές)
 - Για παράδειγμα, μια λυχνία χαμηλής πίεσης υδράργυρου → δεσπόζουσα κορυφή 253,7 nm καθώς και μια σημαντική τριπλέτας στο 365.0/365.5/366.3 nm.
- Διακριτές (Discrete) γραμμές
 - Φασματόμετρα τύπου απλού φίλτρου (Simple filter type spectrometers)
 - Φωτεινές πηγές βαθμονόμησης (calibration)



Spectra From Common Sources of Visible Light

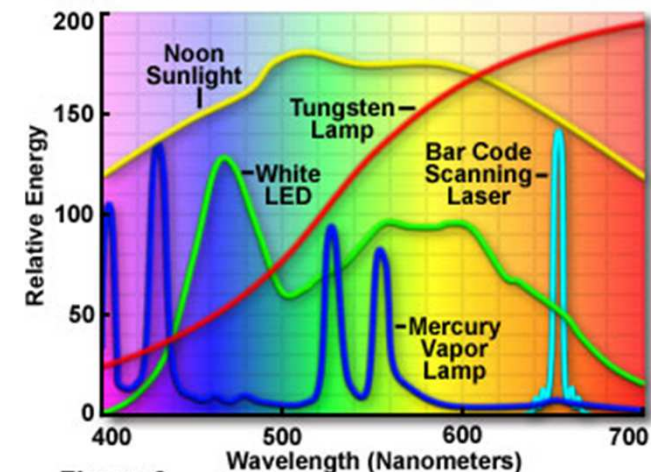


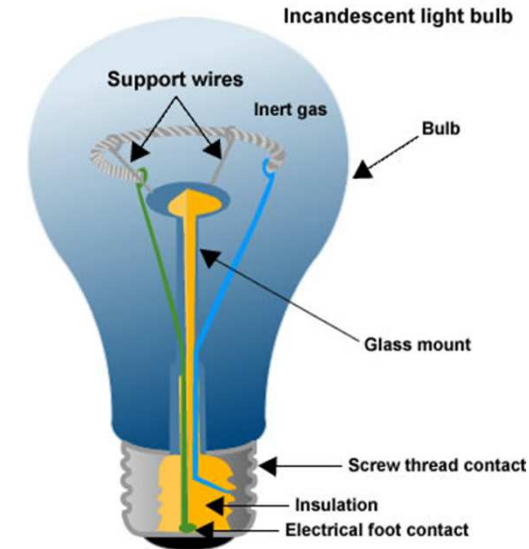
Figure 3

Πηγές φωτός (μη-λείζερ)



- **Λαμπτήρες πυρακτώσεως (Incandescent Lamps)**

- Δημιουργία φωτός από τη θέρμανση ενός μεταλλικού νήματος (συνήθως βολφράμιο)
- Ανέξοδη και πολύ απλή
- Ακτινοβολία με συνεχές φάσμα μελανού σώματος (blackbody radiation spectrum)
 - Βαθμονόμηση έντασης διαφόρων τύπων ανιχνευτών, συμπεριλαμβανομένων και φασματογράφων
- Ωστόσο, η υπεριώδης ακτινοβολία από τέτοιους λαμπτήρες είναι συνήθως πολύ χαμηλή



Spectra From Common Sources of Visible Light

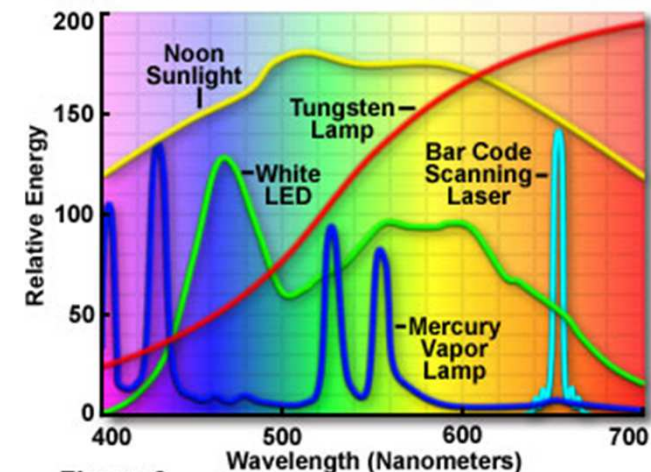


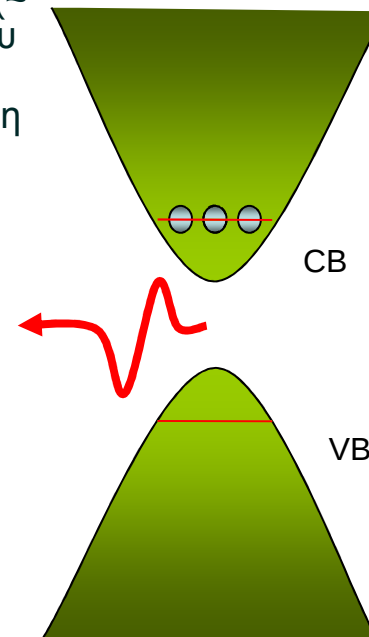
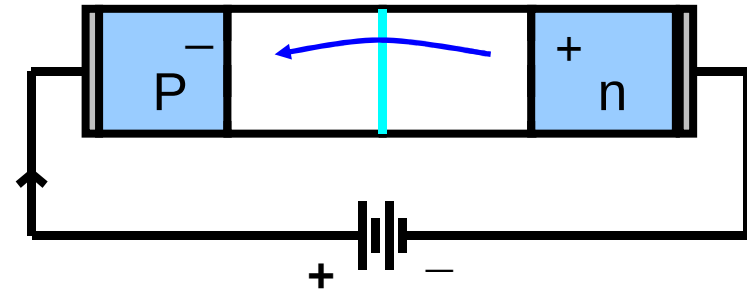
Figure 3

Πηγές φωτός (μη-λείζερ)



- **Δίοδος Εκπομπής Φωτός (Light-Emitting Diode)**

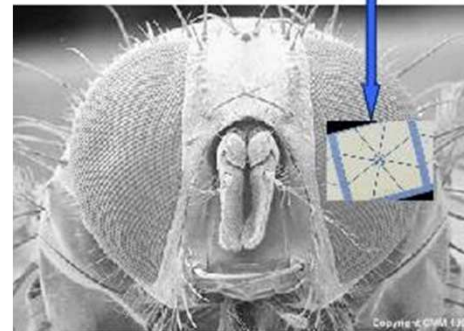
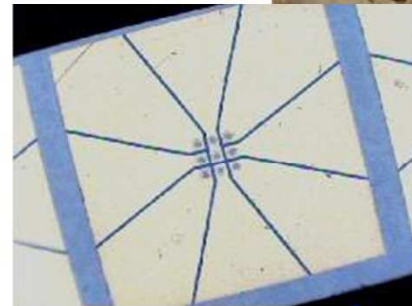
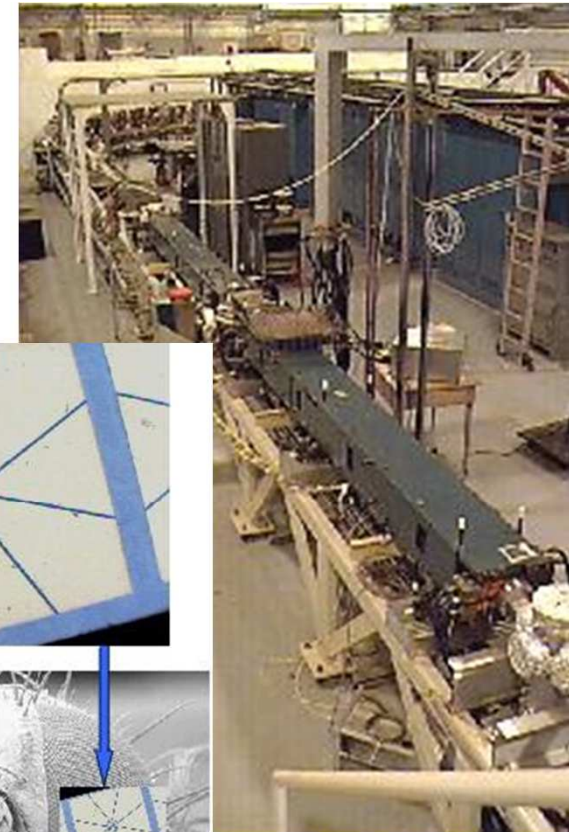
- Πηγές φωτός στερεάς κατάστασης (Solid-state) από ημιαγωγούς (semiconductor)
- Ηλεκτροφωταύγεια όταν θετικοί και αρνητικοί φορείς φορτίου (charge carriers) ανασυνδυάζονται στην επαφή (junction) του ημιαγωγού.
- Σχεδόν μονοχρωματικές
- Μήκος κύματος καθορίζεται από το χαρακτηριστικό ενεργειακό διάκενο (bandgap) του ημιαγωγού ή κράματος ημιαγωγών που χρησιμοποιούνται
- Διαθέσιμα μήκη κύματος από το εγγύς υπέρυθρο (~ 1050 nm) μέχρι το υπεριώδες (UV) (~ 250 nm) που συνεχώς επεκτείνονται
- Προσθήκη φωσφορίζοντος υλικού και ενσωμάτωση των πολλαπλών LED σε μια συσκευή → ευρυζωνικές LED λευκού φως
- Η ένταση των LED μπορεί να διαμορφώνεται σε υψηλές συχνότητες (> 100 MHz)
- Πρόσθετα πλεονεκτήματα
 - Συμπαγές μέγεθος
 - Χαμηλό επίπεδο της παραγόμενης θερμότητας
- Πιο χαμηλή ένταση από του λαμπτήρες πυρακτώσεως και λυχνίες τόξου.



Λείζερ



- **Χαρακτηριστικά**
 - Ψηλή ένταση (High intensity), Μονοχρωματικότητα (Monochromaticity), Συμφωνία (Coherence), Παραλληλότητα (Collimation), Πόλωση (Polarization)
- **Einstein, 1917**
- **Βασικές αρχές λειτουργίας → Charles Townes και Arthur Schalow, Bell Telephone Laboratories το 1958 (Βραβείο Nobel)**
- **G. Gould → δίπλωμα ευρεσιτεχνίας, 1970**
- **Πρώτο πραγματικό λείζερ**
 - Κρύσταλλο ρουβιδίου (Ruby)
 - Theodor Maiman, Hughes Research Laboratories, 1960
- **Χιλιάδες τύποι λείζερ υπάρχουν σήμερα**
 - Συμπεριλαμβανομένου του φαγώσιμου λείζερ από ζελέ ("Jello" laser)
- **Λείζερ → "laser" = (L)ight (A)mplification by (S)timulated (E)mission of (R)adiation (ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας)**

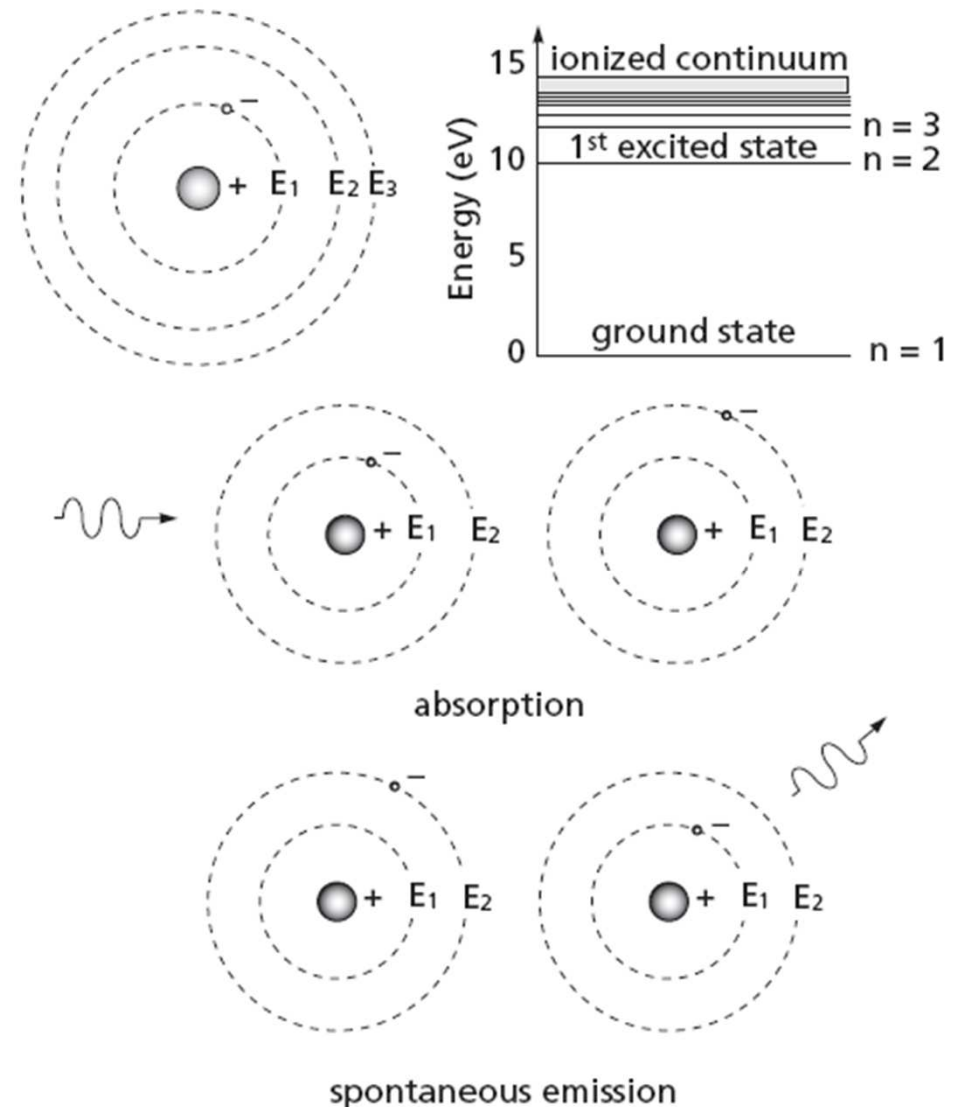




• Το άτομο του Bohr

- Ηλεκτρόνια σε τροχιά από τον πυρήνα
- Ένας περιορισμένος αριθμός προκαθορισμένων τροχιών είναι διαθέσιμες για τα ηλεκτρόνια.
- Υπό τις κατάλληλες συνθήκες ένα ηλεκτρόνιο
 - Μπορεί να πάει από θεμελιώδη κατάσταση (ground state) (χαμηλότερης ενέργειας τροχιά) σε μια υψηλότερη (διεγερμένη (excited)) κατάσταση → απορροφά ενέργεια
 - Μπορεί να υποστεί μετάπτωση (decay) από μια υψηλότερη σε χαμηλότερη κατάσταση → εκπέμπει ενέργεια
 - αλλά δεν μπορεί να παραμείνει μεταξύ των καταστάσεων αυτών
- Οι επιτρεπόμενες ενεργειακές καταστάσεις ονομάζεται “κβαντικές” καταστάσεις

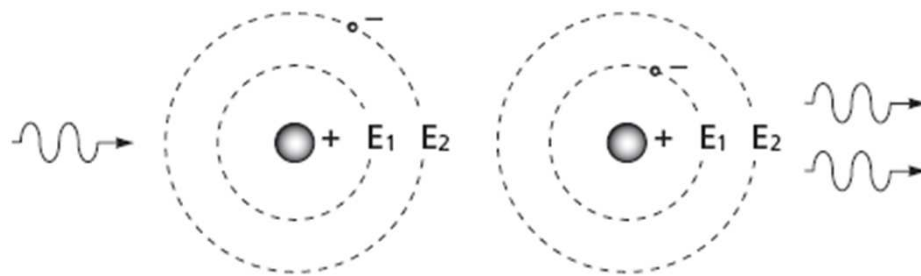
$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} \quad \Delta E = E_m - E_n$$



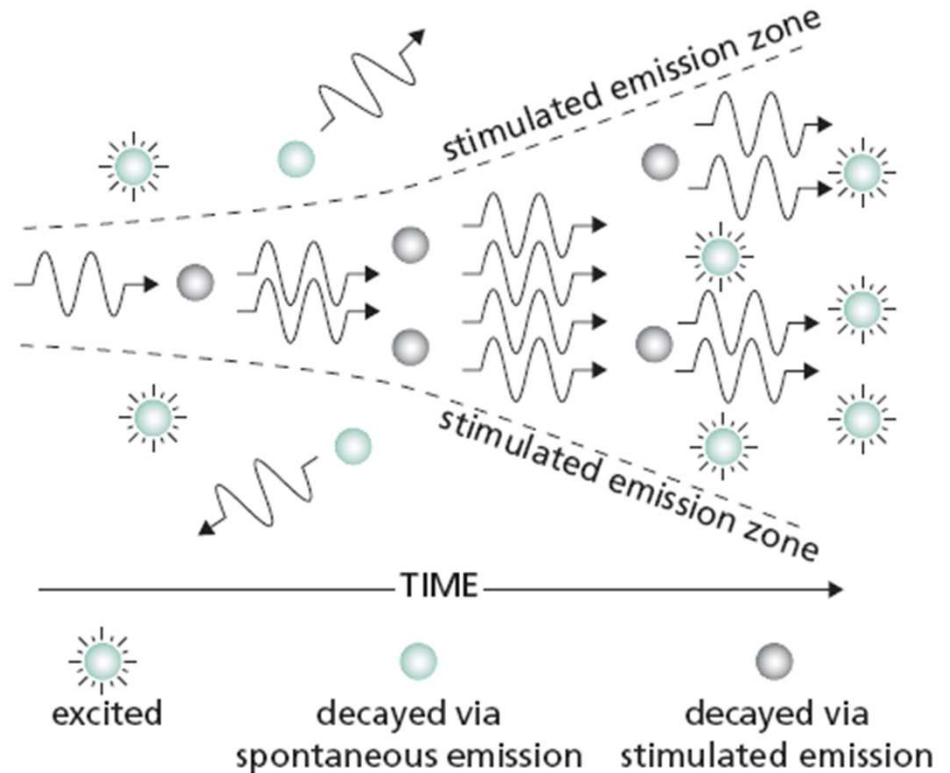


- **Εξαναγκασμένη εκπομπή (Stimulated emission)**

- Φωτόνιο με ενέργεια $\sim E_2 - E_1$
- Προκαλεί μετάπτωση του ηλεκτρονίου $\rightarrow$ εκπέμπεται φωτόνιο με ακριβώς το ίδιο μήκος κύματος, την ίδια κατεύθυνση, και την ίδια φάση $\rightarrow$ ενίσχυση



stimulated emission



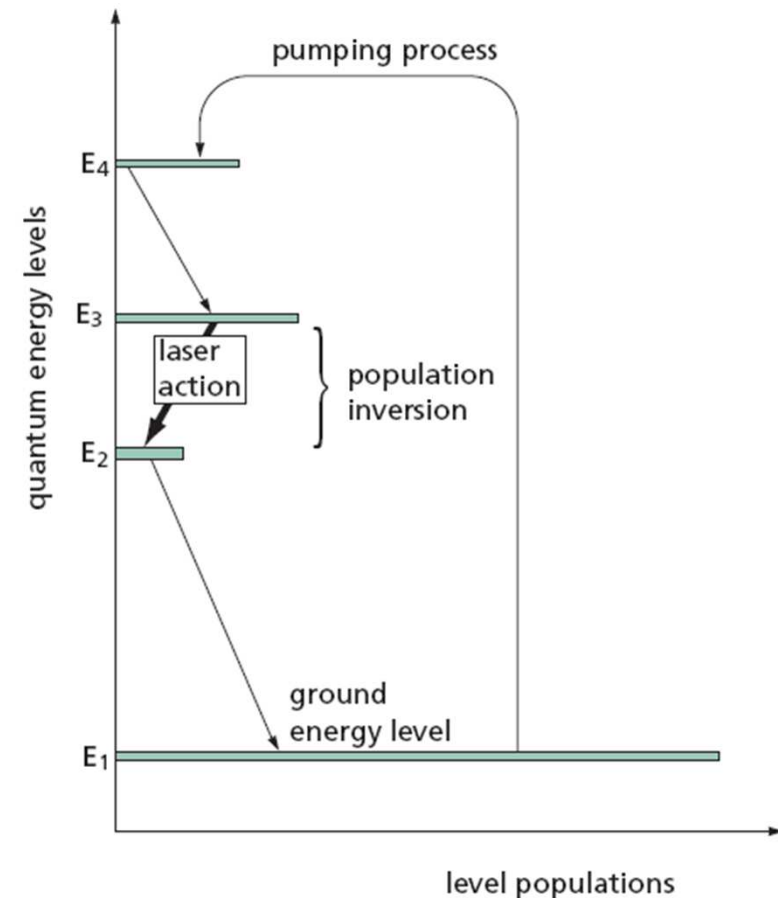


• Αντιστροφή πληθυσμού (Population Inversion)

- Πιθανότητα για εξαναγκασμένη εκπομπή είναι αρκετά μικρή
- Λίγα άτομα είναι συνήθως σε μια διεγερμένη κατάσταση
- Αρχή του Boltzmann
 - Ένας θεμελιώδης νόμος της θερμοδυναμικής
 - Όταν μια ομάδα ατόμων είναι σε θερμική ισορροπία, η σχετική πληθυσμού κάθε δύο επίπεδα ενέργειας δίνεται από
- Πολύ περισσότερα ενεργειακά επίπεδα, το καθένα έχει τη δική του σταθερά χρόνου μετάπτωσης (decay)
- Το ηλεκτρόνιο διεγείρεται σε ένα ανώτερο επίπεδο (π.χ. E_4)
- Επιστρέφει στην E_3 , στη συνέχεια στην E_2 , και τελικά στη θεμελιώδη κατάσταση E_1 .
- Εάν ο χρόνος που απαιτείται για μετάπτωση από το E_3 στο E_2 είναι πολύ μεγαλύτερος από το χρόνο που χρειάζεται για μετάπτωση από το E_4 στο E_3 ή E_2 στο E_1 και με συνεχή διαδικασία διέγερσης → "αντιστροφή πληθυσμού" μεταξύ των ενεργειακών καταστάσεων E_3 και E_2
- Φωτόνιο → Σύμφωνη ενίσχυση (coherent amplification)

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right)$$

$$\Delta N \equiv N_1 - N_2 = (1 - e^{-h\nu/kT}) N_1$$

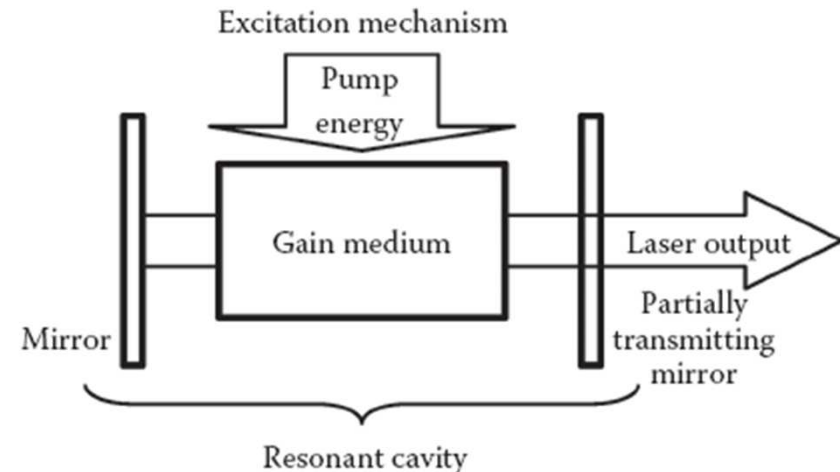




- **Κοιλότητα Συντονισμού (Resonator) του λείζερ**

- Μέσον Αύξησης (Gain Medium)
 - Το υλικό μέσα στο οποίο γίνεται η ενίσχυση του φωτός
 - Στερεό, υγρό, ή αέριο
 - Η ηλεκτρονική ενεργειακή δομή του υλικού καθορίζει τα μήκη κύματος και εύρος εκπομπής
 - **Κέρδος: $G = e^{\sigma(N_2 - N_1)b}$**
 - b = μήκος ενεργού υλικού
 - σ = μεταβατική διατομή (transition cross-section)
- Ταλάντωση (Oscillation) αρχίζει όταν:
 - Κέρδος στο υλικό = απώλειες του συστήματος
 - **$\rho_1 \rho_2 G^2 = 1$**
 - ρ = ποσοστό απώλειας
- Οριακή αντιστροφή πληθυσμού (Threshold population inversion):

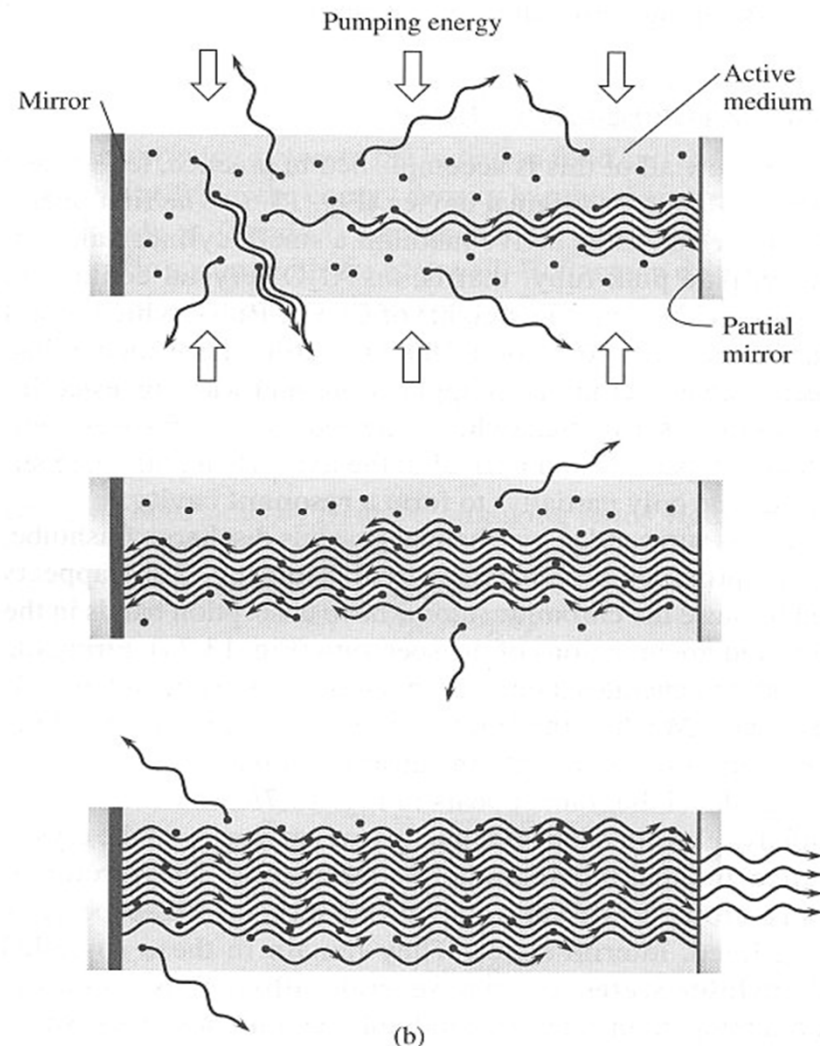
$$(N_2 - N_1)_{th} = \frac{\ln(1/\rho_1 \rho_2)}{2\sigma b}$$





- **Κατάλληλη διέγερση (“άντληση” (“pumping”))**

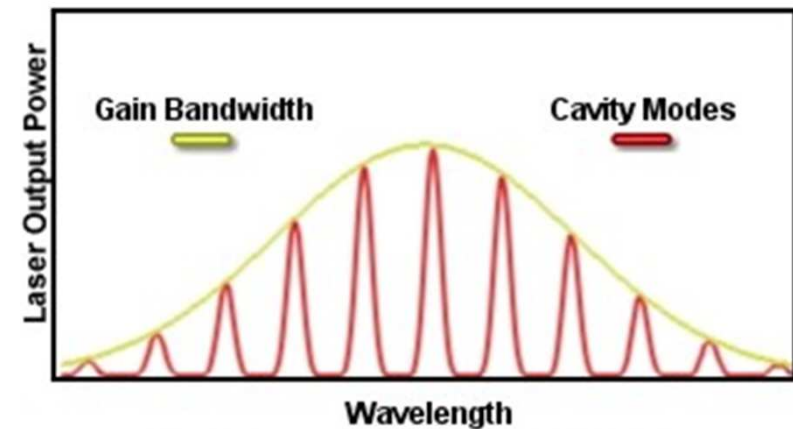
- Μηχανισμός διέγερσης
- Διέγερση μπορεί είναι
 - Ηλεκτρική (έγχυση ηλεκτρικού ρεύματος στο υλικό αύξησης, ημιαγωγό ή αέριο)
 - Οπτική (μέσο αύξησης απορροφά φως, είτε από λαμπτήρα ή άλλο λέιζερ)
→ το μετατρέπει σε ένα διαφορετικό μήκος κύματος για εκπομπή
- Ενέργεια αποθηκεύεται στα άτομα σε διεγερμένη κατάσταση
- Η ενέργεια που απελευθερώνεται μέσω είτε αυθόρμητης (spontaneous) ή εξαναγκασμένης (stimulated) εκπομπής, καθώς τα άτομα μεταβαίνουν πίσω στην αρχική θεμελιώδη τους κατάσταση





- **Επίτευξη συντονισμού (Resonance)**

- Εξαναγκασμένη εκπομπή → συμφωνία (coherence) = όλα τα κύματα φωτός σε φάση
- Αν η κοιλότητα είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος, κάθε κύμα θα είναι στη την ίδια φάση, όταν αντανακλάται από ένα από τα κάτοπτρα της κοιλότητας
 - Υπενθύμιση: ένα φωτόνιο κάνει πολλές διαδρομές μέσα στην κοιλότητα του λείζερ πριν εκπεμφθεί
- Αυτό επιτρέπει την ενισχυτική συμβολή μεταξύ όλων των φωτονίων.
- Χρειάζεται: $m\lambda = 2nL$
- Άλλα μήκη κύματος δεν θα ενισχύονται σημαντικά, και ως εκ τούτου, θα εξαφανιστούν
- Στην πράξη, οι μεταβάσεις (transitions) λείζερ έχουν κέρδος σε πάνω από ένα μήκος κύματος
- Εύρους ζώνης κέρδους (gain bandwidth) → έτσι ώστε το κατάλληλο μήκος της κοιλότητας συντονισμού να μπορεί να επιτευχτεί



Laser cavity:

$$L = m\lambda/2n$$

Estimate amplification factor:

$$\text{Amp} = (1 + \text{Gain})^L$$



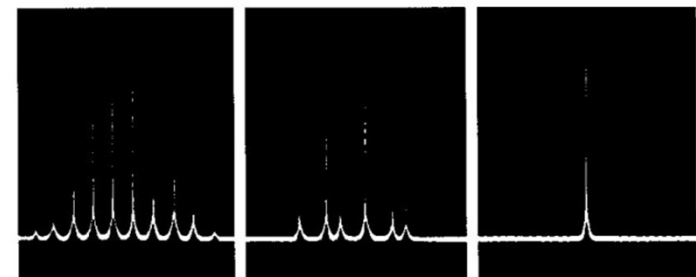
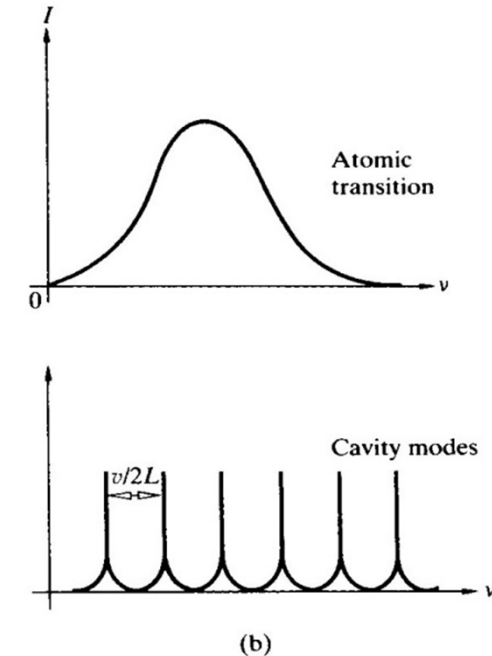
Διαμήκεις Τρόποι (Longitudinal Modes)

- Ένας διαμήκης τρόπος μιας συντονισμένης κοιλότητας είναι κάποιο συγκεκριμένο στάσιμο κύμα (standing wave) περιορισμένο στην κοιλότητα.
- Οι διαμήκεις τρόποι αντιστοιχούν στα μήκη κύματος του κύματος που ενισχύονται από την ενισχυτική συμβολή

$$L = m \frac{\lambda}{2n} \quad f = m \frac{c}{2nL}$$

$$f_{m+1} - f_m = \frac{c}{2nL}$$

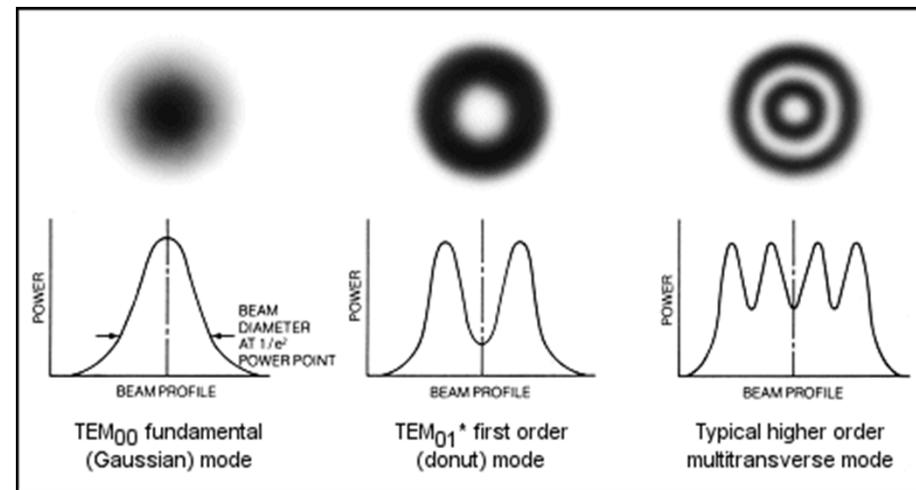
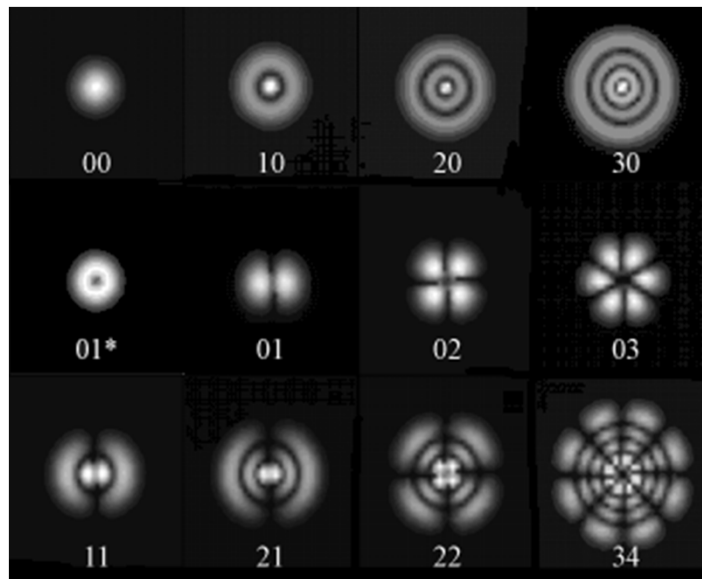
- Η πραγματική f είναι η συνέλιξη του εύρους ζώνης μετάβασης (transition bandwidth) και της f των διαμηκών τρόπων.





Εγκάρσιοι Τρόποι (Transverse Modes)

- Οι εγκάρσιοι τρόποι προσδιορίζουν την μορφή της κατανομής της έντασης εγκαρσώς της ακτίνας.
- Ο TEM₀₀ έχει μια Gaussian κατανομή και είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος.
- Οι κοιλότητες των περισσότερων εμπορικών λέιζερ σχεδιάζονται για να δίνουν μονότροπη εγκάρσια ακτίνα



$$I(r) = \frac{2P}{\pi d^2} e^{-2r^2/d^2}$$



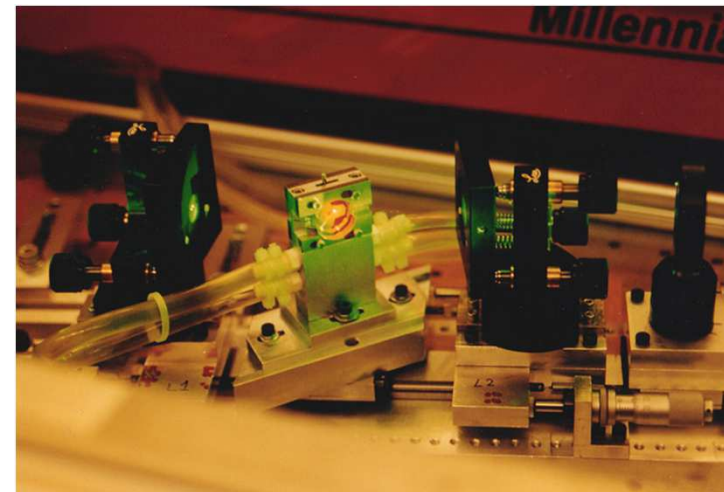
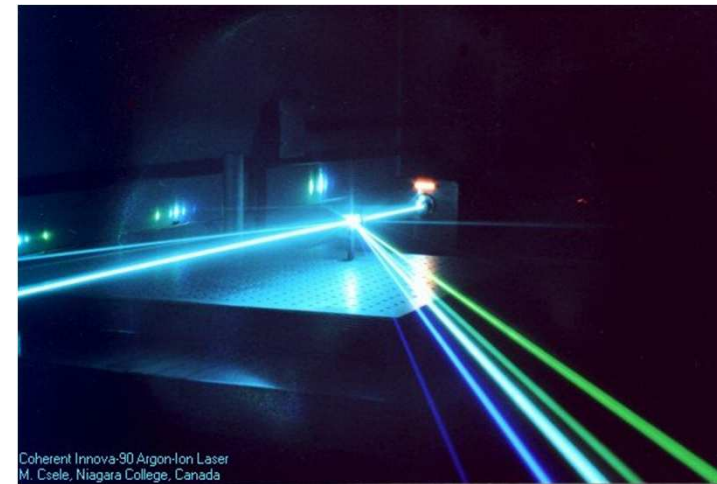
Υλικά κέρδους (Gain Medium Materials)

• Αέριο

- Είναι η «κινητήριος δύναμη» των λέιζερ για πολλά χρόνια
- Το στενό πλάτος (linewidth) του μήκους κύματος τους έχει επιτρέψει τεράστια πρόοδο στη φυσική και τη μηχανική
- Βρίσκονται σε πτωτική πορεία, μια και τα λέιζερ στερεάς κατάστασης και ημιαγωγών έχουν γίνει φθηνότερα, πιο ισχυρά και πιο ευέλικτα

• Στερεάς Κατάστασης (Κρυσταλλικά) (Solid State (Crystal))

- Γενικά είναι λίγα mm σε μέγεθος
- Μπορούν να φθάσουν σε ψηλή ένταση
- Ευαίσθητα σε μη-γραμμικές επιδράσεις
- Πρώτο λέιζερ ορατού φωτός → λέιζερ ρουβιδίου (ruby)
- Μεγάλο εύρος ζώνης κέρδους, στενό πλάτος μήκους κύματος (linewidth), πολύ ευπροσάρμοστα!

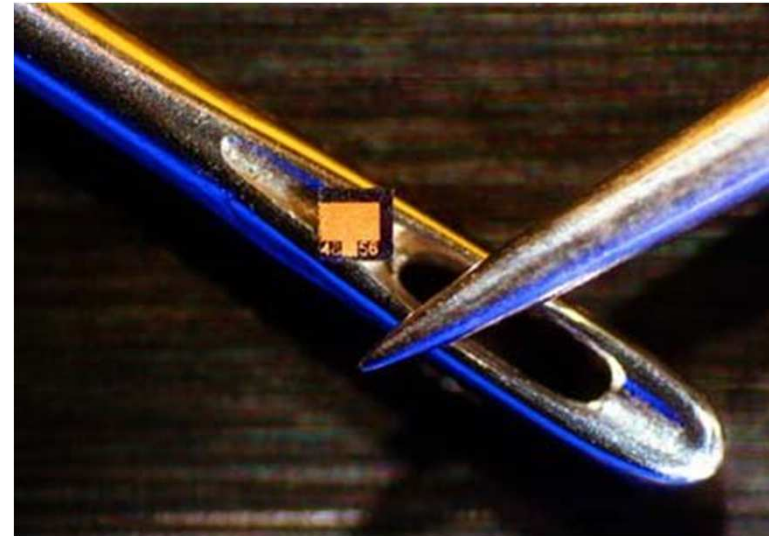




Υλικά κέρδους (Gain Medium Materials)

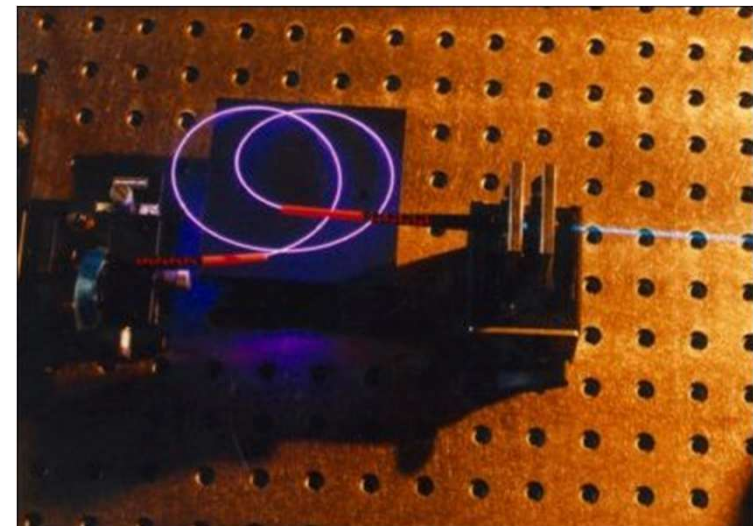
• Δίοδοι ημιαγωγών

- Μπορεί να είναι της τάξης των εκατό μm σε μέγεθος
- Γενικά παράγουν χαμηλή ένταση, όμως υπάρχουν και εξαιρέσεις
- Μπορεί να μπουν σε συστοιχίες για την παραγωγή υψηλής έντασης
- Χρησιμοποιούνται ως «αντλία» για άλλα στερεάς κατάστασης λείζερ
- Στενό εύρος ζώνης κέρδους (gain bandwidth)
- Φθηνά σε σύγκριση με άλλα υλικά



• Λείζερ Οπτικών Ινών

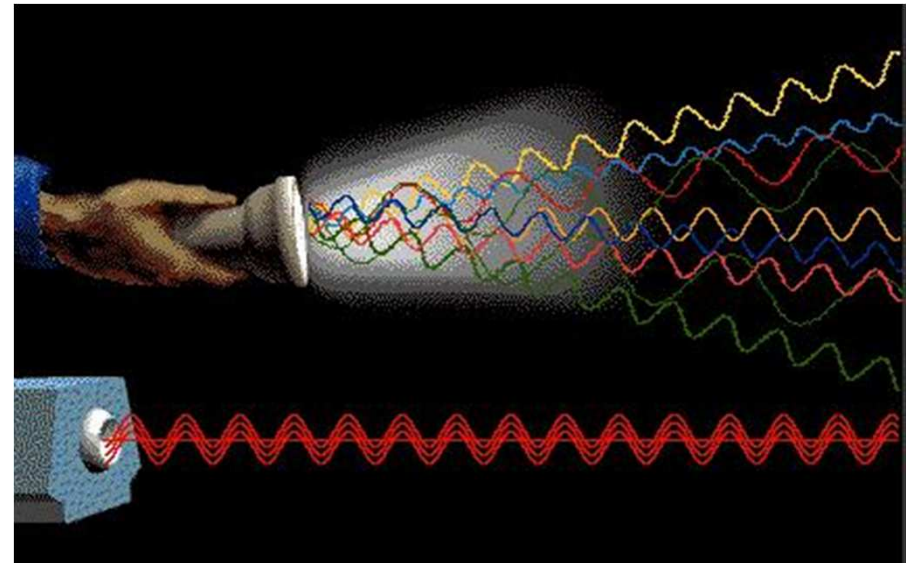
- Μπορεί να έχουν ευρύ εύρος ζώνης και υψηλή ένταση, αλλά περιορίζονται σε μήκη κύματος των οπτικών ινών και είναι ευαίσθητα σε μη γραμμικά φαινόμενα
- Πολύ σταθερά, αλλά όχι ευέλικτα
- Μπορεί να επιδείξουν στενό πλάτος (linewidths) μήκους κύματος
- Συμπαγές μικρό μέγεθος





• Χαρακτηριστικά του φωτός λέιζερ

- Ψηλής έντασης (High intensity)
- Μονοχρωματικό (Monochromatic)
- Σύμφωνο (Coherent)
- Παραλληλισμένο (Collimated)
- Πολωμένο (Polarized)





- **Συνεχές Κύμα (Continuous Wave)**

- Η ισχύς εξόδου είναι σταθερή, χωρίς χρονικές διακοπές
- Μαθηματικά χαρακτηρίζεται από μια και μόνο συχνότητα



- **Παλμικό (Pulsed)**

- Ισχύς έρχεται σε μικρές δόσεις → Σύντομους παλμούς.
- Μπορεί να έχει τεράστια μέγιστη ένταση, αλλά χαμηλή μέση ισχύ
- Μαθηματικά χαρακτηρίζεται από συμβολή πολλών συχνοτήτων



- **Παλμοί μικρότεροι από μερικά μsec (10^{-6} s) εύκολα παράγονται με απευθείας αυξομείωση της εξόδου ενός CW λείζερ**
 - μηχανικοί, ηλεκτρο-οπτικοί, ή ακουστο οπτικοί μηχανισμοί κλείστρου
- **Πιο μικρής διάρκειας παλμοί, της τάξης των nsec (10^{-9} s) ή μικρότεροι, επιτυγχάνονται με ειδικά σχεδιασμένα λείζερ**
 - Μετατροπή Q (Q-switching)
 - Κλείδωμα ρυθμού (Mode-locking)



- **Μετατροπή Q (Q-switching)**

- Παλμοί φωτός με εξαιρετικά ψηλή ένταση (gigawatt) πολύ περισσότερη από ότι με CW
- Χαμηλότερος ρυθμός επανάληψης σε σχέση με το mode-locking
- Μέθοδος
 - Μεταβλητός εξασθενητής (Variable attenuator) εσωτερικό της κοιλότητας του λείζερ
 - Το λείζερ διεγείρεται ενώ ο Q-διακόπτης έχει τεθεί ώστε να εμποδίζει την ανατροφοδότηση του φωτός
 - Αντιστροφή πληθυσμού χωρίς όμως παραγωγή φωτός
 - Ενέργεια αποθηκεύεται στο υλικό και αυξάνεται καθώς το υλικό διεγείρεται → κορεσμένο κέρδος
 - Ο Q-διακόπτης της συσκευής αλλάζει γρήγορα από χαμηλό σε υψηλό Q → ανατροφοδότηση
- Τελικό αποτέλεσμα: ένας σύντομος παλμός φωτός ("παλμός γίγαντας"), ο οποίος μπορεί να έχει πολύ υψηλή μέγιστη ένταση

- **Κλείδωμα ρυθμού (Mode-locking)**

- Αυτή η μέθοδος παράγει παλμούς εξαιρετικά μικρής διάρκειας, της τάξης των psec (10^{-12} s) ή fsec (10^{-15} s).
- Προκαλεί μια σταθερή σχέση μεταξύ των φάσεων των τρόπων (modes) της κοιλότητας του λείζερ
- Πολύ μεγάλο εύρος φάσματος (spectral bandwidth)
- Συμβολή (Interference) μεταξύ αυτών των τρόπων (modes) έχει ως αποτέλεσμα το φως το λείζερ να εκπέμπεται σαν μια σειρά από παλμούς

Φωτοδίοδοι



- **Συμπεριφορά “βαλβίδας”**

- Διάχυση μιας επαφής PN από το P στο N και αντίστροφα, δημιουργεί μια περιοχή απογύμνωσης (depletion region) που είναι μη-αγωγιμη
- Η απογύμνωση ενισχύεται με ανάστροφη πόλωση (reverse bias) και καταστρέφεται με ορθή πόλωση (forward bias)

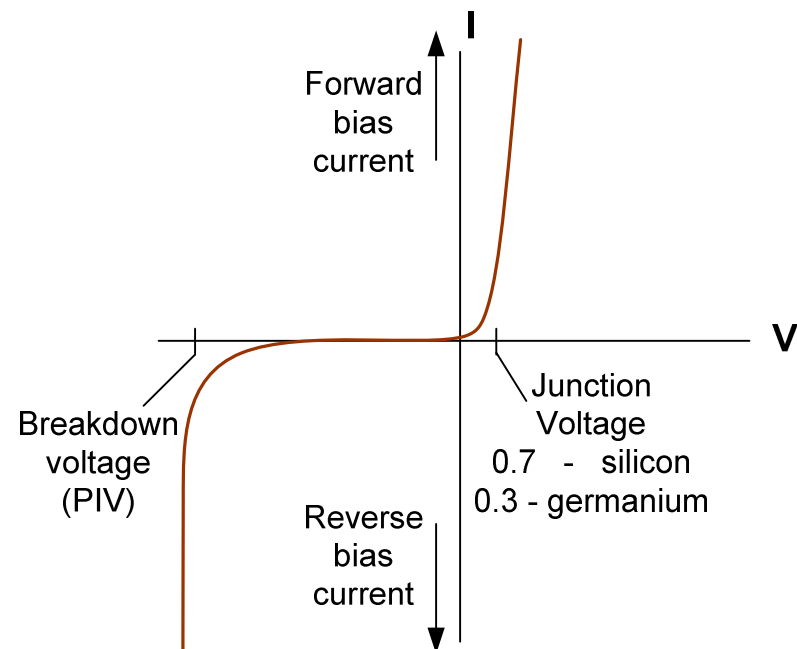
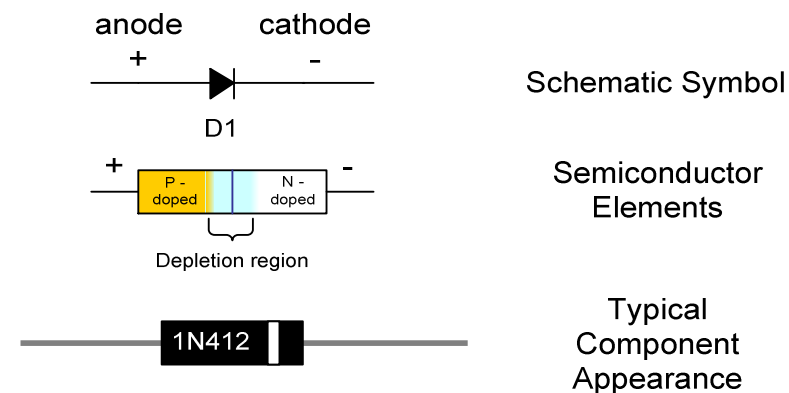
- **Ορθή Πόλωση (forward biased)**

- Ψηλή ροή ρεύματος πάνω από την τάση κατωφλίου ή επαφής (junction voltage)

- **Ανάστροφη Πόλωση (reverse biased)**

- Σχεδόν καθόλου ρεύμα εκτός και αν υπερβούμε την τάση διάσπασης (breakdown voltage.)
 - Καταστρέφει κανονικές διόδους, OK για zeners

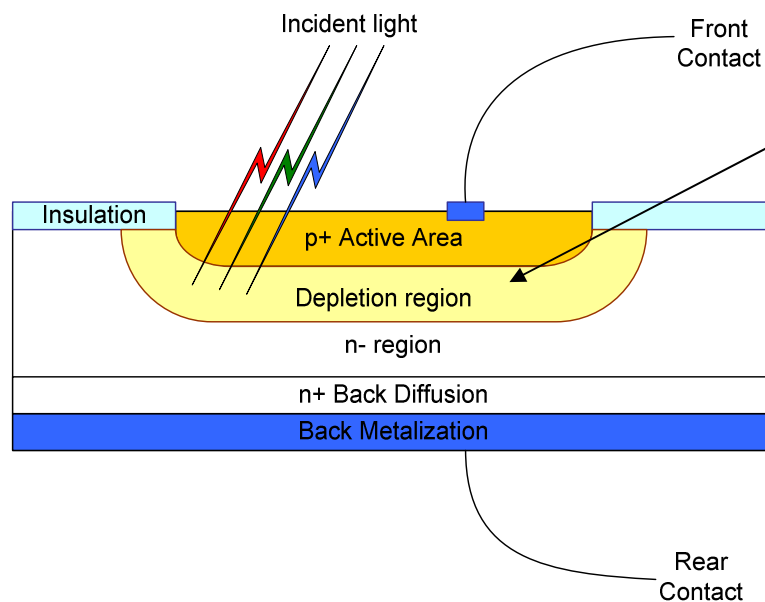
Diode



Φωτοδίοδοι



- Δομή της φωτοδιόδου



Απορρόφηση στην περιοχή απογύμνωσης (depletion layer) προκαλεί ροή ρεύματος και αν η διόδος είναι ανάστροφα πολωμένη (reverse biased) θα προκληθεί μεγάλη ροή ρεύματος.

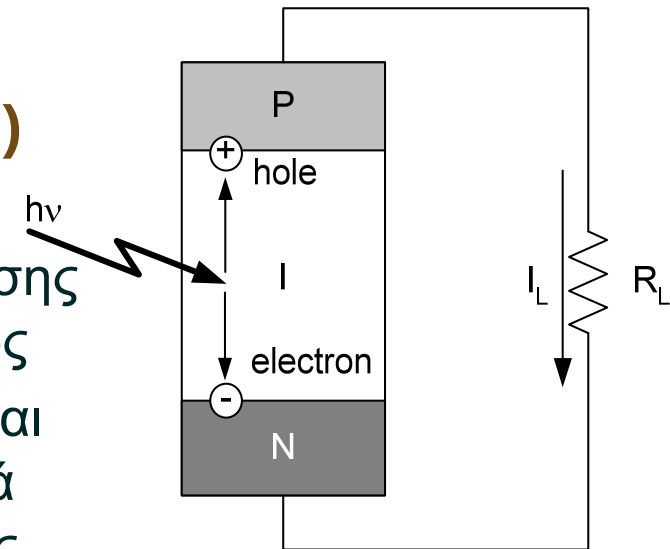
Φωτοδίοδοι



Αρχές της φωτοδιόδου

- Βασίζεται σε δίοδο επαφής (junction) PN ή PIN

- Απορρόφηση στην περιοχή απογύμνωσης (depletion layer) προκαλεί ροή ρεύματος
- Η περιοχή απογύμνωσης πρέπει να είναι εκτεθειμένη στο φως και να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να αλληλεπιδρά με το φως



- **Spectral sensitivity**

Material	Band gap (eV)	Spectral sensitivity
silicon (Si)	1.12	250 to 1100 nm
indium arsenide (InGaAs)	~0.35	1000 to 2200 nm
Germanium (Ge)	.67	900 to 1600 nm

Φωτοδίοδοι



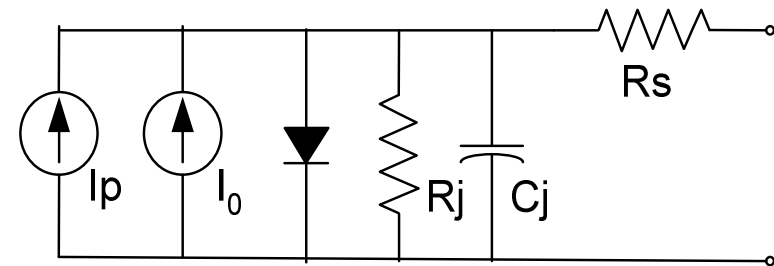
Χαρακτηριστικά της φωτοδιόδου

• Μοντέλο Κυκλώματος

- I_0 Ρεύμα Σκότους (Dark current) - θερμικό (thermal)
- I_p Ρεύμα από ροή (flux) φωτονίων

• Χαρακτηριστικά θορύβου

- Θόρυβος αιχμής (Shot noise)
 - Σχετίζεται με το σήμα
 - $q = 1.602 \times 10^{-19}$ coulombs
 - I = bias (or signal) current (A)
 - i_s = noise current (A rms)
- Θόρυβος Johnson noise
 - Σχετίζεται με τη θερμοκρασία
 - k = Boltzman's constant = 1.38×10^{-23} J/K
 - T = temperature (°K)
 - B = noise bandwidth (Hz)
 - R = feedback resistor (W)
 - e_{OUT} = noise voltage (Vrms)



$$i_s = \sqrt{2qi}$$

$$e_{out} = \sqrt{4kTBR}$$

Φωτοδίοδοι



Ως φωτοβολταϊκό

- $I = \text{Θερμικό μέρος} + \text{Ρεύμα από ροή φωτονίων}$

$$I = I_0 \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right) - \frac{\eta e P}{hf}$$

- where

I = ρεύμα φωτοδιόδου (photodiode current)

V = τάση φωτοδιόδου (photodiode voltage)

I_0 = ρεύμα ανάστροφου κορεσμού (reverse saturation current)
φωτοδιόδου

e = φορτίο ηλεκτρονίου (electron charge)

k = σταθερά Boltzman

T = θερμοκρασία (K)

f = συχνότητα του φωτός

h = σταθερά Plank

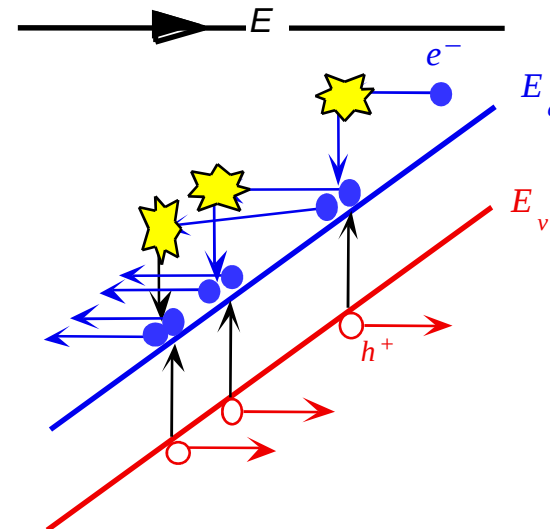
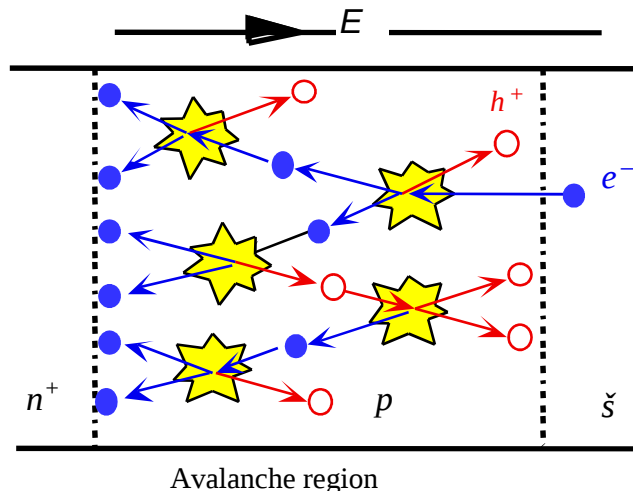
P = οπτική ισχύς (optical power)

η = η πιθανότητα ότι $h\nu$ θα καταφέρει να μεταφέρει το ηλεκτρόνιο πάνω από το ενεργειακό διάκενο (band gap)

Φωτοδίοδοι Διάσπασης Χιονοστιβάδας (Avalanche)



- Σχεδιασμένες να λειτουργούν σε ανάστροφη πόλωση (reverse bias) (συνήθως 50–300 V)
 - Ανάστροφη Πόλωση (Reverse bias) → Ψηλό ηλεκτρικό πεδίο μέσα στη φωτοδίοδο
 - Τα φορτία που παράγονται από τα φωτόνια επιταχύνονται
 - Πρόσκρουση των (πρωτογενών) επιταχυμένων φορτίων με το κρυσταλλικό πλέγμα (crystal lattice) οδηγεί σε ιονισμό → παραγωγή δευτερογενών ζευγών ηλεκτρονίων-οπών →
 - Collision of these accelerated (primary) charges with the crystal lattice leads to ionization → generates secondary electron-hole pairs → αλυσιδωτή αντίδραση (χιονοστιβάδα) → επιπλέον φορτίο από περαιτέρω διαδικασίες ιονισμού.
- Κέρδος ή πολλαπλασιαστικός παράγοντας των APD
 - Εξαρτάται από την ανάστροφη πόλωση
 - 50 μέχρι και μερικές 100δες φορές
- Ψηλοί παράγοντες κέρδος → χρήσιμες για τη μέτρηση αδύνατων οπτικών σημάτων που δεν ανιχνεύονται με τις συμβατικές φωτοδιόδους



Φωτοδίοδοι Διάσπασης Χιονοστιβάδας (Avalanche)



- **Πλεονεκτήματα**

- Αυξημένη ευαισθησία

- **Περιορισμοί**

- Λειτουργία κοντά στη τάση διάσπασης (breakdown voltage)
 - μη-γραμμική απόκριση
 - Η ενεργή περιοχή των APD είναι πολύ μικρή
 - ατέλειες στην κρυσταλλική δομή και μηχανική τάση (strain) πρέπει να αποφεύγονται για να επιτευχθεί η πολύ υψηλή τάση διάσπασης που απαιτείται για τη διαδικασία χιονοστιβάδας
 - Ψηλότερα επίπεδα θορύβου
 - παρουσιάζεται θόρυβος ενίσχυσης
 - Τα κυκλώματα είναι συνήθως πιο περίπλοκα μια και απαιτούνται ψηλές τάσης για τη λειτουργία της φωτοδιόδου



Φωτοπολλαπλασιαστές (Photomultiplier Tubes)



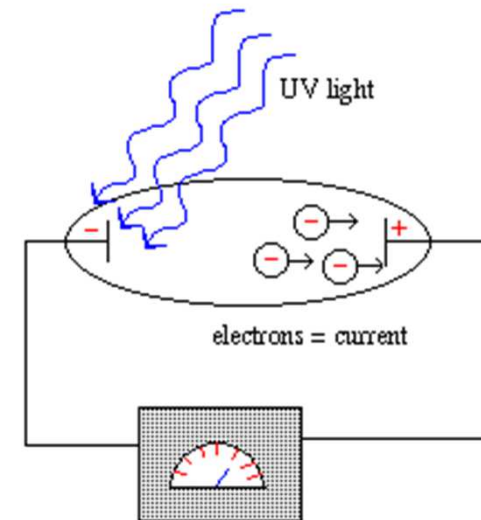
- **Φωτοπολλαπλασιαστές (Photomultiplier Tubes - PMTS)**

- Ανιχνευτές φωτός για εφαρμογές πολύ χαμηλής έντασης
 - Π.χ. φασματοσκοπία φθορισμού (fluorescence spectroscopy)
- Ψηλό Κέρδος → Μεγάλη ευαισθησία

- **Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (Photoelectric effect)**

- Το φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τον Heinrich Hertz το 1887 και εξηγήθηκε από τον Albert Einstein το 1905.
- Εξήγηση
 - Το φως αποτελείται από διακριτά σωματίδια ενέργειας, ή κβάντα, τα ΦΩΤΟΝΙΑ
 - Φωτόνια με αρκετή ενέργεια προσκρούουν στην φωτοκάθοδο → Απελευθερώνουν ηλεκτρόνια με κινητική ενέργεια ίση με την ενέργεια των φωτονίων μείων την “συνάρτηση έργου” (η ενέργεια που απαιτείται για την απελευθέρωση των ηλεκτρονίων από ένα συγκεκριμένο υλικό)
- Ο Einstein πήρε το βραβείο Nobel για ένα άρθρο του το 1905 που περιέγραφε αυτό το φαινόμενο
- Ποια είναι τα άλλα δύο διάσημα άρθρα που έγραψε ο Einstein το 1905;
 - Theory of special relativity
 - Explanation of Brownian motion

Photoelectric Effect



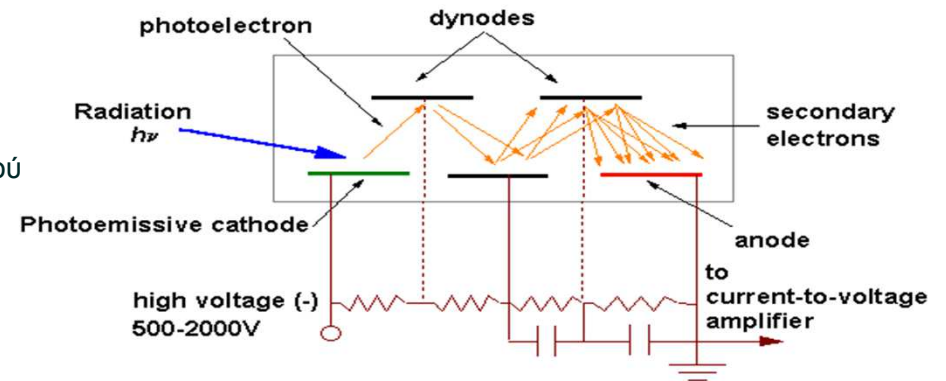
photon = wave particle of light

Φωτοπολλαπλασιαστές (Photomultiplier Tubes)



• Λειτουργία

- Γυάλινο περίβλημα κενού
- Φωτοκάθοδος
 - Τα φωτόνια προσπίπτουν στην κάθοδο και απελευθερώνουν ηλεκτρόνια λόγω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου (πολύ μικρό σήμα)
- Μια σειρά από δύνοδοι (dynodes)
 - Τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται από μια σειρά ηλεκτροδίων που ονομάζονται δύνοδοι
 - Επιπρόσθετα ηλεκτρόνια απελευθερώνονται σε κάθε δύνοδο
 - Καταιγιστικό (Cascading) αποτέλεσμα $\rightarrow 10^5$ to 10^7 ηλεκτρόνια για κάθε φωτόνιο που προσπίπτει στην αρχική φωτοκάθοδο
 - Εξαρτάται από τον αριθμό των δυνόδων και την τάση επιτάχυνσης
- Άνοδος
 - Συλλέγει το ενισχυμένο σήμα, όπου μπορεί να μετρηθεί.



• Κενό μέσα στο γυάλινο περίβλημα

- Σκοπός: ελαχιστοποιήσει τις συγκρούσεις των ηλεκτρονίων με μόρια του αερίου κατά τη διάρκεια της διέλευσης
- Απαιτεί ισχυρό σώμα του σωλήνα
 - Τα ηλεκτρόδια για τις ηλεκτρικές συνδέσεις διαπερνούν μέσα από γυαλί στο κάτω μέρος του σωλήνα (στεγανότητα)
- Βλάβη στο σωλήνα από ήλιο ή υδρογόνο
- "Μικρά" μόρια αερίου μπορούν να διαρρεύσουν μέσα στο σωλήνα, ακόμα και μέσα από το γυαλί



Φωτοπολλαπλασιαστές (Photomultiplier Tubes)



- **Φωτοκάθοδος**

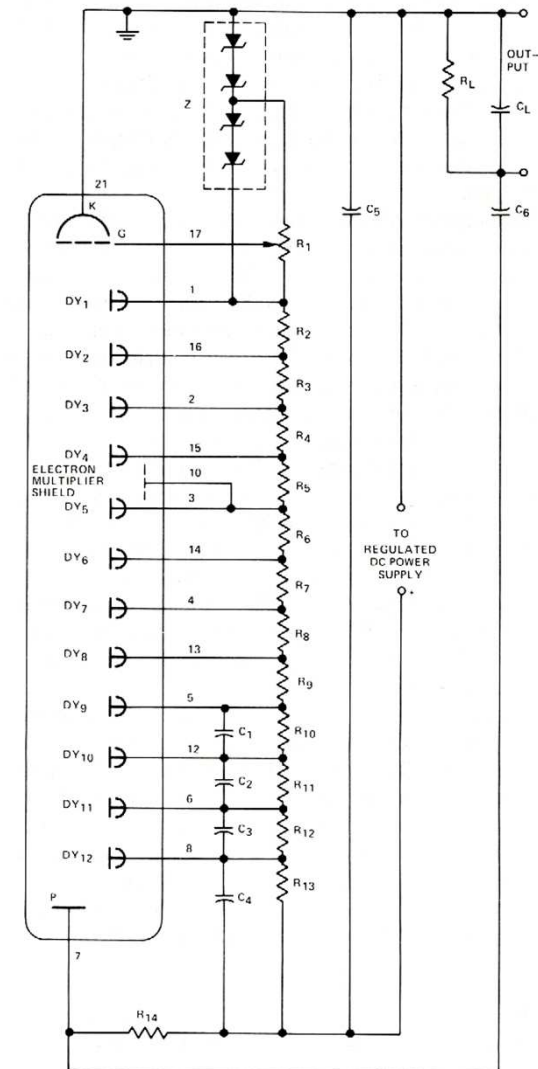
- Σύνθεση: Ημιαγώγιμα υλικά από αντιμόνιο (Sb) και ένα ή περισσότερα αλκαλικά μέταλλα (Cs, Na, K)
 - Λεπτή ώστε τα ηλεκτρόνια να μπορούν να απελευθερώνονται
- Ορισμός της κβαντικής αποδοτικότητας της φωτοκαθόδου, $\eta(\lambda)$

$$\eta(\lambda) = \frac{\text{Number of photoelectrons released}}{\text{Number of incident photons } (\lambda) \text{ on cathode}}$$

- Τυπική κβαντική αποδοτικότητα της φωτοκαθόδου: 10 - 30%
- Φάσμα απόκρισης της φωτοκαθόδου
 - Πρέπει το φάσμα του προσπίπτοντος φωτός να συμπίπτει με το φάσμα απόκρισης της φωτοδιόδου

- **Η αλυσίδα των δυνόδων**

- Η υψηλή τάση που εφαρμόζεται στις δυνόδους δημιουργεί ηλεκτρικά πεδία που καθοδηγούν ηλεκτρόνια μεταξύ από στάδιο σε στάδιο
- Σκοπός
 - Παρέχει ένα ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ φωτοκαθόδου και της πρώτης δυνόδου
 - Διαδοχικές δυνόδοι επιταχύνουν τα ηλεκτρόνια από στάδιο σε στάδιο
- Περίπου 100 V διαφορά τάση απαιτείται μεταξύ σταδίων
- Αλυσίδα των αντιστάσεων διαιρεί μια υψηλή τάση σε μικρότερα βήματα
- Πυκνωτές αποθηκεύουν φορτίο για πολλαπλασιασμό των ηλεκτρονίων
- Τυπική κατανάλωση ρεύματος 1 - 2 mA
- Σύνθεση δυνόδων
 - Ag - Mg
 - Cu - Be Εναποτίθενται σε λεπτό στρώμα
 - Cs - Sb πάνω σε αγωγίμη βάση

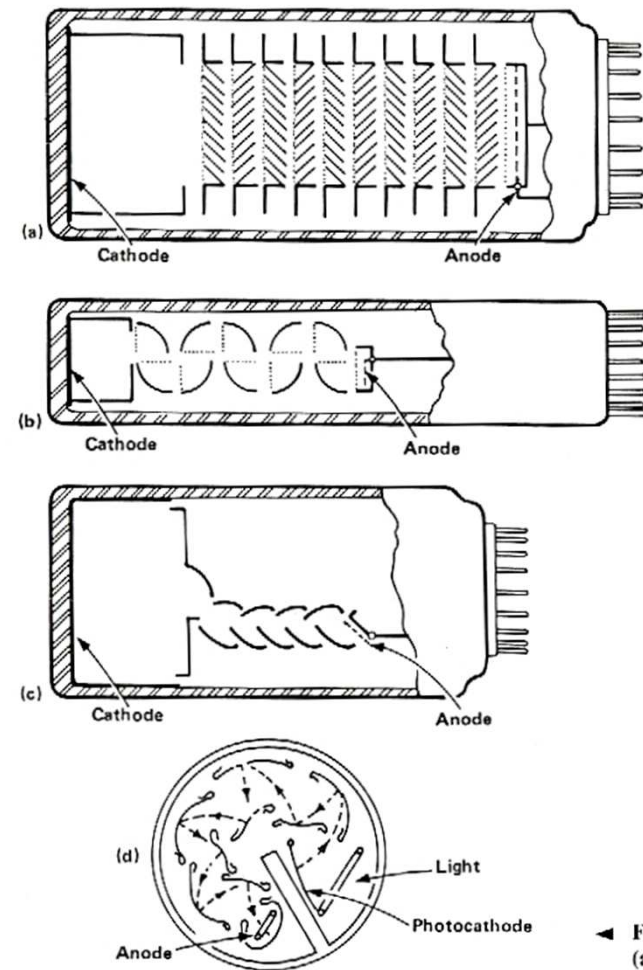


Φωτοπολλαπλασιαστές (Photomultiplier Tubes)



- **Κέρδος του Φωτοπολλαπλασιαστή**

- δ = μέσος όρος ηλεκτρονίων που απελευθερώνονται απ κάθε δυνόδο
 - Συνήθως, $\delta = 4$
 - Εξαρτάται από το υλικό της δυνόδου και τη διαφορά τάσης μεταξύ δυνόδων
- n = αριθμός σταδίων πολλαπλασιασμού
- **Κέρδος** Φωτοπολλαπλασιαστή = δ^n
 - Για $n = 10$ στάδια και $\delta = 4 \rightarrow \text{Κέρδος} = 4^{10} = 1 \times 10^7$
 - Αυτό σημαίνει ότι ένα ηλεκτρόνιο το οποίο εκπέμπεται από τη φωτοκάθοδο (αυτά ονομάζονται “φωτοηλεκτρόνια”) αποδίδει 10^7 ηλεκτρόνια στο σήμα εξόδου



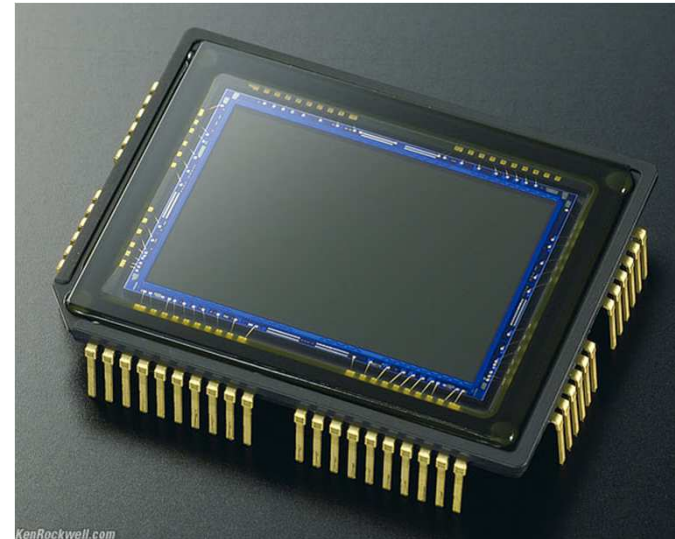
◀ Fig. (a)

Αισθητήρες Απεικόνισης



CCD και CMOS

- Τόσο οι CCD όσο και οι CMOS αισθητήρες λειτουργούν με τη χρήση φωτοευαίσθητων κυκλωμάτων που αντιδρούν στο φως και αποθηκεύουν αναλογικά σήματα σαν ψηφιακά δεδομένα, δηλαδή μια εικόνα.
- Χρησιμοποιούν διαφορετικές μεθόδους για την επίτευξη του στόχου αυτού.
- **CCD**
 - Charge Coupled Device
- **CMOS**
 - Complementary Metal Oxide Semiconductor
- **Σειρές από διόδους (photosites) που παράγουν μια τάση:**
 - Γραμμικά ανάλογη με την ένταση του προσπίπτοντος φωτός
 - Μη-γραμμικά ανάλογη με το ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ
- **Φτιαγμένα από στρώματα σιλικόνης**
 - Η σιλικόνη είναι ευαίσθητη στο φως
 - Τα στρώματα προσθέτουν λειτουργικότητα - διαφορετικά στρώματα εκτελούν διαφορετικές λειτουργίες.

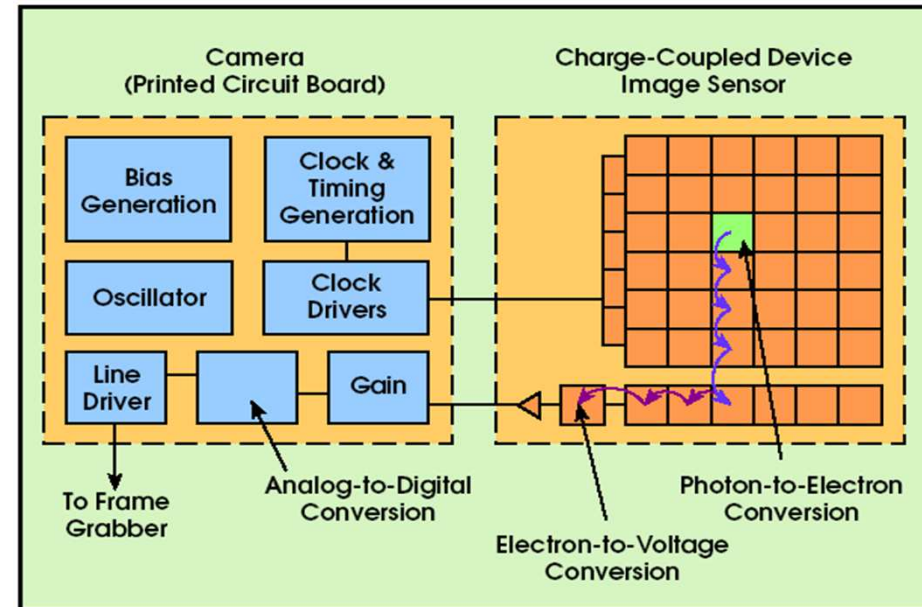


Αισθητήρες Απεικόνισης



- **CCD (Charged-Coupled Device)**

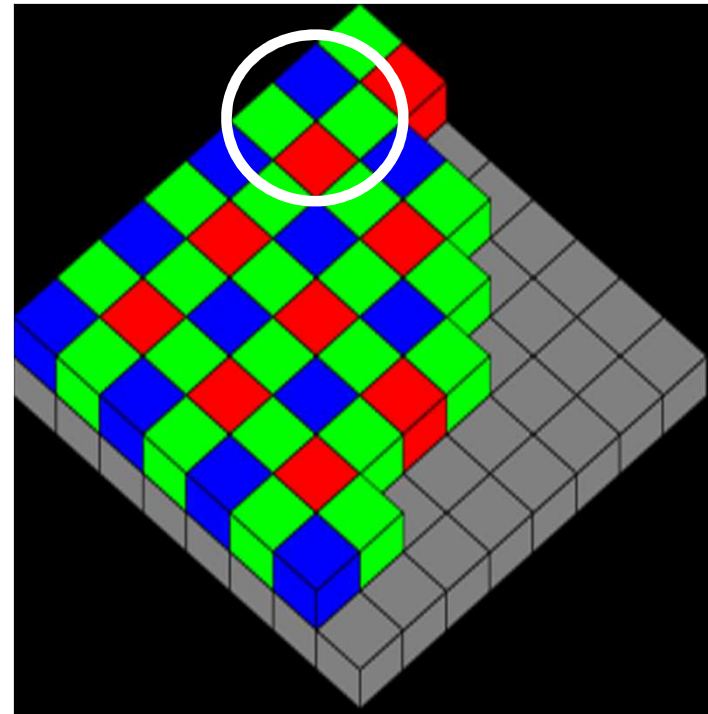
- Φωτοευαίσθητη αναλογική συσκευή
 - Καταγράφει το φως σαν ένα μικρό ηλεκτρικό φορτίο σε κάθε ρίχελ ή κυψέλη του. (Στην ουσία ένα CCD είναι μια συλλογή κυψελών CCD).
- Το φως προσπίπτει σε μια κυψέλη CCD → αποκτά ηλεκτρικό φορτίο ανάλογο με το πόσο φως φτάνει στη συγκεκριμένη κυψέλη CCD
- Για να καταγράψει το σήμα το CCD απαιτούνται επιπλέον κυκλώματα
 - Τη μετατροπή των αναλογικών δεδομένων φωτός σε ένα αναγνώσιμο ψηφιακό σήμα.
 - Στρώματα πυκνωτών που ονομάζονται "Stages" → Μεταφορών το αναλογικό σήμα σε μια σειρά από flip-flops που αποθηκεύουν τα δεδομένα
 - Κάθε κυψέλη CCD μεταφέρει το φορτίο της σε γειτονική κυψέλη και στη συνέχεια έξω στο εξωτερικό κύκλωμα.
 - Τότε το φορτίο διαβάζεται από έναν αναλογικό-προς-ψηφιακό μετατροπέα
 - Ακέραιος από 0 έως 4095 για τις περισσότερες σύγχρονες φωτογραφικές μηχανές DSLR.
 - 0-255, για χαμηλότερης ποιότητας φωτογραφικές μηχανές.
 - Όλα ελέγχονται από ένα σήμα συγχρονισμού (clock).
 - Αυτός είναι ο ορισμός της Αναλογικού Καταχωρητή Ολίσθησης (Analog Shift Register)





- Πως τα CCDs καταγράφουν το χρώμα

- Κάθε κυψέλη CCD δίνει μια τιμή ανεξάρτητα από το χρώμα.
- Έγχρωμες εικόνες
 - Οι κυψέλες του CCD μοιράζονται σε ομάδες των τεσσάρων (απαρτίζουν 1 εικονοστοιχείο (pixel))
 - Πάνω από αυτή την ομάδα μπαίνει ένα φίλτρο (Bayer Filter)
 - Επιτρέπει μόνο στο κόκκινο φως να φτάσει στο ένα pixel, στο μπλε στο άλλο, και δύο λαμβάνουν πράσινο.
 - Η λογική πίσω από τις δύο πράσινες κυψέλες
 - Είναι πιο πρακτικό να χρησιμοποιούνται 4 κυψέλες ανά ομάδα.
 - Το ανθρώπινο άτι είναι πιο ευαίσθητο στο πράσινο φως.
 - Η διαφορά μπορεί να διορθωθεί μετά με ισορροπία λευκού (white balance).

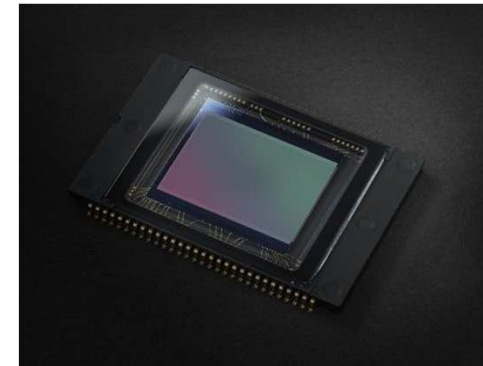


Αισθητήρες Απεικόνισης



- **CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)**

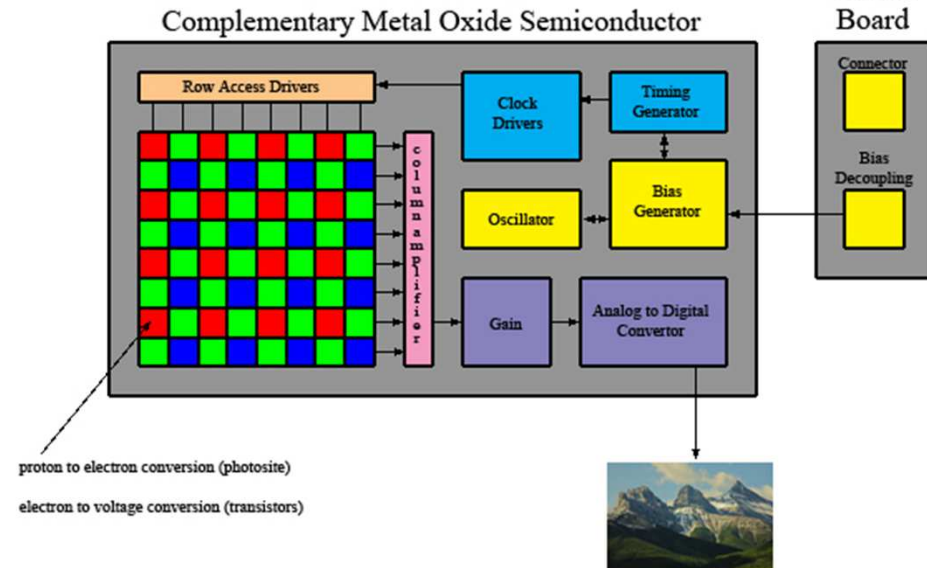
- Κάθε pixel έχει γειτονικά τρανζίστορ
 - Αναλογική σε ψηφιακή μετατροπή γίνεται σε τοπικό επίπεδο
- Κάθε ένα από αυτά τα pixel που ονομάζεται Active Pixel Sensor (APS).
- Διαφορετική στην καταγραφή από τα CCD



- **Πολλές επιπτώσεις στη συνολική οργάνωση και τις ικανότητες μιας φωτογραφικής μηχανής.**

- Η λογική απεικόνισης είναι ενσωματωμένη σε ένα τσιπ CMOS, - Ένα CCD είναι ένα κύκλωμα εικονοληψίας που μπορεί να αντικατασταθεί
 - Σχεδιασμός ενός νέου τσιπ CMOS είναι πιο δαπανηρός
- Ωστόσο, τα APS έχουν σαν βάση το τρανζίστορ
 - Τα CMOS μπορούν να κατασκευαστούν φτηνά σε οποιοδήποτε γραμμή παραγωγής κυκλωμάτων πυριτίου

© sensorcleaning.com



Αισθητήρες Απεικόνισης



CCD

vs

CMOS

- Εικόνες ψηλής ποιότητας, χαμηλού θορύβου
- Μεγαλύτερη ευαισθησία και πιστότητα
- 100 φορές περισσότερη κατανάλωση ρεύματος
- Απαιτούν εξειδικευμένες γραμμές παραγωγής
- Παλαιότερη και πιο ανεπτυγμένη τεχνολογία

- Πιο ευαίσθητα στο θόρυβο
- Η ευαισθησία στο φως είναι χαμηλότερη
- Καταναλώνουν λίγη ενέργεια
- Εύκολη Κατασκευή
- Φτηνότερα

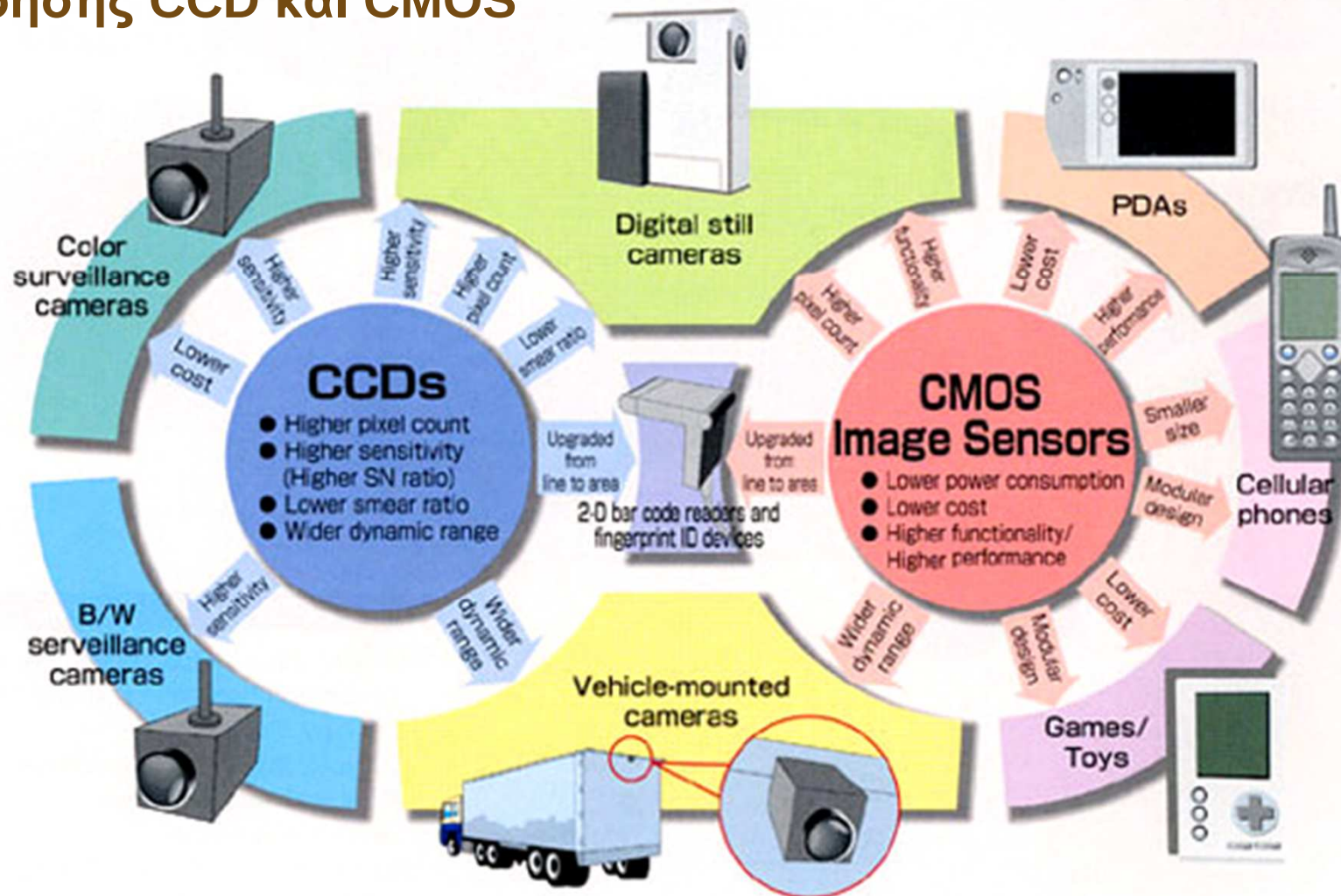
Ποιότητα εικόνας, ευαισθησία και κόστος παραγωγής

vs. Κόστος, λειτουργικός χρόνος μπαταρίας

Αισθητήρες Απεικόνισης



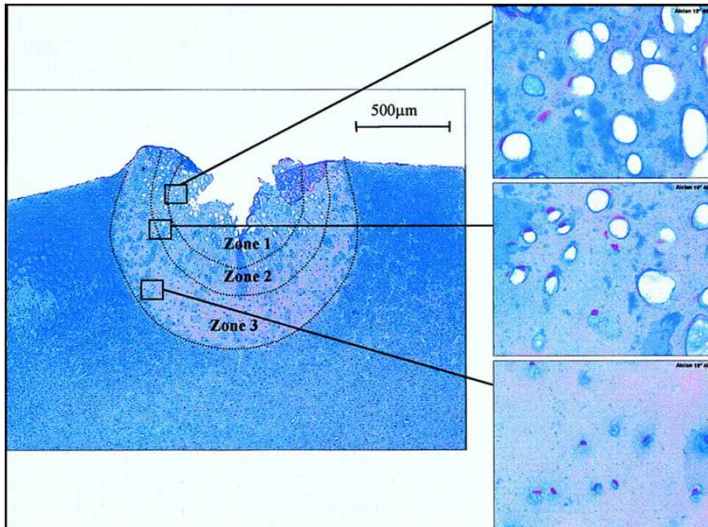
• Χρήσης CCD και CMOS



Κατευθυντήριες Γραμμές Ακτινοβολήσης



- **Βιολογικοί ιστοί ή κύτταρα τα οποία εκτίθενται σε ακτινοβολία**
 - Μπορεί να προκληθούν ανεπιθύμητες αντιδράσεις ή διαδικασίες ανάλογα με
 - Τη φύση και την κατάσταση των κυττάρων και των ιστών
 - Το μήκος κύματος, δύναμη, και η διάρκεια της έκθεσης οπτικών
 - Αυτές οι ανεπιθύμητες αντιδράσεις μπορεί επίσης να μετατραπούν σε θεραπευτικούς μηχανισμούς

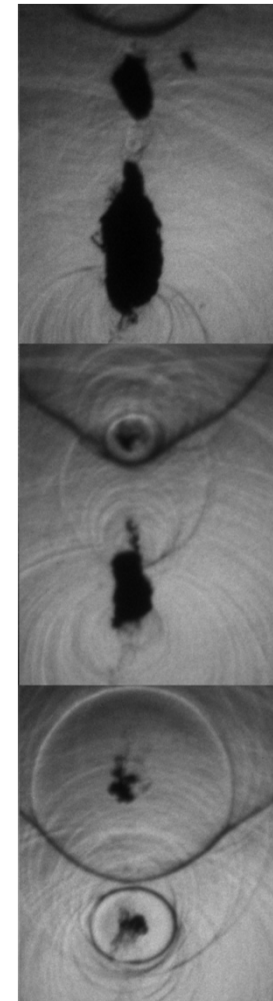


Κατευθυντήριες Γραμμές Ακτινοβολήσης



- **Μηχανισμοί Βλάβης στο Επίπεδο των Ιστών**

- **Φωτοχημική Βλάβη (Photochemical Damage)**
 - Σε χαμηλή συγκέντρωση ισχύος (τάξης του 1 W/cm^2) και παρατεταμένη έκθεση ($>1 \text{ s}$)
 - Τα μέρη του ιστού διεγείρονται με υψηλής ενέργειας ορατή ακτινοβολία
 - Η ενέργεια που απελευθερώνεται από τη διέγερση ενεργοποιεί ανεπιθύμητες χημικές αντιδράσεις → βλάβη
 - Διαχωρισμός ενός δεσμού σε μόρια που παράγουν δραστικά είδη οξυγόνου (μονήρες οξυγόνο, υπεροξείδιο υδρογόνου, ρίζες υδροξυλίου, και άλλες ελεύθερες ρίζες.)
 - Τα δραστικά είδη οξυγόνου είναι πολύ επιθετικά και πολύ επικίνδυνα για τον ιστό → μπορούν να επιτεθούν και να διασπάσουν τις κυτταρικές μεμβράνες.
- **Κίνδυνοι από UV**
 - Άμεσοι
 - Φλεγμονή → Επισκευή σε κυτταρικό επίπεδο και μορφολογικές αλλαγές
 - Χρόνιοι
 - Πρόωρη γήρανση του δέρματος, ρυτίδες, και αυξημένη ευθραυστότητα δέρματος
 - Μεταλλάξεις σε ογκοκατασταλτικά γονίδια → αυξημένη πιθανότητα ανάπτυξης καρκίνου του δέρματος και καταστολή της ανοσίας έναντι των λοιμώξεων.
- **Θερμική βλάβη**
 - Απορρόφηση του φωτός από τον ιστό και επακόλουθη μετατροπή σε θερμική ενέργεια
 - Μπορεί να είναι επιβλαβής σε πολλές περιπτώσεις, αλλά είναι επίσης χρησιμοποιείται εκτενώς για θεραπευτικούς σκοπούς και αισθητικές
- **Θερμοακουστικές Βλάβες**
 - Σύντομοι παλμοί λέιζερ, μικρότεροι από 1 ns → σημαντικές θερμικές μεταβάσεις → θερμοελαστική τάση καθώς ο θερμαινόμενος όγκος επανέρχεται στην κανονική θερμοκρασία. → διαδίδονται έξω από το θερμαινόμενο χώρο.
 - Άλλα φαινόμενα
 - Επιφανειακή εξάτμιση, σχηματισμός φυσαλίδων και έκρηξη, μη γραμμική απορρόφηση, αυτο-εστίαση και βλάβες από λέιζερ
 - Βλάβες που προκαλούνται μέσω αυτού του μηχανισμού έχουν βρει σημαντικές εφαρμογές στην ιατρική
 - Εκτομή ιστών με λέιζερ για την αναζωογόνηση του δέρματος στη δερματολογία, ενδοφθάλμια χειρουργική επέμβαση στην οφθαλμολογία, και στην ορθοπεδική.





- **Επιδράσεις της ακτινοβολίας σε κυτταρικό επίπεδο**

- **Φωτοαποχρωματισμός (Photobleaching)**
 - Καθορίζει μια κατηγορία φαινομένων που προκαλούν μόνιμη εξασθένηση στο σήμα φθορισμού
 - Πιο κοινός μηχανισμός = διέγερση του φθοροφόρου σε μακρόβια κατάσταση τριπλέτας αντί της επιθυμητής μονήρους κατάσταση
 - Περισσότερα κατά τη συζήτηση φθορισμού
- **Φωτοβλάβη (Photodamage)**
 - Φυσική βλάβη στο δείγμα
 - Π.χ. μεταβολές διαπερατότητας της μεμβράνης ή ρήγματα στις ίνες DNA
 - Συνήθως με θερμότητα
- **Φωτοτοξικότητα (Phototoxicity)**
 - Παραγωγή επιβλαβών χημικών ειδών
 - κυρίως δραστικών ειδών οξυγόνου (ROS)
 - Περισσότερα κατά τη συζήτηση της φωτοδυναμικής θεραπείας

Differential Photobleaching in Multiply-Stained Tissues

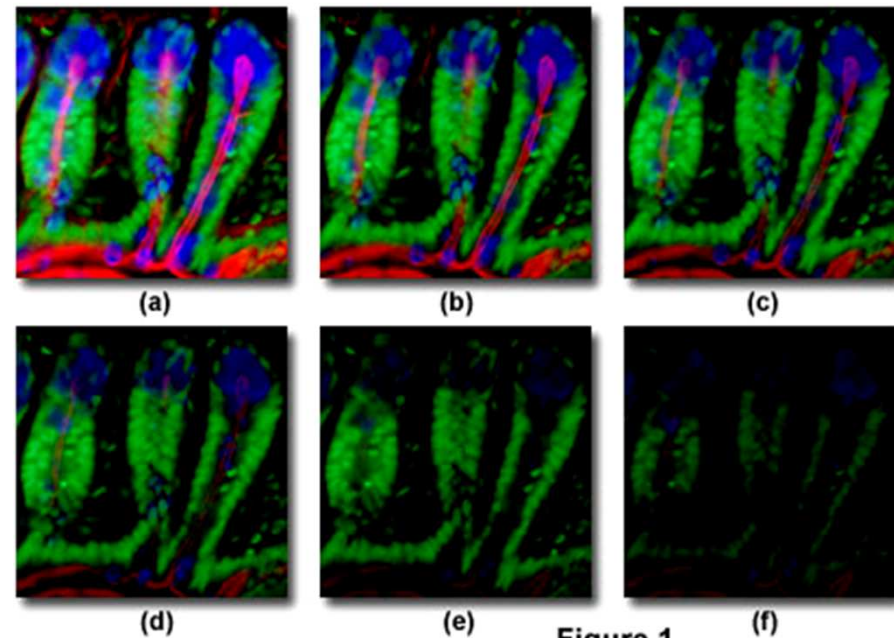


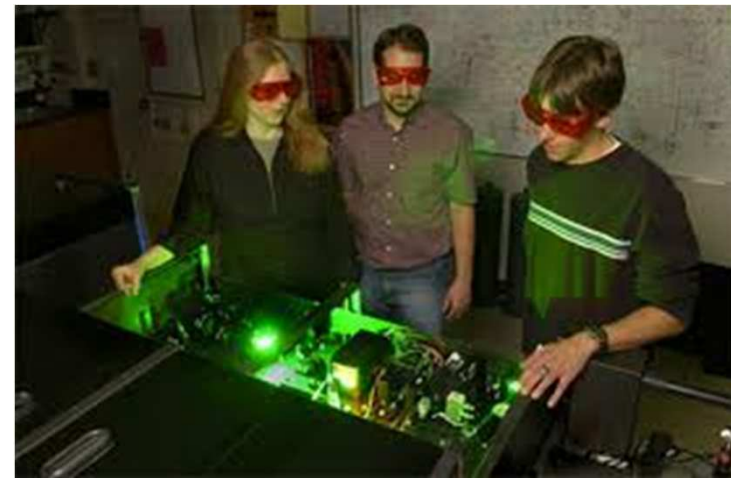
Figure 1

Κατευθυντήριες Γραμμές Ακτινοβολήσης



• Πρακτικές Ασφάλειας

- Πρώτη γραμμή άμυνας → αποστροφή
 - Δεν λειτουργεί για μη ορατό φως!
- Κατευθυντήριες γραμμές για την ασφαλή χρήση των λέιζερ
 - Ποτέ μην κοιτάτε απευθείας την ακτίνα και μην γυρίστε την ακτίνα προς τους άλλους όσο ασφαλές και αν νομίζετε ότι είναι το λέιζερ.
 - Να φοράτε προστατευτικά γυαλιά
 - Μην σκύβετε πάνω από τα συστήματα με λέιζερ και μην περνάτε μέσα από την διαδρομή της δέσμης
 - Περιορίστε τη δέσμη λέιζερ
 - Μην αφήνετε το λέιζερ αναμμένο όταν απουσιάζεται
 - Μόνο κατάλληλα εκπαιδευμένο προσωπικό πρέπει να χειρίζεται τα λέιζερ
 - Τοποθετήστε κατάλληλες σημάνσεις
- ANSI standard (ANSI Z136)



Κατευθυντήριες Γραμμές Ακτινοβολήσης



• Πρακτικές Ασφάλειας

- Πρώτη γραμμή άμυνας → αποστροφή
 - Δεν λειτουργεί για μη ορατό φως!
- Κατευθυντήριες γραμμές για την ασφαλή χρήση των λέιζερ
 - Ποτέ μην κοιτάτε απευθείας την ακτίνα και μην γυρίστε την ακτίνα προς τους άλλους όσο ασφαλές και αν νομίζετε ότι είναι το λέιζερ.
 - Να φοράτε προστατευτικά γυαλιά
 - Μην σκύβετε πάνω από τα συστήματα με λέιζερ και μην περνάτε μέσα από την διαδρομή της δέσμης
 - Περιορίστε τη δέσμη λέιζερ
 - Μην αφήνετε το λέιζερ αναμμένο όταν απουσιάζεται
 - Μόνο κατάλληλα εκπαιδευμένο προσωπικό πρέπει να χειρίζεται τα λέιζερ
 - Τοποθετήστε κατάλληλες σημάνσεις
- ANSI standard (ANSI Z136)



Κατευθυντήριες Γραμμές Ακτινοβολήσης



- Το πρότυπο ANSI (ANSI Z136) καθορίζει τη Μέγιστη Επιτρεπτή Έκθεση (Maximum Permissible Exposure - MPE) για μάτι και δέρμα.

Maximum Permissible Exposure (MPE) for Skin Exposure to a Laser Beam

Wavelength (μm)	Exposure Duration t (s)	MPE		Notes
		($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$)	($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)	
Ultraviolet				
0.180 to 0.302	10^{-9} to 3×10^4	3×10^{-3}		} or $0.56 t^{1/4}$, whichever is lower. 3.5 mm limiting aperture: (See Table 8)
0.303	10^{-9} to 3×10^4	4×10^{-3}		
0.304	10^{-9} to 3×10^4	6×10^{-3}		
0.305	10^{-9} to 3×10^4	1.0×10^{-2}		
0.306	10^{-9} to 3×10^4	1.6×10^{-2}		
0.307	10^{-9} to 3×10^4	2.5×10^{-2}		
0.308	10^{-9} to 3×10^4	4.0×10^{-2}		
0.309	10^{-9} to 3×10^4	6.3×10^{-2}		
0.310	10^{-9} to 3×10^4	1.0×10^{-1}		
0.311	10^{-9} to 3×10^4	1.6×10^{-1}		
0.312	10^{-9} to 3×10^4	2.5×10^{-1}		
0.313	10^{-9} to 3×10^4	4.0×10^{-1}		
0.314	10^{-9} to 3×10^4	6.3×10^{-1}		
0.315 to 0.400	10^{-9} to 10	$0.56 t^{1/4}$		
0.315 to 0.400	10 to 10^3	1		
0.315 to 0.400	10^3 to 3×10^4		1×10^{-3}	
Visible and Near Infrared				
0.400 to 1.400	10^{-9} to 10^{-7}	$2 C_A \times 10^{-2}$		} 3.5 mm limiting aperture. (See Table 8)
	10^{-7} to 10	$1.1 C_A t^{1/4}$		
	10 to 3×10^4		$0.2 C_A$	
Far Infrared *				
1.400 to 10^3	10^{-9} to 10^{-7}	10^{-2}		} (See Table 8 for limiting apertures)
	10^{-7} to 10	$0.56 t^{1/4}$		
	> 10		0.1	

Parameters and Correction Factors

Correction Factor	Wavelength (μm)	Figure *
$T_1 = 10 \times 10^{-20} (\lambda - 0.550)$	0.550 to 0.700	9
$C_B = 1.0$	0.400 to 0.550	9
$C_B = 10^{15} (\lambda - 0.550)$	0.550 to 0.700	9
$C_A = 1.0$	0.400 to 0.700	8a
$C_A = 10^{2(\lambda - 0.700)}$	0.700 to 1.050	8a
$C_A = 5.0$	1.050 to 1.400	8a
$C_P = n^{-1/4}$ **	0.400 to 1.400	13
$C_E = 1.0 \quad \alpha < \alpha_{\min}$	0.400 to 1.400	-
$C_E = \alpha / \alpha_{\min} \quad \alpha_{\min} < \alpha < 100$	0.400 to 1.400	-
$C_E = \alpha^2 / (100 \alpha_{\min}) \quad \alpha > 100$	0.400 to 1.400	-
$C_C = 1.0$	1.050 to 1.150	8b
$C_C = 10^{18} (\lambda - 1.150)$	1.150 to 1.200	8b
$C_C = 8$	1.200 to 1.400	8b