

ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΧΑΤΖΗΓΙΑΝΝΗΣ ΑΛΕΞΙΟΣ

Αρχές και λειτουργίες CCD & CMOS αισθητήρων στις σύγχρονες κάμερες

Από τα φωτόνια μέχρι τον ανθρώπινο οφθαλμό



ΑΘΗΝΑ 2016

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΚΟΥΡΟΣ ΠΑΥΛΟΣ

Ευχαριστώ θερμά την οικογένεια μου, τους φίλους μου και τους δασκάλους μου, με την ευρύτερη έννοια, που ο καθένας εν γνώσει ή εν αγνοία του βοήθησε για να ολοκληρωθεί αυτή η εργασία.

Περίληψη

Το θέμα της παρούσας μελέτης είναι οι φωτοευαίσθητοι αισθητήρες. Η λειτουργία τους βασίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο του Αϊνστάιν. Έχω προσπαθήσει να προσεγγίσω το θέμα από πολλές διαφορετικές πλευρές, όπως πολύπλευρη είναι και η ίδια η φύση της φωτογραφίας.

Αρχικά υπάρχει μια ιστορική αναδρομή στην αρχή της φωτογραφικής απεικόνισης πριν τη ψηφιακή εποχή. Στη συνέχεια αναφέρονται οι πρώτοι ψηφιακοί αισθητήρες. Έχει γίνει προσπάθεια να αναλυθούν όλα τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους τα οποία τους κατέστησαν τόσο δημοφιλείς από την έλευση τους και πως έχουν επηρεάσει την επιστημονική κοινότητα. Εκτενέστερη αναφορά έχει γίνει στην αστροφωτογραφία και πως άλλαξε την ανθρώπινη οπτική αντίληψη. Επίσης πως άλλα πεδία της καθημερινότητας άλλαξαν με τον ερχομό αυτής της μικροσκοπικής ανακάλυψης.

Οι διαφορές ανάμεσα στα CCD και CMOS κυκλώματα εξηγούνται σε βάθος και ακολουθώντας όλα τα διαφορετικά είδη των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται από τη σημερινή βιομηχανία. Όλη η λειτουργία του κυκλώματος εξηγείται βήμα προς βήμα. Έχει καλυφθεί πλήρως όλη η διαδικασία από την έκθεση του αισθητήρα στο φως μέχρι την έξοδο του κυκλώματος και το τελικό αρχείο. Όλα τα θετικά και αρνητικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων παρατίθενται και πως αυτά χρησιμοποιούνται στη σύγχρονη φωτογραφία και βιντεογραφία.

Άλλες έννοιες που με απασχόλησαν αναφέρονται και αναλύονται επίσης. Αυτές είναι: η δυναμική περιοχή, τα φωτοστοιχεία, το bitrate, οι converters, οι αλγόριθμοι και το σχετικό software.

Επίσης το κομμάτι της αισθητικής δε θα μπορούσε να απουσιάζει. Η φωτογραφία και το βίντεο έχουν αλλάξει τη σύγχρονη αισθητική πιθανόν όσο κανένα άλλο μέσο. Από τη δικιά μου ματιά είναι μαγικό πως οι σύγχρονες δημιουργίες μπορούν να εκμεταλλευτούν τις νέες αναδυόμενες δυνατότητες.

Abstract

The subject of the present thesis is the photosensitive sensors. The whole operation it is based on the Albert Einstein 's photoelectric effect. I have tried to reach the subject from many different angles, as the photography from its nature has.

In the prologue there is a historical recursion of the very beginning of the photography before the digital era. Afterwards, the research presents the first digital sensors. I have tried to explain all the constructional characteristics that made them so popular these days and how they affect the scientific society. A special chapter is dedicated to Astrophotography and how it has changed the human visual perception. As long as I have mentioned many there are many fields of modern society that are different today because of this tiny discovery.

Differences between CCD and CMOS circuits are explained in depth and subsequently all the different kind of sensors that are used today from the industry are also presented. The whole operation of the hardware part is explained in depth. I have fully described it from the beginning of the light exposure on the sensor till the circuit output and the final digital file. All the advantages and disadvantages of all these kind of sensors are quoted and how the modern cameras use them both in photography and video.

Other concepts that were in my concern are included and analyzed. These are: dynamic range, bitrate, photosites, converters, post algorithms and the relevant software.

Also the aesthetic part could not be absent. The photography and videography itself has affected the modern aesthetics maybe more than any other mean. From my perspective it is magic how the new art creations can take advantage of this emerging technological equipment.

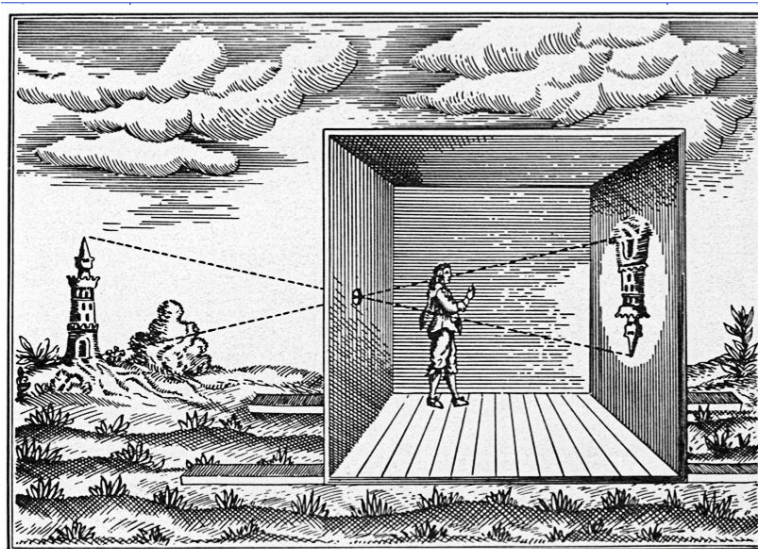
Περιεχόμενα

Ιστορική αναδρομή της φωτογραφίας.....,	7
Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.....	11
Εσωτερικό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.....	14
Γενικά – Εισαγωγικά.....	15
Τα πρώτα χρόνια.....	18
Τότε και σήμερα.....	21
Παρατηρώντας το σύμπαν με ψηφιακούς οφθαλμούς.....	24
Οι x-ray CCDs επι το έργον.....	29
Επανάσταση στην επιστήμη.....	30
Μικροί αλλά θαυματουργοί.....	32
Τα καλύτερα έρχονται.....	36
Απορρόφηση του φωτός στο πυρίτιο.....	38
Αποθήκευση και Χρονισμός.....	44
Η έξοδος του κυκλώματος.....	49
Φωτολιθογραφία.....	51
Η Ιστορία των CMOS.....	56
Ενεργά pixel.....	58
Δυναμική Περιοχή.....	63
Τι πραγματικά βλέπουν τα μάτια μας;.....	65
Ο Analog to digital converter.....	70
Αισθητήρες και χρώμα.....	72
Συστοιχία Bayer.....	73
Απομωσαϊκοποίηση, απο μονόχρωμες ψηφίδες σε φωτογραφία.....	76
RAW Format, Ψηφιακά αρνητικά.....	77
Το RAW και τα άλλα φορμά.....	79
RAW αρχεία και ανθρώπινη όραση.....	81
Το Αντίστοιχο Software.....	82
Η Γενική Φιλοσοφία.....	84
Αισθητήρες για όλα τα γούστα.....	85
Ο Αισθητήρας Foveon.....	92
X-Tans sensor.....	95
Επίλογος.....	96

Ιστορική αναδρομή της φωτογραφίας.

Απο τον 4ο αιώνα π.χ. και περίπου το 350 ο Αριστοτέλης είχε περιγράψει τη λειτουργία της πρώτης φωτογραφικής μηχανής. Αυτό που είχε περιγράψει ήταν ένα ολοσκότεινο κουτί στη μια πλευρά του οποίου υπάρχει μια μικρή οπή για να περνάει το φως. Οι ακτίνες του φωτός ταξιδεύοντας ευθύγραμμα μέσα απο αυτή τη μικρή τρύπα σχηματίζει στην απέναντι πλευρά του κουτιού ένα είδωλο των πραγμάτων έξω απο το κουτί. Ένα είδωλο πιθανώς θολό και ανεστραμένο. Αυτό το φιλοσοφικό μοντέλο που περιέγραψε τότε ο Αριστοτέλης για τη φωτογραφική μηχανή ονομάστηκε camera obscura, ένας όρος που θα μείνει στην ιστορία της φωτογραφίας ως το πρωταρχικό μοντέλο της φωτογραφικής μηχανής και το τρόπο λειτουργίας της. Μια μέθοδος που έχει μείνει ίδια μέχρι σήμερα πολλούς αιώνες μετα τον Αριστοτέλη.

Το είδωλο που προκύπτει οφείλεται στο φαινόμενο της ανάκλασης του φωτός. Ας θεωρήσουμε οτι έξω από το φωτοστεγανό θάλαμο υπάρχει ένας πύργος. Επειδή η τρύπα είναι πολύ μικρή, σχηματικά θεωρούμε μια ακτίνα φωτονίων (στη πραγματικότητα δεν είναι μια αλλά πολλές) περνάει από κάθε ένα σημείο του πύργου μέσα από την οπή. Το φως έχει την ιδιότητα να ταξιδεύει μόνο ευθύγραμμα, έτσι η ακτίνα φωτονίων που ξεκινάει από το ψηλότερο σημείο του πύργου θα περάσει διαγώνια μέσα από την οπή θα συνεχίσει την ευθύγραμμη πορεία της και θα καταλήξει στο χαμηλότερο σημείο στην απέναντι πλευρά της camera obscura. Αντίθετα η δέσμη φωτονίων από το χαμηλότερο σημείο του πύργου θα κατευθυνθεί εξίσου διαγώνια και ευθύγραμμα και θα καταλήξει στο στο ψηλότερο σημείο του σκοτεινού θαλάμου



Αναπαράσταση της Camera Obscura. Ακτίνες φωτός περνούν απο τη μικρή οπή και σχηματίζουν

ανεστραμμένο το είδωλο της πραγματικότητας.

Αν η οπή ήταν μεγαλύτερη και όχι σημειακή όπως τη θεωρήσαμε, τότε από κάθε σημείο του πύργου η ευθύγραμμη ακτίνα θα περνούσε τόσο από το πάνω μέρος της οπής όσο και από το κάτω το αποτέλεσμα θα ήταν ένα είδωλο θολό και συγκεχυμένο αφού το ίδιο σημείο θα φαινόταν σε πολλά σημεία στην απέναντι επιφάνεια.

Πολύ αργότερα, το 1558, ο Giovanni Battista della Porta παροτρύνει ζωγράφους να χρησιμοποιήσουν τη camera obscura για να τους διευκολύνει στους πίνακες τους κύριως σε θέματα τοπίων και πορτραίτων.

Το μοντέλο της camera obscura φαίνεται να λειτουργεί άψογα και αποτελεί μια εφαρμογή του φαινομένου της ανάκλασης του φωτός και σαφώς πρόδρομος της σημερινής φωτογραφικής μηχανής όπως τη γνωρίζουμε. Αυτό που όμως δεν είχε συμβεί ακόμα ήταν η αποτύπωση της εικόνας σε μια επιφάνεια ώστε να μείνει και να αποτυπωθεί ακόμα και μετά την αναπαράσταση του ειδώλου στην επιφάνεια της camera obscura όποια και αν είναι αυτή.

Στις αρχές του 18ου αιώνα χρονολογούνται τα πρώτα πειράματα πάνω σε φωτοευαίσθητα υλικά από τον Johann Heinrich Schulze ο οποίος είχε πετύχει την αποτύπωση του φωτός πάνω σε φωτοευαίσθητοποιημένο από άλατα αργύρου χαρτί αλλά στάθηκε αδύνατη η στερέωση της εικόνας. Με τον όρο στερέωση εννοούμε να πάψει να είναι φωτοευαίσθητη η επιφάνεια και η εικόνα να μείνει αποτυπωμένη στην επιφάνεια.

Θα φτάσουμε στις αρχές του 1800 όπου ο Γάλλος πρωτοπόρος εφευρέτης Nicéphore Niépce κατορθώνει να έχει τις πρώτες φωτογραφίες (δεν χρησιμοποιούνταν τότε αυτή η λέξη) αλλά δυστυχώς δεν έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής καθώς δε καταφέρνει να τις σταθεροποιήσει. Όμως μέχρι το 1826 ο Niépce κατορθώνει να καταγράφει εικόνες και να τις διατηρεί. Βέβαια τα πράγματα ακόμα δεν ήταν απλά καθώς χρειαστηκαν οκτώ ολόκληρες ώρες χρόνο έκθεσης στη φωτοευαίσθητη επιφάνεια που χρησιμοποιούσε! Ονομάστηκαν ηλιογραφίες, ένας όρος πολύ κοντινός στη σημερινή λέξη φωτογραφία (φως + γραφή) αφού περιγράφει τη χρήση του ηλιακού φωτός για αποτύπωση εικόνων.



Ο Γάλλος πρωτοπόρος εφευρέτης Nicéphore Niépce (1765 - 1833)

Παρακάτω η πρώτη διασωσμένη φωτογραφία στην ιστορία. Ανήκει στον Niépce και παρουσιάζει τη θέα από ένα παράθυρο. Τραβήχτηκε με τη μέθοδο της camera obscura.



Από νωρίς ο Γάλλος φωτογράφος Louis Daguerre αλληλογραφεί με τον Niepce, αναπτύσσει τη μέθοδο του και φτιάχνει φωτογραφίες τις οποίες ονομάζει νταγκεροτυπίες.

Στην Αγγλία επίσης αγνοώντας τα επιτεύγματα και τις εφευρέσεις των Niepce και Daguerre ένας μαθηματικός και ανύσηχο πνεύμα καταφέρνει και αυτός να έχει αρνητικές φωτογραφίες σε χαρτί.

Φτάνουμε στο 1839 που η Γαλλία δημοσιοποιεί την εφεύρεση της στην Ακαδημία των Επιστημών. Έτσι τα επόμενα χρόνια η φωτογραφία εξαπλώνεται σε όλο το πλανήτη και γίνεται ένα μέσο πολύ διαδεδομένο για το ευρύ κοινό. Οι φωτογραφικές πλάκες βαρύτες και ευθραυστες αντικαθίστανται από τα φιλμ και το 1888 ο George Eastman λανσάρει τη πρώτη Kodak με φιλμ σε ρολό και το σλογκαν “you press the button we do the rest”, έτσι οι φωτογραφικές μηχανές γίνονται επιτέλους προσιτές σε όλο το κόσμο. Την ίδια χρονιά επίσης κυκλοφορεί το πρώτο τεύχος του διάσημου περιοδικού National Geographic το οποίο δημοσιεύει εντυπωσιακά φωτορεπορταζ.

Η φωτογραφία αν και μόνο τα τελευταία χρόνια της ιστορίας συντροφεύει τον άνθρωπο έχει περάσει από πολλά στάδια. Από παντού κατακλυζόμαστε από φωτογραφίες. Χωρίς να γνωρίζω ποιο είναι το χαρακτηριστικό που την κάνει τόσο δημοφιλή, αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της σημερινής καθημερινότητας. Φωτογραφίες με τα σημαντικότερα ιστορικά γεγονότα, οικογενειακές στιγμές μέσα σε άλμπουμ, αστροφωτογραφίες από τις πιο μακρινές γωνίες του σύμπαντος, πορτραίτα άσημων ή επιφανών προσώπων. Είτε αναλογικές είτε ψηφιακές οι φωτογραφίες υπάρχουν παντού. Στο κείμενο που ακολουθεί θα δούμε την εξέλιξη του ίδιου του μέσου της ψηφιακής φωτογραφίας τόσο επιστημονικά αλλά και κοινωνικά και αισθητικά, όπως διαμορφώθηκε από την έλευση του πρώτου ψηφιακού αισθητήρα μέχρι σήμερα.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

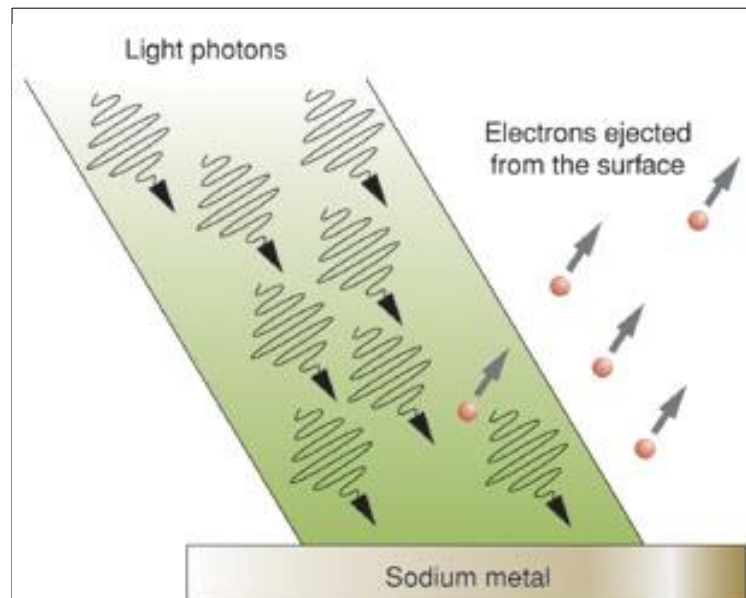
Η αρχή της λειτουργίας ενός ψηφιακού αισθητήρα CMOS ή CCD βασίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο έχει να κάνει με την αντίδραση των μετάλλων όταν σε αυτό προσκρούουν φωτόνια. Πώς αντιδρούν τα μέταλλα στο φως και τι είναι πραγματικά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο;

Οι επιδράσεις του φωτός πάνω σε διάφορα υλικά ήταν από πολύ παλιά κάτι που απασχολούσε την επιστημονική κοινότητα. Στην αρχή όμως του 20ού αιώνα μια συγκεκριμένη αντίδραση των μετάλλων τράβηξε τη προσοχή της επιστημονικής κοινότητας. Ήταν το γεγονός πως όταν μέταλλα ζεσταίνονται εκλύουν ηλεκτρόνια! Πράγματι αυτό το φαινόμενο το εκμεταλλεύτηκε η τότε βιομηχανία και κατασκευάστηκαν έτσι οι τηλεοράσεις ραδιόφωνα κ.α.

Λοιπόν όταν μια δέσμη φωτός προσκρούει σε ένα καθαρό και γυαλιστερό κομμάτι μετάλλου αυτομάτως εκλύονται ηλεκτρόνια. Επόμενο ήταν να σκεφτεί κανείς ότι όσο μεγαλύτερη η ένταση του φωτός τόσο περισσότερα ηλεκτρόνια θα εκλύονται. Αυτό καμιά φορά συνέβαινε αλλά δεν ήταν πάντα έτσι, οπότε κάτι άλλο ήταν αυτό που επηρέαζε τη ποσότητα των ηλεκτρονίων που παραγόταν και όχι η ένταση της φωτεινής δέσμης των φωτονίων.

Έτσι την απάντηση σε αυτό το μυστήριο ήρθε να δώσει, ποιος άλλος; ο Αλμπερτ Αϊνστάιν. Ήταν μάλιστα για αυτή του τη διαπίστωση που κέρδισε το βραβείο Νόμπελ Φυσικής το 1921 και όχι για τη διατύπωση της Θεωρίας της Σχετικότητας. Ο Αϊνστάιν βασίστηκε σε προηγούμενη δουλειά του Max Planck ο οποίος κέρδισε το 1921 το Νομπελ φυσικής. Απέδειξε λοιπόν πως ο παράγοντας που επηρεάζει το αν θα απελευθερωθούν ηλεκτρόνια ή όχι είναι η συχνότητα (f) του φωτός (το χρώμα δηλαδή της ακτινοβολίας) και όχι η ένταση του. Διατύπωσε πως χρειάζεται ένα συγκεκριμένο ποσό ενέργειας για να εξέλθει ένα ηλεκτρόνιο από το μέταλλο. Εάν το προσπίπτων φωτόνιο έχει αυτή την ικανή ενέργεια τότε μπορεί να εκδιώξει ένα ηλεκτρόνιο από τον πυρήνα του και να του δώσει κινητική ενέργεια -ένα φωτόνιο για ένα ηλεκτρόνιο δηλαδή-, εάν πάλι δεν ξεπεράσει αυτή την ενέργεια κατωφλίου τότε η ενέργεια του φωτονίου απορροφάτε απο το περιβάλλον. Εάν η ενέργεια αυτή, που όπως θα δούμε

εξαρτάται από τη συχνότητα της ακτινοβολίας, δεν ξεπεράσει την ενέργεια κατωφλίου το μέταλλο δε φορτίζεται όσο δυνατά και να το φωτίσουμε. Το ποσό της ενέργειας των ηλεκτρονίων που εκλύονται εξαρτάται από τη συχνότητα του προσπίπτοντος φωτός.



Η ενέργεια του φωτονίου ορίζεται:

$$E = h * f$$

Όπου E η ενέργεια του φωτονίου, f η συχνότητα του φωτονίου και h η σταθερά του Planck.

Κατά τον Αϊνστάιν κάθε φωτόνιο της φωτεινής δέσμης που φωτίζει τη μεταλλική επιφάνεια μεταδίδει όλη την ενέργεια του σε ένα μόνο από τα ηλεκτρόνια του μετάλλου. Εάν η ενέργεια του φωτονίου είναι μικρότερη από έργο εξαγωγής του ηλεκτρονίου τότε το ηλεκτρόνιο δε μπορεί να εγκαταλείψει το μέταλλο εάν είναι μεγαλύτερη ή ίση με το έργο εξαγωγής το ηλεκτρόνιο εγκαταλείπει το μέταλλο με κινητική ενέργεια που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E = \frac{1}{2} * m * u^2 = h * f - w \quad (\text{Φωτοηλεκτρική Εξίσωση Αϊνστάιν})$$

Όπου w το έργο εξαγωγής ενός ηλεκτρονίου.

Η ενέργεια του φωτονίου είναι ανάλογη της συχνότητας του. Κατά το συγκεκριμένο φαινόμενο ένα άτομο του μετάλλου μπορεί να απορροφήσει ένα ολόκληρο φωτόνιο και όχι μέρος αυτού. Εάν η ενέργεια του φωτονίου είναι αρκετή το ηλεκτρόνιο θα αποδεσμευτεί από το άτομο του μετάλλου, εάν όμως το φωτόνιο δεν έχει αυτή την απαιτούμενη ενέργεια-συχνότητα τότε το φωτόνιο δεν απορροφάτε και το ηλεκτρόνιο θα παραμείνει στη τροχιά του ασχέτως με το πόσο ισχυρή είναι η φωτεινή ακτινοβολία.

Μόνο ο αριθμός των ηλεκτρονίων (φωτοηλεκτρονίων όπως αναφέρονται) που αποσπώνται από το μέταλλο ανά μονάδα χρόνου είναι ανάλογος της έντασης της φωτεινής πηγής που προσκρούει στο μέταλλο. Η ταχύτητα των εξερχόμενων ηλεκτρονίων (και άρα η ενέργεια τους αφού $E_k = 1/2 * m * u^2$) εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα του προσπίπτοντος φωτός και είναι ανάλογη αυτής. Δηλαδή όσο μεγαλύτερη η συχνότητα του προσπίπτοντος φωτός τόσο μεγαλύτερη η ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων.

Όπως είναι αναμενόμενο δηλαδή το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο εμφανίζεται μόνο για ακτινοβολίες που έχουν συχνότητες πάνω από μια συγκεκριμένη τιμή. Για ένα δεδομένο μέταλλο υπάρχει μια κατώτερη τιμή συχνότητας κάτω από την οποία κανένα ηλεκτρόνιο δε μπορεί να αποσπαστεί.

Η αλληλεπίδραση αυτή είναι πρωταρχικής σημασίας για τη διαδικασία της ψηφιακής φωτογραφίας. Είναι η ιδιότητα εκείνη του φωτονίου που κάνει τα φωτοστοιχεία του αισθητήρα να συσσωρεύουν φορτίο και να το κάνουν πληροφορία και στη συνέχεια pixel. Το ιδεατό θεωρητικά θα ήταν ένα φωτόνιο να απελευθερώνει ένα ηλεκτρόνιο αλλά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο δεν είναι γραμμικό.

Εσωτερικό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Σε πολλά μέταλλα δε παρατηρείται καθόλου το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο με το ορατό φως μιας και οι συχνότητες είναι χαμηλές. Έτσι ποια θα ήταν η χρησιμότητα του αφού εμείς θέλουμε να αιχμαλωτίσουμε μέσα από το φακό το ορατό φως και να το μετατρέψουμε σε ηλεκτρόνια. Οι ψηφιακοί CCD είτε CMOS αισθητήρες κατασκευάζονται από μεταλλικούς ημιαγωγούς, συνήθως πυρίτιο. Ένας τέτοιος ημιαγωγός γενικά σαν υλικό παρουσιάζει φωτοηλεκτρικές ιδιότητες στο ορατό φάσμα· ή ακόμα και στο αόρατο φάσμα, σε πολύ ενδιαφέρουσες περιπτώσεις. Τα άτομα που αποτελούν τους ημιαγωγούς πυριτίου έχουν ηλεκτρόνια σε διακριτές ζώνες. Τα ηλεκτρόνια σθένους, όπως ονομάζονται, είναι κολλημένα στα άτομα του μετάλλου αλλά έχουν την ικανότητα να αποδεσμεύονται και να κινούνται να μην ελεύθερα αλλά να παραμένουν στο εσωτερικό του ημιαγωγού, να γίνουν δηλαδή ηλεκτρόνια μεταβίβασης.

Όταν ένα φωτόνιο προσκρούσει πάνω σε ένα ηλεκτρόνιο του ημιαγωγού αν έχει την απαραίτητη ενέργεια μπορεί να το κάνει να κινηθεί ελεύθερο και απο ηλεκτρόνιο σθένους να γίνει ηλεκτρόνιο μεταβίβασης. Αυτό επιτυγχάνεται φωτίζοντας τον αγωγό και με την απορρόφηση ενός φωτονίου. Άπαξ και το ηλεκτρόνιο αποδεσμευτεί από τη ζώνη σθένους κινείται ελεύθερο στο εσωτερικό του ημιαγωγού πυριτίου. Έχει βέβαια αφήσει πίσω του μια "τρύπα" στη ζώνη σθένους η οποία λειτουργεί σαν θετικά φορτισμένος φορέας. Εάν δεν υπήρχε ηλεκτρικό πεδίο η θετικά φορτισμένη "τρύπα" και το ηλεκτρόνιο θα ξαναενώνονταν και το "ελεύθερο" ηλεκτρόνιο θα χανόταν. Σε έναν σένσορα πυριτίου όμως γι' αυτό το λόγο υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο το οποίο διατηρεί τα φορτία και αποτρέπει την επανένωση του ηλεκτρονίου στη ζώνη σθένους. Έπειτα τα ελεύθερα αυτά ηλεκτρόνια είναι έτοιμα να καθοδηγηθούν μέσα από τα μικροκυκλώματα του αισθητήρα στο ενισχυτή εξόδου. Το πρόβλημα είναι η τυχαία απελευθέρωση ηλεκτρονίων που πηγαίνουν χαμένα και δε διοχετεύονται στο A/D κύκλωμα του αισθητήρα.

Οι αισθητήρες

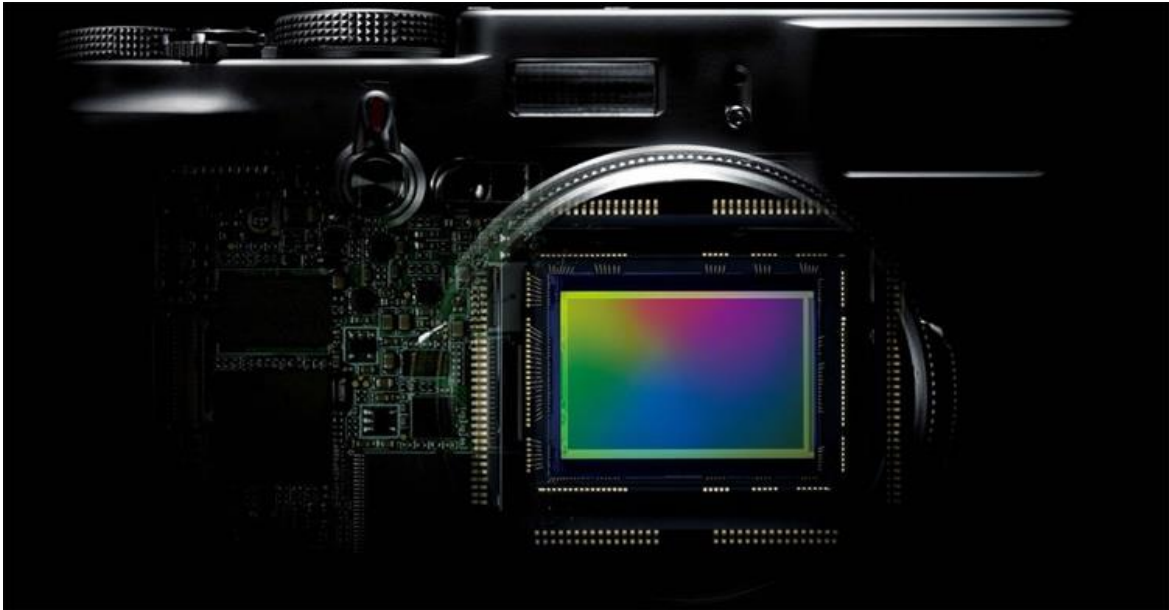
Γενικά - Εισαγωγικά

Στη φωτογραφική γλώσσα όταν αναφερόμαστε σε αισθητήρες (sensors) εννοούμε τη συσκευή εκείνη που, όντας φωτοευαίσθητη, μετατρέπει την αναλογική πληροφορία, το φως δηλαδή, σε ψηφιακό σήμα για περαιτέρω επεξεργασία. Τα φωτόνια περνάνε μέσα από το φωτογραφικό φακό συσσωρεύονται στον αισθητήρα και μετατρέπονται σε ηλεκτρικό ρεύμα και στη συνέχεια σε pixel, συνήθως σε εκατομμύρια pixel, τα οποία συνθέτουν μια εικόνα. Η εικόνα εκείνη αφού έχει αποτυπωθεί μπορεί να φανεί στην LCD οθόνη της φωτογραφικής μηχανής, σε μόνιτορ, να μεταφερθεί σε υπολογιστή για επεξεργασία κλπ.

Στις σημερινές ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές θα μπορούσαμε να χωρίσουμε τους αισθητήρες σε δύο μεγάλες κατηγορίες: CCD (Charge Couples Device) και CMOS (Complementary Metal Oxide System).

Και οι δύο αυτές κατηγορίες χρησιμοποιούν ημιαγωγούς οξειδίων του μετάλλου και έχουν περίπου την ίδια ευαισθησία στο φως. Η δουλειά που επιτελούν είναι να μετατρέπουν τα φωτόνια σε ηλεκτρόνια, ως γνήσιες πρακτικές εφαρμογές του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, και το κάνουν και οι δύο με παρόμοιο τρόπο. Η παράδοση ήθελε τους CCD να θεωρούνται ανώτεροι και πιο ποιοτικοί κατασκευαστικά αλλά πλέον η βιομηχανία έχει εξελιχθεί και χρησιμοποιούνται και οι δύο αισθητήρες κατά κόρον και βλέπουμε και επαγγελματικά μοντέλα των μεγάλων εταιρειών να χρησιμοποιούν CMOS αισθητήρες. Όπως θα δούμε αναλυτικότερα παρακάτω όλοι οι αισθητήρες έχουν τον ίδιο κατασκευαστικό στόχο (μετατροπή φωτός σε ηλεκτρικό ρεύμα) και πλέον όλων των ειδών οι αισθητήρες καταφέρνουν εξαιρετικά αποτελέσματα. Σαν συσκευές κατασκευαστικά είναι και για τις δυο αδύνατο να διακρίνουν χρώμα και για αυτό χρησιμοποιούν ειδικά φίλτρα, τα οποία θα δούμε αναλυτικά παρακάτω. Διαφοροποιούνται όμως σε πολλές λεπτομέρειες τόσο σε κατασκευαστικό επίπεδο κυκλωμάτων που χρησιμοποιούν όσο και στους αλγόριθμους για μετέπειτα επεξεργασία.

Οι διαφορές έγκεινται στο πως διαχειρίζονται το φως αφού το συγκεντρώσουν.



Ο αισθητήρας στο εσωτερικό μιας φωτογραφικής μηχανής. Μια πλήρης εφαρμογή του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

Οι CCD, για παράδειγμα, είναι αναλογικές συσκευές αποτελούμενες φωτοδιόδους, θα τις αποκαλούμε φωτοστοιχεία (photosites). Κάθε φωτοστοιχείο έχει την ικανότητα να αποθηκεύει ηλεκτρικό φορτίο που συσσωρεύεται όσο τα ηλεκτρόνια προσκρούουν στο στοιχείο αυτό. Κάθε τέτοιο φωτοστοιχείο είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία ενός pixel. Ο σχεδιασμός είναι σχετικά απλός και δε χρειάζονται πολύπλοκα κυκλώματα ούτε πολλά τρανζίστορ. Έτσι για να "διαβαστεί" αυτή η συσσωρευμένη εικόνα διεγείρουμε με τάση ηλεκτρόδια που είναι συνδεδεμένα με τα φωτοστοιχεία του σενσορα, στη συνέχεια αυτές οι τάσεις όλων των φωτοστοιχείων καταλήγουν να σκανάρονται από έναν τελικό ενισχυτή εξόδου.

Οι CMOS αισθητήρες αντίθετα διαθέτουν τρανζίστορ για κάθε ένα τέτοιο φωτοστοιχείο του αισθητήρα. Κάθε pixel σε αυτούς διαβάζεται ξεχωριστά, δε χρειάζεται να καταλήξει κάπου το τι έχουν συλλέξει συνολικά τα φωτοστοιχεία όπως στους CCD. Κάθε φωτοστοιχείο στους CCD μπορεί να διαβάζεται αμέσως και ξεχωριστά. Ο CMOS αισθητήρας αποκρίνεται άμεσα στις εκάστοτε συνθήκες φωτός που επικρατούν την ώρα που τραβιέται η φωτογραφία.

Για καιρό το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των CMOS, όπως όλα τα CMOS κυκλώματα, είναι οτι είχαν πολύ μικρό κόστος παραγωγής. Έχουν την ίδια διαδικασία

κατασκευής όπως τα υπόλοιπα κυκλώματα (για Η/Υ ή άλλες εφαρμογές) της οικογένειας των CMOS. Ενώ οι CCD απαιτούν δυσκολότερη διαδικασία κατασκευής και αρκετά πιο δαπανηρή. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω οι πρώτοι CMOS σενσορες παράγαν χαμηλότερης ποιότητας εικόνες, αλλά τώρα δεν είναι έτσι. Η Canon για παράδειγμα χρησιμοποιεί τόσο σε ερασιτεχνικές όσο και σε επαγγελματικές DSLR CMOS αισθητήρες. Η Nikon πάλι σε ένα από τα τελευταία της επαγγελματικά μοντέλα χρησιμοποίησε CMOS αισθητήρα, τον οποίο κατασκεύασε η Sony. Η Kodak είναι μια ακόμη εταιρεία που έβαλε σε μηχανή της υψηλής κατασκευαστικής ποιότητας CMOS σένσορα. Οι Foveon επίσης αισθητήρες είναι μια ειδική κατηγορία CMOS chip που χρησιμοποιούν οι αμερικάνικες Sigma μηχανές, την οποία θα δούμε ξεχωριστά και εκτενέστερα παρακάτω.

Charge-coupled devices

Τα πρώτα χρόνια

Δύο οραματιστές ερευνητές στο τέλος του 1969 οι Willard S. Boyle και George E. Smith στην Bell Labs, είναι η εταιρεία η οποία κατεχει και τα ευσημα για την ανακάλυψη του τρανζίστορ, εργάζονταν σύμφωνα με τις νέες τάσεις της επιστήμης και με τις ιδιότητες αυτές του πυριτίου για να κατασκευάσουν ένα φωτοηλέφωνο! Δηλαδή θα εγκαταστάσουν μια μικροσκοπική κάμερα στο τηλεφωνικό δέκτη και έτσι θα μπορούσαν οι συνομιλούντες να βλέπουν ο ένας τον άλλον! Κάτι σαν πρόδρομος του σημερινού Skype δηλαδή. Έτσι, αρκετά χρόνια αργότερα ακόμη μια εφεύρεση ανήκει στην Bell Labs. Ονομάστηκε Picturephone και κατέληξε να είναι μια πολύ καινοτόμα συσκευή και κατάφερε με την τότε παρουσία της να αλλάξει τη φιλοσοφία στην τεχνολογία της απεικόνισης. Μετά απο αυτή την ιδιαίτερη επιτυχία τους, ξεκίνησαν τη συγγραφή ενός paper που θα δημοσιευόταν με το τίτλο “A new semiconductor device concept has been devised which shows promise of having wide application”. Δε θα μπορούσαν να είναι πιο εύστοχοι και προφητικοί, αν αναλογιστεί κανείς πως σχεδόν κάθε φωτογραφική μηχανή πλέον έχει ένα CCD sensor στο εσωτερικό της! Οι αντιδράσεις και το κουτσομπολιό δε λείπουν φυσικά ούτε από τους κύκλους των επιστημόνων και τα σχόλια από συναδέλφους τους ποικίλαν από “έπρεπε να το είχα σκεφτεί νωρίτερα” ή “δε θα δουλέψει ποτέ”. Φυσικά όχι μόνο δούλεψε, αλλά από τότε μέχρι σήμερα η λίστα με τις εμπορικές εμπορικές-βιομηχανικές εφαρμογές είναι αναρίθμητη.

Έτσι οι CCD εφευρέθηκαν το 1969 απο τους Willard Boyle και George Smith και παρουσιάστηκαν σε μια απλή κατασκευαστική μορφή της μιας γραμμής απο 8 pixel απο τους Gil Amelio, Mike Tompsett και George Smith στη Bell Laboratories στο New Jersey των Η.Π.Α. Μέχρι το 1973 δε κυκλοφόρησαν μεγαλύτερων διαστάσεων κυκλώματα και έτσι η πατέντα κατοχυρώθηκε στους Boyle και Smith το 1974. Στην αρχή αποκαλούνταν surface-channel CCD επειδή το φορτίο που δημιουργούνταν από την απορρόφηση του φωτός αποθηκεύονταν και επεξεργαζόταν κοντά στην επιφάνεια του πυριτίου. Δυσκολίες όμως με αυτή τη μέθοδο οδήγησαν σε άλλη πολυπλοκότερη αρχιτεκτονική για καλύτερη απορρόφηση του φωτός που ονομάστηκε buried-channel και που επεξεργάζεται το φορτίο

σε στρώσεις μέσα στους αγωγούς πυριτίου. Πολλές αλλαγές χρειάστηκαν για να καλυτερεύσουν τα CCD κυκλώματα. Αναπτυξιακές αλλαγές όπως μείωση θορύβου, αποδοτικότεροι ενισχυτές, λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες, και άλλες κατασκευαστικές αλλαγές οι οποίες δε έγιναν εν μια νυκτί. Με τα χρόνια και μέσα στις δεκαετίες οι CCD συσκευές είδαν τεράστια πρόοδο και η προβλέπεται να δουν ακόμη μεγαλύτερη στα αμέσως επόμενα χρόνια.

Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν ως συσκευές μνήμης εκεί όμως δε συνάντησαν μεγάλη επιτυχία αφού εύκολα τους κέρδισαν οι φτηνές και γρήγορες random access memory μνήμες. Η επιστημονική κοινότητα έδειξε μεγάλη αποδοχή στον ερχομό αυτής τις νεάς καινοτόμας συσκευής, αντιλήφθηκε την εργονομία της και εκμεταλλεύτηκε γρήγορα τις φωτοευαίσθητες ιδιότητές της. Έτσι έμελλε να έρθει μια μεγάλη επανάσταση στην τεχνολογία της φωτογραφίας.



Οι Willard Boyle και George Smith, εφευρέτες του CCD, στο εργαστήριο τους, στη Bell laboratories επιδεικνύουν τη καινούρια τους εφεύρεση.

Ήταν πράγματι μια συναρπαστική, από πολλές απόψεις, ανακάλυψη με πλεονεκτήματα που βοήθησαν στη διάδοση της:

- Είναι πολύ συμπαγείς, "πυκνοί" στη κατασκευή τους, μικροί και χαμηλής κατανάλωσης.

- Ποσοστιαία δείχνουν εξαιρετική ευαισθησία στο φως σε μεγάλο εύρος μηκών κύματος.
- Δείχνουν εξαιρετική ευαισθησία τόσο σε χαμηλής όσο και σε υψηλής έντασης πηγές.
- Έχουν σταθερότητα και γραμμική λειτουργία.
- Δεν παρουσιάζουν παραμόρφωση στην απεικόνιση.
- Έχουν σχετικά χαμηλό κόστος σε μαζική παραγωγή απο βιομηχανίες κυκλωμάτων πυριτίου.

Τότε και σήμερα

Χρειάστηκε να έρθει ο Οκτώβριος του 2009 για να μοιραστούν οι Smith και Boyle μαζί με τον Charles Kuen Kao, πρωτοπόρο στις οπτικές ίνες, το βραβείο Νόμπελ φυσικής για την ανακάλυψη του CCD. Στη τελετή απονομής μάλιστα η βασιλική Σουηδική Ακαδημία Επιστημών τους αποκάλεσε με το βαρύγδουπο χαρακτηρισμό "κύριοι του φωτός" (masters of light για την ακρίβεια) και είπαν πως βοήθησαν στο να χτίσουν τα θεμέλια για της σημερινές δικτυωμένες κοινωνίες.

Το τότε αφεντικό τους, Jack Morton, τους είχε παρακινήσει να προσπαθήσουν να κατασκευάσουν μνήμες από ημιαγωγούς. Η ιδέα τους ήταν απλή: ξεκινάς με μια στρώση πυριτίου, συνδέεις στην επιφάνεια ηλεκτρόδια που μπορούν να λειτουργήσουν ως αποθηκευτές φορτίου. Όταν το φως θα έπεφτε στην επιφάνεια του πυριτίου θα δημιουργούνταν φορτίο έτσι εφαρμόζοντας τη κατάλληλη τάση τα ηλεκτρόνια θα μεταφέρονταν μέσω των ηλεκτροδίων και θα μπορούσε να αποθηκευθεί και να μετρηθεί το φορτίο ανάλογα με την ένταση του φωτός. Όπως το νερό θα μεταφερόταν μέσα απο ένα πηγάδι.

"Ουσιαστικά αυτή ήταν η εφεύρεση" θα πει ο ίδιος ο Smith σε συνέντευξη του το 2001, "ας μη βάλουμε κανένα κύκλωμα μέσα. Απλά βάζεις αυτά τα πράγματα πολύ κοντά, εάν υπάρχει εδώ φορτίο απλά εφαρμόζεις μια τάση εδώ που να είναι μεγαλύτερη από την τάση εκεί και το φορτίο θα πέσει. Αυτή η τάση μηδενίζεται, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται". Τόσο απλά φαίνεται πως έβλεπαν τα πράγματα, ίσως αυτό να ήταν και το μυστικό της επιτυχίας τους!

Αν και αρχικά ο σκοπός τους ήταν να κατασκευάσουν μνήμες, ο Smith λέει πως ήταν προφανές ότι η συσκευή τους θα χρησίμευε στην διαδικασία της απεικόνισης, έτσι όταν κατέφθασαν και εγκαθιδρύθηκαν στην αγορά οι μνήμες RAM η ιδέα για μνήμες έμεινε ξεκρέμαστη. Ευτυχώς, αφού αν η βιομηχανία επένδυε στους CCD ως απλές μνήμες, οι εξαιρετικές φωτοευαίσθητες ιδιότητες τους θα έμεναν ανεκμετάλλευτες.

Ο James Janesick, διευθυντής ανάπτυξης αισθητήρων στην εταιρεία Sarnoff, ισχυρίζεται: "Εκτός του ότι καταφέραμε να δούμε μέχρι την άκρη του σύμπαντος, που

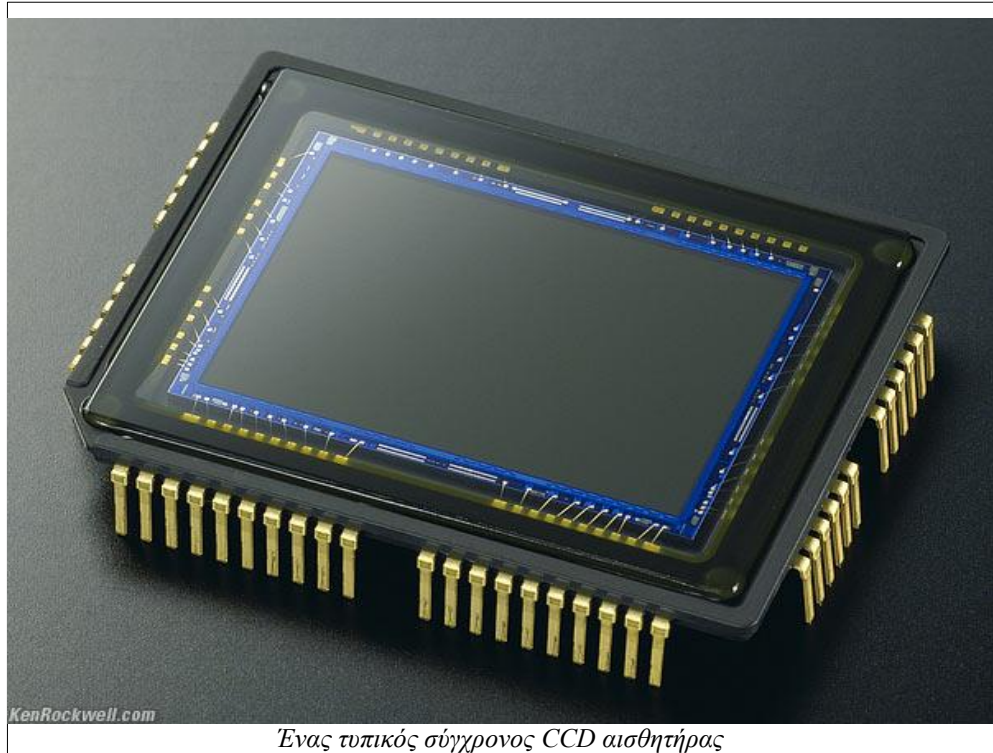
είναι ο τρόπος που εφάρμοσα τη τεχνολογία τους, η τεχνολογία αυτή προσέφερε δισεκατομμύρια δισεκατομμυρίων δολαρίων". Ο ίδιος μάλιστα εργαζόταν για το σύστημα απεικόνισης του τηλεσκοπίου Hubble, και ενώ ακόμη σκεφτόντουσαν να εργαστούν τοποθετώντας φιλμ -και θα έπρεπε να πάνε αστροναύτες να τα πάρουν πίσω ώστε να δούνε τι θα είχε φωτογραφηθεί!- οι CCD ήταν μέχρι και 100 φορές πιο ευαίσθητοι έτσι ο Janesick ισχυρίστηκε πως είχαν πλέον κατακτήσει την επιστημονική απεικόνιση.

Ο Carlo Sequin από την άλλη, ηλεκτρολόγος μηχανικός και καθηγητής στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια στο Berkeley, αλλά και συνεργάτης του Smith, θα δηλώσει: "αυτό που κάποτε ήταν μια απίστευτα απλή αρχή, σήμερα είναι ένα από τις πιο πολύπλοκες συσκευές που κατασκευάζονται, παρόλαυτα με 100 δολάρια το βρίσκεις στο εσωτερικό κάθε κάμερας".

Ακόμη ο Terrence Lomheim, μηχανικός στα συστήματα αισθητήρων και συνσυγγραφέας βιβλίου για CCD και CMOS, λέει πως οι CCD κατείχαν τα σκήπτρα για 30 χρόνια και πως οι Boyle και Smith εφηύραν την ψηφιακή απεικόνιση πρωτού η επανάσταση στη μικροηλεκτρονική μας δώσει τα σημερινά της δώρα.

Τέλος ο Rod Alferness, επικεφαλής επιστήμονας στη σημερινή Alcatel-Lucent Bell Labs, ο οποίος είχε δουλέψει για τον Boyle τη δεκαετία του '70, λέει πως το έργο των τριών κατόχων του βραβείου Νομπελ, στις οπτικές ίνες για τις επικοινωνίες και στους CCD για τις φωτογραφίες και τα βίντεο που κατακλύζουν σήμερα το ίντερνετ, βοήθησε στο να διαμορφωθεί η εποχή της πληροφορίας που γνωρίζουμε σήμερα. "Είναι μια σύγκλιση τεχνολογιών, που αν τις βάλεις μαζί, παίρνεις κάτι εξαιρετικό", θα δηλώσει.

Και έτσι για ακόμη μια φορά η επιστημονική κοινότητα σοφά αφουγκράστηκε το μεγαλείο μιας φαινομενικά απλής ή και ασήμαντης συσκευής. Ο ενθουσιασμός και το σούσουρο, όπως συμβαίνει σε μια παρέα όταν κάτι νέο και εντυπωσιακό κάνει απροσδόκητα την εμφάνιση του, ήταν δικαιολογημένα. Οι CCD είχαν έρθει για να μείνουν και οι εφαρμογές τους σήμερα είναι καθημερινές και αναρίθμητες: από κάμερες για όλη την οικογένεια, επαγγελματικές κάμερες, συστήματα αναμετάδοσης, στα σπορ αλλά και στις τέχνες, εφαρμογές στην ιατρική και στη ρομποτική επιστήμη.



Ένας τυπικός σύγχρονος CCD αισθητήρας

Αλλά εκεί που φάνηκαν σχεδόν τέλειες όπως αναφέρθηκε είναι στην αστροφωτογραφία. Ήταν μεγαλειώδης η αλλαγή που έφερε στην απεικόνιση του σύμπαντος σε σχέση με τα μέχρι τότε δεδομένα, που αμέσως την εναγκάλισαν οι αστρονόμοι και οι μελετητές του διαστήματος της εποχής. Μια από τις πρώτες αναπτυξιακές κινήσεις ήταν από την Texas Instruments να προμηθεύσει τη NASA με μεγάλους CCD σενσορες για την αποστολή στο Δια (Galileo mission) και ακολούθως για το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble Space Telescope.

Παρατηρώντας το σύμπαν με ψηφιακούς οφθαλμούς

Τη περίοδο '73-'77 που γινόντουσαν αλματώδεις βελτιώσεις, η Texas Instruments (TI) κατασκεύασε CCDs 100x160 και 400x400 pixel, ενώ δεν άργησαν να εμφανιστούν και οι 500x500 με απώτερο τότε σκοπό τους 800x800 pixel, αριθμός εντυπωσιακός αν αναλογιστεί κανείς πως μέχρι πριν λίγα χρόνια οι κάπως πιο ακριβές φωτογραφικές μηχανές είχαν αισθητήρα του 1.5 έως 2 MP.

Τα τεστ και οι εκτιμήσεις αυτών των αισθητήρων έγιναν από τους Fred Launder και τον νέο τότε Jim Janesick στο τμήμα αεριωθούμενων jet της NASA. Έτσι στις αρχές του 1976 οι πρωτοπόροι αστρονόμοι της εποχής κατόρθωσαν με τη βοήθεια τηλεσκοπίων και CCD αισθητήρων να έχουν τρομερές, για τα δεδομένα της εποχής, αστροφωτογραφίες από μακρινές γωνιές του γαλαξία. Με κατάλληλα φίλτρα μάλιστα κατάφεραν να εντοπίσουν αέριο μεθάνιο στην ατμόσφαιρα αυτών του Δια και του Κρόνου. Όταν βέβαια έστρεψαν το τηλεσκόπιο στον, αρκετά πιο μακρινό πλανήτη, Ουρανό νόμιζαν πως κάτι πήγε στραβά, "μοιάζει με ντόνατς", κατέληξαν απογοητευμένοι! Αφού οι CCD και η σωρεία απο ηλεκτρονικό εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε είχε κατασκευαστεί για πειράματα εντός του εργαστηρίου, το όλο εγχείρημα για απεικόνιση τόσο μακρινών πλανητών ήταν πρώιμο και παρακινδυνευμένο. Ήταν τα φίλτρα εντοπισμού μεθανίου σε συνδυασμό με την αόρατη στο ανθρώπινο μάτι ακτινοβολία που τους μπέρδευσε και έδινε αυτή την εκτυφλωτική και αλλόκοτη όψη στον Ουρανό.

Είναι επίσης αλήθεια πως, καμιά φορά, χρειάζεσαι ένα πολύ καλό τηλεσκόπιο για να δεις το απόλυτο τίποτα! Αφού, μόλις κοντά στον ερχομό της νέας χιλιετηρίδας, οι επιστήμονες ανακοίνωσαν πως είδαν την "άκρη" μιας μαύρης οπής. "Είναι λίγο περίεργο να πούμε πως ανακαλύψαμε κάτι χωρίς να δούμε τίποτα απολύτως", λέει ο αστροφυσικός Michael Garcia "αλλά στην ουσία αυτό έγινε." Ο Garcia και οι συνεργάτες του, χρησιμοποίησαν το τηλεσκόπιο Chandra, εξοπλισμένο με CCD αισθητήρες για να ανιχνεύσουν ακτινοβολία x, από διάφορα ουράνια σώματα, με πιο ενδιαφέροντα από τους καινοφανείς αστέρες. Ένα τέτοιο σώμα περιλαμβάνει ένα αστέρι σαν τον Ήλιο (ή πολύ μεγαλύτερο) και ένα αστέρι που έχει "σβήσει". Εάν τα δύο αυτά άστρα είναι αρκετά κοντά, η βαρύτητα από το "σβησμένο" αστέρα (μπορεί να είναι μια μαύρη οπή ή ένας αστέρας νετρονίων) φέρνει ένα ρεύμα αερίων από το γειτονικό του άστρο και ένα λαμπρό ξέσπασμα ακτινοβολίας x εκρήγνυται καθώς τα αέρια αυτά υφίστανται πολύ υψηλές

θερμοκρασίες. Οι περίοδοι μάλιστα μεγάλης εκπομπής ακτινών x διαχωρίζονται από τις περιόδους αδράνειας που εκπέμπεται πολύ λιγότερη ακτινοβολία. Η επιστημονική ομάδα του Michael Garcia παρατήρησε πως κατά τη διάρκεια αυτού του λήθαργου η ενέργεια των ακτινών x που εκπέμπεται από ζευγάρια αστέρων-μαύρων οπών είναι πολύ διαφορετική από αυτή που εκπέμπεται από το ζευγάρια αστέρων-αστέρων νετρονίων. Όταν υπάρχει μαύρη τρύπα εκπέμπεται μόνο το 1 τοις εκατό από όταν υπάρχει αστέρας νετρονίων. Η πιο απλή εξήγηση για αυτό, σύμφωνα με τους επιστήμονες, είναι πως οι μαύρες βρίσκονται στον *ορίζοντα των γεγονότων*, και έτσι "ρουφάνε" όλη την ενέργεια που υπάρχει γύρω τους. Γύρω από τον ορίζοντα των γεγονότων, η βαρυτική έλξη είναι τόσο ισχυρή που τίποτα -ούτε καν το φως- δε μπορεί να δραπετεύσει. Θα μπορούσε να πει κανείς πως αυτό το project αποδεικνύει γιατί πραγματικά αποκαλούνται μαύρες τρύπες, ανακοινώνει μέλος της ομάδας. Τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν στην Αμερικάνικη Αστρονομική Κοινότητα και επιβεβαιώνουν που προκύπτει από τη γενική θεωρία της σχετικότητας του Αϊνσταϊν απο το Γερμανό αστρονόμο Karl Schwarzschild πίσω στο 1916.

Οι CCD πλέον αποτελούν αναπόσπαστο και ώριμο κομμάτι της σύγχρονης επιστήμης. Έχουν πρωταγωνιστικό ρόλο σε πολλά πεδία, όπως στις επιστήμες των ωκεανών, στη βιολογία στη φυσική υψηλής ενέργειας. Στην αστρονομία, νέα τηλεσκόπια, τα τελευταία χρόνια μπορούν να δούνε στα βάθη του σύμπαντος χάρη σε συστοιχίες CCD απίστευτων μεγεθών.

Το συγκεκριμένο όργανο στο Chandra που επέτρεψε να δούμε τόσο κοντά στη καρδιά του απόλυτου σκοταδιού ονομάζεται ACIS δηλαδή Advanced CCD Imaging Spectrometer. Απο όταν τέθηκε σε τροχιά το 1999 υπήρξε το κλειδί για πολλές ανακαλύψεις, στις μαύρες τρύπες, στους αστέρες supernova και σε πολλές άλλες άγνωστες πτυχές του σύμπαντος.

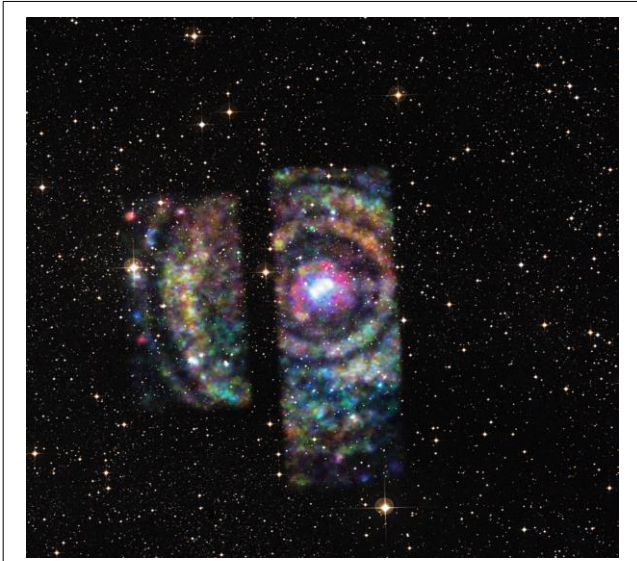


Ο Δορυφόρος παρατηρητής Chandra

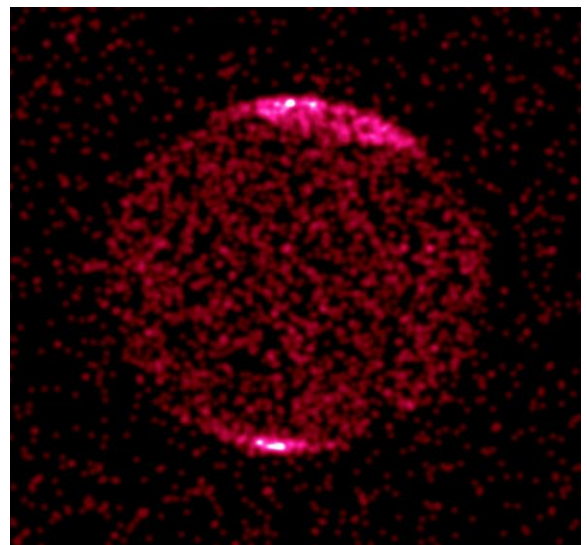
Το σύστημα Chandra (το οποίο πήρε το όνομα του απο τον Ινδοαμερικανό αστροφυσικό Subrahmanyan Chandrasekhar) περιλαμβάνει προωθητήρες, κεραίες για επικοινωνία με τους επίγειους σταθμούς, ηλιακά πάνελ με τα οποία εξασφαλίζει ενέργεια. Μέσω μιας πολύπλοκης οπτικής συνδεσμολογίας καθοδηγούνται τα φωτόνια στον ACIS όπου βρίσκεται στο εστιακό σημείο του τηλεσκοπίου. Μια υψηλής ανάλυσης κάμερα διαθέτει εκεί έναν υπεραιεύσθητο αισθητήρα με φίλτρο για την x ακτινοβολία. Ο ACIS κανονικά συλλέγει φωτόνια για 40.000 δευτερόλεπτα, ούτε λίγο ούτε πολύ δηλαδή για 11 ώρες. Και αυτός είναι περίπου ο χρόνος που απαιτείται για να συλλέξει 100 φωτόνια, το κατώφλι για να έχουν μια επαρκή εικόνα της ακτινοβολίας x, εξηγεί ο Garcia. Άλλες πάλι φορές ο χρόνος που χρειάζεται για τέτοιες περιστάσεις μπορεί να διαρκέσει μερικές μέρες! Αλλά τότε ο θόρυβος από το background του θέματος προκαλεί μεγάλο θόρυβο και το αποτέλεσμα δε θα είναι ικανοποιητικό -το ίδιο ακριβώς δηλαδή που θα συνέβαινε σε μια απλή υπερεκτεθειμένη οικογενειακή φωτογραφία-. Όπως είναι εμφανές πρόκειται για μεγάλη επανάσταση στην αστρονομία, οι πληροφορίες που αντλούμε από τα x-ray φωτόνια έχουν τεράστια ακρίβεια είναι εμπεριέχουν μεγάλες αλήθειες για τα ουράνια σώματα. "Το Chandra άλλαξε το τρόπο που κοιτάμε το σύμπαν", εξηγεί ο Martin Weisskopf αρχηγός του πρότζεκτ Chandra. Έτσι ανιχνεύθηκε μια ασθενής πηγή

ακτινοβολίας x, που πιθανολογείται να πηγάζει από τη μαύρη οπή που λέγεται ότι βρίσκεται στο κέντρο του γαλαξία. Επίσης ήταν οι πρώτοι που είδαν μια λάμψη από έναν καστανό νάνο, μια ειδική κατηγορία αστερών που έχουν πολύ μικρή μάζα για την ενέργεια που εκπέμπουν. Βρήκαν ακόμη ασθενείς πηγές ακτινοβολίας x προερχόμενη από αφθονία μαύρων τρυπών εν ενεργεία υποδεικνύοντας έτσι ότι οι τεράστιες μαύρες τρύπες ήταν πολύ πιο ενεργές στο παρελθόν από ότι σήμερα.

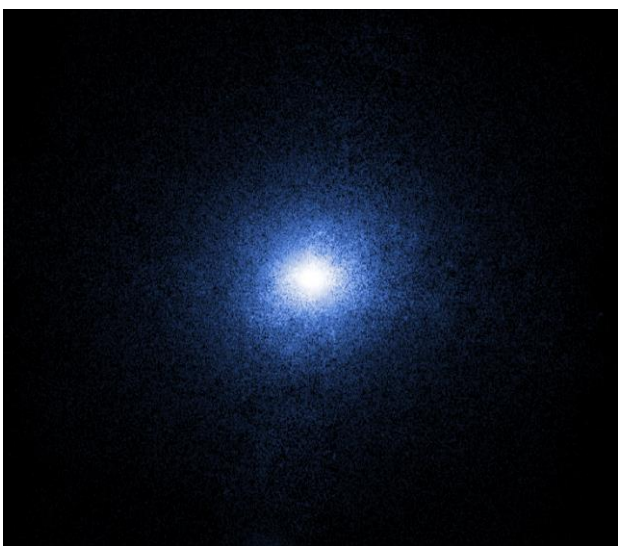
Κάποια μόνο σπουδαία δείγματα υπό την x-ray ματιά του Chandra:



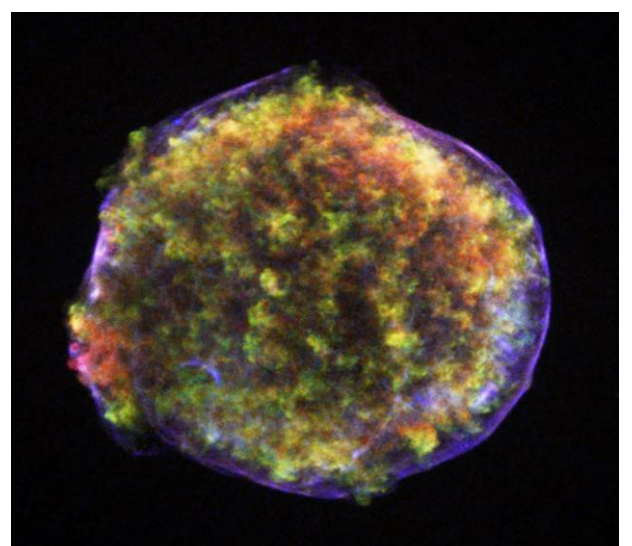
X-ray φωτεινά δαχτυλίδια από αστέρα νετρονίων στο αστρικό σύστημα Circinus X-1



Ο πλανήτης Δίας



Cygnus X-1. Η πρώτη μεγάλη μαύρη οπή που ανακαλύφθηκε.



Απομεινάρι του Υπερκαινοφανούς αστέρα SN1572 του αστερισμού της Κασσιόπης

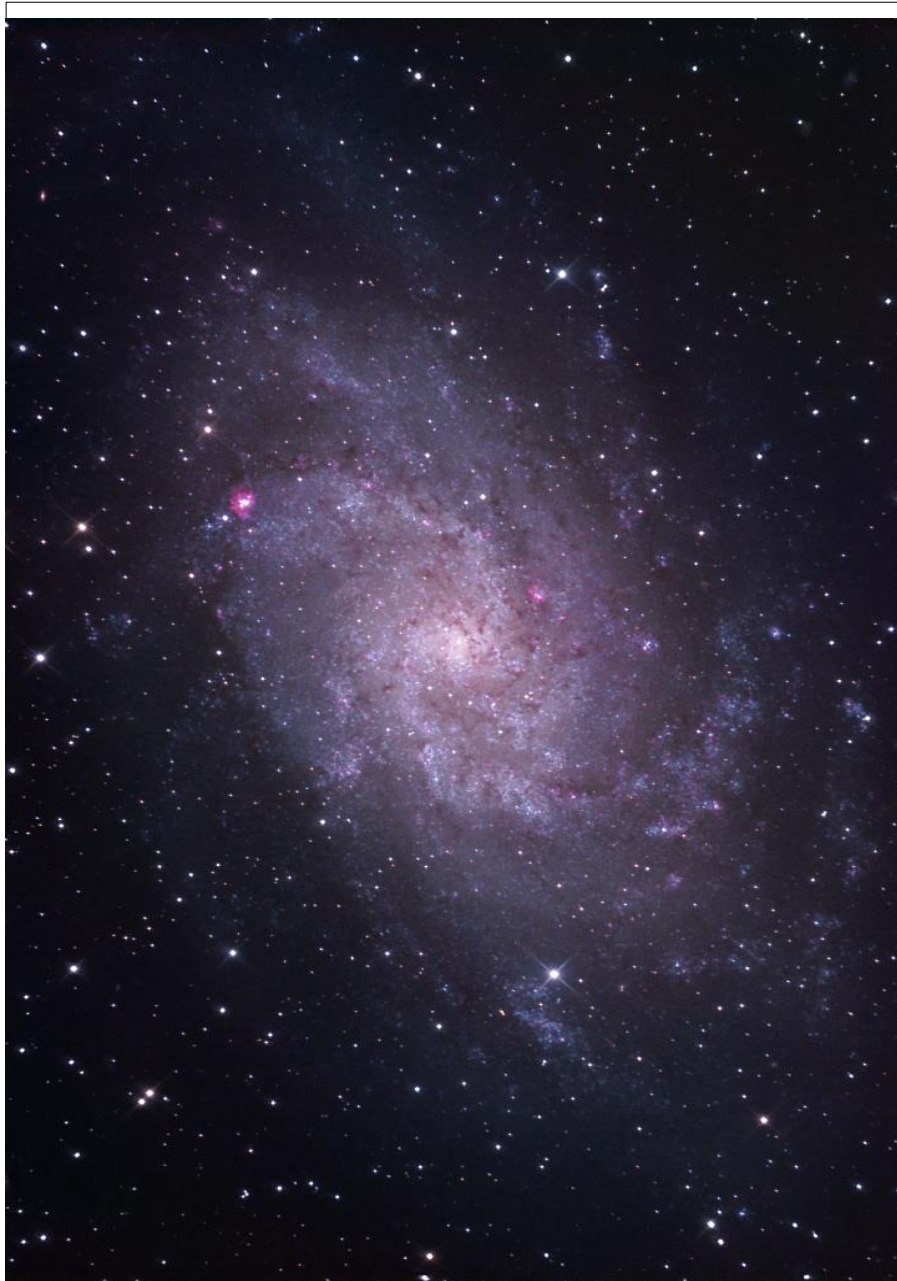
Οι x-ray CCDs επι το έργον

Ο ACIS με τον οποίο είναι εφοδιασμένο το Chandra, περιλαμβάνει 10 επίπεδους CCD μεγέθους 1024x1024 pixel οι οποίοι βρίσκονται στο εστιακό επίπεδο του τηλεσκοπίου όπως φαίνεται στο σχήμα. Οι 10 αυτοί CCD χωρίζονται σε δύο συστοιχίες. Μια 2x2 που χρησιμοποιείται για την απεικόνιση, και μια 1x6 που χρησιμοποιείται είτε για απεικόνιση είτε για να διαβάσει το φως από τις σχάρες περίθλασης που υπάρχουν πριν το τελικό ανιχνευτή. Υπάρχουν δύο τέτοιες σχάρες περίθλασης των οποίων καθήκον είναι να διακόπτουν τη πορεία των ακτίνων x που ανακλώνται από τους καθρέφτες του τηλεσκοπίου, να τους αλλάζουν τη κατεύθυνση και να τις αναλύουν. Έτσι ο ανιχνευτής καταγράφει τις ακτίνες που έχουν υποστεί περίθλαση και μπορεί να πετύχει ακριβή καταγραφή των ενεργειών τους. Το φασματόμετρο που διαθετεί είναι πολύ προχωρημένο. Μπορεί να διακρίνει 50 διακριτές στάθμες ενέργειες ανάμεσα στα 100 eV και στα 100 KeV, δηλαδή σε μήκη κύματος από 10 nm μέχρι 0.01 nm! Η κατασκευή μεγάλων CCD ευαίσθητων στην -αόρατη σε μας- ακτινοβολία x ήταν μεγάλη πρόκληση, λέει ο Barry Burke του MIT. Στις αρχές τις δεκαετίας του '90, όταν κατασκευαζόταν το αντίστοιχο chip για το Chandra ένα chip ενός εκατομμυρίων pixel θεωρούνταν τεράστιο. Αλλά η αναγκαιότητα ήταν μεγάλη. Η κατασκευή CCD ευαίσθητων σε χαμηλές ακτινοβολίες x χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση άνθρακα στο σύμπαν, ένα στοιχείο που υπάρχει σε αφθονία και το φάσμα της ακτινοβολίας που το κάνει αντιληπτό είναι περίπου στα 4.5 nm.

Οι x-ray CCD διαφέρουν από τους, λιγότερο ακριβοθώρητους, ομολόγους τους που "βλέπουν" μόνο το ορατό φάσμα σε δύο βασικούς κατασκευαστικά τομείς: λεπτότερα στρώματα πυριτίου και υψηλότερη αντίσταση στα χαμηλά. Γιατί; Στους συμβατικούς αισθητήρες, όταν έχουμε να κάνουμε με ενέργειες φωτονίων χαμηλές, κάτω από 1 keV, απορροφάται σχεδόν όλη η ενέργεια στην επιφάνεια του αισθητήρα. Έτσι οι κατασκευαστές μείωσαν το πάχος της συνολικής επιφάνειας και μείωσαν τον αριθμό των ακτινών που απορροφώνται πριν καν ανιχνευθούν. Τις ακτίνες x που τα καταφέρνουν και περνάνε βαθύτερα συσσωρεύονται κάτω-κάτω στον αισθητήρα σε μια, όπως την αποκαλούνε, ζώνη εξάντλησης. Ένα υπόστρωμα πυριτίου υψηλής αντίστασης υποδέχεται τις ακτίνες x, οι οποίες έχουν διεισδύσει βαθιά στον αισθητήρα. Είναι το μέρος εκείνο του αισθητήρα που είναι αποδοτικότερα σε αυτό το φάσμα συχνοτήτων.

Επανάσταση στην επιστήμη

"Σε κάθε πεδίο της επιστήμης ο ερχομός των CCD έφερε επανάσταση, συμπεριλαμβανομένου κάθε πεδίου της αστρονομίας", δηλώνει ο Tony Tyson, αστροφυσικός στη Bell Labs. Ο Tyson (αλλά και ο Ed Lowe στο Princeton), ήταν ο πρώτος που τοποθέτησε CCD κάμερα σε τηλεσκόπιο το 1979. Το χρησιμοποίησε για να μελετήσει έναν γαλαξία κβάζαρ, του οποίου το φως, το οποίο εξέπεμπε, έφτανε στη Γη πολύ εξασθενημένο για να καταγραφεί από οποιαδήποτε φωτογραφική πλάκα. Και οι CCD ανάμεσα στα πολλά προτερήματα τους έχουν μια δυνατότητα που τους έκανε αξεπέραστους στην αστρονομία. Μπορεί να χαρακτηριστεί *κβαντική* ικανότητα καταγραφής. Με αυτό τον όρο εννοούμε το ποσοστό των φωτονίων που προσπίπτει στο σένσορα και αποθηκεύεται. Θεωρώντας το φωτόνιο ως ένα κβάντο ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Κβαντικά, λοιπόν, εκεί που οι φωτογραφικές πλάκες απέδιδαν περίπου 5 τοις εκατό οι CCD, τότε κατάφερναν ποσοστά 50 τοις εκατό, ενώ σήμερα φτάνουν μέχρι και 90 τοις εκατό. Σε αντίθεση με τις φωτογραφικές πλάκες, οι οποίες προσφέρονται μόνο για μια έκθεση, μια CCD κάμερα χρησιμοποιεί τον ίδιο αισθητήρα για πάρα πολλές λήψεις. Ας πούμε πως ο αισθητήρας έχει ένα κατεστραμμένο pixel. Εάν αλλάξουμε ελάχιστα τη κατεύθυνση του τηλεσκοπίου, μπορεί να παραχθεί μια εικόνα χωρίς κανένα κατεστραμμένο pixel, αφού θα έχει 'χτιστεί με μαθηματικούς αλγορίθμους, που έχει το λειτουργικό που τους συνοδεύει και που θα δούμε αναλυτικότερα παρακάτω. Αυτή τη *τεχνική μετατόπισης και παρατήρησης* εφηύρε ο Tyson, και χρησιμοποιείται σχεδόν από όλα τα σημερινά αστροτηλεσκόπια. Έτσι, με κβαντική καταγραφή μπορούμε να καταγράψουμε εικόνες συλλέγοντας μέχρι μόνο ένα φωτόνιο το λεπτό, το οποίο μάλιστα μπορεί να έχει ταξιδέψει από ένα μακρινό γαλαξία που απέχει δισεκατομμύρια έτη φωτός από τη Γη!



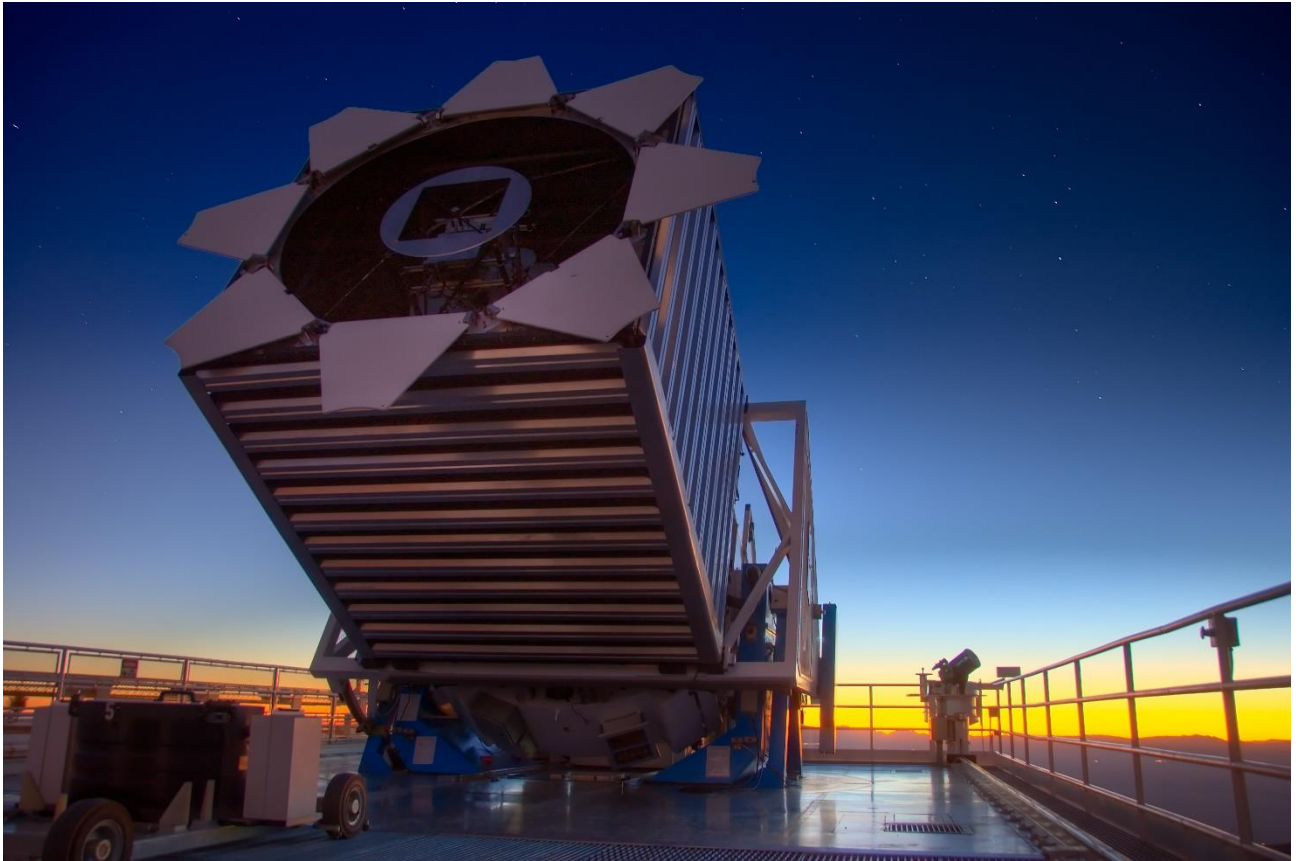
CCD αστροφωτογραφία του μακρινού γαλαξία M33

Μικροί αλλά θαυματουργοί

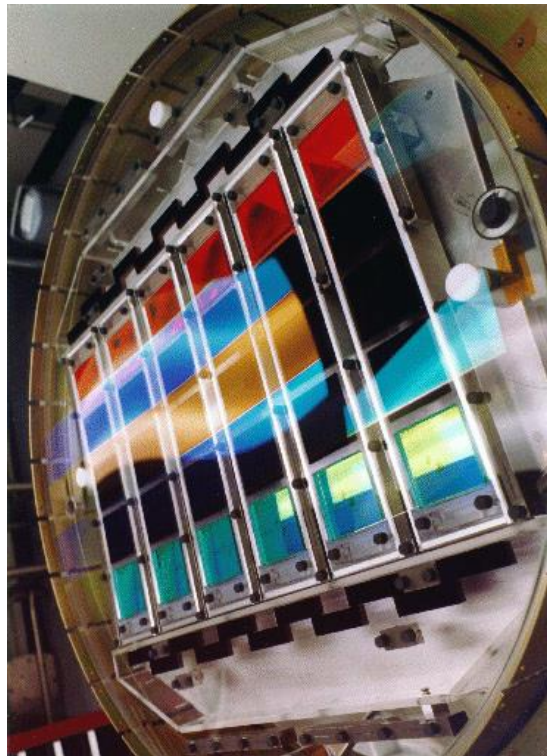
Οι CCD έχουν μεγαλώσει σε μέγεθος από μερικά χιλιοστά μέχρι αρκετά μεγαλύτερους ή συστοιχίες αισθητήρων μεγέθους μέχρι και 20x25 εκατοστά, σαν τις μεγάλες φωτογραφικές πλάκες του παρελθόντος. Ο μεγαλύτερος CCD (πρόκειται επίσης για συστοιχία, δηλαδή πολλοί αισθητήρες μαζί) σε λειτουργία είναι τοποθετημένος σε ένα τηλεσκόπιο 2μση μέτρων σε Νεο Μεξικό για το πρότζεκτ Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Εδώ έχουμε να κάνουμε τόσο με τα αόρατα όσο και με τα ορατά μέρη τους φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Σκοπός του πρότζεκτ είναι να φτιάξει ένα ψηφιακό εργαστήριο για τους μελετητές αστρονόμους, στην ουσία έναν λεπτομερή ψηφιακό χάρτη ο οποίος θα αναπαριστά το ένα τέταρτο του συνόλου του ουρανού, καθορίζοντας τις θέσεις και την απόλυτη φωτεινότητα για πάνω από ένα εκατομμύριο ουράνιων σωμάτων. Έχει ήδη εντοπίσει περίπου χίλιους γαλαξίες quasars, ένας εκ των οποίων είναι το πιο μακρινό σώμα που έχει ανιχνευθεί ποτέ. Όταν μάλιστα πρωτοεξέπεμψε το φως του αυτός ο μακρινός γαλαξίας, το σύμπαν μας μετρούσε μόλις ένα δυσεκατομμύριο χρόνων ζωής από τα δεκατέσσερα δισεκατομμύρια που μετράει σήμερα!

Οι CCDs που χρησιμοποιήθηκαν για το εν λόγω τηλεσκόπιο κατασκευάστηκαν από τη Scientific Imaging Technologies Inc. Βρίσκονται συνολικά τριάντα αισθητήρες τοποθετημένοι σε μια 5x6 συστοιχία. Ο καθένας από αυτούς αποτελείται από πάνω από τέσσερα εκατομμύρια pixels και το κάθε pixel έχει επιφάνεια 24 μm, ενώ η συνολική φωτοευαίσθητη επιφάνεια καταλαμβάνει 720 cm². Μια δεύτερη συστοιχία αποτελούμενη από εικοσιτέσσερις 2048x400 αισθητήρες χρησιμοποιείται για *αστρομέτρηση* επιτρέπει δηλαδή στους ερευνητές να ταιριάζουν φωτεινά άστρα με ουράνια αντικείμενα που έχει εντοπίσει η πρώτη συστοιχία. Η μεγαλύτερη από τις δύο έχει κβαντική ικανότητα καταγραφής μέχρι και 80 τοις εκατό στα μήκη κύματος που είναι αποδοτικότερη. Επίσης λόγω της υψηλής ανάλυσης και των μεγάλων pixels μέσα σε μια νύχτα παρατήρησης μπορεί να συλλέξει δεδομένα όγκου 200 gb.



Το τηλεσκόπιο του Sloan Digital Sky Survey στο Νέο Μεξικό σε όλο του το μεγαλείο.



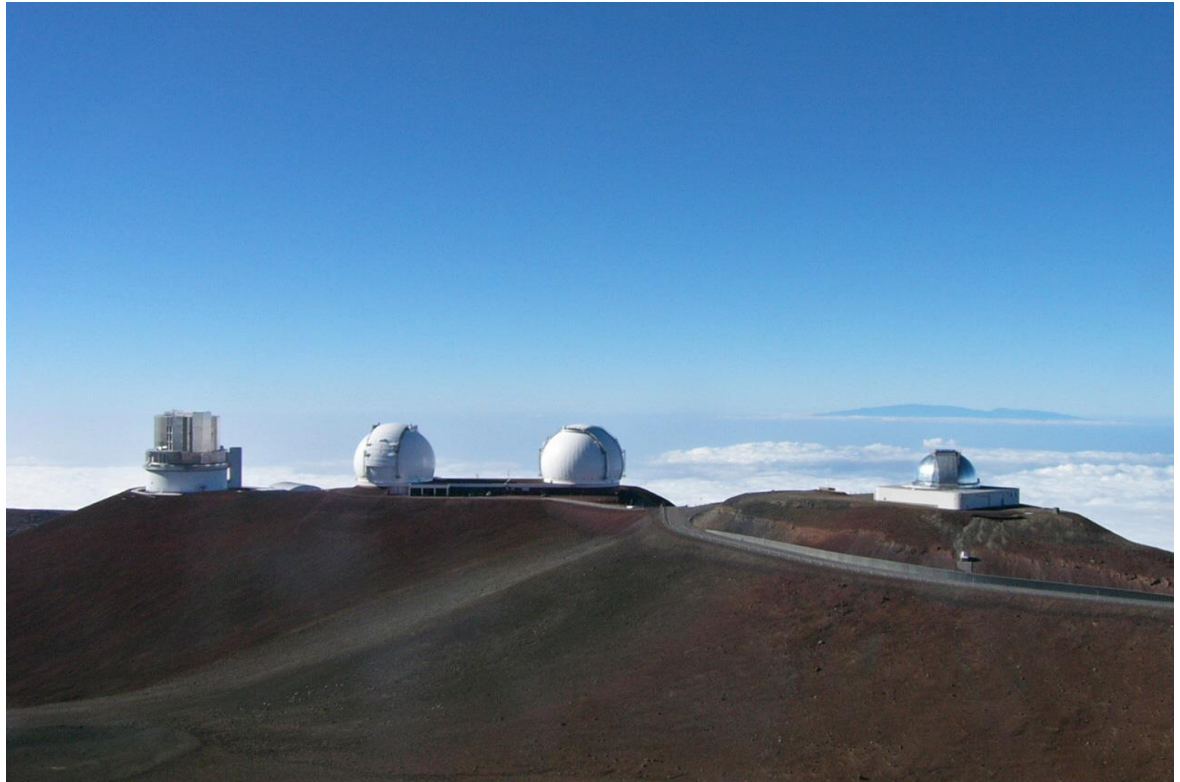
Η συστοιχία των CCD εντός του τηλεσκοπίου

Ένα ακόμη μεγάλο CCD επίτευγμα εδρεύει στη Hawaii. Πρόκειται για το 8.2 μέτρων τηλεσκόπιο Subaru που στην έδρα του έχει μια συστοιχία 5x2 αισθητήρων, ανάλυσης 2048x4096 pixel. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες είναι κατασκευασμένοι για να καλύπτουν μήκη κύματος από 300 εως 1100 nm. Και πάλι το συγκεκριμένο τηλεσκόπιο από τη Hawaii με τους συγκεκριμένους αισθητήρες είναι υπεύθυνο για την ανίχνευση κάποιων από τους πιο μακρινούς γαλαξίες.

Με τα νούμερα των φωτοστοιχείων στις συστοιχίες των CCD τόσο στο SDSS όσο και στο Subaru καταλαβαίνει κανείς το μεγαλείο και τη γεωμετρική πρόοδο της φωτοτεχνολογίας CCD. Τα νούμερα είναι 10 φορές μεγαλύτερα απο ότι σε μια συμβατική κάμερα των 35mm και 40 φορές καλύτερα από ότι σε μια high-end DSLR φωτογραφική μηχανή.



Η εντυπωσιακή εγκατάσταση του Subaru Telescope στη Hawaii



Εντοπισιακή γενική φωτογραφία του Subaru ανάμεσα στα δίδυμα Keck Telescopes και στην Infrared Telescope Facility στη Hawaii.

Τα καλύτερα έρχονται

Και ενώ οι CCD έχουν φτάσει σε φανταστικά επίπεδα, γενικά, στο σχεδιασμό ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, οι κατασκευαστές δε σταματούν εδώ. Πλέον οι σχεδιαστές των CCD κυκλωμάτων στην αστροφωτογραφία δε χρειάζεται απλά να προσπαθούν να κατασκευάσουν όλο και μεγαλύτερα chips (φυσικά το μέγεθος είναι κάτι που παίζει ρόλο) αλλά πρέπει να βελτιώσουν τη κβαντική ικανότητα καταγραφής και να μειώσουν το θόρυβο. Μια άλλη προτεραιότητα είναι η αύξηση της αποδοτικότητας. Στις μεγάλες συστοιχίες CCD ενίοτε, λόγω μεγέθους και λόγω άλλων συνιστωσών (θερμοκρασία, μεγαλύτερη πιθανότητα καμένου pixel) η αποδοτικότητα ελαττώνεται. Αλλά στους αστρονόμους τα μικρότερα chips θα ήταν άχρηστα για τη μελέτη μακρινών ουράνιων σωμάτων και γαλαξιών. Οι σχεδιαστές CCD του MIT, λοιπόν, αποφαινόμενοι πως πρέπει να βρουν τη σωστή ισορροπία ανάμεσα στο μέγεθος και στην αποδοτικότητα που θα μπορέσει να φέρει λαμπρά αποτελέσματα προς μελέτη. Αποτελέσματα τα οποία θα φωτίζονται από το παρελθόν για να μας υποδείξουν σεμνά το μέλλον.

Η ετήσια αγορά για τους CCD είναι περίπου 1 δισεκατομμύριο δολάρια, τα περισσότερα εκ των οποίων είναι για συμβατικές φωτογραφικές μηχανές ή άλλες εμπορικές εφαρμογές, ενώ για τους επιστημονικούς CCD υπάρχει συγκεκριμένη αγορά και φτάνει τα 100 εκατομμύρια δολάρια. Σίγουρα η τεχνολογία των CCD έχει έρθει για να μείνει, αλλά δεν έχει και το μονοπώλιο. Οι CMOS αισθητήρες υπάρχουν όλα αυτά τα χρόνια και δεν αφήνουν καθόλου αδιάφορη τη φωτογραφική κοινότητα, αφού κατέχουν μεγάλο ποσοστό και αυτοί στη γενική αγορά της ψηφιακής απεικόνισης. Αλλά το να ρίξουν τους CCD από το θρόνο της αστροφωτογραφίας θα είναι ένας δύσκολος άθλος.

Η συνολική παρουσία της CCD τεχνολογίας στην αστροφωτογραφία απεδείχθη τρομερά ευεργετική. Είδαμε πράγματα τα οποία μέχρι πρότινος ανήκαν μόνο στο περιεχόμενο ταινιών επιστημονικής φαντασίας. Μακρινούς πλανήτες και αστρικά σώματα, αστέρες νετρονίων, λευκούς νάνους, απομεινάρια απο υπερκαινοφανείς αστέρες, ίχνη μαύρων οπών, νεφελώματα και μακρινούς γαλαξίες και, όπως παρατηρήθηκε, τα ίχνη του φωτός που μας περιβάλλουν είναι η ηχώ της δημιουργίας, το φως από το παρελθόν. Φτάσαμε να δούμε πράγματα που είναι πολύ κοντά στην αρχή, στο περιβόητο πια, big bang. Ίσως στο μέλλον αυτές οι μικρές συσκευές φτάσουν ακόμα πιο κοντά στα γεγονότα

του τότε. Πάντως ο χρόνος και ο χώρος του τότε, μάλλον θα συνεχίσουν να παραμένουν άγνωστα και ελαφρώς ακατανόητα για τις φτωχές αντιλήψεις μας, ανεξαρτήτως τεχνολογίας.

Όπως και να 'χει η αστρονομία δεν είναι η μόνη εφαρμογή της ψηφιακής φωτογραφίας και ούτε η μοναδική σκοπιά της παρούσας μελέτης. Οι ψηφιακοί φωτοευαίσθητοι αισθητήρες μας είναι πολύ πιο οικείοι σε άλλες εφαρμογές. Τόσο οι CCD αλλά και οι CMOS -οι οποίοι σήμερα φιγουράρουν σε μερικά από τα ακριβότερα επαγγελματικά μοντέλα- έχουν εκατοντάδες εφαρμογές και έχουν διαμορφώσει κατά πολύ τη σημερινή κοινωνία της πληροφορίας που ζούμε. Αρκεί να αναλογιστεί κανείς πόσες εικόνες αντικρίζει καθημερινά σε έντυπη ή σε ψηφιακή μορφή, πίσω από κάθε μια τέτοια εικόνα μας υπενθυμίζει τη παρουσία της η φωτοευαίσθητη τεχνολογία. Σαν κάτι που κάνει δειλά δειλά την εμφάνιση του αλλά γρήγορα καταφέρνει με τον ένα ή τον άλλο τρόπο να κερδίσει μια περίοπτη θέση στο σήμερα. Η μάχη ωστόσο ανάμεσα στους δυο (CCD - CMOS) μαίνεται, με φανατικούς υποστηρικτές και στα δύο στρατόπεδα και ξεκάθαρος νικητής δε φαίνεται να υπάρχει.

Απορρόφηση του φωτός στο πυρίτιο

Οι ιδιότητες οποιουδήποτε στερεού εξαρτώνται από δύο πράγματα. Από την ατομική δομή των ατόμων του υλικού, και από τον τρόπο με τον οποίο τα άτομα είναι τοποθετημένα στην ύλη, δηλαδή τη κρυσταλλική του δομή. Το κεντρικό σημείο των ατόμων, ο πυρήνας τους, είναι θετικά φορτισμένος, και γειτονικά έχουμε ηλεκτρόνια σε τροχιά γύρω από το πυρήνα τα οποία είναι αρνητικά φορτισμένα. Τα ηλεκτρόνια υπάρχουν σε αυστηρά καθορισμένες τροχιές ή στοιβάδες γύρω από το πυρήνα και σε κάθε τροχιά έχουν καθορισμένη ενέργεια. Εάν μεμονωμένα άτομα έρθουν πολύ κοντά, τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας (τα οποία είναι και τα ηλεκτρόνια με την υψηλότερη στάθμη ενέργειας) των γειτονικών ατόμων αλληλεπιδρούν σαν να θέλουν να ενώσουν τα άτομα. Εξαιτίας αυτής της πολύ ισχυρής αλληλεπίδρασης μεταξύ αυτών των ηλεκτρονίων, ηλεκτρόνια σθένους όπως αποκαλούνται λόγω της υψηλής τους ενέργειας, οι εξωτερικές στοιβάδες των ατόμων αλλάζουν δραστικά. Το αποτέλεσμα είναι τα εξωτερικά ηλεκτρόνια να μοιράζονται, να είναι κοινά, σε διαφορετικούς πυρήνες. Σε αυτό το παιχνίδι ανταλλαγής ηλεκτρονίων μπορεί να συμμετέχουν δύο, τρία ή και περισσότερα άτομα. Έτσι μεμονωμένα άτομα έχουν ένα χάσμα ανάμεσα στις στοιβάδες τους. Είναι ένα ενεργειακό χάσμα ανάμεσα στις εσωτερικές γεμάτες στοιβάδες και στις εξωτερικές ελλειπείς στοιβάδες. Αυτό το χάσμα πρέπει μοιραία να αναπληρωθεί. Εδώ να σημειωθεί ότι μιλάμε για σταθερή κρυσταλλική δομή και για άτομα ενός μόνον είδους. Διαφορετικά θα σχηματίζονταν νέες ενεργειακές στάθμες ανάμεσα σε ανόμοια άτομα.

Στα μέταλλα αυτό που συμβαίνει είναι τα ηλεκτρόνια από τη ζώνη μεταβίβασης να περιπλανώνται ελεύθερα μέσα στο στερεό. Εάν εκεί εφαρμόσουμε ένα ηλεκτρικό πεδίο (π.χ. τοποθετήσουμε μια μπαταρία στα άκρα του μετάλλου) τότε στα ηλεκτρόνια θα επιτραπεί να αποκτήσουν ροή και θα δημιουργηθεί τάση και ηλεκτρικό ρεύμα. Γι αυτόν ακριβώς το λόγο τα μέταλλα είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρικού ρεύματος (αλλά και της θερμότητας). Αντιθέτως ένα μονωτικό υλικό, ένας μονωτής, έχει αυστηρά διατεταγμένη δομή που δεν επιτρέπει αυτό το ενεργειακό χάσμα, η conduction band δεν έχει ηλεκτρόνια διαθέσιμα να δημιουργήσουν ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Τα ηλεκτρόνια στην εσωτερική στοιβάδα είναι εγκλωβισμένα, οι γύρω στοιβάδες είναι πλήρεις και έτσι δεν είναι σε θέση υπακούσουν σε κάποια τάση που θα εφαρμόσουμε.

Σε έναν ημιαγωγό, συμβαίνει περίπου ότι και σε ένα μονωτή αλλά το ενεργειακό

χάσμα ανάμεσα στις στοιβάδες είναι πιο μικρό. Στη πραγματικότητα, κάποια από τα ηλεκτρόνια μπορούν να ανυψωθούν από τη ζώνη σθένους και να υπερπηδήσουν στη ζώνη μεταβίβασης απλώς απορροφώντας ενέργεια, υπό μορφήν θερμότητας, την οποία προσλαμβάνουν από τις μικρές ανεπαίσθητες κινήσεις που συμβαίνουν στα άτομα και στη κρυσταλλική δομή του ημιαγωγού όταν βρίσκεται σε θερμοκρασία δωματίου. Τα ηλεκτρόνια αυτά που προωθούνται στην ανώτερη στοιβάδα με αυτό το τρόπο μπορούν να δημιουργήσουν ροή ηλεκτρικού ρεύματος εάν εφαρμόσουμε ηλεκτρικό πεδίο. Το ενδιαφέρον που συμβαίνει με αυτή τους τη μεταπήδηση, είναι πως, φεύγοντας τα ηλεκτρόνια για την ανώτερη στοιβάδα αφήνουν πίσω τους μια κενή θέση, μια οπή στη στοιβάδα σθένους, η οποία ελλείπει ηλεκτρονίου αποκτά θετικό φορτίο και συμβάλλει στη δημιουργία ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Από τη στιγμή που το πλήθος των φορτισμένων φορέων (ηλεκτρόνια ή οπές) σε έναν ημιαγωγό είναι μικρότερο από ότι στα μέταλλα, τον καθιστά να μεν “χειρότερο” σαν αγωγό αλλά καλύτερο από ότι ένα μονωτή. Το ακριβές μέγεθος του ενεργειακού χάσματος στους ημιαγωγούς, το ποσό δηλαδή της ενέργειας που χρειάζεται ένα ηλεκτρόνιο ώστε να κάνει το άλμα του στη ζώνη μεταβίβασης, είναι σημαντική και χρήσιμη ποσότητα και μετρείται σε electron volts (eV). Ένα eV είναι η ενέργεια που θα απορροφήσει ένα ηλεκτρόνιο όταν του εφαρμόσουμε τάση 1 volt. Στους περισσότερους ημιαγωγούς το ενεργειακό χάσμα ανάμεσα στη ζώνη σθένους και στη ζώνη μεταβίβασης είναι 1eV. Αυτό το ποσό ενέργειας είναι περίπου 30 φορές μεγαλύτερο από το πόσο της θερμικής ενέργειας που παράγει ένας ημιαγωγός όταν βρίσκεται σε θερμοκρασία δωματίου. Ο αριθμός των ηλεκτρονίων που θα περάσουν στην ανώτερη στοιβάδα εξαρτάται κατά πολύ από τη θερμοκρασία του υλικού, έτσι οι ημιαγωγοί με μεγαλύτερο ενεργειακό χάσμα προτιμώνται αφού οι αλλαγές στη θερμοκρασία δε τους επηρεάζουν τόσο πολύ. Αυτός είναι και ο λόγος που είναι προτιμότερο το πυρίτιο από το γερμάνιο ή άλλα υλικά. Αν, όμως, χαμηλώσουμε τη θερμοκρασία ενός ημιαγωγού και τη κρατήσουμε σε σταθερό επίπεδο, τότε θεωρητικά η μεταπήδηση λόγω θερμότητας ενός ηλεκτρονίου στην εξωτερική στοιβάδα μπορεί να σταματήσει να συμβαίνει.

Για να δούμε πως χρησιμοποιείται το πυρίτιο στην αντίχενυση του φωτός θα πρέπει να θυμηθούμε και πάλι τη κβαντική φύση του φωτός αλλά και το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Και μιλώντας με ορολογίες του μικρόκοσμου ένα πακέτο ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας δεν είναι άλλο από ένα φωτόνιο! Όταν ένα φωτόνιο απορροφάτε στο πυρίτιο

η ενέργεια του μεταφέρεται στο ηλεκτρόνιο που μπορεί να το μετατοπίσει στην επόμενη στοιβάδα και στη ζώνη μεταβίβασης. Απο τη στιγμή που το ηλεκτρόνιο φθάσει στη ζώνη μεταβίβασης, μπορεί να περιπλανηθεί στον ημιαγωγό και αφήνει πίσω του, όπως προαναφέραμε μια “οπή”. Αυτή η ελεύθερη κίνηση εδώ τιθασεύεται και πάλι εφαρμόζοντας ηλεκτρικό πεδίο τοποθετώντας ηλεκτρόδια ή πύλες που συνδέονται σε μια μπαταρία ή κάποια άλλη πηγή. Αυτό το μοντέλο είναι μια απλή εφαρμογή μιας μορφής φωτοδιόδου. Όσο περισσότερα φωτόνια απορροφώνται ανά μονάδα χρόνου τόσο μεγαλύτερο το φορτίο.

Πολλές από τις δομές και τις τεχνικές κατασκευής που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων πυριτίου βασίζονται στις ιδιότητες του διοξειδίου του πυριτίου, SiO_2 . Για το λόγο αυτό η αξιόπιστη παρασκευή SiO_2 είναι εξαιρετικά σημαντική. Στη πραγματικότητα, σε αντίθεση με άλλα επίσης ανταγωνιστικά υλικά, το πυρίτιο έχει επικρατήσει στη βιομηχανία ημιαγωγών έχει εύκολα επεξεργάσιμο οξείδιο, δηλαδή είναι εύκολη η ανάπτυξη και η χάραξη του.

Η απορρόφηση των φωτονίων στο πυρίτιο ως εφαρμογή του φωτοηλεκτρικού φαινομένου έχει να κάνει με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, κατ' επέκταση με την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η ερυθρή ακτινοβολία (χαμηλής ενέργειας) περνάει στα βαθύτερα στρώματα μέχρι να απορροφηθεί. Τελικά, η πιο κόκκινη ακτινοβολία -αν μπορούμε να την αποκαλέσουμε έτσι- με τη χαμηλότερη ενέργεια δεν είναι ικανή να ανυψώσει ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη μεταβίβασης. Αυτό απλά σημαίνει, ότι για κάθε ημιαγωγό, υπάρχει ένα φως συγκεκριμένου μήκους κύματος, πέρα από το οποίο (όσο πιο κόκκινο δηλαδή) ο ημιαγωγός παραμένει εντελώς ανενεργός ακριβώς επειδή τα φωτόνια δεν “κουβαλούν” αρκετή ενέργεια για να καλύψουν το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού. Στη κυματική φυσική αυτό το μήκος κύματος δίνεται από το τύπο:

$$\lambda_g = h c / E_g$$

Όπου h είναι η σταθερά Planck, c η ταχύτητα του φωτός και E_g το ελάχιστο ενεργειακό χάσμα.

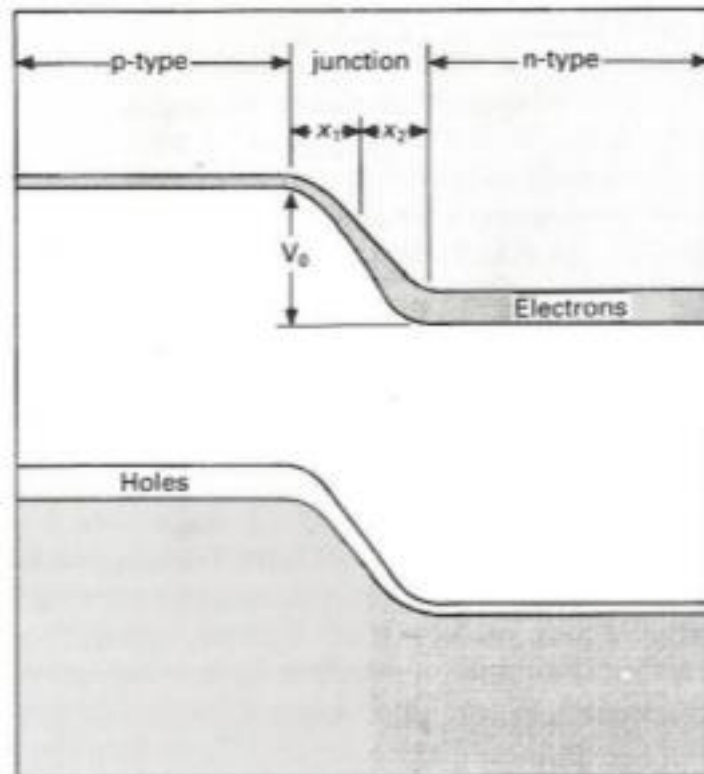
Στο πίνακα παρακάτω αναγράφονται ενδεικτικά κάποιοι γνωστοί ημιαγωγοί και το κατώφλι μήκους κύματος ακτινοβολίας που τους διεγείρει (Cut-Off Wavelength)

Όνομα	Σύμβολο	Θερμοκρασία (K)	Ενεργειακό Χάσμα (eV)	Cut-Off wavelength(μm)
Cadmium sulphide	CdS	296	2.4	0.5
Cadmium Selenide	CdSe	295	1.8	0.7
Gallium Arsenide	GaAs	295	1.35	0.92
Silicon	Si	295	1.12	1.11
Germanium	Ge	295	0.67	1.85
Lead Sulphide	PbS	295	0.18	6.9

Όταν άτομα πυριτίου επίτηδες αντικατασταθούν με άλλα άτομα μέσα στη δομή του ημιαγωγού τότε έχουμε νοθευμένο ημιαγωγό. Εάν αυτό το συγκεκριμένο μη αυθεντικό άτομο έχει περισσότερα ηλεκτρόνια σθένους από ότι ο ημιαγωγός, τότε θα "χαρίσει" τα παραπάνω ηλεκτρόνια στη ζώνη μεταβίβασης. Έτσι ο ημιαγωγός θα έχει αρνητικό φορτίο και από το αγγλικό negative χαρακτηρίζεται ως n-type. Αντίθετα, εάν το άτομο που έχει παρεισφρήσει έχει λιγότερα ηλεκτρόνια σθένους από τον ημιαγωγό, τότε μια θετικά φορτισμένη οπή θα υπάρξει στη ζώνη σθένους έτοιμη να δεχτεί οποιοδήποτε ηλεκτρόνιο. Αυτός είναι ένας p-type ημιαγωγός. Στους p-type ημιαγωγούς υπάρχει περίσσεια οπών και έτσι τα ηλεκτρόνια είναι η μειοψηφία των φορέων του φορτίου, το αντίθετο βεβαίως ισχύει για τους n-type ημιαγωγούς. Η ένωση ανάμεσα σε p-type και n-type ημιαγωγούς είναι συνήθης σε διάφορες εφαρμογές και απαντά ως ένωση pn.

Όταν δημιουργείται μια pn ένωση τα ηλεκτρόνια από τη n περιοχή τείνουν να διαχέονται προς τη p περιοχή και "γεμίζοντας" τις θετικά φορτισμένες οπές και με αποτέλεσμα να κάνουν αυτή τη περιοχή περισσότερο αρνητικά φορτισμένη. Παρομοίως όμως, η διάχυση των οπών από την p προς την n περιοχή οδηγεί προς ένα όλο και περισσότερο θετικό δυναμικό. Δημιουργείται έτσι μια στενή περιοχή εκατέρωθεν της

ένωσης όπου χωρίζονται οι φορείς των φορτίων ανάλογα με τη πλειοψηφία τους. Από τη στιγμή που η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων είναι πολύ μεγαλύτερη στη n περιοχή σε σχέση με την p, θα περίμενε κανείς η ροή τους να είναι ασταμάτητη· αλλά δεν είναι και αυτό επειδή η ίδια η διαδικασία της διάχυσης των ηλεκτρονίων χτίζει έναν ηλεκτροστατικό φράγμα το οποίο συγκρατεί τα ηλεκτρόνια που έρχονται ορμητικά από τη n περιοχή. Το μέγεθος αυτού του φράγματος δυναμικού εξαρτάται από τον αριθμό των μη αυθεντικών ατόμων στον ημιαγωγό και είναι ίσο με την απαιτούμενη ενέργεια που έχουν οι στοιβάδες ώστε να παραμένει σταθερό το E_F μέσα στην ατομική δομή του ημιαγωγού. Τι είναι το μέγεθος E_F ; Είναι το επίπεδο Fermi. Είναι η ενέργεια κατά την οποία υπάρχει πιθανότητα 50 τοις εκατό για την ενεργειακή κατάσταση ενός ηλεκτρονίου ή μιας στοιβάδας να καταληφθεί από ένα άλλο ηλεκτρόνιο. Για τους περισσότερους ημιαγωγούς το E_F κινείται ανάμεσα στη ζώνη σθένους και στη ζώνη μεταβίβασης ενώ για έναν n-type ημιαγωγό το επίπεδο Fermi ανεβαίνει προς τη ζώνη μεταβίβασης και αντίθετα σε έναν ημιαγωγό τύπου p το επίπεδο Fermi χαμηλώνει. Το πλάτος της περιοχής της ένωσης αυξάνεται όσο αυξάνουμε το δυναμικό V_0 , όπως αναπαρίσταται στο παρακάτω σχέδιο.



Διάγραμμα ενεργειακής στάθμης μιας p-n ένωσης . Δύο διαφορετικές στρώσεις από ημιαγωγό πυριτίου σε επαφή.

Εάν εφαρμοστεί μια θετική τάση στη p πλευρά της ένωσης αυτή θα τείνει να εξαλείψει το φράγμα δυναμικού που έχει δημιουργηθεί και θα προσέλκυε ηλεκτρόνια. Μια αρνητική τάση στη p πλευρά από την άλλη θα ενίσχυε το φράγμα δυναμικού και θα "άπλωνε" ακόμα περισσότερο τη κενή περιοχή. Αυτές οι καταστάσεις ονομάζονται θετική ή αρνητική κλίση. Γι αυτό και σε μια pn ένωση υπάρχει μια περιοχή που είναι η πιο αρνητικά φορτισμένη και στο άλλο άκρο μια περιοχή που είναι η πιο θετικά φορτισμένη από το σύνολο του ημιαγωγού. Όταν λοιπόν μια φωτεινή ακτίνα κατάλληλου μήκους κύματος προσκρούει και απορροφάται κοντά στην ένωση ένα ζεύγος ηλεκτρονίου – οπής δημιουργείται και η διαφορά δυναμικού που επικρατεί στο εσωτερικό διασπά αυτό το ζεύγος πριν προλάβει να ξαναενωθεί. Τα ηλεκτρόνια σύρονται προς τη περιοχή με το θετικότερο δυναμικό που βρίσκεται στη n-type περιοχή και συμπεριφέρεται σαν πυκνωτής. Σα φυσική συνέπεια βεβαίως όσα αυξάνονται τα συσσωρευμένα ηλεκτρόνια τόσο το θετικό φορτίο εξασθενεί.

Αποθήκευση και Χρονισμός

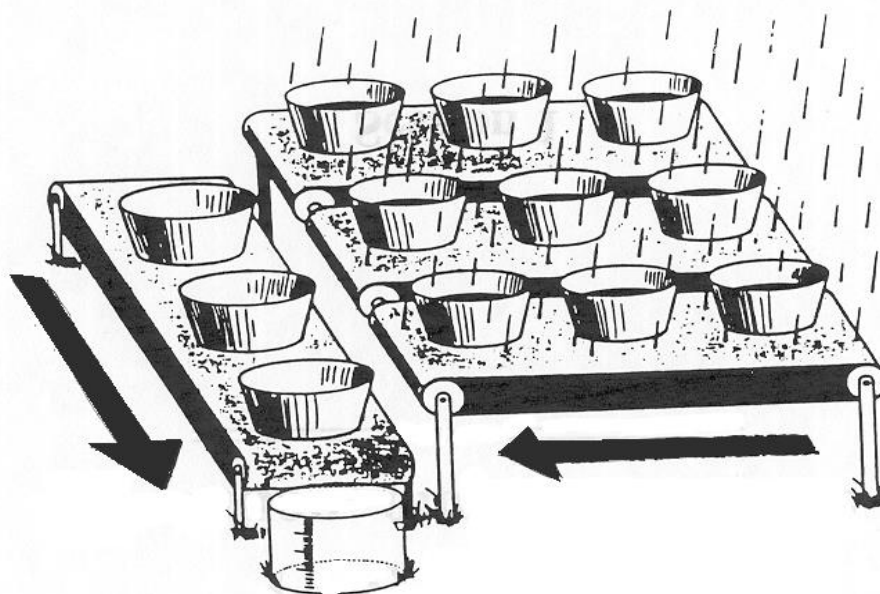
Μπορούμε να θεωρήσουμε την επιφάνεια ενός CCD σαν ένα πλέγμα σκακιέρας από ποικίλα τετραγωνάκια-pixel καθένα από τα οποία απορροφά φωτόνια και χρησιμοποιεί την ενέργεια για να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Αλλά έχοντας σκοπό τη τελική απεικόνιση και τη φωτογραφία, δε θα θέλαμε τα φωτοπαραραγόμενα ηλεκτρόνια να αποκοβόντουσαν και να εγκατέλειπαν το σημείο πρόσκρουσης του αντίστοιχου φωτονίου. Το να παγιδεύσουμε το ηλεκτρόνιο στη περιοχή ενός pixel απαιτεί ένα ειδικό ηλεκτροστατικό πεδίο ώστε να προσελκύσει και να απομονώσει τα ηλεκτρόνια σε ένα συγκεκριμένο σημείο του αισθητήρα. Και τι γίνεται με το επόμενο φωτόνιο, έρχεται αυτόματα η ερώτηση σε κάποιον που έχει βασικές κατασκευαστικές γνώσεις. Προφανώς χρειάζεται να δημιουργηθεί μια περιοχή αποθήκευσης που να μπορεί να αποθηκεύσει πολλά φορτία.

Αυτή η περιοχή αποθήκευσης, στους CCD, υλοποιείται εφαρμόζοντας μεταλλικά ηλεκτρόδια στον ημιαγωγό πυριτίου μαζί με ένα πολύ λεπτό στρώμα (0.1 μm) διαχωρισμού φτιαγμένο από διοξείδιο πυριτίου που δρα και ως μονωτής. Η αρχιτεκτονική αυτή μπορεί και συμπεριφέρεται σαν μια πλάκα πυκνωτή που δεσμεύει φορτίο. Είναι γνωστή κατασκευαστική πατέντα και αποκαλείται δομή MOS. Έτσι ένα ηλεκτρικό πεδίο εμφανίζεται μέσα στη πυκνωτική πλάκα από τη τάση που επικρατεί στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο. Εάν ο ημιαγωγός είναι p-type (που είναι και το σύνηθες) τότε ένα θετικό φορτίο θα απωθήσει τις οπές, που είναι και η πλειοψηφία, και θα εμφανιστεί μια κενή περιοχή όπως σε μια κλασσική περίπτωση pn ένωσης. Όταν ένα φωτόνιο απορροφάται δημιουργείται όπως είπαμε, ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής αλλά η οπή απομακρύνεται από τη κενή περιοχή και το ηλεκτρόνιο κατευθύνεται στο θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο. Ο πυκνωτής τύπου MOS είναι συνδυασμός δύο παράλληλων πυκνωτικών πλακών και η χωρητικότητα τους ανάλογης τις επιφάνειας τους. Από τη στιγμή που το φορτίο εξαρτάται από τη κενή ζώνη, μπορούμε να το αυξομειώσουμε. Αυτή τη κενή ζώνη μπορούμε να τη δούμε σαν ένα "πηγάδι" μέσα στο οποίο μπορούν να αποθηκευτούν πολλά φωτοπαραγόμενα ηλεκτρόνια. Όσο η τάση στα ηλεκτρόδια αυξάνει τόσο αυξάνει και το βάθος αυτού του ηλεκτρικού πηγαδιού. Βέβαια υπάρχει ένα κατώφλι τάσεως που δε πρέπει να το υπερβούμε.

Ήταν τότε που ο Jerry Kristian και ο Morely Blouke επισήμαναν πως το να τραβάς μια φωτογραφία με έναν CCD είναι σαν να μετράς τη βροχόπτωση πάνω από ένα χωράφι! Πράγματι, πολύ παραστατικοί περιγράφοντας με απλά λόγια μια πολύπλοκη διαδικασία που συμβαίνει τόσο στο κβαντικό μικρόκοσμο όσο και μακροσκοπικά σε μια ηλεκτρονική πλακέτα.

Ας φανταστούμε πως έχουμε μερικούς κουβάδες, παρατεταγμένους ομοιόμορφα καλύπτοντας ένα εμβαδό ορθογώνιο παραλληλόγραμμου ισόποσα και ας πούμε πως είναι κατανομημένοι σε παράλληλες ζώνες οι οποίες μπορούν και κινούνται σαν ιμάντες μεταφοράς. Οι ιμάντες αυτοί είναι αρχικά ακίνητοι. Αρχίζει να βρέχει και οι κουβάδες γεμίζουν σιγά-σιγά με νερό. Όταν η βροχή σταματήσει οι γεμάτοι πλέον κουβάδες πρέπει να μεταφερθούν σε έναν μετρητή στην άκρη αυτού του χώρου.

Δηλαδή αφήνουμε τη βροχή να γεμίσει τους κουβάδες, μόλις σταματήσει οδηγούμε τους κουβάδες μέσω των ιμάντων σε έναν τελικό ειδικό σειριακό ιμάντα στο τέλος του ορθογωνίου και κάθετο ως προς τους υπόλοιπους ιμάντες. Ενώ κρατάμε τους ιμάντες ακίνητους, αυτός ο τελικός ιμάντας, φορτωμένος με το πρώτο σετ κουβάδων, αδειάζει το πρώτο κουβά στη σειρά σε μια τελική δεξαμενή, η οποία καταγράφει πόσο νερό περιείχαν. Συνεχίζουμε την ολίσθηση του τελικού ιμάντα ώστε να αδειάσει τον επόμενο κουβά στη τελική δεξαμενή κ.ο.κ. Όταν αδειάσει το πρώτο σετ κουβάδων από το τελικό ιμάντα ξαναολισθαίνουμε τους ιμάντες με τους γεμάτους κουβάδες νερό ώστε να γεμίσει ο τελικός ιμάντας με ένα νεό σετ γεμάτων κουβάδων έτοιμων να αδειάσουν στο τελικό μετρητή. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρις ότου όλοι οι κουβάδες να φτάσουν και να αδειάσουν στο τελικό μετρητή.

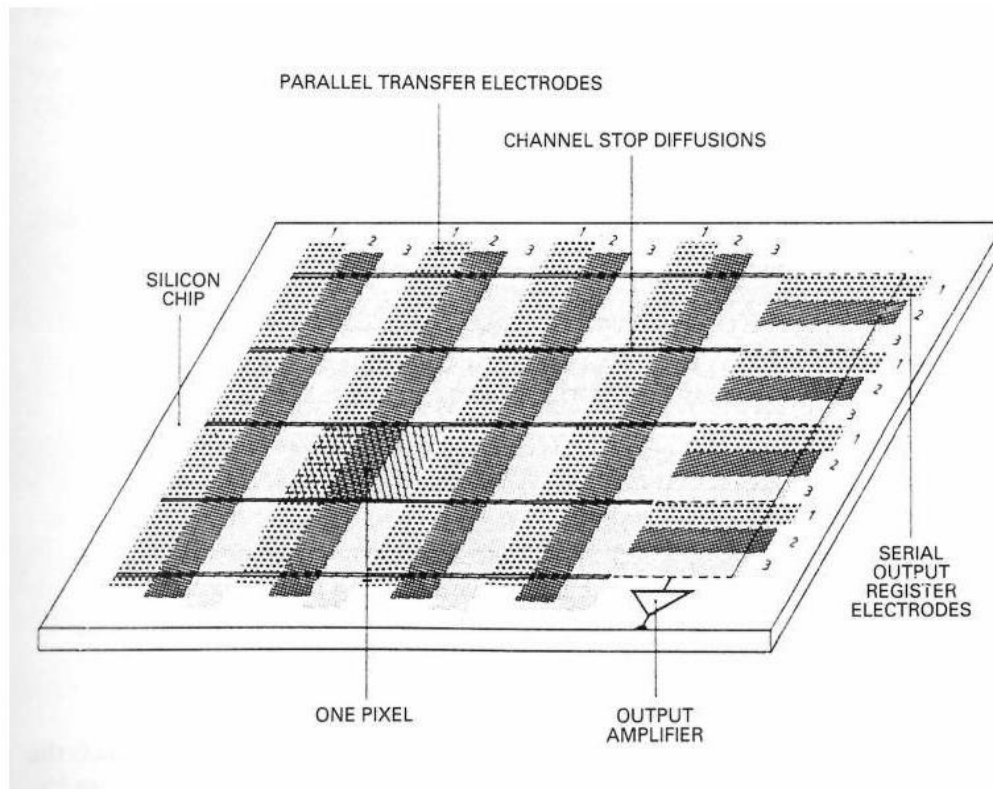


Σχηματική αναπαράσταση της τεχνοτροπίας ενός CCD κυκλώματος με ένα σύστημα απο κάδους γεμάτους με νερό απο φωτόνια!

Στη παραπάνω μεταφορά η επιφάνεια με τους παρατεταγμένους κουβάδες αναπαριστά την ενεργό περιοχή του αισθητήρα. Η βροχή αρχίζει να πέφτει από τη στιγμή που ανοίγει το κλείστρο της φωτογραφικής μηχανής και σταματάει την ώρα που κλείνει (χρόνος που κυμαίνεται από 1/4000 του δευτερολέπτου και φτάνει μερικά λεπτά ή και ώρες εάν το επιθυμεί ο φωτογράφος). Οι κουβάδες είναι τα φωτοστοιχεία που συνθέτουν τα pixels και το νερό της βροχής που γεμίζει τους κουβάδες με ποσότητα-πληροφορία είναι τα φωτόνια που προσκρούουν στα φωτοστοιχεία αυτά. Η λειτουργία με τους ιμάντες και το άδειασμα των κουβάδων στη τελική δεξαμενή είναι η λειτουργία ενός CCD κυκλώματος αφού μετά το τέλος της έκθεσης του αισθητήρα στο φως ένα-ένα τα φωτοστοιχεία περνάνε τη πληροφορία τους σε έναν τελικό ενισχυτή στην άκρη του CCD κυκλώματος ο οποίος τη μετατρέπει σε τάση που μπορεί να επεξεργαστεί.

Μια απλή CCD αρχιτεκτονική βλέπουμε στο σχήμα. Είναι μια δομή CCD τριών φάσεων. Ως βάση ο ημιαγωγός πυριτίου (p-type) καλύπτεται από μια πολύ λεπτή μονωτική στρώση οξειδίου του πυριτίου πάνω στην οποία τοποθετούνται κάποια σετ από τρεις λωρίδες το καθένα. Η μεσαία από τις λωρίδες έχει οριστεί σε πιο θετικό δυναμικό από τις άλλες δύο, και έτσι σε αυτή είναι που συσσωρεύονται τα ηλεκτρόνια. Αυτό που έχουμε καταφέρει είναι να δημιουργήσουμε γύρω από αυτό το ηλεκτρομαγνητικό πηγάδι

δύο τοιχώματα. Δημιουργώντας τεχνητά τη κατάλληλη νοθεία στη κρυσταλλική δομή του πυριτίου, εμφανίζεται ένα στενό πέρασμα το οποίο παρεμποδίζει όποια κίνηση φορτίου βρεθεί εκεί κατά μήκος του ηλεκτροδίου. Αυτό το κατασκευαστικό μοντέλο καθορίζει τα pixels σε μια τέτοια πλακέτα, και τα φωτοπαραγόμενα ηλεκτρόνια κυλάνε και συλλέγονται στο μεσαίο (και θετικότερο) ηλεκτρόδιο, όπως ακριβώς το ορμητικό νερό σε ένα πηγάδι.

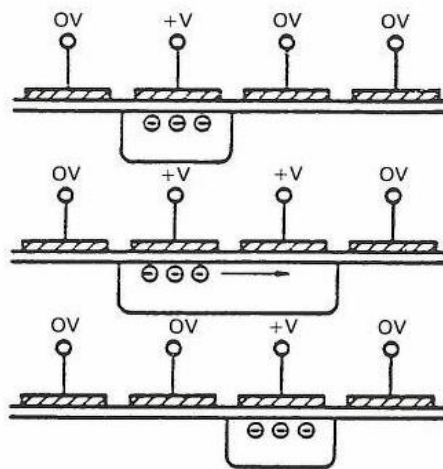


Μια σχηματική κατοπιική αναπαράσταση που μας δείχνει τη βασική διάταξη ενός CCD.

Το νέο χαρακτηριστικό των CCD, στο οποίο χρωστάνε και το όνομα τους, είναι ο τρόπος με τον οποίο, το φωτοπαραγόμενο φορτίο, και ως εκ τούτου, η φωτογραφία, εξάγεται ως ψηφιακή πληροφορία από τη σημείο αποθήκευσης της. Λέγεται Charge Coupling.

Για να γίνει η μεταφορά φορτίου απο το ένα ηλεκτρόδιο στο διπλανό του, πρέπει να ανεβάσουμε τη τάση στο δίπλανό μέχρι να φτάσει στην ίδια στάθμη με το πρώτο. Τα φορτία συνεχίζουν να κυλάνε σαν νερό και μοιράζονται ανάμεσα στους δύο κάδους. Ενώνοντας όλα τα ηλεκτρόδια στη δισδιάστατη επιφάνεια του αισθητήρα μπορούν ταυτόχρονα να μεταφερθούν προς όποια κατεύθυνση. Όταν η τάση στο αρχικό ηλεκτρόδιο

μηδενιστεί, η μεταφορά έχει ολοκληρωθεί, αφού αυτό το σβήσιμο "σπρώχνει" τα φορτία στο διπλανό ηλεκτρόδιο. Από τη στιγμή που χρειάζονται τρία τέτοια ηλεκτρόδια για να ορίσουν ένα pixel, έτσι τρεις τέτοιες μεταφορές θα χρειαστούν για να μετατοπίσουν τη δισδιάστατη αυτή σκακιέρα κατά ένα pixel. Η διαδικασία αύξησης και μείωσης της τάσης επαναλαμβάνεται ξανά και ξανά και είναι ο χρονισμός (clocking) του κυκλώματος. Αυτοί οι παλμοί αναπαρίστανται όπως στο διάγραμμα της κυματομορφής χρονισμού και είναι εύκολο να παραχθούν ηλεκτρονικά.



Hardware αναπαράσταση της διαδρομής και της αποθήκευσης του φορτίου εντός του CCD κυκλώματος.

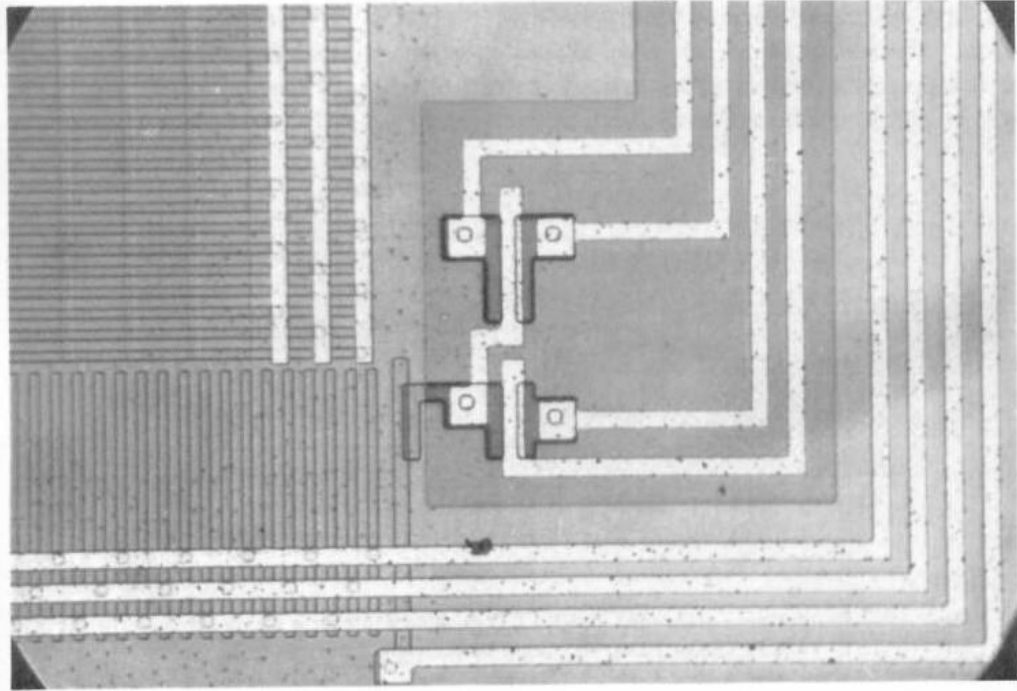
Η έξοδος του κυκλώματος

Μέχρι στιγμής, έτσι όπως έχει περιγραφεί η διαδικασία, αναφέραμε ότι τα φορτία μεταφέρονται στέλνοντας επ'αόριστον clock pulses στα ηλεκτρόδια του κυκλώματος. Αλλά έτσι σε ένα πεπερασμένο CCD κύκλωμα αυτό θα έπρεπε κάπου να τελειώνει. Και φυσικά τα φορτία καταλήγουν στον ειδικά διαμορφωμένο χώρο που ονομάζεται Output Register. Είναι μια ξεχωριστή σειρά από pixel κάθετη στην υπόλοιπη ενεργό περιοχή - όπως εκεί που καταλήγει τελικά το νερό στο παράδειγμα με τους κάδους. Μεταφέρει το φορτίο σειριακά και οριζόντια σε αντίθεση με τις υπόλοιπες σειρές του κυκλώματος. Γι'αυτό και επειδή είναι μια και μοναδική ξεχωριστή σειρά, αποκαλείται σειριακός καταχωρητής ενώ το υπόλοιπο κύκλωμα αποτελείται από παράλληλους καταχωρητές. Στο τέλος αυτής της σειριακής εξόδου υπάρχει ο ενισχυτής εξόδου του κυκλώματος.

Συνοψίζοντας. Μια ολοκληρωμένη διαδικασία χρονισμού ενός CCD κυκλώματος αποτελείται από τις εξής διαδικασίες:

1. Μια κάθετη μετατόπιση συνολικά ολόκληρης της εικόνας κατά ένα pixel. Αυτό μεταφέρει μια σειρά φορτίου στο καταχωρητή εξόδου.
2. Μια οριζόντια μετατόπιση όλων των pixel του καταχωρητή εξόδου. Αυτό μεταφέρει το κάθε φορτίο αυτής της σειράς στο τελικό ενισχυτή εξόδου, ένα pixel τη φορά. Εκεί το φορτίο ανιχνεύεται και μετατρέπεται σε τάση η οποία μετρείται και καταγράφεται.
3. Η επόμενη κάθετη μετατόπιση. Έτσι έρχεται η επόμενη σειρά της εικόνας.
4. Η επόμενη οριζόντια μετατόπιση κ.ο.κ.

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να διαβαστούν όλες οι σειρές και να καταλήξουν στο καταχωρητή εξόδου και στον τελικό ενισχυτή. Γενικά τα pixel του καταχωρητή εξόδου είναι μεγαλύτερα από τα υπόλοιπα, βασικά, pixel ώστε να έχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα και να είναι λιγότερο επιρρεπής στο θόρυβο.



Μικρογραφία της εξόδου του CCD κυκλώματος. Οι βασικοί παράλληλοι καταχωρητές και ο σειριακός καταχωρητής κάθετοι μεταξύ τους. Βλέπουμε επίσης και τον ενισχυτή εξόδου.

Φωτολιθογραφία

Λιθογραφία (lithography) είναι η διαδικασία αποτύπωσης (patterning) ορισμένων δομών, δηλαδή γεωμετρικών σχημάτων, πάνω σε κάποια επιφάνεια. Για να αποτυπωθούν αυτές οι δομές απαιτείται η χρήση μιας πρότυπης μάσκας, η οποία να έχει αποτυπωμένη πάνω της μια μήτρα αυτών των δομών. Ανάλογα με το είδος της ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται, η λιθογραφία διακρίνεται σε οπτική λιθογραφία, λιθογραφία με ακτίνες Χ και λιθογραφία ηλεκτρονικής δέσμης. Κατά την οπτική λιθογραφία η αποτύπωση γίνεται με τη διέλευση φωτός μέσα από τη μάσκα, η οποία είναι κατασκευασμένη από χαλαζία ή πλαστικό. Αυτή είναι γενικά η φωτολιθογραφία. Ο σχεδιασμός της μάσκας, όπου είναι απαραίτητη παράμετρος στη τεχνική της φωτολιθογραφίας, γίνεται με κλασικά προγράμματα σχεδίασης (AUTOCAD), για τις απλές διατάξεις. Η μάσκα διαθέτει σκοτεινές (μη διαπερατές από το φως) και φωτεινές (διαπερατές από το φως) περιοχές.

Στη φωτολιθογραφία οι περιοχές νόθευσης πυριτίου, πολυπυριτίου, μετάλλων και επαφών ορίζονται με τη χρήση μασκών. Δηλαδή, στις περιοχές που καλύπτονται από τη μάσκα μπορεί να μη συμβεί εμφύτευση ιόντων ή το στρώμα πυριτίου να παραμείνει άθικτο. Στις περιοχές όπου δεν υπάρχει μάσκα μπορεί να γίνει εμφύτευση ιόντων, ή ο ημιαγωγός να αποκολληθεί μέσω εγχάραξης (etching). Η αποτύπωση των επιθυμητών μοτίβων είναι το αποτέλεσμα της λιθογραφίας. Το δισκίο καλύπτεται με το φωτοευαίσθητο υλικό και υπόκειται σε επιλεκτικό φωτισμό μέσω φωτομασκών. Βέβαια, ύστερα από την αρχική δημιουργία μοτίβων πάνω στο φωτοευαίσθητο υλικό, υπάρχουν και άλλα στρώματα φραγής(π.χ. Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, διοξειδίο του πυριτίου ή νιτρίδιο του πυριτίου) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φυσικές μάσκες πάνω στο ολοκληρωμένο.

Μια τέτοια φωτομάσκα κατασκευάζεται από γυαλί χαλαζία, το οποίο επικαλύπτεται από χρώμιο. Για την έκθεση του δισκίου στο φως επιλέγουμε μια πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται σχηματικά η διαδικασία της φωτολιθογραφίας. Η φωτομάσκα έχει χρώμιο στις περιοχές που δε θέλουμε να εκτεθούν στο φως. Το υπεριώδες φως πέφτει στη μάσκα απο τη πίσω πλευρά και διαπερνά τις περιοχές που δεν είναι καλυμμένες με χρώμιο, για την έκθεση του φωτοευαίσθητου υλικού με το οποίο είναι καλυμμένο το δισκίο. Στη συνέχεια ένα υλικό εμφάνισης

αναλαμβάνει το ρόλο να διαλύσει τα μέρη του υλικού που δεν έχουν εκτεθεί στο φως με αποτέλεσμα να παραμείνουν μόνον νησίδες του φωτοευαίσθητου μη διαλυτού υλικού που εξετέθη στην υπεριώδη ακτινοβολία. Αυτό το φωτοευαίσθητο υλικό που έχει απομείνει χαρακτηρίζεται ως αρνητικό. Εν αντιθέσει ένα θετικό φωτοευαίσθητο υλικό είναι κατ' αρχήν μη διαλυτό και γίνεται διαλυτό όταν εκτεθεί σε υπεριώδες φως. Τα θετικά φωτοευαίσθητα υλικά παρέχουν υψηλότερη ανάλυση από τα αρνητικά, αλλά επιδεικνύουν μειωμένη ευαισθησία στο φως. Δεδομένης της συνεχούς μείωσης των διαστάσεων των στοιχείων, οι στρώσεις του φωτοευαίσθητου υλικού πρέπει να γίνονται ολοένα και πιο λεπτές Αυτό βέβαια με τη σειρά του σα φαινόμενο μπορεί να μειώσει την αξιοπιστία της κατασκευαστικής διαδικασίας και να τη καθιστά πιο επιρρεπή σε αστοχίες και σφάλματα, πράγμα το οποίο μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την απόδοση της παραγωγής αλλά και το κόστος παραγωγής του ολοκληρωμένου.

Η φωτομάσκα στη γλώσσα της λιθογραφίας αποκαλείται και πλέγμα (reticle) και είναι συνήθως μικρότερη από το δισκίο. Ένας βηματιστής μετακινεί το πλέγμα σε διαδοχικές θέσεις, για τη πλήρη έκθεση του δισκίου. Συνήθως χρησιμοποιείται εκτύπωση προβολής, δηλαδή χρησιμοποιούνται φακοί ανάμεσα στο πλέγμα και στο δισκίο για να εστιάσουν το μοτίβο στην επιφάνεια του δισκίου. Σε παλαιότερες τεχνικές περιλαμβανόταν η εκτύπωση επαφής, όπου η μάσκα και το δισκίο βρίσκονταν σε επαφή το ένα με το άλλο αλλά και η εκτύπωση εγγύτητας που μάσκα και δισκίο βρίσκονταν πολύ κοντά αλλά όχι σε επαφή. Το πλέγμα μπορεί να έχει το ίδιο μέγεθος με την επιφάνεια πάνω στην οποία θα αποτυπωθεί το μοτίβο ή μεγαλύτερο.

Το μήκος κύματος της φωτεινής πηγής είναι αυτό που επηρεάζει το ελάχιστο εκτυπώσιμο μέγεθος στοιχείου. Το ελάχιστο βήμα απόστασης μιας τεχνολογίας κατασκευής ορίζεται ως $2b$. Η ανάλυση ενός φακού εξαρτάται από το μήκος κύματος (λ) του φωτός και το αριθμητικό διάφραγμα του φακού (NA):

$$2b = k_1 \frac{\lambda}{NA}$$

Το αριθμητικό διάφραγμα υπολογίζεται ως:

$$NA = n \sin(\alpha)$$

όπου n ο δείκτης διάθλασης του μέσου (1 για αέρα, 1,33 για νερό και έως 1,5 για έλαιο) και α είναι η γωνία αποδοχής του φακού. Η αύξηση του α απαιτεί μεγαλύτερα οπτικά στοιχεία. Οι φακοί που χρησιμοποιούνταν κατά τη δεκαετία του '70 είχαν αριθμητικό διάφραγμα 0.2. Η Intel χρησιμοποιεί αριθμητικό διάφραγμα 0.92 για τη δική της τεχνολογία κατασκευής. Οι Nikon και ASML ξεπέρασαν το φράγμα του 1 εισάγοντας τη τεχνική της λιθογραφίας με εμβάπτιση, η οποία αξιοποιεί τομ υψηλότερο δείκτη διάθλασης του νερού, ενώ το 2008 επετεύχθη $NA = 1.35$. Για όλες αυτές τις εξελίξεις ανα τα χρόνια χρειάστηκαν επενδύσεις εκατομμυρίων δολαρίων σε οπτικά συστήματα. Το k_1 , στην αρχική μας εξίσωση, εξαρτάται από τη συνοχή του φωτός, της χρησιμοποιούμενες αντανακλαστικές επιστρώσεις, τις παραμέτρους των φωτοευαίσθητων υλικών και τις τεχνικές βελτίωσης της ανάλυσης. Στη παρούσα κατάσταση το 0.8 θεωρείται εύκολο ενώ το 0.5 πολύ δύσκολο.

Το βάθος εστίασης (depth of field), άρρηκτα συνδεδεμένο με το διάφραγμα, υπολογίζεται από τη σχέση

$$DOF = \frac{k_2 \lambda}{NA^2}$$

Όπου το k_2 κυμαίνεται από 0.5 έως 1. Τα προηγμένα λιθογραφικά συστήματα με μικρά μήκη κύματος και μεγάλα αριθμητικά διαφράγματα έχουν πολύ ρηχό βάθος πεδίου, πράγμα το οποίο απαιτεί η επιφάνεια του δισκίου να διατηρείται αυστηρά επίπεδη.

Κατά τη δεκαετία του '80 χρησιμοποιούνταν λυχνίες υδραργύρου με μήκη κύματος 436 nm ή 365 nm. Στη τεχνολογική γενιά των 0.25 μm υιοθετήθηκαν τα λέιζερ υπεριώδους φωτός (excimer) με μήκος κύματος 248 nm (βαθύ υπεριώδες), τα οποία και χρησιμοποιήθηκαν έως και τη τεχνολογία των 180 nm. Επι του παρόντος χρησιμοποιούνται λέιζερ αργού-φθορίου στα 193 nm για τις κρίσιμες στρώσεις, έως τη τεχνολογία των 45 nm αλλά και μετά από αυτή. Οι κρίσιμες στρώσεις είναι αυτές που καθορίζουν τη συμπεριφορά του στοιχείου. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα είναι οι μάσκες για τη πύλη (πολυπυρίτιο), την πηγή/υποδοχή, τη πρώτη στρώση μετάλλου και τις επαφές. Με ένα τέτοιο λέιζερ, αριθμητικό διάφραγμα 1.35 και $k_1=0.5$, το βέλτιστο επιτεύξιμο

βήμα απόστασης (pitch) είναι $2b=72$ nm, το οποίο αντιστοιχεί σε μισό βήμα απόστασης (halfpitch) 36 nm για το πολυπυρίτιο. Είναι εκπληκτικό το γεγονός ότι μπορούμε να εκτυπώνουμε χαρακτηριστικά τόσο πολύ μικρότερα από το μήκος κύματος του φωτός, αλλά ακόμα κι έτσι η λιθογραφική μέθοδος εκτύπωσης αρχίζει να θέτει σοβαρά προβλήματα από τη γενιά των 45 nm και κάτω.

Οι προσπάθειες ανάπτυξης λιθογραφικών συστημάτων βαθέως υπεριώδους στα 157 nm υπήρξαν ανεπιτυχής και έχουν εγκαταλειφθεί, προς το παρόν, από τη βιομηχανία. Στο μέλλον θα μπορούσαν ίσως να χρησιμοποιηθούν πηγές ακραία υπεριώδους ακτινοβολίας (extreme ultraviolet, EUV) στα 13.5 nm, ωστόσο, επι του παρόντος απαιτούν απαγορευτικά ακραία ακριβά οπτικά συστήματα και επεξεργασία εν κενώ, ενώ δεν είναι επαρκώς ισχυρές για σκοπούς παραγωγής.

Τα μήκη κύματος που είναι συγκρίσιμα ή μεγαλύτερα από το μέγεθος στοιχείου προκαλούν παραμόρφωση στα μοτίβα που εκτίθενται στο φωτοευαίσθητο υλικό, Υπάρχουν τεχνικές αύξησης της ανάλυσης γνωστές ως RET (resolution enhancement techniques), οι οποίες αντισταθμίζουν αυτή τη παραμόρφωση, ώστε να επιτυγχάνονται τα επιθυμητά μοτίβα. Αυτές οι τεχνικές προϋποθέτουν τη τροποποίηση του πλάτους, της φάσης ή της κατεύθυνσης του εισερχόμενου φωτός. Οι απολήξεις μιας γραμμής σε ένα φυσικό σχέδιο δέχονται λιγότερο φως από ότι δέχεται το κέντρο, προκαλώντας ανομοιόμορφη έκθεση. Η τεχνική της οπτικής διόρθωσης εγγύτητάς, εφαρμόζει μικρές αλλαγές στα μοτίβα των μασκών για την αντιστάθμιση των τοπικών αυτών παραμορφώσεων. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει ένα παράδειγμα εκτύπωσης με και χωρίς οπτική διόρθωση εγγύτητάς. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζει εκ των προτέρων παραμόρφωση στις γωνίες για να μειώσει το ανεπιθύμητο στρογγύλεμα τους.

Οι μάσκες μετατόπισης φάσης PSM, εκμεταλλεύονται την επίδραση του φαινομένου διάθλασης στις παράλληλες γραμμές μιας μάσκας, μεταβάλλοντας το πάχος της μάσκας για να αλλάξουν τη φάση του φωτός, έτσι ώστε το φως από γειτονικές γραμμές να είναι εκτός φάσης και να ακυρώνεται στα σημείο που δεν είναι επιθυμητό. Ο φωτισμός εκτός άξονα μπορεί επίσης να βελτιώσει την αντίθεση σε ορισμένους τύπους επαναλαμβανόμενων μοτίβων υψηλής πυκνότητας.

Η μέθοδος της διπλής αποτύπωσης μοτίβου χρησιμοποιεί μια αλληλουχία δύο απόλυτα ευθυγραμμισμένων βημάτων έκθεσης με διαφορετικές μάσκες για το ίδιο στρώμα

φωτοευαίσθητου υλικού. Η μέθοδος OPC κατέστη αναγκαία στη γενιά των 180 nm, ενώ όλες οι προαναφερθείσες τεχνικές χρησιμοποιούνται κατά κόρον από τη γενιά των 45 nm και μετά.

Κάθε επόμενος βηματιστής UV είναι ακριβότερος από τους προηγούμενους, ενώ η ρυθμοαπόδοση του μπορεί να είναι μειωμένη. Αυτό είναι ένα ακόμη από τα ζητήματα που συμβάλλουν στο διαρκώς αυξανόμενο κόστος κατασκευής ολοκληρωμένων. Το κόστος των ίδιων των μασκών είναι επίσης εξαιρετικά υψηλό, γεγονός το οποίο ανάγκασε τους σχεδιαστές ολοκληρωμένων να είναι εξονυχιστικοί σε ζητήματα όγκου παραγωγής.

Η Ιστορία των CMOS

Από τα μέσα της δεκαετίας του 1960 οι ιδιότητες των p-n ημιαγωγών χρησιμοποιούνταν για να μετατρέπουν το φως σε ηλεκτρικό φορτίο. Η έρευνα αυτή δε περιορίστηκε στο να χρησιμοποιούν απλώς αυτό το φορτίο, αλλά εξελίχθηκε σε τεχνολογία απεικόνισης διαβάζοντας το σήμα σε συστοιχίες απο φωτοδιόδους, δηλαδή pixel. Παράδειγμα είναι οι Shuster και Strull όπου στο 1965 ανέφεραν πως κατασκεύασαν έναν πίνακα αποτελούμενο απο 2.500 pixel και 100 εξόδους προς ανάγνωση. Σε αυτά τα πρωτόλεια ολοκληρωμένα αναγκαστικά χρησιμοποιήθηκαν υψηλοί συντελεστές κέρδους στα pixel τους αφού δεν υπήρχε καλή ενίσχυση τους φωτός και του κατ επέκταση του φορτίου. Ένα χρόνο αργότερα ο Weckler επιδεικνύει τη λειτουργία ενός p-n ημιαγωγού για χρήση προς απεικόνιση , σε πολύ απλούστερη και μικρότερη κατασκευαστική μορφή.

Η διαδικασία αυτή απαιτούσε τα φωτοστοιχεία να παραμένουν ενεργά για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο θα διοχετευόταν και θα επεξεργαζόταν (θα αυξανόταν ή θα μειώνονταν) η τάση σε έναν αποθηκευτικό χώρο στο ολοκληρωμένο. Έτσι το φορτίο (το προστιθέμενο ή το αφαιρούμενο) είναι ανάλογο της έντασης της εισερχόμενης φωτεινής ακτινοβολίας μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα.

Αργότερα, τη δεκαετία του 1970 οι CMOS αισθητήρες αρχίζουν να χάνουν τη δημοτικότητα τους, λόγω της εμφάνισης της CCD τεχνολογίας, της οποίας όπως αναφέρθηκε εκτενέστατα, η αποδοχή ήταν τεράστια. Η αναγκαιότητα για την ύπαρξη τρανζίστορ πίσω από κάθε pixel αλλά και τα υψηλότερα επίπεδα θορύβου σε σχέση με τους CCD ανάγκασαν τους CMOS να μείνουν πίσω, την τότε εποχή και στις ταχύτατα αναπτυσσόμενες δεκαετίες του 1980 και 1990 μεσουράνησαν οι CCD. Πάντως σίγουρα δεν εξαφανίστηκαν τελείως και μελέτες πάνω στη μείωση της κατανάλωσης σε συσκευές που δουλεύουν με μπαταρίες, προκάλεσε την επανεμφάνιση τους.

Υπάρχουν δύο διαφορετικές τεχνολογίες CMOS αισθητήρων και αυτές είναι οι active ή passive pixel sensors. Οι παθητικοί παρουσιάζουν πολύ θόρυβο αφού δεν έχουν ενισχυτή πίσω από κάθε pixel, και το ηλεκτρικό σήμα που γεννάται από το γυμνό φως που διεγείρει τα φωτοστοιχεία τους. Η τεχνολογία που τους κάνει πλέον ευρέως αποδεκτούς είναι η active pixel sensor (APS) κατασκευαστική τεχνολογία. Έχει να κάνει με τη

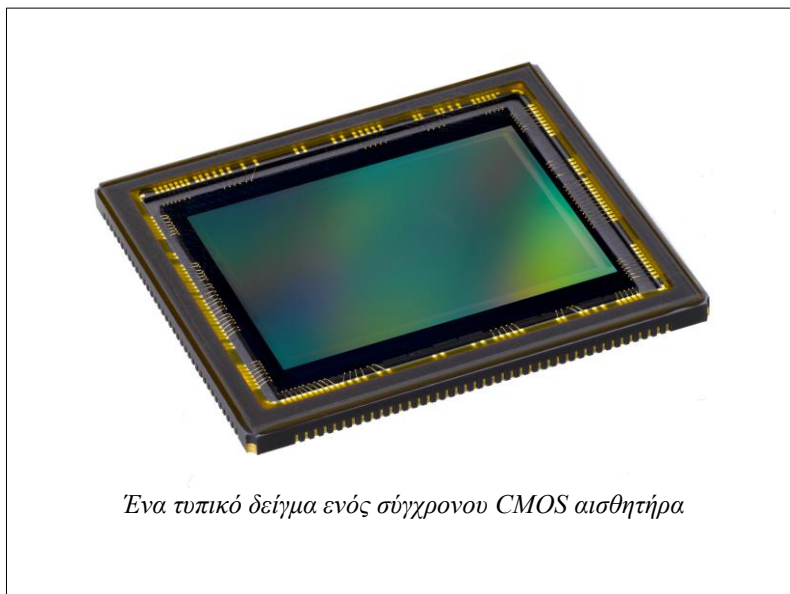
γραμμική διαχείριση, μέτρηση, και αποθήκευση του φωτός, όπως υπάρχει και το active column sensor (ACS) που είναι σχεδιαστικά παρόμοιο, όμως πετυχαίνει χαμηλότερα επίπεδα θορύβου.

Το ότι αποτελούνται από απλά ολοκληρωμένα της οικογένειας CMOS τους κάνει πολύ ευέλικτους στην αγορά. Οικονομικότεροι και πολύ χαμηλοί σε κατανάλωση οι CMOS sensors κατέχουν πλέον μεγάλο κομμάτι της αγοράς γύρω από την εικόνα. Επίσης είναι πολύ γρήγοροι σε read-out frames. Δηλαδή όταν μιλάμε για καταγραφή απλού βίντεο όχι ιδιαίτερα υψηλής ανάλυσης, τα 30 π.χ. καρέ το δευτερόλεπτο είναι όντως αρκετά, αλλά σε ειδικές εφαρμογές που θέλουμε λεπτομερέστατη καταγραφή (π.χ. Η πορεία μιας σφαίρας που διαπερνάει ένα στερεό σώμα) εκεί χρειάζονται χιλιάδες καρέ το δευτερόλεπτο. Εκεί τα ολοκληρωμένα CMOS τα καταφέρνουν με περισσή ευκολία.

Στα μέσα της δεκαετίας του 1980, οι Carver Mead και Misha Mahowald παρουσίασαν το Silicon Retina έναν ημιαγωγό πυριτίου που χρησιμοποιούσε ένα διπολικό τρανζίστορ ως φωτοδέκτη. Έκτοτε ξεκίνησε μια μεγάλη έρευνα που αξιοποιούσε CMOS φωτοανιχνευτές μαζί με CMOS κυκλώματα επεξεργασίας σήματος. Έτσι κατασκευάστηκαν τσιπ με συστοιχίες από *έξυπνα* pixel με περισσότερα τρανζίστορ ανά φωτοστοιχείο από ότι συναντάται σε μια απλή APS-based συστοιχία. Το χαμηλό κόστος των ολοκληρωμένων CMOS κυκλωμάτων, επιτρέπει τη δημιουργία τσιπ με χιλιάδες φωτοστοιχεία να σχεδιάζονται να κατασκευάζονται να μελετώνται και να δοκιμάζονται εργαστηριακά. Αυτό οδήγησε στο σχεδιαστικό γεγονός, πως όταν έχουμε τσιπ με κάπως λιγότερα φωτοστοιχεία η υπόλοιπη περιοχή του ημιαγωγού να μη πηγαίνει χαμένη. Το μέρος εκείνο χρησιμοποιείται για ανάγνωση ή επεξεργασία. Έτσι υπάρχει η ανάλογη οικονομία χώρου που είναι και βασική αρχή της λιθογραφίας. Και εδώ αυτή η τεχνολογία κατάφερε και βρήκε γόνιμο έδαφος και μερικές εφαρμογές ενδεικτικά είναι σε εμφυτεύματα αμφιβληστροειδούς, x-ray απεικονίσεις, σε περιπτώσεις πολύ έντονου φωτισμού κ.α.

Ενεργά pixel

Εάν τα τελευταία χρόνια η APS τεχνολογία των CMOS ολοκληρωμένων δεν είχε εκμεταλλευθεί καταλλήλως τότε μάλλον θα είχαν κλειστεί στο χρονοντούλαπο και οι CCD θα μονοπωλούσαν αβίαστα την αγορά. Έτσι με την APS τεχνολογία έχουν κατα ένα ποσοστό αντικαταστήσει τους CCD σε σοβαρές εφαρμογές (smartphones, high-end DSLRs κ.α.) και όχι μόνο διατηρούν όλα τα θετικά στοιχεία που έκαναν τους CCD ανάρπαστους αλλά εξαλοίφει και μερικές από τις αδυναμίες τους.



Μερικά από τα δυνατά τους προτερήματα έναντι των CCD είναι:

- Χαμηλότερο κόστος
- Χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας (100 μέχρι 1000 φορές μικρότερη)
- Ευρύτερη δυναμική περιοχή
- Εμφανίζουν blooming σπανιότερα
- Ανάγνωση κάθε pixel μεμονωμένα
- Λειτουργούν σε χαμηλή τάση
- Λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες
- Ενσωματωμένη on-chip επεξεργασία του σήματος
- Μεγάλες συστοιχίες pixel

Σε μεγαλεπήβολες εφαρμογές απεικόνισης, όπως x-ray φωτογραφία, αστρονομία, μετάδοση τηλεοπτικού σήματος, απαιτούνται, όπως είδαμε, σένσορες μεγάλου format. Και όπως και αναλύσαμε οι CCD αισθητήρες υπηρέτησαν εξαιρετικά αυτό το σκοπό σε ποικίλες εφαρμογές διευρύνοντας κατά πολύ τους πνευματικούς ορίζοντες του ανθρώπινου νου. Ωστόσο οι CCD μεγάλου format έχουν πάρα πολύ μεγάλο κόστος και δύσκολη διαδικασία παραγωγής.

Οι ανάγκες της ποιοτικής επιστημονικής απεικόνισης απαιτούν αυτομάτως μεγάλα φωτοστοιχεία σε πολυάριθμες σειρές, κατ' επέκταση δηλαδή πολύ μεγάλους αισθητήρες τόσο μεγάλους που καθιστά τη CCD υλοποίηση τους σχεδόν απαγορευτική. Επιπλέον η μεγάλη ισχύς και κατανάλωση και η ανάγκη για εξωτερικά κυκλώματα επεξεργασίας καθιστά τους CCD πολλές φορές λιγότερο ελκυστικούς τόσο για επίγειες ή και για διαστημικές εφαρμογές.

Η φασματική απόκριση του αισθητήρα είναι ευθέως ανάλογη με τις φυσικές και φασματικές ιδιότητες του στοιχείου. Για παράδειγμα στη UV και στην x-ray ακτινοβολία οι έμπροσθεν ευαίσθητοι CCD δε λειτουργούν σωστά αφού η απορρόφηση γίνεται στα πρώτα στρώματα. Ένας όπισθεν ευαίσθητος CCD θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη UV ακτινοβολία με αρκετή επιτυχία.

Με τη γενική ορολογία ενεργό pixel θεωρούμε μια φωτοδίοδο με ένα ενεργό τρανζίστορ ενσωματωμένο στο ίδιο το pixel. Έτσι, με την Active Pixel Sensor τεχνολογία δεν υπάρχει η αναγκαιότητα για τέλεια μεταφορά φορτίου δίχως απώλειες –την αχίλλειο πτέρνα θα λέγαμε των CCD. Όπως έχει προαναφερθεί είναι αυτή η αναγκαιότητα και η ειδοποιός διαφορά στους CCD που τους κάνει “θορυβώδεις” στις χαμηλές συνθήκες φωτισμού, δύσκολους στη κατασκευή μεγαλύτερων αισθητήρων, σε χαμηλές θερμοκρασίες, σε μεγάλα framerates και δύσκολους να λειτουργήσουν σε υλικά εκτός του πυριτίου που διευρύνουν τη φασματική απόκριση ενός αισθητήρα. Με τα ενεργά pixel το σήμα μεταφέρεται από τη φωτοδίοδο μέσω ηλεκτροδίων χωρίς να μεταφέρεται αυτούσιο σε άλλο αποθηκευτικό χώρο του ημιαγωγού.

Η συνεχής εξέλιξη στη φωτολιθογραφία οδήγησε σε προηγμένα κυκλώματα ημιαγωγών και όπως στους CCD τη δεκαετία του 1970 και από κει στη τεχνολογία του

APS. Στη νέα APS ιδέα, έχουμε ένα ή περισσότερα τρανζίστορ ενσωματωμένα σε καθένα από τα pixels του φωτοευαίσθητου αισθητήρα που λειτουργούν ως buffers για το σήμα και το οδηγούν στις εξόδους προς ανάγνωση. Σε κάθε στιγμή μόνο μια γραμμή της συστοιχίας είναι ενεργή (αυτόματα η κατανάλωση τους μειώνεται κατά πολύ σε σχέση με τη CCD λογική). Το ενεργό ποσοστό της συνολικής επιφάνειας είναι κατά 50% μεγαλύτερο και με τη χρήση μικροσκοπικών φακών on-chip φτάνει μέχρι το 80%. Η δυναμική περιοχή, η άλλη μεγάλη παράμετρος, παραμένει περίπου στα ίδια επίπεδα με τους CCD. Έτσι το APS διατηρεί τη ποιότητα ενός CCD με τη διαφορά ότι εξαλείφει την αναγκαιότητα για τέλεια μεταφορά φορτίου.

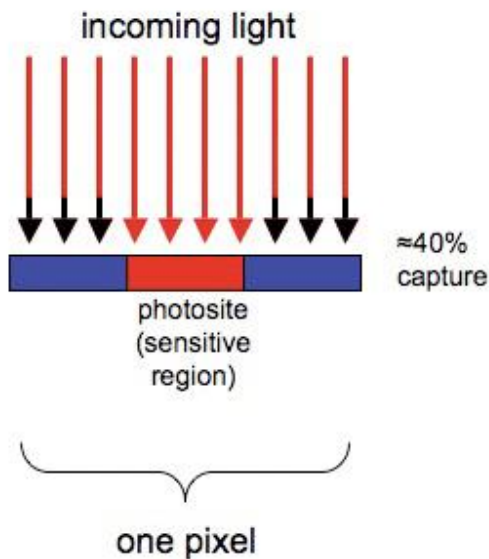
Πάντως, όπως σε όλα τα κυκλώματα έτσι και εδώ η απώλεια μεταφοράς φορτίου μπορεί να είναι μικρή, αλλά υπάρχει και μετριέται πειραματικά. Η μεταφορά φορτίου στους CCD όπως είδαμε, βασίζεται στη μεταφορά *οπών* από το ένα ηλεκτρόδιο στο διπλανό του. Οι οπές αυτές – τα ηλεκτρόνια δηλαδή- πρέπει να μεταφερθούν κάποια εκατοστά μέσα στον όγκο του πυριτίου μέχρι να φτάσουν στην έξοδο προς ανάγνωση και από εκεί στον a/d converter. Ένας κλασικός CCD έχει τρία ηλεκτρόδια σε κάθε φωτοστοιχείο, έτσι σε μια συστοιχία των 1024x1024 pixels, τα ηλεκτρόνια θα πρέπει να μεταφερθούν αρκετές χιλιάδες φορές. Ο λόγος των ηλεκτρονίων που μεταφέρθηκαν επιτυχώς ως προς τα ηλεκτρόνια που έμειναν ανεπιτυχώς πίσω ονομάζεται απόδοση μεταφοράς φορτίου CTE (charge transfer efficiency). Πρέπει να είναι σχεδόν τέλειο, δηλαδή να τείνει στη μονάδα, για να είναι ένας CCD αποδεκτός στα πεδία της επιστημονικής απεικόνισης. Το CTE προκύπτει από το n , το καθαρό κλάσμα του μεταφερόμενου σήματος μετά από m μεταβιβάσεις είναι n^m . Όπως προκύπτει από τον παρακάτω πίνακα το CTF πρέπει να βρίσκεται και να διατηρείται πολύ ψηλά.

ARRAY SIZE	CTE	FRACTION AT OUTPUT
1024x1024	0.999	0.128
	0.9999	0.815
	0.99999	0.980
2048x2048	0.99999	0.960
4096x4096	0.99999	0.921
8192x8192	0.99999	0.849

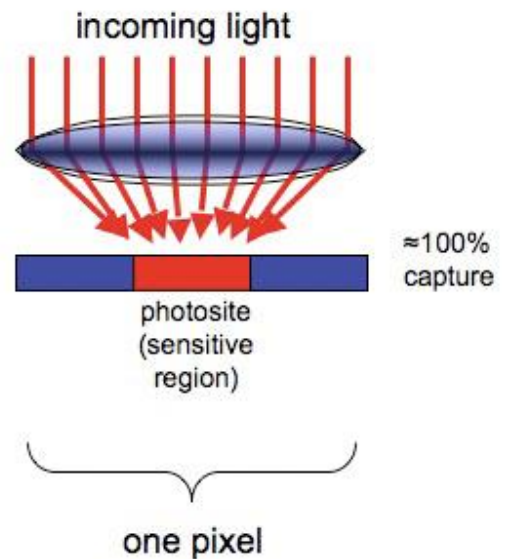
Ένας τυπικός CCD δηλαδή έχει CTE 0.99999 όταν ένας αντιπροσωπευτικός αριθμός ηλεκτρονίων σε ένα πακέτο είναι περίπου χίλια ηλεκτρόνια. Με CTE 0.99999 σημαίνει πως μόνο ένα ηλεκτρόνια χάνεται κάθε 100 μεταφορές! Ένας μόνο φθαρμένος πόρος είναι ικανός να βλάψει την τέλεια ροή των οπών (και συνήθως θα υπάρξει τουλάχιστον ένας). Η αναγκαιότητα και η δυσκολία για τέλεια δομή στο εσωτερικό του ημιαγωγού ήταν η κινητήριος δύναμη για τα ενεργά pixel τα οποία βρήκαν πρόσφορο έδαφος στη CMOS δομή. Ως APS sensor λοιπόν ορίζεται ο αισθητήρας με ένα ή περισσότερα τρανζίστορ στο κάθε pixel του. Τα εμφυτευμένα αυτά ενεργά τρανζίστορ έχουν ρόλο τόσο ενισχυτή όσο και buffer.

Οι CCD αισθητήρες χρησιμοποιούν μικροσκοπικούς φακούς για να εστιάσουν το φως που πέφτει πάνω από κάθε φωτοστοιχείο. Το καλό είναι πως σε μια τέτοια κατασκευή η ευαίσθητη στο φως περιοχή κάθε φωτοστοιχείου ξεχωριστά είναι περίπου το 95% της έκτασης ολόκληρου του φωτοστοιχείου, δηλαδή σχεδόν ολόκληρο το φωτοστοιχείο είναι ευαίσθητο στο φως. Αυτό κάνει τους CCD πολύ αποδοτικούς στο να δεσμεύουν το φως.

Without microlens



With microlens



Όσο λοιπόν τα φωτόνια πέφτουν στα φωτοστοιχεία του σένσορα αυτός “γεμίζει” με πληροφορία. Εάν κατά τη διάρκεια της έκθεσης του στο φως λάβει έναν ικανό αριθμό φωτονίων που ονομάζουμε κατώφλι, τότε αυτό το φωτοστοιχείο είναι ικανό να αναπαραστήσει ένα pixel. Εάν δε ξεπεραστεί αυτό το κατώφλι τότε το pixel θεωρείται χωρίς πληροφορία (μαύρο). Όσο η έκθεση στο φως παρατείνεται και το φωτοστοιχείο συνεχίσει να συλλέγει φως τότε όλο και πιο φωτεινό γίνεται μέχρι που μπορεί να γεμίσει (ή και να υπερχειλίσει) και το αντίστοιχο pixel θα είναι εντελώς λευκό. Πράγματι εάν υπερβολικό φως πέσει σε ένα φωτοστοιχείο τότε υπερχειλίζει και η πληροφορία “χύνεται” και στα γύρω φωτοστοιχεία δημιουργώντας -ανεπιθύμητες συνήθως- λάμπσεις γνωστές στη γλώσσα της φωτογραφίας ως blooming. Σε όλες τις ενδιάμεσες τιμές ο αισθητήρας παράγει pixel που αντιστοιχούν στις αποχρώσεις του γκρι.

Δυναμική Περιοχή

Μια πολύ σημαντική ιδιότητα που χαρακτηρίζει όλους τους ψηφιακούς αισθητήρες είναι η λεγόμενη Δυναμική περιοχή. Η δυναμική περιοχή (dynamic range) στη γλώσσα της φωτογραφίας έχει να κάνει με την ικανότητα του σενσορα να λαμβάνει πληροφορία σε όλο το εύρος, από τον σκοτεινότερο μέχρι τον φωτεινότερο τόνο. Μεταφράζοντας το μαθηματικά, είναι ο λόγος ανάμεσα στη μέγιστη δυνατή πληροφορία προς την ελάχιστη δυνατή. Η έννοια βέβαια της δυναμικής περιοχής δε περιορίζεται μόνο στις φωτογραφικές μηχανές αλλά γενικότερα και σε μια τυπωμένη φωτογραφία, σε ένα μόνιτορ ή σε ένα σκάνερ αλλά και στο πραγματικό κόσμο που αντιλαμβανόμαστε με τα μάτια μας.

Έτσι κάθε συσκευή από τις παραπάνω έχει μια καθορισμένη δυναμική περιοχή. Σε μια τυπωμένη φωτογραφία π.χ. Δε μπορούμε να έχουμε λευκότερο τόνο από το λευκό του χαρτιού ή στην οθόνη κάτι πιο λευκό από το πιο λευκό της pixel. Τα μάτια από την άλλη έχουν το δικό τους εύρος στη δυναμική περιοχή. Έτσι από μέσο σε μέσο αλλάζει η πληροφορία που μεταδίδεται, το τελικό αποτέλεσμα ποικίλει και εντέλει αλλάζει η συγκινησιακή φόρτιση κοιτάζοντας μια εικόνα. Γι αυτό και η δυναμική περιοχή είναι κάτι που απασχολεί πολύ την επιστήμη γύρω από τη τεχνολογία της φωτογραφίας. Άλλωστε, πολύ πριν την επινόηση της φωτογραφικής απεικόνισης ο τρόπος με τον οποίο το φως σκέπαζε τον κόσμο επηρέασε πολύ την αισθητική του σύγχρονου πολιτισμού. Απο την αναγέννηση και αργότερα μοντέρνοι και μεταμοντέρνοι ζωγράφοι ασχολήθηκαν πολύ με το φως και την ατμόσφαιρα που δημιουργεί και δημιούργησαν έργα που έμειναν για πάντα στην ιστορία της τέχνης και στιγμάτισαν με την αισθητική τους. Μια τέτοια δυνατότητα εκ των πραγμάτων δε θα μπορούσε να μην απασχολεί τη φωτογραφία.



Rene Magritte: The empire of light. Ένας θαυμάσιος πίνακας που αν ήταν φωτογραφική αναπαράσταση θα χρειαζόταν μεγάλη δυναμική περιοχή για να αναδείξει την ομορφιά του.

Τι πραγματικά βλέπουν τα μάτια μας;

Το ανθρώπινο μάτι μπορεί να έχει γενικά μεγαλύτερη δυναμική περιοχή από τις φωτογραφικές μηχανές αφού η κόρη του ματιού μπορεί να συστέλλεται ή να διαστέλλεται ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες φωτισμού ώστε να συλλάβει όλο το δυνατό εύρος. Στη γλώσσα της φωτογραφίας συνολικά το ανθρώπινο μάτι μπορεί να δει σε εύρος 24 f-stops. Για να έχει νόημα όμως η σύγκριση με μια φωτογραφική μηχανή πρέπει να συγκρίνουμε με το τι βλέπει το μάτι σε μια συγκεκριμένη σκηνή (σε ένα συγκεκριμένο κάδρο) και να θεωρήσουμε μια στιγμιαία δυναμική περιοχή του ματιού. Δηλαδή εστιάζοντας σε ένα μέρος χωρίς να αφήσουμε το βλέμμα μας να παρασυρθεί. Σε αυτή την υπόθεση αν και πάλι υπάρχουν διαφωνίες, μιας και η ευαισθησία αλλάζει ανάλογα με το φως ή το contrast που επικρατεί και πάλι η δυναμική περιοχή των ματιών ορίζεται ανάμεσα στα 10 έως και 14 f-stops. Το πρόβλημα στο μετρηθεί η ακριβής δυναμική περιοχή των ματιών είναι ότι είναι πολύ προσαρμόσιμα, ανοίγουν δηλαδή πολύ στο σκοτάδι και κλείνουν στο δυνατό φως. Στο βαθύ σκοτάδι μάλιστα πετυχαίνουν ακόμα μεγαλύτερη στιγμιαία δυναμική περιοχή.

Πολλές φορές καλούμαστε να τραβήξουμε μια φωτογραφία που μια μεγάλη δυναμική περιοχή θα ήταν πολύ χρήσιμη. Για παράδειγμα αν είχαμε μαυροντυμένους ανθρώπους σε ένα ολόλευκο χιονισμένο τοπίο ή ένα δυνατό ηλιοβασίλεμα στο φόντο με λεπτομέρειες που θα θέλαμε να φανούν στο έμπροσθεν μέρος ή γενικότερα ένα όχι τόσο καλοφωτισμένο τοπίο με σημαντικές λεπτομέρειες στα σκοτεινά του σημεία. Έτσι, και πάντα σύμφωνα με τις ρυθμίσεις της μηχανής, τα φωτόνια που προέρχονται από τους ιδιαίτερα σκοτεινούς τόνους δε θα “προλάβουν” να παράξουν κάποια πληροφορία στα φωτοστοιχεία, ενώ ταυτόχρονα τα φωτόνια προερχόμενα από τους πολύ φωτεινούς τόνους μάλλον θα παράξουν πολύ περισσότερη πληροφορία από όση μπορεί να αντέξει ο σενσορας προκαλώντας υπερχειλίση ή blooming. Μιλάμε πάντα για τόνους που ενυπάρχουν στο ίδιο κάδρο και για την ίδια λήψη. Αυτό έχει σημασία γιατί αν έχουμε τη μηχανή μας στο αυτόματο η φωτομέτρηση θα δείχνει κάθε φορά και διαφορετικές ρυθμίσεις(διαφράγματος, ταχύτητας κλείστρου και ISO) ανάλογα προς τα που θα τη στρέψουμε. Αν και εδώ ενυπάρχει η υποκειμενικότητα, το -ηλεκτρονικά- ιδανικό θα ήταν με ένα κλικ σε ένα κάδρο που υπάρχουν πολλοί τόνοι να αναπαρασταθούν όλοι(φωτεινοί, μεσαίοι και σκοτεινοί) εξίσου όμορφα και ρεαλιστικά.



Στην εικόνα στα αριστερά οι σκιερόι τόνοι περιέχουν λίγη πληροφορία . Στην εικόνα δεξιά με μεγαλύτερη δυναμική περιοχή αναδεικνύονται τόσο τα φωτεινά σημεία στο φόντο όσο και τα μπροστινά. Η τελική επιλογή είναι πάντα στο χέρι του φωτογράφου.

Όταν το λογισμικό της μηχανής μετατρέπει την εικόνα σε JPG αρχείο τότε λόγω της συμπίεσης που υφίσταται χάνονται πληροφορίες από τα σκιερά ή τα φωτεινά σημεία. Για να δούμε τη πραγματική διαφοροποίηση των τόνων πρέπει να έχουμε το RAW αρχείο που διατηρεί τη πραγματική δυναμική περιοχή που μπορεί να συλλάβει η κάμερα μας. Όπως είπαμε νωρίτερα μπορούμε να παρομοιάσουμε τα φωτοστοιχεία με κάδους που συλλέγουν νερό. Ανάλογα λοιπόν με το που έχει φτάσει η στάθμη του νερού για κάθε κουβά αντιστοίχως δίδεται μια τιμή στο κάθε φωτοστοιχείο για το πόσο φως έχει περισυλλέξει. Για να γίνει αυτή η αλλαγή από την περισύλλεξη φωτονίων και να αποδοθούν τιμές στο κάθε pixel χρησιμοποιείται ένας analog to digital converter, ο οποίος ψηφιοποιεί τις αναλογικές τιμές που έχουν τα φωτοστοιχεία, θα δούμε αναλυτικότερα τη λειτουργία του παρακάτω. Ας πούμε όμως ότι δίνει τιμές απο 0-255 (0 για το πιο σκούρο και 255 για το πιο φωτεινό) αλλά όπως και οι κάδοι έτσι και τα φωτοστοιχεία μπορούν να υπερχειλίσουν. Τι θα συμβεί δηλαδή;

Εάν κατά τη λήψη κάποιιοι φωτοσυλλέκτες υπερχειλίσουνε τότε η τιμή που κανονικά θα τους αναλογούσε θα ήταν μια τιμή μεγαλύτερη του 255. Ο a/d converter όμως δεν έχει αυτή τη δυνατότητα και έτσι όσα pixel ξεπεράσουν αυτό το κατώφλι η τιμή τους γίνεται αυτομάτως 255 -ενώ στη πραγματικότητα είναι διαφορετική- κι έτσι η φωτεινή λεπτομέρεια έχει χαθεί. εάν πάλι μειώναμε το χρόνο έκθεσης ώστε να μη "καούν"

τα συγκεκριμένα pixels τότε ο χρόνος αυτός δε θα ήταν ικανός να καταγράψει τους σκοτεινότερους τόνους.



Στη πρώτη εικόνα διακρίνουμε μόνο τους φωτεινούς τόνους στο βάθος. Στη δεύτερη εικόνα διακρίνουμε μόνο τις λεπτομέρειες στο μπροστινό μέρος. Στη τρίτη εικόνα με το high dynamic range που προσφέρουν οι σύγχρονες DSLRs έχουν καταγραφεί επιτυχώς όλα τα μέρη του κάδρου.

Έτσι λοιπόν οι ποιοτικοί αισθητήρες των DSLR μηχανών έχουν ευρύτερη δυναμική περιοχή ακριβώς επειδή είναι μεγαλύτεροι. Προσοχή όμως, δεν εννοούμε μεγαλύτερη επιφάνεια γενικά αλλά μεγαλύτερα pixels. Τα pixels με μεγαλύτερη επιφάνεια έκθεσης μπορούν να συλλέξουν περισσότερα φωτόνια σε ένα σκιερό μέρος πριν τα άλλα αρχίσουν να ξεχειλίζουν, όπως ένας κουβάς με μεγαλύτερη χωρητικότητα!

Για να το δούμε στη πράξη και να το καταλάβουμε καλύτερα ας δούμε πως λειτουργεί η δυναμική περιοχή σε διάφορους αισθητήρες. Μια συμβατική, όχι dslr, μηχανή με έναν cmos CCD αισθητήρα ανάλυσης 8 MP το κάθε φωτοστοιχείο του είναι περίπου 2.7 microns (10^{-6} m). Σε μια dslr, από την άλλη, με ανάλυση 6 MP τα φωτοστοιχεία μπορεί να έχουν μέγεθος μέχρι και 7,8 microns σχεδόν τριπλάσια σε μέγεθος από μια συμβατική φωτογραφική μηχανή. Η dslr θα παράξει πολύ ποιοτικότερες εικόνες ενώ η άλλη μηχανή έχει 2 εκατομμύρια περισσότερα pixels! Καταλαβαίνουμε έτσι πόσο ρόλο παίζουν τα μεγαλύτερα φωτοστοιχεία.

Τώρα όσον αφορά το marketing και τις μάχες που δίνουν οι εταιρίες γύρω από τα megapixel μέχρι να φτάνουν τεράστια ποσά είναι για να χαϊδέψουν τα αυτιά και να κλείσουν το μάτι στον άσχετο ή και στο μέσο χρήστη. Φυσικά για μια κάμερα δεν αρκεί να έχει πολλά MP, αλλά ικανό και αποδοτικό σενσορα και καλά οπτικά. Πράγματι, όμως, τα πολλά MP βοηθούν όταν έχουμε να κάνουμε με μεγάλα τυπώματα (αφίσες, μεγάλα κάδρα εκθέσεων κ.τ.λ.) δηλαδή αν προσπαθήσουμε να δούμε σε μεγάλη μια εικόνα μικρής ανάλυσης θα έχουμε το καθόλου ευχάριστο stretching και ευδιάκριτα pixel.

Όπως είπαμε η δυναμική περιοχή εκφράζει τη σχέση ανάμεσα στο φωτεινότερο και το σκοτεινότερο τόνο που μπορεί να καταγράψει η φωτογραφική μηχανή. Η σχέση αυτή δεν είναι γραμμική αλλά λογαριθμική (όπως η κλίμα ριχτερ που μετράει τις σεισμικές δονήσεις για παράδειγμα). Ο λόγος αυτός εκφράζεται με το γράμμα D, και για παράδειγμα ένα D=3 είναι 10 φορές μεγαλύτερο από ένα D=2.

Για να προκύψει αυτό το νούμερο πρέπει να έχουμε δύο τιμές D_{min} (το φωτεινότερο σημείο της εικόνας) και D_{max} (το σκοτεινότερο σημείο της εικόνας). Έτσι για να υπολογιστεί η δυναμική περιοχή πρέπει να γίνει πρώτα η μετατροπή του αναλογικού σήματος ενός φωτοστοιχείου σε ψηφιακό μέσω του a/d converter. Η τελική ψηφιακή εικόνα (όταν την έχουμε πλέον στο pc και σε έναν editor π.χ. photoshop) αποτελείται από τρία κανάλια (RED, GREEN, BLUE) το καθένα από αυτά έχει 256 τιμές (απο 0 εως 255) και η καθεμιά από αυτές τις τιμές αποτελείται από έναν 8-bit αριθμό. Τα 3 κανάλια σε συνδυασμό (3 x 8bit) μας δίνουν την 24-bit εικόνα που έχουμε συνηθίσει να βλέπουμε στους editors.

Όμως όταν μια dslr μηχανή δημιουργεί τα RAW αρχεία χρησιμοποιεί περισσότερα απο 8 bit για κάθε κανάλι συνήθως 12 ή 14 ή ακόμα και 16 bit. Αυτά τα μεγαλύτερου εύρους κανάλια ξαναγίνονται 8μπιτα όταν το RAW αρχείο μεταφέρεται στον editor.

Το κύκλωμα του a/d converter παρέχει μια δυναμική περιοχή που μας δίνει το ανώτατο όριο της ποσότητας της πληροφορίας που μπορεί να επεξεργαστεί. Δηλαδή ένας 8-bit a/d converter θα μας έδινε τη τιμή 1 στο σκοτεινότερο σημείο και τη τιμή 255 στο φωτεινότερο, έτσι η μέγιστη δυναμική περιοχή υπολογίζεται στο D=2.4, ένα νούμερο όχι τόσο εντυπωσιακό όπως θα δούμε.







Ένας 10μπιτος a/d μετατροπέας έχει 1024 διαφορετικές τιμές για κάθε τονικότητα που θα

μας έδινε $D=3$. Ένας 12μπιτος ή ένας 16μπιτος θα διέθεταν 4.094 και 65.535 τιμές για κάθε τονικότητα αντίστοιχα που σημαίνει $D=3.6$ και $D=4.8$ αντίστοιχα, αυτά τα νούμερα είναι πραγματικά πολύ εντυπωσιακά δεδομένης της λογαριθμικής κλίμακας. Είναι τόσο σπουδαία που θεωρητικά θα σήμαιναν έναν αισθητήρα σχεδόν τέλειο, χωρίς καθόλου θόρυβο, αλλά αυτά που πειραματικά εκλαμβάνουμε είναι ελαφρώς πιο απογοητευτικά, αφού όπως παντού, έτσι και εδώ, υπάρχουν σφάλματα που ρίχνουν τις επιδόσεις. Όμως, με αυτό τον τρόπο, καταλαβαίνουμε γιατί ένας 12μπιτος a/d converter είναι πολύ καλύτερος από έναν 8μπιτο. Και όταν λέμε *πολύ* το εννοούμε ένεκα της γεωμετρικής προόδου της λογαριθμικής κλίμακας.

Ένα καμένο απο υπερβολικό φως pixel είναι πολύ δύσκολο να διορθωθεί στον editor αφού προσπαθώντας να το διορθώσουμε το μόνο που θα καταφέρνουμε είναι να "γκριζάρει". Αν και τα σκοτεινά pixel είναι αυτά που μας παιδεύουν περισσότερο, από ένα σκοτεινό pixel είναι πιο εύκολο να αντλήσουμε πληροφορία εφόσον έχει όντως καταγραφεί κάτι κατά τη λήψη. Αυτός είναι και ο λόγος που εάν έχουμε μια τέτοια εικόνα με πολλές τονικές διαβαθμίσεις καλύτερα ελαφρώς να υπο φωτίσουμε τη λήψη με σκοπό να καταγραφούν επαρκώς οι σκοτεινοί τόνοι. Γενικά τα φωτεινά σημεία ενός κάδρου δεν είναι δύσκολο να τα συλλάβει το κύκλωμα του αισθητήρα (όσο είναι απλώς φωτεινά και όχι εκθαμβωτικά), το δύσκολο είναι σε μια λήψη να καταγραφούν τα σκοτεινά σημεία μιας και μετά το κλείσιμο του κλείστρου και όταν τα φωτοστοιχεία "αδειάσουν" τη πληροφορία τους στο τελικό ενισχυτή, είναι δύσκολο να ενισχυθούν αρκετά χωρίς να υπάρξει ανεπιθύμητος θόρυβος. Έτσι όσο μεγαλύτερη η δυναμική περιοχή της φωτογραφικής μας μηχανής, που εξαρτάται απο όλες αυτές τις συνιστώσες που αναφέραμε, τόσο καλύτερα θα καταγράψει όλους τους τόνους και κυρίως του σκοτεινούς που είναι οι δυσκολότεροι. Όταν λοιπόν κάνουμε νυχτερινές λήψεις θα πρέπει να σκεφτούμε αν ο a/d converter και η δυναμική περιοχή μπορούν να ανταπεξέλθουν. Αλλά τα νούμερα από μόνα τους δε λένε πάντα την αλήθεια, και έτσι δε θα διαπιστώσουμε εάν δε κάνουμε λήψεις κάτω από τις συνθήκες που μας ενδιαφέρουν!

Ο Analog to digital converter

Ένα ακόμη μείζονος σημασίας κομμάτι του CCD κυκλώματος είναι ο analog to digital μετατροπέας του. Όπως έχει γίνει κατανοητό μέχρι στιγμής ο σενσορας αποτελείται από pixel με φωτοδιόδους οι οποίες μετατρέπουν την ενέργεια των φωτονίων σε ηλεκτρικό φορτίο αυτό το ηλεκτρικό φορτίο γίνεται τάση η οποία μέσω του τελικού ενισχυτή του κυκλώματος ενισχύεται σε βαθμό ώστε να μπορεί να προσπελαστεί από τον a/d converter. Αυτό που πραγματώνει ο adc είναι να ταξινομεί την αναλογική τάση που έχει αποθηκεύσει το κάθε pixel ανάλογα με τη φωτεινότητα του σε ένα διακριτό νούμερο και να δίνει στο καθένα μια δυαδική τιμή. Τι τιμές δίνει πραγματικά όμως; Η απάντηση είναι πως εξαρτάται από το πόσα bit είναι η χωρητικότητα του. Αν είχαμε έναν μονόμπιτο μετατροπέα θα μπορούσε να πάρει μόνο δύο τιμές, 0, για τα σκούρα, ή 1, για τα φωτεινά. Ένας δίμπιτος θα έδινε μέχρι τέσσερις τιμές 00 για τα σκούρα και 11 για τα φωτεινά και 01 και 10 για τις 2 ενδιάμεσες τιμές. Οι εικόνες όμως με τέτοιους μετατροπείς θα ήταν πολύ φτωχές τονικά σε βαθμό που δε θα μπορούσαμε καν να διακρίνουμε τι απεικονίζουν, έτσι οι κάμερες πλέον διαθέτουν 8-bit converters που μπορούν να αποδώσουν 256 τιμές για κάθε τόνο και η ακόμη καλύτερες και ακριβότερες dslr διαθέτουν 12, 14 η και 16-bit converters που είναι πολύ ανώτεροι.

Analog →	Sampling	→ Digital
1.00V - 	 - 255	→ 11111111
0.38V - 	 - 98	→ 01100010
0.00V - 	 - 0	→ 00000000

Το bitrate του converter και η δυναμική περιοχή είναι έννοιες αλληλένδετες. Αν η κάμερα μας για παράδειγμα έχει δυναμική περιοχή 1000:1 τότε ο adc θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 10μπιτος ($2^{10}=1024$ διακριτές τιμές) ώστε να μπορεί να αναπαραστήσει τους τόνους χωρίς απώλεια πληροφορίας. Θεωρητικά στη συγκεκριμένη περίπτωση ο 10μπιτος φαίνεται να είναι η καλύτερη επιλογή αφού ένας 12μπιτος ή 16μπιτος adc δε θα

προσέφερε παραπάνω χρήσιμη πληροφορία παρά θόρυβο. Στη πραγματικότητα όμως ένας 12μπιτος converter θα ήταν καλύτερος για να αφήσουμε ένα περιθώριο σφάλματος. Γενικά είναι καλύτερο να έχεις μερικά extra bit γιατί μειώνεις κάποια σφάλματα του αισθητήρα που έχουν όλα τα κυκλώματα κατασκευαστικά.

Συχνά βλέπουμε και πάλι τις εταιρείες να πλασάρουν το bitrate του adc σαν προσόν μιας κάμερας ή ενός σκάνερ που μπορεί να αποδώσει εικόνες πολύ ευρείας τονικής γκάμας και υψηλής δυναμικής περιοχής αλλά ο adc απο μόνος του δεν είναι αρκετός και αυτό αληθεύει μόνο αν κατασκευαστικά ο σενσορας μπορεί όντως να έχει αυτή τη δυναμική περιοχή.

Όπως είπαμε οι ακριβότερες των dslr έχουν adc's χωρητικότητας 12-bit και έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύσουμε το RAW αρχείο σε ότι bitrate προτιμούμε. Άλλωστε η JPEG κωδικοποίηση επιτρέπει μόνο 8-bit για κάθε κανάλι.

Αισθητήρες και χρώμα

Μέχρι στιγμής στιγμής η θεώρηση που έχουμε κάνει για τους φωτοευαίσθητους αισθητήρες, είτε αυτοί είναι τεχνολογίας CCD είτε CMOS, έχει να κάνει με την ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας και πως αυτή την αντιλαμβάνονται. Αυτό σύμφωνα με τη κυματική φύση του φωτός τους καθιστά ανίκανους να αντιλαμβάνονται την έννοια του χρώματος. Οι αισθητήρες λοιπόν όπως τους έχουμε δει μέχρι στιγμής αντιλαμβάνονται τον κόσμο όπως οι σκύλοι. Δε βλέπουν τα χρώματα!

Γιατί οι αισθητήρες έχουν αχρωματοψία;

Για να απαντήσουμε σε αυτό το ερώτημα θα πρέπει να ανατρέξουμε πίσω στη βασική αρχή λειτουργίας ενός αισθητήρα, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Αυτό το οποίο συμβαίνει είναι ότι τα φωτόνια, εν είδει μπιλιάρδου, χτυπούν τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας του μετάλλου και τα εκτοξεύουν από το άτομο τους, ένα προς ένα. Η ενέργεια του φωτονίου πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη ενέργεια που χρειάζεται για να αποδεσμευτεί το ηλεκτρόνιο. Εάν υπάρχει περίσσεια ενέργεια τότε αυτή μετατρέπεται σε παραπάνω ταχύτητα του ηλεκτρονίου. Λοιπόν, έχει γίνει ήδη κατανοητό, ότι η ποσότητα των ηλεκτρονίων είναι ανάλογη του αριθμού των προσπίπτοντων φωτονίων και ανεξάρτητη από τη συχνότητα του προσπίπτοντος φωτός. Η συχνότητα όμως είναι αυτή που διαμορφώνει το χρώμα της φασματικής ακτινοβολίας. Έτσι εξηγείται γιατί οι φωτοευαίσθητοι αισθητήρες μας στους οποίους μετράμε το φορτίο που παράγουν, δηλαδή των αριθμό των ηλεκτρονίων, δε διακρίνουν συχνότητα και χρώμα παρά μόνο φωτεινότητα.

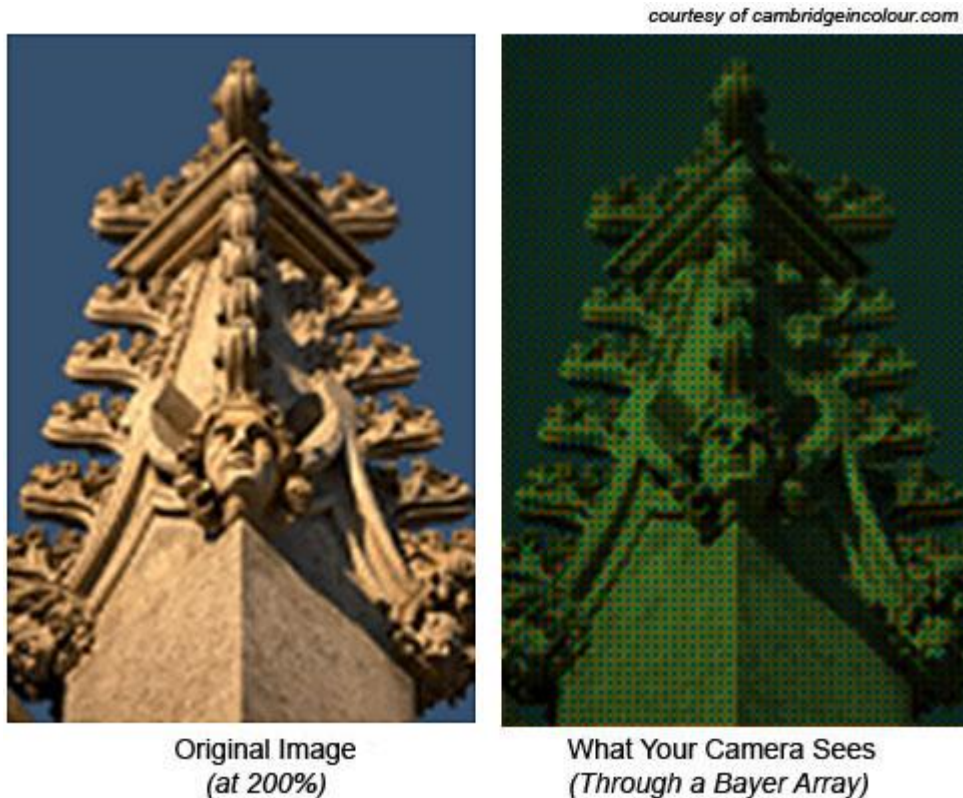
Υπάρχει μια παράμετρος που επηρεάζει τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται κατά τη πραγματοποίηση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Είναι η ταχύτητα. Η ταχύτητα με την οποία εκπέμπονται τα ηλεκτρόνια είναι ανεξάρτητη από την ένταση του φωτός και εξαρτάται αποκλειστικά από το χρώμα του, δηλαδή τη συχνότητα, την ενέργεια ενός εκάστου φωτονίου. Τη ταχύτητα όμως δε μπορούμε να τη μετρήσουμε εύκολα.

Συστοιχία Bayer

Πως λοιπόν καταλήγουμε από το φως που συλλέγει ο αισθητήρας να έχουμε μια ολοζώντανη έγχρωμη εικόνα;

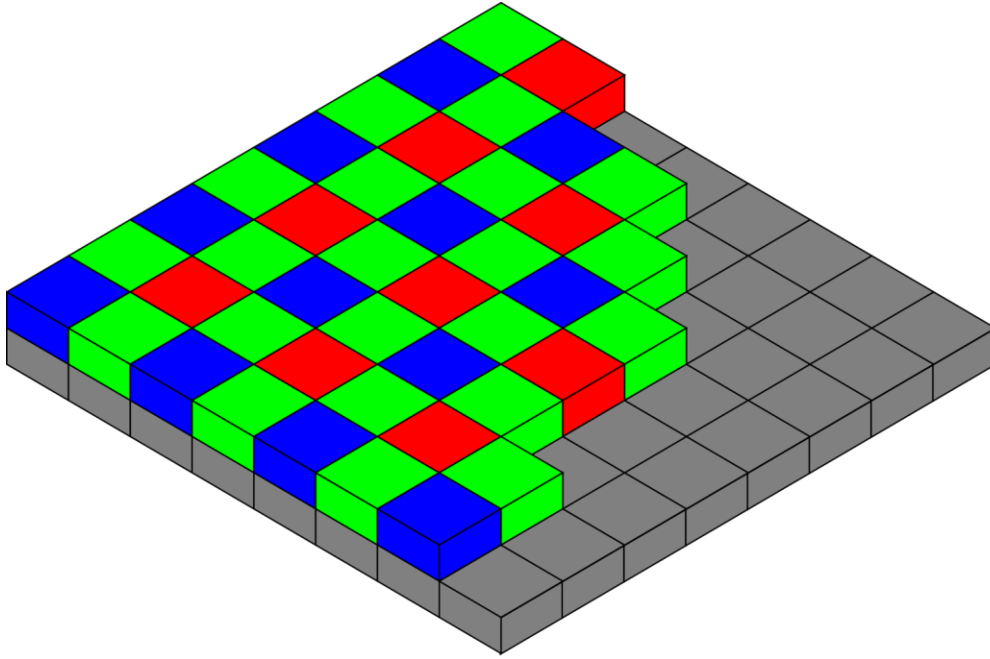
Λοιπόν για τη δημιουργία χρώματος τα φωτοστοιχεία επικαλύπτονται με ένα στρώμα απο χρωματικά φίλτρα. Πάνω από κάθε φωτοστοιχείο υπάρχει και ένα αντίστοιχο χρωματικό φίλτρο, που επιτρέπει μόνο ένα φάσμα, δηλαδή ένα χρώμα να περάσει, δεσμεύοντας τα υπόλοιπα. Έτσι το κάθε pixel αποθηκεύει είτε κόκκινο, είτε πράσινο, είτε μπλε και αγνοεί όλα τα υπόλοιπα χρώματα. Καταλήγουμε να έχουμε δηλαδή να έχουμε pixel που "βλέπουν" μόνο ένα χρώμα. Για παράδειγμα μπορεί ένα pixel να είναι μπλε, το διπλανό του να είναι κόκκινο και το από κάτω να είναι πράσινο.

Βέβαια έτσι όπως είναι πλασμένος ο κόσμος, μπορεί σε μια φωτογραφία ένα pixel ευαίσθητο στο πράσινο να μη σταθεί τόσο τυχερό και να μη καταγράψει αρκετό πράσινο εάν δεν υπάρχει στο κάδρο του φωτογράφου και να ήταν καλύτερα εάν εκείνο το pixel ήταν ευαίσθητο στο κόκκινο. Ευτυχώς όμως με μια παράταξη 6 εκατομμυρίων και πλέον pixel αρκετά ευαίσθητα στο πράσινο θα καταγράψουν πράσινο, ευαίσθητα στο κόκκινο, κόκκινο και ευαίσθητα στο μπλε, μπλέ χρώμα με έναν υψηλό βαθμό ακρίβειας. Πως λοιπόν κατασκευάζει ο αισθητήρας μια έγχρωμη εικόνα; Αυτό που αρχικά παίρνουμε είναι μια εικόνα που μοιάζει με μωσαϊκό με το κάθε pixel να αναπαριστά την εικόνα μόνο με τα 3 βασικά χρώματα και για να καταλήξουμε στη τελική έγχρωμη εικόνα χρησιμοποιούνται ισχυροί αλγόριθμοι που δουλειά τους είναι να "μαντεύουν" το χρώμα του εκάστοτε pixel κοιτάζοντας τα pixel που το περιτριγυρίζουν! Αυτούς τους αλγορίθμους δούμε αναλυτικότερα παρακάτω.



Αριστερά η τελική εικόνα και δεξιά η εικόνα μέσα απο το χρωματικό bayer φίλτρο, αισθητά πράσινη.

Τα φίλτρα, τώρα, δεν είναι όπως θα περίμενε κανείς παρατεταγμένα ισόποσα. Χρησιμοποιείται ένα μοτίβο που έχει μείνει στην ιστορία με το όνομα Bayer array. Τη συστοιχία bayer εφηύρε ο επιστήμονας Bryce Bayer το 1975, ο οποίος έφυγε από τη ζωή σε ηλικία ογδονταριών ετών στις 13 Νοεμβρίου 2012. Στο μοτίβο αυτό έχουμε τη πρώτη γραμμή που αποτελείται από πράσινα και κόκκινα φίλτρα εναλλάξ και ακολουθεί η δεύτερη γραμμή με πράσινα και μπλε φίλτρα εναλλάξ όπως στην εικόνα. Δηλαδή τα πράσινα pixels υπερिशύουν, για την ακρίβεια είναι διπλάσια από τα υπόλοιπα. Γιατί συμβαίνει αυτό; Η επιστήμη θέλει το ανθρώπινο μάτι να είναι πιο ευαίσθητο στο πράσινο και στις αποχρώσεις του και σε αυτό το φάσμα να διακρίνει τις περισσότερες διαβαθμίσεις. Γι αυτό και ο διπλάσιος αριθμός πράσινων φίλτρων. Θα λέγαμε κατ' επέκταση ότι έτσι πετυχαίνεται μεγαλύτερη δυναμική περιοχή και πιο ρεαλιστικό και “ανάγλυφο” αποτέλεσμα.



Μια συστοιχία bayer τοποθετημένη πάνω απο το φωτοευαίσθητο σενσορα.

Εκ των πραγμάτων, η χρήση του Bayer προτύπου προκαλεί μεγάλη απώλεια στη συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία. Το μισό από το πράσινο φως εντέλει αποθηκεύεται στο σένσορα αφού το μισό κάθε γραμμής είναι τα πράσινα pixel και το άλλο μισό κόκκινα ή μπλε (αρά κατ' επέκταση το ίδιο ισχύει και για το σύνολο τις επιφάνειας του αισθητήρα). Ακόμα χειρότερα μόνο το 25% από το κόκκινο ή το μπλε φως αποθηκεύεται στο σενσορα. Για παράδειγμα σε εάν μικροσκοπικό κομμάτι του αισθητήρα με 36 pixel, τα 18 θα ήταν πράσινα και 9 μπλε και κόκκινα. Έτσι με τόσο φως να μη καταγράφεται η συνολική ευαισθησία του σενσορα μειώνεται. Κατ' επέκταση μειώνεται και η ανάλυση αφού μια συμβατική ψηφιακή μηχανή των 6MP στη πραγματικότητα συλλαμβάνει 3 διαφορετικές εικόνες που αποτελούνται από μια 3MP πράσινης απόχρωσης, 1,5MP μπλέ και 1,5MP κόκκινης.

Απομωσαϊκοποίηση, απο μονόχρωμες ψηφίδες σε φωτογραφία.

Εδώ έρχεται η απαραίτητη διαδικασία της απομωσαϊκοποίησης. Είναι οι αλγόριθμοι μετά την εκτέλεση των οποίων παράγεται η πλήρως έγχρωμη εικόνα από το Bayer τρίχρωμο ψηφιδωτό. Γενικός σκοπός αυτών των αλγορίθμων είναι να υπολογίσουν ποσοστιαία τα 2 χρώματα που λείπουν από κάθε φωτοστοιχείο. Σε φωτογραφίες με μικρής κλίμακας λεπτομέρειες που αγγίζουν το όριο της ανάλυσης του αισθητήρα, μπορεί να ξεγελαστούν οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι και να υπάρξουν ανεπιθύμητα σφάλματα όπως το γνωστό και αρκετά ενοχλητικό moiré. Για την καταπολέμηση αυτών των σφαλμάτων όμως εφαρμόζονται φίλτρα όπως το optical low pass filter ή το Anti-Aliasing filter.

Υπάρχουν πολλά είδη τέτοιων αλγορίθμων. Με έναν πολύ απλό δε θα πάρουμε υψηλή ποιότητα στο αποτέλεσμα αλλά είναι αρκετοί για μια γρήγορη προεπισκόπηση της φωτογραφίας. Υπάρχουν πολύ πιο σύνθετοι και αξιόλογοι οι οποίοι να μεν απαιτούν υπολογιστική ισχύ αλλά αποδίδουν φοβερά αποτελέσματα και εξιδεικευμένοι οι οποίοι είναι πολύ καλοί στο να αποδίδουν αιχμές, μυτερές άκρες και λεπτομέρειες.

RAW Format, Ψηφιακά αρνητικά

Μέχρι στιγμής έχει αναλυθεί διεξοδικά και πολύπλευρα ο τρόπος λειτουργίας ενός αισθητήρα από τη στιγμή ανοίγματος του κλείστρου μέχρι τη δημιουργία της εικόνας στην LCD της φωτογραφικής μας μηχανής. Τι γίνεται όταν επιχειρούμε να δούμε τη φωτογραφία σε ένα πρόγραμμα επεξεργασίας εικόνας και ποιές πρωτοβουλίες ανήκουν στο χρήστη και ποιές στη μηχανή;

Σε ένα ψηφιακό φωτογραφικό αρχείο καταγράφονται εκατομμύρια pixel που αναλαμβάνει να επεξεργαστεί ο processor σε μια DSLR ώστε να καθορίσει τις τιμές σε κάθε τελικό pixel. Είναι η μετατροπή του αναλογικού σήματος (φως) σε ψηφιακό σύμφωνα με τον analog to digital converter της εκάστοτε μηχανής. Σε αυτό το στάδιο η πληροφορία που εισέρχεται και αποθηκεύεται στα ενδότερα της μηχανής είναι ακατέργαστη, εξ ου και raw (που σημαίνει ωμό). Αυτό προϋποθέτει βέβαια να έχει η μηχανή τη δυνατότητα να τραβάει και να αποθηκεύει σε raw ή να έχουμε ενεργοποιημένη αυτή την επιλογή από την αντίστοιχη επιλογή στο menu. Σε περίπτωση που δεν είναι επιλεγμένη αυτή η επιλογή και τραβάμε σε κάποια κωδικοποιημένη μορφή εικόνας, συνηθέστερη η jpeg ή tiff η ακατέργαστη πληροφορία θα ρυθμιστεί σύμφωνα με τις παραμέτρους του white balance, saturation, sharpness και τα λοιπά μέχρι να αποθηκευτεί σαν αρχείο jpeg ή tiff ή ότι άλλο έχει επιλεγθεί. Εάν έχουμε επιλέξει αποθήκευση σε raw, η εικόνα καταγράφεται χωρίς άλλη διαδικασία.

Να σημειώσουμε, για να είναι σαφές και στον αναγνώστη πως πρέπει πρωτίστως η φωτογραφική μηχανή να υποστηρίζει raw (όλες οι DSLR, και κάποιες mirrorless ή compact υποστηρίζουν) και πως η κάθε κατασκευάστρια εταιρεία ονομάζει αλλιώς τα raw αρχεία της. Έτσι για παράδειγμα η Canon τα ονομάζει CR2, η Fujifilm RAF, η Nikon NEF κ.α. Η υποστήριξη raw format είναι κάτι που θα πρέπει να ενδιαφέρει το λίγο πιο έμπειρο φωτογράφο αφού όπως θα δούμε δίνει μεγάλες επιλογές μετά τη λήψη.

Έχοντας εξηγήσει τι ακριβώς είναι τα RAW αρχεία, ας δούμε ποιά είναι η θέση τους σε σχέση με τα JPEG και τα TIFF. Όπως είπαμε και πριν, το RAW είναι η ακατέργαστη πληροφορία που προκύπτει από τη μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Για να δημιουργηθεί ένα JPEG αρχείο, πρέπει αυτή η πρωτογενής πληροφορία να την

επεξεργαστεί η μηχανή, και να φτιαχτεί μια ψηφιακή εικόνα με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά χρώματος, ευκρίνειας, white balance κλπ, που ορίζονται στα μενού των μηχανών μας. Στη συνέχεια πρέπει να συμπιεστεί (το JPEG είναι συμπιεσμένο, απωλεστικό φορμά εικόνας) και να αποθηκευτεί στην κάρτα. Εδώ να σημειώσουμε ότι τα JPEG αρχεία είναι 8bit και συνεπώς έχουν 256 διαβαθμίσεις σε κάθε κανάλι, κατά πολύ μικρότερο του RAW. Τα TIFF από την άλλη πλευρά, μπορεί να συμπιέζονται, με μη απωλεστικό αλγόριθμο, και μπορεί να είναι 8 ή 16bit. Παραμένουν όμως δέσμια της επεξεργασίας, χωρίς επιστροφή, από τη μηχανή. Το RAW έχει λοιπόν το πλεονέκτημα ότι δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να “εμφανίσει” το αρχείο του με όποιον τρόπο και χαρακτηριστικά θέλει, μετά τη λήψη, στον υπολογιστή του. Έτσι ενώ ένα λάθος white balance για παράδειγμα, είναι πρόβλημα για τα JPEG και TIFF, το RAW μας αφήνει να ρυθμίσουμε το white balance όποτε θέλουμε. Γι’ αυτό το λόγο ονομάζουμε τα RAW αρχεία “ψηφιακά αρνητικά”. Επιλέγουμε τον τρόπο εμφάνισής τους στον ψηφιακό σκοτεινό θάλαμο, δηλαδή στον εκάστοτε editor. Κάτι που πρέπει να θυμόμαστε είναι ότι τα RAW αρχεία δεν επιδέχονται μόνιμες αλλαγές. Ότι και να ρυθμίσουμε στην εμφάνιση μιας RAW εικόνας, είναι προσωρινό και αναστρέψιμο. Οποτε θελήσουμε, μπορούμε να το επαναφέρουμε στην αρχική του κατάσταση, χωρίς απώλειες. Τα JPEG είναι μια καλή περίπτωση παράγωγου ενός RAW, που λόγω της συμπίεσης του, διευκολύνει πολύ και τη μεταφορά του, σε cloud applications, internet, αποστολή σε τρίτους. Εκεί που υστερεί λόγω 8 bit δομής του, είναι στην επεξεργασία του αρχείου μετά τη λήψη. Πιάνει όμως μικρό χώρο και είναι χρήσιμο για αποστολή μέσω διαδικτύου, ενώ σε καλή ανάλυση και μικρή συμπίεση καταφέρνει άριστες εκτυπώσεις.

Τα TIFF από την άλλη είναι μεγάλα σε μέγεθος και εκεί δεν πλεονεκτούν σε σχέση με τα RAW,. Μπορούν βέβαια να αποτελέσουν ένα άριστο παράγωγο των RAW, που ενδείκνυται για επεξεργασία και μεγάλες εκτυπώσεις. Η διαδικασία είναι απλή: κάνουμε λήψεις σε RAW και εμφανίζουμε τα αρνητικά αυτά με κάποιο πρόγραμμα της αρεσκείας μας. Το τελικό αποτέλεσμα, αποθηκεύεται ως TIFF ή JPEG. Όπου υπάρχει ανάγκη το TIFF μπορεί να περάσει για επεξεργασία στο Photoshop.

Το RAW και τα άλλα μορμά

Οι ρυθμίσεις των ISO, διαφράγματος, ταχύτητας και εστίασης έχουν την ίδια και μη αναστρέψιμη επίδραση σε όλα τα είδη αρχείου, είναι άλλωστε οι βασικές αρχές της φωτογραφίας που δε θα μπορούσαν να μην επηρεάζουν την εικόνα. Οι λοιπές ρυθμίσεις χρώματος, white balance, saturation κλπ επηρεάζουν καθοριστικά τα JPEG και TIFF, αλλά δεν αφορούν τα RAW.

Η τρομερή πληροφορία που καταγράφεται στο αρχείο α RAW, με υπερδειγματοληψία 12-16bit αναλόγως το A/D στάδιο της φωτογραφικής μηχανής, έχει περιθώρια για πολλές διορθώσεις εκ των υστέρων. Διαφορές εκφώτισης ως 2+ stop -είτε προς τους σκοτεινούς τόνους, είτε προς τους φωτεινούς- δεν αποτελούν πρόβλημα για το RAW.

Εδώ βέβαια να πούμε και να υπογραμμίσουμε πως αυτός δεν είναι λόγος να μη γνωρίζουμε σωστά τη τεχνική της φωτομέτρησης και να μη τη χρησιμοποιούμε σαν εκφραστικό μέσο. Δεν είναι για όλους προφανές πως οι καλές φωτογραφίες και η συγκίνηση που προκαλούν στο κοίταγμα τους δεν οφείλεται ούτε στις παραμετροποιήσεις που προσφέρει το raw αλλά ούτε και στα φίλτρα του photoshop. Έτσι, σίγουρα εμπεριέχεται μεγάλη σοφία στα λόγια του Henri Cartier Bresson όταν έλεγε πως *“Είναι ψευδαίσθηση πως οι φωτογραφίες φτιάχνονται μέσα στη φωτογραφική μηχανή... φτιάχνονται με τα μάτια, τη καρδιά και το μυαλό.”* ή ακόμη *“Είναι πράγματι σπάνιο, μια σύνθεση φτωχή κατά τη λήψη να καλυτερέψει αναμορφώνοντας την στο σκοτεινό θάλαμο.”*. Και ας αναλογιστούμε ότι δεν είχε ασχοληθεί ούτε με τους εξελιγμένους αισθητήρες, ούτε με τα RAW ή τα extreme φίλτρα του photoshop.

Εν πάση περιπτώσει, σίγουρα θα είχε μεγάλο ενδιαφέρον να βλέπαμε πως θα λειτουργούσε ο Bresson και οι μεγάλοι κλασσικοί φωτογράφοι στη σημερινή εποχή αλλά επειδή για αυτά μόνο εικασίες μπορούμε να κάνουμε, εδώ παραθέτουμε τα θετικά και τις ευκολίες που παρέχει στον έμπειρο φωτογράφο το RAW αρχείο αλλά και τα αρνητικά που μπορεί να το συνοδεύουν:

Υπέρ:

- Περιλαμβάνει όλα τα αυθεντικά δεδομένα απο τον αισθητήρα.
- Υποστηρίζει εως και 16 bit βάθος χρώματος.
- Αναπαράγεται πολύ καλύτερα η τονικότητα, ειδικά σε δύσκολα θέματα με μεγάλη διαβάθμιση φωτεινότητας, απο τα πλεον λαμπρά ως τα πλεον σκιερά σημεία.
- Διαθέτει μεγάλο εύρος για διορθώσεις σφαλμάτων έκθεσης ($\pm 3\text{stop}$)
- Πιο ευέλικτο σε ρυθμίσεις-επεμβάσεις-διορθώσεις.
- Η εξισορρόπηση λευκού γίνεται για πρώτη φορά απο το χρήστη, χωρίς υποβάθμιση της ποιότητας.

Κατά:

- Μεγάλο σε όγκο μέγεθος αρχείου.
- Ανάγκη για μεγάλες κάρτες μνήμης SD
- Το RAW δεν υποστηρίζεται από πολλές μηχανές πέραν των DSLRs και mirrorless.
- Για να “διαβαστούν” απαιτείται η software λύση του εκάστοτε κατασκευαστή, ή λογισμικό το οποίο δεν είναι freeware και συνήθως είναι πολύ ακριβό.
- Η επεξεργασία του απαιτεί ποιοτική hardware υποστηριξη, χρόνο και τεχνογνωσία.

RAW αρχεία και ανθρώπινη όραση.

Σε προηγούμενο κεφάλαιο έχουμε αναλύσει περιγραφικά και μαθηματικά την έννοια της δυναμικής περιοχής. Η δυναμική περιοχή εκφράζεται σε f/stop, δηλαδή όταν αυξάνεται κατά 1 stop το φως διπλασιάζεται ή κατά 2 stop το φως τετραπλασιάζεται. Σε μια τυπική φωτογραφική μηχανή η δυναμική περιοχή είναι από 5 μέχρι 7 f/stop. Τι συμβαίνει όμως όταν μια φωτοδίοδος δέχεται διαφορετικές εκφωτίσεις ανάλογα με τον (φυσικό ή τεχνητό) φωτισμό της σκηνής; Ας εξαιρέσουμε αρχικά την περίπτωση που δέχεται υπερβολικό φως. Έστω λοιπόν μηχανή με 12bit A/D converter και δυναμική περιοχή 5 f/stop. Με επιλογή RAW και πλήρη εκφώτιση μπορεί να αποδώσει 4096 διακριτούς τόνους (επίπεδα του γκρι). Με JPEG συμπίεση αυτόματα ερχόμαστε σε 256 τόνους. Μειώνοντας κατά 1 και 2 f/stop, διαδοχικά, το μεν RAW θα περιοριστεί σε 512/256 τόνους του γκρι, το δε JPEG σε μόλις 64/32 τόνους και μάλιστα οι περισσότεροι από τους τόνους κατανέμονται στις φωτεινότερες περιοχές του ειδώλου, αφήνοντας δύσκολα διακρινόμενη λεπτομέρεια στα σκιερά που μοιάζουν να “μπουκώνουν”. Αυτά συμβαίνουν για ένα βασικό λόγο: οι αισθητήρες είναι γραμμικά «όργανα» αντίληψης του φωτός ενώ η ανθρώπινη όραση μη γραμμική, δηλαδή αντιλαμβάνεται το φως λογαριθμικά. Έστω ότι εκθέτουμε τον αισθητήρα μέχρι το όριο όπου μπορεί να γράψει πληροφορία δηλ. στο 254 (παραπάνω παρατηρούνται φαινόμενα ψαλιδισμού του σήματος και εμείς το παρατηρούμε ως «καμμένη περιοχή»). Μειώνοντας κατά 1 stop φθάνουμε στο 127 δηλ. μέσα σε ένα stop ξετυλίγονται 127 διαβαθμίσεις του ανοιχτού γκρι ως σχεδόν απόλυτου λευκού. Η ανθρώπινη όραση λοιπόν έχει μια μη γραμμική καμπύλη 2.2 που συχνά αναφέρεται ως gamma και μόνον με την εφαρμογή αυτής της καμπύλης καταφέρνει η ψηφιακή μηχανή να ικανοποιήσει την ανθρώπινη όραση.

Το Αντίστοιχο Software

Θα έχουμε ίσως παρατηρήσει ότι αρκετά Image browser προγράμματα δε μπορούν να κάνουν προεπισκόπηση RAW αρχείων. Αυτό αν και διορθώνεται με Plug in της Microsoft, προτιμούμε τα ειδικευμένα software, καταλληλότερα για φωτογράφους. Το πιο κοινό είναι ίσως το Adobe Bridge, που συνοδεύει το Photoshop. Για τους χρήστες των Mac, ο απλός Finder μπορεί να δείξει εικόνες RAW, αλλά πάλι ενδείκνυται η χρήση του Bridge. Πέρα φυσικά από την απλή προεπισκόπηση, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε και κάποιο εξειδικευμένο πρόγραμμα επεξεργασίας-εμφάνισης των RAW αρχείων. Εδώ υπάρχει πληθώρα από προγράμματα όπως το απλό ACR (Adobe Camera RAW), το Adobe Lightroom, το PhaseOne Capture One, το Corel AfterShot Pro (πρώην Bible), το DxO Optics Pro κλπ. Όλα γενικώς τα RAW Converters, αναλαμβάνουν να κάνουν τις ίδιες περίπου εργασίες με διαφορετικούς όμως αλγόριθμους και σε διαφορετικό περιβάλλον.

- Adobe Camera RAW (ACR)

Το παλιό καλό ACR που εδώ και χρόνια γνωρίζουμε, δεν έχει σταματήσει να εξελίσσεται και να υποστηρίζει όλο και περισσότερα μοντέλα μηχανών. Απλό και αρκετά ξεκάθαρο, αποτελεί μια άριστη λύση για όσους είναι κάτοχοι του Photoshop, αφού προφανώς έρχεται ως μέρος αυτού, όπως και το Bridge. Τα εργαλεία του χωρίζονται σε καρτέλες με βασικότερη, αυτή που ονομάζει Basic. Υποστηρίζει το άνοιγμα δύο ή περισσότερων εικόνων, των οποίων οι αλλαγές μπορούν φυσικά να συγχρονιστούν, γλιτώνοντας μας από πολύ χρόνο.

- PhaseOne Capture One

Πολύ δυνατό πρόγραμμα, που απευθύνεται κυρίως σε επαγγελματίες, αν και κυκλοφορεί σε δύο εκδοχές: την απλή και την professional. Πίσω από το σχεδιασμό του κρύβεται το team της Phase One, της εταιρίας κατασκευής των διάσημων ψηφιακών πλατών. Η πληθώρα των εργαλείων του και οι άριστοι αλγόριθμοί του, υποστηρίζουν τις περισσότερες DSLR μηχανές. Τα εργαλεία του Capture One επιτρέπουν αλλαγές και διορθώσεις ακριβείας, κάτι που το καθιστά εξαιρετικό στη διόρθωση δερματικών τόνων

και όχι μόνο. Μέσα από το Capture One μπορούμε να χειριστούμε και τις μηχανές μας σε περιβάλλον studio, μέσω ενσύρματης σύνδεσης με τον υπολογιστή μας.

- Adobe Lightroom

Όσοι είναι εξοικειωμένοι με τα εργαλεία του ACR, σίγουρα θα μάθουν γρήγορα και αυτά του Lightroom, μια και είναι παρεμφερή. Το Lightroom αποτελεί ολοκληρωμένη λύση για τη διαχείριση, την επεξεργασία και όχι μόνο, των ψηφιακών αρνητικών, χωρίς να περιορίζεται μόνο σε αυτά τα αρχεία. Πολύ γρήγορο και πλήρες, το δημοφιλές πρόγραμμα, επιτρέπει στους φωτογράφους την τακτοποίηση, προεπισκόπηση και άριστη επεξεργασία (εμφάνιση) των RAW εικόνων, αλλά και την παραγωγή εκτυπώσεων, contacts και online galleries.

- Adobe Bridge

Εδώ ο χρήστης κάνει προεπισκόπηση, βαθμολόγηση-αξιολόγηση των εικόνων με αστεράκια. Όταν θελήσει να επεξεργαστεί μια εικόνα RAW, το Bridge θα συνεργαστεί με το ACR, που θα ανοίξει σε κάποιο νέο παράθυρο. Μέσα στο Bridge μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες και σε συνδυασμό με το Photoshop, να τρέξουμε ομαδικά actions, να δημιουργήσουμε contacts, Pdf κλπ.

Η Γενική Φιλοσοφία

Γιατί υπάρχουν τα προγράμματα επεξεργασίας RAW θα αναρωτηθεί κάποιος αφού υπάρχει το photoshop; Γενικός σκοπός αυτών των προγραμμάτων είναι να διορθώσουμε σε μια εικόνα όλα όσα θέλουμε σε βαθμό που να μην απαιτούνται περαιτέρω επεμβάσεις στο photoshop. Ενδεχομένως να υπάρξουν λόγοι που θα μας οδηγήσουν στο photoshop αλλά η βασική ιδέα είναι αυτή και έχει σαφώς μια πιο φωτογραφική προσέγγιση. Αναφερθήκαμε ήδη στην αλόγιστη χρήση που προσφέρουν τα σύγχρονα μέσα και πως απομακρύνουν από την ουσία της φωτογραφίας αλλά όταν εδώ αναφερόμαστε σε φωτογραφική προσέγγιση εννοούμε να εκμεταλλευτούμε στο μέγιστο όλες τις δυνατότητες του RAW αρχείου. Πρωτίστως φωτεινότητα, contrast και δυναμική περιοχή και μετά white balance και διαχείριση του χρώματος. Έπεται η λεπτομερής διόρθωση του ιστογράμματος και η επαναφορά τυχόν καμένων pixel. Τέλος μπορούμε να ασχοληθούμε και με βελτιστοποιήσεις πιθανών σφαλμάτων του φακού, παραμορφώσεων (π.χ. η συνήθης παραμόρφωση του ευρυγώνιου), ή βινιετάρισμα.

Άλλωστε οι περισσότερες από αυτές τις δυνατότητες προσφέρονταν και στους κλασικούς φωτογράφους του περασμένου αιώνα. Μάλιστα αυτοί τα κατάφερναν με πολύ πιο δημιουργικά και επίπονα τεχνάσματα που απαιτούσαν ώρες δουλειάς μέσα στο σκοτεινό τους θάλαμο.

Αισθητήρες για όλα τα γούστα

Η ψυχή μιας φωτογραφικής μηχανής είναι, αν μη τι άλλο, ο ψηφιακός της σενσορας. Είναι αυτός που καθορίζει την ανάλυση και το μέγεθος της εικόνας μιας καμερας, τη δυναμική της περιοχή, το κάδρο που θα "βλέπει" ο φακός, ακόμα και το φυσικό μέγεθος της. Όπως και με τα φιλμ είχες στη διάθεση σου να διαλέξεις ανάμεσα σε μια πληθώρα διαφορετικού μεγέθους, ευαισθησίας, χρώματος, στυλ και μεγέθους καθένα με τα δικά του ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, έτσι συμβαίνει και με τους ψηφιακούς αισθητήρες. Η κάθε κάμερα χρησιμοποιεί το δικό της!

Ο σενσορας είναι αυτός που καθορίζει πως δείχνει η τελική εικόνα και πόσο μεγάλες εκτυπώσεις μπορείς να κάνεις από αυτήν. Η τελική ποιότητα δε καθορίζεται μόνο από το μέγεθος του αισθητήρα αλλά και από τον αριθμό των pixel και από το πόσο μεγάλα είναι αυτά τα pixel.

Αφού έχει προηγηθεί όλη η τεχνική και κατασκευαστική ανάλυση, εδώ θα αναλύσουμε όχι αυτού του είδους τα χαρακτηριστικά του κάθε σενσορα, αλλά θα τους κατηγοριοποιήσουμε σύμφωνα με το μέγεθος και τον τύπο τους και πως τους χρησιμοποιεί η κάθε μια από τις μεγάλες εταιρείες.

Είτε πρόκειται για CCD είτε για CMOS θα δούμε οτι όλα υπάρχουν και σε διάφορα φορμά. Απο τις μικρές compact μέχρι τις ακριβότερες full frame και απο τις εμπορικότερες Nikon και Canon μέχρι τις ακριβοθώρητες Leica και Hasselblad κρύβεται ένας αισθητήρας. Μάλιστα θα δούμε πως με τον καιρό οι CMOS –αν και δε τους φαινότανε!- κατέλαβαν όλο και περισσότερο την αγορά λόγω του οικονομικού τους προτερήματος αλλά και της χαμηλής τους κατανάλωσης. Ακόμη ο, επίσης CMOS αρχιτεκτονικής, Foveon που χρησιμοποιείται στις αμερικάνικες Sigma. Τέλος υπάρχει και ο Live MOS, που φάνηκε μόλις το 2006 και χρησιμοποιείται από Olympus, Panasonic και Leica και που προσπαθεί να κατασκευάσει εικόνες με τη τεχνοτροπία ενός CCD και τη χαμηλή κατανάλωση ενός CMOS.

Οι αισθητήρες εδώ χωρίζονται και ονοματίζονται ανάλογα με τις διαστάσεις τους.

Full Frame sensor:

Ο full frame sensor έχει διαστάσεις 36mm x 24mm..Τις διαστάσεις δηλαδή ενός καρε απο 35άρι φιλμ. Εξ ου και full frame, δηλαδή πλήρους κάδρου. Μπορεί να τους ακούσετε και σαν 1 προς 1, επειδή δεν επηρεάζεται το εστιακό μήκος του φακού, δεν τους επηρεάζει το crop factor. Και πάντα όταν μιλάμε για μεγέθη κάδρου 35, 50, 105, 200 mm κτλπ αναφερόμαστε όπως αναπαρίσταται σε έναν full frame sensor. Στα μοντέλα τα οποία τοποθετείται είναι CMOS κατασκευής . Είναι σχεδόν διπλάσιοι σε εμβαδό από τους APC-S. Τα μεγαθήρια της Canon και Nikon όπως η D600/700/800 και τα ακριβά μοντέλα της σειράς Mark III αλλά και η νεοσύστατη mirrorless σειρά a7 της sony είναι όλα εξοπλισμένα με full frame σενσορα. Έτσι σε συνεργασία πάντα με έναν ποιοτικό φωτεινό φακό μπορεί να αποδώσει καταπληκτικές ολοζώντανες εικόνες με πραγματικά χρώματα, ευρύτατη δυναμική περιοχή, εξαιρετικά ρηχό βάθος πεδίου και πολύ καλά τόσο νεταρισμένα όσο και θολά σημεία. Οι εκπληκτικές δυνατότητες τους δε σταματάνε στη φωτογραφία αλλά επεκτείνονται και στη πολύ καλή καταγραφή βιντεο. Ήδη πολλοί επαγγελματίες προτιμούν να χρησιμοποιούν τέτοιες μηχανές για τις δουλειές τους. Η εναλλαγή φακών σε ένα τέτοιο σώμα επιτρέπει μεγάλη ευελιξία στη σκηνοθεσία και έτσι επιτρέπει στον έμπειρο χρήστη να γυρίσει ταινίες μικρού ή μεγάλου μήκους, ντοκιμαντερ, video art. Όπως και στη φωτογραφία έτσι και στο βίντεο τα πάνε περίφημα στους χαμηλούς φωτισμούς με πραγματικό ISO απο 100 εως 6400 και εικονικό να φτάνει το εξωπραγματικό 100.000 και πλεον! Το πλήθος των pixels τους συνήθως δεν είναι τόσο εντυπωσιακό –και ξέρουν πολύ καλά τι κάνουν- αφού αναλύσαμε πως τα πολλά pixel δε κάνουν τη διαφορά. Οι ακριβότερες full frame Canon και Nikon για παράδειγμα έχουν ανάλυση 36.3 MP και η αντίστοιχη sony δεν υπερβαίνει τα 42 MP. Γενικά όσο μεγαλύτερος ο σενσορας τόσο μεγαλύτερο και το σώμα αλλά αυτό δεν είναι τόσο ανασταλτικό γιατί σε σχέση με τις ογκώδεις βιντεοκάμερες η χρήση μιας full frame μηχανής μάλλον διευκολύνει παρά δυσχεραίνει τα πράγματα, ειδικά στη περίπτωση της σειράς a7 που, αν και full frame, διατηρείται μικροκαμωμένη και κομψή. Στα πλην να αναφέρουμε οτι δεν είναι ακόμα σε θέση να τραβήξουν μεγάλης διάρκειας συνεχόμενη καταγραφή βιντεο. Οι περισσότερες περιορίζονται στα τριάντα λεπτά συνεχόμενης καταγραφής, αφού μετά ο σενσορας υπερθερμαίνεται και δεν αντέχει άλλο.

APS-H sensor:

Ο Active pixel CMOS sensor που αναλύσαμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο. Οι διαστάσεις του είναι 28.7 x 17 mm. Είναι ο πιο διαδεδομένος σενσορας στην αγορά. Χρησιμοποιείται τόσο από τις μεγάλες DSLR όσο και από τις ποιοτικότερες compact μηχανές. Ο APS-H τύπος σενσορα συνδυάζει ένα σχετικά μεγάλο μέγεθος με λιγότερα pixel. Λόγω του μικρότερου του μεγέθους έχει 1.3x crop factor. Η Canon 1D Mark III και Mark IV έχουν έναν τέτοιο σένσορα και θεωρούνται από τις καλύτερες μηχανές τις αγοράς κι ας μην ανήκει στη κυρίαρχη κατηγορία των full frame (με διαφορές χιλιοστών στις οποίες δεν εντοπίζονται σοβαρές διαφορές). Χρησιμοποιείται κυρίως από τη βιομηχανία της Canon. Μάλιστα μόλις το Σεπτέμβριο του 2015 ανακοίνωσε πως κατασκεύασε APS-H σένσορα διαστάσεων 29.2 x 20 mm 250 εκατομμυρίων pixel (19.580 x 12.600 για την ακρίβεια). Ο μεγαλύτερος αριθμός σε pixel για έναν σένσορα μικρότερο από το full frame. Αν και είπαμε και πιστεύουμε πως τα pixel δεν είναι αυτά που κάνουν τη διαφορά εδώ με έναν τέτοιου βεληνεκούς σενσορα μπορούμε να καταφέρουμε τρομερά τεχνικά και καλλιτεχνικά κατορθώματα. Με δυνατότητες να καταγράφει θέματα πολλά χιλιόμετρα μακριά και να βίντεο πολύ μεγαλύτερης ανάλυσης απο το πολυπόθητο και ακριβοπληρωμένο 4K. Το crop factor εδώ είναι x 1.3.

APS-C sensor:

Τα περισσότερα μοντέλα που χρησιμοποιούν οι φανατικοί οπαδοί των DSLR (Canon, Nikon, Pentax και Sony) έχουν έναν APS-C σένσορα. Αλλά δεν είναι όλοι οι APS-C ίδιοι ούτε ίσοι. Οι APS-C Canon για παράδειγμα είναι 22.2 x 14.8 ενώ στις Sony, Pentax, Fuji και Nikon (DX όπως ονομάζει η Nikon τα μη full frame μοντέλα τις οι διαστάσεις κυμαίνονται 23.5 x 15.6 mm μέχρι 23.7 x 15.5 mm με crop factor περίπου x1.6. Διαφορές αμελητέες όσον αφορά τα χιλιοστά. Οι ίδιοι αυτοί σενσορες αν και θεωρούνται entry είναι πολύ αξιόπιστοι και πουλάνε πάρα πολύ. Ειδικά σε έναν νέο φωτογράφο δίνονται πολύ δημιουργικές δυνατότητες τόσο στη φωτογραφία όσο και στο βίντεο, αλλά θα αναγκαστεί να περιοριστεί σχετικά στο post processing.

Four thirds sensor:

Εδώ πέφτουμε σχεδόν στο $\frac{1}{4}$ της συνολικής επιφάνειας του full frame σενσορα αλλά όχι απαραίτητα και σε επιδόσεις. Λόγω του μεγέθους το crop factor ανεβαίνει στο x2

έτσι διπλασιάζεται το εστιακό μήκος του εκάστοτε φακού. Είναι έναν στάνταρ που καθιέρωσε η Olympus και η Kodak και χρησιμοποιείται στις Olympus και στις Panasonic Lumix και σε κάποιες Micro four DSLRs όπως λέγονται. Η πολύ αξιόλογη mirrorless Olympus OM-D E-M10 έχει έναν τέτοιο. Αλλά και η σειρά GH της Panasonic, παρά το μικρότερο σενσορα, έχει κερδίσει τους κινηματογραφιστές με το πολύ καλό βίντεο. Η τελευταία μάλιστα καταγράφει 4K βίντεο. Οι διαστάσεις τους είναι 17.3 x 13 mm και crop factor x2 που σημαίνει πως διπλασιάζει την εστιακή απόσταση του φακού. Σε αυτές τις μηχανές δηλαδή ένας 50mm φακός μας δίνει το κάδρο ενός 100mm. Το τελευταίο επαφίεται στο φωτογράφο ή κινηματογραφιστή να θεωρηθεί θετικό ή αρνητικό, πάντως μπορεί και πρέπει να εκμεταλλεύεται αναλόγως.

CX (one inch) sensor:

Παρουσιάστηκε μόλις το 2011. Αρκετά μικρότερος και πιο απλός Υιοθετήθηκε τόσο από τη mirrorless σειρά Nikon 1J αλλά και από την pocket size της Sony Cyber-shot DSC-RX100. Είναι πιο οικονομικοί, πιο απλοί και για πιο casual χρήστες. Είναι διαστάσεων 13.2 x 8 mm με crop factor x2.7.

Ακόμα μικρότεροι:

Οι δύο τελευταίες κατηγορίες δεν έχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους. Όσον αφορά το μέγεθος είναι ο σενσορας που έχουν οι φτηνότερες από τις compact μηχανές και προέρχονται από τις τηλεοράσεις

1/1.7 inch sensor:

Είναι απο τους μεγαλύτερους που θα βρεις σε μια compact φωτογραφική μηχανή, αυτοί οι μικροί σενσορες επιτρέπουν κάπως μεγαλύτερα pixel για μειωμένο θόρυβο. Τυπική ποιότητα αλλά και πειστική αποτύπωση μιας compact μηχανής. Έννοιες όπως βάθος πεδίου και δυναμική περιοχή παύουν να μας απασχολούν.

1/2.5 inch sensor:

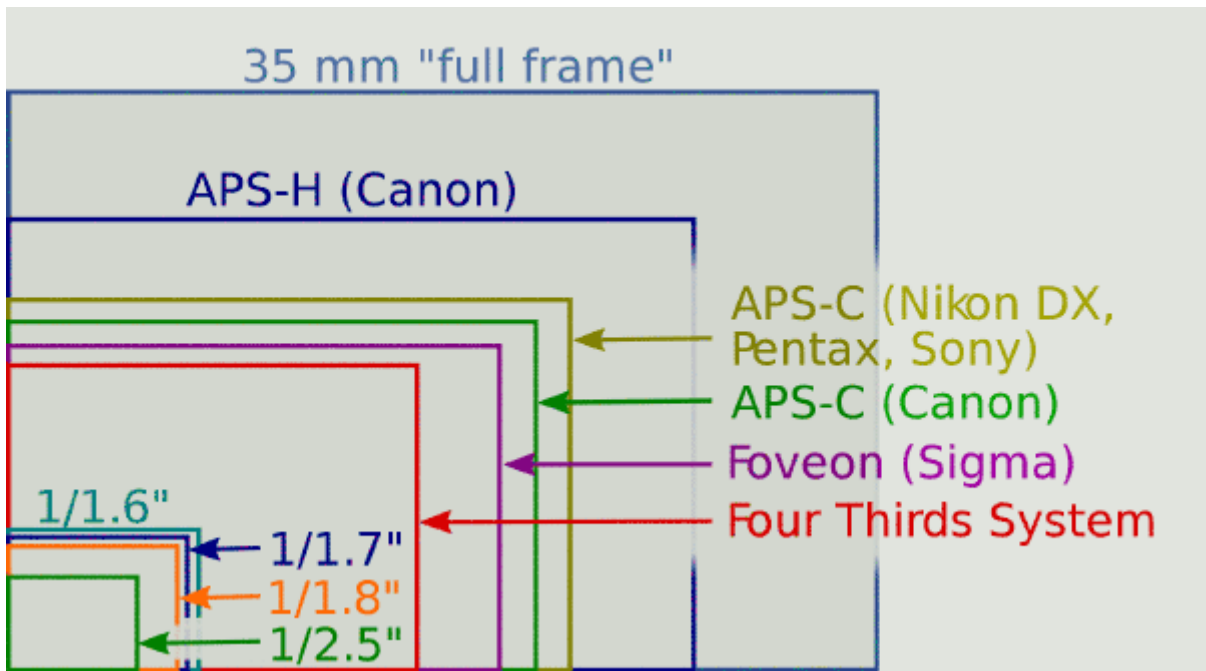
Είναι από τους μικρότερους που θα βρεις μέσα σε μια από τις φτηνότερες point

and shoot ψηφιακές μηχανές. Είναι φθηνοί στη κατασκευή, έχουν μαζική παραγωγή και τα μικροσκοπικά τους pixel παράγουν εικόνες με ψηφιακό θόρυβο και υπερβολικά μειωμένη δυναμική περιοχή.

Όσον αφορά τα smartphones, ξεκάθαρα έχουν ανοίξει ένα νέο δικό τους δρόμο στη φωτογραφία. Δεν είναι τυχαίο ότι βλέπουμε διαγωνισμούς φωτογραφίας με κινητό με καταπληκτικά αποτελέσματα, στήλες σε διάσημα περιοδικά αφιερωμένες σε αυτό το είδος φωτογραφίας ακόμη και κανονικές παραγωγές ταινιών να γυρνούνται αποκλειστικά με ένα κινητό! Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούν τα σημερινά smartphones κυμαίνονται σε 1/3-inch (iPhone 5s), 1/2.3 (Sony Xperia Z1), 1/1.5 (Nokia Lumia 1020) και διαθέτουν 20 και πλέον megapixel.

Τα επαγγελματικά μεγαθήρια:

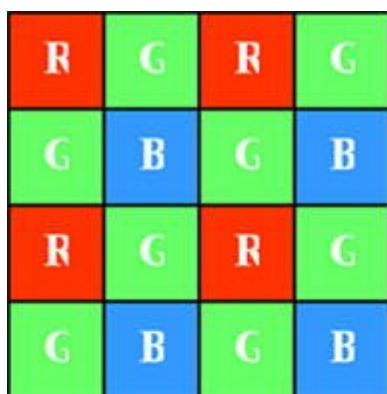
Στο χώρο του κινηματογράφου και των μεγάλων studio κυριαρχούν άλλες κάμερες που δεν απευθύνονται σίγουρα στο μέσο χρήστη. Είναι ογκώδης, βαριές και πανάκριβες και χρησιμοποιούνται (και συνήθως ενοικιάζονται) σε πιο οργανωμένες παραγωγές. Το μέγεθος του σενσора τους δε ξεπερνά το full frame. Έχουν όμως ποιοτικά χαρακτηριστικά που τις καθιστά ανώτερες. Το βάθος χρώματος, το δημιουργικό βάθος πεδίου, η ανάδειξη των υφών, η πολύ μεγάλη δυναμική περιοχή των 12 και πλέον stop, το ultra HD που φτάνει μέχρι και 6K, τα εκπληκτικής ακρίβειας νεταρισμένα σημεία και τα εξίσου όμορφα θολά, σε συνδυασμό με ποιοτικούς φακούς, όλα αυτά είναι υπεύθυνα για τα ομορφότερα κάδρα των τελευταίων δεκαετιών που έχουμε δει στη μεγάλη οθόνη του κινηματογράφου. Οι μεγαλύτερες τέτοιες κάμερες είναι οι Blackmagic, Red και Arri. Όπως και ανάμεσα στους μικρότερους των αισθητήρων έτσι και εδώ ο πόλεμος μαίνεται για το ποιος είναι ο καλύτερος αλλά ας μην αναλωθούμε και εδώ σε μια μονομαχία χαρακτηριστικό προς χαρακτηριστικό γιατί εμπίπτει πολύ το προσωπικό γούστο και δεν είναι σκοπός της παρούσας μελέτης.



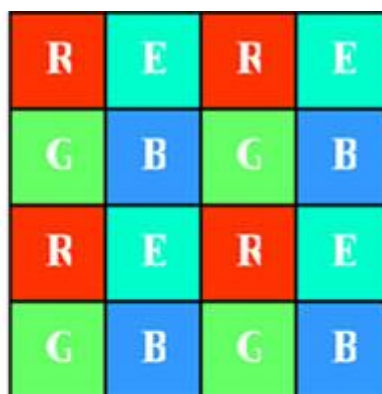
Συγκριτική αναπαράσταση των διάφορων αισθητήρων σύμφωνα με το μέγεθος τους.

Four-color CCD

Εδώ σπάζοντας τα καθιερωμένα η Sony θέλησε να προσθέσει ένα ακόμα χρώμα στα τρία βασικά και να δημιουργήσει μια συστοιχία φίλτρων αποτελούμενη από τέσσερα χρώματα που την αποκαλούμε RGB+E, και το E προκύπτει από το emerald που είναι ένα χρώμα που πλησιάζει στο τρκουάζ.



Traditional 3-color filter



New 4-color filter

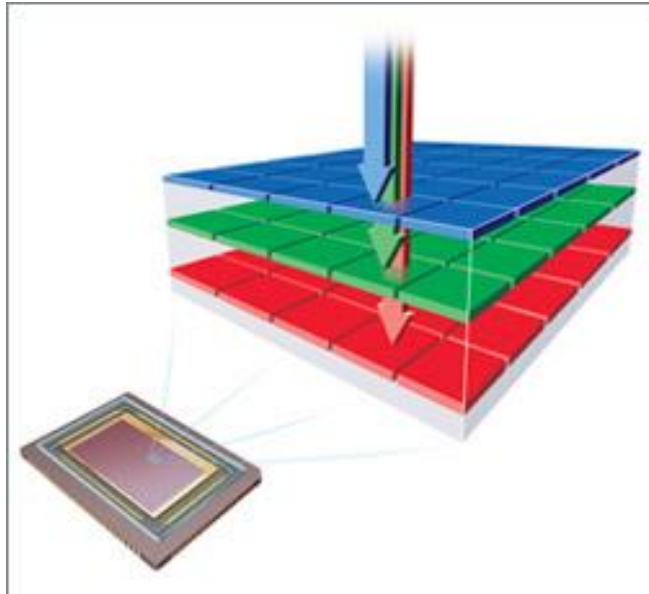


Η διαφορά φίλτρου τεσσάρων χρωμάτων σε σχέση με το κλασσικό πρότυπο Bayer

Υποστηρίζει πως αυτό το πρότυπο είναι πιο κοντά στη φυσική αντίληψη χρώματος του ανθρώπινου οφθαλμού και αυτό το πρότυπο συνοδεύεται και από έναν αντίστοιχο επεξεργαστή. Έτσι στο τετράχρωμο φίλτρο με το προστιθέμενο κυανό χρώμα μειώνονται τα χρωματικά σφάλματα και οι χρωματιστές εικόνες αποτυπώνονται με πιο φυσικό τρόπο και πιο κοντά στην ανθρώπινη όραση που είναι πιο ευαίσθητη στους πράσινους τόνους. Έτσι με το συνδυασμό των τεσσάρων χρωμάτων πετυχαίνονται όχι μόνο πιο νατουραλιστικές εικόνες αλλά και οι αποδώσεις των κόκκινων και των μπλέ και πρασίνων έχουν βελτιωθεί.

Ο Αισθητήρας Foveon

Ο μοναδικός αισθητήρας που είναι επίσης ευρέως διαδεδομένος αλλά δε χρησιμοποιεί τη Bayer array είναι ο αισθητήρας Foveon που συναντάται στις αμερικάνικης προέλευσης Sigma cameras. Πρόκειται για έναν αισθητήρα τύπου CMOS που λειτουργεί αρκετά διαφορετικά όσον αφορά το πως “αντιλαμβάνεται” το χρώμα. Εδώ αντίθετα από τη Bayer συστοιχία έχουμε τρεις διαφορετικές στρώσεις φίλτρων ένα μπλε, ένα πράσινο και ένα κόκκινο, το ένα κάτω από το άλλο και με αυτή τη σειρά. Και τα 3 χρώματα της ακτινοβολίας που αντανακλώνται από το φωτογραφούμενο θέμα προσπίπτουν στο κάθε pixel του αισθητήρα με την ίδια ένταση. Καθώς περνάει από το φακό στον αισθητήρα πρώτη η μπλε ακτινοβολία απορροφάται και αποθηκεύεται στο πρώτο μπλε φίλτρο, η πράσινη και η κόκκινη ακτινοβολία συνεχίζουν τη πορεία τους προς τον αισθητήρα. Έπειτα το ποσοστό της πράσινης ακτινοβολίας αποθηκεύεται στο μεσαίο πράσινο φίλτρο και τέλος το ποσοστό της κόκκινης αποθηκεύεται στο τελευταίο κόκκινο φίλτρο. Με αυτό το τρόπο το τελικό αποτέλεσμα δεν αναπαρίσταται με ψηφίδες ώστε να υπάρχει η εικόνα τύπου μωσαϊκό που έχουμε συνηθίσει στις περισσότερες dslr. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό γιατί δεν υπάρχει η χρονοβόρος διαδικασία της απομωσαϊκοποίησης. Με την απουσία των αλγορίθμων απομωσαϊκοποίησης σώζεται πολύτιμος επεξεργαστικός χρόνος και έτσι η camera έχει τη πολυτέλεια να παίρνει και να αποθηκεύει τις φωτογραφίες πολύ πιο γρήγορα. Ένα ακόμη πλεονέκτημα ενός Foveon sensor είναι πως πηγαίνει χαμένο λιγότερο φως λόγω της συγκεκριμένης διάταξης των φίλτρων. Γενικά ως CMOS, είναι λιγότερο ευαίσθητος στο φως από ότι ένας CCD και έτσι η απώλεια φωτονίων δε παύει να υπάρχει για κατασκευαστικούς λόγους.

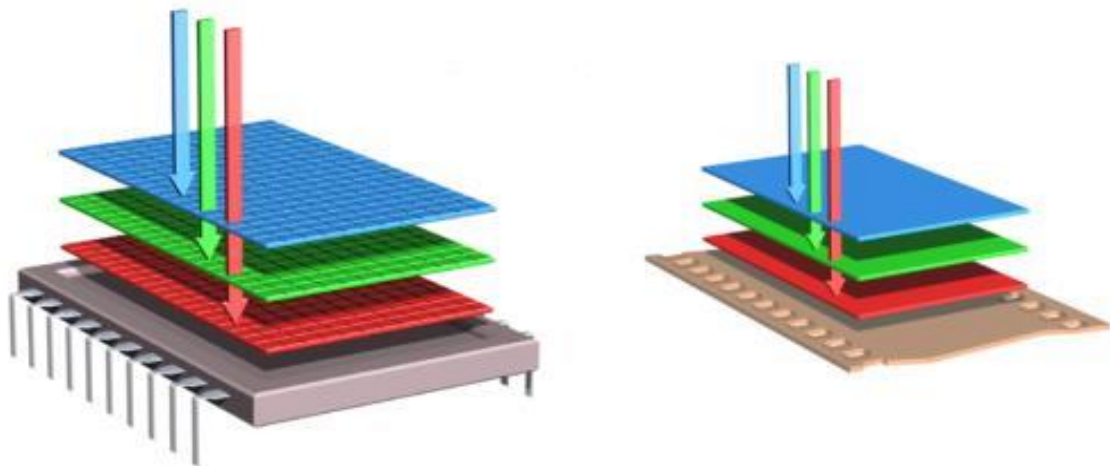


Η σταδιακή απορρόφηση της ακτινοβολίας στον αισθητήρα Foveon

Ενώ σε ένα παραδοσιακό σύστημα με Bayer διάταξη υπάρχει απώλεια που είναι στο 1/3 της συνολικής ακτινοβολίας, αφού το κάθε pixel λαμβάνει μόνο ένα χρώμα από το συνολικό φάσμα της ακτινοβολίας. Με τους αλγόριθμους απομωσαικοποίησης που χρησιμοποιούν οι υπόλοιποι CMOS ή CCD αισθητήρες για να υπολογίσουν τα υπόλοιπα χρωματικά 2/3 ενδέχεται να υπάρξει απώλεια χρωματικής πληροφορίας. Μερικές εταιρείες μάλιστα για να αντισταθμίσουν αυτή την απώλεια θολώνουν κάποια σημεία της εικόνας. Στους Foveon και τα 3 βασικά χρώματα του φάσματος απορροφώνται από το καθένα pixel, και είναι λιγότερο πιθανό να εμφανίσουν ανεπιθύμητους θορύβους (artifacts).

Ένα ακόμη μεγάλο κατασκευαστικό προσόν των Foveon sensors είναι πως εκμεταλλεύονται το γεγονός ότι κάθε χρώμα απορροφάτε σε διαφορετικά βάθη καθώς διεισδύει στο πυρίτιο. Το μπλε φως απορροφάτε σε κοντά στην επιφάνεια, το πράσινο πιο κάτω και το κόκκινο ακόμα βαθύτερα. Αυτό έχει να κάνει με τη συχνότητα του φωτός και πως αυτό απορροφάται από το κάθε υλικό. Έτσι τα φωτοευαίσθητα φίλτρα έχουν τοποθετηθεί με αυτή τη σειρά ώστε το κάθε φίλτρο να απορροφάει όσο το δυνατόν περισσότερο το δικό του φάσμα.

Θα πρέπει ακόμη να σημειωθεί και κάτι ακόμα, πως η τεχνολογία του Foveon είναι όμοια με αυτή του έγχρωμου φιλμ. Ο παραλληλισμός είναι σαφής. Τα πρώτα έγχρωμα φιλμ ήταν ασπρόμαυρα και μέσω φωτοχημικών αλλαγών των ιόντων του αργύρου, όπου



Ο αισθητήρας Foveon και η σταδιακή απορρόφηση της ακτινοβολίας και δεξιά το παρεμφερές πρότυπο του έγχρωμου φιλμ.

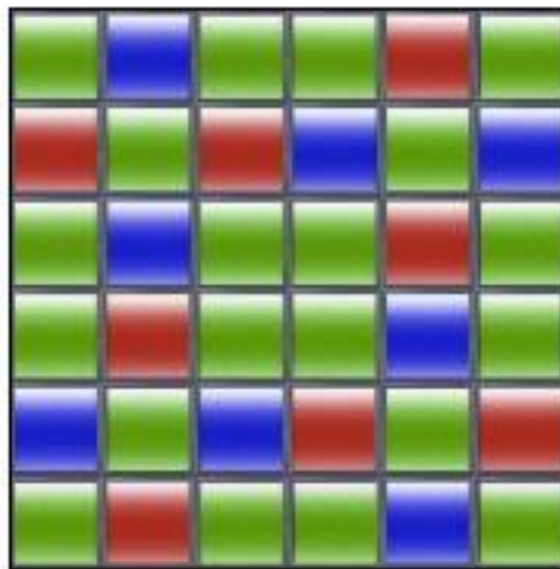
“μαυρίζουν” όταν συναντηθούν με το φως, σχημάτιζαν την αρνητική εικόνα. Έτσι και οι σενσορες -χωρίς κανένα χρωματικό φίλτρο- μιμούνται αυτή τη λειτουργία του φιλμ και αποθηκεύουν το φως. Όμως το 1861 ο Τζιμς Κλερκ Μάξγουελ, αποτύπωσε τη πρώτη έγχρωμη φωτογραφία τοποθετώντας τρία χρωματικά φίλτρα ένα κόκκινο, ένα μπλε κι ένα πράσινο σε σειρά πάνω από την φωτοευαίσθητη επιφάνεια του φιλμ όπου όταν τα συνδύαζες πρόκυπτε η κλασική έγχρωμη εικόνα. Με τον ίδιο τρόπο είναι παρατεταγμένα και τα φίλτρα στο Foveon αισθητήρα. Μάλλον την ιδέα του μεγάλου Maxwell είχαν στο μυαλό τους οι επιστήμονες πίσω από τον αισθητήρα.

Ο λόγος που δεν έχουν εξίσου μεγάλο μερίδιο στην αγορά μάλλον έγκειται στο γεγονός πως τεχνικής φύσεως προβλήματα δε τους επιτρέπουν να έχουν αρκετά μεγάλα φωτοστοιχεία και υψηλή ανάλυση. Έτσι ένας foveon αισθητήρας μπορεί να φτάσει σε φαινομενικά χαμηλής ανάλυσης για τα σημερινά δεδομένα επίπεδα. Όμως ένας foveon αισθητήρας των 5MP μπορεί να ισούται με έναν 12MP CCD ή συμβατικό CMOS αισθητήρα. Και παρότι δεν έχει καθιερωθεί μπορεί στο μέλλον να εξελιχθεί τεχνολογικά και κατασκευαστικά και να προσφέρει πολλά περισσότερα από ότι μέχρι στιγμής.

Η παρακάτω εικόνα είναι τραβηγμένη τόσο με αισθητήρα κλασικής διάταξης bayer όσο και με foveon. Η σύγκριση γίνεται στα σημεία που έχουν σημειωθεί με τετραγωνάκι. Η εταιρεία που τους προωθεί ισχυρίζεται πως είναι ίδιου μεγέθους σένσορες ωστόσο ο Foveon υπερέρχει σε αριθμό pixel.

X-Tans sensor

Η Fuji καθιέρωσε τον x-trans sensor. Ένα ακόμη μοντέλο που δεν χρησιμοποιεί τη Bayer διάταξη. Δίνοντας έμφαση στη τυχαιότητα και εμπνευσμένο από τη τυχαία διάταξη των λεπτών κόκκων αργύρου στο φιλμ. Ο x-trans εξαλείφει το ανεπιθύμητο μουaré, έχει ζωντανά χρώματα και αναδεικνύει τα προτερήματα των φακών. Η διάταξη του είναι ελαφρώς διαφορετική από τη bayer και έχει ένα επαναληπτικό μοτίβο όπως ακριβώς φαίνεται στο σχήμα



Επίλογος

Προσπάθεια της παρούσας μελέτης είναι να προσεγγίσει το θέμα της σύγχρονης φωτογραφίας πολύπλευρα. Πρόκειται για μια αναδρομή με αφετηρία τις απλές και βασικές αρχές, περνώντας από επιστημονικές παρατηρήσεις και συμπεράσματα και ενδιάμεσους σταθμούς μεγάλα επιστημονικά όσο και καλλιτεχνικά κατορθώματα. Δεν πρόκειται για μια ιεράρχηση τεχνικών χαρακτηριστικών, ούτε για μια συγκέντρωση στατιστικών με ανάδειξη τον καλύτερο. Γύρω από όλη αυτή τη προσέγγιση σκόπιμα απουσιάζει η ενδεδειγμένη σύγκριση των τεχνικών λεπτομερειών χωρίς να απουσιάζει η χρησιμότητα και η λειτουργικότητα τους αλλά ούτε και η επιστημονική αναγκαιότητα που τις γέννησε. Και αυτό γιατί στο παρόν κείμενο τέτοια χαρακτηριστικά δε θεωρούνται ανταπόδεικτα. Ο κινητήριος μοχλός για τη συνολική εκπόνηση της μελέτης είναι η αγάπη για την ίδια τη φωτογραφία και την ιστορία της μέχρι σήμερα.

Έτσι, παράλληλα με την γεωμετρική και ευτυχή εξέλιξη του μέσου ποτέ δε θα μπορούσα να αναδείξω το ανώτερο τεχνολογικά, ως ανώτερο γενικά. Θα προτιμήσω τις πολύπλευρες συζητήσεις που γίνονται με κριτήρια την τέχνη και την τεχνική και οι απόψεις ως συγκρούονται, ανάλογα με την προσωπικότητα, το γούστο, την αισθητική ακόμα και τις ιδιορρυθμίες των δημιουργών... παρά μια καθολική αλήθεια, πόσο μάλλον όταν αυτή κρύβεται στα νούμερα που ακολουθούν τις υποδιαστολές.

Μελετώντας καθολικά τη διαδικασία της φωτογραφίας, και έχοντας κάνει όλη αυτή την επιστημονική και ιστορική αναδρομή στη τέχνη και στη τεχνική της απεικόνισης βλέπουμε πως οι βασικές αρχές των πραγμάτων παραμένουν ίδιες και αναλλοίωτες και διέπονται από τους ίδιους κανόνες. Πως, η διαδικασία της φωτολιθογραφίας, για παράδειγμα, δε διαφέρει πολύ από το μοντέλο της camera obscura, την αποτύπωση της εικόνας στο φιλμ ή το τύπωμα στο σκοτεινό θάλαμο αλλά ούτε και από τη δημιουργία pixel και ψηφιακών εικόνων στους αισθητήρες τελευταίας γενιάς. Πως όλα αυτά βασίζονται στο αρχέγονο παιχνίδισμα του φωτός με το μικρόκοσμο ή με όποιον άλλο βρεθεί στο ταξίδι του. Ένα ταξίδι που κρατάει από καταβολής κόσμου και που έχει φωτίσει, άλλοτε λαμπρά και άλλοτε διακριτικά, τόσες διαφορετικές πτυχές της ανθρώπινης ύπαρξης.

Βιβλιογραφία:

- Ian S. Mclean (1989), *ELECTRONIC AND COMPUTER AIDED ASTRONOMY from eyes to electronic sensors*, Ellis Horwood Limited
- David D. Busch (2005), *MASTERING DIGITAL SLR PHOTOGRAPHY*, Thomson Course Technology
- Jon Tarrant (2007), *UNDERSTANDING DIGITAL CAMERAS – GETTING THE BEST IMAGE FROM CAPTURE TO OUTPUT*, Elsevier
- John G. Blair (2008), *The Glossary of digital photography*, Rocky Nook
- N. Los Robles Ave. 7th Floor, Pasadena, CA 91101
University of Arizona, Steward Observatory, Tucson, AZ 85721
University of Southern California, Department of Electrical Engineering-
Electrophysics,
Los Angeles, CA 90089-0271, *CMOS Active Pixel Sensor (APS) Imager for Scientific Applications*, Micron Imaging
- W. S. Boyle, G. E. Smith, *Charge-coupled devices A new approach to MIS device structures*, BellTelephoneLaboratories, Inc.
- Robert A. Maschal Jr., S. Susan Young, Joe Reynolds, Keith Krapels, Jonathan Fanning, Ted Corbin (2010), *Review of Bayer Pattern Color Filter Array (CFA) Demosaicing with New Quality Assessment Algorithms*
- Γιώργος Γραμματικάκης (2005), *Η ΑΥΤΟΒΙΟΓΡΑΦΙΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ*, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης
- <http://www.cambridgeincolour.com/>
<<http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/digital-camera-sensor-size.htm>>
<<http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/cameras-vs-human-eye.htm>>
<<http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/dynamic-range.htm>>
- <http://www.techhive.com>
< <http://www.techhive.com/article/2052159/demystifying-digital-camera-sensors-once-and-for-all.html>>
- <http://www.dpreview.com/>
- <https://el.wikipedia.org/>

