

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΚΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ

Κοσμάς Γαζέας



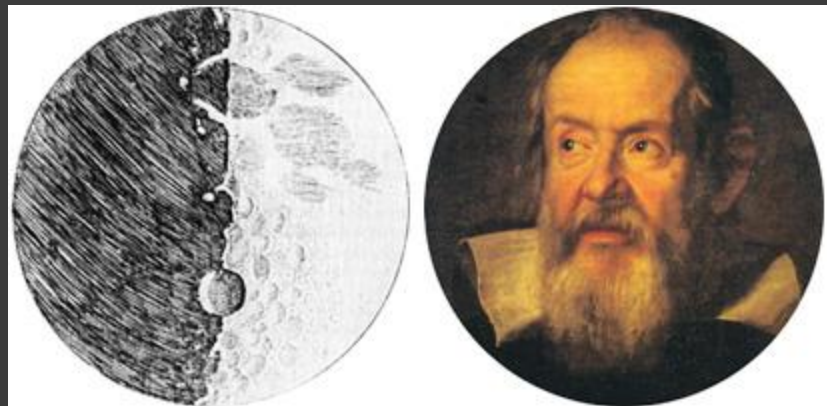
Εισαγωγή

... 1609 μ.Χ.

- Η παρατηρησιακή αστρονομία από το ξεκίνημά της χρησιμοποίησε τον ανθρώπινο οφθαλμό σαν «δέκτη» φωτός από τον ουρανό.

Περίοδος 1609 – 1840

- Η χρήση του τηλεσκοπίου το 1609 μ.Χ. από τον Γαλιλαίο άνοιξε νέους ορίζοντες και αύξησε τη συλλεκτική ισχύ του ανθρώπινου ματιού. Η παρατήρηση όμως εξακολουθούσε να γίνεται με το μάτι για τα επόμενα 250 χρόνια περίπου.



Left: One of Galileo's Moon drawings from 1610.
Right: Portrait of Galileo by J. Sustermans (1597-1681).

Εισαγωγή

Περίοδος 1840 – 1900

- Στις αρχές του 19^{ου} αιώνα η φωτογραφία μπήκε στη ζωή του ανθρώπου, και αναπόφευκτα χρησιμοποιήθηκε και στην αστρονομία. Οι πρώτες αστρονομικές φωτογραφίες (της Σελήνης) ελήφθησαν το 1840 σε φωτογραφικές πλάκες, πάνω στις οποίες υπήρχε λεπτή επίστρωση φωτοευαίσθητου φωτογραφικού γαλακτώματος.

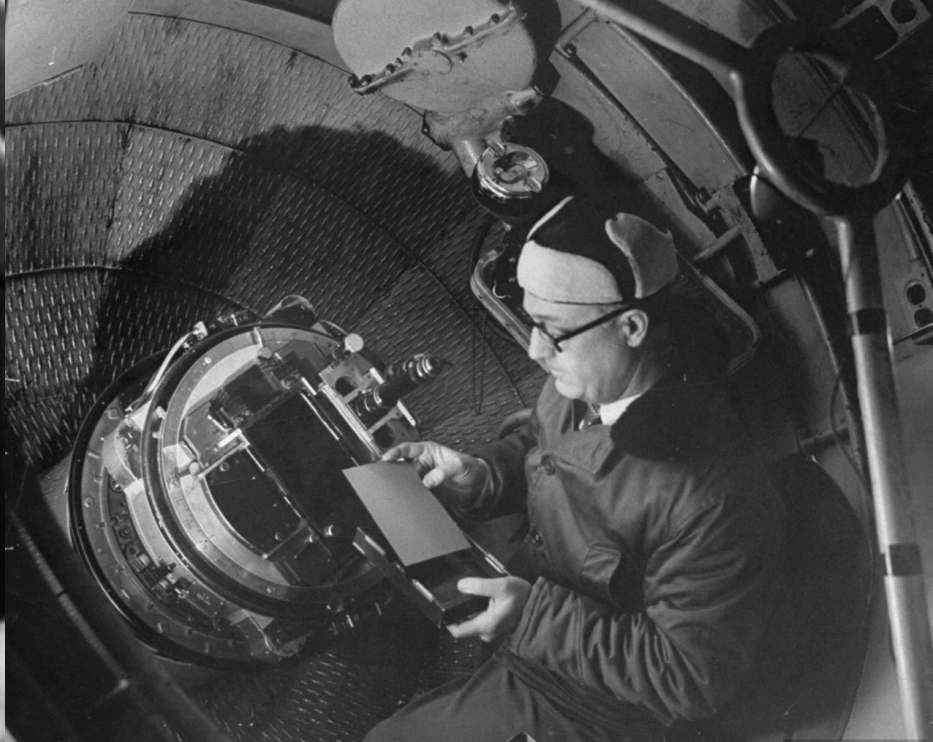


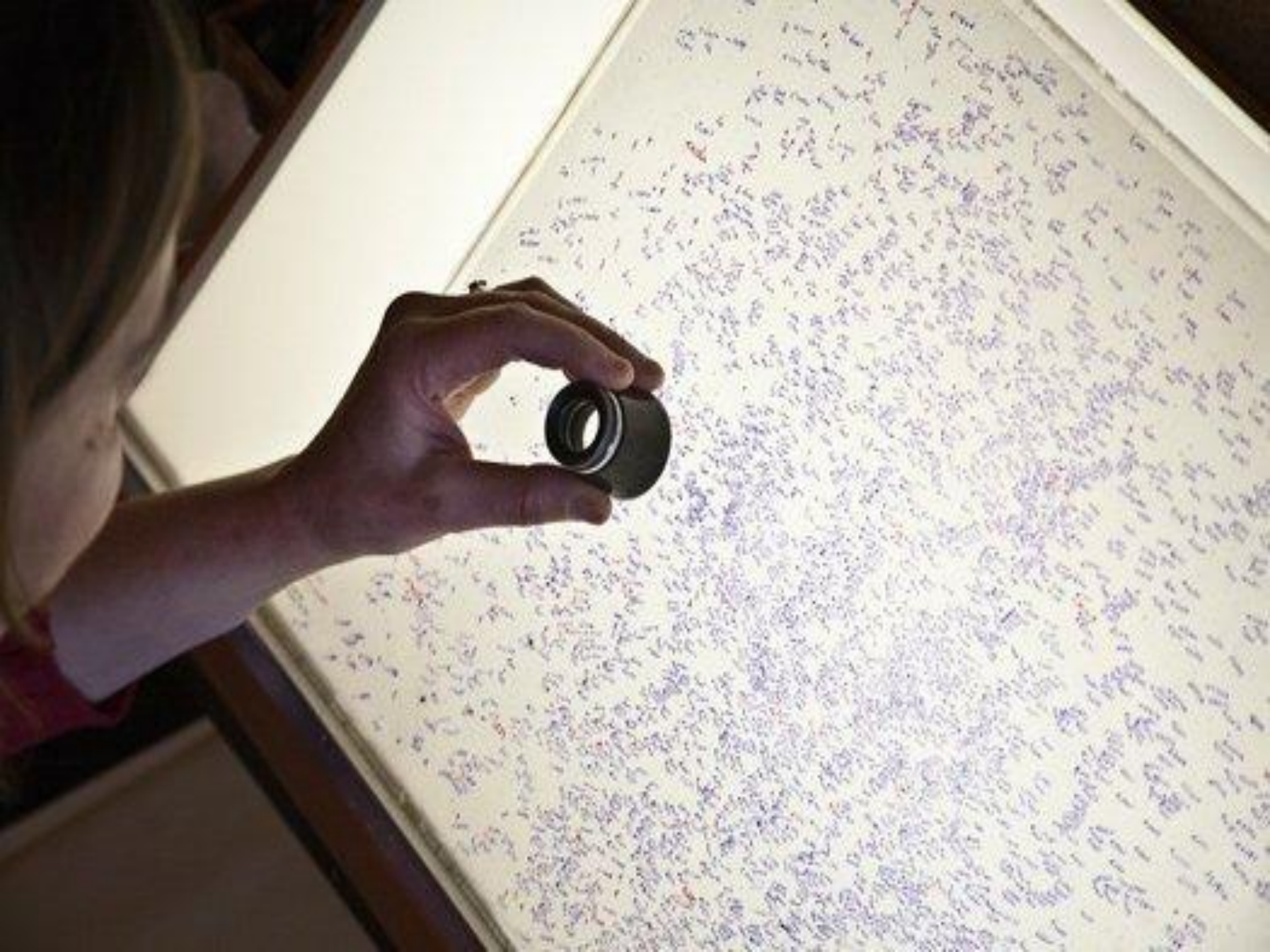


Περίοδος 1840 – 1900

- Για σχεδόν μισό αιώνα η παρατήρηση και καταγραφή αμυδρών αντικειμένων γινόταν με την τεχνική της φωτογραφίας. Ο μεγάλος χρόνος έκθεσης προσέφερε το πλεονέκτημα της συλλογής φωτός.
- Ο συνδυασμός μεγάλου τηλεσκοπίου, μεγάλου χρόνου έκθεσης, ευαίσθητου φωτογραφικού γαλακτώματος, και σκοτεινού ουρανού ήταν το κλειδί για μια καλή αστροφωτογραφία.







Περίοδος 1900 – 1920

- Το 1905 ο Albert Einstein (Nobel 1921) εξήγησε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, σύμφωνα με το οποίο ένα φωτόνιο μπορεί να προκαλέσει την εκπομπή ενός ηλεκτρονίου από την ύλη, όταν αυτό πέσει πάνω σε αυτή. Το αποτέλεσμα της εκπομπής ηλεκτρονίων ήταν η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, η οποία μπορούσε να μετρηθεί και να καταγραφεί.
- Αυτό έδωσε την ιδέα για την κατασκευή των πρώτων ηλεκτρονικών οργάνων, ευαίσθητων στο φως, τα οποία έδιναν στην έξοδο ένα αναλογικό σήμα (ρεύμα).
- Έτσι, το 1920 γεννήθηκε η φωτοηλεκτρική λυχνία, ο φωτοπολλαπλασιαστής και το φωτοηλεκτρικό φωτόμετρο.



Φωτοκάθοδος

&

Φωτοπολλαπλασιαστής

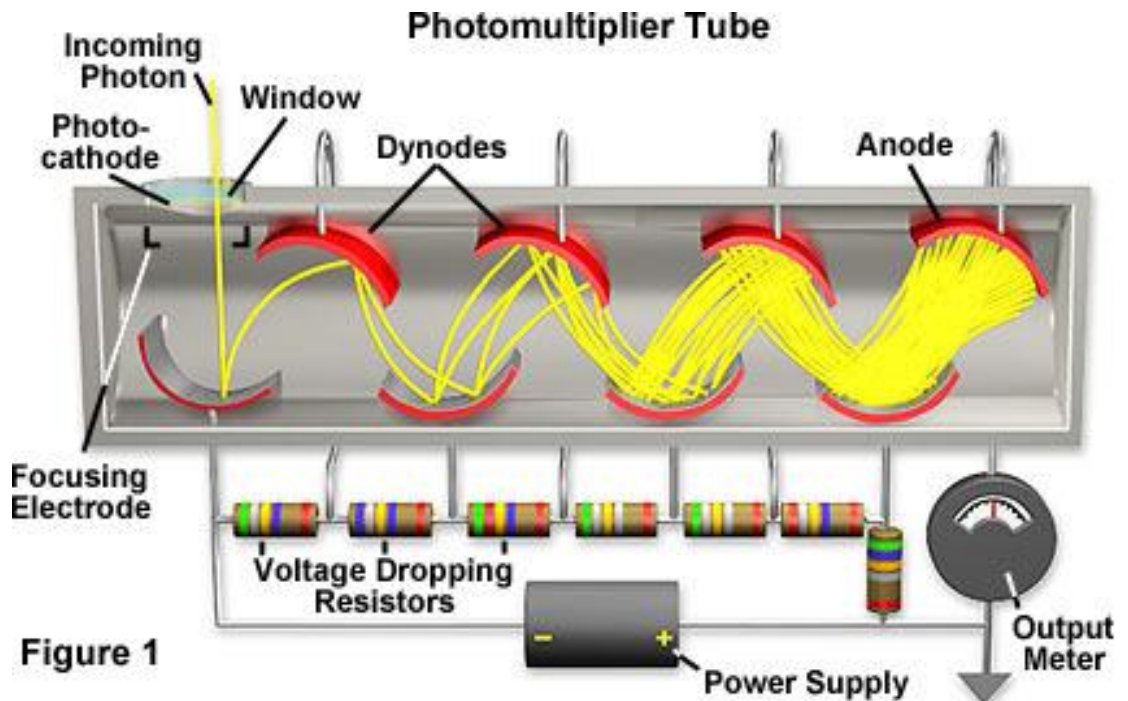
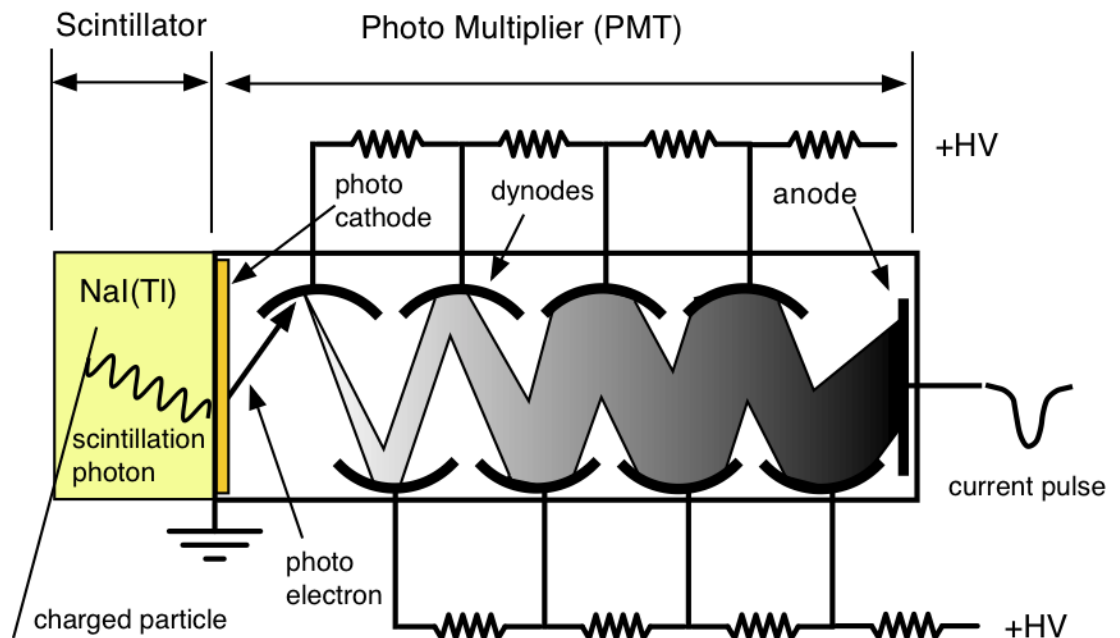
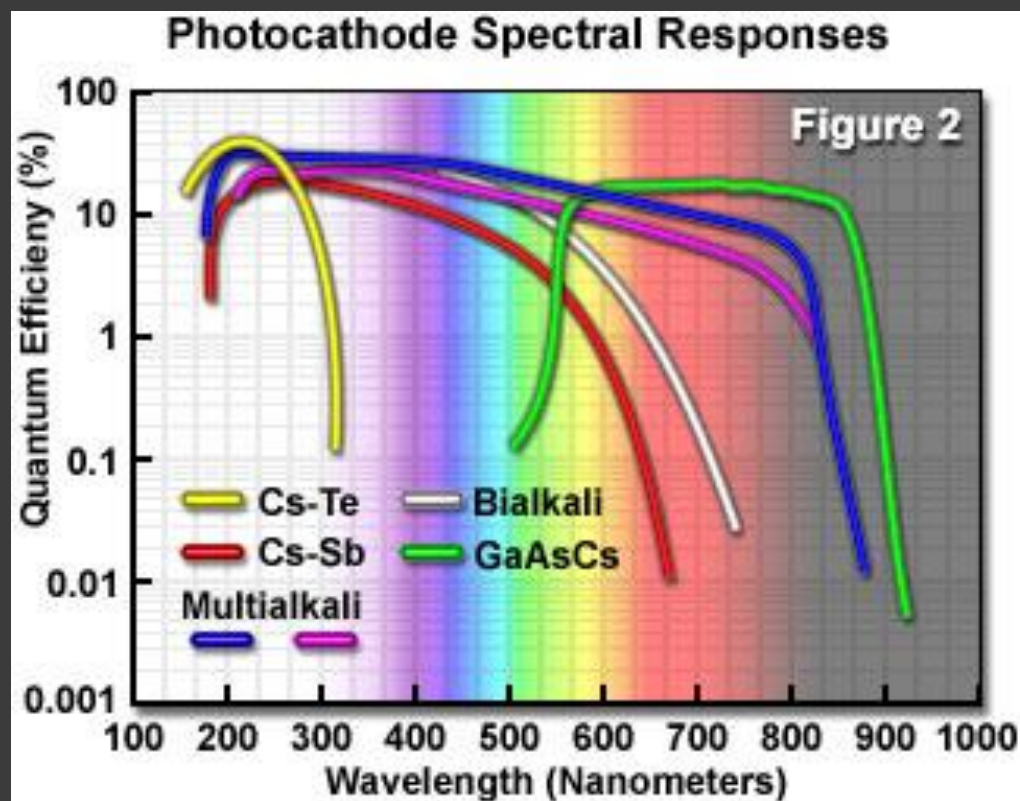


Figure 1

Είδη φωτοπολλαπλασιαστών



Φασματική απόκριση φωτοπολλαπλασιαστών



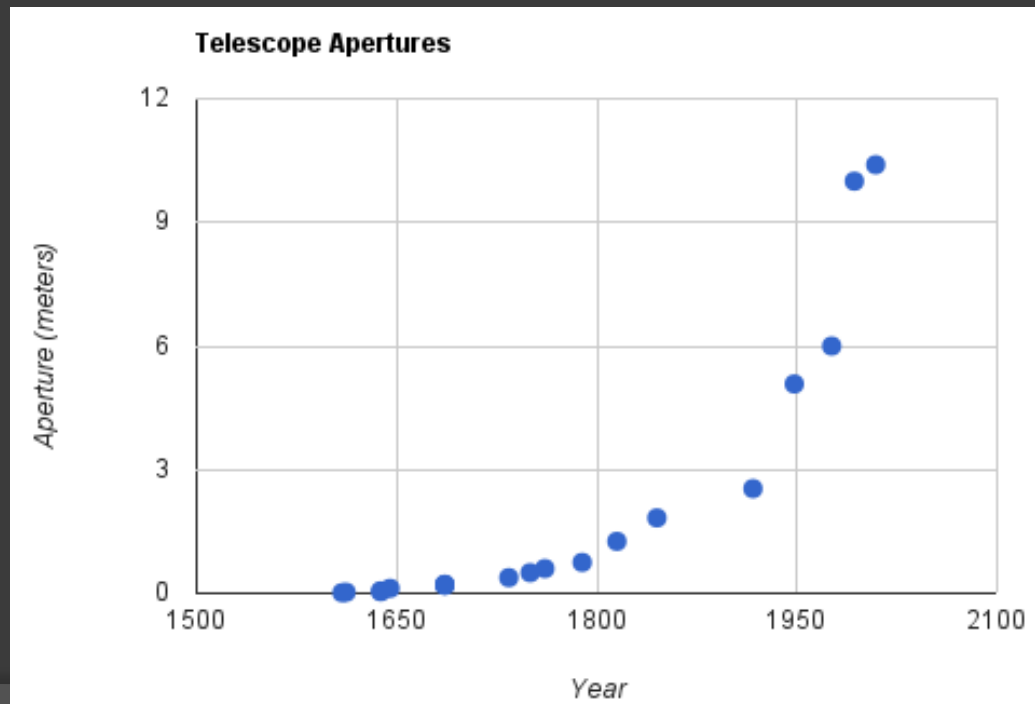
Περίοδος 1920 – 1960

- Οι φωτογραφικές μηχανές χρησιμοποιούσαν αρχικά γυάλινες φωτογραφικές πλάκες, επιστρωμένες με το φωτοευαίσθητο φωτογραφικό γαλάκτωμα.
- Αργότερα οι γυάλινες πλάκες αντικαταστάθηκαν με μια εύκαμπτη πλαστική μεμβράνη, επιστρωμένη με το φωτογραφικό γαλάκτωμα. Αυτή η μεμβράνη είναι το γνωστό μας φιλμ.



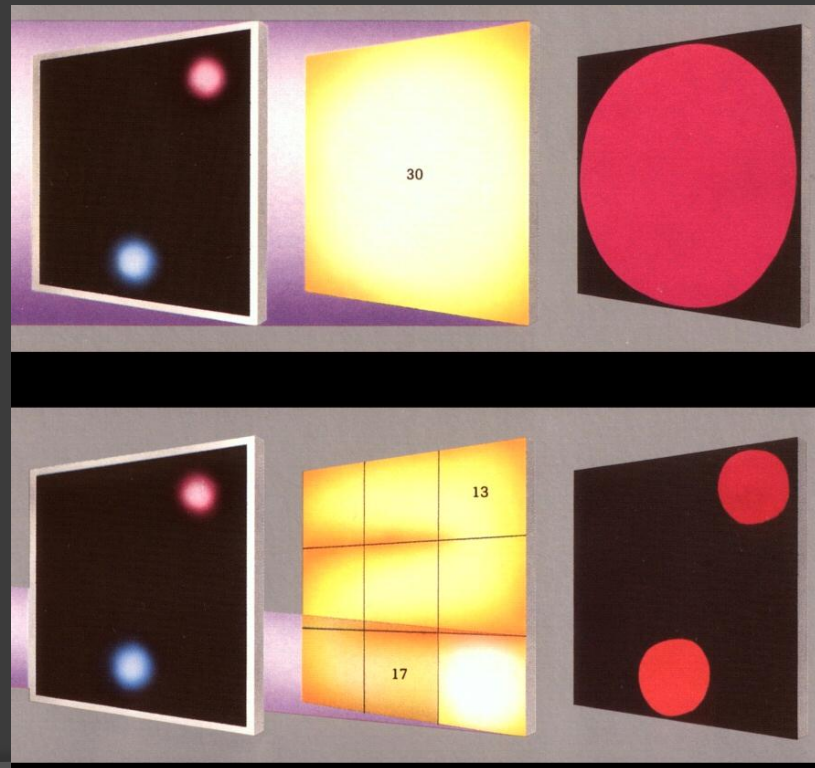
Περίοδος 1920 – 1969

- Στα επόμενα 50 χρόνια οι φωτοπολλαπλασιαστές κατάφεραν να αναβαθμίσουν την ευαισθησία των υπαρχόντων τηλεσκοπίων.
- Ο ολοένα και μεγαλύτερη ευαισθησία των φωτοπολλαπλασιαστών, σε συνδυασμό με τα ολοένα και μεγαλύτερα τηλεσκόπια, πρόσφερε στους αστρονόμους μια νέα εικόνα για το μακρινό ορατό σύμπαν.



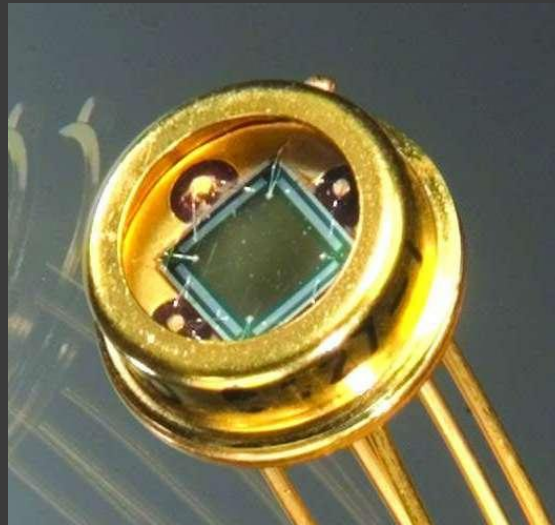
Περίοδος 1920 – 1969

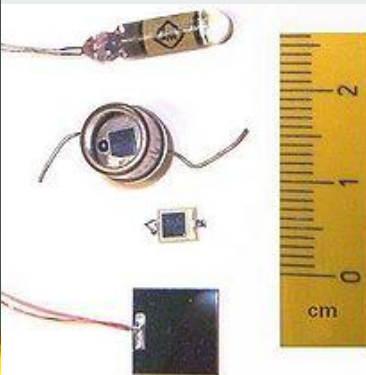
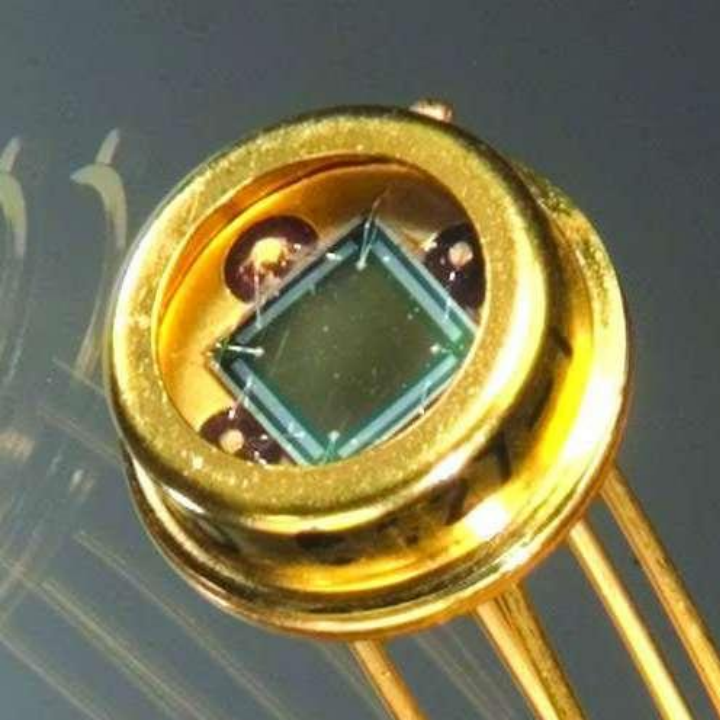
- Το μεγάλο μειονέκτημα των φωτοπολλαπλασιαστών είναι ότι δεν έχουν απεικονιστική ικανότητα, δηλαδή δεν αποτυπώνουν εικόνα. Μετρούν μόνο τη φωτεινότητα των ουρανίων σωμάτων, μέσα από ένα πολύ μικρό οπτικό πεδίο.



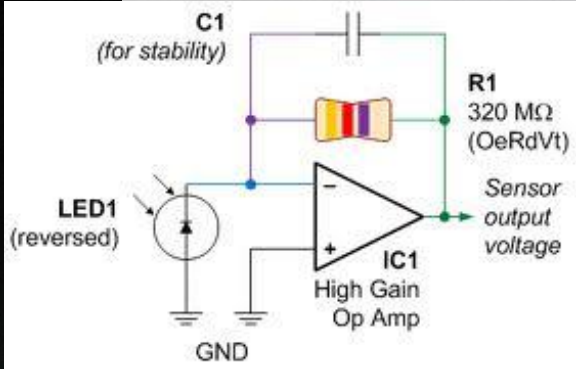
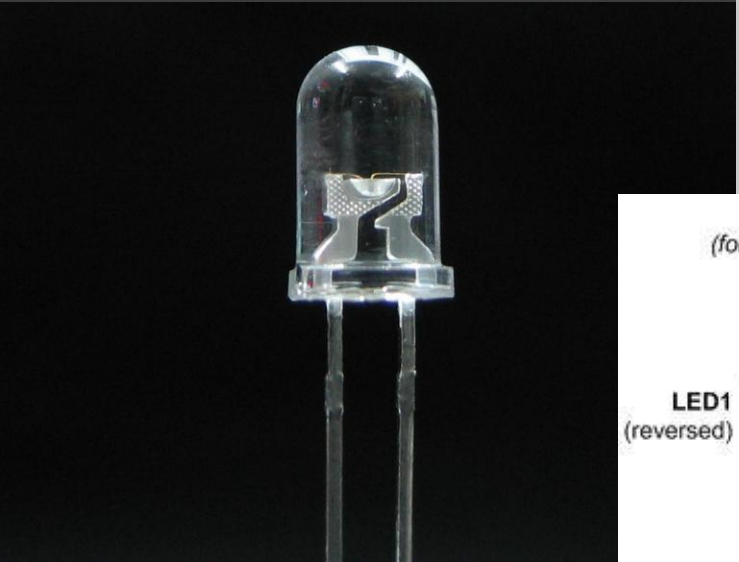
Περίοδος 1920 – 1969

- Θεωρητικά, μια συστοιχία φωτοπολλαπλασιαστών σε ορθογώνια διάταξη θα παρείχε μια πληροφορία εικόνας. Αυτό όμως είναι ιδιαίτερα δαπανηρό και δύσκολο στην κατασκευή. Οι φωτοπολλαπλασιαστές είναι μεγάλοι σε μέγεθος, οπότε η κατασκευή μιας τέτοιας συστοιχίας είναι τεχνικά αδύνατη.
- Μικρότερες φωτοευαίσθητες ηλεκτρονικές διατάξεις είναι οι φωτοδίοδοι.





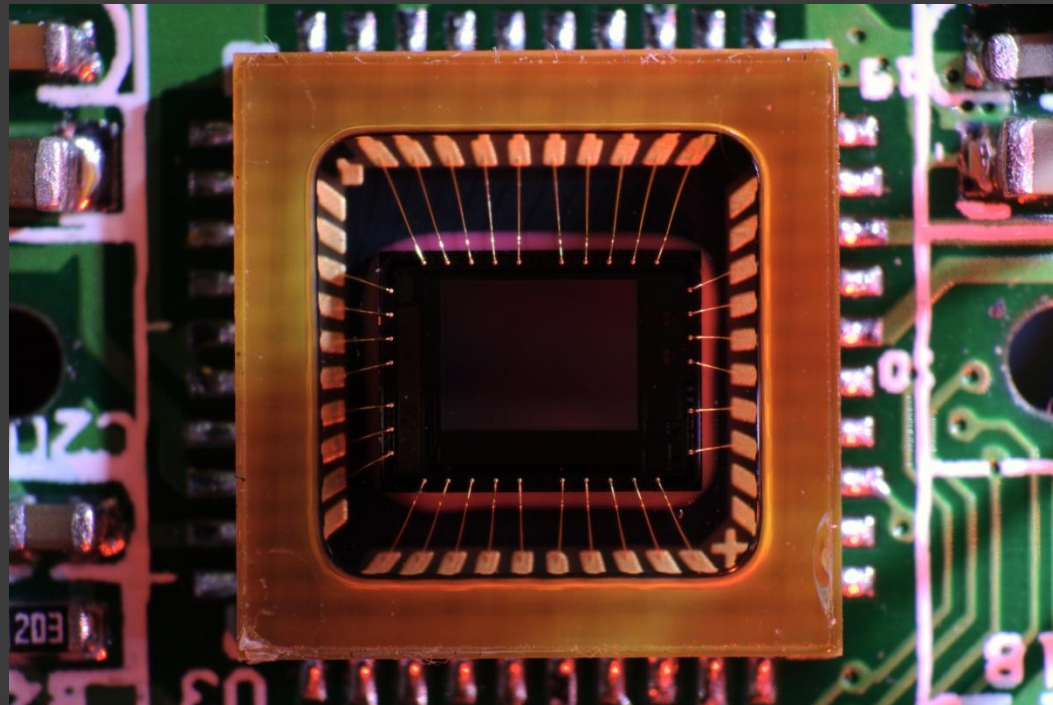
Κατηγορίες φωτοδιόδων



Έτος 1969

- Μια συστοιχία πολλών μικρών φωτοδίοδων μπορούν να σχηματίσουν εικόνα με ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Αυτήν την τεχνική την επινόησαν το 1969 οι Willard Boyle και George Smith στα Bell Laboratories.
- Η πρώτη συστοιχία συζευγμένων φορτίων είχε διαστάσεις 100x100 pixels.

charge-coupled device CCD





2009 Nobel Prize in Physics awarded to the inventors of the CCD

In 1969, Willard S. Boyle and George E. Smith invented the first successful imaging technology using a digital sensor, a CCD (charge-coupled device). The two researchers came up with the idea in just an hour of brainstorming.



Bell Labs researchers Willard Boyle (left) and George Smith (right) with the charge-coupled device.

Photo taken in 1974. Photo credit: Alcatel-Lucent/Bell Labs.



The Nobel Prize in Physics 2009

"for the invention of an imaging semiconductor circuit – the CCD sensor"



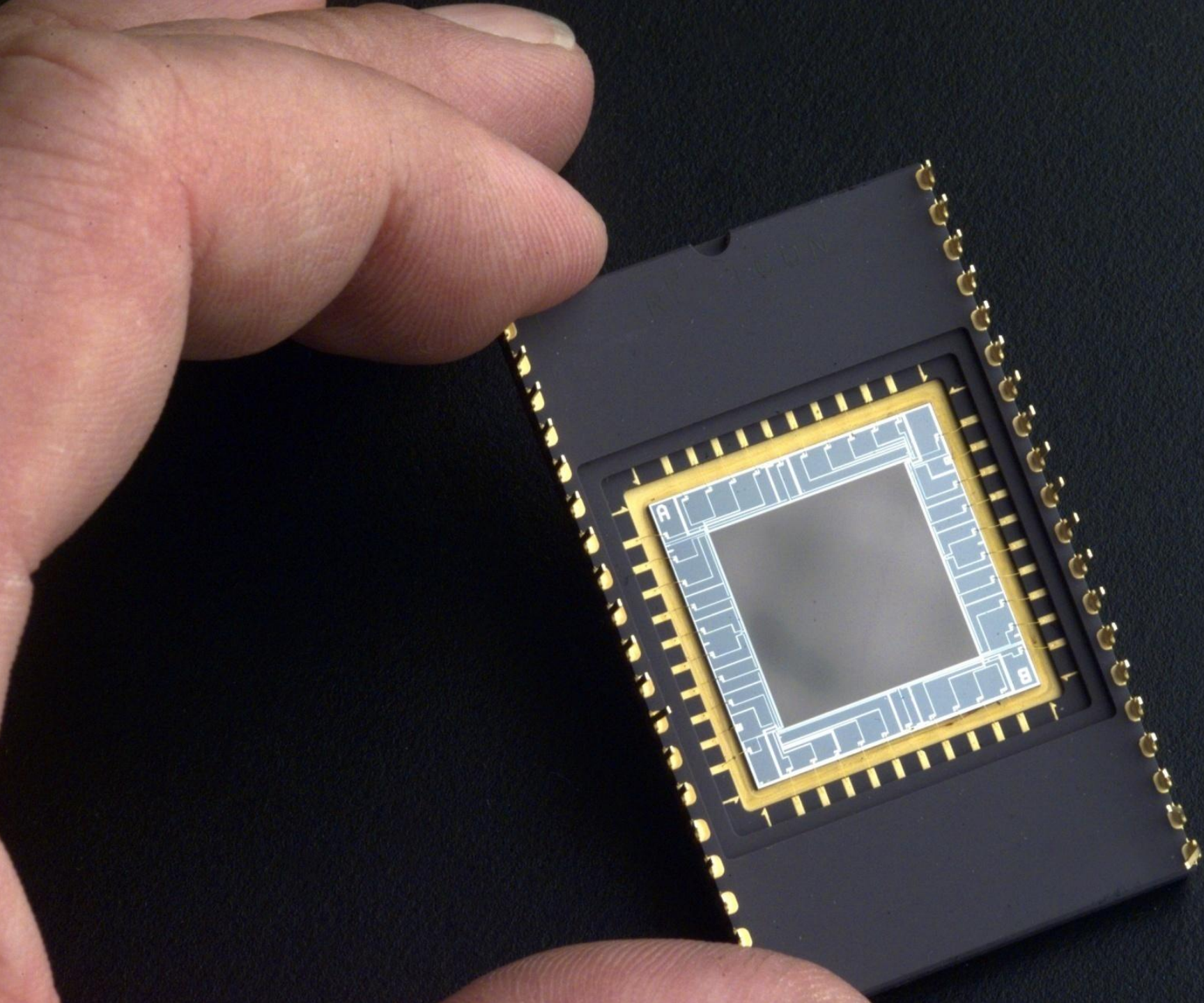
Willard S. Boyle

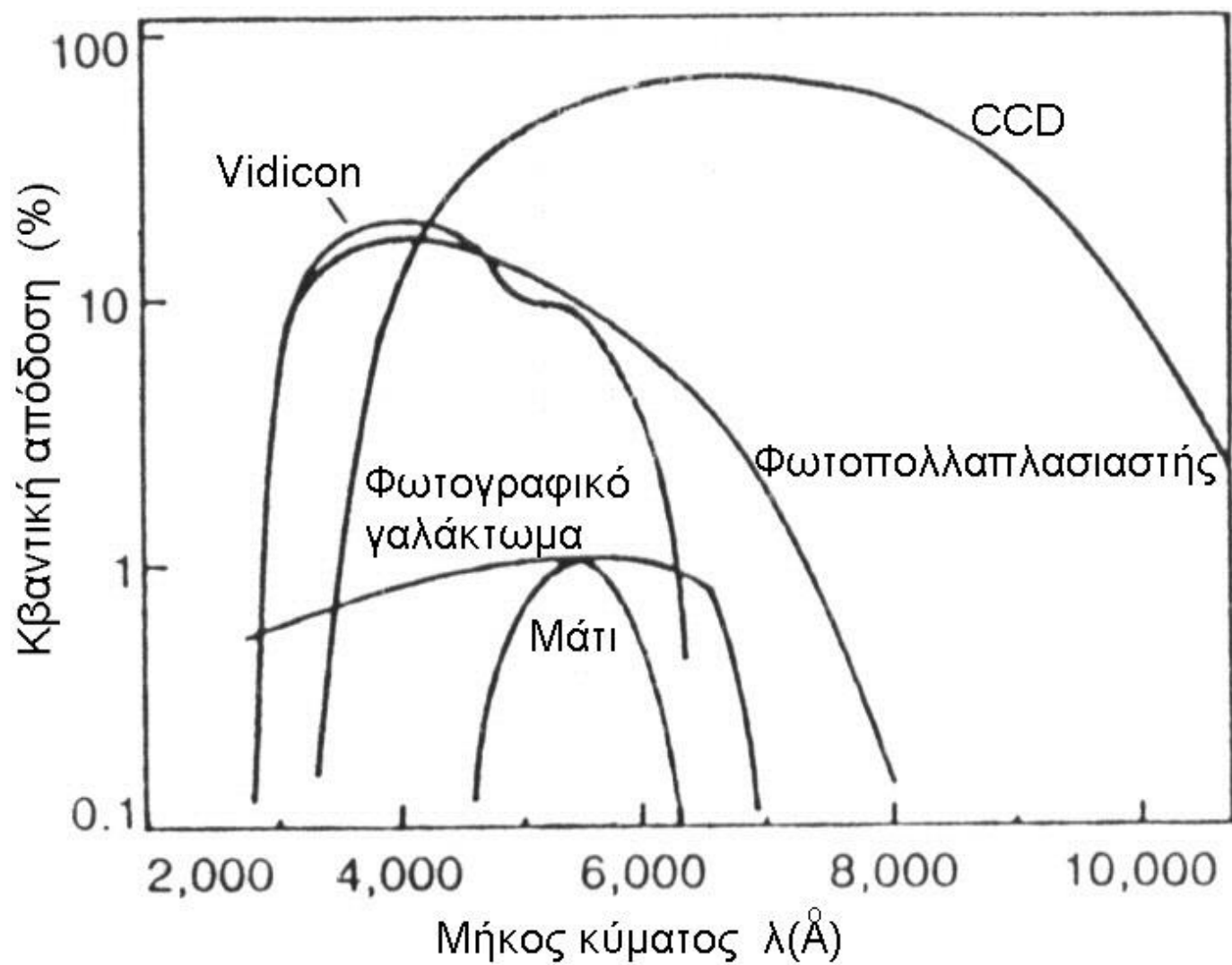


George E. Smith

Οι εφευρέτες της CCD camera, Williard Boyle και George Smith
κατά την απονομή του βραβείο Nobel Φυσικής το 2009







CRAF/CASSINI CCD

200X S4613

RG (gate)
Vref (drain)

SW
TG

drain

source (VOUT)

100µm

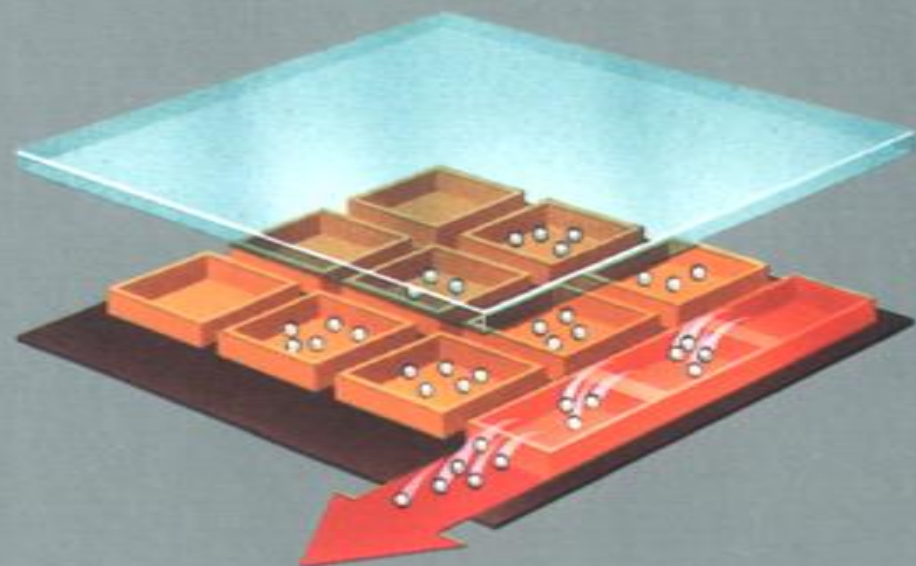
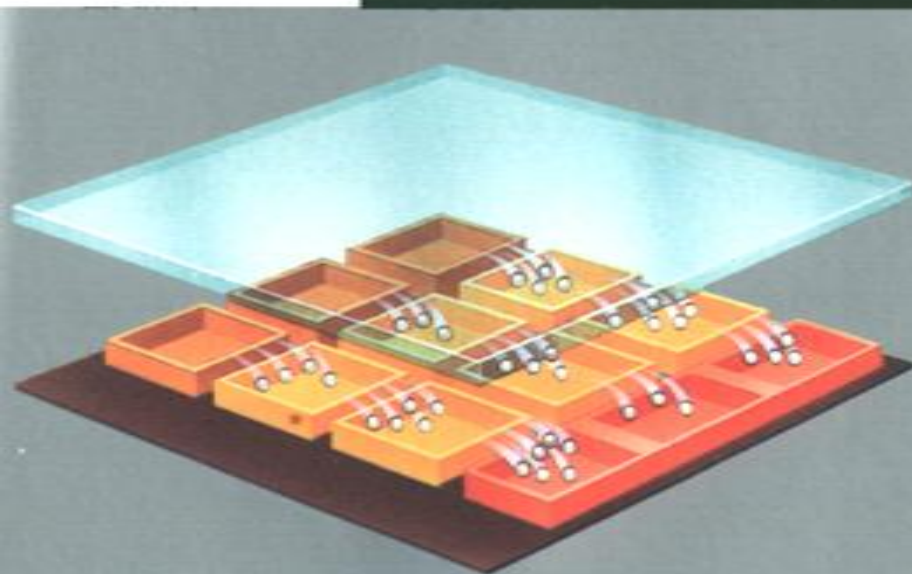
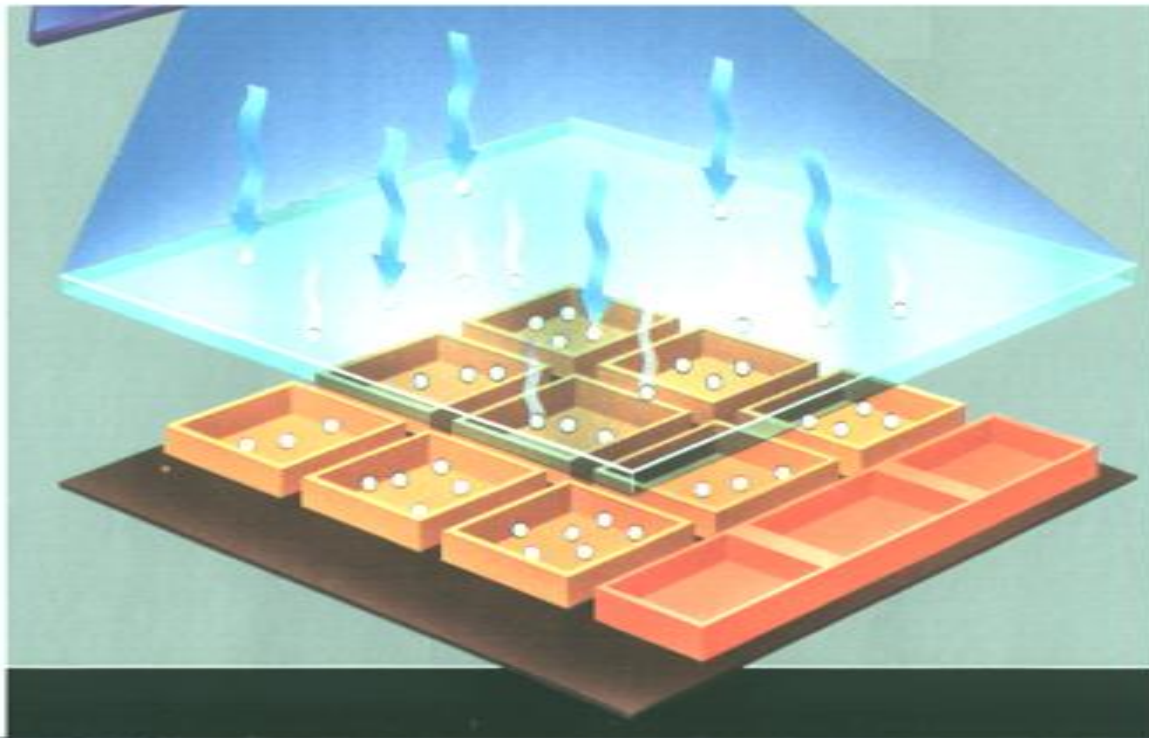
20KV

45

029

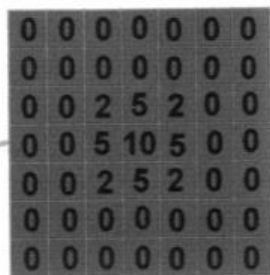
S

J JAN
BR

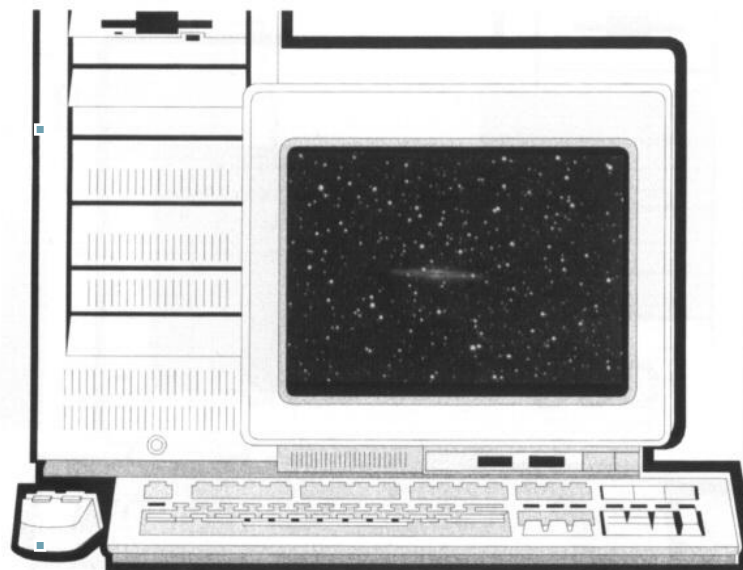
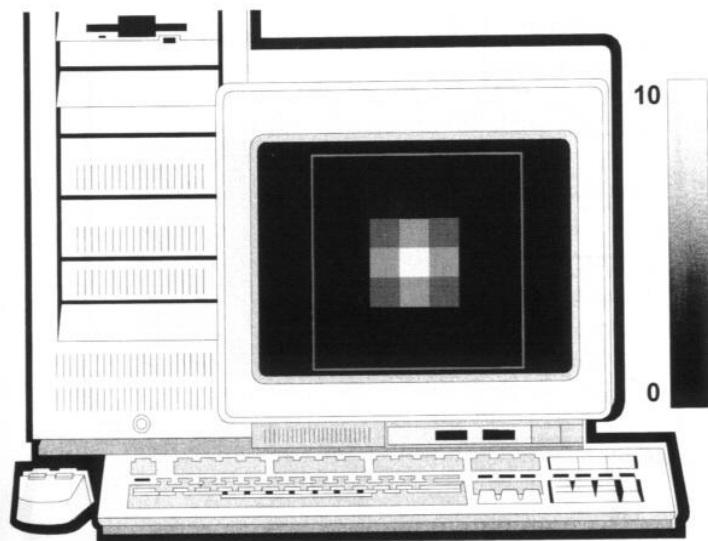
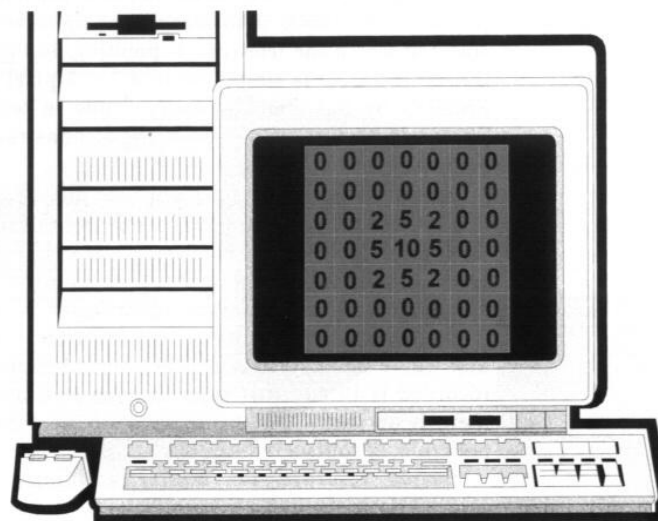




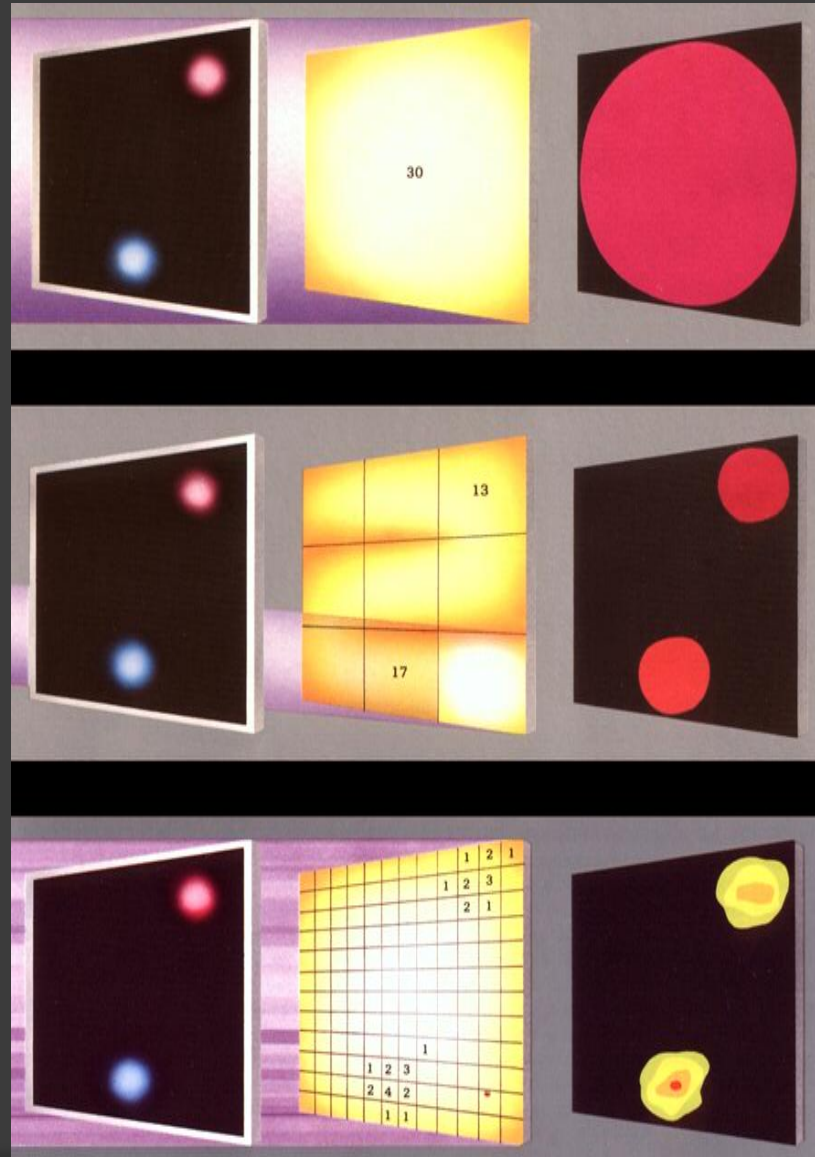
Computer

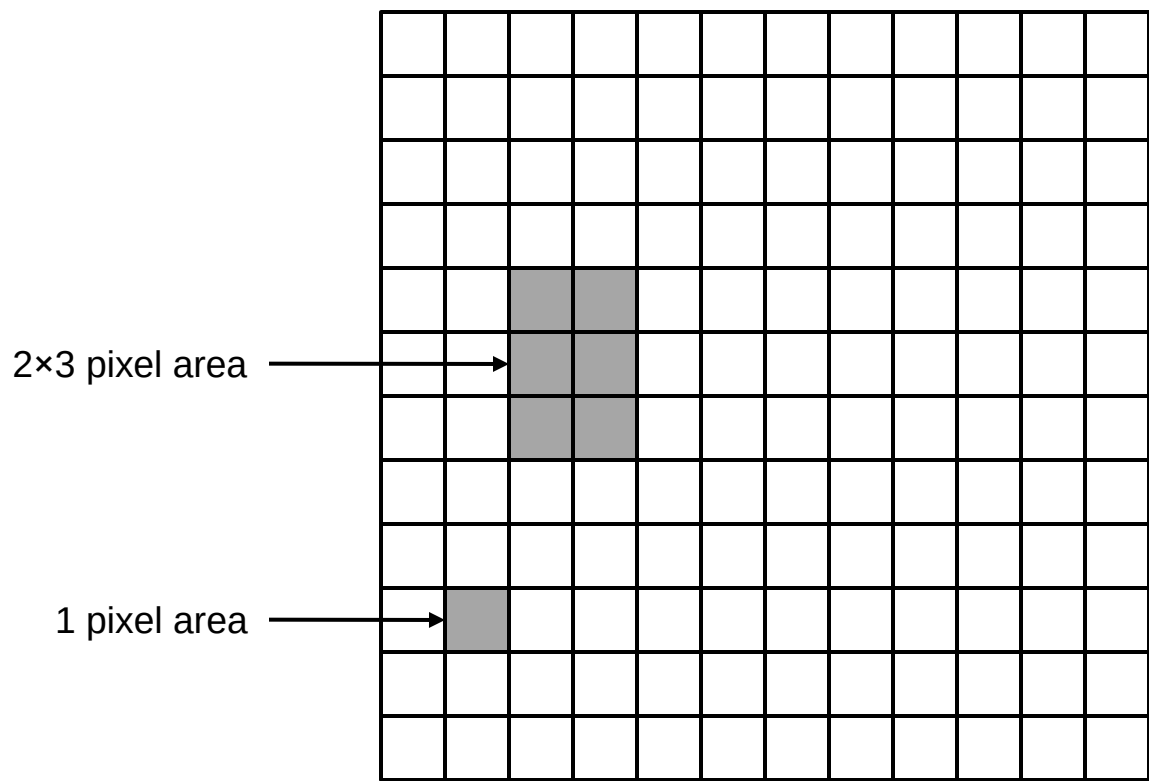
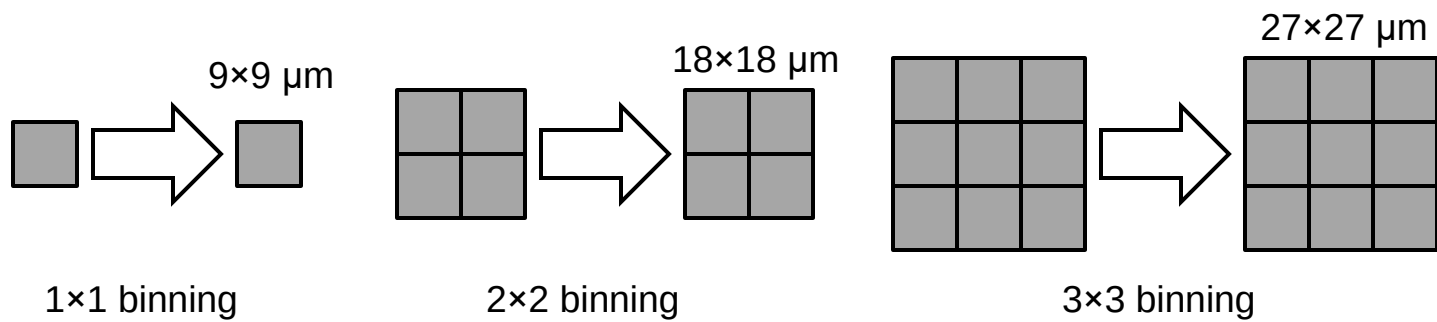


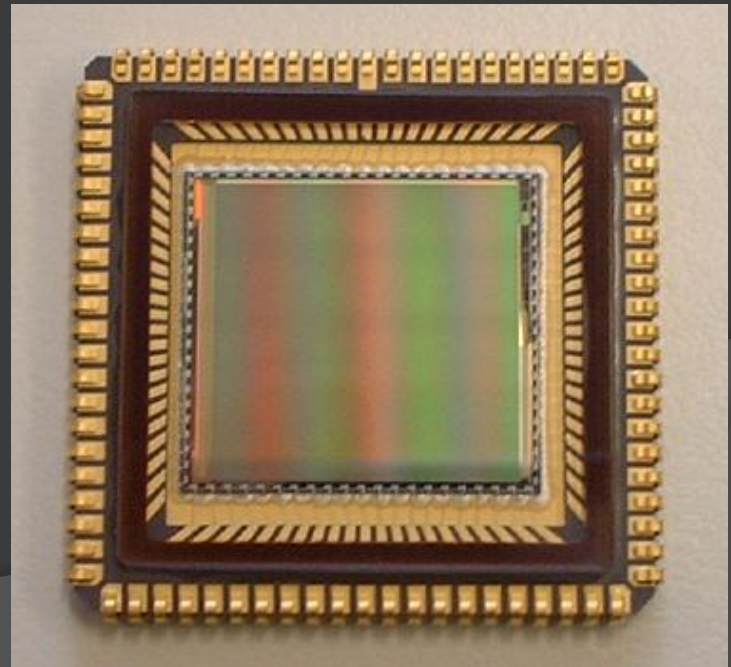
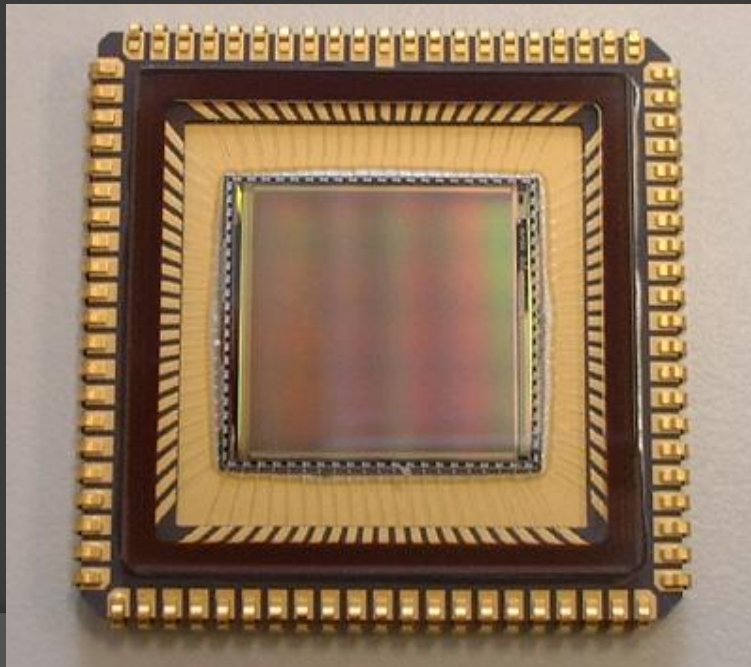
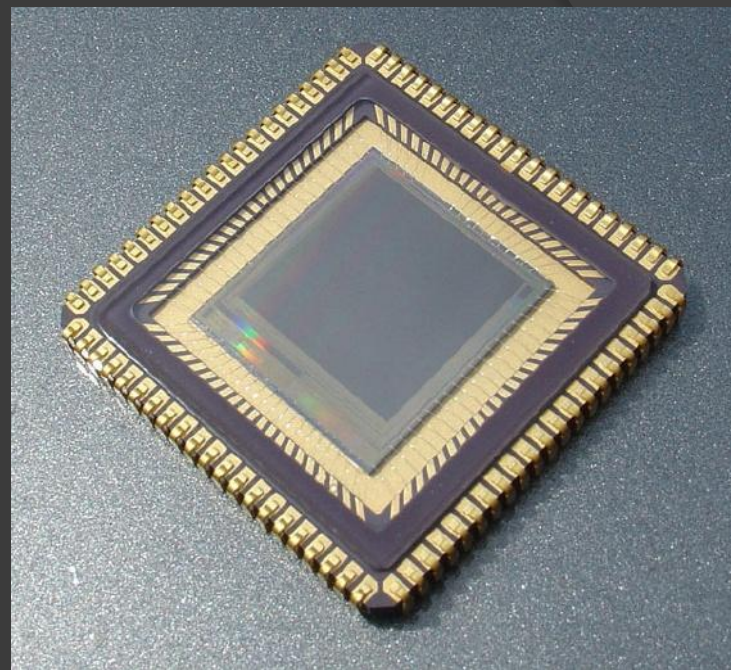
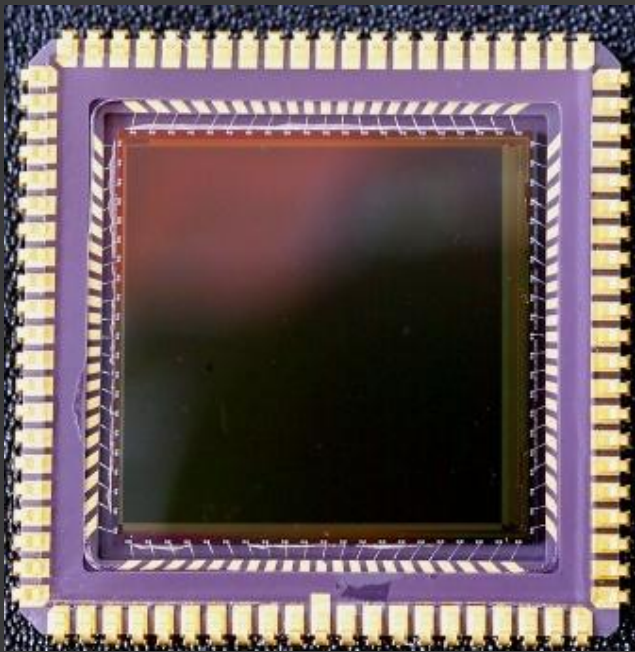
CCD

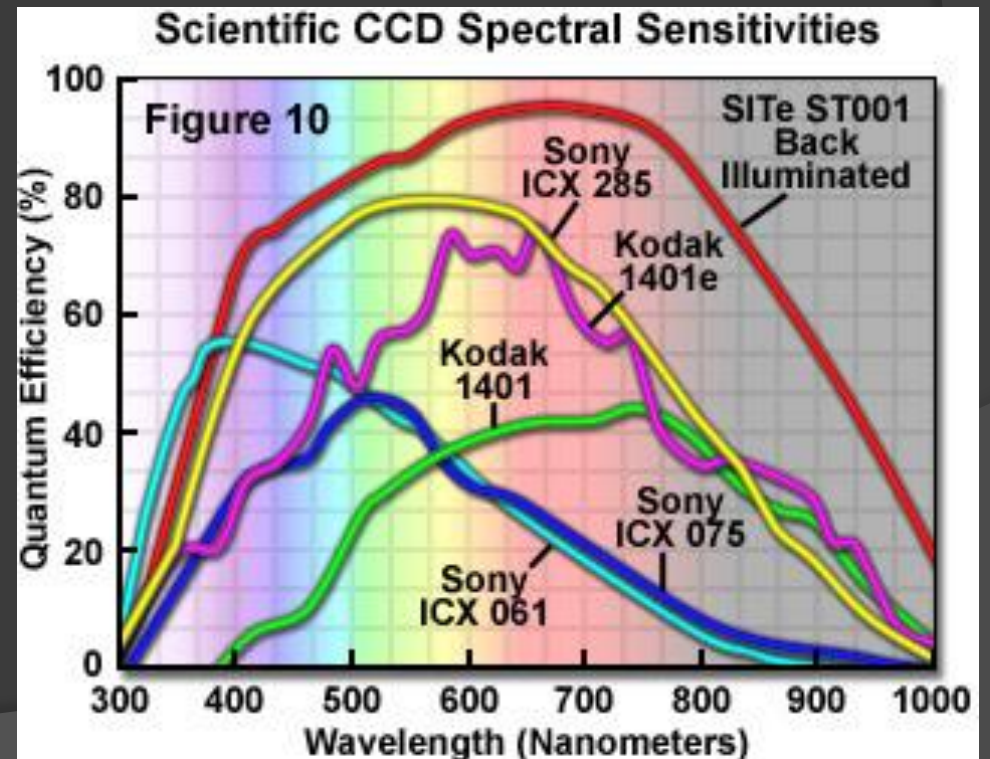
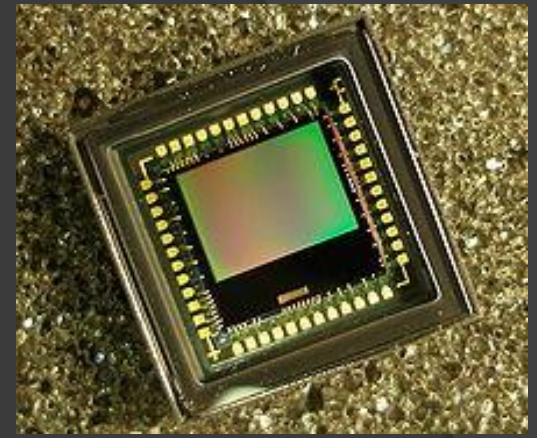
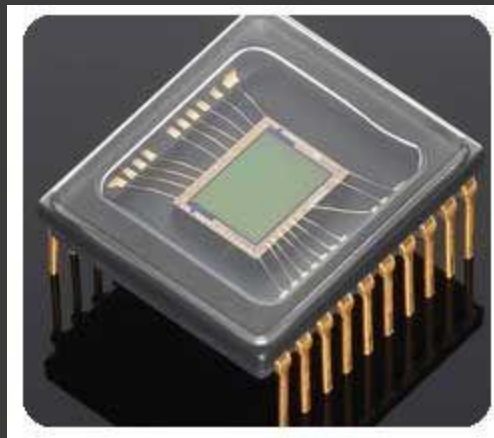
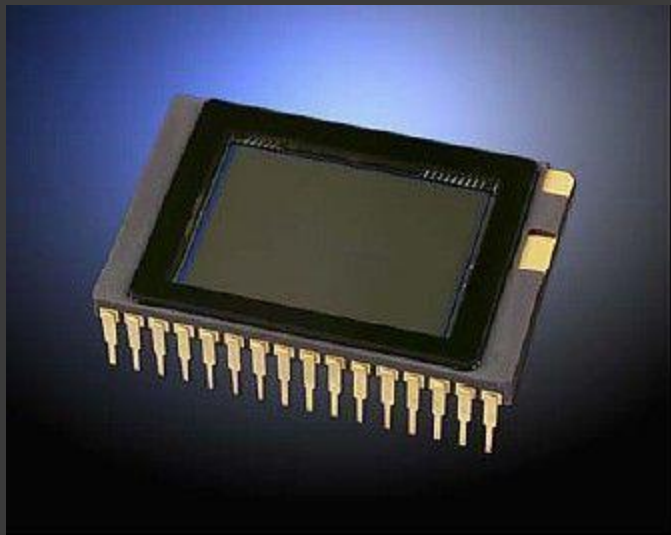


Το μέγεθος των pixels παίζει καθοριστικό ρόλο στην ανάλυση της εικόνας

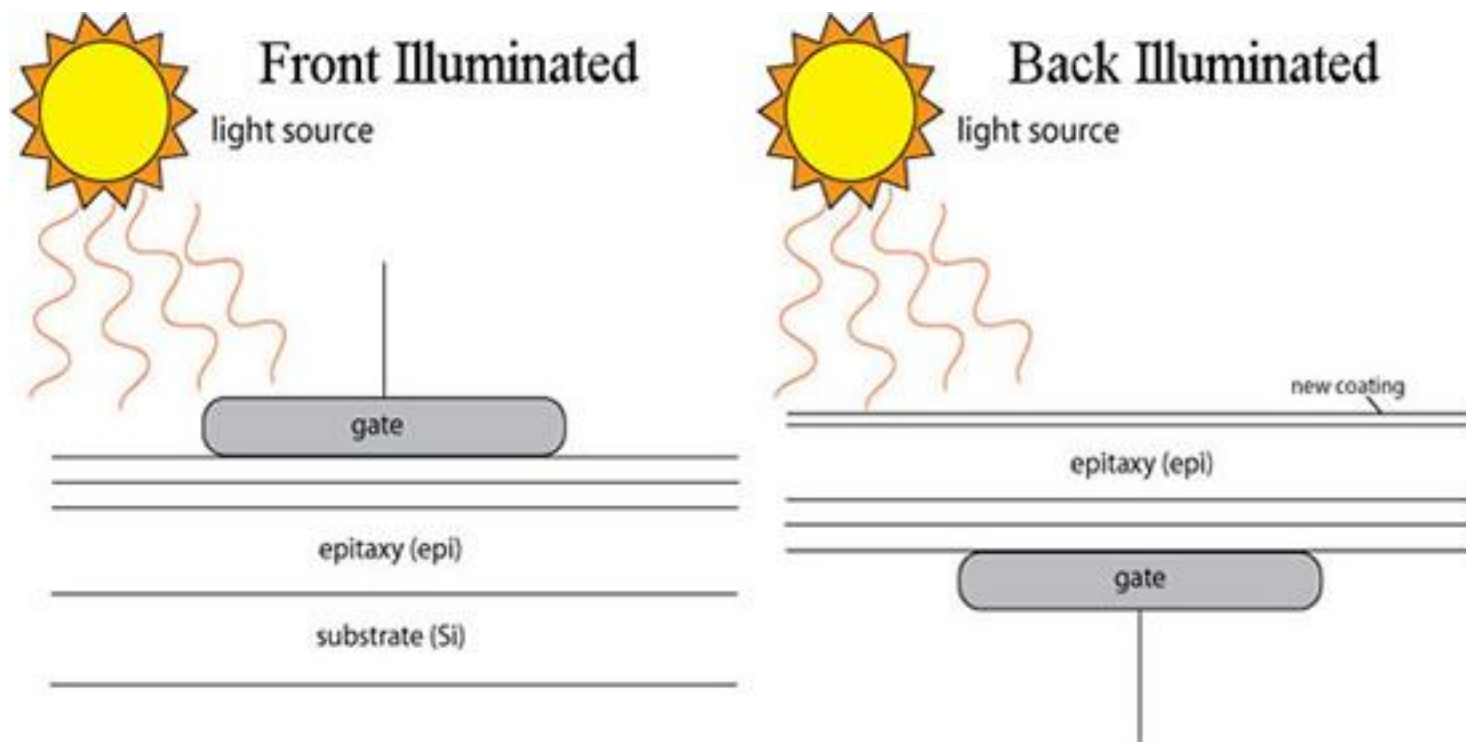




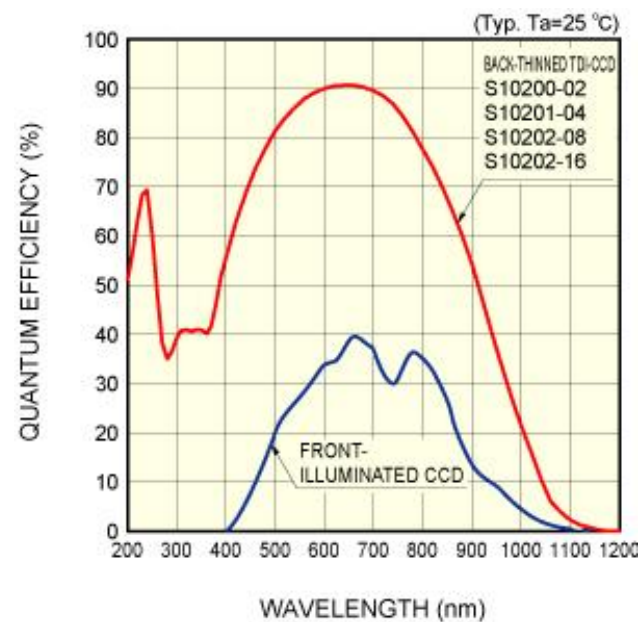
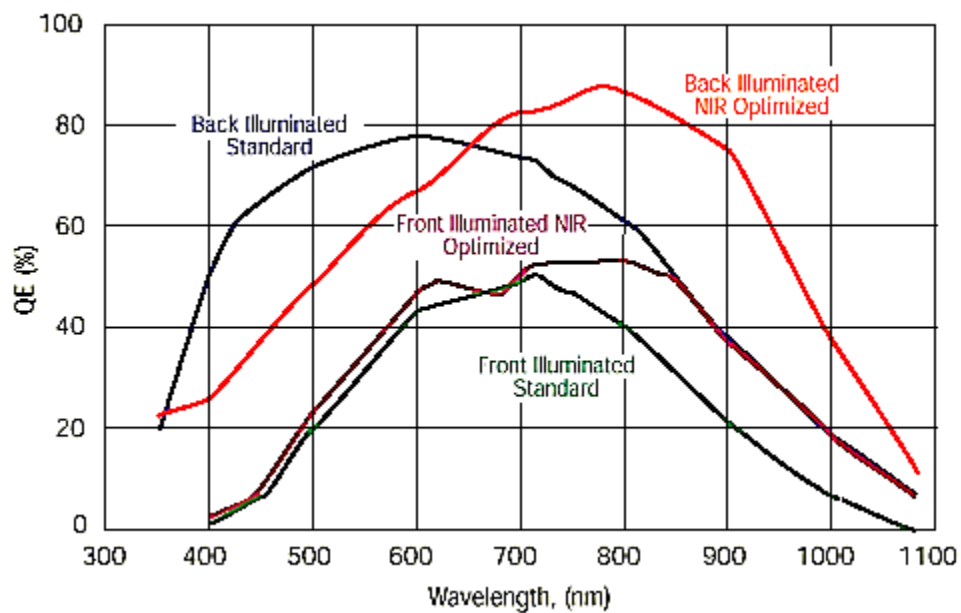




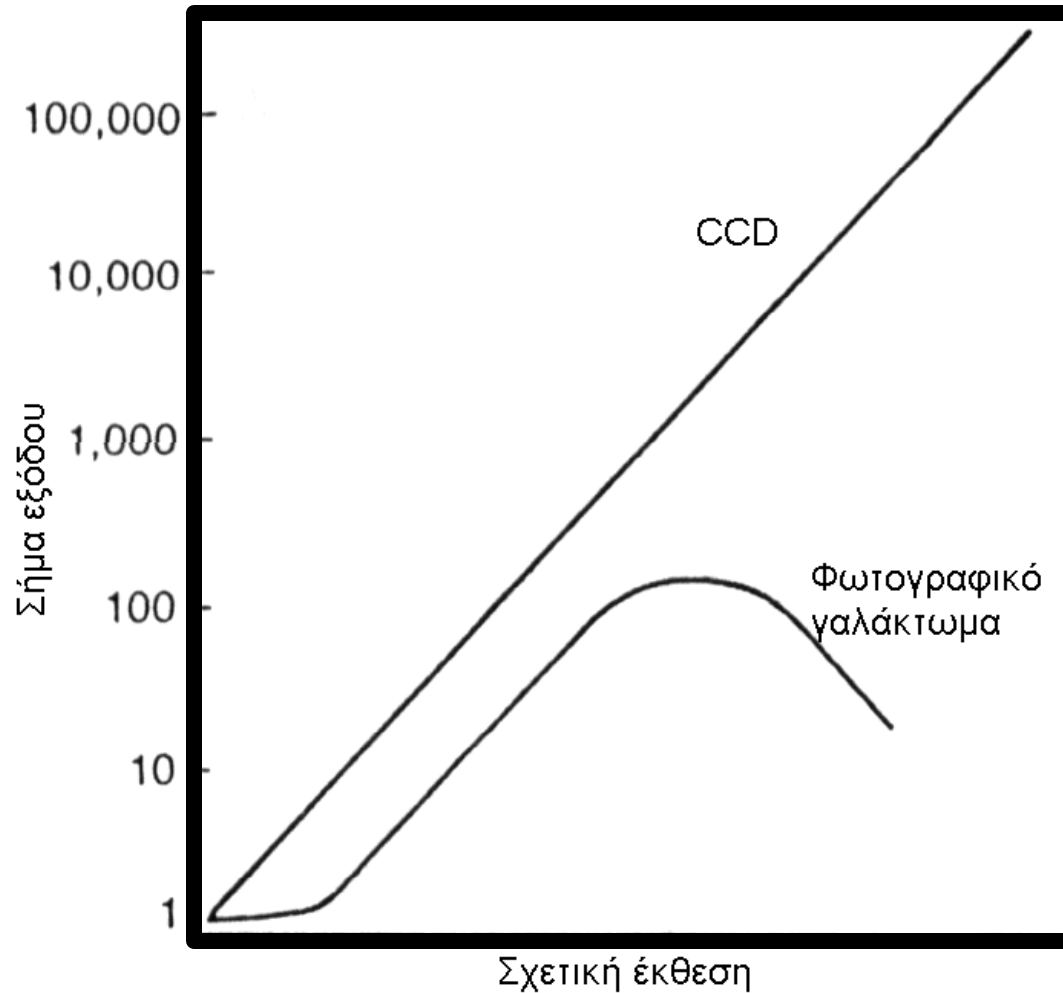
Εκμετάλλευση ολόένα και περισσότερων φωτονίων



Φασματική απόκριση των CCD

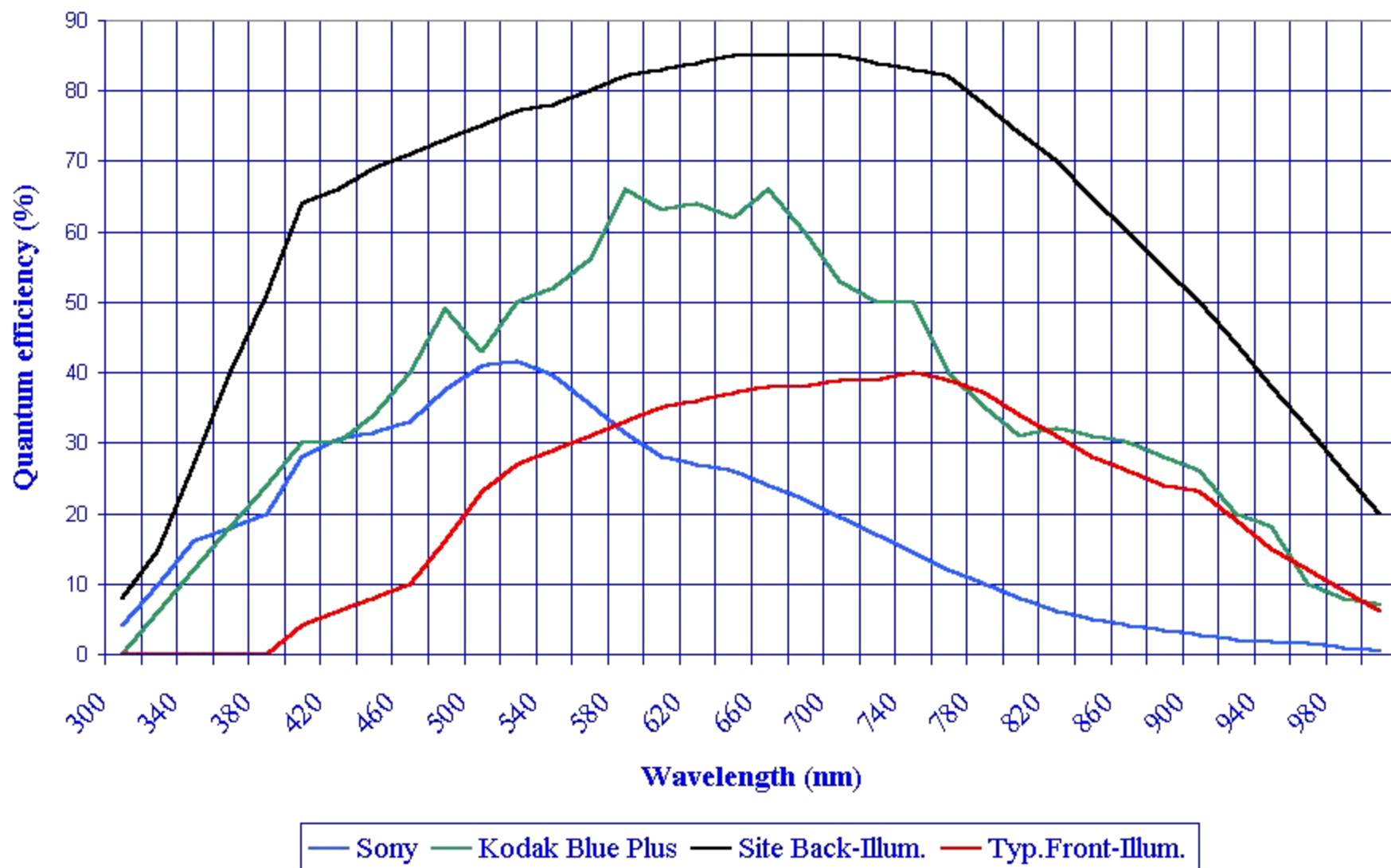


Η συμπεριφορά της CCD είναι (σχεδόν τέλεια) γραμμική

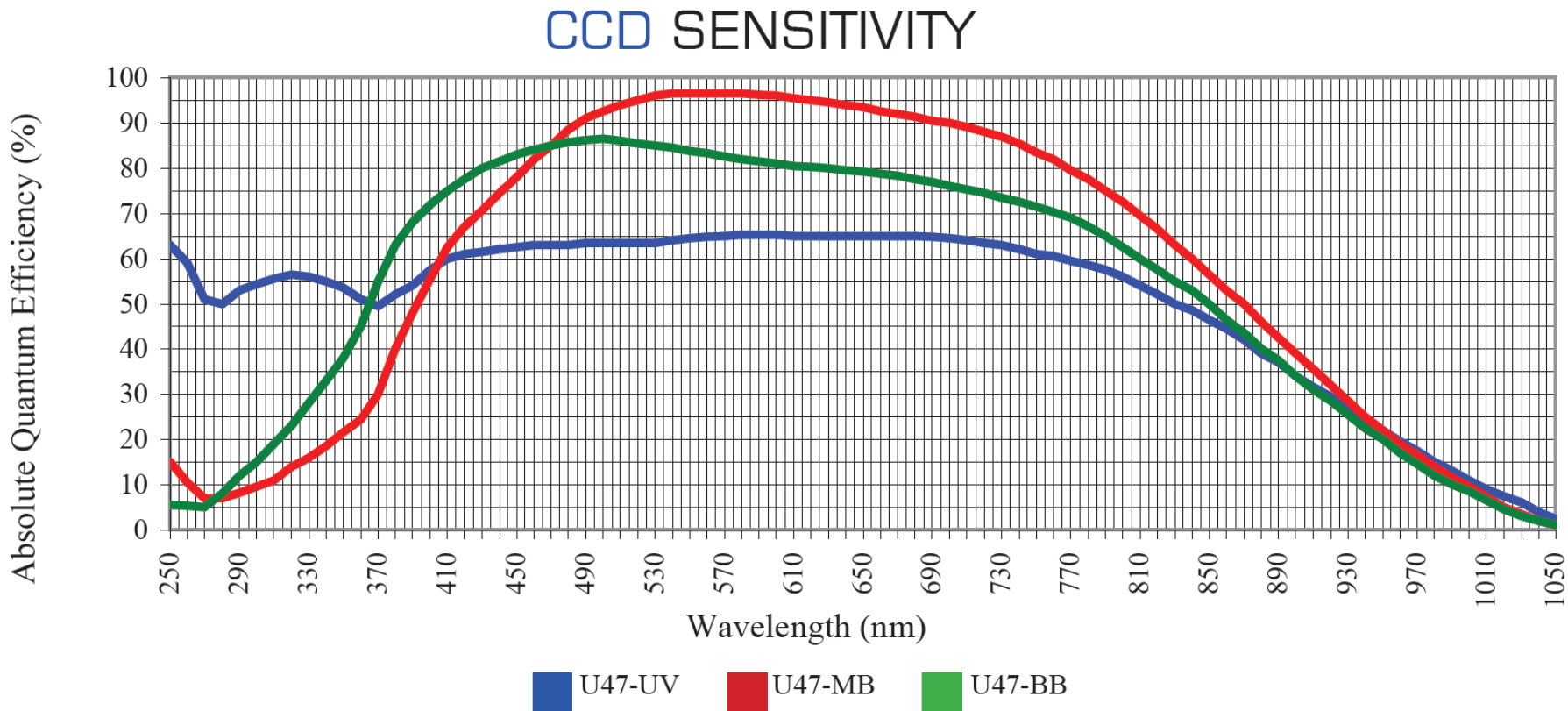


Κβαντική απόδοση των CCD

CCD Sensitivity



Κβαντική απόδοση των CCD



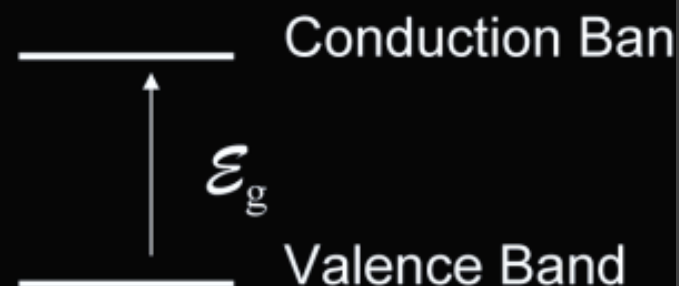
For an electron to be excited from the conduction band to the valence band

$$h\nu > \mathcal{E}_g$$

h = Planck constant (6.63×10^{-34} Joule•sec)

ν = frequency of light (cycles/sec) = λ/c

$\mathcal{E}_g$ = energy gap of material (electron-volts)

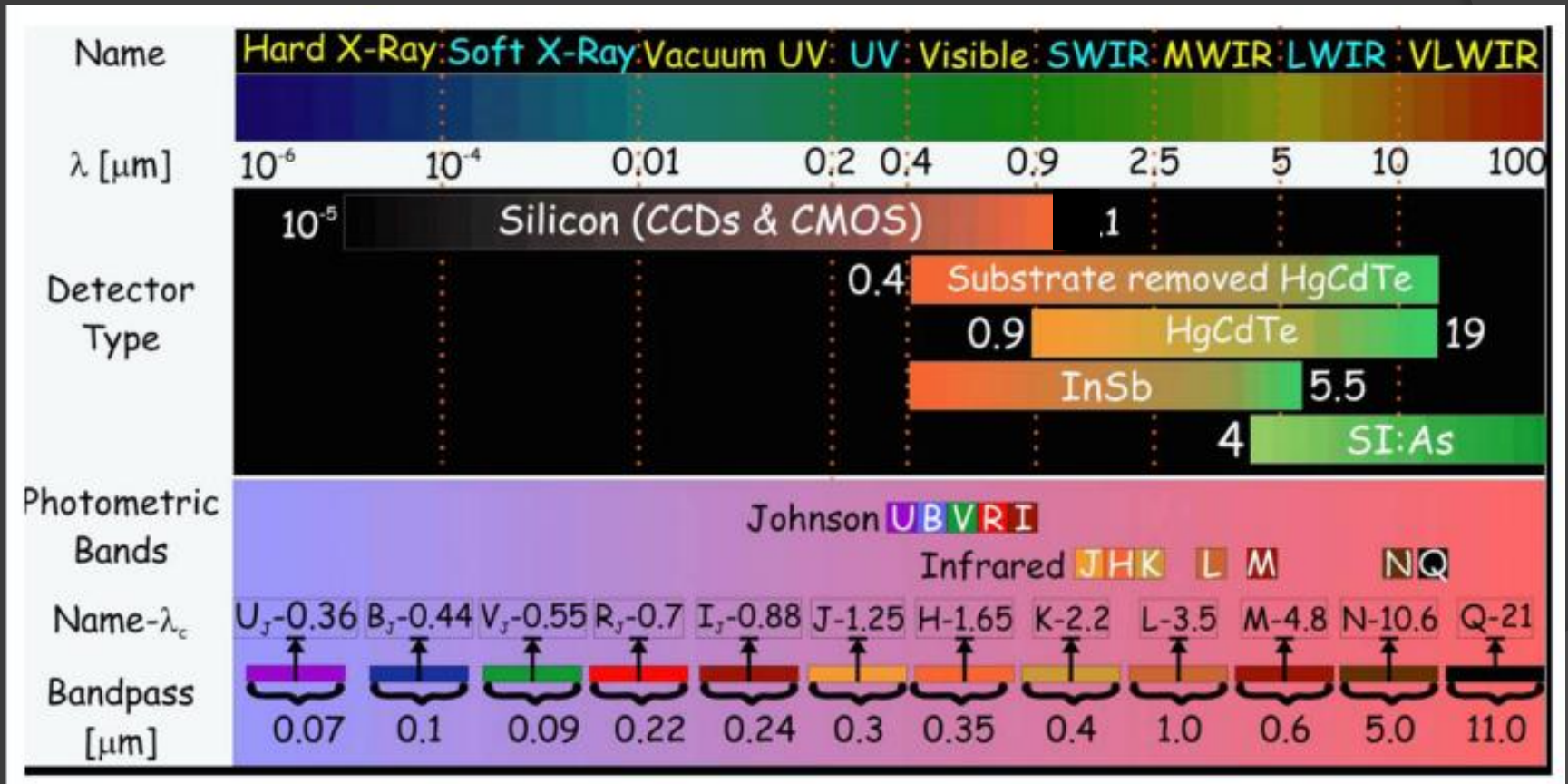


$$\lambda_c = 1.238 / \mathcal{E}_g \text{ (eV)}$$

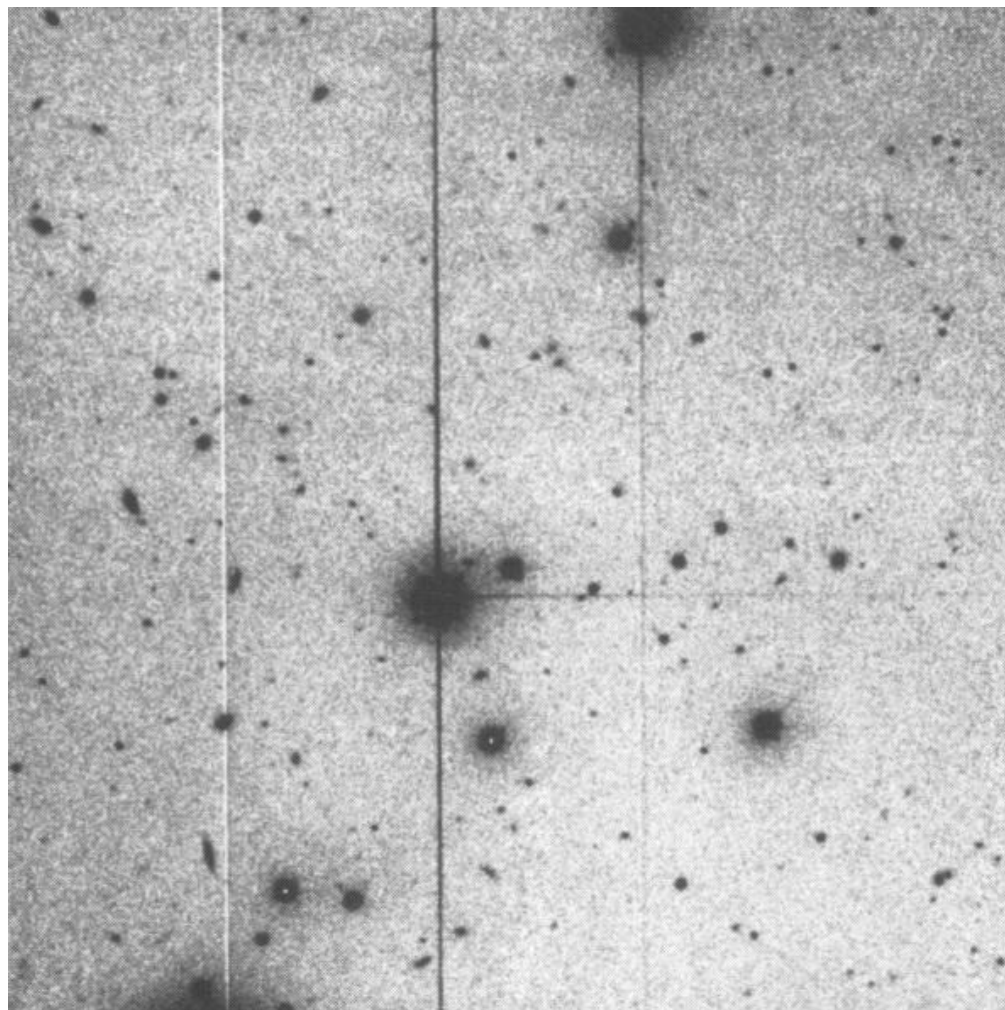
Material Name	Symbol	$\mathcal{E}_g$ (eV)	λ_c (μm)
Silicon	Si	1.12	1.1
Indium-Gallium-Arsenide	InGaAs	0.73 – 0.48	1.68* – 2.6
Mer-Cad-Tel	HgCdTe	1.00 – 0.07	1.24 – 18
Indium Antimonide	InSb	0.23	5.5
Arsenic doped Silicon	Si:As	0.05	25

IR detectors work with the same principle, but with crystals that are a lot more expensive than Silicon

Τα chip των CCD κατασκευάζονται από ημιαγώγιμα υλικά



Μια εικόνα CCD έχει αρκετά “ελαττώματα”





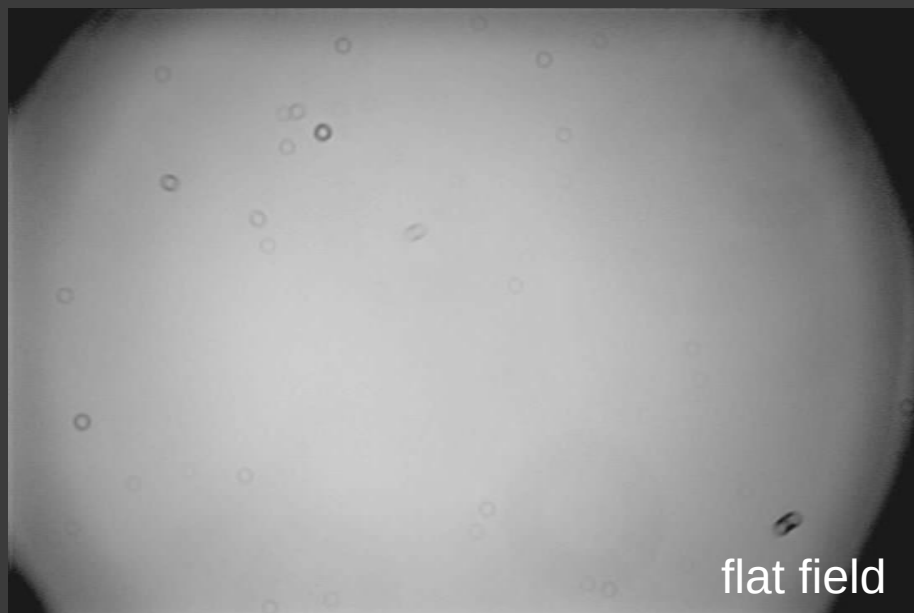
μιόνια, ηλεκτρόνια και διάχυτα ίχνη φωτοϊονισμού



αρχική εικόνα (χωρίς διορθώσεις)



τελική εικόνα (μετά τις διορθώσεις)



flat field



sky image



bias frame



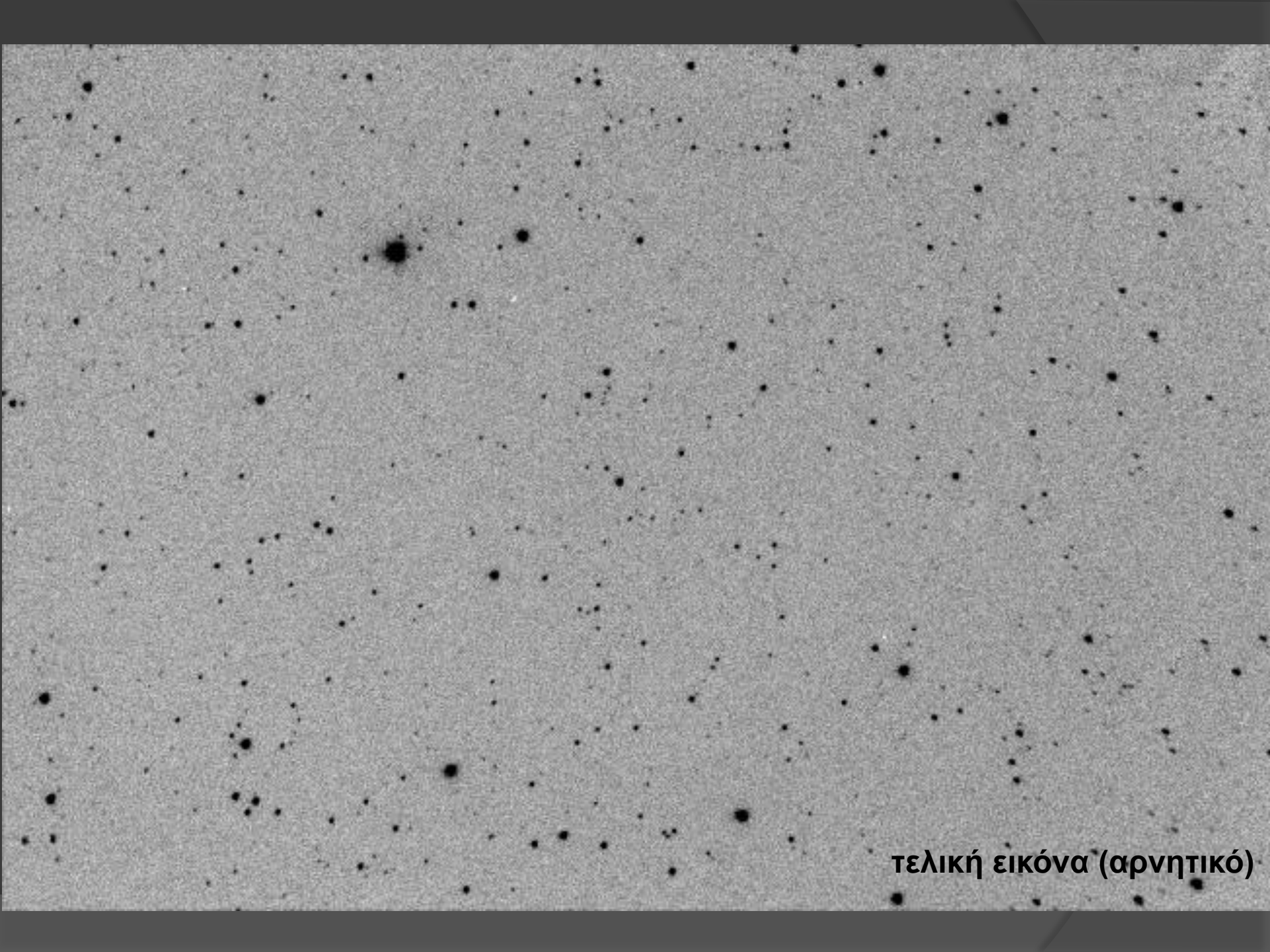
dark frame



αρχική εικόνα

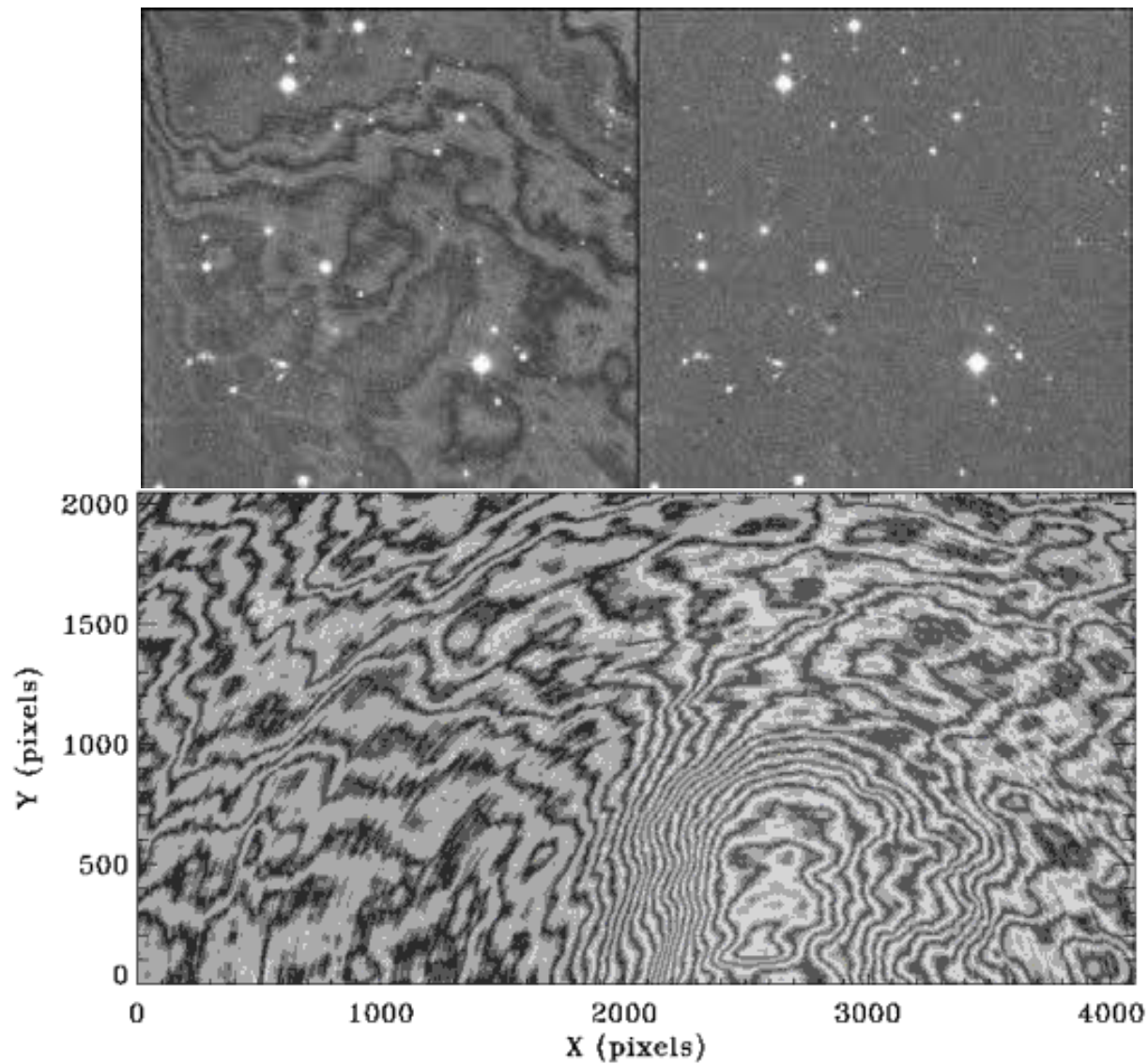


τελική εικόνα



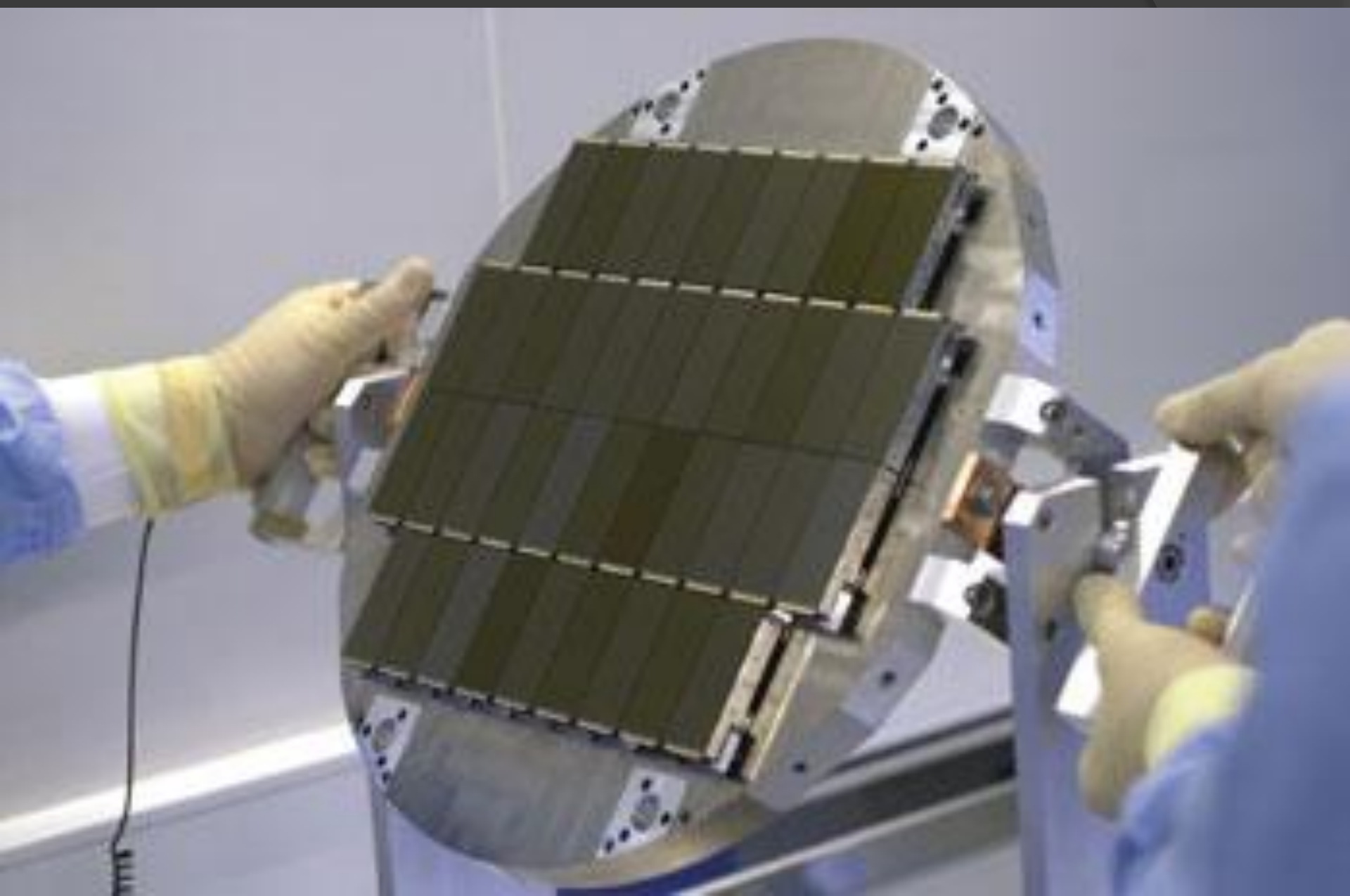
τελική εικόνα (αρνητικό)

Εμφάνιση ανεπιθύμητων κροσσών συμβολής

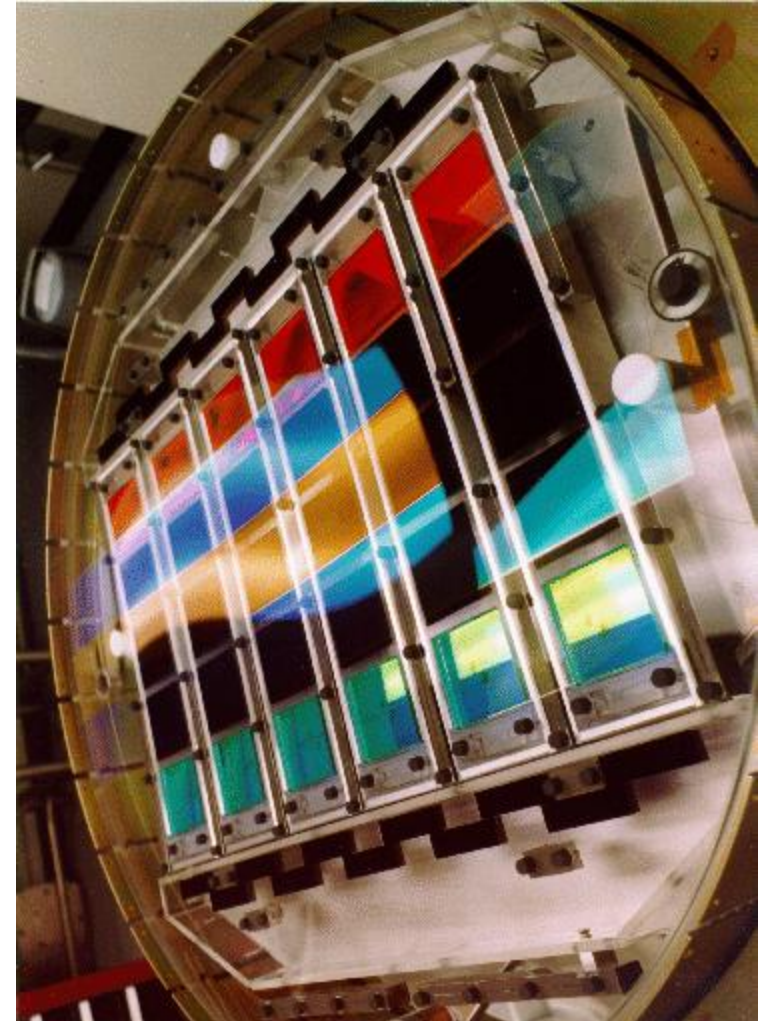
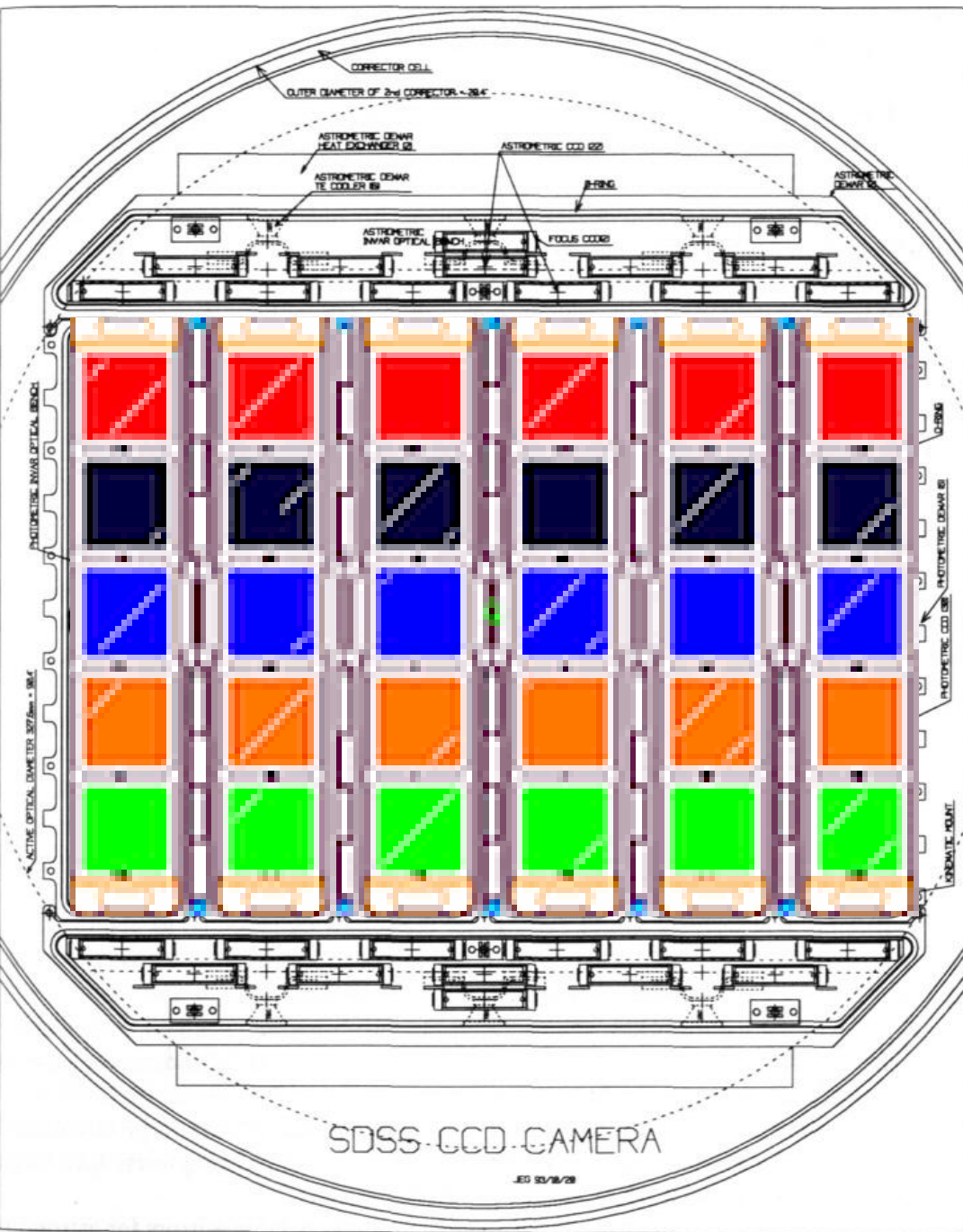


Μωσαϊκά με CCD

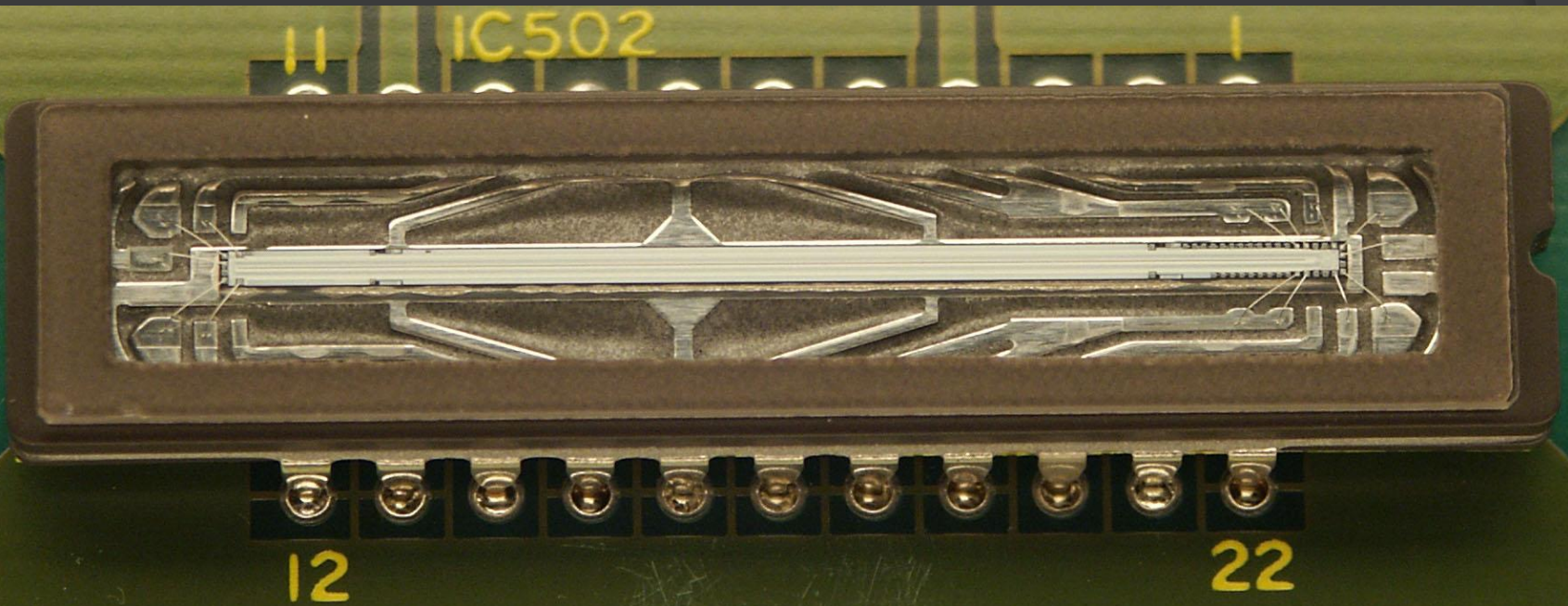
- Για την αύξηση του οπτικού πεδίου η τεχνολογία των CCD προσπαθεί να κατασκευάσει ολοένα και μεγαλύτερα chip.
- Παρόλα αυτά υπάρχουν κατασκευαστικοί περιορισμοί.
- Η λύση σε αυτό το πρόβλημα προέρχεται με μια συστοιχία πολλών chip (CCD mosaic).
- Ο κάθε **συνδυασμός τηλεσκοπίου** (διάμετρος και εστιακή απόσταση) **και ψηφιακού ανιχνευτή** (διαστάσεις chip και μέγεθος pixel) προσφέρεται για διαφορετική χρήση (υψηλές μεγεθύνσεις, μεγάλο οπτικό πεδίο ή για άλλες ειδικές χρήσεις όπως η φασματοσκοπία κ.α.)



Μεγάλο μωσαϊκό CCD
για την κάμερα
επισκόπησης SDSS



Μονοδιάστατο CCD chip για φασματοσκοπία

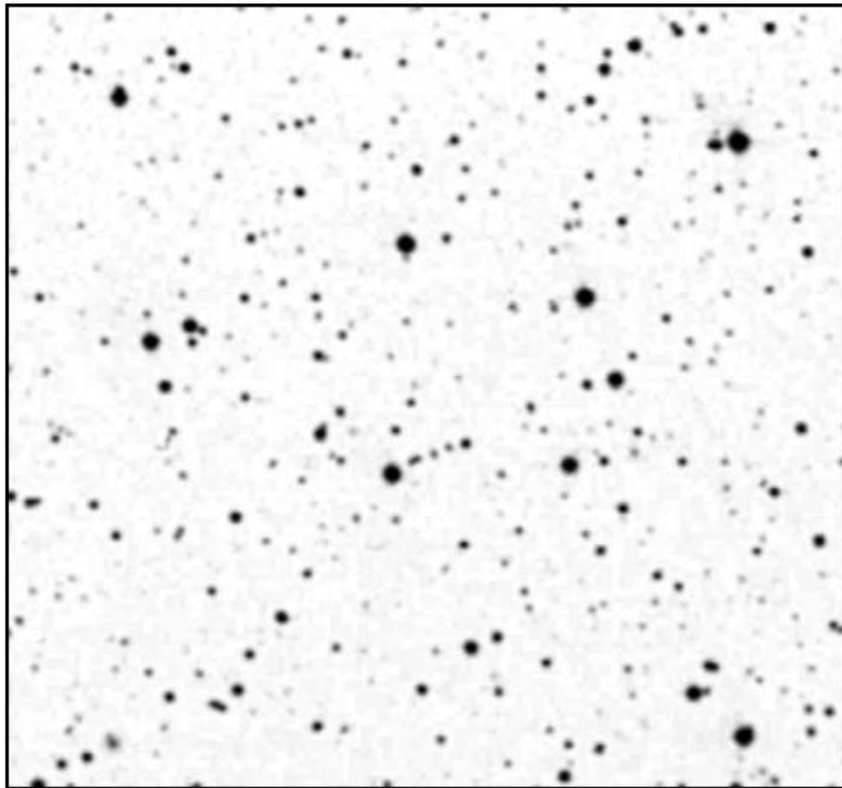


Παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η απεικόνιση με CCD

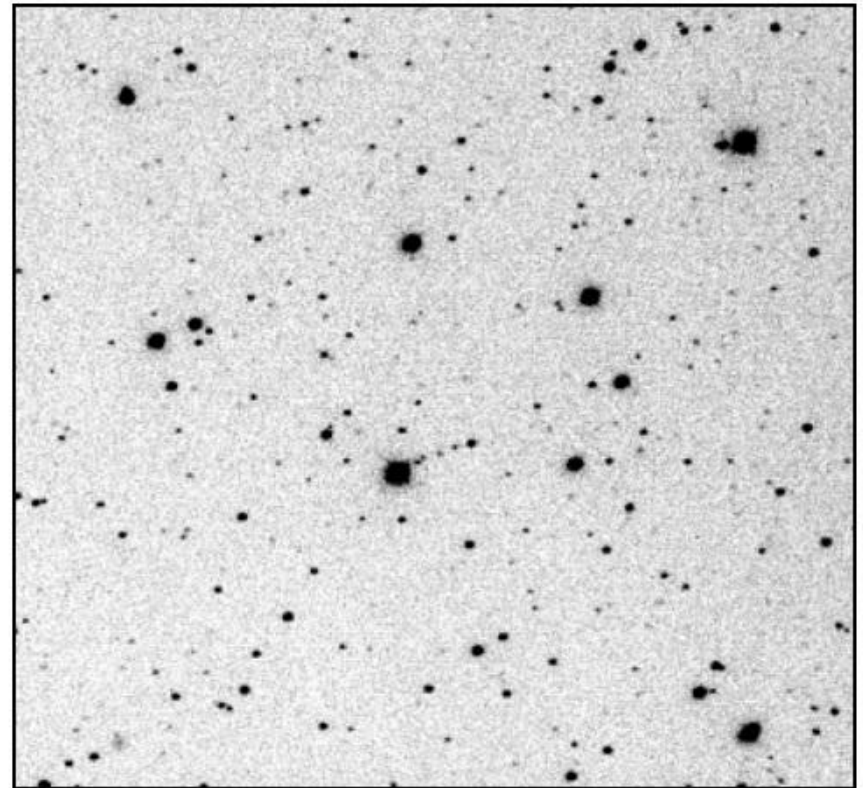
- Στο διάστημα όλα είναι σκοτεινά
- Το φως από τις πηγές στον ουρανό είναι ελάχιστο
- Οι ανιχνευτές πρέπει να είναι ευαίσθητοι και με μεγάλο φασματικό εύρος
- Χρειάζεται ψύξη για ελάττωση του θερμικού θορύβου
- Χρειάζονται φίλτρα και συστήματα φίλτρων για την πληροφορία χρώματος
- Απαραίτητη η διόρθωση και η επεξεργασία των εικόνων (Bias-Dark-Flat Frames)
- Τεχνικά χαρακτηριστικά των CCD (Back illuminated – Front Illuminated)
- Αποφυγή ανεπιθύμητων παραγόντων (Fringing)

Χαρακτηριστικά των CCD

- Μεγάλη κβαντική απόδοση (quantum efficiency ~ 98%)
- Γραμμική απόκριση στο φωτεινό ερέθισμα (linearity > 0.999)
- Ευρύ φασματικό εύρος (spectral range: 200nm – 1200nm)
- Μεγάλο δυναμικό εύρος (dynamic range: 16-bit)
- Η διακριτική ικανότητα εξαρτάται από το μέγεθος των pixels
- Ευκολία στην επεξεργασία και ανάλυση με Η/Υ, εφόσον οι εικόνες επεξεργάζονται σαν μαθηματικοί πίνακες.



ESO Digital Sky Survey
3600sec 103-E filter Exposure
120cm Schmidt Camera with
photographic plates



University of Athens Observatory
180sec I-filter Exposure
40cm f/8 Cassegrain with CCD

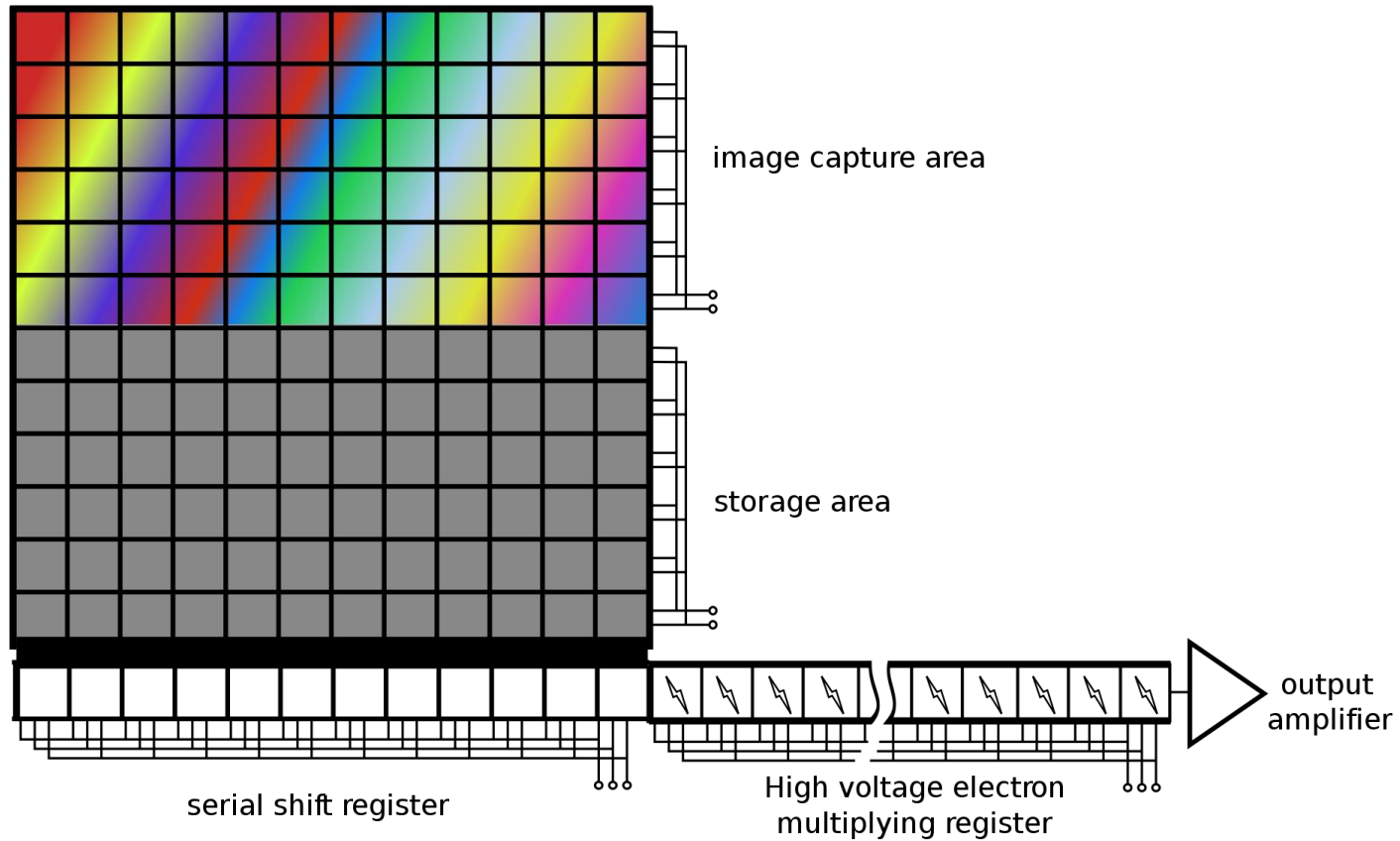
Σύγκριση μεταξύ CCD και φωτοπολλαπλασιαστή.

Φωτοπολλαπλασιαστής	CCD
Δεν είναι δυνατή η ταυτόχρονη μέτρηση του αντικειμένου και του γειτονικού ουρανού	Μπορεί να γίνει ταυτόχρονη μέτρηση του αντικειμένου και του υποβάθρου του ουρανού
Είναι δύσκολη η βαθμονόμηση των διαφορών στην απόκριση πάνω στην επιφάνεια της φωτοκαθόδου	Οι διαφορές στην απόκριση πάνω στην επιφάνεια του CCD μπορούν να βαθμονομηθούν με τη χρήση του Flat Field
Είναι δύσκολη η απομόνωση του σήματος που προέρχεται από τις κοσμικές ακτίνες	Μπορεί εύκολα να γίνει διόρθωση για σήματα προερχόμενα από κοσμικές ακτίνες
Δεν υπάρχει πληροφορία για χωρική κατανομή του παρατηρούμενου αντικειμένου	Μπορούν εύκολα να ξεχωριστούν οι πηγές η μία από την άλλη
Μόνο ένα αντικείμενο μπορεί να παρατηρηθεί κάθε φορά	Όλα τα αντικείμενα που υπάρχουν στο πεδίο μπορούν να παρατηρηθούν ταυτόχρονα και κάτω από τις ίδιες ατμοσφαιρικές συνθήκες
Το «κεντράρισμα» του αντικειμένου στο διάφραγμα είναι πάντοτε υποκειμενικό	Το «κεντράρισμα» είναι αντικειμενικό
Οι μετρήσεις που γίνονται με μικρό διάφραγμα μπορεί να εμπεριέχουν σφάλματα όταν το seeing είναι πολύ μεγάλο	Το αντικείμενο συνεχώς φωτίζει τον ανιχνευτή ακόμη και με μεγάλο seeing

ICCD και EMCCD

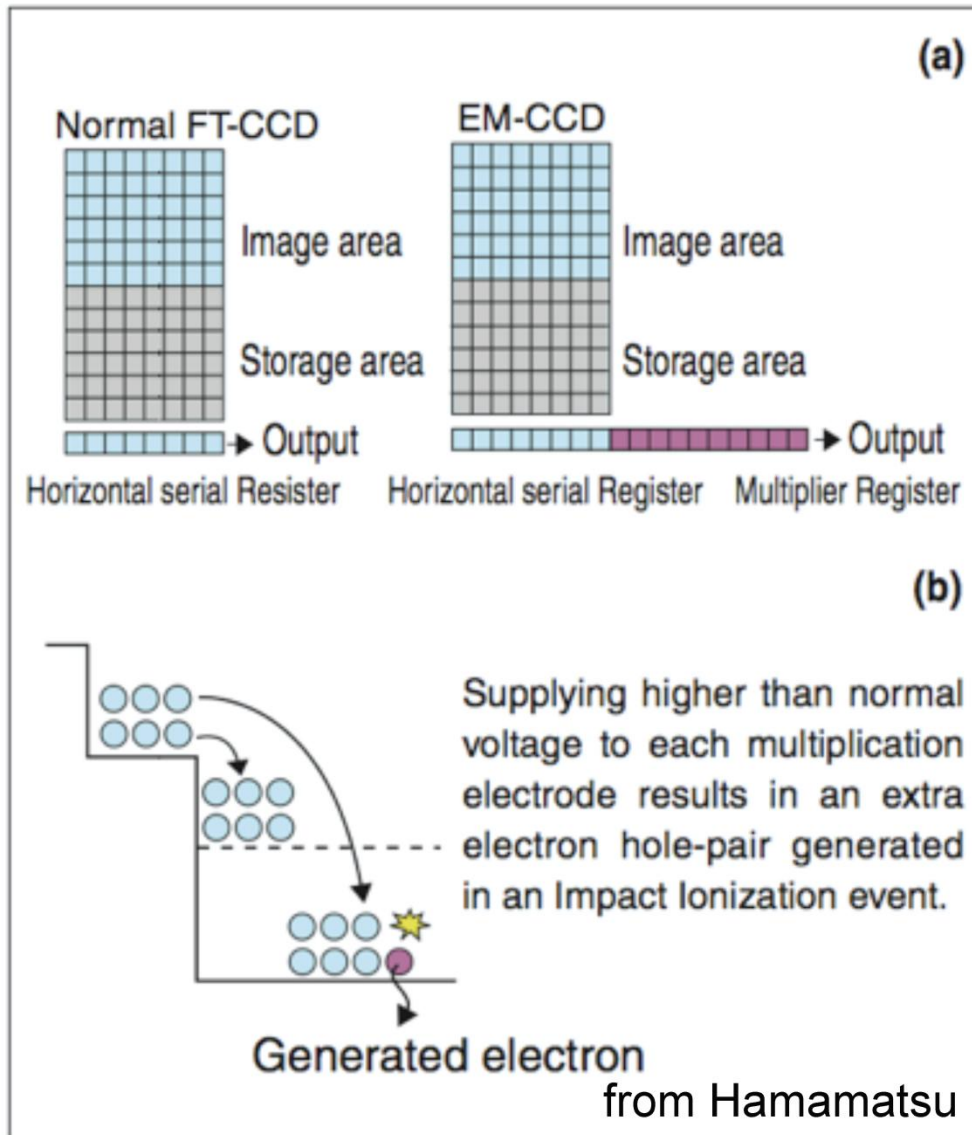
- Η ολοένα και πιο έντονη προσπάθεια επίτευξης ενός πολύ αποδοτικού ανιχνευτή οδήγησε στη δημιουργία του αισθητήρα ICCD (Intensified CCD), ο οποίος είναι ένας αισθητήρας CCD με έναν επιπλέον ενισχυτή. Μια κάμερα ICCD έδινε αρκετή ενίσχυση στο σήμα, αλλά και ο θόρυβός της ήταν μεγάλος.
- Τα τελευταία χρόνια οι EMCCD (Electron Multiplying CCD) διαδόθηκαν αρκετά στην αγορά, με αποτέλεσμα την ολοένα και ευρύτερη χρήση τους. Σύντομα άρχισαν να ανταγωνίζονται και τις ICCD. Ειδικά σε περιπτώσεις χαμηλού σήματος (π.χ. χρήση στην αστρονομία) οι EMCCD έχουν αποδειχτεί ανώτερες των ICCD.
- Οι EMCCD χρησιμοποιούνται κυρίως σαν ταχείας λήψης κάμερες με μεγάλη ευαισθησία και βρίσκουν εφαρμογές σε παρατηρήσεις ταχέως εξελισσόμενων φαινομένων, όπως είναι οι επιπροσθήσεις, οι διαβάσεις και οι εκλείψεις.

Η αρχιτεκτονική των FT-EMCCD*



* *Frame Transfer – Electron Multiplying CCD*

EMCCDs : CCDs with charge multiplication



Η τεχνολογία των EMCCD είναι ακόμη πολύ νέα.

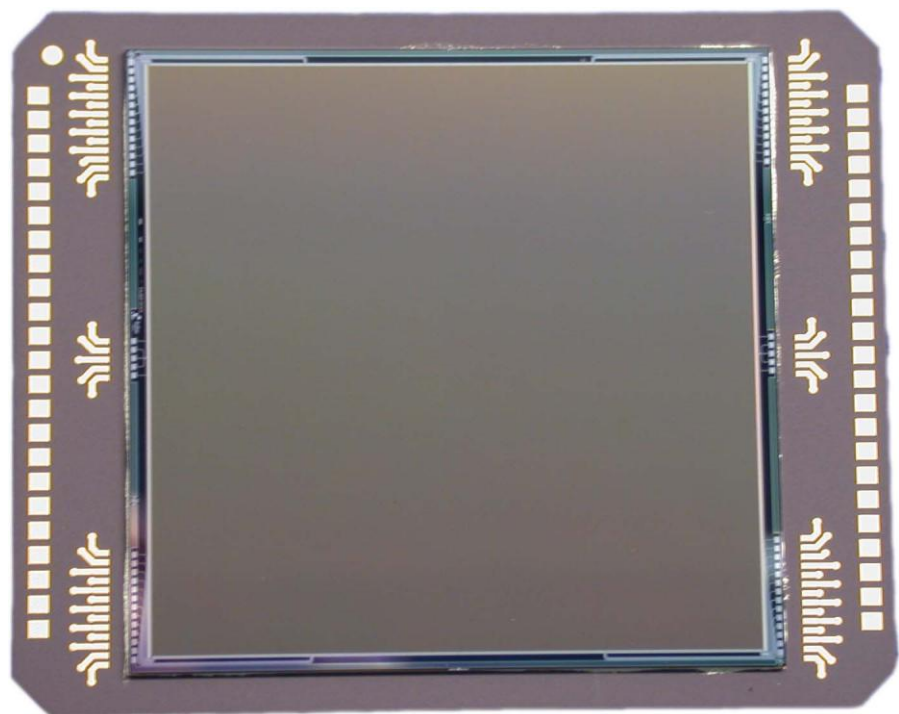
Επιτυγχάνεται ενίσχυση (gain) της τάξης του 10-1000.

Σε περιπτώσεις υψηλού σήματος η ενίσχυση δεν είναι σταθερή (ακόμη και μεγαλύτερη του θορύβου Poisson) με αποτέλεσμα το μικρότερο λόγο S/N.

Επιτυγχάνεται ανανέωση εικόνας με συχνότητα ακόμη και 1 kHz.

Πρόσφατα ανακοινώθηκε ότι οι αισθητήρες αυτοί γηράσκουν με αποτέλεσμα την αλλοίωση των χαρακτηριστικών τους.

Δεν επιτυγχάνουν απεικόνιση υψηλής ανάλυσης.



CMOS IMAGE SENSOR

(Complementary Metal-Oxide Semiconductor)

- Αντίστοιχες διατάξεις είναι και οι CMOS. Η λογική είναι η ίδια με αυτή της CCD, με τη διαφορά στα ηλεκτρονικά τους.
- Αντίστοιχα λειτουργούν άλλωστε και οι ICCD (Intensified CCD), EMCCD (Electron Multiplying CCD), APS (Active Pixel Sensors)
- Μια κοινή ψηφιακή φωτογραφική μηχανή σήμερα έχει στο εστιακό επίπεδο (στη θέση του φιλμ) ένα CCD chip, ενώ οι πιο σύγχρονες μηχανές έχουν ένα CMOS chip.

CMOS IMAGE SENSOR

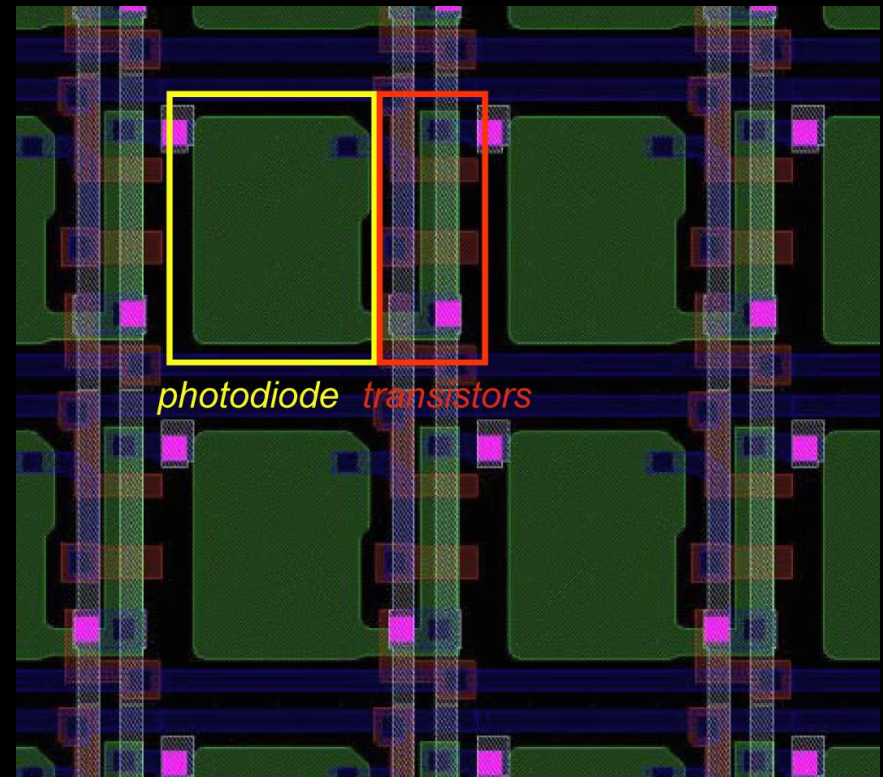
(Complementary Metal-Oxide Semiconductor)

- Οι ψηφιακές κάμερες έχουν πλέον κατακλύσει την αγορά και η τιμή τους ολοένα και μειώνεται.
- Ο βασικός λόγος της μείωσης του κόστους παραγωγής είναι η τεχνολογία CMOS που επέτρεψε την πολύ φθηνότερη κατασκευή αισθητήρων.
- Τόσο οι CCD όσο και οι CMOS αισθητήρες βασίζονται στο ίδιο σκεπτικό με κοινό στόχο τη μετατροπή του αναλογικού φωτεινού ερεθίσματος σε ψηφιακό ηλεκτρονικό σήμα.
- Το επόμενο βήμα της διαδικασίας απεικόνισης είναι η ανάγνωση της τιμής του σήματος αυτού σε κάθε επιμέρους στοιχείο της επιφάνειας. Αυτό γίνεται συνήθως με τη μεταφορά των φορτίων από γραμμή σε γραμμή και από στήλη σε στήλη και η τελική έξοδος του σήματος από μια γωνία του chip.
- Ένας μετατροπέας αναλογικού-ψηφιακού σήματος (analog to digital converter) αναλαμβάνει να μετατρέψει το ηλεκτρονικό σήμα σε ψηφιακές μονάδες. Στα CMOS υπάρχουν αρκετά transistors σε κάθε pixel, τα οποία ενισχύουν το σήμα και το μεταφέρουν με συμβατικά καλώδια έξω από το chip. Έτσι, τα CMOS είναι πιο «ευέλικτα», εφόσον κάθε pixel μπορεί να «διαβαστεί» σαν ανεξάρτητη και μεμονωμένη οντότητα.

CMOS IMAGE SENSOR

(Complementary Metal-Oxide Semiconductor)

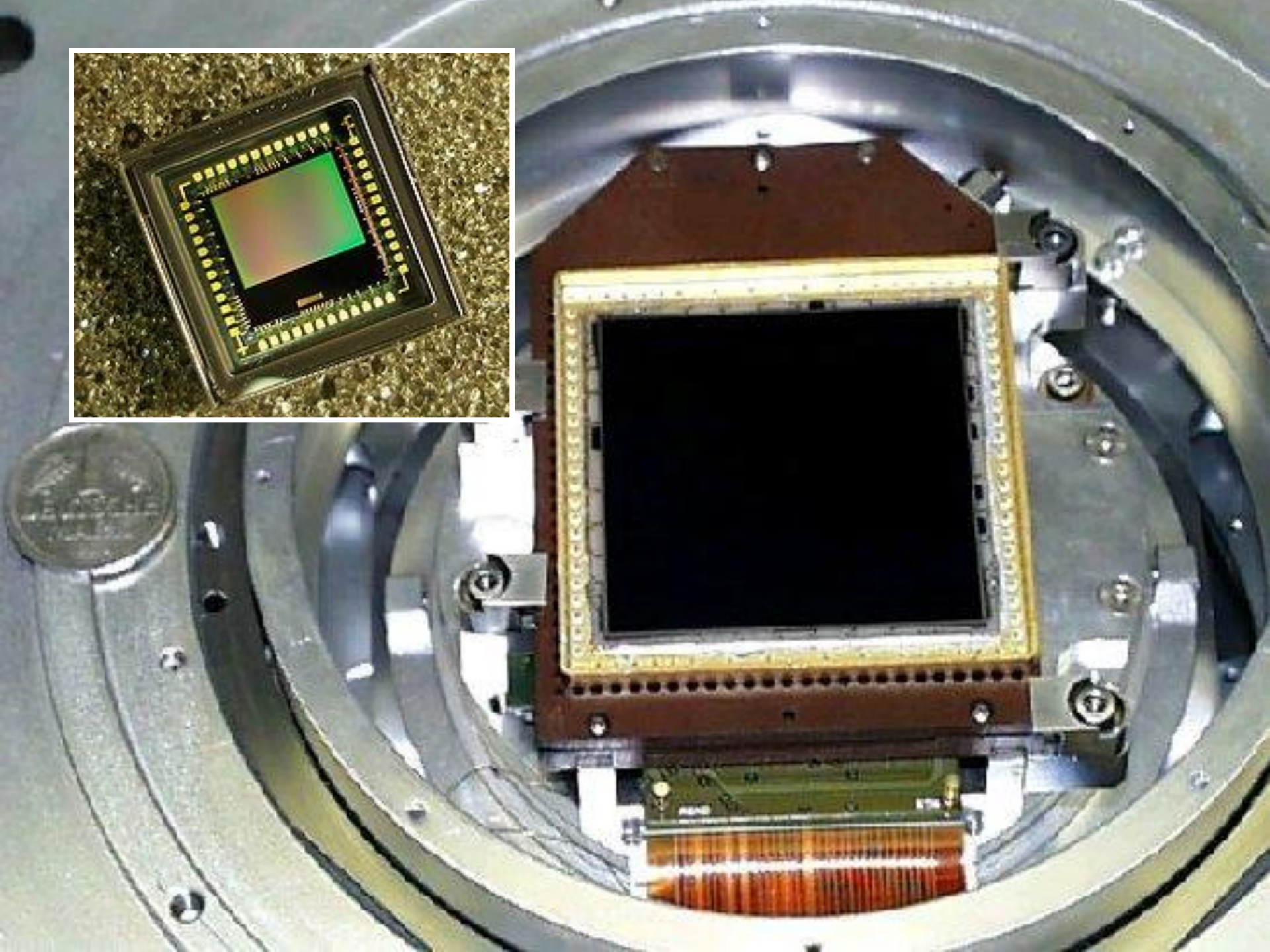
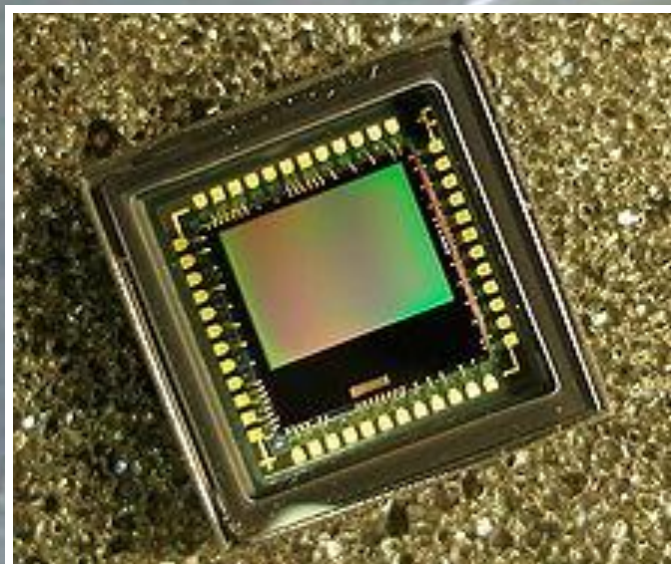
- Οι CCD χρησιμοποιούν ορθογώνια μέθοδο ανάγνωσης των pixels με αποτέλεσμα μια εικόνα υψηλής ποιότητας, ευαισθησίας και αξιοπιστίας. Αντιθέτως, οι CMOS χρησιμοποιούν τις συμβατικές μεθόδους ανάγνωσης των pixels μεμονωμένα, όπως ακριβώς και στους μικροεπεξεργαστές. Οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες αποτελούν και τις βασικές διαφορές μεταξύ των δύο αυτών αισθητήρων.
- Οι αισθητήρες CCD έχουν πολύ χαμηλό ηλεκτρονικό θόρυβο, σε αντίθεση με τα CMOS, τα οποία έχουν πολλά transistors δίπλα από κάθε pixel, με αποτέλεσμα να προκαλούν μείωση του φωτεινού ερεθίσματος αλλά και αυξημένο ηλεκτρονικό θόρυβο.

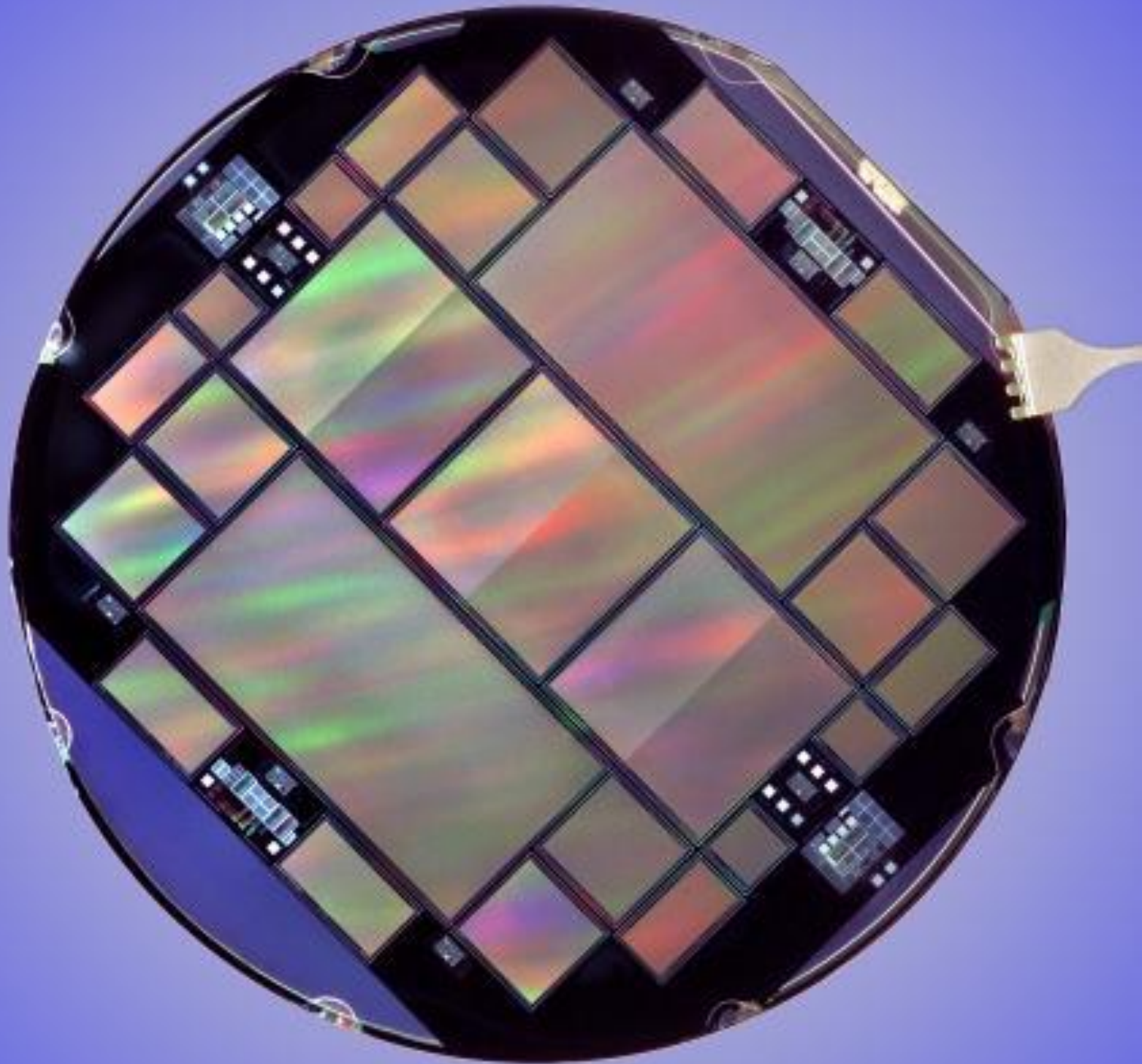


CMOS IMAGE SENSOR

(Complementary Metal-Oxide Semiconductor)

- Οι CMOS καταναλώνουν πολύ λιγότερη ενέργεια σε αντίθεση με τις CCD (η διαφορά μπορεί και να αγγίζει τις 100 φορές) και είναι αξιοσημείωτα φθηνότεροι από τις CCD.
- Οι CMOS έχουν ανεξάρτητα κυκλώματα ανάγνωσης, με αποτέλεσμα την ανεξαρτητοποίηση των pixels μεταξύ τους. Αυτό οδηγεί στην επίλυση του φαινομένου charge bleeding και blooming στις περιπτώσεις του κορεσμού των pixels με φορτίο.
- Οι CCD παράγονται και χρησιμοποιούνται για πολύ περισσότερο χρόνο από ό,τι οι CMOS, οπότε είναι μια ώριμη και πολύ γνωστή τεχνολογία. Αποτέλεσμα αυτής της γνώσης είναι η υψηλότερη ποιότητα των CCD και η δυνατότητα κατασκευής μεγαλύτερων επιφανειών chip.
- Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι η χρήση των CCD σε εφαρμογές που απαιτείται υψηλή ακρίβεια, αξιοπιστία, ποιότητα και ευαισθησία σε μεγάλη επιφάνεια (με περισσότερα pixels). Οι CMOS έχουν μειωμένη ποιότητα, χαμηλότερη ανάλυση και χαμηλότερη ευαισθησία. Η τεχνολογία των CMOS αναπτύσσεται αυτήν την εποχή και έχουν φτάσει σχεδόν την ποιότητα των CCD σε ορισμένες εφαρμογές.





Εφαρμογές CMOS



Web-cam



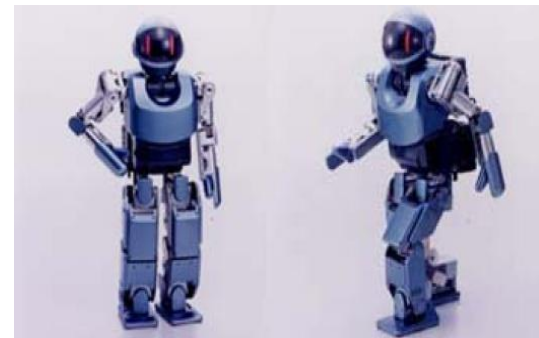
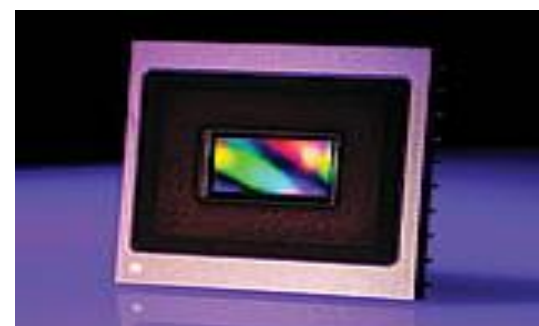
Ψηφιακές
φωτογραφικές
μηχανές



Σε κινητά
τηλέφωνα

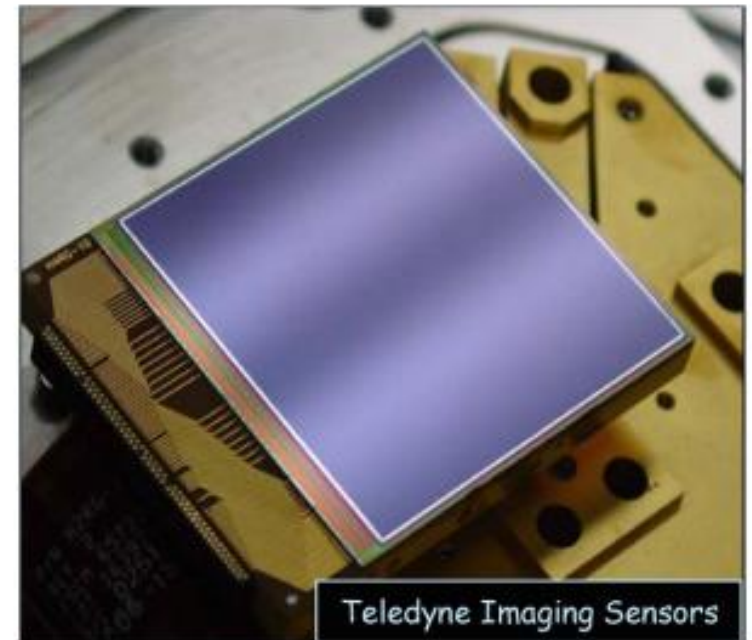
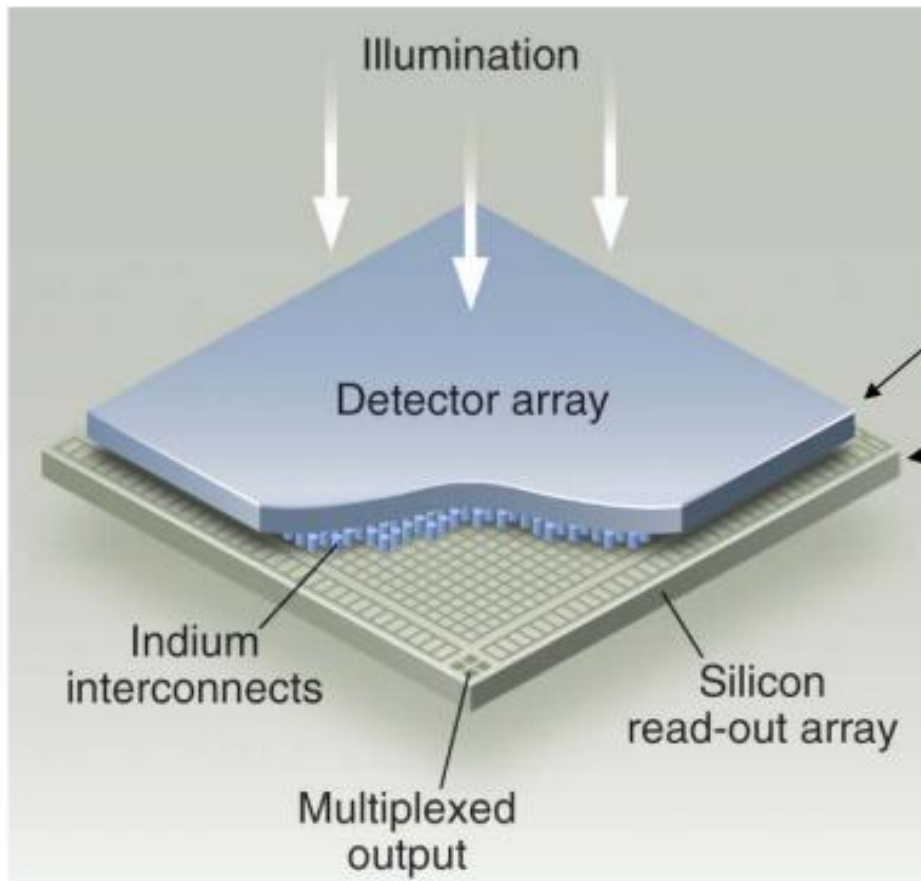


Κάμερες
παρακολούθησης



Μη ορατά μήκη κύματος - Υβριδικά CMOS

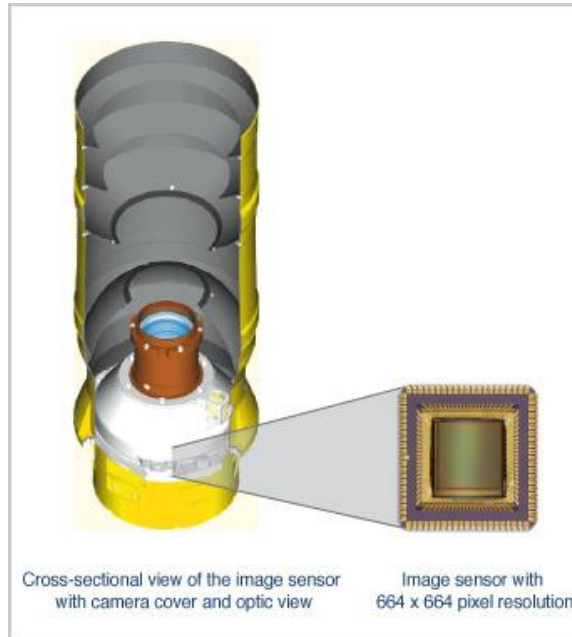
Τοποθέτηση φωτοευαίσθητης επιφάνειας από κατάλληλο υλικό επάνω σε υπόστρωμα πυριτίου και επαφές από αγώγιμο υλικό (συνήθως Ίνδιο - In).



many applications in IR astronomy. Detectors are not Silicon anymore, readout array is still silicon.

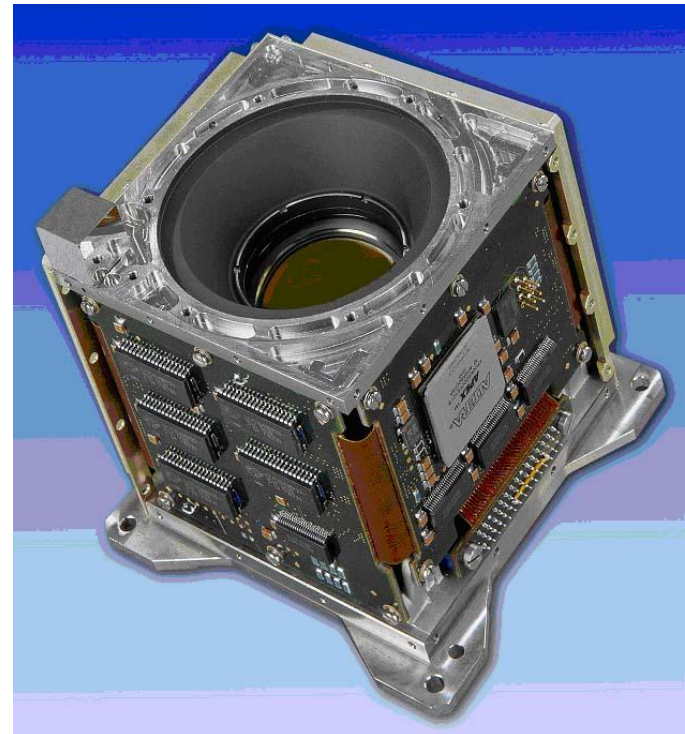
Active Pixel Sensors (APS)

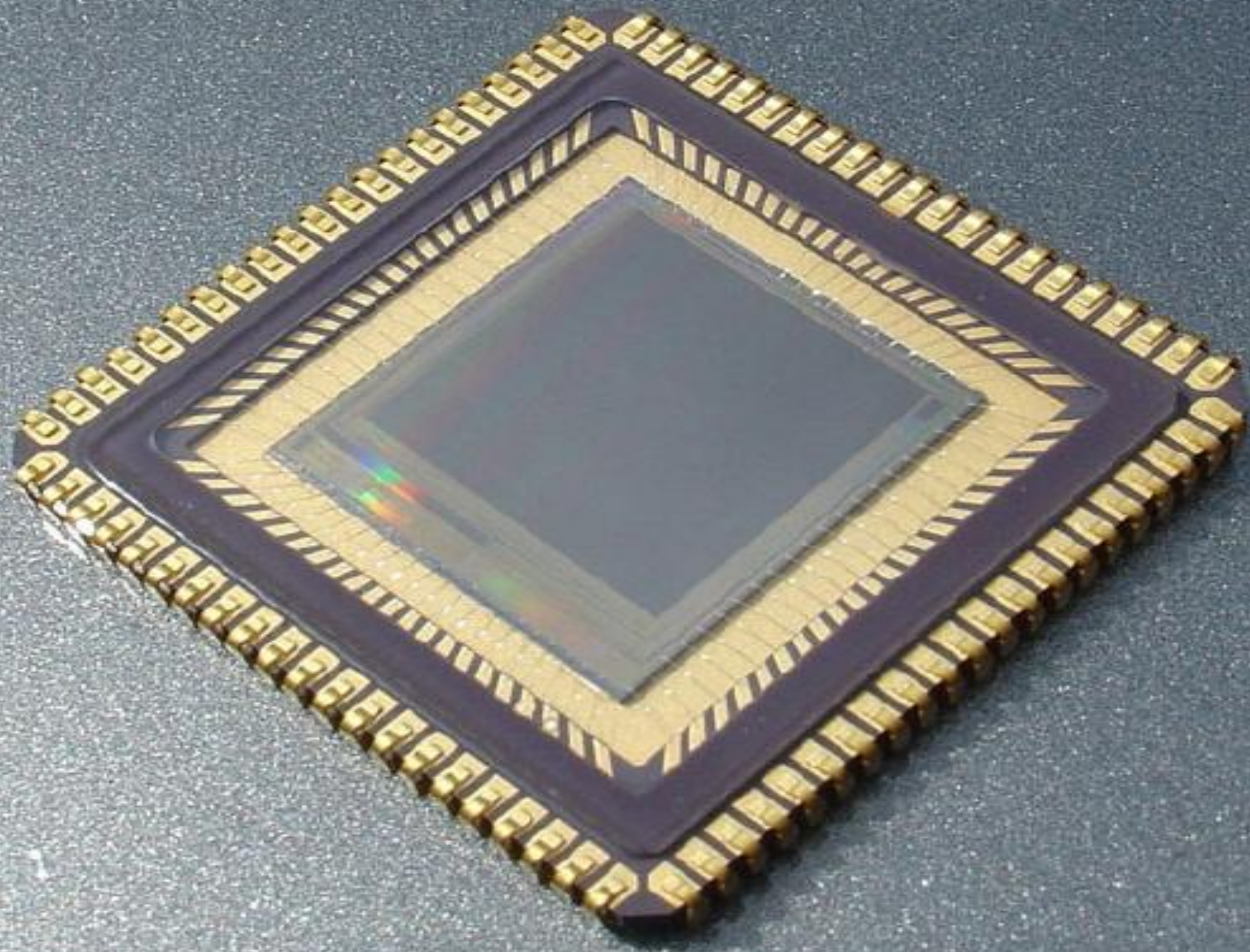
Οι διαστημικές αποστολές (δορυφόροι, διαστημόπλοια κτλ) φέρουν ειδικά όργανα προσανατολισμού με γυροσκόπια, αλλά και ειδικά τηλεσκόπια που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό αστεριών. Αυτά τα όργανα ονομάζονται Star Trackers και χρησιμοποιούν ανιχνευτές APS.



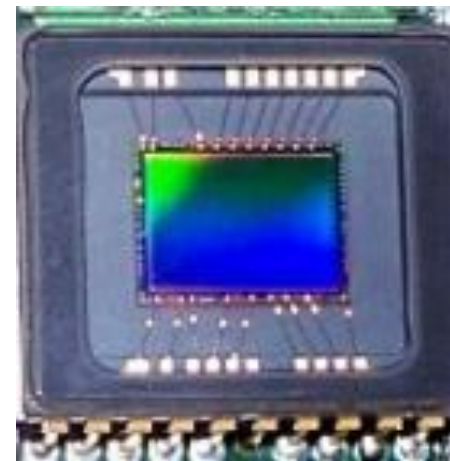
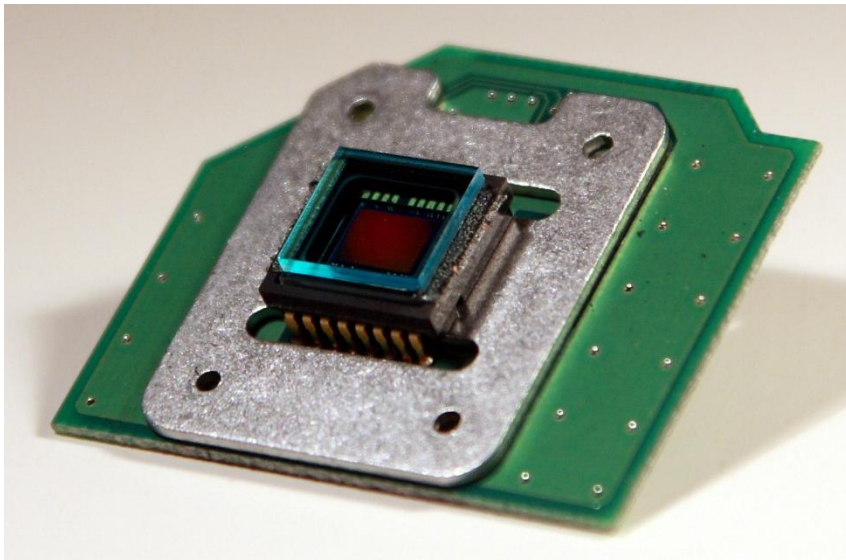
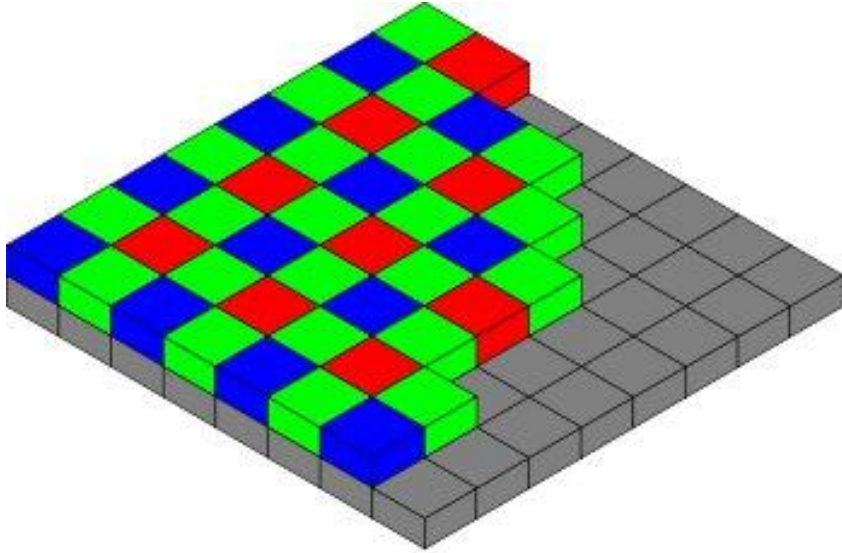
Active Pixel Sensors (APS)

Οι ανιχνευτές με APS βασίζονται στην τεχνολογία των CMOS, ώστε τα pixels να ελέγχονται μεμονωμένα. Η τεχνολογία αυτή δίνει τη δυνατότητα της επικέντρωσης σε συγκεκριμένα pixels (και όχι σε όλο το chip) με αποτέλεσμα την ταχεία επεξεργασία των μετρήσεων και την άμεση απόκριση του ανιχνευτή με σκοπό π.χ. την οδήγηση του σκάφους.

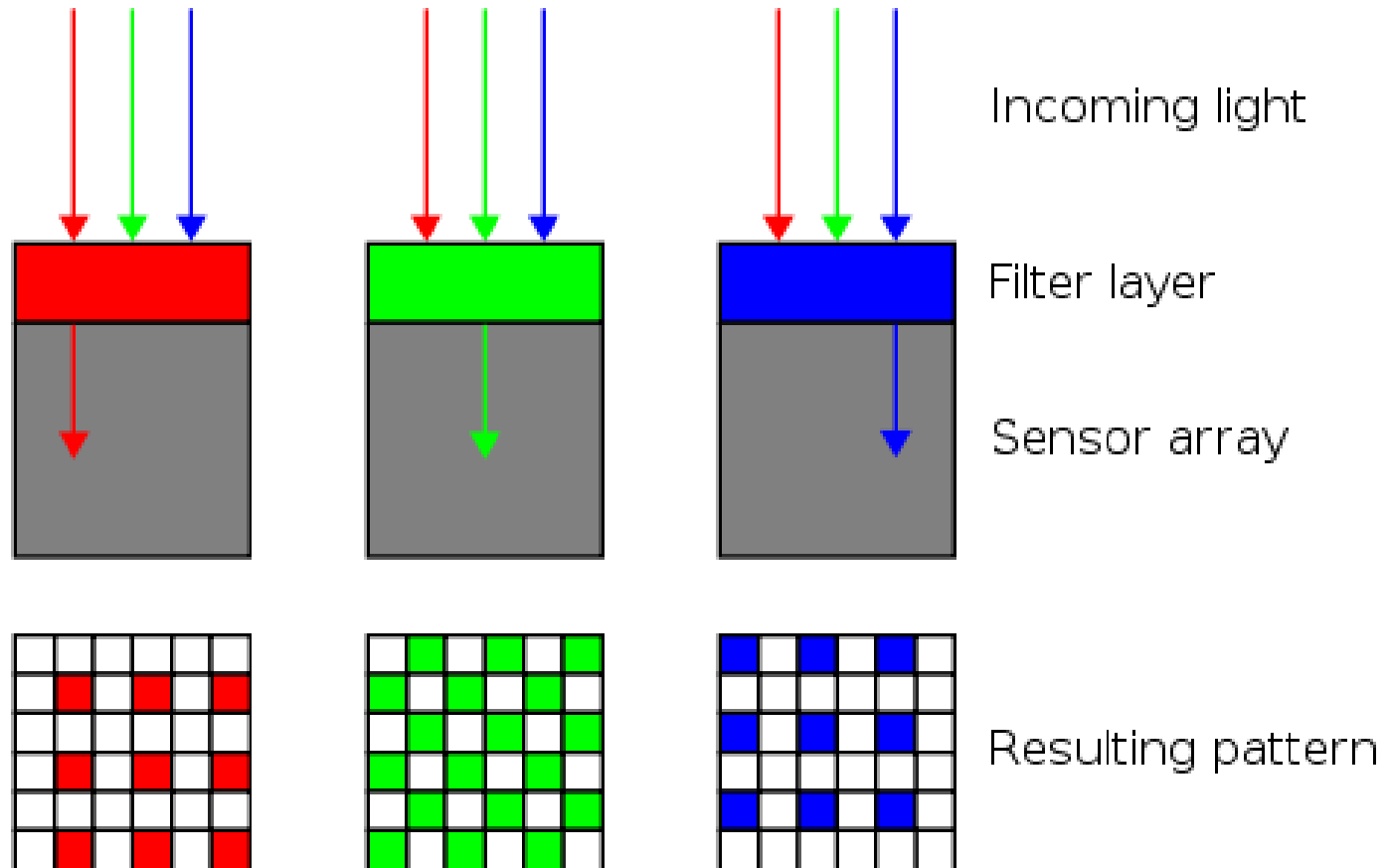


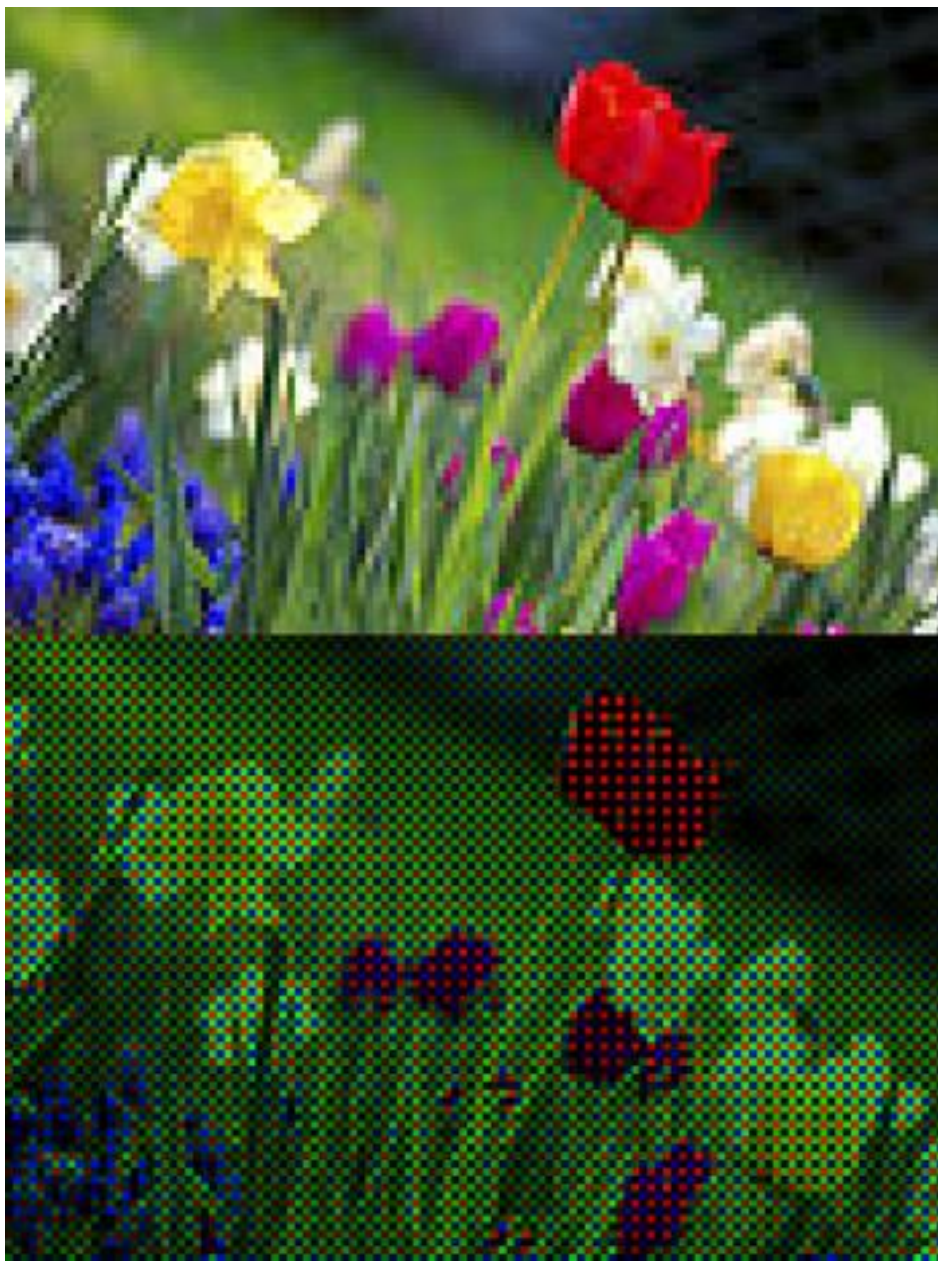


Pixel με έγχρωμα φίλτρα (Bayer Filter Mosaic)



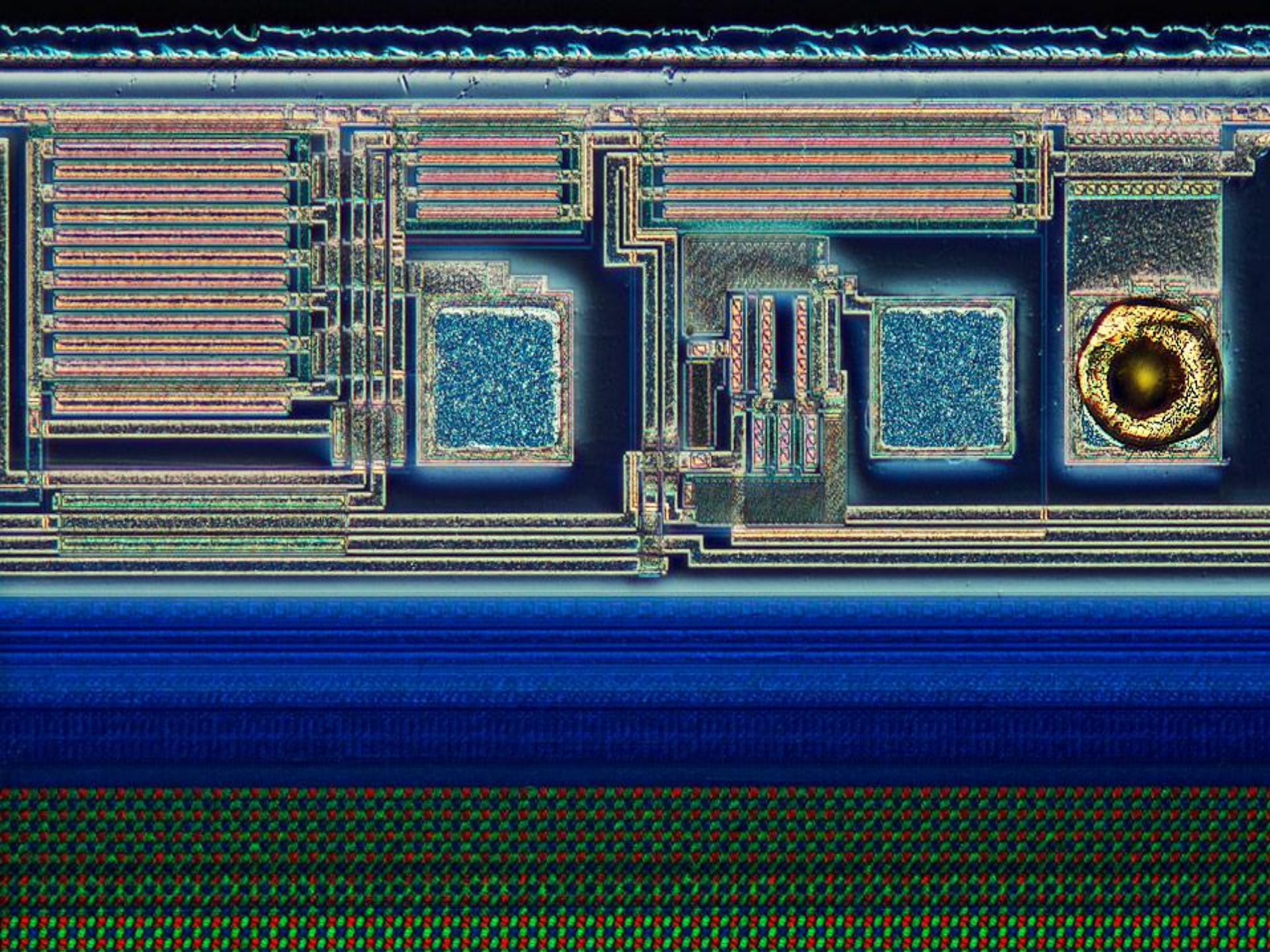
Η τεχνική της έγχρωμης απεικόνισης με CCD

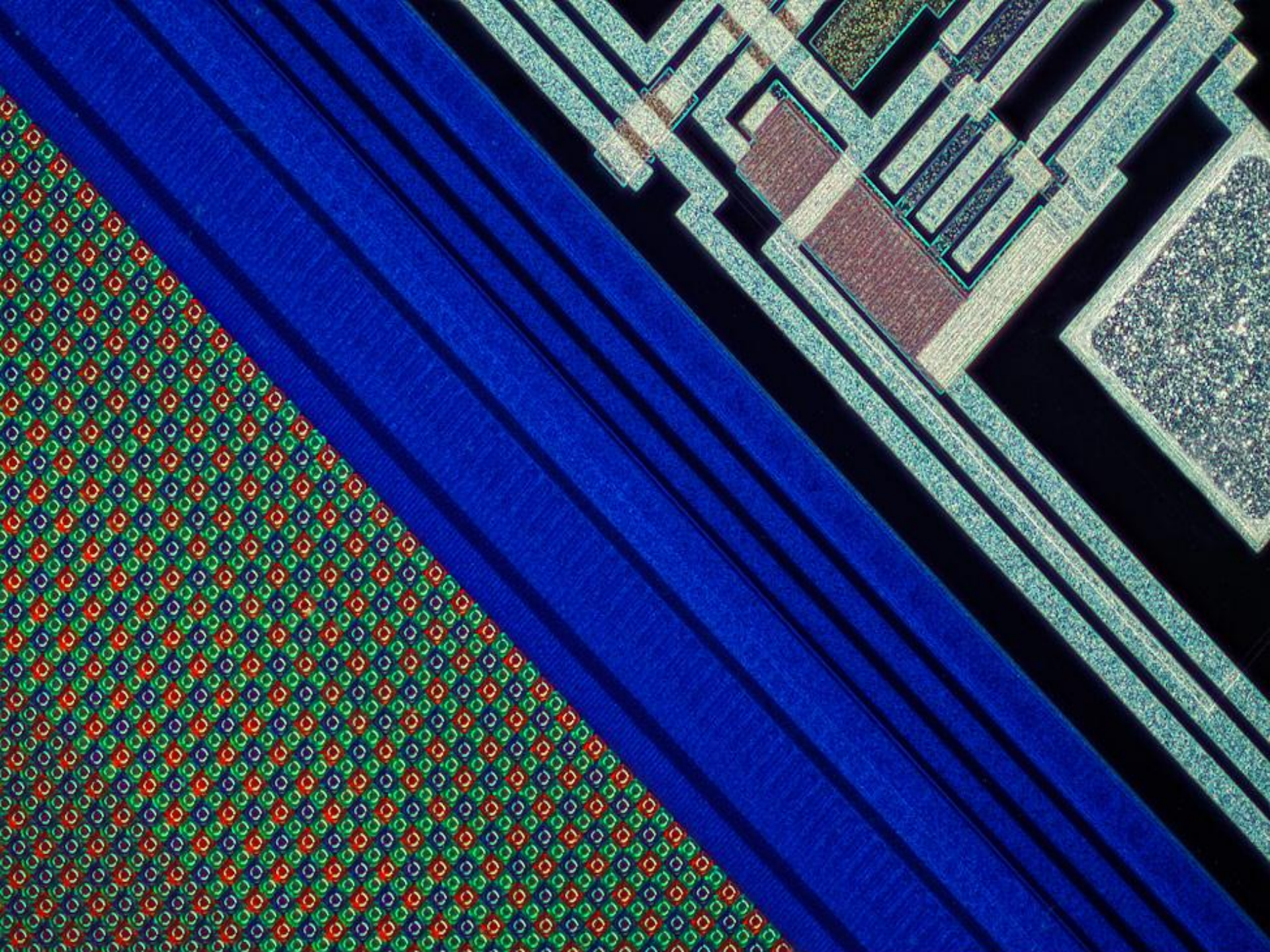


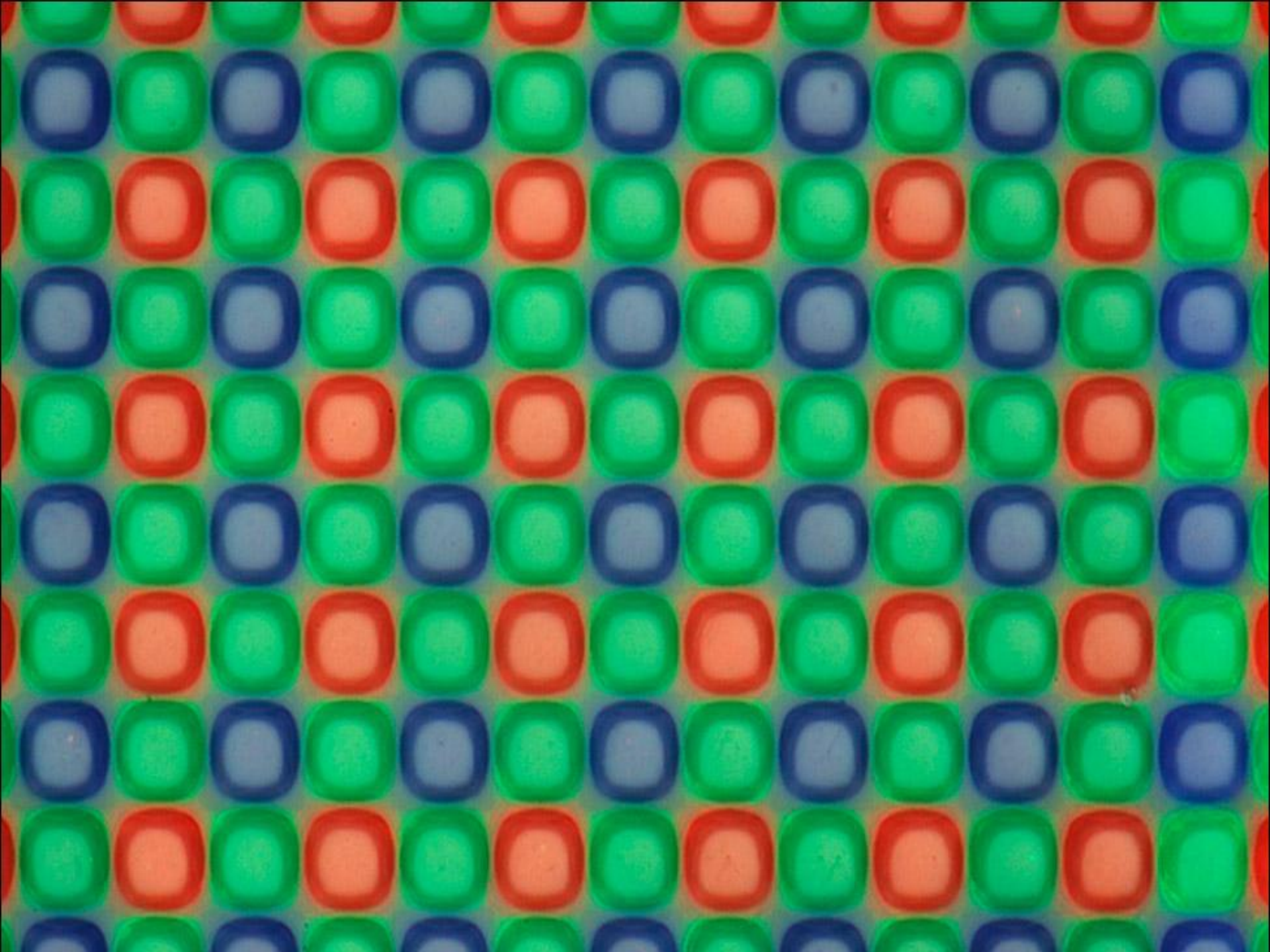


Το τελικό αποτέλεσμα μιας έγχρωμης φωτογραφίας με CCD, όπως αυτή ανακατασκευάζεται ψηφιακά από την αρχική εικόνα (κάτω).

Η αρχική αποτύπωση της εικόνας από μια CCD με Bayer Filter Mosaic.

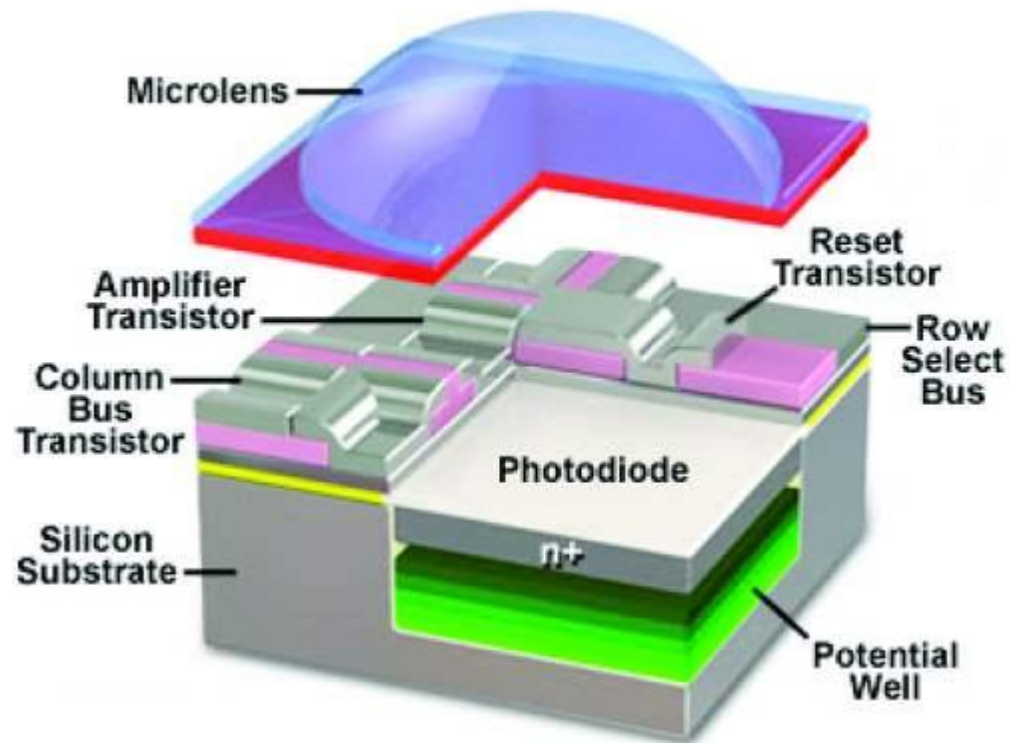




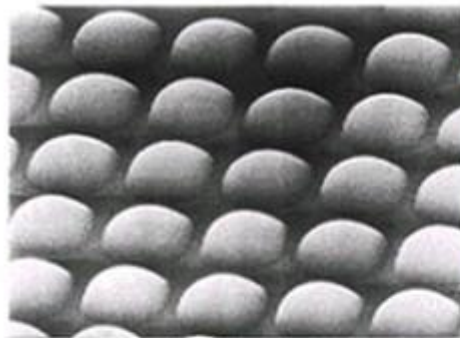


Αύξηση ευαισθησίας με μικροφακούς

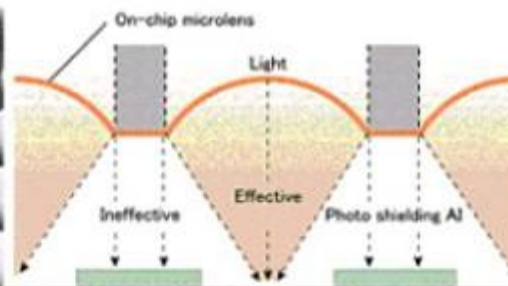
Anatomy of the Active Pixel Sensor Photodiode



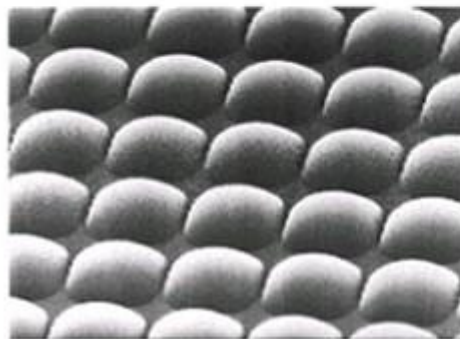
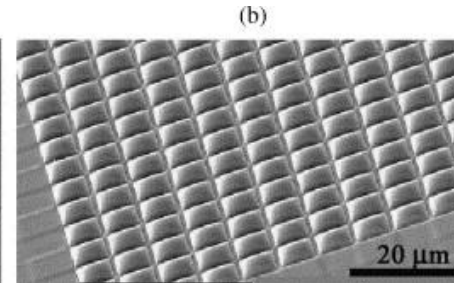
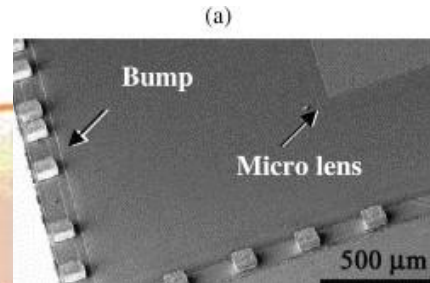
Η γεωμετρία των μικροφακών



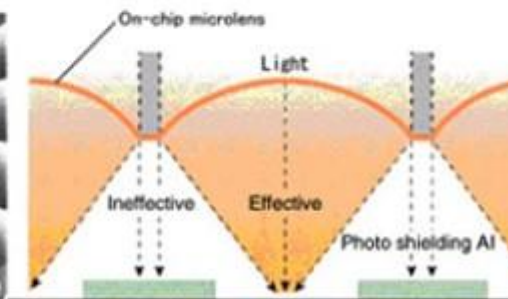
On-chip Micro-lens of
Conventional CCD



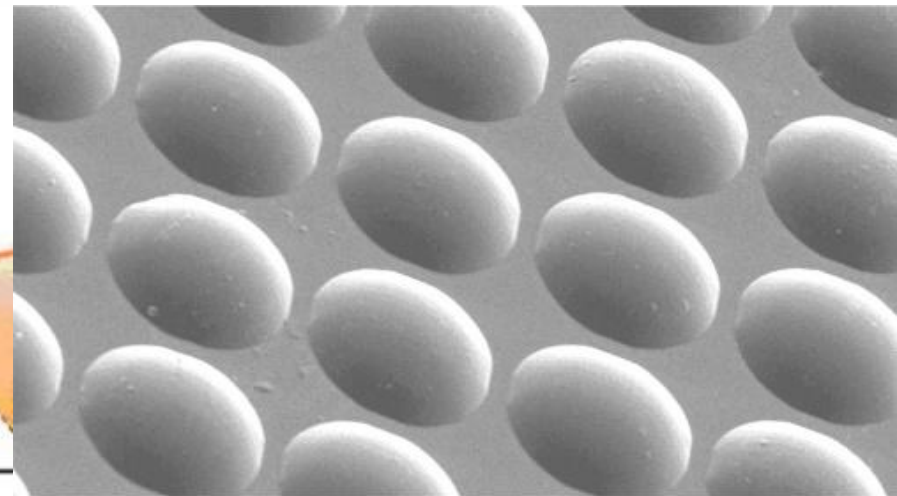
Conventional CCD Sensor Structure



On-chip Micro-lens of
Super HAD CCD



Super HAD CCD Sensor
Structure



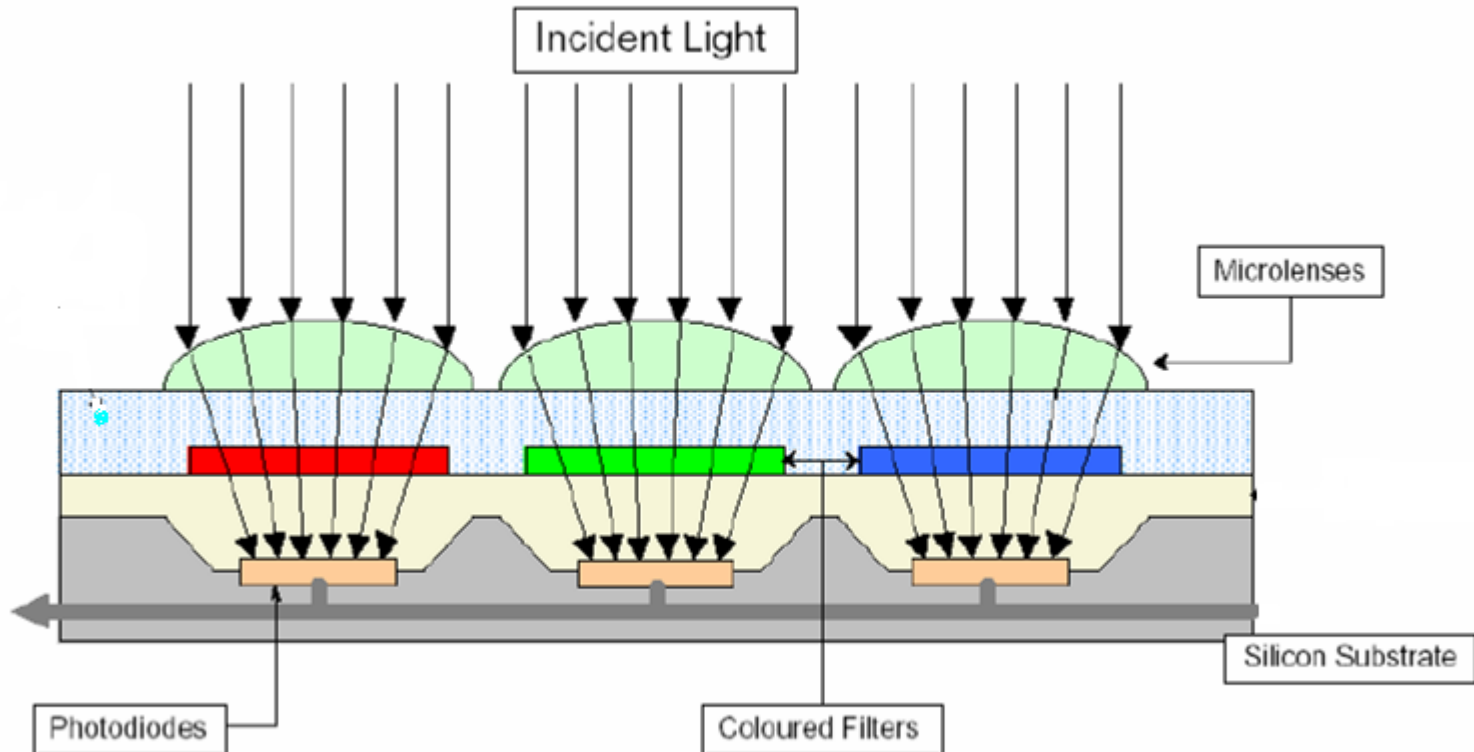
10 KV

× 300

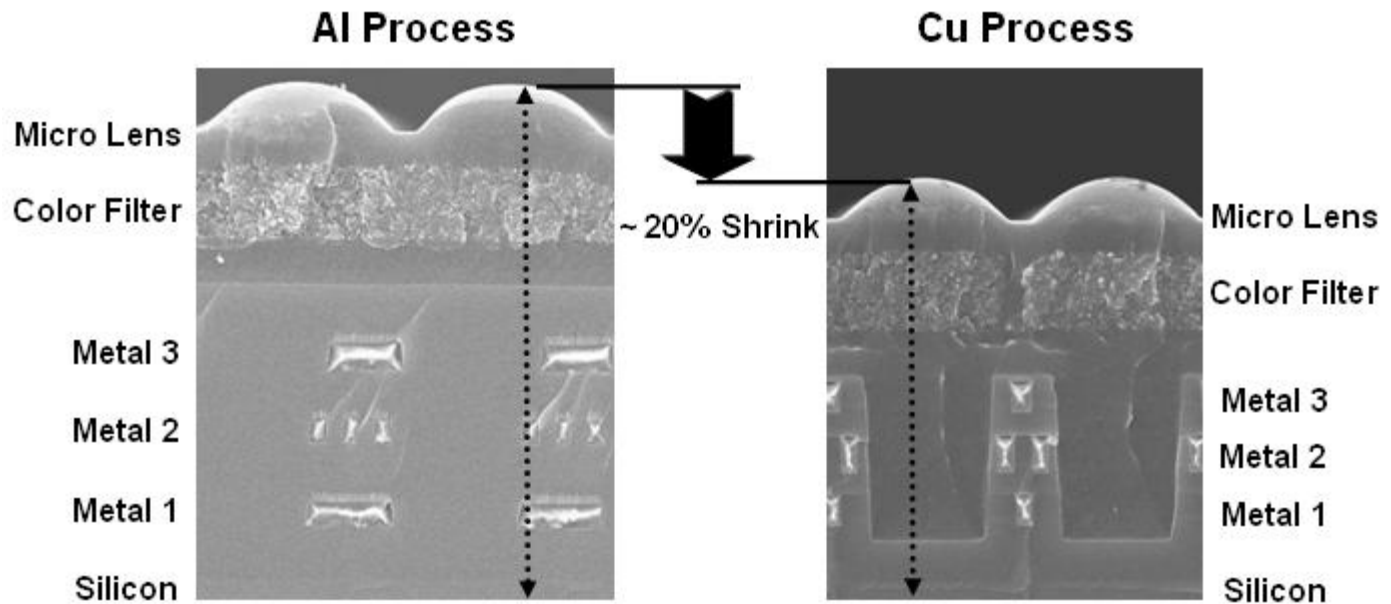
50 μm

Μικροφακοί και έγχρωμα φίλτρα

- Οι CCD είναι εκ των πραγμάτων μονόχρωμες, αφού είναι απλοί ανιχνευτές φωτός. Με τη χρήση φίλτρων, οι εικόνες μπορούν να γίνουν έγχρωμες, κατόπιν ψηφιακής επεξεργασίας.



Αύξηση της συλλεκτικής ισχύος μειώνοντας το πάχος του ανιχνευτή κατά 20%



Μικροφακοί, φίλτρα και γεωμετρία ανιχνευτή

