

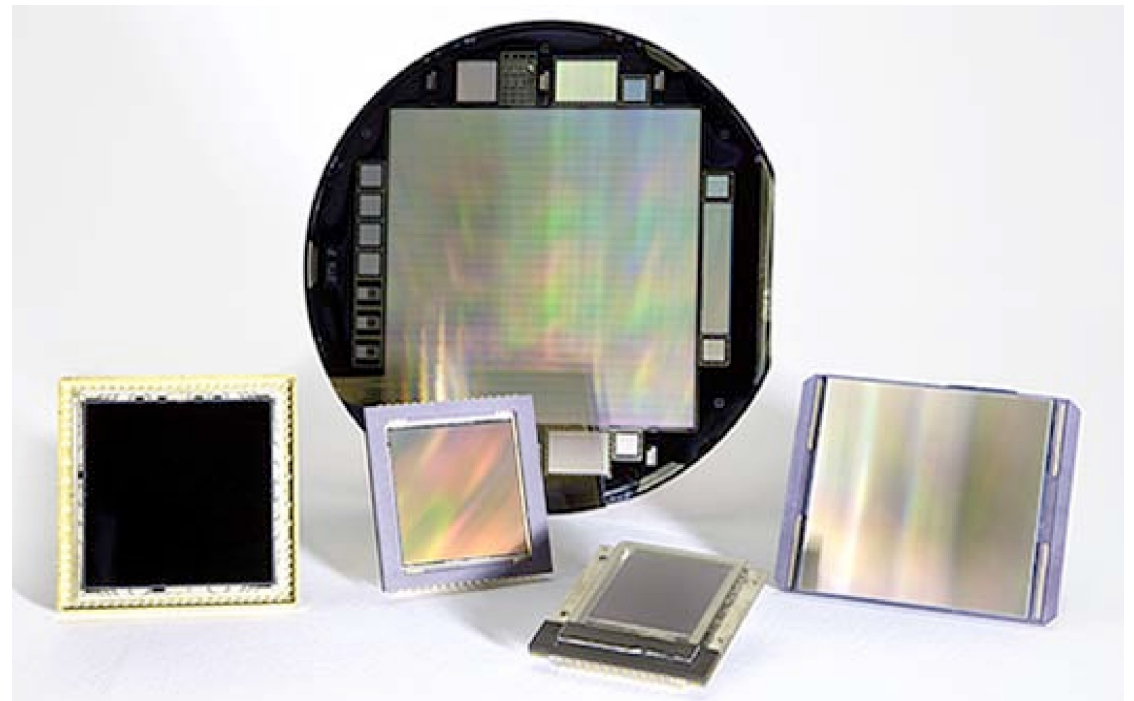
Ανιχνευτές CCD: Αρχή λειτουργίας και εφαρμογές



Κουτσουμπής Στέφανος ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ
Υπεύθυνη Καθηγήτρια: Μυρσίνη Μακροπούλου

Τι θα δούμε

- Τι είναι ο ανιχνευτής CCD
- Πως λειτουργεί
- Τεχνικές κατασκευής
- Επιδόσεις
- Ανταγωνιστικές τεχνολογίες
- Εφαρμογές



Τι είναι ο ανιχνευτής CCD Ιστορικό

- Ο Ανιχνευτής CCD – Charge Coupled Device (Διάταξη Συζευγμένου Φορτίου) είναι μια συσκευή για τη μεταφορά ηλεκτρικού σήματος, από την περιοχή της συσκευής σε μια έξοδο όπου μπορεί να καταγραφεί.
- Εφευρέθηκε το 1969 στα Bell Labs της AT&T, από τους Willard Boyle και George Smith, αρχικά ως ηλεκτρονική μνήμη.



Ιστορικό

- Σήμερα χρησιμοποιείται κατά κόρον, σε φωτογραφικές μηχανές και κάμερες, αντικαθιστώντας το αναλογικό φιλμ. Χωρίς αυτόν, θα ήταν αδύνατη η μεγάλη ανάπτυξη που γνώρισαν οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές τα τελευταία χρόνια.
- Το τηλεσκόπιο Hubble που μπήκε σε τροχιά γύρω από τη γη, το 1990, ήταν εξοπλισμένο με τέσσερις αισθητήρες CCD, συνολικής ανάλυσης 2,56 megapixels.

To Nobel

- Το 2009 οι Boyle και Smith πήραν το βραβείο Nobel *"for the invention of an imaging semiconductor circuit – the CCD sensor"* (The Nobel Foundation)



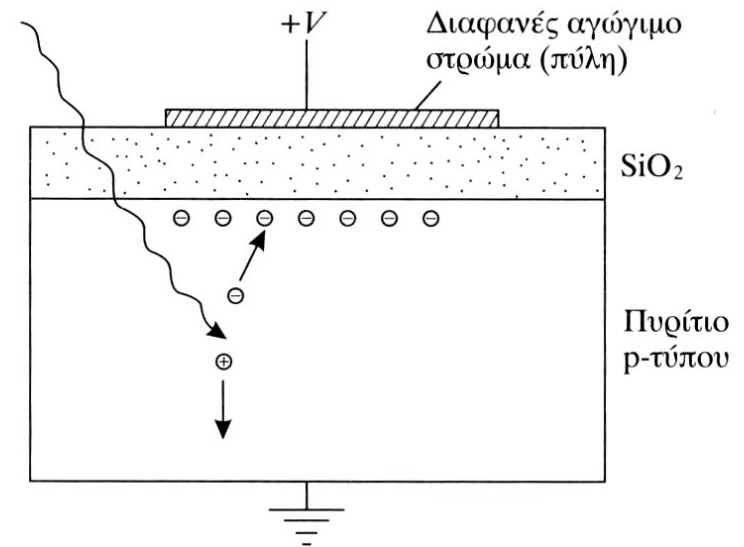
Αρχή λειτουργίας πυκνωτή MOS

Ο πυκνωτής MOS είναι βασικό δομικό στοιχείο του ανιχνευτή CCD. Ας τον αναλύσουμε:

Αποτελείται από τρεις στρώσεις υλικού, έναν ημιαγωγό, ένα μονωτή και ένα μέταλλο.

Όταν ο πυκνωτής είναι ορθά πολωμένος, δημιουργείται ένα πηγάδι δυναμικού κάτω από το ηλεκτρόδιο

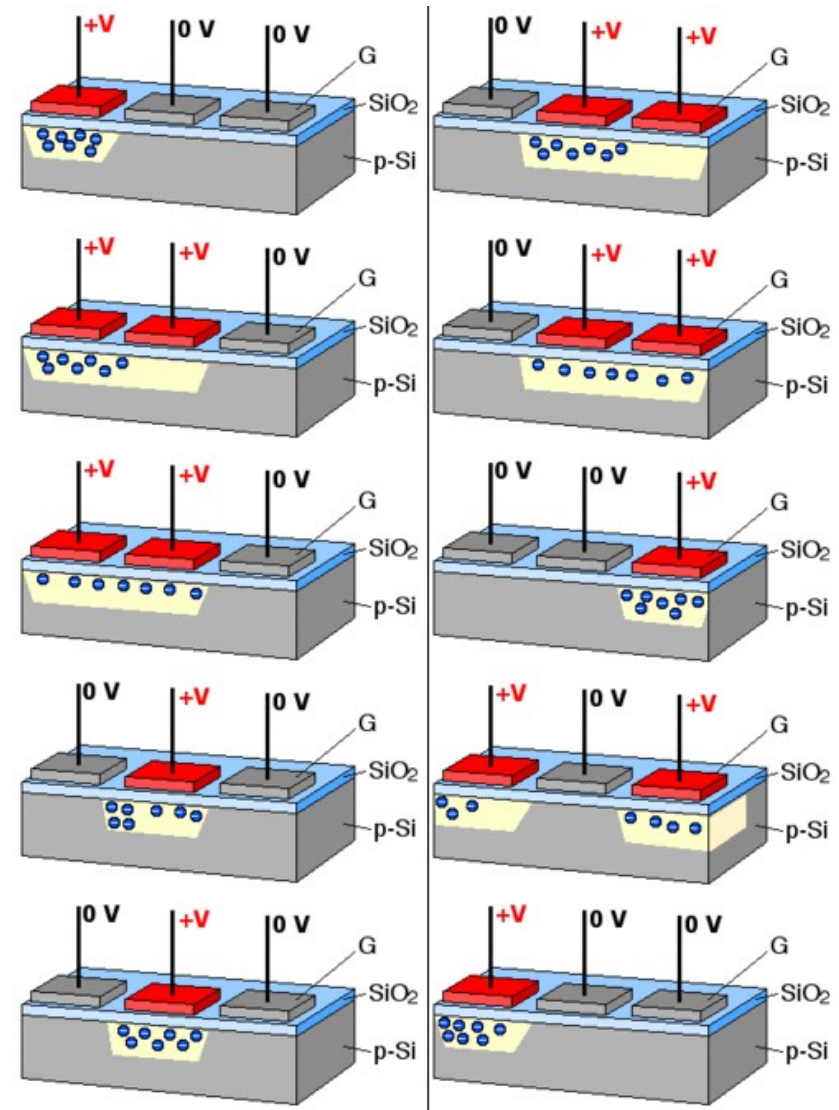
Η προσπίπτουσα ακτινοβολία δημιουργεί ζεύγη οπών και ηλεκτρονίων στον ημιαγωγό. Τα ηλεκτρόνια δεσμεύονται από το πηγάδι δυναμικού και μένουν κοντά στη διεπιφάνεια ημιαγωγού-μονωτή.



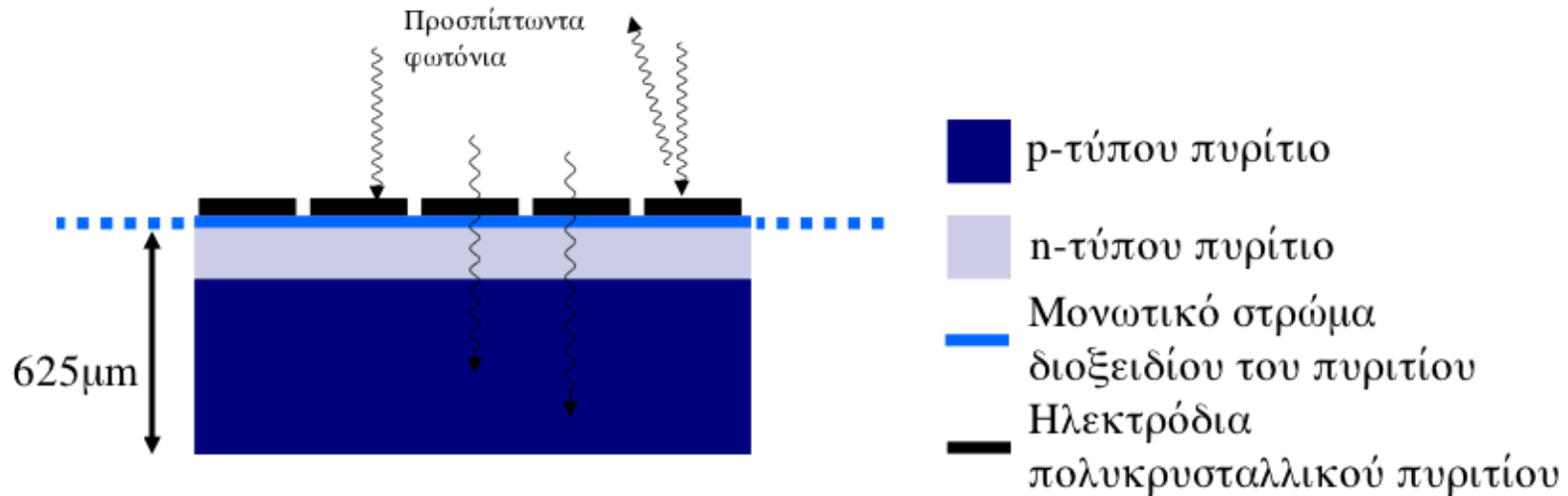
Αρχή λειτουργίας ανιχνευτή CCD

Ο στοιχειώδης ανιχνευτής CCD αποτελείται από τρεις ανιχνευτές MOS παράλληλα τοποθετημένους. Η καινοτομία της συσκευής, έγκειται στη μεταφορά του σήματος, από τον ένα πυκνωτή, στον άλλο.

- Η σύλληψη και μεταφορά του σήματος γίνεται σε τρεις φάσεις.
- Αρχικά πολώνουμε μόνο την πρώτη πύλη, έτσι όλο το σήμα συγκεντρώνεται εκεί.
- Έπειτα, πολώνουμε τη δεύτερη πύλη και μηδενίζουμε το δυναμικό της πρώτης. Το σήμα έκανε ένα “βήμα” δεξιά.
- Όμοια πράττουμε και με την τρίτη πύλη. Ο κύκλος ολοκληρώθηκε.



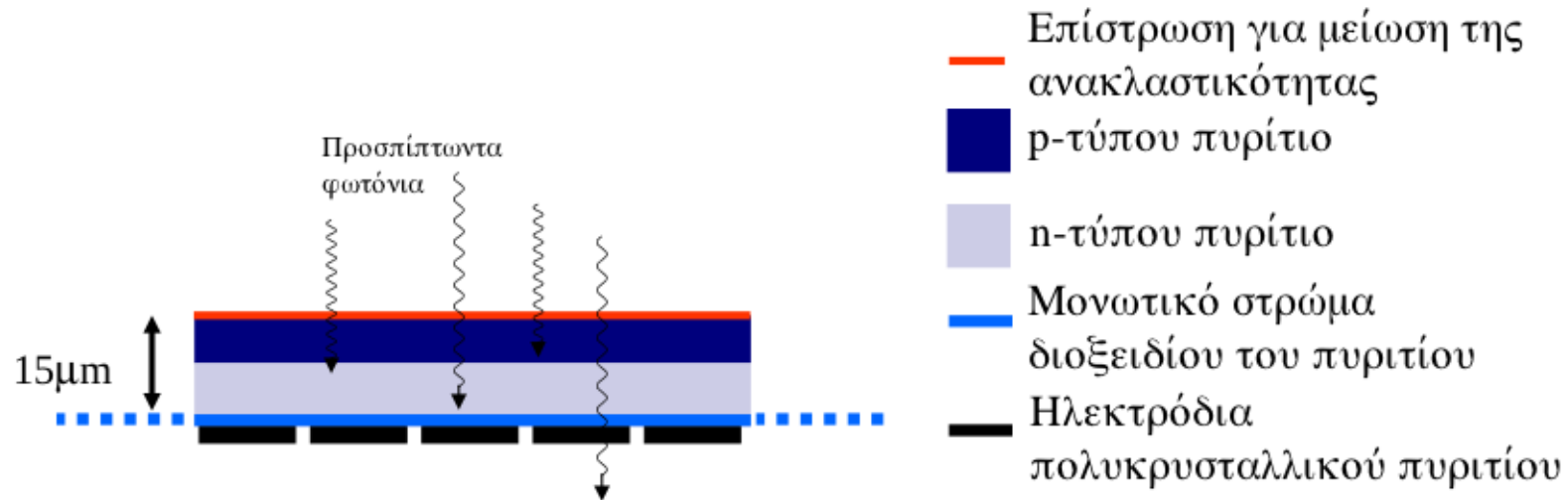
Παχύ, φωτιζόμενο από εμπρός CCD



Αυτού του τύπου τα CCD, παράγονται σχετικά φτηνά, χρησιμοποιώντας συμβατικές τεχνικές με wafer.

Έχουν χαμηλή κβαντική απόδοση, που οφείλεται στην ανάκλαση και απορρόφηση των φωτονίων, από τα ηλεκτρόδια. Επίσης, είναι πολύ χαμηλή η απόδοσή τους στο μπλε.

Λεπτό, φωτιζόμενο από πίσω CCD



Μπορούμε να πετύχουμε μεγαλύτερες κβαντικές αποδόσεις χρησιμοποιώντας λεπτότερους ανιχνευτές και φωτίζοντας τους από την πίσω όψη. Κάνοντας επίσης, χρήση μιας επίστρωσης για μείωση της ανακλαστικότητας, μπορούμε να πλησιάσουμε κβαντικές αποδόσεις 100%!

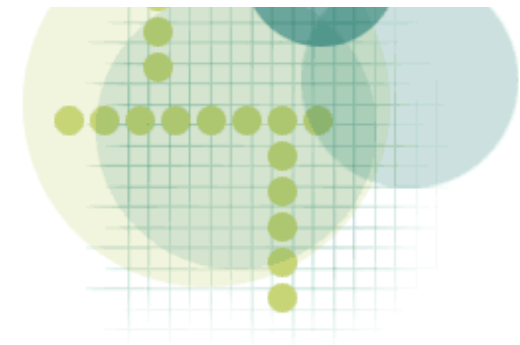
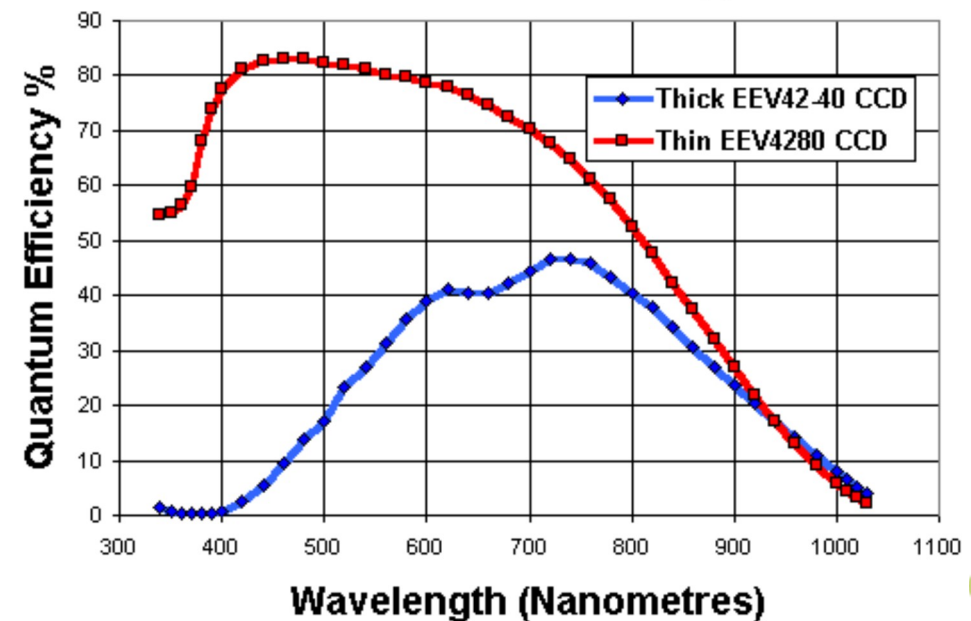
Η παραγωγή τους είναι αρκετά ακριβή, αφού η διαδικασία για τη λείπτυνσή τους είναι αρκετά εξειδικευμένη. Στο κόκκινο, ο ανιχνευτής γίνεται διάφανος και τα ηλεκτρόνια των διαπερνούν, έτσι η απόδοσή του στο κόκκινο είναι χαμηλή.

Σχεδόν όλα τα CCD στην Αστρονομία, είναι αυτού του είδους.

Σύγκριση των αποδόσεων των δύο τύπων CCD

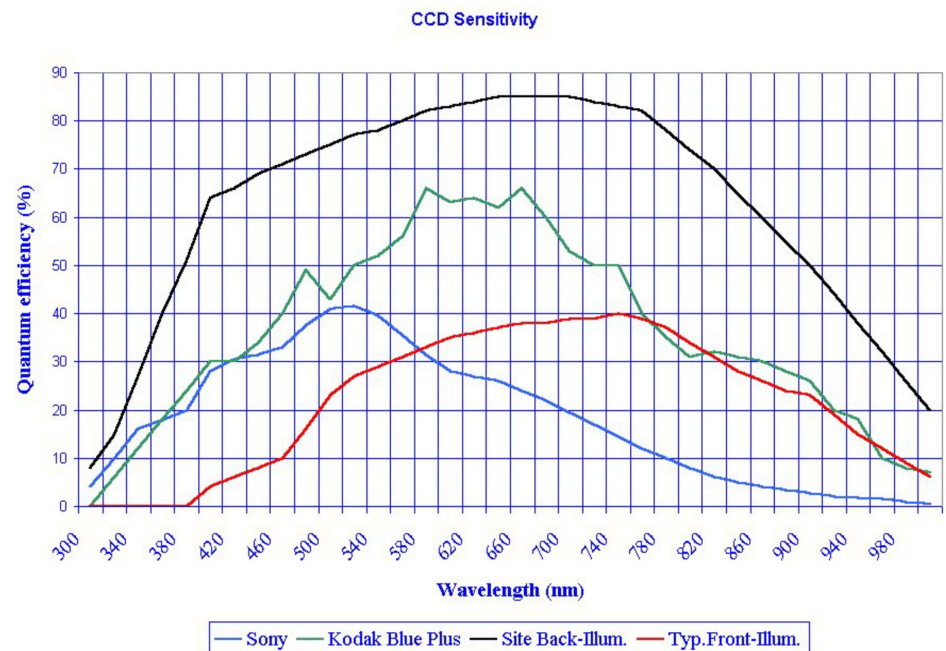
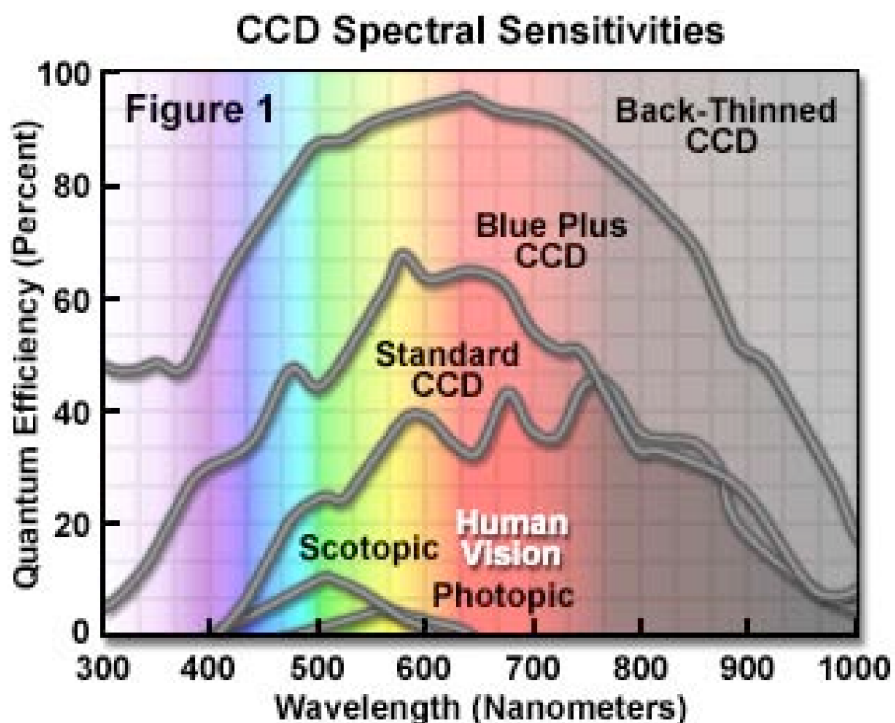
- Η απόδοση του παχύ ανιχνευτή είναι μηδενική στο μπλε, ενώ μεγιστοποιείται λίγο πάνω από το κόκκινο.
- Η απόδοση του λεπτού ανιχνευτή είναι μέγιστη στο μπλε. Πουθενά δεν είναι χειρότερη από αυτή του παχύ ανιχνευτή.

Quantum Efficiency Improvements from Thinning



Φασματική απόκριση CCD

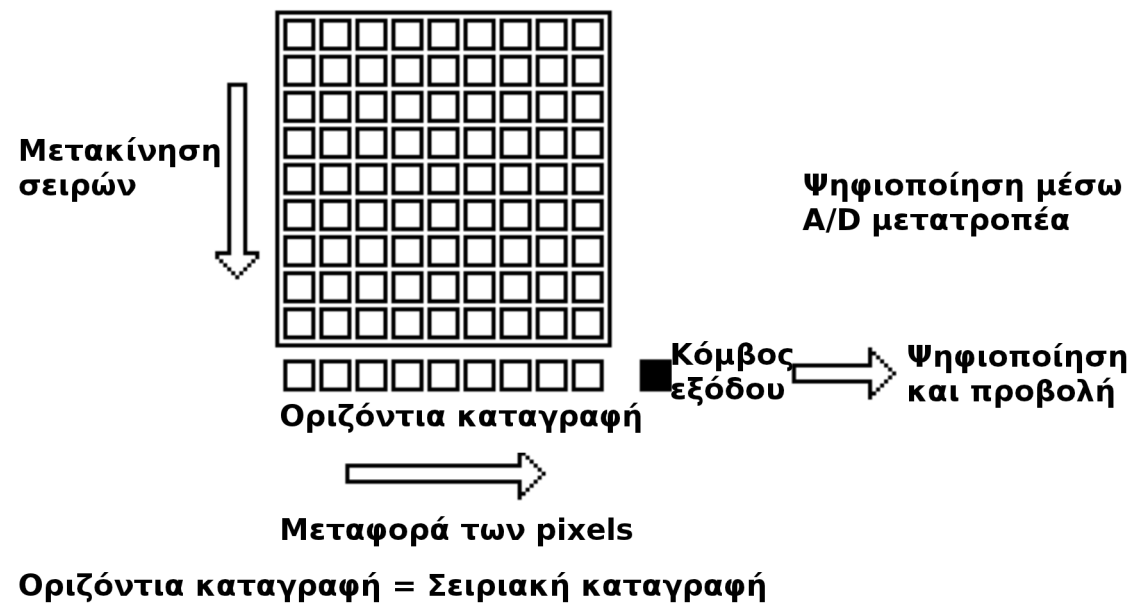
Η φασματική απόκριση διαφέρει ανάλογα με την τεχνική κατασκευής του CCD. Δεν δίνουν όλοι οι κατασκευαστές ίδια ποιότητα.



Ανιχνευτής δύο διαστάσεων

Ένας ανιχνευτής CCD αποτελείται από πολλά τέτοια στοιχεία, τοποθετημένα σε μονοδιάστατο ή δισδιάστατο πλέγμα, ανάλογα την εφαρμογή.

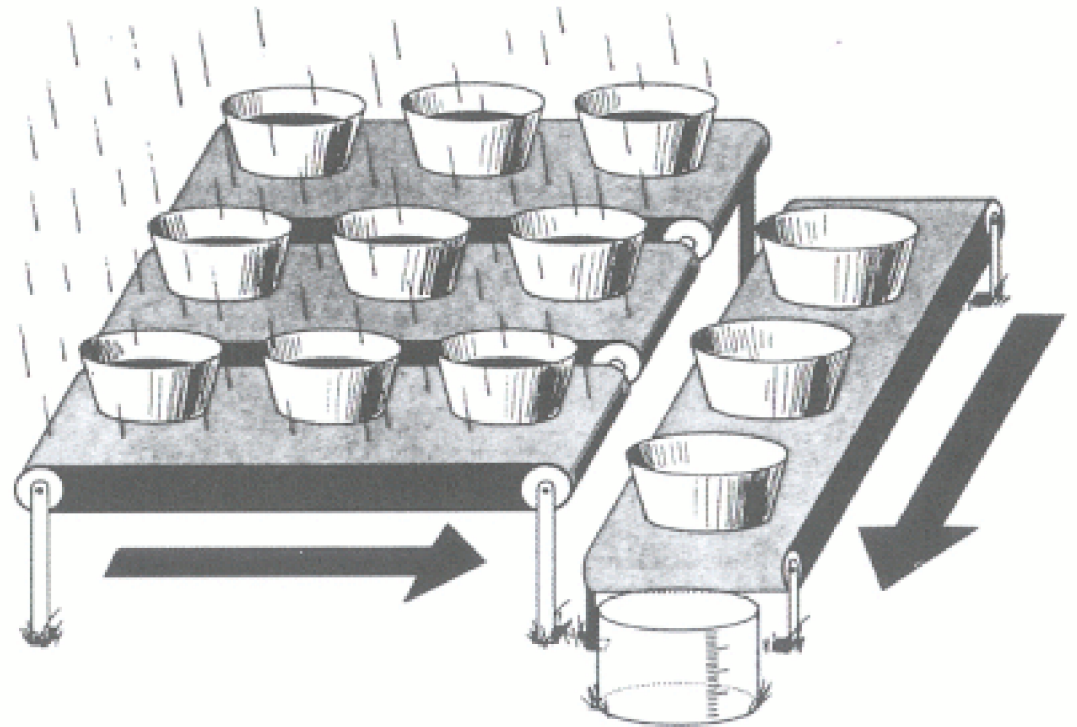
Το σήμα μεταφέρεται προς τα κάτω, σε κάθε σειρά και καταγράφεται σε ένα γραμμικό ανιχνευτή CCD. Έπειτα, μεταφέρεται και διαβάζεται σειριακά, από το κόμβο εξόδου. Ακολουθεί η ψηφιοποίηση και τελική επεξεργασία του σήματος.



Ανάγνωση εξόδου “Η μέθοδος του κουβά”

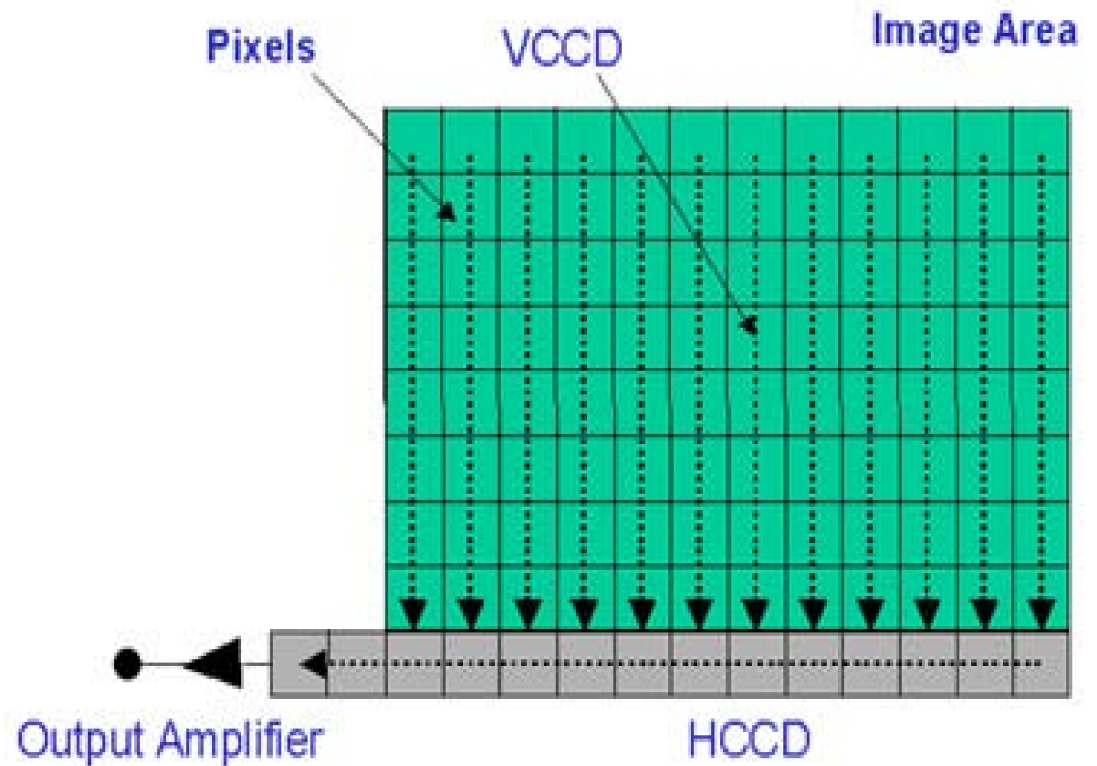
Μπορούμε να καταλάβουμε καλύτερα πως γίνεται η ανάγνωση του σήματος, με το παράδειγμα του κουβά και της βροχής.

Η βροχή αντιστοιχεί στην προσπίπτουσα ακτινοβολία. Ένας-ένας κουβάς μεταφέρει το περιεχόμενό του στη κεντρική γραμμή, απ' όπου καταλήγουν στο σημείο συλλογής του νερού.



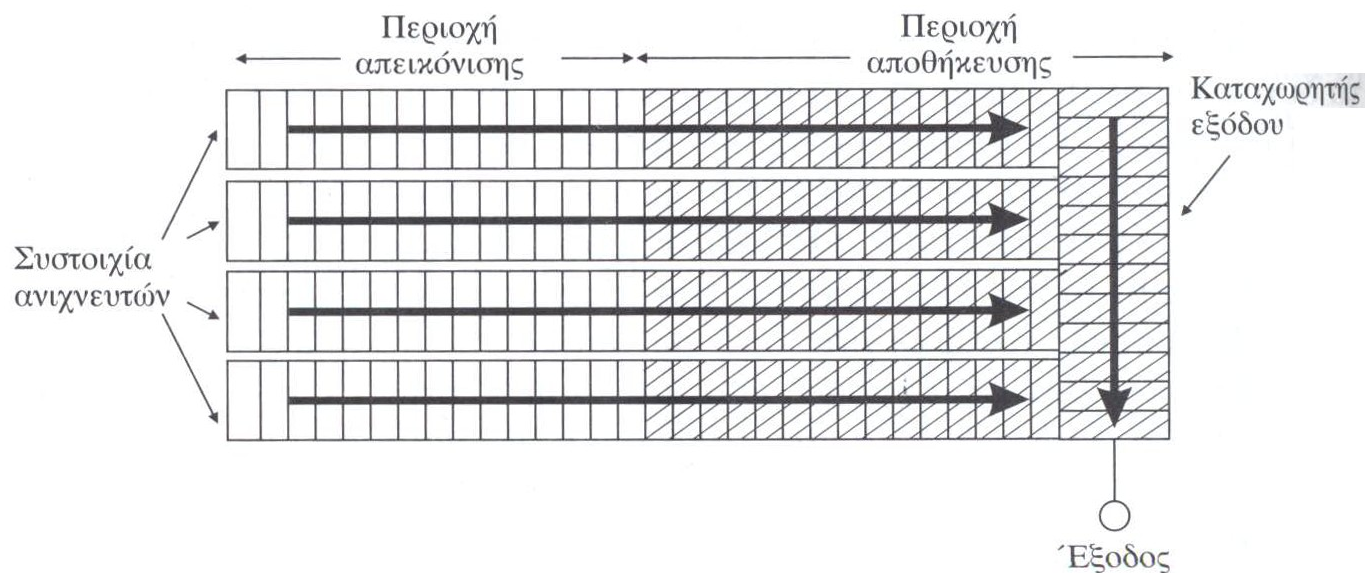
Τύποι CCD: Full Frame

- Στο full frame CCD, όλη η επιφάνεια χρησιμεύει ως ανιχνευτής.
- Για να διαβαστεί το σήμα, πρέπει η επιφάνεια να καλυφθεί από το φως, άρα υπάρχει απαίτηση για εξωτερικό κλείστρο.
- Δεν μπορεί να συλλεχθεί φως όσο διαβάζεται το σήμα.



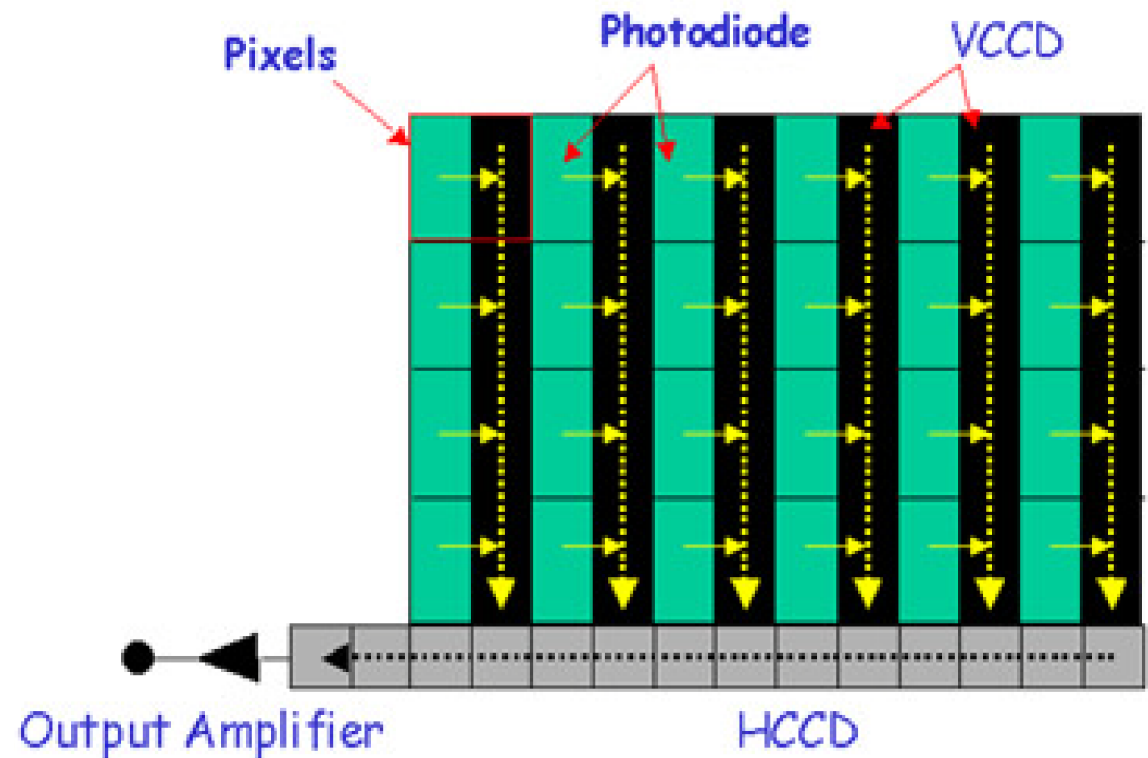
Τύποι CCD: Frame Transfer

- Ένας σχεδιασμός που επιτρέπει λήψη σήματος, όσο αποθηκεύεται το προηγούμενο, είναι το Frame Transfer CCD.
- Έχουμε δύο περιοχές, την περιοχή απεικόνισης και την περιοχή αποθήκευσης. Το αρχικά σήμα αποθηκεύεται στη δεύτερη περιοχή και από εκεί γίνεται η τελική ανάγνωσή του.
- Έχουμε διπλασιασμό του μήκους και κόστους του ανιχνευτή.



Τύποι CCD: Interline

- Στη περίπτωση του interline CCD, το φως συλλέγεται από φωτοδιόδους και μεταφέρεται από το CCD.
- Μπορεί να συλλέγεται φως όσο η προηγούμενη εικόνα μεταφέρεται στην έξοδο.



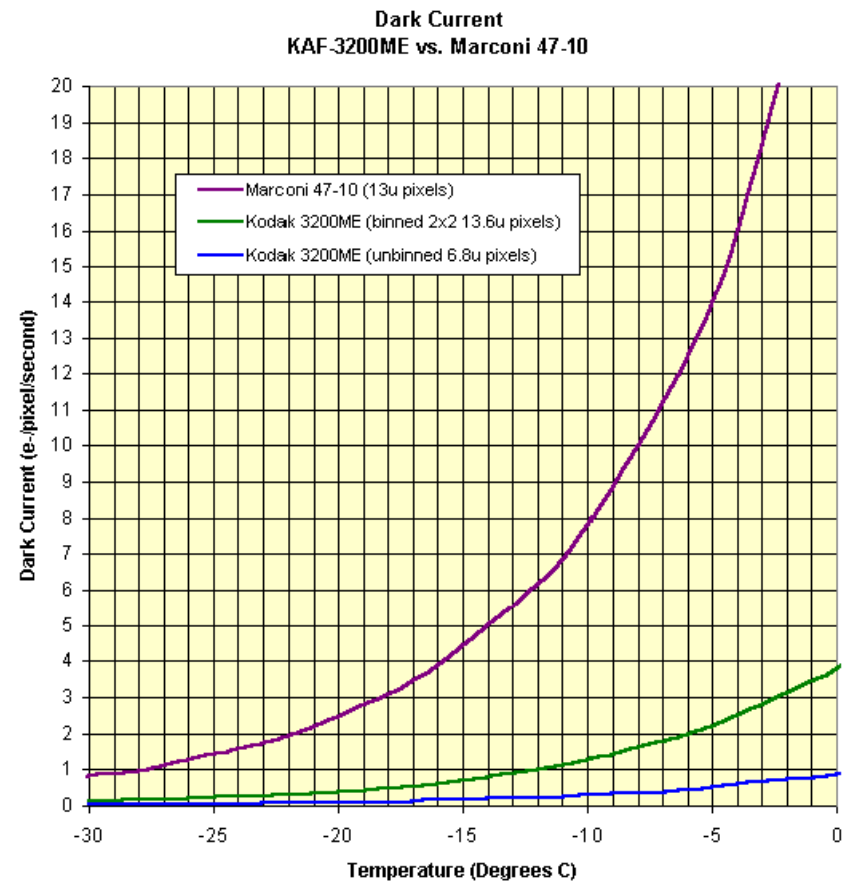
Θερμικός Θόρυβος

Ένα πρόβλημα στους ανιχνευτές CCD είναι ο θερμικός θόρυβος.

Ακόμα και όταν ο ανιχνευτής μας βρίσκεται σε σκοτάδι, παίρνουμε ένα σήμα που μπορεί να είναι μέχρι 10^3 e/s. Αυτό ονομάζεται “φορτίο σκότους” και είναι εκθετική συνάρτηση της θερμοκρασίας.

Λύση σε αυτό δίνεται μέσω της ψύξης του ανιχνευτή, σε θερμοκρασίες που ο θερμικός θόρυβος γίνεται αμελητέος .

Τα επαγγελματικά CCD λειτουργούν συνήθως σε θερμοκρασίες -100 °C, ενώ τα ερασιτεχνικά, μετά βίας φτάνουν τους -30 °C.



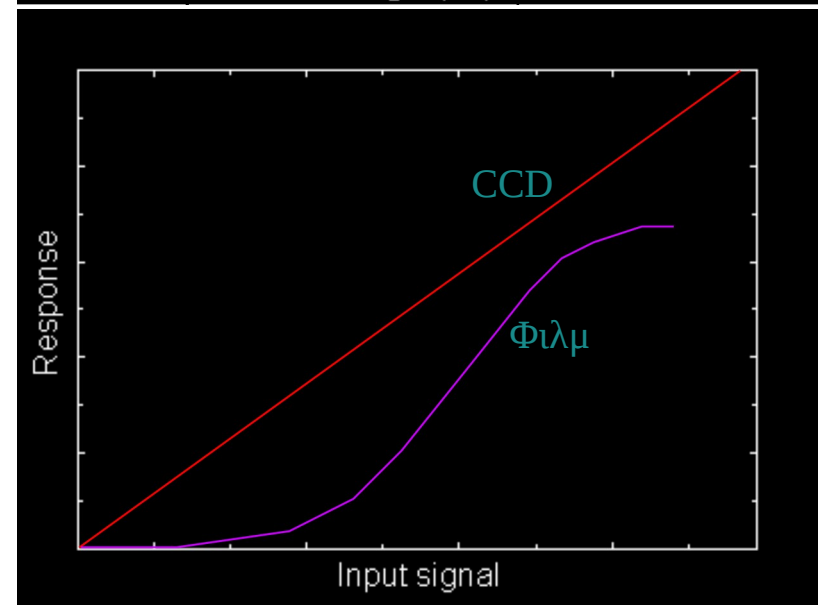
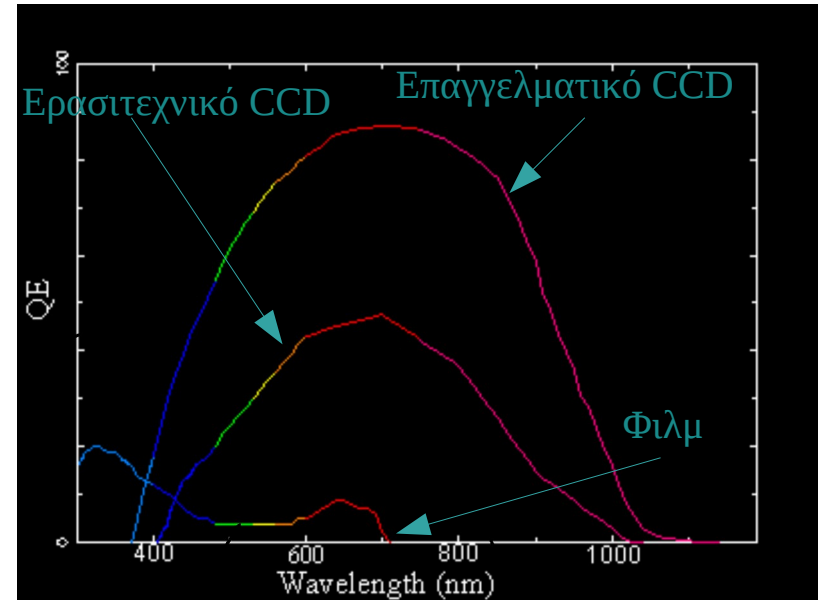
Σύγκριση CCD και Φιλμ

Το CCD έχει μεγαλύτερη κβαντική απόδοση, από το φιλμ.

Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να συλλεχθεί πολύ περισσότερη πληροφορία σε μικρότερο χρόνο έκθεσης, ή να μελετηθούν πιο αδύναμα σήματα.

Επίσης το CCD έχει γραμμική απόκριση εισόδου-εξόδου, κάτι που δε συμβαίνει στο φιλμ. Αυτό σημαίνει, ότι αν πάρουμε διπλάσια έξοδο, γνωρίζουμε ότι η πηγή ήταν 2 φορές πιο λαμπρή.

Η επεξεργασία της εικόνας γίνεται ψηφιακά πλέον. Τέρμα τα χημικά και ο σκοτεινός θάλαμος.



Σύγκριση CCD και CMOS

Ανταγωνιστική τεχνολογία του CCD, είναι το CMOS, που χρησιμοποιείται σε ολοκληρωμένα κυκλώματα.

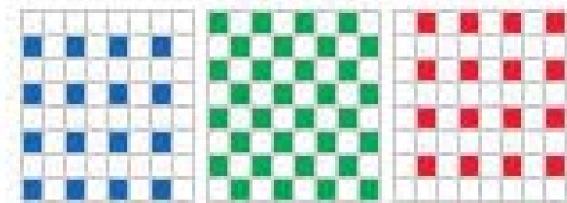
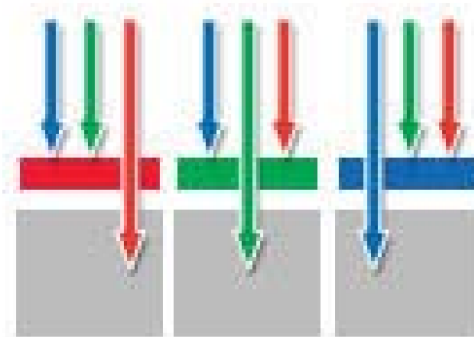
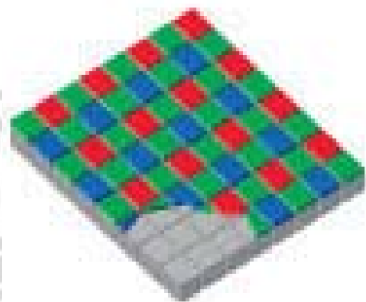
- Στους αισθητήρες φωτός CMOS, κάθε pixel είναι ένας ξεχωριστός ανιχνευτής, γι αυτό και μεγαλύτερα συγκριτικά με το CCD.
- Ο CMOS είναι πολύ φτηνότερος και χρησιμοποιείται μαζικά σε κινητά τηλέφωνα, παιχνίδια, φτηνές κάμερες κλπ. Όταν υπάρχει απαίτηση σε ποιότητα, χρησιμοποιούμε CCD ανιχνευτή.
- Η κατανάλωση του CCD είναι 2-5 Watt, ενώ του CMOS, μόλις 20-50 mWatt. Το CCD όμως είναι πιο φωτοευαίσθητο (1 lux vs 5-10 lux).
- Σήμερα δεν υπάρχει σαφή διάκριση μεταξύ των δύο τεχνολογιών. Μπορούμε να βρούμε CCD σε χαμηλού κόστους και κατανάλωσης, κάμερα κινητού, και ανιχνευτές CMOS σε υψηλής απόδοσης ερευνητικές κάμερες.

Το CCD στη φωτογραφική μηχανή

Μέχρι τώρα είδαμε ότι το CCD είναι ένας ανιχνευτής φωτονίων, ικανός να δώσει εικόνα. Πως όμως παίρνουμε χρώμα από αυτόν;

Το φίλτρο Bayer δημιουργεί ένα μωσαϊκό χρωμάτων. Κάθε pixel καταγράφει ένα από τα τρία βασικά χρώματα, η τελική σύνθεση μας δίνει όλο το φάσμα του ορατού.

Έχουμε περισσότερα πράσινα pixel: αυτό γίνεται επειδή και το ανθρώπινο μάτι είναι πιο ευαίσθητο στο πράσινο.



B25%

G50%

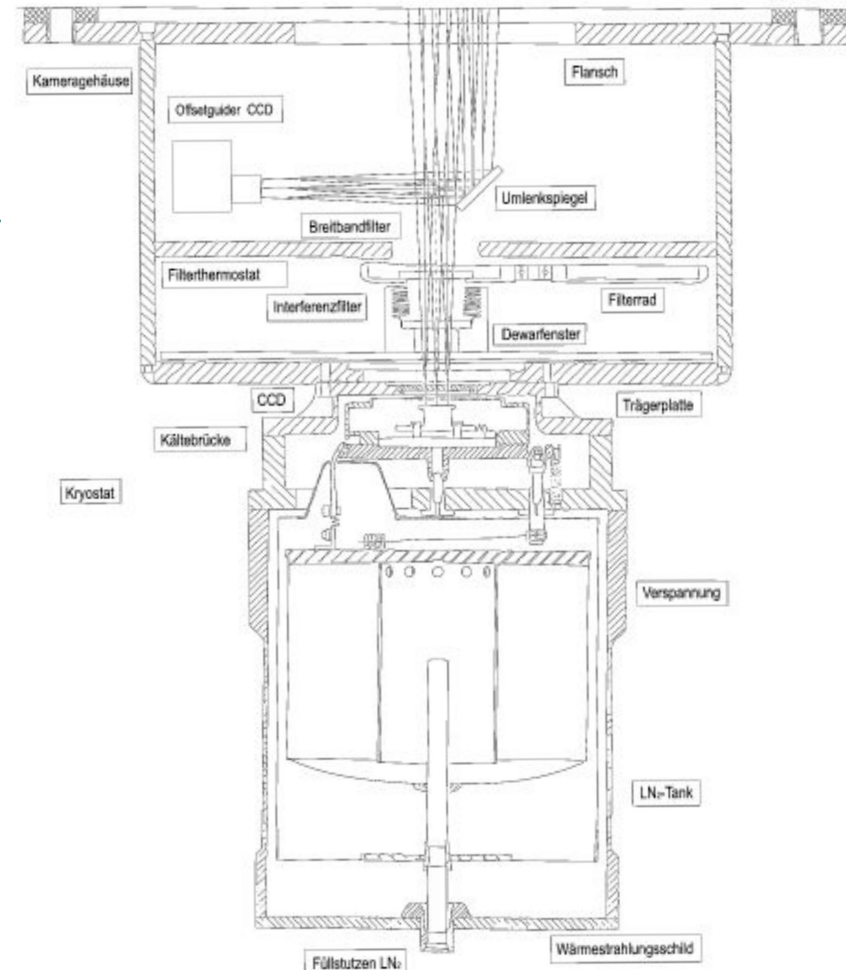
R25%

Το CCD στην αστρονομία

Στα αστεροσκοπεία, ο ανιχνευτής CCD τοποθετείται κάτω από τηλεσκόπιο, εκεί όπου σχηματίζεται το είδωλο του φακού.

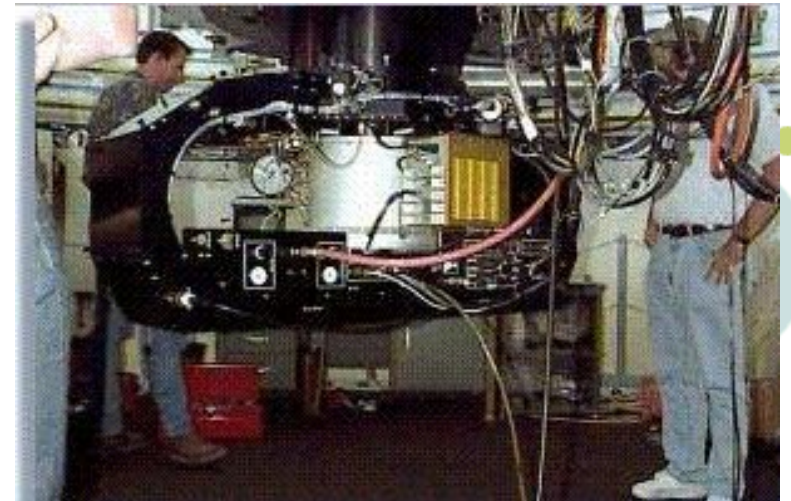
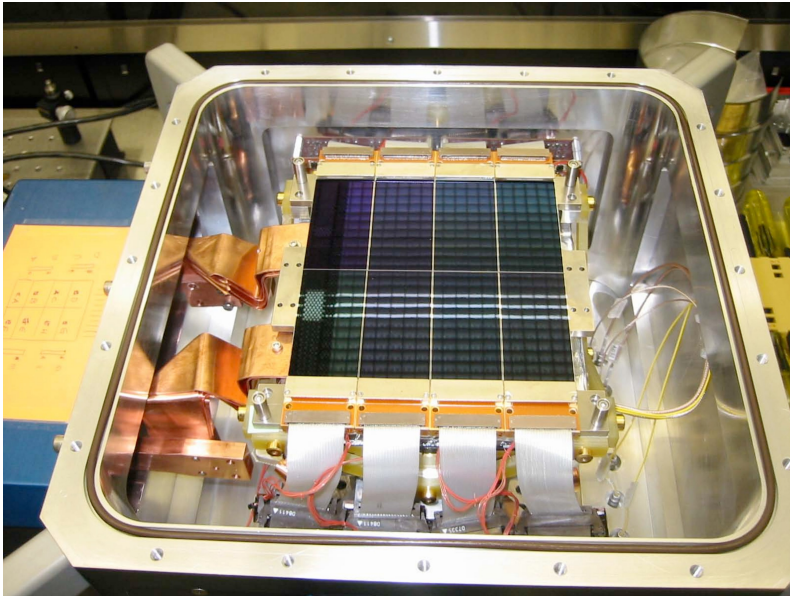
Για τη μείωση του θερμικού θορύβου, ο ανιχνευτής ψύχεται με υγρό άζωτο σε θερμοκρασίες μέχρι $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Όλο το σύστημα ελέγχεται ηλεκτρονικά.



CCD στην αστρονομία

MOSAIC CCD (KPNO 0.9m)



Άλλες εφαρμογές

Το CCD μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε θερμικές κάμερες, αφού είναι ευαίσθητο σε μήκη κύματος 0,4-5,5 μm .

Επίσης, με χρήση ενισχυτή εικόνας, μπορεί μια συμβατική κάμερα να μετατραπεί σε κάμερα νυχτερινής λήψης.

Φωτογραφικές μηχανές, βιντεοκάμερες και σαρωτές, όλα αυτά δουλεύουν με ανιχνευτές CCD.

Στην επιστήμη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με κάποιο μικροσκόπιο για μελέτη του ιστού και των κυττάρων.

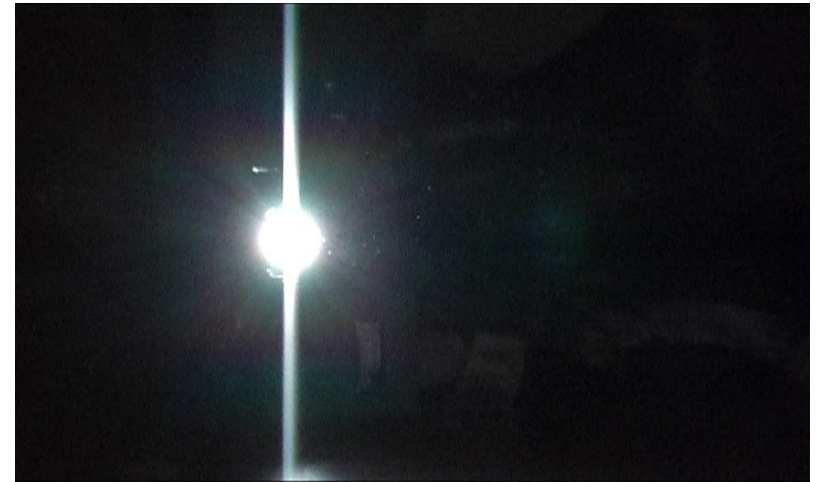
Επίσης, οι ανιχνευτές CCD είναι σημαντικό βοήθημα στα ενδοσκόπια, για ιατρική ή βιομηχανική χρήση.



Κάτι ενδιαφέρον...

Τι είναι αυτή η κάθετη άσπρη γραμμή όταν στη φωτογραφία μας υπάρχει μια ισχυρή πηγή φωτός (πχ φλας);

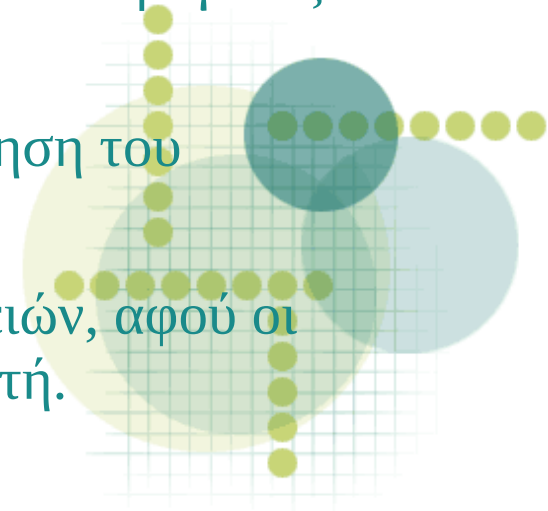
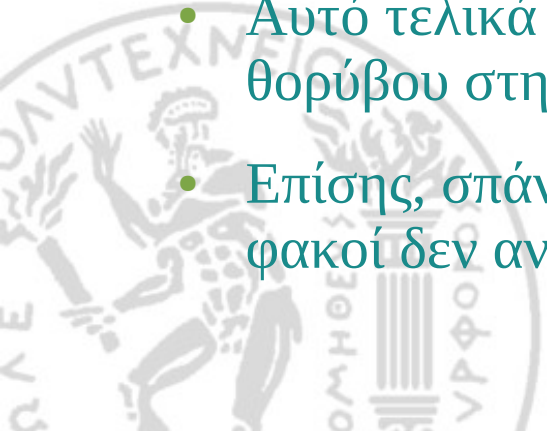
- Κατά την ανάγνωση του σήματος που συνέλεξε ο ανιχνευτής, τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται κάθετα από πυκνωτή σε πυκνωτή.
- Τον ίδιο χρόνο όμως, συνεχίζουν να συλλέγουν φως.
- Αν η μεταφορά του σήματος δεν είναι αρκετά γρήγορη, μπορούν να συμβούν λάθη από φως που πέφτει στον πυκνωτή που μεταφέρει το σήμα.
- Τέτοια προβλήματα λύνονται με τη χρήση ανιχνευτών CCD τύπου frame transfer.



...και κάτι χρήσιμο

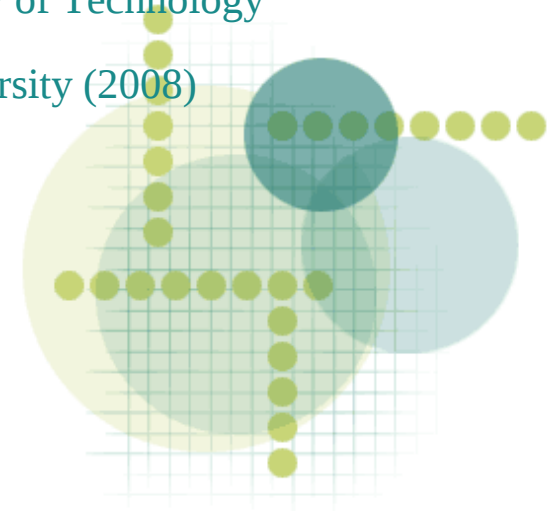
Περισσότερα pixels, χειρότερη φωτογραφία!

- Οι καινούριες κάμερες, έχουν μια αυξανόμενα χειρότερη ποιότητα εικόνας και ο λόγος είναι προφανής:
- “Όσα περισσότερα pixels έχει μια κάμερα, τόσο καλύτερη είναι.” Αυτό ίσχυε τις πρώτες μέρες της ψηφιακής φωτογραφίας όταν οι περισσότερες κάμερες είχαν ανάλυση VGA (640x480)
- Οι καταναλωτές αγοράζουν πάντα την κάμερα με την μεγαλύτερη ανάλυση. Αν και αυξάνεται η ανάλυση, δεν αυξάνεται και το μέγεθος του ανιχνευτή.
- Αυτό τελικά οδηγεί σε μείωση της ευαισθησίας και αύξηση του θορύβου στη φωτογραφία.
- Επίσης, σπάνια έχουμε καλύτερη καταγραφή λεπτομερειών, αφού οι φακοί δεν ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις του ανιχνευτή.

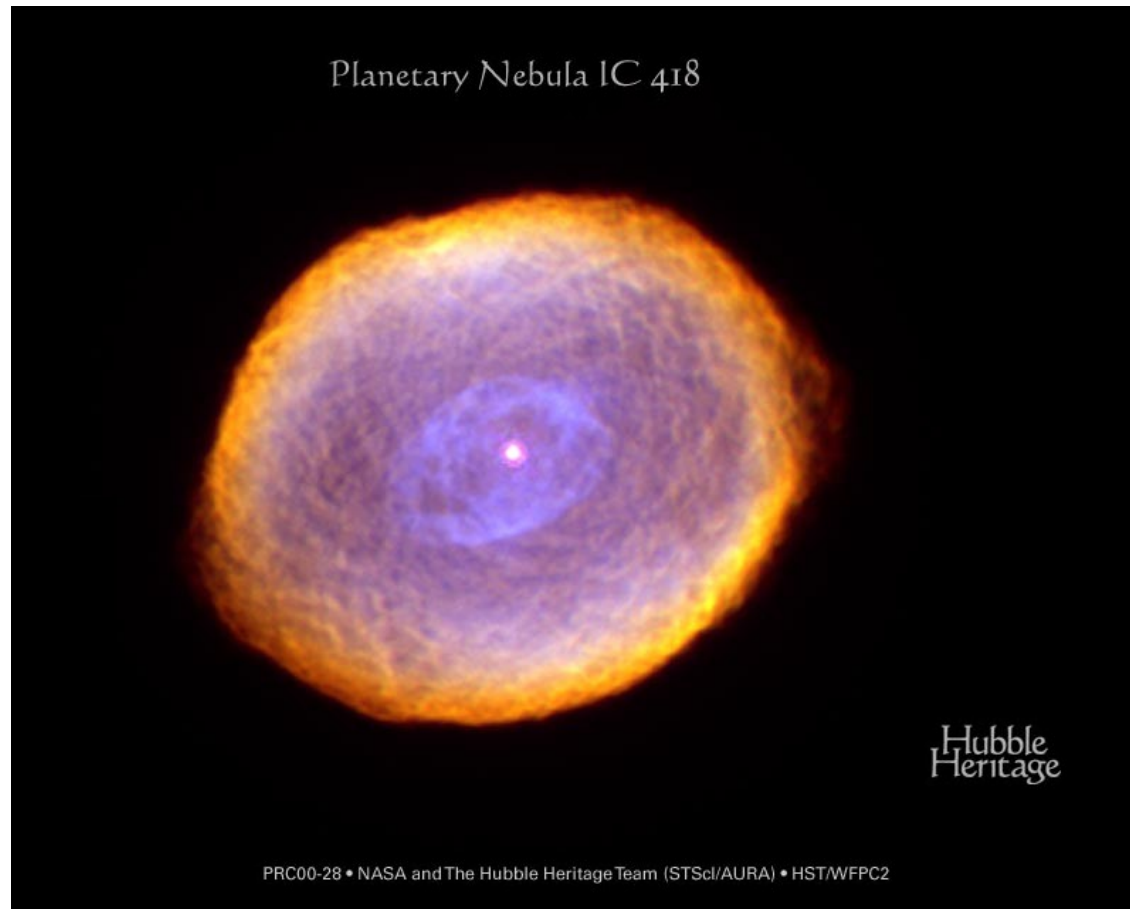


Βιβλιογραφία

- John Wilson, John Hawkes, *Οπτοηλεκτρονική: μια εισαγωγή*, Εκδόσεις ΕΜΠ (2006)
- http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2009/ 1/4/2011
- http://en.wikipedia.org/wiki/Hubble_Space_Telescope 1/4/2011
- http://en.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled_device 1/4/2011
- John Bally, Adam Ginsburg, *ASTR 3520 Observations & Instrumentation II: Spectroscopy*, Colorado University
- Rainer Schwenn, *Space Instrumentation*, MPAe
- *CCD imaging in amateur and professional astronomy*, Swinburne University of Technology
- Ewert Bengtsson, *Digital cameras, CMOS and CCD sensors*, Uppsala University (2008)
- Steve B. Howell, *Basics of Charge Coupled Devices*, NOAO



Ευχαριστώ για την προσοχή σας!



LibreOffice
The Document Foundation



To GIMP 2.6.11

