



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ  
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ ΕΠΙΔΟΣΕΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ  
CCD ΓΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΕ ΧΑΜΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ**

ΓΑΛΑΝΗΣ ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2010

**Επιβλέπων**  
**Σ. Μαλτέζος, Επικ. Καθ. Ε.Μ.Π.**

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ ΕΠΙΔΟΣΕΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ  
CCD ΓΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΕ ΧΑΜΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ**





*Αφιερώνεται* .....

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη παρούσα εργασία παρουσιάζεται μία αναλυτική μελέτη και περιγραφή των βασικών αρχών λειτουργίας, των τύπων και των χαρακτηριστικών μεγεθών, που επηρεάζουν τις επιδόσεις των διατάξεων CCD για την ανίχνευση ακτινοβολιών. Γίνεται επίσης αναλυτική μελέτη και περιγραφή των παραγόντων που συνεισφέρουν στο συνολικό θόρυβο και αναφέρονται διάφορες τεχνικές μείωσης ή εξάλειψης αυτών. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται για τις κάμερες CCD υψηλών επιδόσεων για επιστημονικές εφαρμογές, που λειτουργούν σε θερμοκρασίες υγρού αζώτου. Ακόμα γίνεται αναφορά στα προβλήματα που δημιουργούνται στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας και παρουσιάζονται μετρήσεις που ελήφθησαν χρησιμοποιώντας την κάμερα CCD με αισθητήρα CCD 30-11 της E2V, σε διάφορες εφαρμογές.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....</b>	<b>6</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....</b>	<b>7</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>11</b>
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b>	
<b>ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ CCD.....</b>	<b>20</b>
1.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ CCD.....	20
1.1.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ.....	20
1.1.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ – MOS .....	23
1.1.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΣΥΖΕΥΞΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	25
1.2. ΕΙΔΗ – ΤΥΠΟΙ CCD.....	26
1.2.1 CCD: ΤΡΙΩΝ ΦΑΣΕΩΝ - ΔΥΟ ΦΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΙΚΗΣ ΦΑΣΗΣ - ΘΑΜΜΕΝΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ .....	26
1.2.2 CCD ΕΜΠΡΟΣΘΙΑΣ ΚΑΙ ΟΠΙΣΘΙΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗΣ.....	32
1.2.3 INTERLINE & FRAME TRANSFER CCD .....	35
1.3 Η ΒΑΘΜΙΔΑ ΕΞΟΔΟΥ ΚΑΙ Ο ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΤΗΣ.....	36
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b>	
<b>ΕΙΔΗ ΘΟΡΥΒΟΥ ΚΑΙ ΟΙ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ CCD.....</b>	<b>40</b>
2.1 ΦΩΤΟΝΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ.....	41
2.2 ΘΟΡΥΒΟΣ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ.....	43
2.3 ΘΕΡΜΙΟΝΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ.....	44
2.4 ΘΟΡΥΒΟΣ ΧΡΟΝΙΣΜΟΥ.....	48

2.5 ΘΟΡΥΒΟΣ ΑΝΑΓΝΩΣΗΣ.....	48
2.6 ΕΠΙΔΟΣΗ ΤΟΥ CCD ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΘΟΡΥΒΟ – SNR.....	54
2.7 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ.....	59

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

#### **ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΗΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΖΟΥΝ ΤΙΣ ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΕΝΟΣ CCD.....66**

3.1 ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ .....	66
3.2 ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΚΑΜΕΡΑΣ.....	68
3.3 ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ .....	69
3.4 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΦΟΡΤΙΟΥ .....	71
3.5 ΔΙΑΧΥΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	75
3.6 BINNING.....	75
3.7 ΥΠΕΡΧΕΙΛΙΣΗ [BLOOMING].....	77
3.8 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....	79

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

#### **ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ CCD ΣΕ ΧΑΜΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ .....80**

4.1 ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΚΕΝΟΥ ΠΡΙΝ ΑΠΟ ΤΗ ΨΥΞΗ.....	80
4.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ.....	81



4.3	ΣΦΑΛΜΑ ΛΟΓΩ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ .....	82
4.4	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΦΟΡΤΙΟΥ CTE.....	84
4.5	ΑΛΛΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΛΟΓΩ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ ΤΩΝ PIXELS.....	85
4.6	ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ.....	87
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</b>		
	<b>ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟΙ ΤΥΠΟΙ CCD ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ.....</b>	<b>87</b>
5.1	EMCCDs .....	87
5.2	ICCD.....	91
5.3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ CCD EMCCD και ICCD.....	100
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6</b>		
	<b>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΨΥΧΟΜΕΝΗΣ ΜΕ ΥΓΡΟ ΑΖΩΤΟ ΚΑΜΕΡΑΣ, ΜΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ CCD 30-11 ΤΗΣ E2V.....</b>	<b>103</b>
6.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΤΗΣ ΚΑΜΕΡΑΣ.....	103
6.2	ΧΡΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ .....	110
6.3	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	114
	 <b>ΠΑΡΑΤΗΜΑ .....</b>	<b>115</b>
	 <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>119</b>



# **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

## **1.ΓΕΝΙΚΑ**

Είμαστε όλοι γνώστες για τις καταπληκτικές αστρονομικές εικόνες που παράγονται με τηλεσκόπια στην εποχή μας, ιδιαίτερα με αυτές που εμφανίζονται με χρωματικές αναπαραστάσεις και παρουσιάζονται στο διαδύκτιο και σε περιοδικά. Εξίσου θεαματικά είναι τα φωτομετρικά, αστρομετρικά και φασματοσκοπικά αποτελέσματα τα οποία αν και είναι λιγότερο γνωστά στο ευρύ κοινό παρουσιάζουν μεγαλύτερο αστροφυσικό ενδιαφέρον.

Το κοινό στοιχείο όλων αυτών των αποτελεσμάτων είναι το γεγονός ότι πίσω από κάθε καλή οπτική εικόνα κρύβεται ένα καλό CCD (Charge Coupled Device). Τα CCD χρησιμοποιούνται σε πολλές πτυχές της καθημερινότητάς μας. Για παράδειγμα στις βιντεοκάμερες οικιακής χρήσης, στις κάμερες ελέγχου της ταχύτητας των αυτοκινήτων στους αυτοκινητόδρομους, στα ακτινογραφικά μηχανήματα, στους παλμογράφους και στις ψηφιακές κάμερες που χρησιμοποιούνται ως μόνιτορ ελέγχου ποιότητας (digital cameras used as quality control monitors). Επίσης αξιοσημείωτη είναι η ευρεία χρήση τους με πολλές εφαρμογές στη μοντέρνα αστρονομία και αστροφυσική. Η χρήση των CCD στις αστρονομικές παρατηρήσεις διαχωρίζεται σε τέσσερις βασικούς άξονες: **α)απεικόνιση, β) αστρομετρία, γ)φωτομετρία, δ)φασματοσκοπία.**

Επειδή οι εγγενείς φυσικές ιδιότητες του πυριτίου (που είναι το βασικό υλικό των CCD) είναι περισσότερο επωφελείς κυρίως στη περιοχή του ορατού φάσματος (από 300nm έως 1000nm περίπου) η πλειοψηφία της ανάλυσής μας αναφέρεται σε αυτή τη περιοχή των ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών. Επίσης πιο σπάνια και σε ειδικές περιπτώσεις τα CCD χρησιμοποιούνται για τη μελέτη ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών εκτός του ορατού φάσματος (π.χ. του υπέρυθρου).

Τα CCD κατασκευάζονται σε διάφορα μεγέθη που κυμαίνονται από 512×512 pixels σε συστοιχία μέχρι 4096×4096 pixels. Επίσης είναι διαθέσιμα και σε ορθογώνιο σχήμα με άνισες πλευρές για παράδειγμα 1024×3072 pixels που χρησιμοποιούνται για φασματοσκοπικές εφαρμογές. Θα δούμε ότι κάθε pixel λειτουργεί σαν μία ηλεκτρικά απομονωμένη περιοχή του πυριτίου και είναι ικανή να απορροφά (συλλέγει) τα προσπίπτοντα φωτόνια, να αποθηκεύει τα παραγόμενα φωτοηλεκτρόνια τα οποία κατόπιν διαβάζονται από τις συστοιχίες του CCD συνήθως μέσω ενός συνδεδεμένου υπολογιστή και μετατρέπονται σε ψηφιακό σήμα.

Τα ονόματα των CCD είναι συνήθως ένας συνδυασμός από το όνομα της κατασκευαστικής εταιρίας και το μέγεθος του CCD (π.χ. RCA512, SITe2048). Στα διάφορα παρατηρητήρια που συχνά μέσα στον εξοπλισμό τους περιλαμβάνεται ένα CCD ως ανιχνευτής για την εκτέλεση εξειδικευμένων εργασιών (π.χ. ως φασματόμετρο) ο προσδιορισμός του ονόματος μπορεί να περιέχει ή να μην περιέχει πληροφορίες για το CCD. Για παράδειγμα το Βασιλικό παρατηρητήριο του Γκρίνουιτς (Royal Greenwich Observatory, RGO) στο La Palma διαθέτει το 'FOS#1A' (το οποίο είναι ένα 512×1024 CCD που χρησιμοποιείται στο φασματογράφο) και το Tek 2k (το οποίο είναι ένα 2048×2048 CCD που χρησιμοποιείται στο 0.9m τηλεσκόπιο ως κάμερα εικόνων).

Οι περισσότεροι ανιχνευτές για αστρονομικές παρατηρήσεις στις μέρες μας στα επαγγελματικά παρατηρητήρια καθώς επίσης και με πολλά ερασιτεχνικά τηλεσκόπια, είναι CCD κάμερες. Αυτό το γεγονός από μόνο του προδίδει την εξαιρετική χρησιμότητα των CCD. Τα CCD έφεραν επανάσταση στη μοντέρνα αστρονομία και σίγουρα θα λάβουν μία θέση στην ιστορία της αστρονομίας ανάμεσα στις σπουδαιότερες ανακαλύψεις μαζί με τα τηλεσκόπια, τα πρίσματα, τα φασματόμετρα, κ.α. Η συνεισφορά τους στη διεύρυνση των γνώσεών μας από τις παρατηρήσεις του ουρανού είναι ήδη εκπληκτικές αν και χρησιμοποιούνται μόνο για περίπου 35 χρόνια. Πρωτοεμφανίστηκαν ως αναλογικά ηλεκτρονικά σε μαγνητικές μνήμες από τους Willard Boyle & George Smith το 1970 κατά τη διάρκεια των ερευνητικών τους δραστηριοτήτων στα εργαστήρια Bell (Bell Laboratories), ενώ οι πρώτες αστρονομικές εικόνες με CCD εμφανίστηκαν περίπου το 1975. Οι Willard Boyle & George Smith τιμήθηκαν γι' αυτή την ανακάλυψή τους με το βραβείο Νόμπελ του έτους 2009.

Στα τελευταία 30 χρόνια έχει επιτευχθεί τεράστια πρόοδος τόσο ως προς τη βιομηχανική τους παραγωγή όσο και ως προς τις ιδιότητές τους και τις τεχνικές τους προδιαγραφές. Η εξέλιξή τους έχει βελτιώσει κατά πολύ την απόδοσή τους ως προς το θόρυβο και ως εκ τούτου γενικεύτηκε η χρήση τους στις αστρονομικές παρατηρήσεις.

## **2. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ CCD ΕΝΑΝΤΙ ΑΛΛΩΝ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ**

Δύο είναι οι πιο βασικοί λόγοι που τα CCD ουσιαστικά θεωρούνται στις μέρες μας οι πιο ολοκληρωμένες συσκευές εικόνων (οπτικές συσκευές):

### **A) ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΘΟΡΥΒΟ**

Η χρησιμότητα ενός ανιχνευτή καθορίζεται από το εγγενές ποσό θορύβου ανάγνωσης εντός της ίδιας της συσκευής. Τα τελευταίας γενιάς CCD μπορούμε να πούμε ότι είναι πλέον σχεδόν απαλλαγμένα από το θόρυβο ανάγνωσης αφού οι τιμές του δεν ξεπερνούν τα 15 e<sup>-</sup> ανά

pixel (για σύγκριση αναφέρουμε ότι τα πρώτα CCD είχαν θόρυβο ανάγνωσης περίπου  $800 e^-$  ανά pixel). Τα μεγάλα επίπεδα θορύβου που παρουσίαζαν οι πρώτοι ανιχνευτές έθεταν περιορισμούς τόσο στο λόγο σήματος προς θόρυβο για μία συγκεκριμένη μέτρηση, όσο και στο δυναμικό εύρος παρατήρησης της κάμερας.

## **B) ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΙ ΕΥΡΟΣ ΔΙΟΔΟΥ ΖΩΝΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ (Quantum Efficiency and Band Pass)**

Ἐκβαντική απόδοση ἔστιν ὁ ὅρος ποῦ χρῆσιμοποιοῦμε γιὰ νὰ ἐκθέσουμε τὴν ἰκανότητα ἐνὸς ἀνιχνευτῆ ὡς πρὸς τὴν ἐπιτυχή ἀπόκρισή του στὴν συλλογή των εἰσερχομένων φωτονίων ὅσο καὶ στὴ καταμέτρηση καὶ καταγραφὴ αὐτῶν. Γενικά ὀρίζεται ὡς ὁ λόγος των φωτονίων ποῦ ἀνιχνεύθηκαν καὶ καταμετρήθηκαν τελικά ἀπὸ τὴ συσκευὴ πρὸς τὰ συνολικά εἰσερχόμενα φωτόνια.

Εὐρος διόδου ζώνης συχνότητων (Band Pass) ἐννοοῦμε τὸ συνολικὸ φασματικὸ εὐρος στο ὁποῖο ὁ ἀνιχνευτῆς εἶναι εὐαίσθητος στα εἰσερχόμενα φωτόνια. Το μάτι μας γιὰ παράδειγμα ἔχει φασματικὸ εὐρος ἀνίχνευσης ποῦ καλύπτει περίπου 200 nm (ἀπὸ 450 nm ἕως περίπου 650 nm) ἐπὶ τοῦ συνόλου τοῦ ὀπτικοῦ φάσματος.

Ἐνα ἀπὸ τὰ σπουδαία πλεονεκτήματα των CCDs συγκρινόμενα με παλιότερες ἀνιχνευτικές διατάξεις εἶναι ἡ ἰκανότητά τους νὰ μετατρέπουν ἓνα μεγάλο ποσοστὸ των εἰσερχομένων φωτονίων σε φωτοηλεκτρόνια . Οἱ φωτογραφικὲς πλάκες εἶχαν κβαντικὴ ἀπόδοση περίπου μόνο 2% (ἡ Kodak IIIaJ's ἔφτασε μέχρι 3%) ἐνῶ οἱ πιο ὑπερευαίσθητες φωτογραφικὲς πλάκες (οἱ ὁποῖες εἶχαν ὑποστεί ἐιδικὴ ἐπεξεργασία με θέρμανση καὶ ἐκθεση σε διάφορα ἀέρια) κατάφεραν νὰ φτάσουν μέχρι τὸ 10%! Ἐπίσης ἐπειδὴ τὰ φωτογραφικὰ ἄγαλακτώματα (διάφορες χημικὲς οὐσίες ποῦ χρῆσιμοποιοῦνται στὴν ἐιδικὴ ἐπεξεργασία των φωτογραφικῶν πλακῶν) ἦταν περισσότερο εὐαίσθητα στο ὑπεριώδες καὶ στο κυανὸ τμήμα τοῦ φάσματος, ἦταν ἀπαραίτητη ἡ ἐκ νέου ἐπεξεργασία με πολλαπλὲς βαφές καὶ ἐπιχρίσματα ἔτσι ὡστε νὰ διευρυνθεῖ ἡ ζώνη διόδου συχνότητων καὶ νὰ γίνῃ ἐπιτρεπτή ἡ ἀνίχνευση των ἄκτινων καὶ ἔρυθρων φωτονίων. Ἀπὸ τὴν ἄλλη μεριά ἀκόμα καὶ τὰ πρώτα CCD εὐκόλα ἔφταναν σε μέγιστες τιμές κβαντικῆς ἀπόδοσης 40%! Σήμερα γιὰ ἓνα τυπικὸ CCD ἡ καμπύλη κβαντικῆς ἀπόδοσης παρουσιάζει μέγιστο στο 90% καὶ εἶναι τουλάχιστον 60% γιὰ τὰ δύο τρίτα ἢ καὶ περισσότερο, ἐπὶ τοῦ συνόλου τῆς περιοχῆς τῆς ζώνης διόδου συχνότητων (Band Pass). Ἐπίσης τὸ εὐρος τῆς διαθέσιμης ζώνης διόδου (Band Pass) με κβαντικὴ ἀπόδοση ἀπὸ 10% καὶ πάνω (δηλαδή τὴ μέγιστη τιμὴ κβαντικῆς ἀπόδοσης των καλύτερων φωτογραφικῶν πλακῶν), κυμαίνεται ἀπὸ 300 nm ἕως 1050 nm περίπου. Ἀκόμα με διάφορες τεχνικὲς (ὅπως π.χ. ἐπιχρισμάτων καὶ ἐναπόθεσης φωσφόρου στὴν ἐπιφάνεια τοῦ CCD) τὸ εὐρος διόδου συχνότητων μπορεῖ νὰ διευρυνθεῖ ὅπως ἐπίσης εἶναι δυνατὴ καὶ ἡ περαιτέρω ἀύξηση τῆς κβαντικῆς ἀπόδοσης γιὰ συγκεκριμένες περιοχές τοῦ φάσματος.

## **ΧΡΗΣΕΙΣ**

### **A) ΙΑΤΡΙΚΗ - ΨΗΦΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΓΡΑΦΙΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ CCD**

Τα τελευταία χρόνια διάφορα συστήματα για τη λήψη ψηφιακής ακτινογραφίας με CCD έχουν κάνει την εμφάνιση τους. Ο βασικός μηχανισμός για τη δημιουργία της εικόνας παραμένει κοινός. Υπάρχει ένα ειδικό στρώμα ενισχυτικών πινακίδων (scintillation layer) για τη μετατροπή των φωτονίων της ακτινοβολίας X σε φως. Στη συνέχεια το φως κατευθύνεται μέσω οπτικών ινών και προσβάλλει το CCD. Σε κάθε στοιχειώδη μονάδα του αισθητήρα, δηλαδή σε κάθε pixel, δημιουργούνται ηλεκτρικά φορτία. Το μέγεθος των φορτίων αυτών είναι ανάλογο με την ένταση της δέσμης της ακτινοβολίας X, που προσέβαλλε τον αισθητήρα. Η πολύ μεγάλη ευαισθησία στην ακτινοβολία X έχει σαν συνέπεια να δέχεται ο ασθενής πολύ μικρότερη ακτινοβολία.

### **ΤΗΛΕΟΦΘΑΛΜΟΛΟΓΙΑ**

Αναφορικά με την ανάκτηση εικόνων τηλεοφθαλμολογίας, η πιο συνηθισμένη εφαρμογή είναι η χρήση CCD κάμερας τοποθετημένης εμπρός από μια ακτινοσκοπική αγγειογραφική συσκευή, ένα οφθαλμολογικό μικροσκόπιο, ή την ψηφιοποίηση slides οφθαλμολογικών εικόνων. Οι διαγνωστικές εικόνες ψηφιοποιούνται, αποθηκεύονται και σε ύστερο χρόνο μεταδίδονται στον εξειδικευμένο οφθαλμίατρο για γνωμάτευση και παροχή περαιτέρω οδηγιών.

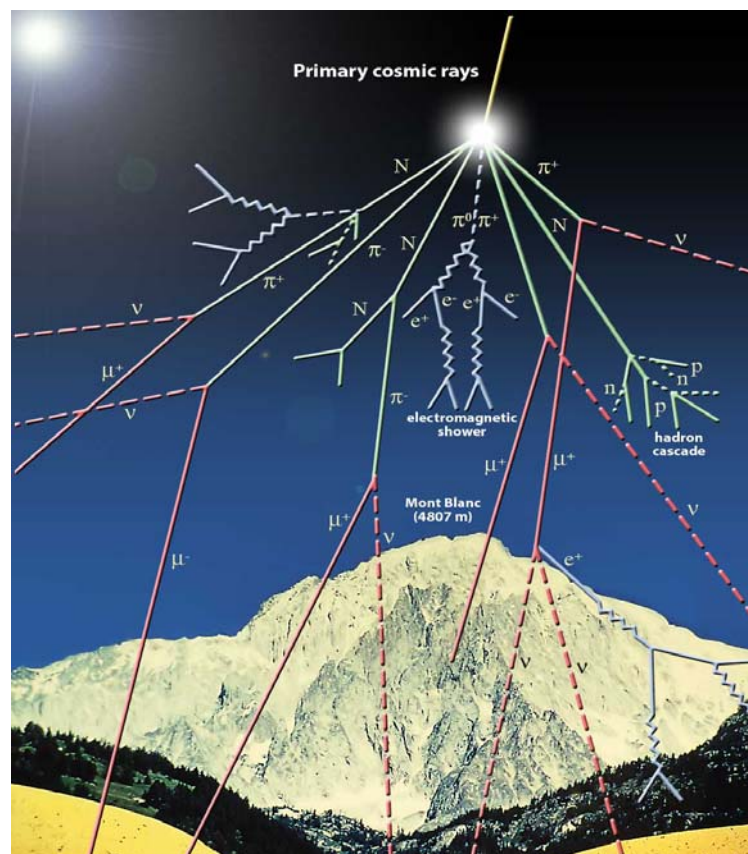
### **B) ΜΕΛΕΤΗ ΚΟΣΜΙΚΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ**

#### **ΚΟΣΜΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ**

Οι κοσμικές ακτίνες (ή αλλιώς κοσμική ακτινοβολία) συνίσταται από σωματίδια υψηλής ενέργειας (έως  $10^{20}$  eV) που κινούνται στο μεσοαστρικό χώρο. Τα σωματίδια αυτά μπορεί να είναι πυρήνες διαφόρων ατόμων (κατά πλειοψηφία πρωτονίων) όπως και υποατομικά σωματίδια (π.χ. μεσόνια, ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια κ.τ.λ.π.). Την κοσμική ακτινοβολία διακρίνουμε σε πρωτογενή και δευτερογενή.

Η πρωτογενής ακτινοβολία συνίσταται από τα σωματίδια υψηλής ενέργειας (κυρίως πρωτόνια) που κινούνται στο μεσοαστρικό χώρο πριν από την πρόσπτωση τους στην πάνω στη γήινη ατμόσφαιρα. Η πρόσπτωση ενός τέτοιου σωματιδίου πάνω στην γήινη ατμόσφαιρα έχει σαν αποτέλεσμα τη σύγκρουση του με ένα από τα άτομα ή τα μόρια των αερίων της. Αποτέλεσμα μιας τέτοιας σύγκρουσης είναι η διάσπαση του συγκρουόμενου πυρήνα του ατόμου σε πολλά υποατομικά σωματίδια. Μερικά από αυτά προσλαμβάνουν από τη σύγκρουση τόσο υψηλή ενέργεια ώστε συγκρουόμενα ξανά με άλλα άτομα ή μόρια της ατμόσφαιρας προκαλούν με όμοιο τρόπο περαιτέρω διασπάσεις, που ακολουθούνται από παραγωγή νέων υποατομικών σωματιδίων.

Το σύνολο των παραγομένων υποατομικών σωματιδίων από αυτή τη διαδικασία, χαρακτηρίζεται σαν δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία. Κατά τον τρόπο αυτό ένα πρωτογενές σωματίδιο υψηλής ενέργειας κινούμενο με μεγάλη ταχύτητα μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα προκαλεί την παραγωγή μεγάλου αριθμού δευτερογενών σωματιδίων-βροχής κοσμικών ακτίνων- με σύγχρονη απώλεια της ενέργειας του προς αυτά. Η παρατήρηση των κοσμικών ακτίνων από την επιφάνεια της Γης συνίσταται στη παρατήρηση της δευτερογενούς ακτινοβολίας. Η μελέτη των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων επιτυγχάνεται και με άμεσο τρόπο δια μέσου οργάνων τα οποία οδηγούνται με αερόστατα ή δορυφόρους εκτός γήινης ατμόσφαιρας. Μια τυπική βροχή κοσμικών ακτίνων που προέρχεται από τη σύγκρουση ενός πρωτογενούς πυρήνα με άτομο της ατμόσφαιρας φαίνεται στο σχήμα 1.



**ΣΧΗΜΑ 1 :** Αναπαράσταση ατμοσφαιρικού κατεγισμού.

Αυτή αποτελείται από ενεργητικά θραύσματα του διασπασθέντος πυρήνα, βαρυόνια, μεσόνια και τα παράγωγα της διασπάσεώς τους (π.χ. διάσπαση π-μεσονίων ή πιονίων (π) σε μ-μεσόνια ή μιονία (μ), μιονίων σε ηλεκτρόνια (e<sup>-</sup>) ή ποζιτρόνια (e<sup>+</sup>), διάσπαση πιονίων σε φωτόνια γ και στη συνέχεια δημιουργία από αυτά ζευγών ηλεκτρονίων-ποζιτρονίων). Διαδοχή τέτοιων συγκρούσεων και διασπάσεων έχει σαν αποτέλεσμα την παρατήρηση από τη επιφάνεια της Γής

μιας βροχής κοσμικών ακτίνων που αποτελείται κυρίως από ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια και μόνια. Πολλές φορές η ενέργεια ενός μόνο πρωτογενούς σωματιδίου είναι ικανή να προκαλέσει κοσμική βροχή που αποτελείται από  $10^9$  δευτερογενή σωματίδια. Μία τυπική βροχή κοσμικών ακτινοβολιών έστω και αν αρχίζει σε ύψος 10 και πλέον χιλιομέτρων από την επιφάνεια της Γής, με τη σύγκρουση ενός πρωτογενούς με ένα άτομο της ατμόσφαιρας, εμφανίζεται συγκεντρωμένη γύρω από την διεύθυνση προσπτώσεως του πρωτογενούς σωματιδίου και προσπίπτει πάνω στη Γή σε επιφάνεια διαμέτρου όχι μεγαλύτερης μερικών εκατοντάδων μέτρων. Η συγκέντρωση αυτή των κοσμικών βροχών επιτρέπει την εύρεση της ολικής ενέργειας του εκάστοτε πρωτογενούς σωματιδίου με την παρατήρηση της κοσμικής βροχής μέσω πλεγμάτων μετρητών σωματιδίων διατεταγμένων επί μικρής σχετικά επιφάνειας διαμέτρου μερικών εκατοντάδων μέτρων. Επιπλέον η διαφορά του χρόνου αφίξεως των σωματιδίων στους διάφορους μετρητές δείχνει τη διεύθυνση πρόσπτωσης του πρωτογενούς σωματιδίου.

Η μελέτη της πρωτογενούς ακτινοβολίας υποβοηθείται σημαντικά από τα πολλά πειραματικά δεδομένα τα οποία προέρχονται από τη μελέτη σωματιδίων υψηλής ενέργειας τα οποία και προέρχονται εργαστηριακά με ειδικούς επιταχυντές. Μέχρι στιγμής οι εργαστηριακοί επιταχυντές μπορούν να επιταχύνουν διάφορα σωματίδια με ενέργειες της τάξεως των  $3 \times 10^{11}$  eV. Αυτές είναι κατά πολύ χαμηλότερες της ενέργειας ορισμένων πρωτογενών κοσμικών σωματιδίων η οποία ανέρχεται σε  $10^{20}$  eV. Η πλειοψηφία πάντως των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων χαρακτηρίζεται από σωματίδια ενέργειας  $10^9$  eV και μόνο ένα μικρό ποσοστό έχει ενέργεια μεγαλύτερη του  $10^{18}$  eV.

Παραθέτουμε λοιπόν ορισμένα πειραματικά δεδομένα που χαρακτηρίζουν την πρωτογενή κοσμική ακτινοβολία όσον αφορά:

- α) τη χημική σύνθεση,
- β) την κατανομή των σωματιδίων της συναρτήσεως της ενέργειας τους,
- γ) την πυκνότητα ενέργειας και την ισοτροπική κατανομή τους.

#### **α) ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΝΘΕΣΗ**

Η πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία στις περιοχές ενέργεια από  $10^9$  έως  $10^{12}$  eV συνίσταται, όπως προκύπτει από παρατηρήσεις που έγιναν κυρίως με αερόστατα στην κορυφή της γήινης ατμόσφαιρας, κατά 90% από πρωτόνια, 9% από σωματίδια α (πυρήνες He) και 1% από βαρύτερους πυρήνες. Αναλυτική σύσταση και σύγκριση αυτής με την αντίστοιχη κοσμική σύσταση του Γαλαξία δείχνεται στον Πίνακα 1 όπου οι πυρήνες των διαφόρων ατόμων που απαντώνται στην κοσμική ακτινοβολία κατατάσσονται κατά ομάδες ανάλογα του (φορτίου) ατομικού αριθμού τους. Η διαφορά τους συνίσταται στην μεγαλύτερη περιεκτικότητα των κοσμικών ακτίνων σε πυρήνες βαρύτερους του He κυρίως δε σε “ελαφρούς” πυρήνες λιθίου (Li), Βηρυλλίου (B) και Βορίου (Bo) οι οποίοι είναι αφθονότεροι της “κοσμικής αναλογίας” κατά ένα



παράγοντα της τάξεως  $10^5$ . Αυτό μπορεί να ερμηνευτεί αφενός μεν λόγω της καταστροφής των στοιχείων αυτών στο θερμό εσωτερικό των αστερών ή οποία οδηγεί σε μικρή “κοσμική” περιεκτικότητα, αφετέρου δε από τον εμπλουτισμό της κοσμικής ακτινοβολίας με τέτοιους ελαφρούς πυρήνες που προέρχονται από τη θραύση διαφόρων βαρύτερων μεσοαστρικών πυρήνων οι οποίοι συγκρούονται με τα ενεργητικά πρωτογενή πρωτόνια κατά τη διαδρομή τους στο μεσοαστρικό χώρο. Η παρατηρούμενη περιεκτικότητα των κοσμικών ακτίνων σε ελαφρούς πυρήνες Li, Be, Bο, και He<sup>3</sup> μπορεί να ερμηνευθεί με την παραδοχή συγκρούσεως ενεργητικών πρωτονίων με πυρήνες μεσοαστρικών ατόμων άνθρακα, αζώτου και οξυγόνου. Η παρατηρούμενη δηλ. αφθονία ελαφρών πυρήνων αποτελεί τα θραύσματα-παράγωγα από τη σύγκρουση πρωτονίων με τους προαναφερθέντες βαρύτερους πυρήνες. Η περιεκτικότητα των κοσμικών ακτίνων σε βαρύτερους πυρήνες είναι σαφώς ανώτερη της αντίστοιχης περιεκτικότητας των μετεωριτών και της ηλιακής ατμόσφαιρας. Αυτό υποδηλώνει ότι τα σωματίδια κοσμικών ακτίνων προέρχονται από αστρικά σώματα που βρίσκονται σε προχωρημένη φάση εξέλιξης που χαρακτηρίζεται από την παραγωγή βαρέων στοιχείων και βίαιη εκπομπή τους από αυτά σε μεγάλες ταχύτητες. Τέτοια αστρικά σώματα είναι οι υπερκαινοφανείς, οι παλμικοί αστέρες (pulsars) και πιθανά οι λευκοί νάνοι. Η παρουσία μεγάλων ποσοτήτων βαρέων πυρήνων στη κοσμική ακτινοβολία (π.χ πυρήνες Fe) μας παρέχει ορισμένες ενδείξεις αναφορικά με το μέσο χρόνο ζωής της. Αυτό γιατί οι οι βαρείς πυρήνες των διαφόρων στοιχείων χαρακτηρίζονται από μεγάλη ενεργό διατομή συγκρούσεως σε σύγκριση με τους ελαφρούς πυρήνες και ως εκ τούτου αναμένεται να έχουν μικρό χρόνο ζωής. Η παρατηρούμενη περιεκτικότητα σε βαρείς πυρήνες οδηγεί στον προσδιορισμό ενός ανωτέρου ορίου για το μέσο χρόνο ζωής των κοσμικών ακτίνων στο Γαλαξία, της τάξεως των  $10^9$  ετών.

ΟΜΑΔΑ ΠΥΡΗΝΩΝ	ΦΟΡΤΙΟ Z	ΣΧΕΤΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ	
		ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ	
		ΚΟΣΜΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	ΓΑΛΑΞΙΑΣ
Πρωτόνια,p	1	1000	1000
Πυρήνες άλφα,a	2	68	152
Ελαφροί πυρήνες	3-5	1.46	$1.5 \times 10^{-6}$
Μέσοι πυρήνες	6-9	4.4	1.5
Βαρείες πυρήνες	$\geq 10$	1.46	0.15
Πολύ βαρείες πυρήνες	$\geq 20$	0.41	0.007

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1 :** Σύσταση της κοσμικής ακτινοβολίας, [3].

Η κοσμική ακτινοβολία περιέχει ακόμη και συνιστώσα από ρελατιβιστικά ηλεκτρόνια μέρος των οποίων αποτελείται από πρωτογενή κοσμικά ηλεκτρόνια που επιταχύνθηκαν μέσα στη πηγή παραγωγής τους. Η περιεκτικότητα της κοσμικής ακτινοβολίας σε πρωτογενή ηλεκτρόνια για μία δεδομένη ενέργεια υπολογίζεται σε 1% των πρωτονίων της, της ίδιας ενέργειας. Η πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία περιέχει επίσης και ορισμένο αριθμό αντι-πρωτονίων ο οποίος είναι μικρότερος του 0.1% των πρωτονίων της.

Η περιεκτικότητα της κοσμικής ακτινοβολίας σε υψηλότερες ενέργειες, δηλ σε σωματίδια ενέργειας μεγαλύτερης των  $10^{14}$  eV δεν έχει μέχρι τώρα διερευνηθεί επαρκώς λόγω του μικρού σχετικά αριθμού αυτών των σωματιδίων. Οι μέχρι τώρα παρατηρήσεις δείχνουν μία αύξηση της αναλογίας των βαρέων πυρήνων συγκριτικά με τα πρωτόνια για την περιοχή ενέργειας από  $10^{15}$  έως  $10^{16}$  eV. Πέραν όμως της περιοχής αυτής η αναλογία αυτή περατώνεται και για ενέργειες μεγαλύτερες από  $10^{17}$  eV, πιστεύεται ότι η κοσμική ακτινοβολία συνίσταται πλήρως από πρωτόνια.

Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι με τον όρο “κοσμική ακτινοβολία“ υπονοείται και κάθε άλλη μορφή ακτινοβολίας υψηλής ενέργειας όπως π.χ. ακτινοβολία X, ακτινοβολία  $\gamma$  και ακτινοβολία νετρονίων.

## **β) ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΑΣΜΑ**

Ο ανά μονάδα όγκου αριθμός των πρωτογενών σωματιδίων των κοσμικών ακτίνων μεταβάλλεται συναρτήσει της ενέργειας των σωματιδίων. Η κατανομή των πρωτογενών σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας συναρτήσει της ενέργειάς τους, το ενεργειακό δηλαδή φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας υπακούει ένα εκθετικό νόμο της μορφής

$$N(E)dE = kE^{-\gamma}dE$$

Όπου  $N(E)$  ο ανά μονάδα όγκου αριθμός των σωματιδίων που έχουν ενέργεια μεταξύ των τιμών  $E$  και  $E+dE$  και  $\gamma$  ο φασματικός δείκτης για τον οποίο ισχύει:

$$\gamma = 2.5 \pm 0.5$$

για όλες τις ομάδες των πυρήνων που αποτελούν την πρωτογενή και κοσμική ακτινοβολία και για την περιοχή ενέργειας από  $10^9$  έως  $10^{15}$  eV. Για  $E = 10^{15}$  eV ο δείκτης αυξάνει σε  $\gamma = 3.2$ . ενώ για  $E = 10^{18}$  eV ο δείκτης επανέρχεται στην αρχική περίπου τιμή ( $\gamma = 2.7$ ). Για την περιοχή ενέργειας από  $10^{18}$  έως  $10^{20}$  eV δεν υπάρχουν προς το παρόν επαρκή πειραματικά δεδομένα.

### γ) ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ολική πυκνότητα ενέργειας της κοσμικής ακτινοβολίας στην περιοχή του Γαλαξία πλησίον της Γης, υπολογίζεται σε  $10^{-12}$  erg cm<sup>-3</sup> και ισούται περίπου με την πυκνότητα ενέργειας του αστρικού φωτός ( $\sim 7 \times 10^{-13}$  erg cm<sup>-3</sup>). Κάθε δηλαδή μονάδα όγκου του μεσοαστρικού χώρου περιέχει τόση ενέργεια από την κοσμική (μη θερμική) ακτινοβολία όση και υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικής (θερμικής) ακτινοβολίας. Η μέση όμως ενέργεια της κοσμικής ακτινοβολίας ανά σωματίδιο, είναι κατά πολύ μεγαλύτερη της μέσης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας ανά φωτόνιο. Αυτό το εκ πρώτης όψεως παράδοξο της ισότητας της πυκνότητας ενέργειας της θερμικής και μη θερμικής ακτινοβολίας, λύνεται με τη παρατήρηση ότι η διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι ευθύγραμμη και έτσι η εκπεμπόμενη αστρική ακτινοβολία διαφεύγει από το γαλαξία μετά από ορισμένες χιλιάδες έτη ενώ η κοσμική ακτινοβολία επειδή αποτελείται από φορτισμένα σωματίδια παγιδεύεται μέσα στο γαλαξία, λόγω των μαγνητικών πεδίων που υπάρχουν, με αποτέλεσμα τη συσσώρευση των σωματιδίων για εκατομμύρια έτη (10-100 εκ. έτη),[3].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1°

### 1.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ CCD [Charge Coupled Device (Συσκευή Συζευγμένου Φορτίου)]

Η βασική αρχή λειτουργίας των CCD στηρίζεται στην ουσία στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο σε συνδυασμό με τις ιδιότητες των ημιαγωγών [ή των ημιαγωγών προσμίξεων τύπου (p) και τύπου (n)]. Γι' αυτό ξεκινάμε την περιγραφή του τρόπου λειτουργίας των CCD, παραθέτοντας συνοπτικά κάποια βασικά χαρακτηριστικά των ημιαγωγών.

#### 1.1.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ

Ημιαγωγοί θεωρούνται τα στοιχεία της τέταρτης ομάδας του περιοδικού συστήματος, όμως ανάλογες ιδιότητες παρουσιάζουν και συνδυασμοί από στοιχεία της τρίτης και πέμπτης ομάδας.

Οι πιο γνωστοί ημιαγωγοί τόσο από πλευράς μελέτης τους όσο και από τις χρήσεις τους σε εφαρμογές είναι το πυρίτιο (Si) και το γερμάνιο (Ge). Τα υλικά αυτά έχουν μία ζώνη σθένους πλήρως συμπληρωμένη, με τα τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους που διαθέτει το κάθε άτομο και άλλα τέσσερα που συνεισφέρουν τα γειτονικά του άτομα.

Επομένως η ζώνη αγωγιμότητας είναι άδεια, δηλαδή δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια στον κρύσταλλο και συνεπώς αυτά τα υλικά θα έπρεπε να συμπεριφέρονται ως μονωτές.

Όμως αν σε ένα ηλεκτρόνιο σθένους προσφερθεί ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα  $E_G$  που χωρίζει τη ζώνη σθένους από τη ζώνη αγωγιμότητας, τότε το ηλεκτρόνιο θα μεταπηδήσει στη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας πίσω του ένα «κενό» (οπή) που συμπεριφέρεται ως θετικό φορτίο το οποίο μπορεί να μετακινείται μέσα στον κρύσταλλο από άτομο σε άτομο (γι' αυτό συνήθως αυτές τις οπές τις αντιμετωπίζουμε ως φανταστικά θετικά φορτισμένα σωματίδια).

Ωστόσο ένας ημιαγωγός σπάνια χρησιμοποιείται καθαρός (ως αυτοτελής ημιαγωγός). Συνήθως νοθεύεται με προσμίξεις από στοιχεία της τρίτης και πέμπτης ομάδας του περιοδικού συστήματος (ημιαγωγός προσμίξεως). Τα στοιχεία των προσμίξεων, εισάγουν είτε ελεύθερα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας (αυτά της πέμπτης ομάδας αφού διαθέτουν ένα παραπάνω ηλεκτρόνιο), είτε "θετικές οπές" στη ζώνη σθένους (αυτά της τρίτης ομάδας αφού διαθέτουν

ένα λιγότερο ηλεκτρόνιο). Με αυτό τον τρόπο οι ημιαγωγοί που προκύπτουν περιέχουν εγγενώς φορείς πλειονότητας είτε ελεύθερα ηλεκτρόνια (στη ζώνη αγωγιμότητας) και ονομάζονται τύπου (n), είτε οπές (στη ζώνη σθένους) και ονομάζονται τύπου (p) αντίστοιχα. Στην κατασκευή των CCD συνήθως χρησιμοποιούνται υποστρώματα τύπου (p). Οι ημιαγωγοί είτε τύπου (p) είτε τύπου (n) προφανώς είναι αγωγάμοι αφού υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου θα δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα από τους φορείς πλειονότητας (θετικές οπές ή ηλεκτρόνια).

Όμως στις συνήθεις θερμοκρασίες (θερμοκρασία δωματίου) ακόμα και ένας καθαρός κρύσταλλος ημιαγωγού είναι αγωγάμος διότι παράγονται σε αυτόν ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών λόγω θερμικής διέγερσης. Σε αυτή την περίπτωση υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου θα μετρηθεί ένα ηλεκτρικό ρεύμα διπλάσιο από αυτό που οφείλεται μόνο στα ηλεκτρόνια (ή διπλάσιο από αυτό που οφείλεται μόνο στις οπές).

Έτσι επιπλέον λόγω του φαινομένου της θερμικής διέγερσης η αγωγιμότητα των ημιαγωγών προσμύξεων αυξάνεται σημαντικά. Βέβαια τα αποτελέσματα της θερμικής διέγερσης επηρεάζουν αρνητικά τις επιδόσεις μίας κάμερας CCD λόγω του θερμιοκτικού θορύβου που δημιουργείται εξ' αιτίας αυτού του φαινομένου. Ειδικά για τη μέτρηση ασθενούς σήματος (ακτινοβολίας) ο θερμιοκτικός θόρυβος επιφέρει πλήρη αλλοίωση του μετρούμενου σήματος. Αυτό το είδος θορύβου αντιμετωπίζεται κυρίως με ψύξη των CCD, ζήτημα το οποίο κατέχει κυρίαρχο ρόλο σε αυτή την εργασία και θα αναλυθεί εκτενέστερα στα επόμενα κεφάλαια.

Όμως εκτός από τη θερμική διέγερση, παραγωγή ζεύγους ηλεκτρονίου – οπής, μπορεί να προκληθεί από την απορρόφηση φωτονίου κατάλληλης ενέργειας (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο). Η κατάλληλη αυτή ενέργεια καθορίζεται από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού  $E_G$ . Για κάθε ημιαγωγό υπάρχει ένα κατώφλι ενέργειας  $E_G$  (bandgap), όπου φωτόνια χαμηλότερης ενέργειας, δεν μπορούν να ανιχνευθούν. Οπότε αυτόματα δημιουργούνται περιορισμοί στην συχνότητα (f) και στο μήκος κύματος ( $\lambda$ ) των φωτονίων που μπορούν να αλληλεπιδράσουν με τον ημιαγωγό (μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου) και κατά συνέπεια να ανιχνευθούν, με μέγιστο μήκος κύματος  $\lambda_{\max}$  (μήκος αποκοπής) που δίδεται από τον τύπο : 
$$\lambda_{\max} = \frac{h \cdot c}{E_G}$$

Όπου : h η σταθερά του Planck, C η ταχύτητα του φωτός και  $E_G$  το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού.

Το πλήθος των ηλεκτρονίων που παράγονται με αυτό τον τρόπο, είναι συνάρτηση του πλήθους των φωτονίων που απορροφά ο ημιαγωγός. Έτσι από τη καταμέτρηση των φωτοηλεκτρονίων γίνεται εφικτός ο προσδιορισμός της ακτινοβολίας που απορροφά ο ημιαγωγός και κατ'επέκταση το CCD.

Από τον πίνακα (1), στον οποίο αναγράφονται τα ενεργειακά χάσματα και τα αντίστοιχα μήκη κύματος αποκοπής ορισμένων ημιαγωγών σε θερμοκρασία δωματίου ( $T=295\text{K}$ ), βλέπουμε ότι για το πυρίτιο  $\lambda_{\max} = 1110 \text{ nm}$ . Έτσι γίνεται φανερή η αιτία (η οποία είναι εγγενής) της αδυναμίας ανίχνευσης φωτονίων με  $\lambda > 1100\text{nm}$ , με κάμερες CCD, αφού η βιομηχανία κατασκευής τους στηρίζεται στο πυρίτιο. Εξαιρέση αποτελούν CCD που προορίζονται για πολύ εξειδικευμένα παρατηρητήρια (κυρίως στο διάστημα).

ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΧΑΣΜΑ $E_G$ , (ev)	ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ $\lambda_{\max}$ , (nm)
CdS	2,4	500
CdSe	1,8	700
GaAs	1,35	920
Si	1,12	1110
Ge	0,67	1850
PbS	0,42	2950
InSb	0,18	6900

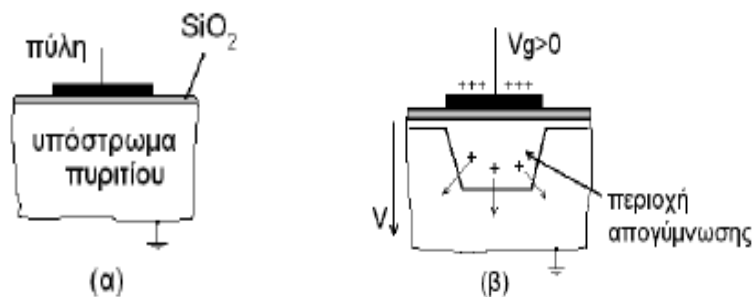
**ΠΙΝΑΚΑΣ 1 :** Τα ενεργειακά χάσματα ορισμένων ημιαγωγών και τα αντίστοιχα μήκη κύματος αποκοπής τους σε θερμοκρασία δωματίου ( $T=295 \text{ K}$  ή  $\Theta=22^\circ\text{C}$ )

Ένα επιπλέον σημαντικό χαρακτηριστικό του πυριτίου, κατά την απορρόφηση φωτονίων, είναι ότι φωτόνια με μεγάλα μήκη κύματος (στο ερυθρό και στο κοντινό υπέρυθρο) απορροφούνται βαθύτερα (διανύουν αποστάσεις έως και  $100 \mu\text{m}$  μέχρι να απορροφηθούν), ενώ αυτά με μικρά μήκη κύματος (στο ιώδες, κυανό) απορροφούνται σε πολύ μικρότερα βάθη (διανύουν αποστάσεις το πολύ  $1\mu\text{m}$ ). Το φαινόμενο αυτό επηρεάζει τα χαρακτηριστικά ενός CCD, όπως η χρωματική ευαισθησία.

### 1.1.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ – MOS

Η βασική δομή ενός pixel, δηλαδή ενός φωτοστοιχείου σε ένα CCD είναι ένας MOS (Metal Oxide Semiconductor) πυκνωτής. Δηλαδή το φωτοστοιχείο αποτελείται από μία μεταλλική επιφάνεια (πύλη- gate) που βρίσκεται πάνω στην επιφάνεια του ημιαγωγού (υπόστρωμα), ενώ μεταξύ τους παρεμβάλλεται ένα στρώμα οξειδίου το οποίο παίζει το ρόλο του διηλεκτρικού [μονωτικό υλικό, για το οποίο συνήθως χρησιμοποιείται διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ )], Σχήμα 1 (α)].

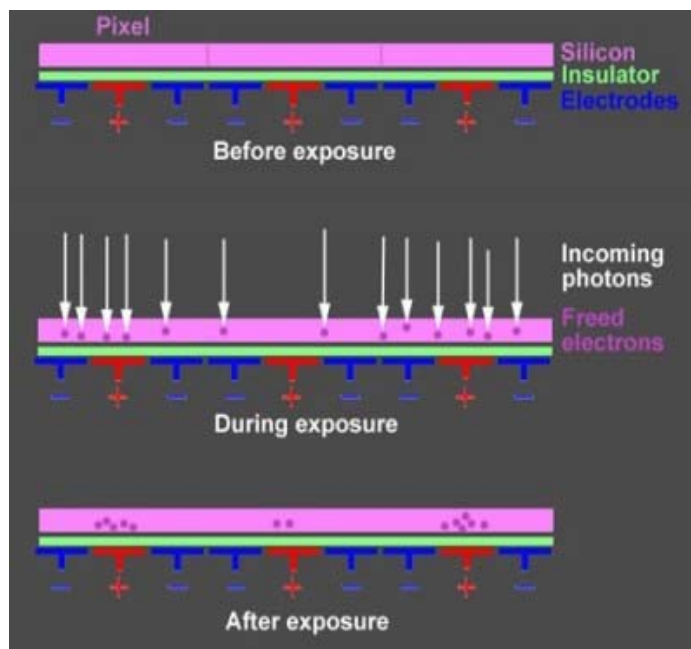
Εάν στην πύλη εφαρμοστεί θετικό δυναμικό (περίπου 10 volt) τότε οι φορείς πλειονότητας, σε ένα τύπου (p) υπόστρωμα (θετικές οπές), απωθούνται από αυτήν προς το εσωτερικό του υποστρώματος. Έτσι δημιουργείται η περιοχή απογύμνωσης (κενή από οπές) και ταυτόχρονα πηγάδι δυναμικού [Σχήμα 1 (β)], που λειτουργεί ως παγίδα και αποθηκευτικός χώρος για τα ηλεκτρόνια, κατά το σχηματισμό ζευγών ηλεκτρονίου – οπής, είτε αυτά προκύπτουν από θερμική διέγερση, είτε από την απορρόφηση φωτονίων (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο).



**Σχήμα 1 :** (α) Η βασική δομή ενός MOS,  
(β) Η εφαρμογή θετικού δυναμικού στην πύλη δημιουργεί ένα πηγάδι δυναμικού κάτω από αυτή, ενώ επιπλέον απομακρύνονται οι οπές και σχηματίζεται η περιοχή απογύμνωσης.

Τα ηλεκτρόνια που προκύπτουν κατά το σχηματισμό ζεύγους ηλεκτρονίου – οπής, μεταβαίνουν από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Χωρίς την παρουσία του δυναμικού θα επανασυνδέονταν με τις οπές στη ζώνη σθένους σε περίπου 100μs. Λόγω όμως του δυναμικού τα ηλεκτρόνια έλκονται προς την πύλη και παγιδεύονται στην περιοχή απογύμνωσης ενώ οι οπές απωθούνται, οπότε αποφεύγεται η επανασύνδεσή τους (σχήμα 2). Η συλλογή των ηλεκτρονίων στην περιοχή απογύμνωσης ελαττώνει το δυναμικό του πηγαδιού και συνεπώς το βάθος της

περιοχής απογύμνωσης. Η χωρητικότητα του πηγαδιού εξαρτάται από την τιμή του δυναμικού που εφαρμόζεται στην πύλη (όσο μεγαλύτερο είναι το δυναμικό τόσο μεγαλύτερο βάθος έχει η περιοχή απογύμνωσης και μεγαλύτερη τιμή η χωρητικότητα) και από το πάχος του υποστρώματος. Πρέπει να επισημανθεί ότι το πηγάδι δυναμικού στο σχήμα δεν ταυτίζεται με τα όρια της περιοχής απογύμνωσης. Έχει απλώς ανάλογη μορφή με την περιοχή απογύμνωσης και μας επιτρέπει να έχουμε μια εποπτική αντίληψη του αποθηκευτικού χώρου που σχηματίζεται. Αν το πηγάδι γεμίσει (οπότε μηδενίζεται το δυναμικό στην περιοχή απογύμνωσης) τότε λέμε ότι έφτασε σε **κόρο**. Οι τιμές της χωρητικότητας κυμαίνονται από 50.000 σε 500.000 ηλεκτρόνια ανάλογα με τον τύπο του CCD όπως θα δούμε αργότερα, [1], [23].

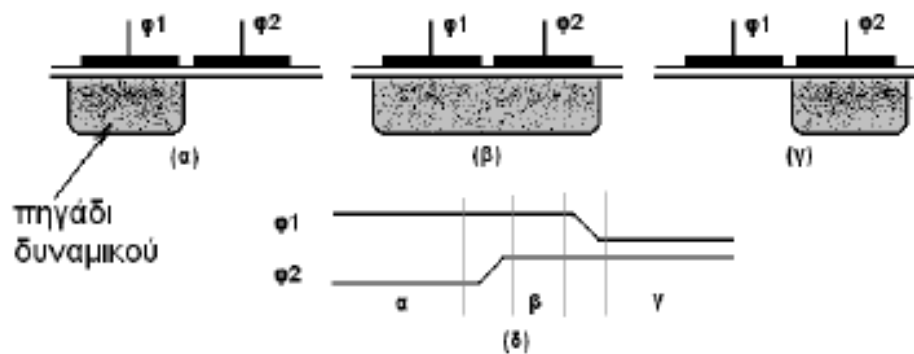


**Σχήμα 2 :** Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου με τον οποίο τα παραγόμενα φωτοηλεκτρόνια παγιδεύονται στη περιοχή απογύμνωσης (λόγω των τάσεων που εφαρμόζουμε στις πύλες).



### 1.1.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΣΥΖΕΥΞΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

Εάν φέρουμε δύο δομές MOS αρκετά κοντά μεταξύ τους, τότε θα σχηματιστεί μία ενιαία περιοχή απογύμνωσης ( και ένα ενιαίο πηγάδι δυναμικού) κάτω από τις δύο πύλες όταν βρίσκονται και οι δύο σε θετικό δυναμικό. Αν μόνο η πρώτη πύλη βρίσκεται σε θετικό δυναμικό, οπότε μόνο κάτω από αυτήν θα έχουν αποθηκευτεί ηλεκτρόνια [σχήμα 3(α)] και θέσουμε και τη δεύτερη πύλη σε θετικό δυναμικό, τότε μέρος των ηλεκτρονίων θα μετακινηθεί καλύπτοντας και το χώρο κάτω από τη δεύτερη πύλη [σχήμα 3(β)]. Εάν ύστερα κατεβάσουμε την πρώτη πύλη σε χαμηλό δυναμικό (π.χ. μηδέν), τότε τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται κάτω από αυτή, θα αναγκαστούν να μετακινηθούν προς τη δεύτερη πύλη που βρίσκεται σε υψηλότερο δυναμικό [σχήμα 3(γ)], [23].



Σχήμα 3 :

- (α) Η πρώτη πύλη σε θετικό δυναμικό.
- (β) Και οι δύο πύλες σε υψηλό δυναμικό-σύζευξη φορτίου.
- (γ) Η πρώτη πύλη επιστρέφει σε χαμηλό δυναμικό, τα ηλεκτρόνια προωθήθηκαν στην δεύτερη πύλη.
- (δ) Διάγραμμα χρονισμού των τάσεων που εφαρμόζονται στις πύλες.

Η διαδοχική εφαρμογή των τάσεων στις πύλες με τον τρόπο που μόλις περιγράψαμε ονομάζεται χρονισμός των τάσεων. Με τη διαδικασία αυτή, καθίσταται εφικτή η μεταφορά από πύλη σε πύλη, των ηλεκτρονίων που συλλέγονται σε κάθε μία από αυτές. Τα ηλεκτρόνια αυτά αποτελούν την πληροφορία που θέλουμε να προσδιορίσουμε. Έτσι φτάνει η πληροφορία στο άκρο κάθε αλυσίδας από δομές MOS, όπου γίνεται σειριακά η ανάγνωση και η καταγραφή της από διάταξη η οποία καταμετρά τα συσχεθέντα ηλεκτρόνια ως διαφορά δυναμικού. Επίσης τα φορτία που έχουν συσχεθεί, ενισχύονται από έναν ενισχυτή στην έξοδο, ο οποίος είναι κατασκευασμένος απευθείας πάνω στο κύκλωμα του πυριτίου, με τέτοιο τρόπο ώστε να λειτουργεί σε πολύ χαμηλή τάση και να έχει πολύ μικρό θόρυβο (η ευαισθησία αυτών των ενισχυτών μετρείται σε  $mV/e^-$  και κυμαίνεται από  $0,5 mV/e^-$  έως  $mV/e^-$ ).

Η τάση εξόδου μετατρέπεται σε έναν ψηφιακό αριθμό σε μονάδες ADU (Analog to Digital Unit). Η τάση που απαιτείται, δηλαδή ο αριθμός των ηλεκτρονίων που συλλέγονται, για να παραχθεί 1 ADU, καθορίζει το κέρδος (gain) της συσκευής (π.χ. κέρδος  $10 \frac{e^-}{ADU}$  σημαίνει ότι για κάθε  $10 e^-$  η έξοδος θα δίνει 1 ADU).

## 1.2. ΕΙΔΗ – ΤΥΠΟΙ CCD

Σε αυτό το εδάφιο θα παρουσιάσουμε τους διάφορους τύπους CCD κάθε ένας από τους οποίους καθορίζεται με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του είτε ως προς τον τρόπο κατασκευής των δομικών του μονάδων (MOS) και τη μέθοδο χρονισμού αυτών, είτε ως προς την επιφάνεια η οποία υποδέχεται την προς μέτρηση ακτινοβολία, είτε τέλος ως προς την αρχιτεκτονική που σχετίζεται με τον τρόπο μεταφοράς και ανάγνωσης της πληροφορίας, η οποία όπως αναφέραμε συλλέγεται και αποθηκεύεται αρχικά υπό μορφή ηλεκτρονίων στις δομές (MOS), από τις οποίες αποτελούνται τα pixels.

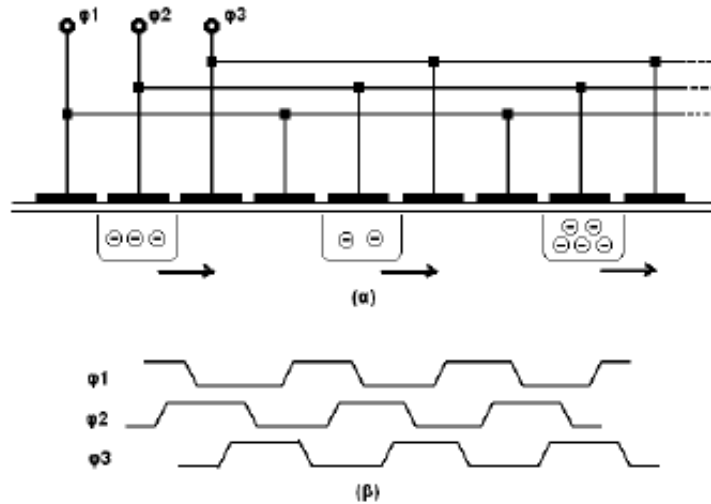
### 1.2.1 CCD : Α) ΤΡΙΩΝ ΦΑΣΕΩΝ Β) ΔΥΟ ΦΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΙΚΗΣ ΦΑΣΗΣ Γ) ΘΑΜΜΕΝΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ

[ Διαχωρισμός με βάση το είδος των δομικών μονάδων (MOS) από τις οποίες αποτελούνται τα pixels και τη μέθοδο χρονισμού αυτών ]

#### A) CCD ΤΡΙΩΝ ΦΑΣΕΩΝ

Σε μία CCD τριών φάσεων ένα φωτοστοιχείο (στοιχειώδης ψηφίδα της εικόνας – pixel) αποτελείται από τρεις δομές (MOS). Η πύλη κάθε δομής (MOS) είναι συνδεδεμένη με την αντίστοιχη όλων των άλλων φωτοστοιχείων (pixels) της CCD [σχήμα 4(α)]. Η κάθε τέτοια ομάδα από κοινά συνδεδεμένα στοιχεία (MOS) ονομάζεται φάση, συνεπώς κάθε φωτοστοιχείο θα έχει 3 φάσεις. Προφανώς με μία φάση δεν μπορούμε να κάνουμε μεταφορά, αφού όλες οι πύλες θα είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους και συνεπώς δεν θα υπάρχουν διαφορές δυναμικού για να γίνει η μεταφορά προς το υψηλότερο δυναμικό. Επίσης, με 2 φάσεις, όταν θα φέρουμε σε υψηλό

δυναμικό και τη δεύτερη φάση, καταλήγουμε να συζητήσουμε όλες τις πύλες της CCD. Συνεπώς η τρίτη φάση χρειάζεται για να βρίσκεται σε μηδέν δυναμικό, όταν οι άλλες 2 είναι συζευγμένες, έτσι ώστε να αποφεύγεται κατά τη μεταφορά τους η ένωση των πακέτων ηλεκτρονίων τα οποία συλλέχθηκαν από διαφορετικά pixels [Σχήμα 4 (β)], [23].

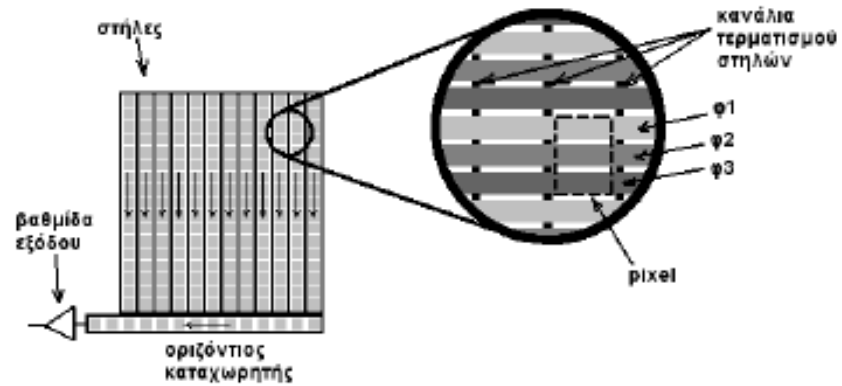


**Σχήμα 4 :** (α) Τομή κατά μήκος μίας στήλης (ή κατά μήκος του οριζοντίου καταχωρητή) μίας CCD τριών φάσεων, (β) Εφαρμόζοντας αυτή τη χρονοσειρά παλμών στις φάσεις της CCD (χρονισμός), προκαλείται μετακίνηση, των πακέτων ηλεκτρονίων του κάθε pixel, προς τα δεξιά.

Μία CCD τριών φάσεων λοιπόν αποτελείται από τριάδες ηλεκτροδίων, κατά την διεύθυνση προς την οποία προβλέπεται να γίνεται η μετακίνηση των πακέτων (π.χ. κατακόρυφα). Για να διαχωρίζονται τα φωτοστοιχεία των οριζοντίων γραμμών (στην περίπτωση της κατακόρυφης μεταφοράς) είναι απαραίτητη η ύπαρξη ειδικών μονωτικών καναλιών τερματισμού, κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Έτσι εμποδίζεται η οριζόντια μετακίνηση ηλεκτρονίων, ανάμεσα σε γειτονικά φωτοστοιχεία, χωρίς όμως να επηρεάζεται η ελεγχόμενη - από τον χρονισμό των φάσεων στα ηλεκτρόδια - κατακόρυφη μετακίνηση των ηλεκτρονίων. Στο σχήμα (5) φαίνεται πως ένα φωτοστοιχείο (pixel) σχηματίζεται στη επιφάνεια του τσιπ, σαν το διάκενο ανάμεσα σε 2 ηλεκτρόδια της πρώτης φάσης και μεταξύ 2 κατακόρυφων καναλιών τερματισμού.

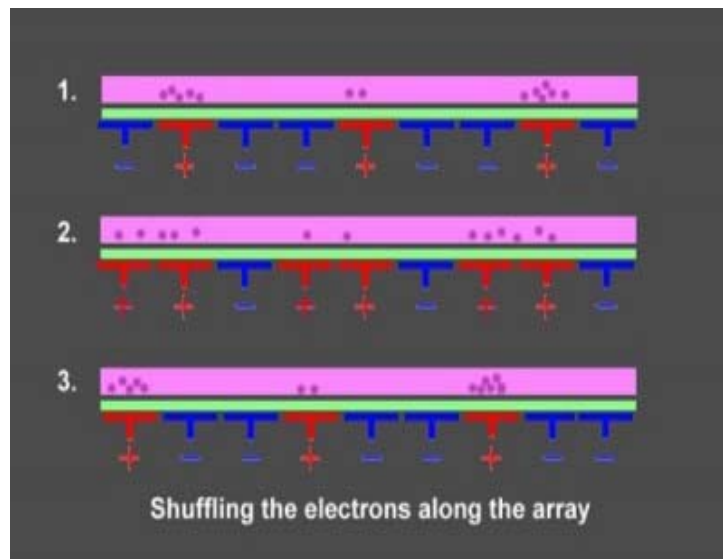
Με τη διαδοχική εφαρμογή δυναμικού σε κάθε φάση τα πακέτα ηλεκτρονίων μετακινούνται κατακόρυφα από pixel σε pixel, ταυτόχρονα σε όλες τις στήλες σε όλη την επιφάνεια της CCD (σχήμα 5) έως το τέλος. Εκεί υπάρχει μία ειδική γραμμή που ονομάζεται οριζόντιος ή σειριακός καταχωρητής, ο οποίος επιτρέπει την οριζόντια μετακίνηση των ηλεκτρονίων (χωρίς όμως να ανακατεύονται τα ηλεκτρόνια από διαφορετικά pixel). Τα πακέτα φορτίων, από τον καταχωρητή κινούνται οριζόντια (με εφαρμογή κατάλληλου χρονισμού τάσεων στις φάσεις του) και στο τέλος του διαβιβάζονται σειριακά (το καθένα ξεχωριστά) στη βαθμίδα

εξόδου όπου γίνεται η ανάγνωση και η καταγραφή της πληροφορίας (μετατροπή των ηλεκτρονίων ανά πακέτο σε ηλεκτρικό σήμα τάσης).



**Σχήμα 5:** Σχηματική αναπαράσταση της δομής μίας CCD. Με τα βέλη φαίνεται η φορά κίνησης των φορτίων κατά τη μεταφορά και ανάγνωσή τους. Επίσης στη μεγέθυνση φαίνονται πως είναι διατεταγμένα τα ηλεκτρόδια πάνω στην επιφάνεια του τσιπ καθώς και οι θέσεις των καναλιών τερματισμού που διαχωρίζουν τις στήλες.

Ύστερα εφαρμόζουμε χρονοσειρά τάσεων (σχήμα 6) στις οριζόντιες φάσεις, ώστε να προωθηθεί η επόμενη οριζόντια γραμμή στον καταχωρητή από όπου διαβιβάζονται και καταγράφονται επίσης τα πακέτα των pixels της γραμμής στη βαθμίδα εξόδου. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται εωσότου όλες οι γραμμές στο CCD διαβαστούν.



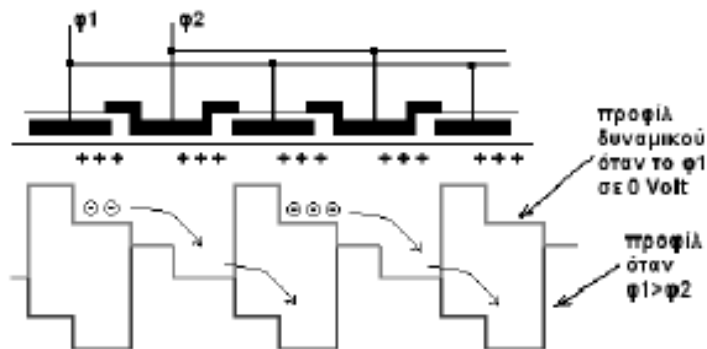
**Σχήμα 6:** Αναπαράσταση του τρόπου με τον οποίο διαδοχικά εφαρμόζουμε τις τάσεις στα στιγμιότυπα 1,2,3 ώστε να μετακινηθούν τα πακέτα ηλεκτρονίων (του κάθε pixel ) οριζόντια (προς αριστερά).

## Β) ΔΥΟ ΦΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΙΚΗΣ ΦΑΣΗΣ

Όπως αναφέραμε στη προηγούμενη παράγραφο το πρόβλημα για την κατασκευή CCD δύο φάσεων, είναι ότι όταν φέρνουμε την δεύτερη φάση στο υψηλό δυναμικό τότε όλες οι πύλες έχουν το ίδιο δυναμικό και συνεπώς γίνεται σύζευξη όλων των pixel, με αποτέλεσμα σε όλο το CCD να γίνεται ένα μεγάλο πηγάδι δυναμικού. Ένας τρόπος να ξεπεράσουμε το πρόβλημα διατηρώντας τα τοπικά πηγάδια δυναμικού, είναι να θέσουμε την δεύτερη φάση σε πιο υψηλό δυναμικό από την πρώτη.

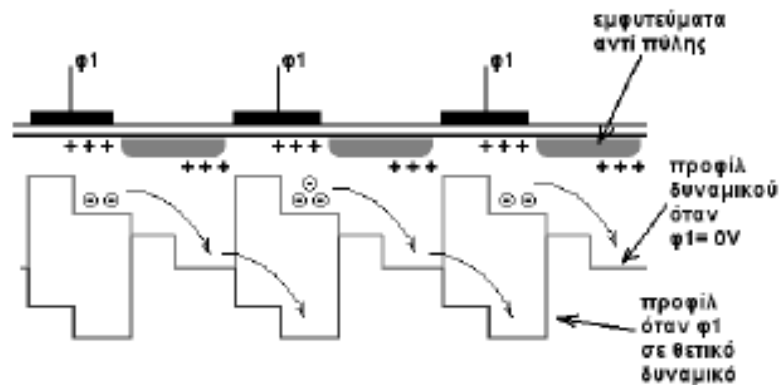
Τότε τα φορτία θα μετακινηθούν από την πρώτη στη δεύτερη φάση κάτω από την οποία υπάρχει το υψηλότερο δυναμικό όμως η κατεύθυνση της κίνησης τους δεν θα είναι καθορισμένη και ένα μεγάλο ποσοστό των φορτίων θα κινηθεί και προς τα πίσω, εφόσον και μπροστά αλλά και πίσω από μια πύλη της πρώτης φάσης θα υπάρχει πύλη της δεύτερης φάσης.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για να κατασκευαστούν CCD με δύο φάσεις, είναι να γίνονται εμφυτεύσεις θετικών ιόντων, στη μισή περιοχή κάτω από τις πύλες, προς το άκρο που βρίσκεται στη κατεύθυνση που θέλουμε να μετακινούνται τα φορτία. Έτσι δημιουργείται εκ' κατασκευής ασύμμετρο πηγάδι δυναμικού με αποτέλεσμα να ευνοείται η μεταφορά του φορτίου προς την επιθυμητή κατεύθυνση. Επιπλέον τα ηλεκτρόδια της δεύτερης φάσης επικαλύπτουν λίγο τα ηλεκτρόδια της πρώτης φάσης ώστε να υποβοηθούν τη μεταφορά του φορτίου (σχήμα 7), [23]. Έστω ότι αρχικά η πρώτη φάση έχει δυναμικό μηδέν ενώ η δεύτερη θετικό δυναμικό, οπότε το πηγάδι δυναμικού σχηματίζεται κάτω από τα εμφυτεύματα της δεύτερης φάσης. Αν ύστερα εφαρμόσουμε στην πρώτη φάση δυναμικό υψηλότερο από της δεύτερης (την οποία διατηρούμε σταθερή), το υψηλότερο δυναμικό δημιουργείται κάτω από τα εμφυτεύματα της πρώτης φάσης και τα ηλεκτρόνια θα κινηθούν προς το φ1 του επόμενου pixel, διανύοντας διαδρομή μισού pixel. Όταν η πρώτη φάση επιστρέψει σε μηδέν δυναμικό τότε τα ηλεκτρόνια θα κινηθούν τελικά προς την δεύτερη φάση, ολοκληρώνοντας την μετάβαση.



Σχήμα 7 : Η δομή και το προφίλ δυναμικού σε ένα CCD δύο φάσεων.

Σε ένα τέτοιο τρόπο λειτουργίας μίας CCD δύο φάσεων που περιγράψαμε, μόνο το δυναμικό της μιας φάσης ταλαντώνεται, ενώ η δεύτερη φάση βρίσκεται σε ένα σταθερό δυναμικό. Στις CCD εικονικής φάσης (Virtual Phase CCD) το σταθερό δυναμικό της δεύτερης φάσης υποκαθίσταται από εμφυτεύματα ιόντων που παράγουν το αντίστοιχο πηγάδι δυναμικού (σχήμα 8). Η λειτουργία τους είναι παρόμοια με αυτή που περιγράψαμε παραπάνω, αλλά έχει πολλά σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλους τύπους CCD. Έτσι μία CCD εικονικής φάσης έχει λιγότερες φάσεις, πράγμα που απλουστεύει τα κυκλώματα οδήγησής της, αλλά και τις παλμοσειρές που χρειάζονται για την ανάγνωση. Είναι χαρακτηριστικό ότι με ένα και μόνο παλμό γίνεται μεταφορά μιας στήλης ή ανάγνωση ενός pixel. Επιπλέον το γεγονός ότι υπάρχει μόνο ένα ηλεκτρόδιο ανά pixel κάνει αυτές τις CCD πιο αξιόπιστες σε περιβάλλον αυξημένης ιονίζουσας ακτινοβολίας [γι' αυτό και επιλέχθηκαν τέτοιες CCD (με ανάλυση 800x800) για την διαστημοσυσκευή Γαλιλαίος, αλλά και για το Τζιότο που επισκέφτηκε τον κομήτη Haley και φωτογράφησε τον πυρήνα έχοντας διεισδύσει μέσα στην κόμη].



**Σχήμα 8 :** Η δομή μίας CCD εικονικής φάσης και το αντίστοιχο προφίλ των πηγαδιών δυναμικού.

### Γ) ΘΑΜΜΕΝΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ

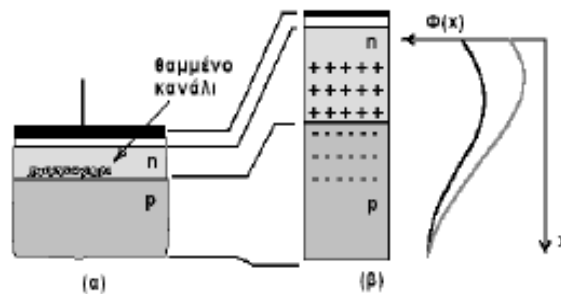
Στις περιπτώσεις που αναφερθήκαμε μέχρι τώρα, τα φορτία σε μία CCD αποθηκεύονται ακριβώς κάτω από τις πύλες και σε βάθος μερικών μm (επιφανειακού καναλιού). Αυτή η δομή δημιουργεί σημαντικά προβλήματα μεταφοράς των φορτίων, αφού από διάφορες κρυσταλλικές ανωμαλίες που - είναι πολύ συχνές στην επιφάνεια - είναι δυνατόν να παρακρατείται μέρος του φορτίου ή να εμποδίζεται η μεταφορά του.

Λύση σε αυτά τα προβλήματα δόθηκε με τη κατασκευή CCD θαμμένου καναλιού, στις οποίες το κανάλι αποθήκευσης και μεταφοράς των ηλεκτρονίων βρίσκεται σε βάθος περίπου

1μm από την επιφάνεια. Σε αυτή τη περίπτωση κάθε δομή αποτελείται από ένα στρώμα τύπου-n στην επιφάνεια και κάτω από αυτό ένα τύπου-p υπόστρωμα. Επειδή ο ημιαγωγός n-τύπου περιέχει ελεύθερα ηλεκτρόνια και ίσο αριθμό θετικών ιόντων, ενώ ο p-τύπου περιέχει οπές και αρνητικά ιόντα, στην επαφή n-p σχηματίζεται η λεγόμενη περιοχή φορτίων χώρου. Σε αυτή την περιοχή δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια, ούτε οπές, αλλά μόνο θετικά και αρνητικά ιόντα στην n και στην p πλευρά της περιοχής αντίστοιχα. Έτσι το υψηλότερο δυναμικό σχηματίζεται από τα θετικά ιόντα μέσα στην n-τύπου περιοχή της επαφής και όχι στην επιφάνεια του πυριτίου. Ωστόσο οι πύλες ακόμα μπορούν να ελέγχουν το βάθος του πηγαδιού δυναμικού και έτσι οι αρχές για την σύζευξη φορτίου συνεχίζουν να ισχύουν (σχήμα 9), [23].

Το ενδιαφέρον όμως σε μια τέτοια δομή είναι ότι τα δυναμικά που εφαρμόζονται στην πύλη, μπορούν να είναι και αρνητικά (μειώνοντας το πηγάδι δυναμικού), ενώ και με δυναμικό μηδέν στην πύλη το πηγάδι δυναμικού συνεχίζει να υπάρχει. Η λειτουργία της CCD σε αναστροφή, δηλαδή με αρνητικές τάσεις, είναι πολύ συνηθισμένη και έχει σημαντικά πλεονεκτήματα.

Σημαντικό μειονέκτημα του θαμμένου καναλιού είναι ότι έχει αρκετά μικρότερο αποθηκευτικό χώρο συγκριτικά με το αντίστοιχο επιφανειακό κανάλι, με αποτέλεσμα να μειώνεται η δυναμική περιοχή της συσκευής η οποία φτάνει στον κόρο πιο εύκολα. Έτσι ενώ μία CCD με επιφανειακό κανάλι έχει τυπικά χωρητικότητα 200000-500000 ηλεκτρόνια, η αντίστοιχη CCD θαμμένου καναλιού έχει χωρητικότητα μόλις 50000-100000 ηλεκτρόνια. Λόγω όμως της καλύτερης σύζευξης και των λίγων παγίδων και ελαττωμάτων που παρουσιάζουν αυτά τα CCD, προτιμώνται στις περισσότερες εφαρμογές αντί αυτών επιφανειακού καναλιού.



**Σχήμα 9 :** (α) Η δομή ενός CCD θαμμένου καναλιού.

(β) Αναλυτική τομή της επαφής pn και τα αντίστοιχα διαγράμματα δυναμικού-βάθους, για χαμηλό (μαύρο) και για υψηλό (γκρι) δυναμικό στην πύλη.

## 1.2.2 CCD ΕΜΠΡΟΣΘΙΑΣ ΚΑΙ ΟΠΙΣΘΙΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗΣ

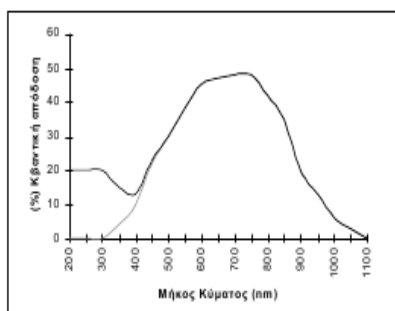
### A) ΕΜΠΡΟΣΘΙΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗΣ ( Front side Illuminated CCD )

Μέχρι τώρα υποθέσαμε ότι το φως πέφτει στη CCD από την εμπρόσθια όψη, δηλαδή την όψη όπου υπάρχουν οι πύλες. Αυτός ο κλασικός τύπος CCD που λέγεται CCD φωτιζόμενο από εμπρός (Frontside Illuminated CCD), έχει το μειονέκτημα ότι το φως προτού ανιχνευτεί, πρέπει να περάσει μέσα από τα ηλεκτρόδια που υπάρχουν στην επιφάνεια του.

Τα ηλεκτρόδια αν και γενικά είναι διάφανα [διότι αντί μετάλλου για την κατασκευή τους χρησιμοποιείται πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (POLY)], απορροφούν ένα μέρος του φωτός κυρίως στο ιώδες τμήμα του φάσματος. Τέτοια CCD έχουν κβαντική απόδοση (ποσοστό των φωτονίων που ανιχνεύονται ως προς τα συνολικά που προσπίπτουν στην επιφάνεια του CCD) που δεν ξεπερνά το 50%. Ενώ ειδικά για τα μικρά μήκη κύματος (ιώδες), που τα ηλεκτρόδια παρουσιάζουν ισχυρή απορρόφηση, η κβαντική απόδοση είναι τυπικά 5% με 10% και φτάνει στο μηδέν περίπου στα 300nm. Ωστόσο η ευαισθησία στο υπέρυθρο και στο κόκκινο δεν επηρεάζεται σημαντικά έτσι ένα τέτοιο CCD μπορεί να έχει και 50% κβαντική απόδοση στα 750nm που είναι το τυπικό όριο για το ανθρώπινο μάτι.

Για να αυξηθεί η ευαισθησία τους στο υπεριώδες εφαρμόζονται ειδικές επικαλύψεις, από υλικά που απορροφούν ακτινοβολία στα μικρά μήκη κύματος και την επανεκπέμπουν σε πιο μεγάλα μήκη κύματος (σχήμα 10), [1], [2]. Το πρώτο τέτοιο υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν η κορωνίνη, μια οργανική ένωση που ακτινοβολεί το υπεριώδες φως που απορροφά στα 550nm περίπου, ένα μήκος κύματος όπου τα CCD έχουν πολύ καλή ευαισθησία. Με τις διάφορες σχετικές επικαλύψεις είναι δυνατόν CCD φωτιζόμενα από μπροστά να αποκτήσουν κβαντική απόδοση, μεγαλύτερη από 30% στα 250nm, ένα μήκος κύματος που κανονικά τέτοια CCD είναι εντελώς τυφλά.

Σημαντικότερο πλεονέκτημα των φωτιζόμενων από εμπρός CCD, είναι η σχετικά εύκολη κατασκευή τους και συνεπώς ελαττώνεται το κόστος τους.



**Σχήμα 10 :** Η τυπική καμπύλη φασματικής ευαισθησίας, ενός φωτοζόμενου από μπροστά CCD, χωρίς επιστρώσεις (γκρι καμπύλη) και με επιστρώσεις υλικού για το υπεριώδες (μαύρη καμπύλη).

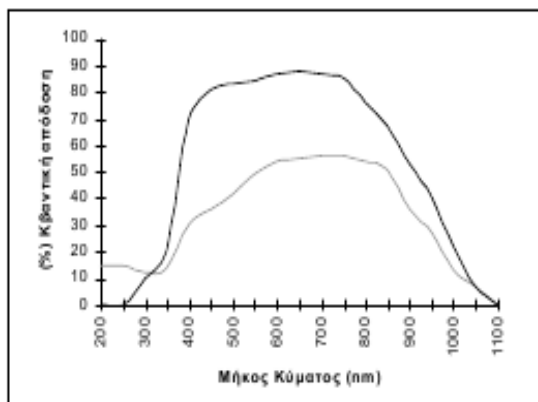


## **B) ΟΠΙΣΘΙΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗΣ ( Backside Illuminated CCD )**

Άλλη λύση στο πρόβλημα της χαμηλής ευαισθησίας στο ιώδες, των εμπροσθοφωτιζόμενων CCD, είναι να "αναποδογυριστεί" το τσιπ ώστε το φως να προσπίπτει στην πίσω επιφάνεια. Σε αυτή την περίπτωση, αφού το φως φτάνει στο πυρίτιο χωρίς να περνά μέσα από οτιδήποτε άλλο η κβαντική απόδοση θα πρέπει να είναι η μέγιστη δυνατή για όλα τα μήκη κύματος. Θεωρητικά σε μια τέτοια περίπτωση η ευαισθησία θα πρέπει να περιορίζεται μόνο από τις ιδιότητες του πυριτίου και τις ανακλάσεις στην επιφάνεια του. Ωστόσο επειδή η απορρόφηση των μικρών μηκών κύματος γίνεται σε μικρό βάθος, για να συλλεχθούν τα ηλεκτρόνια στα πηγάδια δυναμικού στην άλλη πλευρά του τσιπ, πριν προλάβουν να επανασυνδεθούν με οπές ή πριν παγιδευτούν από ανωμαλίες, πρέπει το υπόστρωμα να γίνει πολύ λεπτό. Έτσι τα φωτιζόμενα από πίσω CCD (Backside Illuminated CCD) έχουν πάχος της τάξεως των 10μm.

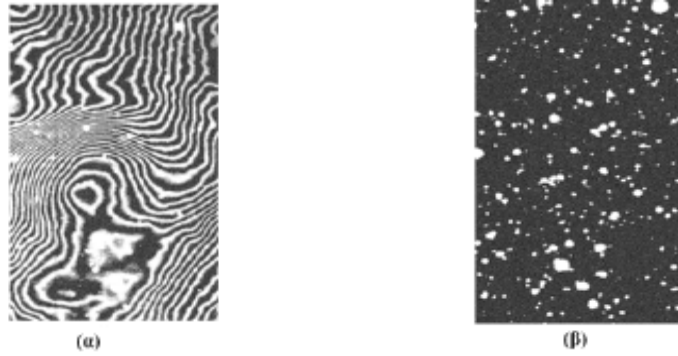
Τα φωτόνια με μεγάλα μήκη κύματος απορροφούνται σε μεγαλύτερα βάθη μέσα στο πυρίτιο, έτσι ένα λεπτό υπόστρωμα έχει μειωμένη ευαισθησία στο ερυθρό και στο υπέρυθρο. Τα φωτόνια του υπέρυθρου κυριολεκτικά διαπερνούν το CCD χωρίς να ανιχνευτούν. Συνεπώς το πάχος του CCD πρέπει να ρυθμιστεί με προσοχή ώστε να επιτευχθεί καλή ευαισθησία τόσο στο ιώδες όσο και στο ερυθρό τμήμα του φάσματος.

Τα φωτιζόμενα από πίσω CCD, έχουν κβαντική απόδοση τυπικά 10% με 20% στην περιοχή του κοντινού υπεριώδους (200nm με 400nm), αλλά μετά τα 400nm η κβαντική απόδοση αυξάνει σταδιακά σε περίπου 50% με 60% στα 550nm όπου διατηρείται περίπου σταθερή μέχρι τα 800nm, από όπου και αρχίζει να μειώνεται σημαντικά. Επειδή σε τέτοια CCD το μεγαλύτερο μέρος του φωτός χάνεται σε ανακλάσεις στην επιφάνεια τους, λόγω της μεγάλης διαφοράς του δείκτη διάθλασης του πυριτίου ( $n \approx 4$ ) από αυτόν του αέρα ( $n=1$ ), πολλοί κατασκευαστές τοποθετούν διάφορες αντανάκλαστικές επιστρώσεις. Με αντανάκλαστικές επιστρώσεις για την περιοχή του ορατού ένα τέτοιο CCD μπορεί να έχει πάνω από 80% κβαντική απόδοση στην περιοχή μηκών κύματος 400nm έως 800nm (σχήμα 11), [1], [2]. Αυτές οι πολύ υψηλές ευαισθησίες αυτών των CCD, σε ένα τόσο μεγάλο εύρος μηκών κύματος που εκτείνεται από το κοντινό υπεριώδες μέχρι το κοντινό υπέρυθρο (από 200nm έως 1100nm), σε συνδυασμό με τον χαμηλό θόρυβο ανάγνωσης τους, τα κατατάσσει σαν τους τελειότερους ανιχνευτές ακτινοβολίας που έχουν κατασκευαστεί.



**Σχήμα 11** : Η τυπική καμπύλη ευαισθησίας ενός CCD φωτιζόμενου από πίσω, με αντιανακλαστική επικάλυψη, αλλά και χωρίς επικάλυψη (γκρι καμπύλη).

Όμως εξαιτίας της αναγκαιότητας ενός τόσο λεπτού υποστρώματος αυτά τα CCD δεν κατασκευάζονται εύκολα σε μαζική παραγωγή και συνεπώς είναι πολύ ακριβά. Επίσης επειδή για την κατασκευή του λεπτού υποστρώματος χρησιμοποιούνται ισχυρά οξέα, για να λεπτύνουν το παχύ αρχικό υπόστρωμα, αρκετές χημικές ακαθαρσίες μένουν στην επιφάνεια του CCD επηρεάζοντας την ευαισθησία στο κυανό κυρίως φάσμα και προκαλώντας φαινόμενα υστέρησης της κβαντικής απόδοσης (τα σημεία του CCD που προσβάλλονται από ισχυρό φως γίνονται πιο ευαίσθητα). Επιπλέον το λεπτό υπόστρωμα δημιουργεί και προβλήματα εστίασης σε τηλεσκόπια πολύ μικρού εστιακού λόγου ( πχ τηλεσκόπια Schmidt), αφού λόγω θερμοκρασιακών διαφορών, οι δημιουργούμενες συστολές και διαστολές στο τόσο λεπτό τσιπ, μπορεί να προκαλέσουν την καμπύλωσή του. Ένα άλλο πολύ σημαντικό πρόβλημα, πάλι λόγω του λεπτού υποστρώματος, είναι ότι μπορούν να σχηματιστούν κροσσοί συμβολής στο τσιπ, λόγω εσωτερικών ανακλάσεων, όπως ακριβώς συμβαίνει και σε λεπτά πλακίδια ή υμένια. Το φαινόμενο αυτό είναι πολύ σοβαρό (εικόνα 12α), αλλά μπορεί σε μερικές περιπτώσεις να αναιρεθεί με κατάλληλο πρόγραμμα επεξεργασίας εικόνας (εικόνα 12β), [23]. Στην φωτομετρία με αυτά τα CCD το πιο σημαντικό πρόβλημα είναι ότι λόγω των διαφορών πάχους του υποστρώματος ( αφού το πάχος δεν μπορεί να ελεγχθεί με ακρίβεια καλύτερη του  $\mu\text{m}$ ) υπάρχουν σημαντικές διακυμάνσεις στην ευαισθησία κατά μήκος της επιφάνειας. Αυτές οι διακυμάνσεις επειδή σχετίζονται με το χρώμα του φωτός, είναι δύσκολο να διορθωθούν. Παρόλα αυτά τα πρακτικά προβλήματα των φωτιζόμενων από την πίσω επιφάνεια CCD, ειδικά στην αστρονομία βρίσκουν σημαντική εφαρμογή, εξαιτίας της πολύ υψηλής ευαισθησίας τους. Ας μην ξεχνάμε ότι υψηλότερη ευαισθησία σημαίνει μικρότερους χρόνους έκθεσης, καλύτερα φωτομετρικά δεδομένα (μεγαλύτερη ακρίβεια λόγω αύξησης του λόγου σήματος-θορύβου) και τελικά σημαίνει ότι μπορεί να κάνει κανείς την ίδια εργασία με μικρότερο τηλεσκόπιο.



**Εικόνα 12:** (α) Σε CCD φωτιζόμενα από πίσω, είναι δυνατόν ορισμένες γραμμές εκπομπής του νυκτερινού ουρανού να σχηματίσουν κροσσούς συμβολής.  
 (β) Η αφαίρεση των κροσσών με πρόγραμμα επεξεργασίας εικόνας.

### 1.2.3 INTERLINE & FRAME TRANSFER CCD

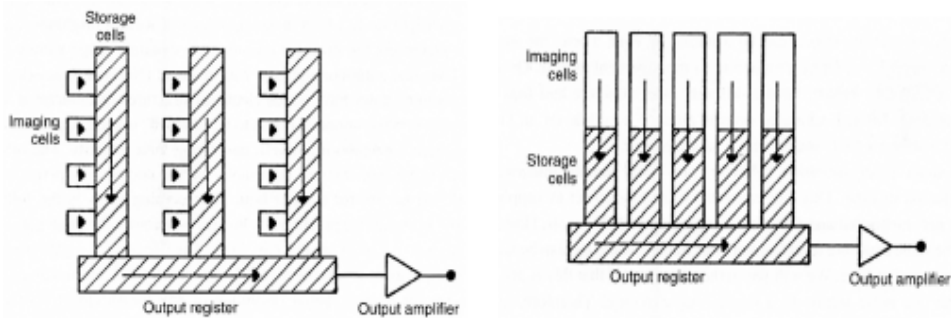
#### A) INTERLINE CCD

Στα interline transfer CCD δίπλα σε κάθε στήλη ενεργών pixels, υπάρχει μία φωτοστεγανή στήλη ανενεργών pixels, που χρησιμεύει για αποθήκευση των φωτοηλεκτρονίων (πληροφορία) που συλλέγονται. Στο τέλος της έκθεσης η πληροφορία μεταφέρεται, μέσα σε λίγα  $\mu\text{s}$ , από τις ενεργές στις αντίστοιχες ανενεργές στήλες. Τότε, ενώ ξεκινά η διαδικασία μεταφοράς των δεδομένων προς την έξοδο, οι ενεργές στήλες είναι ικανές να επανεκτεθούν για λήψη νέας μέτρησης. Οι Interline συσκευές έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές συστοιχίες ανιχνευτών φωτονίων υψηλής ταχύτητας (σχήμα 13α). Όμως η συλλεκτική επιφάνεια ελαττώνεται στο μισό, οπότε το ολικά συλλεγόμενο σήμα διαιρείται δια δύο. Οι δομές των ηλεκτροδίων και των πυλών είναι διαφορετικές από αυτές ενός κανονικού CCD, προκαλώντας επιπλέον μείωση του συλλεγόμενου σήματος και διαφοροποίηση της ευαισθησίας. Λόγω αυτών των δύο παραγόντων και των γρήγορων χρόνων ανάγνωσης των σύγχρονων CCD, τα Interline transfer CCD δεν χρησιμοποιούνται πλέον πολύ στην αστρονομία.

#### B) FRAME TRANSFER CCD

Οι frame transfer συσκευές λειτουργούν σαν δύο ξεχωριστά CCD συνδεδεμένα μεταξύ τους, το ένα από τα οποία είναι ενεργό (εκτίθεται στο φως και καταγράφει την πληροφορία, ενώ το άλλο είναι φωτοστεγανό και χρησιμεύει ως αποθηκευτική συσκευή. Στο τέλος της έκθεσης τα δεδομένα μεταφέρονται γρήγορα από το ενεργό τμήμα στο αποθηκευτικό, όπου και διαβάζονται, καθώς μια νέα έκθεση στο ενεργό τμήμα ξεκινά. Τα Frame transfer CCD

χρησιμοποιούνται στις βιντεοκάμερες, όπου η εικόνα διαβάζεται σε ρυθμούς των 30 frames/s. Αστρονομική φωτογράφιση σε τόσο υψηλούς ρυθμούς συνήθως δεν μπορεί να γίνει λόγω της χαμηλής ροής των εισερχομένων φωτονίων(σχήμα 13β), [1], [2] .



Σχήμα 13 : α) interline transfer CCD , β) frame transfer CCD

### 1.3 Η ΒΑΘΜΙΔΑ ΕΞΟΔΟΥ ΚΑΙ Ο ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΤΗΣ

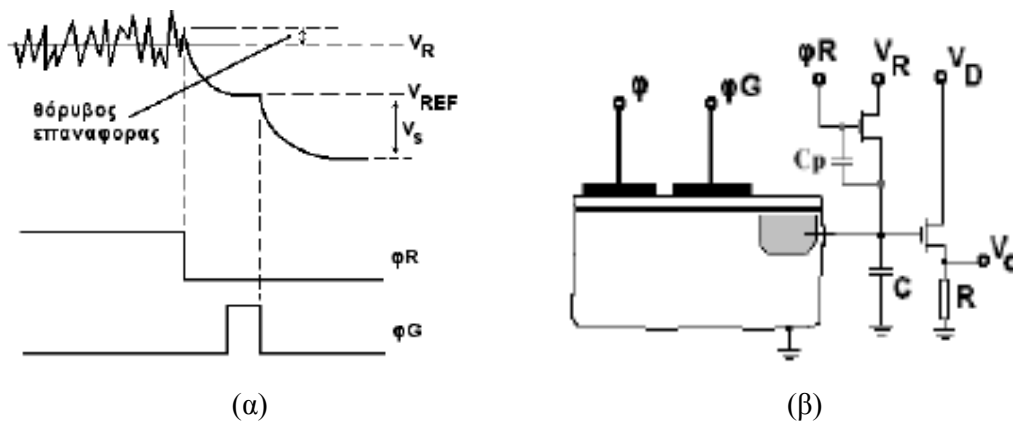
#### Α) ΒΑΘΜΙΔΑ ΕΞΟΔΟΥ

Λέγοντας βαθμίδα εξόδου ενός CCD, εννοούμε το τμήμα των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων του CCD, το οποίο υποδέχεται στην είσοδό του τα πακέτα ηλεκτρονίων καθενός pixel, που εξέρχονται σειριακά από τον οριζόντιο καταχωρητή. Ρόλος της βαθμίδας εξόδου είναι η μετατροπή της πληροφορίας (πακέτα ηλεκτρονίων) σε ηλεκτρικό σήμα (τάση), το οποίο κατόπιν ενισχύεται και προωθείται στον ψηφιοποιητή που αναλαμβάνει τη μετατροπή του σε ψηφιακό σήμα. Κατά κανόνα αμέσως μετά την έξοδο του σειριακού καταχωρητή υπάρχει μία πύλη (φG), που ελέγχει την κίνηση των πακέτων φορτίου, προς ένα πυκνωτή ο οποίος τη διαδέχεται (στην πραγματικότητα μια δίοδος παίζει το ρόλο του πυκνωτή, αφού οι πυκνωτές δύσκολα κατασκευάζονται σε τσιπ). Αυτός ο πυκνωτής πραγματοποιεί τη μετατροπή των φορτίων σε τάση ( $V_S$ ) με βάση την απλή σχέση  $V_S = \frac{Q}{C}$ , όπου (C) η χωρητικότητα του πυκνωτή, και (Q) το φορτίο του πακέτου των ηλεκτρονίων. Όμως επειδή ο πυκνωτής πριν την ανάγνωση του φορτίου κάθε πακέτου, φορτίζεται σε μία θετική τάση  $V_R$  (με σκοπό να λειτουργήσει ως τάση αναφοράς), το ( $V_S$ ) είναι η πτώση τάσης που προκαλεί το φορτίο στον πυκνωτή, ενώ στην έξοδο του CCD θα διαβάσουμε τάση  $V_R - V_S$ . Τη φόρτιση στην τάση αναφοράς πραγματοποιεί ένα MOSFET (ημιαγώγιμο οξειδίο μετάλλου, επίδρασης πεδίου τρανζίστορ), το οποίο μπορούμε να θεωρήσουμε ότι συμπεριφέρεται ισοδύναμα με ανοικτό ή

κλειστό διακόπτη όταν το δυναμικό στην πύλη του ( $\phi R$ ) είναι μηδέν ή θετικό αντίστοιχα. Ωστόσο λόγω της παρασιτικής χωρητικότητας του MOSFET, αφού επαναφορτίσουμε τον πυκνωτή, ακολουθεί μία πολύ σύντομη εκφόρτισή του τρανζίστορ, όταν το ( $\phi R$ ) επιστρέψει σε δυναμικό μηδέν. Έτσι αποκαθίσταται μία τάση  $V_{REF}$ , η οποία είναι ελάχιστα μικρότερη από την τάση  $V_R$ . Τη  $V_{REF}$  την ονομάζουμε τάση επαναφοράς (reset voltage) και συνεπώς το μετρούμενο σήμα στην έξοδο θα είναι η διαφορά  $V_{REF} - V_S$ .

Ύστερα ο πυκνωτής συνδέεται με την πύλη ενός δεύτερου (MOSFET) το οποίο και πραγματοποιεί την τελική ενίσχυση του σήματος (δηλαδή της τάσης του πυκνωτή) και παρέχει την τάση εξόδου  $V_o$  (σχήμα 14), [23].

Αν και το θέμα είναι πολύπλοκο και οι μέθοδοι πολλές, η βασική αρχή είναι η εξής: Μετά την επαναφορά του πυκνωτή, μετράμε την τάση αναφοράς, την αποθηκεύουμε, έπειτα προωθείται το φορτίο στην έξοδο και λαμβάνουμε σαν σήμα τη διαφορά της τάσης εξόδου και της αποθηκευμένης τάσης αναφοράς. Η τεχνική αυτή ονομάζεται CDS (Correlated Double Sampling). Να σημειωθεί ότι η σταθερά χρόνου RC του κυκλώματος είναι της τάξης των (sec) ενώ ο δειγματισμός διαρκεί μόνο λίγα ( $\mu\text{sec}$ ).

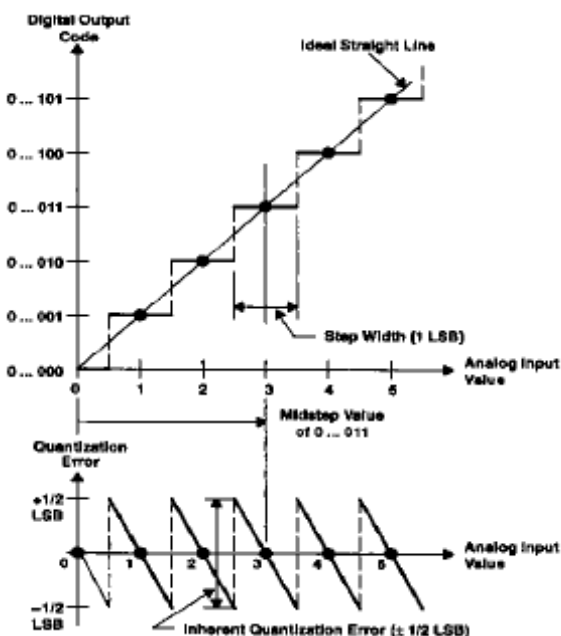


**Σχήμα 14 :** (α) Η σύνδεση του καταχωρητή με τη βαθμίδα εξόδου.  
 (β) Όταν το τρανζίστορ επαναφοράς είναι κλειστό ( $\phi R$  σε υψηλό δυναμικό) τότε υπάρχουν διακυμάνσεις στην τάση επαναφοράς. Με παλμό στην πύλη  $\phi G$ , το φορτίο μετακινείται στην βαθμίδα εξόδου όπου ανιχνεύεται ( $V_s$ ).

## B) ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΤΗΣ

Ο ψηφιοποιητής είναι το ηλεκτρικό τμήμα του CCD που αναλαμβάνει να μετατρέψει το αναλογικό σήμα, το οποίο δέχεται ενισχυμένο από τη βαθμίδα εξόδου, σε ψηφιακό (δηλαδή σε αριθμό, που μπορεί να επεξεργαστεί ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής).

Αυτή η μετατροπή γίνεται σύμφωνα με μία απλή γραμμική σχέση η οποία ονομάζεται συνάρτηση μεταφοράς. Όμως η μετατροπή του σήματος (τάση) σε ψηφιακό αριθμό DN (Data Number) δεν είναι ποτέ απολύτως γραμμική διότι η ακρίβεια κατά την ψηφιοποίηση του σήματος καθορίζεται από τον αριθμό των bit που χρησιμοποιούνται. Έτσι η πραγματική συνάρτηση μεταφοράς έχει μορφή σκάλας, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 1, [23].



**Διάγραμμα 1 :** Η συνάρτηση μεταφοράς καθορίζει την αντιστοίχιση τιμής εξόδου – σήματος εισόδου ενός ψηφιοποιητή. Λόγω του γεγονότος ότι περιοχές τιμών αντιστοιχίζονται σε συγκεκριμένους αριθμούς, έχουμε μερική αβεβαιότητα ως προς το σήμα εισόδου (σφάλμα κβαντοποίησης).

Το βήμα στη συνάρτηση μεταφοράς καθορίζεται από την απόσταση δύο διαδοχικών τιμών του σήματος οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορά μίας μονάδας 1 ADU (Analog to Digital Unit) του ψηφιοποιητή. Αυτή η απόσταση στις τιμές σήματος, που αντιστοιχεί σε 1 ADU, καθορίζει την κλίμακα του ψηφιοποιητή και μετριέται συνήθως σε  $\frac{mVolt}{ADU}$  ή σε  $\frac{N_e}{ADU}$  [όπου  $N_e$  το πλήθος ηλεκτρονίων που αντιστοιχούν σε 1 ADU και ονομάζεται κέρδος. Μεταξύ σήματος σε

Volts και του αντίστοιχου πλήθους ηλεκτρονίων ισχύει η σχέση  $V = \frac{N_e \cdot |q_e|}{C}$ , όπου (C) η χωρητικότητα του πυκνωτή στον οποίο πραγματοποιείται η μετατροπή των φορτίων σε τάση].

Έτσι αν π.χ. έχουμε κλίμακα  $1 \frac{mV}{ADU}$ , αυτό σημαίνει ότι σήμα 100 mV θα δίνει και τιμή

100ADU στην έξοδο του ψηφιοποιητή αλλά το αντίστροφο προφανώς δεν είναι ακριβές. Αυτό διότι ένα σήμα 100,3 mV θα ψηφιοποιηθεί επίσης σε 100ADU στην έξοδο. Άρα μπορούμε να προσδιορίσουμε το σήμα με ακρίβεια που καθορίζεται από την κλίμακα της ψηφιοποίησης που στο παράδειγμά μας θα έχουμε αβεβαιότητα εύρους 1 mV γύρω από την κεντρική τιμή των 100 mV. Η αβεβαιότητα αυτή που εισάγεται κατά την ψηφιοποίηση του σήματος ονομάζεται θόρυβος κβαντοποίησης. Το μέγεθος του εισαγόμενου θορύβου κατά την διαδικασία της κβαντοποίησης, εξαρτάται από τον αριθμό των bit που χρησιμοποιούνται κατά την μετατροπή [διότι καλύτερη ακρίβεια σημαίνει μικρότερο πλάτος βήματος και μεγαλύτερο πλήθος βημάτων, στα οποία αναλύεται το σήμα, άρα και μεγαλύτερο πλήθος bit]. Η καταλληλότερη επιλογή ψηφιοποιητή ως προς το πλήθος bit που διαθέτει, σχετίζεται με τη δυναμική περιοχή της κάμερας, ζήτημα το οποίο αναλύεται σε κατοπινό κεφάλαιο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°

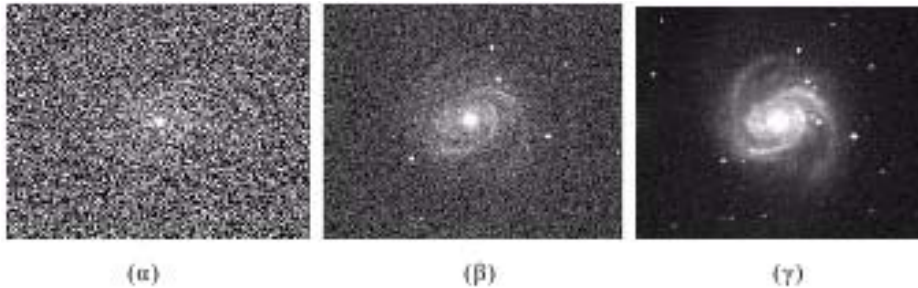
### **ΕΙΔΗ ΘΟΡΥΒΟΥ ΚΑΙ ΟΙ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ CCD**

Με τον όρο ‘θόρυβο’ σε μία διαδικασία προσδιορισμού της τιμής ενός μεγέθους, εννοούμε οποιαδήποτε αλλοίωση ή αβεβαιότητα υπεισέρχεται στο αποτέλεσμα της μέτρησης. Όπως γίνεται αντιληπτό το θέμα του θορύβου, γενικά για μία ανιχνευτική διάταξη, είναι καίριας σημασίας, τόσο για τις επιδόσεις όσο και για την αξιολόγησή της. Ειδικά για διατάξεις υψηλών προδιαγραφών, όπως είναι οι κάμερες CCD, που προορίζονται για επιστημονική χρήση στο πεδίο της έρευνας και απαιτείται η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια στις μετρήσεις, η αντιμετώπιση του θορύβου αποτελεί πολυσύνθετο και πολύπλοκο πρόβλημα. Στόχος δεν είναι μόνο ο προσδιορισμός του θορύβου, κατά απόλυτο μέγεθος και η προσπάθεια εξάλειψής του (αν και ποτέ δεν είναι δυνατό να τον εκμηδενίσουμε όπως θα δούμε), αλλά η ελαχιστοποίησή του σε σχέση με το μέγεθος του σήματος που επιθυμούμε να μετρήσουμε.

Για την λήψη καλής ποιότητας εικόνων, με μία κάμερα CCD, δεν φτάνει η πολύ υψηλή ευαισθησία (οπότε και με πολύ μικρής χρονικής διάρκειας εκθέσεις μπορούν να καταγραφούν ασθενή σήματα), ούτε το μέγεθος του θορύβου από μόνο του είναι αντιπροσωπευτικό για τις επιδόσεις ενός CCD. Το πιο βασικό χαρακτηριστικό ποιότητας μιας εικόνας, που αποτελεί και βασικό κριτήριο για τη συνολική αξιολόγηση ενός CCD (όπως και οποιασδήποτε άλλης ανιχνευτικής διάταξης), είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio) δηλαδή  $(SNR = \frac{S}{N})$ , όπου (S) το σήμα -το οποίο ισοδυναμεί με το συνολικό πλήθος των φωτονίων που συλλέχθηκαν- και (N) ο θόρυβος που υπεισέρχεται στο σήμα. Είναι προφανές ότι μεγαλύτερες τιμές του (SNR) σημαίνουν καλύτερη ποιότητα εικόνας. Στην εικόνα 1 παρουσιάζονται τρεις φωτογραφίες του γαλαξία (M100) . Στην 1(α) έχουμε την μικρότερη τιμή για το λόγο σήματος



θορύβου και φαίνεται καθαρά ότι ο θόρυβος επισκιάζει το σήμα με αποτέλεσμα μετά βίας να διακρίνεται ο γαλαξίας.



**Εικόνα 1:** (α) Ο γαλαξίας (M100) ανιχνεύεται, αλλά με πολύ κακή ποιότητα. Οι σπείρες του είναι εντελώς χαμένες μέσα στον θόρυβο.

(β),(γ) Εικόνες του γαλαξία με διαδοχικά καλύτερο λόγο σήματος-θορύβου. Είναι φανερή η αύξηση της ποιότητας της εικόνας και των λεπτομερειών στην σπειροειδή δομή.

Άρα σκοπός μας είναι να επιτύχουμε την μεγαλύτερη τιμή λόγου σήματος προς θόρυβο με διάφορες τεχνικές (που ποικίλουν ανάλογα με την εφαρμογή και τον τρόπο χρήσης της κάμερας) οι οποίες φυσικά αποσκοπούν σε αύξηση του σήματος και ελάττωση του θορύβου ή καλύτερα, αύξηση του σήματος σε μεγαλύτερο ποσοστό από την αύξηση του θορύβου (αφού συνήθως αύξηση του σήματος επιφέρει αναπόφευκτα και αύξηση του θορύβου όπως θα δούμε).

Ας εξετάσουμε όμως αναλυτικά τις πηγές και τα είδη θορύβου, που μπορεί να είναι χρονικοί, χωρικοί, συστηματικοί ή τυχαίοι. Οι κυρίαρχες πηγές θορύβου είναι τρεις: Ο φωτονικός (photon noise), ο θερμιονικός (dark noise) και ο θόρυβος ανάγνωσης (read out noise). Ωστόσο θα αναφερθούν και άλλες πηγές θορύβου, δευτερεύουσας σημασίας, επειδή στην πράξη είναι δυνατό να μειωθεί σε αμελητέο σχετικά επίπεδο η συνεισφορά τους, είτε με συγκεκριμένες τεχνικές επεξεργασίας των μετρήσεων είτε με κατάλληλη αξιοποίηση των παραμέτρων λειτουργίας της κάμερας.

## 2.1 ΦΩΤΟΝΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ

### [Photon Noise – Shot Noise ( $N_p$ )]

Ο φωτονικός θόρυβος (ή θόρυβος βολής όπως συνήθως αποκαλείται) έχει να κάνει με την αβεβαιότητα σε σχέση με το πλήθος των φωτονίων που πραγματικά προσπίπτουν, ανά μονάδα χρόνου, σε ένα pixel (δηλαδή με την αβεβαιότητα ως προς την ένταση της ακτινοβολίας). Αυτό οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο τα φωτόνια καταφθάνουν στον αισθητήρα μας. Το κάθε φωτόνιο φτάνει στο CCD ανεξάρτητα από το κάθε άλλο ή διαφορετικά, ο χρόνος άφιξης ενός

φωτονίου είναι ανεξάρτητος από το χρόνο άφιξης είτε του προηγούμενου είτε του επόμενου φωτονίου. Άρα τα φωτόνια που προσπίπτουν στο CCD δεν έχουν σταθερή ροή. Όταν η ένταση της ακτινοβολίας έχει μεγάλη τιμή (από πηγές αυξημένης φωτεινότητας), αυτές οι διακυμάνσεις είναι πολύ μικρές σε σχέση με την μέση τιμή της έντασης, οπότε μπορούμε να τις θεωρήσουμε αμελητέες (δεν γίνονται αντιληπτές). Όμως για σήματα χαμηλής έντασης (για παράδειγμα το φως από αμυδρούς αστέρες) αυτές οι διακυμάνσεις είναι συγκρίσιμες με την μέση τιμή της έντασης, άρα είναι παρατηρήσιμες και ιδιαίτερα αισθητές για λήψεις έστω και μικρών χρονικών διαστημάτων (της τάξεως του δευτερολέπτου).

Το χρονικό διάστημα μεταξύ των αφίξεων των φωτονίων διέπεται από τη στατιστική κατανομή Poisson και ως εκ τούτου ο φωτονικός θόρυβος είναι ισοδύναμος με την τετραγωνική ρίζα του σήματος (η οποία εξαρτάται επίσης από το μέγεθος των Pixel και από τον χρόνο έκθεσης). Δηλαδή ισχύει:

$$N_P = \sqrt{S} = \sqrt{I_S \cdot Q_E \cdot t}$$

όπου:  $S$  το ανιχνευόμενο σήμα ανά pixel ( $\frac{e^-}{pixel}$ ),

$I_S$  είναι η μέση τιμή της έντασης των φωτονίων που προσπίπτουν σε κάθε pixel (Photon Flux σε  $\frac{photons}{pixel \cdot sec}$ ),

$Q_E$  η κβαντική απόδοση του CCD (%) και  $t$  ο χρόνος έκθεσης (σε sec).

Έτσι γίνεται επίσης φανερό ότι αυξανόμενης της φωτεινής ροής (ένταση του σήματος), ελαττώνεται το επίπεδο του θερμικού θορύβου ως σχετικό μέγεθος επί του σήματος, δηλαδή

αυξάνεται το κλάσμα  $\frac{S}{N_P} = \frac{I_S \cdot Q_E \cdot t}{\sqrt{I_S \cdot Q_E \cdot t}}$  και συνεπώς βελτιώνεται η ποιότητα της εικόνας. Η

αύξηση του σήματος μπορεί να επιτευχθεί επίσης με μεγαλύτερους χρόνους έκθεσης, τότε όμως αυξάνεται και ο θερμικός θόρυβος όπως θα δούμε αργότερα.

Από τα πιο πάνω είναι φανερό, ότι ο φωτονικός θόρυβος αποτελεί ένα κατώτερο όριο θορύβου, που θέτει η ίδια η φύση και δεν είναι δυνατό να το ξεπεράσουμε (για συγκεκριμένη τιμή σήματος). Στην περίπτωση που τα υπόλοιπα είδη θορύβου έχουν πολύ μικρότερη τιμή, σε σχέση με την τιμή του φωτονικού θορύβου, έτσι ώστε η εισφορά τους στον συνολικό θόρυβο να θεωρείται αμελητέα, τότε λέμε ότι το σύστημα λειτουργεί σε συνθήκες περιορισμού από τον φωτονικό θόρυβο (Photon noise limited). Για παράδειγμα κατά την ανίχνευση ενός σήματος  $S=3600$  ( $e^-$ ), ακόμα και με ένα ιδανικό CCD το οποίο δεν εισάγει καθόλου θόρυβο κατά τη λειτουργία του, το κλάσμα σήματος προς θόρυβο δεν μπορεί να υπερβαίνει την τιμή

$$SNR_{\max} = \frac{3600}{\sqrt{3600}} = 60.$$

Γενικά ο όρος Shot Noise ( ή θόρυβος βολής ) χρησιμοποιείται για κάθε είδος θορύβου που ακολουθεί τη στατιστική κατανομή Poisson. Σε αυτή τη κατηγορία ανήκει και ο θερμικός θόρυβος. Απλά είναι συνήθεια ο φωτονικός θόρυβος να αναφέρεται και ως θόρυβος βολής (Shot Noise).

## 2.2 ΘΟΡΥΒΟΣ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ ( $N_B$ )

Ο θόρυβος υποβάθρου προκαλείται από το ανεπιθύμητο σήμα διαφόρων πηγών φωτός στο υπόβαθρο του παρατηρούμενου αντικειμένου (π.χ. φαινόμενα διασποράς του φωτός και αντανάκλασεις στο σύστημα απεικόνισης) . Έχει πολύ σημαντική επίδραση στο μετρούμενο ωφέλιμο σήμα ιδιαίτερα κατά την παρατήρηση αμυδρών αντικειμένων.

Στη περίπτωση παρατήρησης αστρικών αντικειμένων, ο θόρυβος υποβάθρου προέρχεται από τον νυχτερινό ουρανό και οφείλεται στην ακτινοβολία από την ατμόσφαιρα τη νύχτα (airglow ή nightglow), το φως των άστρων , το ζωδιακό φως, το σκεδαζόμενο φως του Ηλίου, το φως της Σελήνης, το διάχυτο γαλαξιακό φως και το φως από ανθρωπογενείς παράγοντες (φωτορύπανση). Από το συνολικό φως του νυχτερινού ουρανού έχει υπολογιστεί ότι κατά τη διεύθυνση του βόρειου ουράνιου πόλου το 40% οφείλεται στην ακτινοβολία της ατμόσφαιρας θόρυβος υποβάθρου του ουρανού, λόγω του πλήθους των πηγών, παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις, τόσο ως προς την ένταση όσο και ως προς το φάσμα του και μεταβάλλεται από πολλούς παράγοντες π.χ. τον τόπο στον οποίο γίνονται οι μετρήσεις, τη διεύθυνση των παρατηρήσεων, τη χρονική περίοδο (ακόμα και κατά τη διάρκεια της ίδιας νύχτας και στον ίδιο τόπο μπορεί να παρατηρηθούν μεγάλες διακυμάνσεις του θορύβου υποβάθρου σε μικρά χρονικά διαστήματα).

Ο θόρυβος υποβάθρου έχει όμοια χαρακτηριστικά με τον φωτονικό θόρυβο - δηλαδή ακολουθεί τη στατιστική κατανομή Poisson και ανήκει επίσης στη κατηγορία θορύβου βολής - οπότε εκφράζεται με μία αντίστοιχη σχέση, με διαφορετική όμως τιμή για την φωτεινή ροή, η οποία τώρα θα εκφράζει την ένταση της ακτινοβολίας υποβάθρου:

$$N_B = \sqrt{S_B} = \sqrt{I_B \cdot Q_E \cdot t} ,$$

όπου  $S_B$  το ανεπιθύμητο σήμα από τις πηγές υποβάθρου (  $\frac{e^-}{pixel}$  ) και

$I_B$  η μέση τιμή έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας υποβάθρου ανά  
pixel (  $\frac{photons}{pixel \cdot sec}$  ).

### 2.3 ΘΕΡΜΙΟΝΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ

#### [Dark Noise ή ΣΚΟΤΕΙΝΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ ( $N_D$ )]

Σε κάθε υλικό, λόγω θερμικών ταλαντώσεων, συμβαίνει μια διαρκής παραγωγή ζευγών ηλεκτρονίου-οπής. Προφανώς αυτά τα θερμικά παραγόμενα ηλεκτρόνια δρουν παρασιτικά στο μετρούμενο σήμα. Ο σκοτεινός θόρυβος προκύπτει από τις στατιστικές διακυμάνσεις των θερμικά παραγόμενων ηλεκτρονίων, στο εσωτερικό της δομής του πυριτίου της CCD, φαινόμενο το οποίο είναι ανεξάρτητο από το φωτοπαραγόμενο σήμα (φωτοηλεκτρόνια), αλλά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία της συσκευής. Ο ρυθμός παραγωγής θερμικών ηλεκτρονίων, σε μία δεδομένη θερμοκρασία ονομάζεται ρεύμα σκότους (Dark Current,  $I_D$ ) –αφού υφίσταται ακόμη και σε συνθήκες που η κάμερα είναι πλήρως φωτοστεγανή – και μετράται σε μονάδες  $nA/cm^2$  ή σε  $e^-/pixel/sec$ . Ομοίως με τον φωτονικό θόρυβο, ο σκοτεινός θόρυβος ακολουθεί την κατανομή Poisson σε σχέση με το ρεύμα σκότους – δηλαδή ανήκει επίσης στην κατηγορία των θορύβων βολής (shot noise)– και ως εκ τούτου ισοδυναμεί με την τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής των θερμικά παραγόμενων ηλεκτρονίων, εντός του χρονικού διαστήματος της λήψης. Δηλαδή ισχύει :

$$N_D = \sqrt{S_D} = \sqrt{I_D \times t}$$

Όπου:  $S_D$  η μέση τιμή των θερμικά παραγόμενων ηλεκτρονίων σε χρόνο  $t$  ( $e^-/pixels$ ), και  $I_D$  η μέση τιμή για το ρεύμα σκότους ( $e^-/pixel/sec$ ).

Η παραγωγή σκοτεινού ρεύματος οφείλεται στο φαινόμενο κατά το οποίο τα ηλεκτρόνια χρησιμοποιούν θερμική ενέργεια για να μεταβούν από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Η μετάβαση αυτή διευκολύνεται σε πολύ μεγάλο βαθμό –όπως επίσης και η παραγωγή στο ρεύμα σκότους– λόγω ύπαρξης ατελειών πλέγματος και ακαθαρσιών, οι οποίες εισάγουν ενεργειακά επίπεδα στην απαγορευμένη ζώνη (bandgap).

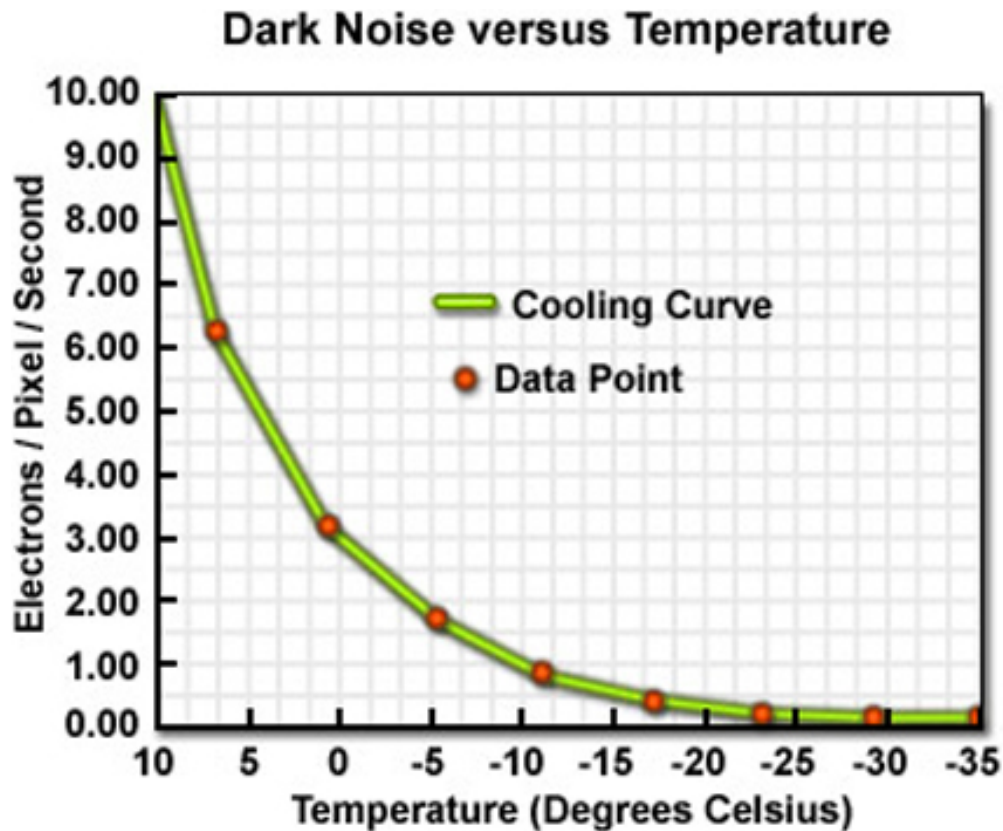
Στην παραγωγή σκοτεινού ρεύματος συμβάλλουν διάφορες συγκεκριμένες περιοχές ενός CCD, αλλά η κύρια συνεισφορά γίνεται από το σύνολο της περιοχής απογύμνωσης των pixels (Bulk Dark Current, B.D.C.) και από την περιοχή διεπαφής του πυριτίου με το οξείδιο του πυριτίου (Surface Dark Current, S.D.C.).

Το B.D.C. ποικίλει σημαντικά μεταξύ διαφόρων κατασκευαστών CCD και εξαρτάται από την ποιότητα του υλικού «γκοφρέτας» πυριτίου (silicon wafer material) και από τις τεχνικές επεξεργασίας του, που χρησιμοποιούνται πριν από την κατασκευή της CCD. Το μέσο επίπεδο παραγωγής B.C.D. σχετίζεται κυρίως σε ακαθαρσίες και διάφορες τεχνικές (πχ. gettering) χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνσή τους από τις περιοχές του αισθητήρα στις οποίες παράγεται το σήμα. Γενικά το B.D.C. μπορεί να περιορισθεί σε πολύ χαμηλά επίπεδα, τόσο ώστε η συνεισφορά του στο συνολικό σκοτεινό θόρυβο μπορεί να αγνοηθεί.

Έτσι η κύρια πηγή παραγωγής σκοτεινού ρεύματος, με πολύ μεγάλη διαφορά, είναι το S.D.C.. Για την ελάττωση του S.D.C. εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές κατά την κατασκευή του

αισθητήρα, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το πλήθος των κατεστραμμένων ή «ετοιμόρροπων» δεσμών (που προκαλούνται από τις αναντιστοιχίες πλέγματος στην διεπαφή πυριτίου – οξειδίου του πυριτίου) και να απομακρυνθούν οι ακαθαρσίες (πχ. Θερμική επεξεργασία, passivation). Όμως ακόμη και σε αυτή την περίπτωση, τα κέντρα παραγωγής ρεύματος σκότους στην διεπαφή είναι τυπικά κατά 100 φορές περισσότερα από το πλήθος αυτών στην περιοχή απογύμνωσης των pixels. Το μέγεθος του S.D.C. επίσης ποικίλει σημαντικά μεταξύ των διαφόρων κατασκευαστών CCD, ανάλογα με τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται, τόσο για την επεξεργασία των υλικών (πυρίτιο, οξείδιο πυριτίου) όσο και στην διαδικασία κατασκευής της διεπαφής στα pixel του αισθητήρα.

Μετά την κατασκευή του αισθητήρα, ο μόνος μηχανισμός για την μείωση του σκοτεινού ρεύματος είναι η ψύξη του CCD. Γενικά οι αισθητήρες CCD υψηλών επιδόσεων, παρουσιάζουν κατά το ήμισυ ελάττωση στο ρεύμα σκότους για κάθε περίπου  $7^{\circ}\text{C}$ , καθώς ψύχονται κάτω από την θερμοκρασία δωματίου, προδιαγραφή η οποία αναφέρεται ως «θερμοκρασία διπλασιασμού» (doubling temperature). Αυτός ο ρυθμός μείωσης εξακολουθεί συνήθως μέχρι τη θερμοκρασία περίπου  $-10^{\circ}\text{C}$ , κάτω από την οποία η ελάττωση είναι ραγδαία (σχήμα 1), [5].



ΣΧΗΜΑ 1 : Διάγραμμα της παραγόμενου ρεύματος σκότους σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.

Μία εμπειρική εξίσωση έχει αναπτυχθεί, για την περιγραφή της σχέσης μεταξύ της θερμοκρασίας και του παραγόμενου σκοτεινού ρεύματος σε ένα αισθητήρα CCD, η οποία προκύπτει από πειραματικές μετρήσεις και είναι πολύτιμη για τον προσδιορισμό της απαιτούμενης θερμοκρασίας στην οποία το ρεύμα σκότους καταργείται, [5]. Η εξίσωση αυτή αναπτύχθηκε από μια γενική μέθοδο, η οποία συνδυάζεται με μία έκφραση που περιγράφει την μεταβολή της ενέργειας αποκοπής του πυριτίου, με τη θερμοκρασία και μία τιμή μέτρησης του σκοτεινού ρεύματος σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας (300 K). Η ενέργεια αποκοπής του πυριτίου ( $E_G = 66$  eV), ποικίλει ανάλογα με τη θερμοκρασία σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση στην οποία  $T$  είναι η θερμοκρασία σε Kelvin :

$$E_G = 1.1557 - \left[ \frac{7.021 \times 10^{-4} \times T^2}{1108 + T} \right],$$

Η σχέση που προκύπτει για το σκοτεινό ρεύμα έχει ως εξής :

$$I_D = 2.5 \times 10^{15} \times A \times I_{300} \times T^{1.5} \times e^{-\frac{E_G}{2kT}}$$

Όπου :  $I_D$  το ρεύμα σκότους (e / pixel / sec )

$A$  το εμβαδό της επιφάνειας των pixel ( $\text{cm}^2$ )

$I_{300}$  η τιμή του σκοτεινού ρεύματος μετρημένη στους 300 K ( $\text{nA} / \text{cm}^2$ )

$T$  η θερμοκρασία (K)

και  $E_G$  η ενέργεια αποκοπής του πυριτίου σε θερμοκρασία  $T$  (eV).

Με την ψύξη βελτιώνονται και άλλες παράμετροι επιδόσεων των CCD, όπως για παράδειγμα η αποφυγή του κορεσμού των pixels (ειδικά για μεγάλους χρόνους έκθεσης) φαινόμενο το οποίο οφείλεται κατά κύριο λόγο στις μεγάλες τιμές του σκοτεινού ρεύματος. Η ψύξη της CCD μπορεί να επιτευχθεί με ψυκτικές μηχανές κλειστού τύπου, με ξηρό πάγο, με θερμοηλεκτρικές μονάδες Peltier ή με υγρό άζωτο (LN) για ψύξη σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από τους  $-30$  °C ( στο παράρτημα Γ γίνεται αναφορά για τους τρόπους ψύξης).

Μια νέα σχετικά τεχνολογία, με τη χρήση κατάλληλων εμφυτευμάτων κάτω από τις φάσεις των pixels, επιτρέπει την αναστροφή των τάσεων στις πύλες του CCD, χωρίς να καταστρέφονται τα πηγάδια δυναμικού (Multi – Pinned Phase CCD, MPP CCD). Κατά τη λειτουργία ενός MPP CCD σε κατάσταση αναστροφής των τάσεων (inverted mode), το ρεύμα σκότους μπορεί να μειωθεί σε πολύ χαμηλά επίπεδα (έως και 100 φορές πιο μικρό από το αντίστοιχο ενός κλασσικού CCD), οδηγώντας σε πρόσθετα συναφή πλεονεκτήματα όπως την ελάττωση των απαιτήσεων ψύξης. Με την αναστροφή των τάσεων στα pixels καταφέρνουμε τη μείωση σε πολύ υψηλό βαθμό (όχι όμως και την εξάλειψη) της εισφοράς ρεύματος σκότους από τα κέντρα παραγωγής του, στις διεπαφές πυριτίου – οξειδίου πυριτίου, που όπως αναφέρθηκε αποτελούν

την κυρίαρχη πηγή (S.D.C). Στα κλασικά CCD οι περιοχές των διεπαφών κατά τη λειτουργία της συσκευής, είναι εντελώς άδειες από ελεύθερους φορείς, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πιθανότητα μεταπήδησης των θερμικά παραγόμενων ηλεκτρονίων, από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Σε συνθήκες ανεστραμμένης λειτουργίας, το δυναμικό στη διεπαφή είναι χαμηλότερο από του υποστρώματος, με αποτέλεσμα φορείς μειονότητας (οπές) να μεταναστεύουν και να γεμίζουν τη διεπαφή. Σε αυτή τη κατάσταση χρονισμού, που ονομάζεται «accumulation mode clocking», οι οπές που δημιουργούνται στη διεπαφή, συνδέονται με τα θερμικά ηλεκτρόνια που εκπέμπονται, εμποδίζοντας τα να συλλέγονται και να ενσωματώνονται στο σήμα ως θερμοϊονικός θόρυβος.

Μειονέκτημα των MPP CCD είναι η ελάττωση της χωρητικότητας των πηγαδιών δυναμικού, κάτι το οποίο αντισταθμίζεται πλήρως από το πλεονέκτημα της ελαχιστοποίησης του ρεύματος σκότους. Επίσης, ακόμη και στα κλασικά (μη MPP CCD) είναι εφικτή η λειτουργία σε μερική αναστροφή τάσης (με τις δύο φάσεις ανεστραμμένες και την Τρίτη σε θετικό δυναμικό), επιτυγχάνοντας ελάττωση στο ρεύμα σκότους σχεδόν κατά  $\frac{2}{3}$ , κάτι που μπορούμε να το πετύχουμε με μείωση της θερμοκρασίας περίπου κατά  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Βέβαια αυτή η ελάττωση στο ρεύμα σκότους είναι πολύ μικρή σε σχέση με αυτή που επιτυγχάνεται στην πλήρη αναστροφή ενός MPP CCD.

Ο θόρυβος που συνδέεται με το ρεύμα σκότους αποτελείται από δύο τύπους, τον σκοτεινό θόρυβο βολής (**Dark Current Shot Noise**) που ανήκει στην κατηγορία των χρονικών θορύβων και τον μη-ομοιόμορφο σκοτεινό θόρυβο (**Dark Current Non-Uniformity**) ο οποίος ανήκει στη κατηγορία των χωρικών θορύβων. Η χρονική συνιστώσα όπως έχει ήδη αναφερθεί, ισοδυναμεί με την τετραγωνική ρίζα του σκοτεινού σήματος και ο μόνος τρόπος για να αντιμετωπιστεί είναι η ψύξη της CCD.

Ο μη ομοιόμορφος σκοτεινός θόρυβος σχετίζεται με την διακύμανση του σκοτεινού ρεύματος από pixel σε pixel του αισθητήρα, η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι τα pixels έχουν εγγενώς διαφορετικό ρυθμό παραγωγής σκοτεινού σήματος. Μέγιστες τιμές στο ρεύμα σκότους, είναι εκδηλώσεις της ασυνήθιστα υψηλής παραγωγής του σε μεμονωμένα pixel (hot pixel) και θεωρείται ότι προκύπτουν λόγω ατελειών και ακαθαρσιών στο πλέγμα του πυριτίου. Ωστόσο οι τιμές αυτές δεν ακολουθούν κατ' ανάγκη την τυπική συμπεριφορά με τη θερμοκρασία, [1], [5].

Αυτό το είδος χωρικού θορύβου μειώνεται επίσης με την ψύξη, αλλά επιπλέον αντιμετωπίζεται με τεχνικές επεξεργασίας της εικόνας (dark frames). Το dark frame είναι λήψη, υπό τις ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας και χρόνου ολοκλήρωσης όπως και η εικόνα που θέλουμε να διορθώσουμε, αλλά με το CCD πλήρως φωτοστεγανό. Έτσι αν αφαιρέσουμε από την εικόνα το dark frame (που θεωρητικά οφείλεται μόνο σε θερμικά παραγόμενο σήμα) αφαιρούμε και την χωρική συνιστώσα του σκοτεινού θορύβου. Επίσης τα hot pixels μπορούν εύκολα να

εντοπιστούν σε ένα dark frame, οπότε είτε να απομονωθούν είτε να αντιμετωπιστούν με τεχνικές επεξεργασίας της εικόνας.

## 2.4 ΘΟΡΥΒΟΣ ΧΡΟΝΙΣΜΟΥ ( $N_C$ ) [Clocking Noise / Clock Jitter Noise]

Η διαχείριση του συλεχθέντος σήματος στα pixel και η μεταφορά του προς την έξοδο του αισθητήρα της κάμερας, απαιτεί μια σειρά χρονισμών στα ηλεκτρονικά κυκλώματα, υπό τον έλεγχο ενός κεντρικού ρολογιού (master clock). Κατά την εφαρμογή των χρονισμών προκύπτει θόρυβος από την λειτουργία των κυκλωμάτων, όταν υπάρχει σήμα τροφοδότησης του ρολογιού μέσα από το κανάλι της κυματομορφής εξόδου. Το επίπεδο του θορύβου χρονισμού αυξάνει με την ένταση του σήματος, καθώς επίσης εξαρτάται και από την τετραγωνική ρίζα της συχνότητας των χρονισμών. Τα συστήματα καμερών των οποίων το κεντρικό ρολόι οδηγείται από ένα ταλαντωτή κρυστάλλου, συνήθως δεν παρουσιάζουν προβλήματα θορύβου χρονισμού.

Επίσης όταν το φορτίο (σήμα) μετατοπίζεται από pixel σε pixel, με την εφαρμογή των τάσεων χρονισμού, προς την έξοδο, υπάρχει μια πολύ μικρή αλλά πεπερασμένη πιθανότητα παραγωγής φορτίων (ηλεκτρονίων), με την διαδικασία του ιονισμού από κρούση. Αυτά τα ανεπιθύμητα φορτία επιδρούν στο σήμα ως μία επιπλέον συνιστώσα θορύβου (Spurious Noise). Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται σε όλους τους τύπους CCD, αλλά σε μία καλά σχεδιασμένη κάμερα, η επίδρασή του ελαχιστοποιείται σε τέτοιο βαθμό, ώστε το σφάλμα που υπεισέρχεται να θεωρείται αμελητέο, με εξαίρεση σε πολύ ειδικές περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα κατά τις λήψεις με εφαρμογή της ομαδοποίησης (Binning) μεγάλου πλήθους των pixels. Ωστόσο στον τύπο καμερών EMCCD -τον τρόπο λειτουργίας των οποίων παρουσιάζουμε σε επόμενο κεφάλαιο- τα παρασιτικά αυτά φορτία ενισχύονται και έχουν μεγάλη επίδραση στο σήμα. Παρεμπιπτόντως η διαδικασία ενίσχυσης που πραγματοποιείται στα EMCCDs, στηρίζεται στην αξιοποίηση του ίδιου ακριβώς φαινομένου.

Το σύνολο του θορύβου χρονισμού, που οφείλεται στα φαινόμενα που αναφέρθηκαν, συμβολίζεται ως  $N_C$ .

## 2.5 ΘΟΡΥΒΟΣ ΑΝΑΓΝΩΣΗΣ (Read Out Noise, $N_R$ )

Αυτό το είδος θορύβου, οφείλεται στα ηλεκτρονικά μέρη του CCD, που εκτελούν διαδοχικά τη μετατροπή του σήματος σε τάση, το ενισχύουν και τελικά το ψηφιοποιούν. Είναι ένας συνδυασμός από συστηματικές συνιστώσες θορύβου οι οποίες είναι έμφυτες στη διαδικασία



διαχείρισης του σήματος, που μόλις αναφέρθηκε. Ο θόρυβος ανάγνωσης προέρχεται κυρίως από τον on-chip προενισχυτή και προστίθεται ομοιόμορφα στο σήμα κάθε εικονοστοιχείου (pixel) της εικόνας. Ορισμένοι τύποι θορύβου στον προενισχυτή των CCD, είναι συνάρτηση της συχνότητας, οπότε ο απαιτούμενος ρυθμός ανάγνωσης (frame rate) εν μέρει καθορίζει τις προδιαγραφές θορύβου ανάγνωσης και το πρακτικό αποτέλεσμα επί του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR), καθώς επίσης και το φάσμα των εφαρμογών της κάμερας.

Γενικά όμως, στα υψηλής απόδοσης CCD χρησιμοποιούνται βελτιώσεις στο σχεδιασμό τους, οι οποίες μειώνουν δραματικά τη σημασία του θορύβου ανάγνωσης. Πιο κάτω αναφέρονται αναλυτικά οι τύποι από τους οποίους αποτελείται.

#### **A) ΘΟΡΥΒΟΣ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ (Reset Noise, $N_r$ )**

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει, ο θόρυβος επαναφοράς υπεισέρχεται στο σήμα, κατά τη διαδικασία μετατροπής του σήματος, στη βαθμίδα εξόδου, από φορτίο (πλήθος ηλεκτρονίων) σε τάση, με τη βοήθεια ενός πυκνωτή (κόμβος διόδου). Σε αυτή τη μετατροπή απαιτείται η εφαρμογή μιας σταθερής τάσης αναφοράς στον πυκνωτή, η οποία αλλοιώνεται κατά τη μέτρηση του σήματος καθενός pixel. Έτσι πριν από κάθε νέα μέτρηση, ένα τρανζίστορ MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), αναλαμβάνει την επαναφορά της τάσης αναφοράς στον πυκνωτή, η οποία όμως μετά από κάθε επαναφορά ποτέ δεν έχει ακριβώς την ίδια τιμή, αλλά μια παραπλήσια. Ο θόρυβος επαναφοράς δημιουργείται στον κόμβο, από την αβεβαιότητα ως προς την τιμή της τάσης αναφοράς, λόγω των διακυμάνσεων θερμικής φύσης, στην αντίσταση του καναλιού του τρανζίστορ που εκτελεί την επαναφορά στην τάση. Ο θόρυβος που προκύπτει υπολογίζεται από τη σχέση, [5], [23]:

$$N_r = \sqrt{4kTBR} ,$$

Όπου  $N_r$  είναι ο θόρυβος επαναφοράς (Volt),

K είναι η σταθερά του Boltzman ( $\frac{J}{K}$ ),

T είναι η θερμοκρασία (K),

B μέγεθος που σχετίζεται με το εύρος ισχύος του θορύβου (Hz),

και R είναι η αντίσταση (Ohm).

Ο θόρυβος επαναφοράς μπορεί επίσης να εκφραστεί σε μονάδες ισοδύναμου πλήθους ηλεκτρονίων με την αναδιάρθρωση της προηγούμενης σχέσης ως εξής:

$$N_{r(rms)} = \frac{\sqrt{kTC}}{|q_e|}$$

Όπου: C είναι η χωρητικότητα του πυκνωτή (F).

Η τελευταία μορφή της εξίσωσης είναι υπεύθυνη για την προέλευση του συνήθους όρου KTC θόρυβος (KTC noise), που συχνά χρησιμοποιείται ως συνώνυμο του Reset Noise. Ο θόρυβος επαναφοράς είναι άξουσα συνάρτηση της ταχύτητας ανάγνωσης και μπορεί να λαμβάνει σημαντικές τιμές (ίσως και  $50 e^-$  rms). Τα CCD με μεγάλο θόρυβο επαναφοράς αποφεύγονται σε περιπτώσεις μετρήσεων όπου εφαρμόζεται η τεχνική της άθροισης εικόνων, αφού σε κάθε άθροιση θα αθροίζονται και τα αντίστοιχα σφάλματα. Όμως, οι περισσότερες κάμερες CCD υψηλής απόδοσης, έχουν ενσωματωμένα ειδικά κυκλώματα που περιορίζουν σε αμελητέα επίπεδα αυτό το είδος θορύβου.

Επίσης η κοινή τεχνική αντιμετώπισης είναι η διαδικασία συσχετιζόμενης διπλής δειγματοληψίας (Correlated double sampling) που αναφέρθηκε στα προηγούμενα. Σ' αυτήν τη διαδικασία, ένα κύκλωμα μετρά την τάση επαναφοράς πριν από κάθε μέτρηση και έτσι καθίσταται περιττή η επαναφορά της τάσης στο ίδιο ακριβώς επίπεδο.

## B) ΘΟΡΥΒΟΣ ΣΤΟΝ ON-CHIP ΕΝΙΣΧΥΤΗ

Ο θόρυβος ανάγνωσης στον ενισχυτή εξόδου ενός CCD, προέρχεται από δύο κύριες συνιστώσες θορύβου που αναφέρονται ως **White Noise** (Λευκός Θόρυβος,  $N_w$ ) και **Flicker Noise** ( $N_f$ ).

### WHITE NOISE:

Ομοίως με το τρανζίστορ επαναφοράς, ο ενισχυτής εξόδου MOSFET έχει μία αντίσταση που παράγει θερμικό θόρυβο, ο οποίος αναφέρεται είτε ως «Λευκός» επειδή δεν εξαρτάται από τη συχνότητα, είτε ως «θόρυβος Johnson», επειδή η τιμή του διέπεται από την εξίσωση Johnson για το λευκό θόρυβο,[5].

Αν θεωρήσουμε ότι η ενεργή αντίσταση, ισοδυναμεί με την εμπέδηση εξόδου του ενισχυτή από την πηγή που τον ακολουθεί, τότε η τιμή του λευκού θορύβου  $N_w$  (σε Volt), καθορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$N_w = \sqrt{4kTBR_{out}}$$

Όπου:  $K$  είναι σταθερά του Boltzman ( $\frac{J}{k}$ ),

$B$  μέγεθος που σχετίζεται με το εύρος ισχύος του θορύβου (Hz) ,  
και  $R_{out}$  είναι η εμπέδηση εξόδου του ενισχυτή (Ohm).

Ο Λευκός θόρυβος εκφρασμένος σε πλήθος ηλεκτρονίων, προκύπτει αν διαιρέσουμε την αντίστοιχη τιμή του σε volt , της πιο πάνω εξίσωσης, με το γινόμενο της ευαισθησίας του ενισχυτή επί το κέρδος εξόδου. Δηλαδή δίνεται από τη σχέση:

$$N_{W(rms.e^-)} = \frac{\sqrt{4kTBR_{out}}}{S_{amp} \times A_{amp}}$$

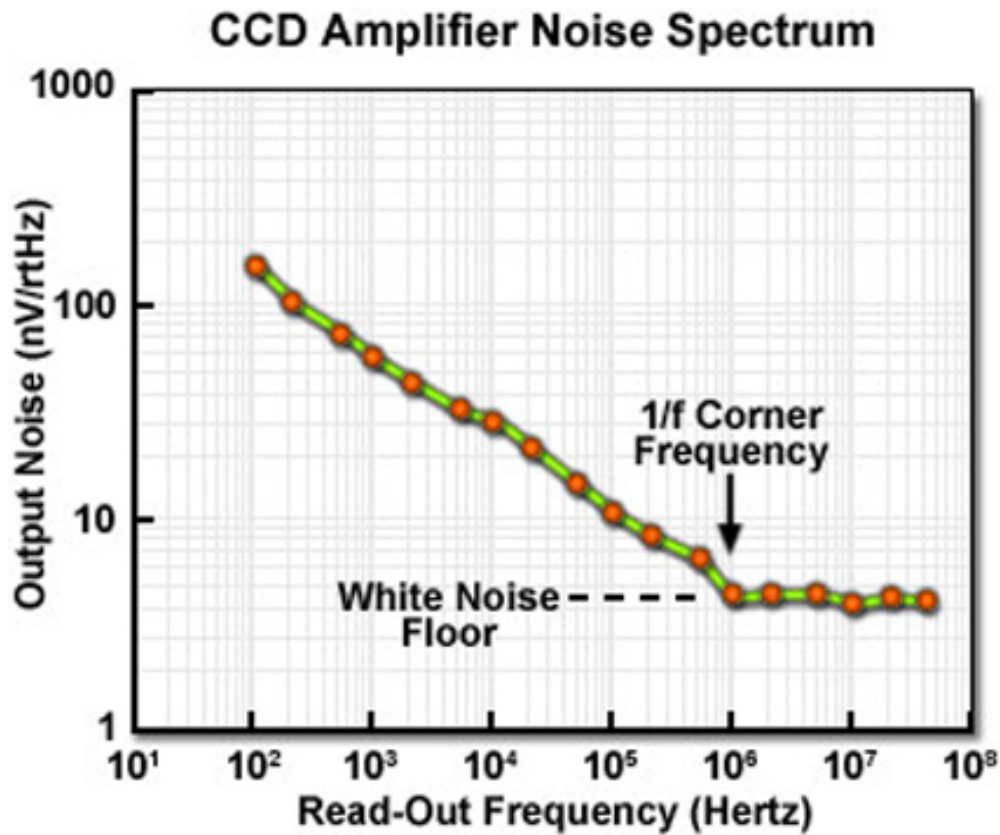
Όπου  $S_{amp}$  είναι η ευαισθησία του ενισχυτή ( $\frac{volt}{e^-}$ )

και  $A_{amp}$  είναι το κέρδος της ενίσχυσης.

### **FLICKER NOISE:**

Είναι η δεύτερη πηγή θορύβου που οφείλεται στον ενισχυτή εξόδου και συνήθως αναφέρεται ως θόρυβος «1/f », εξαιτίας της κατά προσέγγιση εξάρτησής του, από το αντίστροφο της συχνότητας του ρυθμού ανάγνωσης των pixels. Για κάμερες στις οποίες τα pixels διαβάζονται με ρυθμούς μικρότερους από 1 MHz, οι οποίες έχουν ως χαρακτηριστικό το 1/f φάσμα θορύβου, το πάτωμα του θορύβου ανάγνωσης συνήθως καθορίζεται από τη συνιστώσα θορύβου flicker noise (1/f).

Η μείωση του θορύβου καθώς αυξάνεται η συχνότητα είναι χαρακτηριστική ενός 1/f φάσματος, παρουσιάζοντας μείωση κατά έναν παράγοντα 3,16 για κάθε δεκάδα αύξησης της συχνότητας. Σημειώνεται ότι ο θόρυβος εξακολουθεί να μειώνεται με αυτό το ρυθμό έως το κατώτερο επίπεδο, σε μία συχνότητα όπου αναφέρεται ως «1/f corner frequency» (συχνότητα αποκοπής του flicker noise). Η σταθεροποίηση του επιπέδου θορύβου σε υψηλότερες συχνότητες, δείχνει ότι το πάτωμα λευκού θορύβου του ενισχυτή, έχει επιτευχθεί. Δηλαδή για ρυθμούς ανάγνωσης μεγαλύτερους από την «1/f corner frequency» έχουμε σαν αποτέλεσμα τον περιορισμό της περεταίρω ελάττωσης του συνολικού θορύβου στον ενισχυτή, λόγω του περιορισμού από τον 1/f θόρυβο (λειτουργία με το κατώτερο όριο συνολικού θορύβου στον ενισχυτή). Για το MOSFET του ενισχυτή που παράγει την καμπύλη του σχήματος 2, [5], το κατώτερο όριο θορύβου στον ενισχυτή, είναι περίπου  $4,5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  , στη συχνότητα αποκοπής του flicker noise («1/f corner frequency»)  $10^6 \text{ Hz}$ .



**ΣΧΗΜΑ 2:** Χαρακτηριστική καμπύλη της συνιστώσας θορύβου  $1/f$  (flicker noise), σε συνάρτηση με τη συχνότητα ανάγνωσης. Το πάτωμα του  $1/f$  θορύβου επιτυγχάνεται στα  $10^6$  Hz και είναι περίπου  $4,5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ , [5].

Γενικά είναι αποδεκτό ότι το είδος θορύβου « $1/f$ » παράγεται από διάφορα κέντρα καταστάσεων που υπάρχουν στις περιοχές των διεπαφών της σιλικόνης των οποίων η ενεργοποίηση και απενεργοποίηση συμβαίνει τυχαία σύμφωνα με διαφορετικές χρονικές σταθερές. Στο MOSFET του ενισχυτή τα κέντρα αυτών των καταστάσεων είναι παγίδες κατακράτησης ηλεκτρονίων στην περιοχή της διεπαφής του πυριτίου-διοξειδίου, που δημιουργούνται λόγω των ανωμαλιών στο πλέγμα της επιφάνειας του πυριτίου. Οι διαταραχές στο πλέγμα του πυριτίου, έχουν σαν αποτέλεσμα μια κατανομή των ενεργειακών επιπέδων των παγίδων εντός της απαγορευμένης ζώνης (bandgap).

Η τρέχουσα ροή σήματος επηρεάζεται, καθώς τα παγιδευμένα ηλεκτρόνια απελευθερώνονται, σε ένα ευρύ φάσμα χρόνων εκπομπής που διέπονται από τις διάφορες χρονικές σταθερές των παγίδων. Το φάσμα του βάθους των παγίδων και οι ποικίλες χρονικές σταθερές τους, καθορίζουν τις συχνότητες αποκοπής των παγίδων και παράγουν μία ομοιόμορφη ενεργειακή κατανομή σε όλη την έκταση της απαγορευμένης ζώνης του πυριτίου. Η

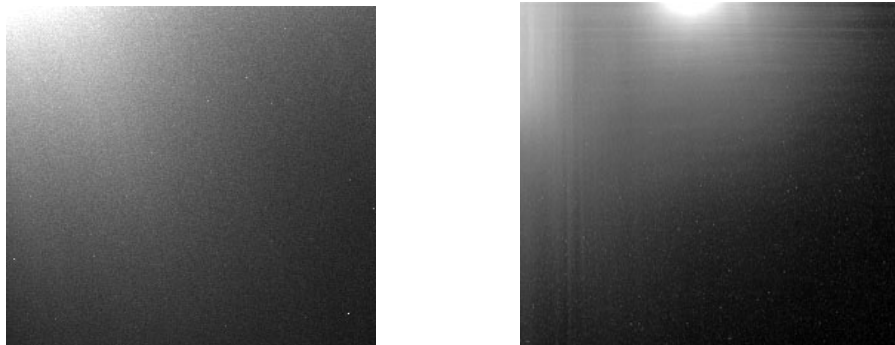
χαρακτηριστική κατανομή του θορύβου « $1/f$ » έναντι της συχνότητας, εμφανίζεται επειδή μεγαλύτερες διακυμάνσεις είναι εφικτές στις παγίδες μεγάλων χρονικών σταθερών (χαμηλές συχνότητες), παράγοντας μεγαλύτερες διακυμάνσεις στη έξοδο (θόρυβος), σε σχέση με αυτές που παράγονται σε παγίδες μικρότερων χρονικών σταθερών (υψηλές συχνότητες).

Πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των CCDs για τη μείωση της πυκνότητας των παγίδων στις διεπαφές του πυριτίου, μία εκ των οποίων είναι η χρήση γκοφρετών πυριτίου, με συγκεκριμένο κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό, οι οποίες έχουν χαμηλότερη εγγενή πυκνότητα ατελειών στο πλέγμα τους.

### **ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (ΛΑΜΨΗ) ΤΟΥ ΕΝΙΣΧΥΤΗ [Amplifer Glow]**

Η λειτουργία των CCD όπως ήδη έχουμε αναφέρει, στηρίζεται στην ιδιότητα του πυριτίου να μετατρέπει τα φωτόνια σε ηλεκτρόνια. Όμως, δημιουργούνται και αντίστροφα φαινόμενα στα κυκλώματα του πυριτίου, από τα οποία εκπέμπεται φως κατά τη λειτουργία του CCD. Τέτοια φαινόμενα εκπομπής φωτός, προκύπτουν συνήθως από τη λειτουργία του on-chip ενισχυτή –ο οποίος βρίσκεται κατά κανόνα, στην γωνία της συστοιχίας του αισθητήρα από την οποία εξέρχεται το σήμα- κατά τη διάρκεια μεγάλων χρονικών εκθέσεων. Για τον έλεγχο εκπομπής φωτός από τον ενισχυτή αρκεί μια μεγάλης έκθεσης σκοτεινή εικόνα (dark frame), [20].

Η λάμψη είναι χαρακτηριστική και συνήθως εμφανίζεται στην πάνω αριστερή γωνία (όπου συνήθως βρίσκεται ο ενισχυτής), αλλά και σε άλλα σημεία της περιφέρειας ανάλογα με τη θέση του ενισχυτή, καθώς και τη θέση άλλων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων του αισθητήρα.



**ΣΧΗΜΑ 3:** Χαρακτηριστική λάμψη από τον ενισχυτή ενός CCD, η οποία γίνεται ιδιαίτερα εμφανής, στην εικόνα ενός dark frame μεγάλης διάρκειας. Οι εικόνες ελήφθησαν με μία E2V CCD87 (αριστερά) και με μία Sony ICX205 (δεξιά), [20].

## Γ) ΘΟΡΥΒΟΣ ΚΒΑΝΤΟΠΟΙΗΣΗΣ $N_q$ (σφάλμα κβαντοποίησης)

Κατά την ψηφιοποίηση του σήματος το κέρδος (gain) καθορίζει το μέγεθος του αντίστοιχου σφάλματος (θορύβου κβαντοποίησης), το οποίο υπεισέρχεται στην πληροφορία.

Θυμίζουμε ότι κέρδος ονομάζουμε το πλήθος των ηλεκτρονίων που αντιστοιχούν σε κάθε 1 ADU, που καταγράφεται στην έξοδο. Όσο μικρότερη τιμή έχει το κέρδος ( $\mu$ ), τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια έχει ο ψηφιοποιητής κατά τη διαδικασία απόδοσης τιμών στο σήμα, οπότε θα υπεισέρχεται και λιγότερος θόρυβος αυτού του είδους. Ο θόρυβος κβαντοποίησης υπολογίζεται

από τη σχέση,[4]:  $N_q = \frac{\text{full well capacity}}{2^n \sqrt{12}}$ , όπου n πλήθος των bit του A/D μετατροπέα.

Το ιδανικό θα ήταν ο ψηφιοποιητής να διέθετε τέτοιο βάθος σε bit, ώστε το κέρδος να είναι  $1 \frac{e^-}{ADU}$ , οπότε θα είχαμε μηδενικό σφάλμα κατά την ψηφιοποίηση του σήματος. Τότε όμως, λόγω της ύπαρξης θορύβου ανάγνωσης από τις άλλες πηγές που αναφέρθηκαν, στη πράξη δεν θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν οι δυνατότητες του ψηφιοποιητή ως προς την διάκριση των διαφορετικών τόνων στην εικόνα, ενώ συνάμα αυξάνεται κατά πολύ το κόστος. Όπως ήδη έχουμε αναφέρει, η κατάλληλη επιλογή ψηφιοποιητή σχετίζεται με τη δυναμική περιοχή της κάμερας, ζήτημα που αναλύεται στην αμέσως επόμενη παράγραφο.

### 2.6 ΕΠΙΔΟΣΗ ΤΟΥ CCD ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΘΟΡΥΒΟ – SNR

Όπως αναφέραμε και στην αρχή αυτού του κεφαλαίου, οι επιδόσεις ενός CCD κρίνονται από την επίτευξη όσο το δυνατόν μεγαλύτερης τιμής του λόγου σήματος προς θόρυβο ( $SNR = \frac{S}{N}$ ). Η τιμή του σήματος (S) στον αριθμητή εξαρτάται από την προσπίπτουσα ένταση φωτονίων  $I_S$  (αυτών που επιθυμούμε να μετρήσουμε και όχι των φωτονίων που προέρχονται από το υπόβαθρο τα οποία έχουν ένταση  $I_B$ ) που προσπίπτουν στις φωτοδιόδους του CCD (εκφραζόμενη σε φωτόνια/ pixel/sec), από τη κβαντική απόδοση  $Q_E$  της συσκευής και από το χρόνο ολοκλήρωσης (χρόνος έκθεσης) στον οποίο συλλέγεται το σήμα. Συγκεκριμένα ισχύει για το σήμα S:

$$S = I_S \cdot Q_E \cdot t$$

Όσο για το συνολικό θόρυβο  $N$  στον παρανομαστή του SNR θεωρούμε ότι προκύπτει από τις κύριες πηγές θορύβου που αναφέρθηκαν (φωτονικός  $N_P$ , υπόβαθρου  $N_B$ , θερμιοικός  $N_D$ , χρονισμού  $N_C$  και ανάγνωσης  $N_R$ ) και ως εκ τούτου δίνεται από τη σχέση:

$$N = \sqrt{N_P^2 + N_B^2 + N_D^2 + N_R^2 + N_C^2} \quad , \quad \text{ή}$$

$$N = \sqrt{(I_S + I_B) \cdot Q_E \cdot t + I_D \cdot t + N_R^2 + N_C^2}$$

Έτσι για τον υπολογισμό του συνολικού SNR ενός συστήματος κάμερας CCD χρησιμοποιείται η ακόλουθη εξίσωση :

$$\text{SNR} = \frac{I_S \cdot Q_E \cdot t}{\sqrt{(I_S + I_B) \cdot Q_E \cdot t + I_D \cdot t + N_R^2 + N_C^2}}$$

Αν υποθέσουμε ότι η μόνη πηγή φωτός είναι το σήμα που επιθυμούμε να μετρήσουμε (δηλαδή δεν υπάρχει θόρυβος από το υπόβαθρο), όπως επίσης και ότι η κάμερα είναι υψηλών προδιαγραφών (ώστε και ο θόρυβος χρονισμού να θεωρείται αμελητέος), τότε η πιο πάνω σχέση γίνεται:

$$\text{SNR} = \frac{I_S \cdot Q_E \cdot t}{\sqrt{I_S \cdot Q_E \cdot t + I_D \cdot t + N_R^2}}$$

Ένας επιπλέον παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν, είναι ότι οι τιμές της προσπίπτουσας έντασης φωτός (σήματος και υποβάθρου), καθώς και η κβαντική απόδοση, είναι συναρτήσεις του μήκους κύματος και όταν οι πηγές φωτισμού είναι ευρυζωνικές, ο υπολογισμός του SNR απαιτεί αυτές οι μεταβλητές να ολοκληρωθούν πάνω σε όλα τα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση.

Αρκετοί κατασκευαστές καμερών CCD υψηλής απόδοσης, παρέχουν μία προδιαγραφή για το σήμα προς θόρυβο, που συχνά εκφράζεται σε ντεσιμπέλ (dB), η οποία δεν αντιπροσωπεύει τον προσδιορισμό της συνολικής τιμής του SNR υπό συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, αλλά είναι μία χρήσιμη αναπαράσταση για τη δυναμική περιοχή της κάμερας ανεξάρτητα από την εφαρμογή. Η τιμή αυτή ισοδυναμεί με το λόγο της μέγιστης χωρητικότητας ηλεκτρονίων ανά pixel του ανιχνευτή (Full Well Capacity,  $e^-/\text{pixel}$ ), προς τον αριθμό ηλεκτρονίων θορύβου που

προκύπτουν μόνο από τις on-chip θερμικές και ηλεκτρικές πηγές (θόρυβος στον ενισχυτή και θόρυβος επαναφοράς), παραμελώντας τα άλλα είδη θορύβου (φωτονικό, υποβάθρου, θερμοιονικό).

Σε συνθήκες χαμηλού σήματος, όπου ο θόρυβος ανάγνωσης είναι η κυρίαρχη πηγή θορύβου, η πλήρης εξίσωση για το SNR που αναφέρθηκε προηγουμένως, θα δίνει τιμή του SNR κατά προσέγγιση ίση με τη δυναμική περιοχή της κάμερας. Ωστόσο, το πεδίο τιμών της δυναμικής περιοχής, αντιστοιχεί στην οριακή κατάσταση κατά την οποία έχει επιτευχθεί η πλήρης χωρητικότητα ενός pixel του αισθητήρα και ορίζεται ως εξής :

$$\text{Dynamic Range} = \frac{\text{Full Well Capacity } (e^-)}{\text{Read Noise } (e^-)}$$

$$\text{ή } \text{Dynamic Range} = 20 \times \log_{10} \left[ \frac{\text{Full Well Capacity } (e^-)}{\text{Read Noise } (e^-)} \right] \text{ σε dB, [2].}$$

Η χωρητικότητα ανά Pixel ενός CCD αντιπροσωπεύει το μέγιστο φορτίο (πλήθος  $e^-$ ) που μπορεί να αποθηκευτεί σε κάθε pixel, οπότε έτσι καθορίζεται και το μέγιστο δυνατό σήμα για ένα γεγονός ανάγνωσης σήματος. Ο λόγος χωρητικότητας ανά pixel (αναφέρεται επίσης ως το μέγιστο βάθος ή και ως η μέγιστη γραμμικότητα) προς το πλήθος ηλεκτρονίων ανά pixel που αντιστοιχούν στο θόρυβο ανάγνωσης, χαρακτηρίζει την ικανότητα της συσκευής να συλλαμβάνει τόσο τα χαμηλά όσο και τα υψηλά επίπεδα σημάτων κατά τη λήψη μίας εικόνας. Η δυναμική περιοχή του CCD και το χρήσιμο μέγιστο πλήθος των bit του αναλογικό-ψηφιακού μετατροπέα της κάμερας, συνδέονται στενά στο ότι το συνολικά διαθέσιμο σήμα σε σχέση με το θόρυβο, καθορίζει τον μέγιστο αριθμό τόνων (βημάτων) στους οποίους μπορεί να διαιρεθεί το σήμα.

Προκειμένου να αντιπροσωπεύονται οι λεπτές διαφορές της έντασης, σε μία ψηφιακή εικόνα, είναι αναγκαίο να διακρίνονται όσο το δυνατόν περισσότερα επίπεδα τόνων - πλήθος βημάτων στα οποία μπορεί να αναλύσει το σήμα ο μετατροπέας που εξαρτάται από το πλήθος  $e^-$  ανά 1 ADU - και ως εκ τούτου μια τυπική προσέγγιση είναι να φτάσει το αναλογικό-ψηφιακό βάθος των bit του μετατροπέα, τη δυναμική περιοχή του CCD. Το δυναμικό εύρος της σε σχέση με το πλήθος των bit του μετατροπέα, καθορίζουν το πλήθος των ηλεκτρονίων που απαρτίζουν κάθε επίπεδο τόνου ( $e^-/\text{ADU}$ ) στην τελική εικόνα. Να σημειωθεί ότι ένας ψηφιακό-αναλογικός μετατροπέας με βάθος bit που υπερβαίνει τη δυναμική περιοχή του CCD, δεν μπορεί να επιτύχει το πλήρες θεωρητικό φάσμα διάκρισης τόνων (βάθος bit), διότι κάθε επίπεδο τόνου πρέπει να αντιστοιχεί στην ελάχιστη διαφορά σήματος κατά ένα μόνο ηλεκτρόνιο.



Ως παράδειγμα της κατάλληλης στρατηγικής (για την επιλογή ψηφιοποιητή), έστω ένα CCD με χωρητικότητα  $180000 e^-/\text{pixel}$  και θόρυβο ανάγνωσης  $4 e^-/\text{pixel}$ , στον προβλεπόμενο ρυθμό ανάγνωσης. Τότε θα έχει ένα δυναμικό εύρος ίσο με  $180000/4 = 4500$ . Για να αξιοποιηθεί πλήρως η δυναμική περιοχή του CCD απαιτείται μετατροπέας με 12-bit ο οποίος έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύει 4096 διαβαθμίσεις στη ένταση του σήματος (οπότε θα προκύπτει η αντιστοιχία  $1,1 e^-$  ανά επίπεδο έντασης ή τόνου). Αν χρησιμοποιήσουμε μετατροπέα με 10-bit, τότε μόνο 1024 επίπεδα τόνων μπορούν να απεικονιστούν που αντιστοιχεί σε  $4,4 e^-$  ανά επίπεδο.

Από την άλλη μεριά ένας μετατροπέας των 14-bit ο οποίος έχει την ικανότητα διάκρισης 16384 επιπέδων, δε θα αποδίδει σύμφωνα με τις δυνατότητές του, διότι θα περιορίζεται από τη δυναμική περιοχή του CCD.

Για την ανάλυση του SNR είναι μερικές φορές αρκετό να ληφθεί υπ' όψιν μόνο ο θόρυβος του on-chip ενισχυτή και γι' αυτό οι περισσότεροι κατασκευαστές παρέχουν αυτήν την προδιαγραφή ως θόρυβο ανάγνωσης (αντιστοιχεί σε πλήθος  $e^-$ ) ή ως το κατώτερο όριο του θορύβου. Ενώ ο θόρυβος ανάγνωσης μπορεί να θεωρηθεί ως το δάπεδο θορύβου σε σχέση με τις πηγές των ηλεκτρονικών, υπό συνθήκες συνθήκες φωτισμού ο φωτονικός θόρυβος βολής, αποτελεί ένα φυσικό και θεμελιώδες όριο θορύβου για τις επιδόσεις μίας CCD κάμερας (ή οποιουδήποτε συστήματος ανίχνευσης φωτός). Κατά συνέπεια είναι επιθυμητό να λειτουργεί ένα σύστημα απεικόνισης σε συνθήκες που η επίδοσή του περιορίζεται από το φωτονικό θόρυβο, με τις άλλες συνιστώσες θορύβου να έχουν περιοριστεί σε αμελητέο επίπεδο. Υπό συνθήκες χαμηλού φωτισμού (με την παραδοχή ότι ο σκοτεινός θόρυβος έχει εξαλειφθεί με την ψύξη του CCD) ο θόρυβος ανάγνωσης είναι μεγαλύτερος από το φωτονικό και τότε λέμε ότι το σήμα περιορίζεται από το θόρυβο ανάγνωσης. Ο χρόνος έκθεσης της κάμερας μπορεί να αυξηθεί προκειμένου να συλλεχθούν περισσότερα φωτόνια και να αυξηθεί το SNR, μέχρι το χρονικό σημείο στο οποίο ο φωτονικός θόρυβος υπερβεί το σύνολο των άλλων ειδών θορύβου. Για πιο μεγάλα χρονικά διαστήματα λέμε ότι η εικόνα είναι περιορισμένη από το φωτονικό θόρυβο.

Χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές, σε ορισμένες κάμερες υψηλής απόδοσης, τα επίπεδα θορύβου ανάγνωσης έχουν μειωθεί σε μόλις 3 έως  $5 e^-/\text{pixel}$ , για τυπικούς ρυθμούς ανάγνωσης που προσεγγίζουν το 1 MHz. Με το θόρυβο ανάγνωσης των σημερινών CCD να πλησιάζει ένα πιθανό κατώτατο όριο, ο πρακτικός μηχανισμός που απομένει για τη βελτίωση της δυναμικής περιοχής είναι η αύξηση του διαθέσιμου επιπέδου σήματος. Αν και αυτό μπορεί να επιτευχθεί με το σχεδιασμό CCD που περιλαμβάνουν μεγαλύτερα pixel με πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα, υπάρχει ένα συνοδευτικό μειονέκτημα ως προς τη χωρική ανάλυση.

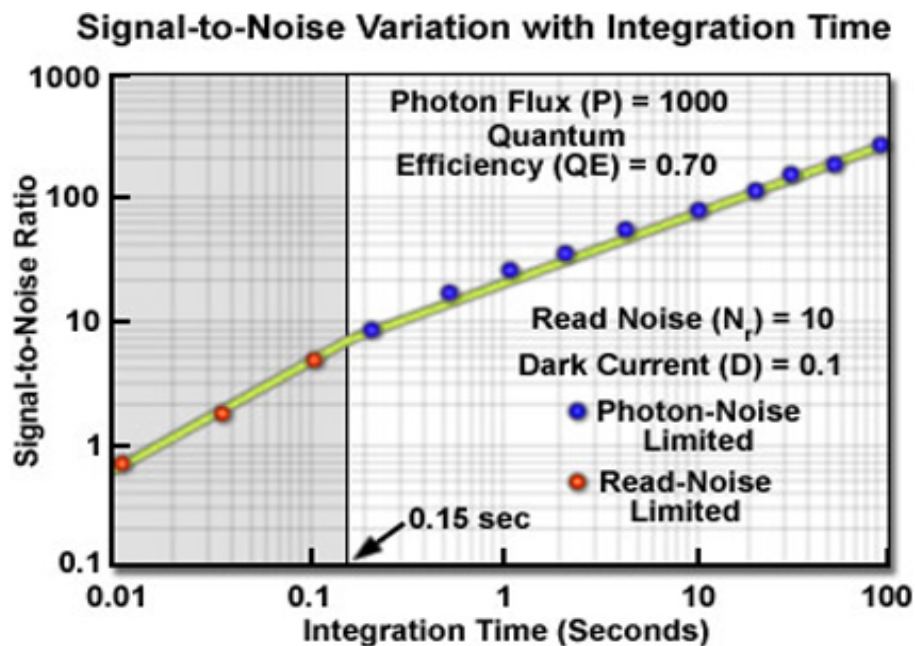
Ο περιορισμένος αριθμός των διαθέσιμων φωτονίων για το σχηματισμό εικόνας είναι ένας χρήσιμος παράγοντας για κάμερες CCD υψηλών επιδόσεων που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για την επίτευξη του ορίου του φωτονικού θορύβου (παράλληλα με υψηλή τιμή SNR), για πολύ

χαμηλότερα επίπεδα σήματος από τις συμβατικές κάμερες, των οποίων οι επιδόσεις συνήθως ποτέ δεν φτάνουν αυτό το όριο.

Για παράδειγμα μία ροή φωτονίων  $10^6$  φωτόνια / sec αντιστοιχεί σε εξαιρετικά ασθενές σήμα, αφού ισοδυναμεί για έναν αισθητήρα με  $10^6$  ενεργά pixel, σε ένα φωτόνιο/pixel/sec, κατά μέσο όρο. Ως σημείο αναφοράς το ελάχιστο όριο ανίχνευσης του προσαρμοσμένου στο σκοτάδι ματιού είναι περίπου  $40 \cdot 10^6$  φωτόνια/sec.

Σε συμβατική λειτουργία απεικόνισης φωτεινών πεδίων (brightfield), συνήθως παράγονται επίπεδα σήματος κατά μέσο όρο 5000 ως 40000 περίπου φωτόνια / pixel / sec. Εάν το χρονικό διάστημα ολοκλήρωσης δεν είναι πολύ μικρό, τότε το συνολικό ανιχνεύσιμο σήμα που παράγεται φτάνει τις 100000 φωτόνια / pixel.

Το σχήμα 4 παρουσιάζει ένα διάγραμμα του SNR σε σχέση με το χρόνο ολοκλήρωσης, σε μια τυπική υψηλής απόδοσης κάμερα CCD, σχεδιασμένη ειδικά για απεικόνιση σε χαμηλά επίπεδα σήματος (η ροή φωτονίων και τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα αναγράφονται στο διάγραμμα). Σε ένα διάγραμμα αυτού του τύπου οι περιοχές περιορισμού από το θόρυβο ανάγνωσης και από το φωτονικό θόρυβο μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν, αφού διαχωρίζονται από το χρόνο έκθεσης για τον οποίο ο φωτονικός θόρυβος υπερβαίνει το θόρυβο ανάγνωσης (για το διάγραμμα 4 αυτός ο χρόνος είναι περίπου 0,15 sec), [5].



**ΣΧΗΜΑ 4:** Διάγραμμα του SNR σε σχέση με το χρόνο ολοκλήρωσης, σε μια τυπική υψηλής απόδοσης κάμερα CCD. Για μεγαλύτερους χρόνους έκθεσης από περίπου 0,15 sec το SNR περιορίζεται από τη συνιστώσα του φωτονικού θορύβου.

Λόγω της σχέσης του φωτονικού θορύβου με την τετραγωνική ρίζα του σήματος, ο διαχωρισμός των δύο περιοχών εμφανίζεται σε ένα χρόνο έκθεσης, για τον οποίο το συνολικά

ανιχνεύσιμο σήμα ανά pixel είναι περίπου το τετράγωνο της τιμής του θορύβου ανάγνωσης. Αυτός ο χρόνος έκθεσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_p \geq N_R \Rightarrow \sqrt{S} \geq N_R \Rightarrow \sqrt{Q_E \cdot I_S \cdot t} \geq N_R \Rightarrow t \geq \frac{N_R^2}{Q_E \cdot I_S}$$

Για παράδειγμα με μία προδιαγραφή θορύβου ανάγνωσης  $5 e^-$  (rms) /pixel, ο φωτονικός θόρυβος γίνεται η κυρίαρχη πηγή θορύβου, όταν ο χρόνος έκθεσης είναι αρκετός για να προκληθούν περισσότερα από 25 ανιχνεύσιμα φωτόνια/pixel, για την προσπίπτουσα ροή φωτονίων. Η μετάβαση μεταξύ των περιοχών περιορισμού του σήματος, από αυτές τις δύο κυρίαρχες πηγές θορύβου, προϋποθέτει ότι ο σκοτεινός θόρυβος (καθώς και οποιαδήποτε άλλη πηγή θορύβου) έχει περιοριστεί σε αμελητέα επίπεδα.

Λειτουργία σε υψηλά επίπεδα σκοτεινού θορύβου, μεταβάλλει τη σημασία των σχετικών τιμών του θορύβου ανάγνωσης και του φωτονικού θορύβου και σε τέτοιες συνθήκες ο σκοτεινός θόρυβος μπορεί να κατακλύσει αμφότερα το σήμα και τις άλλες συνιστώσες θορύβου.

## 2.7 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ

### A) ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ

#### 1) ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΥΠΑΡΧΟΝΤΟΣ ΦΟΡΤΙΟΥ [BIAS FRAME]

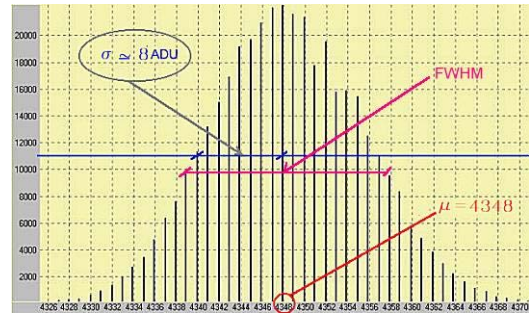
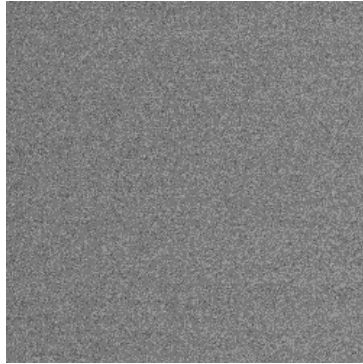
Πριν από κάθε έκθεση του CCD για ανίχνευση του σήματος, με την κάμερα εκτός λειτουργίας και κλειστό το κλείστρο, σε κάθε pixel προϋπάρχει ένα φορτίο με τυχαία χωρική κατανομή, που προέρχεται από τα ηλεκτρονικά μέρη του CCD. Για τον προσδιορισμό της τιμής του προϋπάρχοντος φορτίου, ώστε να αφαιρεθεί αυτό το είδος θορύβου, το οποίο αναπόφευκτα υπεισέρχεται στο σήμα, λαμβάνουμε μέτρηση για μηδενικό χρόνο ολοκλήρωσης και με την κάμερα φωτοστεγανή. Η εικόνα που παράγεται με αυτόν τον τρόπο ονομάζεται bias frame και καθορίζει το «μηδενικό» επίπεδο θορύβου. Προς αποφυγή αρνητικών τιμών στην έξοδο – αφού αυτές δεν αναγνωρίζονται από τον A/D μετατροπέα που σημαίνει απώλεια πληροφορίας για το προϋπάρχον φορτίο – τα ηλεκτρονικά του CCD ρυθμίζονται κατάλληλα ώστε να παράγουν μόνο θετικές τιμές. Οι τιμές του bias ακολουθούν γκαουσιανή κατανομή γύρω από τη μέση τιμή, το εύρος της οποίας σχετίζεται με το θόρυβο ανάγνωσης και με το κέρδος του A/D μετατροπέα

σύμφωνα με τη σχέση:  $\sigma = \frac{\text{Read Noise}}{\text{Gain}}$ , όπου  $\sigma$  η τυπική απόκλιση. Στο σχήμα 5

παρουσιάζεται ένα bias frame και το αντίστοιχο ιστόγραμμα από όπου φαίνεται καθαρά η γκαουσιανή κατανομή που εκφράζεται από τη σχέση:

$$G = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)^2\right]$$

- Όπου  $\mu$  η μέση τιμή του bias ( $\mu=4348$  ADU)  
 $\sigma$  η τυπική απόκλιση ( $\sigma \approx 8$  ADU)  
 $x$  η τιμή του bias ανά pixel (σε ADU)



**Σχήμα 5:** Παράδειγμα ενός ιδανικού bias frame και του αντίστοιχου ιστογράμματος, όπου φαίνεται καθαρά η γκαουσιανή κατανομή.

Το μέγεθος του επιπέδου bias ανά pixel εξαρτάται από την ποιότητα κατασκευής της κάμερας. Ένα τυπικό μέγεθος είναι 400 ADU (για ένα pixel), το οποίο για κέρδος 10 e/ADU αντιστοιχεί σε 4000 e. Η μέση τιμή στις μετρήσεις του bias, παρουσιάζει διακυμάνσεις που οφείλονται σε διάφορους παράγοντες όπως η μη σταθερή επίδραση των ηλεκτρονικών του CCD ή επίδραση κοσμικών ακτινών. Για την αξιοποίηση του bias στη διόρθωση των εικόνων, χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές, εκ των οποίων 2 είναι οι πιο συνηθισμένες:

- α. παραγωγή περιοχών σάρωσης (Overscan) και
- β. χρήση ολόκληρης της εικόνας του bias.

Οι περιοχές σάρωσης είναι ένα πλήθος από γραμμές ή στήλες ή από γραμμές και στήλες (συνήθως 32), που κυρίως αποτελούνται από τα pixel της περιφέρειας του αισθητήρα και οι οποίες εκ κατασκευής ούτως ή άλλως δεν χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση του σήματος (δεν εκτίθενται στο φως). Έτσι με κατάλληλη εντολή στο λογισμικό του CCD, είναι εφικτή η ανάγνωση αυτών των περιοχών στην έξοδο, επιπλέον των γραμμών και των στηλών στις οποίες συλλέχθηκε το σήμα (Overscan), ώστε με μία λήψη να έχουμε πληροφορία τόσο για το σήμα όσο και για τη μέση τιμή του bias.

Με την τεχνική overscan έχουμε εκτίμηση της μέσης τιμής του bias την οποία αφαιρούμε από την τιμή κάθε pixel της εικόνας που θέλουμε να διορθώσουμε.

Όμως με τη λήψη στιγμιότυπων για το bias σε όλη την περιοχή του αισθητήρα, έχουμε καλύτερη εκτίμηση της μέσης τιμής του bias αλλά και πληροφορία για το προϋπάρχον φορτίο σε κάθε pixel ξεχωριστά. Άρα η διόρθωση της εικόνας είναι πιο ακριβής, είτε αν αφαιρέσουμε τη

μέση τιμή του bias από κάθε pixel είτε αφαιρώντας ολόκληρο το bias frame (οπότε αφαιρούμε την αντίστοιχη τιμή bias για κάθε pixel). Η τεχνική των bias frames, χρησιμοποιείται στις εφαρμογές που απαιτείται η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια, στις μετρήσεις ιδιαίτερα ασθενών σημάτων και συνήθως λαμβάνουμε 10 έως 20 bias frames από τα οποία εξάγουμε τη μέση τιμή τους.

## 2) FLAT FIELDING [ΦΩΤΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ]

Με τη τεχνική φωτομετρικής διόρθωσης flat fielding, είναι εφικτή σε μεγάλο βαθμό, η διόρθωση της εικόνας από το θόρυβο που υπεισέρχεται λόγω της ανομοιόμορφης φωτοαπόκρισης των pixels, η οποία μπορεί να παρουσιάζει διακυμάνσεις της τάξης του 20%. Σε αυτή τη διαδικασία στόχος είναι η λήψη ομοιόμορφης εικόνας (flat frame), ενός πλήρως ισοφωτισμένου πεδίου (flat field) και κατόπιν η διαίρεση της εικόνας που θέλουμε να διορθώσουμε –χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογισμικό– με την εικόνα flat frame. Για να έχουμε καλό αποτέλεσμα πρέπει το φως που χρησιμοποιούμε για τη λήψη του flat frame να είναι ακριβώς ίδιο ως προς τη φασματική του κατανομή, με το φως της εικόνας που επιθυμούμε να διορθώσουμε.

Αν και θεωρητικά η τεχνική της φωτομετρικής διόρθωσης που αναφέραμε μοιάζει σχετικά απλή, στη πράξη είναι δύσκολη και επίπονη διαδικασία για δύο κυρίως λόγους:

i) Είναι δύσκολη η εύρεση φωτεινής πηγής για τη λήψη flat frame, με παρόμοια φασματική κατανομή όπως αυτή της εικόνας που θέλουμε κάθε να διορθώσουμε (φασματική ομοιομορφία), διότι οι διακυμάνσεις στη φωτοαπόκριση των pixels είναι συνάρτηση του μήκους κύματος [αφού το ίδιο ισχύει και για την  $Q_E$ ]

ii) Είναι επίσης δύσκολο κατά την απόκτηση του flat frame να εξασφαλίσουμε τον ομοιόμορφο φωτισμό (ως προς την ένταση) καθενός από τα χιλιάδες pixels του αισθητήρα (χωρική ομοιομορφία).

Για εφαρμογές σε αστρονομικές παρατηρήσεις μια πολύ διαδεδομένη μέθοδος απόκτησης flat frame, περιλαμβάνει λήψεις του ουρανού κατά το σούρουπο ή την αυγή (twilight flats) ή λήψεις εικόνων του σκοτεινού νυχτερινού ουρανού από τις οποίες είναι δυνατή η αφαίρεση των αστεριών με κατάλληλο φιλτράρισμα.

Μια κατάλληλη περιοχή για twilight flats έχει καθοριστεί ότι είναι η περιοχή  $13^\circ$  ανατολικά του ζενίθ αμέσως μετά τη δύση. Τα flat frames αυτού του είδους αναφέρονται γενικά ως «Sky flats.»

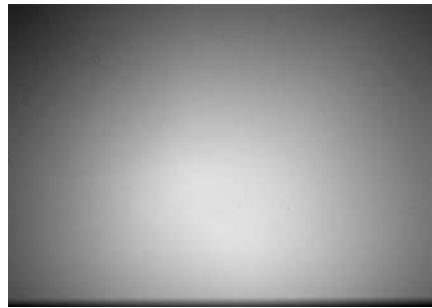
Επίσης σε άλλες μεθόδους χρησιμοποιούνται διάφορες φωτεινές πηγές όπως flat field οθόνες –οι οποίες βάζονται κιάλας με ειδικές μπογιές ώστε να αντανακλούν όλα τα μήκη κύματος όσο

το δυνατόν πιο ομοιόμορφα- ή slide προβολείς, μέχρι και ειδικές λάμπες quartz σε διάφορους συνδυασμούς χρώματος και φωτεινότητας. Σ' αυτές τις περιπτώσεις λαμβάνουμε flat frames με λήψεις είτε εστιάζοντας απ' ευθείας στην φωτεινή πηγή είτε εστιάζοντας στον θόλο του τηλεσκοπίου που φωτίζεται από αυτές, για μικρές χρονικές εκθέσεις ώστε να αποφεύγεται ο κορεσμός στο CCD. Αυτού του είδους τα flat frames ονομάζονται γενικά «dome flats».

Στη φασματογραφία τα flat frames λαμβάνονται μέσω του φωτισμού της σχισμής (slit) του φασματογράφου από μια λάμπα quartz ή με υψηλής φωτεινότητας λάμπα ενός προβολέα, που ενσωματώνεται μέσα σε μια σφαίρα ώστε να φωτίζει το φράγμα (grating) του φασματογράφου, με παρόμοιο τρόπο όπως τα αντικείμενα των αστρονομικών παρατηρήσεων. Αυτό το είδος flat frame αναφέρεται ως «projector flats». Ανεξάρτητα του είδους flat frame που θα χρησιμοποιήσουμε για τη φωτομετρική διόρθωση (sky flat ή dome flat ή projector flat), είναι αναγκαίο να γίνονται λήψεις με διαφορετικά φίλτρα, που να αντιστοιχούν στα μήκη κύματος της εικόνας που θα διορθώσουμε. Απαιτείται η λήψη 5 έως 10 εικόνων για κάθε φίλτρο από τα οποία εξάγουμε ένα μέσου όρου flat frame (master flat frame).

Για πολύ απαιτητικές εφαρμογές η απόκτηση flat frame με την καλύτερη δυνατή προσέγγιση προς το ιδανικό, μπορεί να προκύψει με χρήση ενός συνδιασμού από sky και dome flats. Όμως πολλές εφαρμογές δεν απαιτούν flat field για όλα τα μήκη κύματος ή για ολόκληρη τη δυσδιάστατη περιοχή του αισθητήρα, όπως για παράδειγμα στην αστρική φωτομετρία όπου μελετάμε συγκεκριμένες γραμμές εκπομπής.

Ενώ ο κύριος ρόλος των εικόνων flat field είναι η διόρθωση της ανομοιόμορφης φωτοαπόκρισης των pixels ενός CCD λόγω ενδογενών παραγόντων, ωστόσο αυτές οι εικόνες βαθμονόμησης μπορούν επίσης να αντισταθίσουν και τις ανομοιομορφίες στη φωτοαπόκριση λόγω εξωτερικών παραγόντων (π.χ. vignetting ή σκόνη στην οπτική διαδρομή).



**Σχήμα 6:** Εικόνα ενός τυπικά ισοφωτισμένου πεδίου,[20].

### 3) ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΘΕΡΜΙΟΝΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ [Dark Frames]

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει τα θερμικά παραγόμενα ηλεκτρόνια, κατά τη διάρκεια του χρόνου έκθεσης, αποτελούν ανεπιθύμητο σήμα και πρέπει να αφαιρεθούν. Παρόλο που ο θερμιοικός θόρυβος μπορεί να εξαλειφθεί μόνο με ψύξη του CCD (για την απαλλαγή ακόμα και από τις στατιστικές του διακυμάνσεις), ωστόσο η κοινή αντιμετώπιση στηρίζεται στην αφαίρεσή του με χρήση σκοτεινών εικόνων (Dark Frames). Τα σκοτεινά πλαίσια (dark frames) λαμβάνονται έχοντας φωτοστεγανή την κάμερα και για χρόνο έκθεσης ίσο με αυτόν της εικόνας που θέλουμε να διορθώσουμε. Εκτός όμως από τον προσδιορισμό του σκοτεινού θορύβου, τα dark frames μας δίνουν πληροφορία είτε για την ύπαρξη ελαττωματικών ή hot pixels -στα οποία το ρεύμα σκότους παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλές τιμές σε σχέση με τη μέση τιμή- όσο και για γεγονότα κλιμάκωσης του ρυθμού πρόσπτωσης κοσμικών ακτινών στον αισθητήρα. Όπως και στη περίπτωση των bias frames, έτσι για τα dark frames πρέπει να λαμβάνονται περισσότερα από ένα στον ίδιο χρόνο έκθεσης, εκ των οποίων να εξάγουμε το μέσο όρο. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα λαμβανόμενα dark frames εμπεριέχεται και το προϋπάρχον φορτίο (bias) και ως εκ τούτου η ξεχωριστή λήψη και αφαίρεση των bias frames δεν είναι πάντα απαραίτητη. Κατά τη μελέτη πολύ ασθενών σημάτων, ψύχοντας το CCD με  $LN_2$  σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (π.χ.  $-100^\circ C$ ), ο θερμιοικός θόρυβος είναι πάρα πολύ μικρός και έτσι η αφαίρεση του dark frame εισάγει περισσότερο θόρυβο απ' αυτόν που αφαιρείται (λόγω των άλλων ειδών θορύβου π.χ. θόρυβο ανάγνωσης ο οποίος υπεισέρχεται και στα dark frames). Σ' αυτές τις περιπτώσεις είναι προτιμότερο να αφαιρούμε μια σταθερή τιμή σκοτεινού θορύβου από κάθε pixel, τη μέση τιμή από όλα τα pixel στο αντίστοιχο dark frame εξαιρουμένων βέβαια των τιμών στα ελαττωματικά ή hot pixels. Μια άλλη προσέγγιση διόρθωσης των εικόνων από τον σκοτεινό θόρυβο στηρίζεται στην χρήση ενός μόνο Dark Frame (μέσω τιμής) που λαμβάνεται σε μια θερμοκρασία και απ' αυτό μπορούν να εξαχθούν άλλα Dark Frames για τις αντίστοιχες συνθήκες θερμοκρασίας και χρόνου έκθεσης.



**Σχήμα 7:** Εικόνα ενός τυπικού dark frame. Τα φωτεινά pixels της εικόνας αντιπροσωπεύουν hot pixels,[20].

## B) ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΘΡΟΙΣΗΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Η τεχνική της άθροισης πολλών εικόνων μικρής χρονικής διάρκειας, προκειμένου να αποκτήσουμε μια εικόνα με μεγαλύτερο ισodύναμο χρόνο έκθεσης, είναι ευρέως διαδεδομένη και αξιοποιείται με πολύ καλά αποτελέσματα στη χρήση των CCDs. Ο θόρυβος που υπεισέρχεται στο σήμα (S) από διαφόρους παράγοντες, επιφέρει μια τυχαία διακύμανση ( $\pm\Delta S$ ). Κατά την άθροιση εικόνων, υπάρχει πιθανότητα, η οποία αυξάνεται με τον αριθμό των εικόνων που αθροίζονται, πλήθος αυτών των διακυμάνσεων να είναι αντιθέτου προσήμου και να αλληλοαναιρούνται. Έτσι στη συνολική εικόνα που προκύπτει από άθροιση θα έχουμε λιγότερο θόρυβο και υψηλότερο SNR. Η τυπική απόκλιση για τη συνολική εικόνα ( $\sigma_n$ ) που προκύπτει από την άθροιση (n) εικόνων με τυπική απόκλιση ( $\sigma$ ) στη κάθε μία, συνδέονται με τη σχέση:

$$\sigma_n = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}.$$

Άρα αθροίζοντας (n) εικόνες θα έχουμε ελάττωση του θορύβου ή αύξηση του SNR κατά  $\sqrt{n}$ . Δηλαδή για παράδειγμα, κατά την άθροιση 4 ή 25 ή 100 εικόνων, προκύπτει μια εικόνα με 2 ή 5 ή 10 φορές βελτιωμένο SNR αντίστοιχα (σχήμα 8), [23], [16].

Η χρήση της τεχνικής της άθροισης εικόνων είναι επιβεβλημένη ειδικά σε περιπτώσεις όπου έχουμε περιορισμό χρόνου έκθεσης, για κάποιον από τους εξής συνήθως, λόγους:

1) Τα πηγάδια δυναμικού των pixels ή ο ψηφιοποιητής φτάνουν σε κόρο όταν το αντικείμενο των παρατηρήσεών μας είναι πολύ φωτεινές πηγές.

2) Το ρεύμα σκότους ή το υπόβαθρο του ουρανού, περιορίζει τη δυναμική περιοχή της εικόνας ή τείνει να φτάσει το CCD σε κόρο.

3) Θερμά pixels (hot pixels) δημιουργούν επίσης, φαινόμενα κόρου και υπερχειλίση (blooming) των pixels.

4) Το τηλεσκόπιο μπορεί να μην ακολουθεί σωστά την κίνηση του παρατηρούμενου ουράνιου αντικειμένου, είτε λόγω σφαλμάτων οδήγησης του τηλεσκοπίου (συστηματικά ή τυχαία) είτε λόγω κακής ευθυγράμμισης του πολικού άξονα, προβλήματα τα οποία γίνονται πιο εμφανή σε μεγάλες χρονικές εκθέσεις.

5) Ριπές του ανέμου ή δονήσεις του εδάφους προκαλούν τυχαίες ταλαντώσεις στο τηλεσκόπιο, οι επιδράσεις των οποίων είναι μικρότερες για μικρότερους χρόνους έκθεσης.

6) Επίδραση των κοσμικών ακτινών ή και άλλων πολύ ασθενών ραδιενεργών πηγών.

7) Αστάθεια στα στρώματα της ατμόσφαιρας.

Επίσης, με τη λήψη πολλών εικόνων μικρής χρονικής διάρκειας περιορίζεται η επίδραση του μικρού θερμονομικού θορύβου, ο οποίος είναι ανάλογος της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου έκθεσης.



Βέβαια, η τεχνική άθροισης εικόνων δεν επιφέρει μόνο καλά αποτελέσματα, αλλά συνοδεύεται και από μειονεκτήματα.

Αν θεωρήσουμε ότι στο σύστημα οι σημαντικές πηγές θορύβου είναι ο θόρυβος ανάγνωσης και ο φωτονικός θόρυβος (έστω ότι ο θερμικός εξαιρείται ψύχοντας το CCD με  $LN_2$ ) τότε

για χρόνους έκθεσης  $t < \frac{N_R^2}{Q_E \cdot I_S}$ , κυρίαρχος θόρυβος από τον οποίο περιορίζεται το SNR είναι

ο θόρυβος ανάγνωσης. Σε αυτήν την περίπτωση ο αθροισμένος μαζί με τις εικόνες θόρυβος ανάγνωσης, προκαλεί μείωση του SNR σε σχέση με την τιμή του σε μια λήψη μεγαλύτερης έκθεσης, στην οποία ο θόρυβος ανάγνωσης υπεισέρχεται μία φορά.

Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η δημιουργία πολύ μεγαλύτερου όγκου δεδομένων και συνεπώς η ανάγκη για ύπαρξη πολύ μεγαλύτερου αποθηκευτικού χώρου, όπως επίσης απαιτείται και περισσότερος χρόνος τόσο για τη λήψη όσο και για την επεξεργασία των εικόνων που αθροίζονται. Όμως, τα πλεονεκτήματα είναι μεγαλύτερης βαρύτητας από τα μειονεκτήματα, αφού για χρονικές εκθέσεις κατά τις οποίες το SNR περιορίζεται από τον φωτονικό θόρυβο, η τεχνική άθροισης μας δίνει τη δυνατότητα να αποκτήσουμε εικόνες πολύ μεγαλύτερου ισοδύναμου χρόνου έκθεσης.



**Σχήμα 8:** Σε αυτή την εικόνα βλέπουμε καθαρά τα οφέλη από την αύξηση του λόγου σήματος-θορύβου από την πρόσθεση εικόνων. Το δεξί τμήμα είναι αποτέλεσμα πρόσθεσης 4 εικόνων, ενώ στο αριστερό διατηρείται η αρχική μία εικόνα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ (ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΗΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ) ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΖΟΥΝ ΤΙΣ ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΕΝΟΣ CCD

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζουμε φαινόμενα που επηρεάζουν και περιορίζουν τις δυνατότητες ενός CCD, καθώς επίσης και χαρακτηριστικά μεγέθη τα οποία αποτελούν κριτήρια για την αξιολόγηση και τις επιδόσεις ενός CCD.

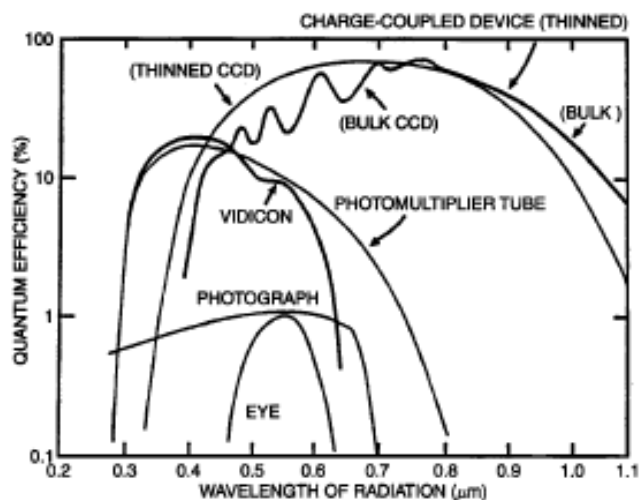
#### **3.1 ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ**

##### **[ Quantum Efficiency – Spectral Sensitivity ]**

Η ανιχνευτική ικανότητα του αισθητήρα ενός CCD, έχει να κάνει με τη δυνατότητα του αισθητήρα να συλλαμβάνει σήματα, τόσο ως προς το μήκος κύματος (εύρος φάσματος) όσο και ως προς την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην επιφάνεια του αισθητήρα. Η ανιχνευτική ικανότητα των CCD είναι ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων ανιχνευτικών διατάξεων ακτινοβολίας όπως ήδη έχουμε αναφέρει. Το μέγεθος που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό αυτής, είναι η κβαντική απόδοση ( $Q_E$ ) η οποία ορίζεται ως το ποσοστό των φωτονίων που ανιχνεύονται από το CCD (δηλαδή αλληλεπιδρούν με το CCD και προκύπτουν φωτοηλεκτρόνια), σε σχέση με το σύνολο των φωτονίων που προσπίπτουν στην επιφάνεια του CCD, δηλαδή :

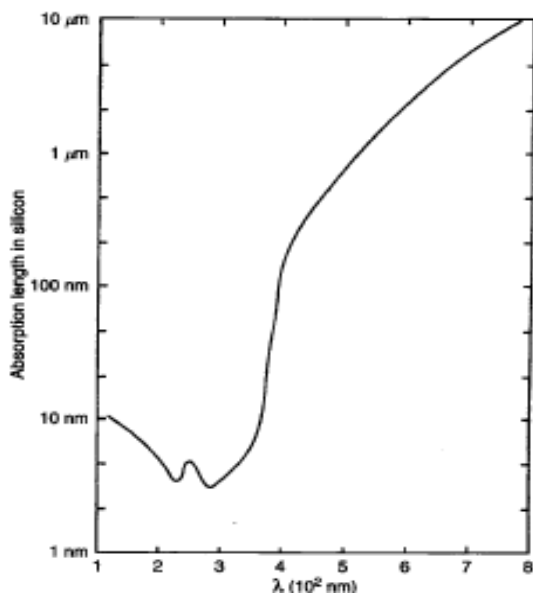
$$Q_E = \frac{\text{πλήθος φωτονίων που ανιχνεύονται}}{\text{συνολικό πλήθος φωτονίων που προσπίπτουν}} \cdot 100$$

Η συνάρτηση της κβαντικής απόδοσης σε σχέση με το μήκος κύματος ονομάζεται φασματική ευαισθησία και η αντίστοιχη γραφική παράσταση ‘καμπύλη κβαντικής απόδοσης’. Στο σχήμα 1 δίδονται οι καμπύλες κβαντικής απόδοσης διάφορων διατάξεων ανίχνευσης φωτονίων, όπου είναι εμφανής η υπεροχή των CCD ειδικά για μήκη μεγαλύτερα από 400 nm. Εύρος διόδου ζώνης συχνοτήτων (Band Pass) είναι το συνολικό φασματικό εύρος στο οποίο ο ανιχνευτής είναι ευαίσθητος στα εισερχόμενα φωτόνια και αποτελεί τη δυναμική περιοχή (ή δυναμικό εύρος) του ανιχνευτή, [1], [2].



**Σχήμα 1:** Καμπύλες κβαντικής απόδοσης διαφόρων τύπων ανιχνευτών. Παρατηρούμε ότι τα CCD υπερέχουν αισθητά από τα 400 nm και πάνω.

Λογικό είναι τόσο η φασματική ευαισθησία όσο και η δυναμική περιοχή να εξαρτώνται κυρίως από την απόκριση του πυριτίου (ή των προσμίξεών του) στη απορρόφηση της ακτινοβολίας. Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του μήκους απορρόφησης (absorption length), του καθαρού πυριτίου σε συνάρτηση με το μήκος των φωτονίων που προσπίπτουν σ' αυτό. Ως μήκος απορρόφησης ορίζεται η απόσταση (το βάθος) στην οποία απορροφάται το 63% των φωτονίων.



**Σχήμα 2:** Το μήκος απορρόφησης φωτονίων στο πυρίτιο συναρτῆσει του μήκους κύματος.

Όμως παρόλο που οι εγγενείς ιδιότητες του πυριτίου θέτουν τα όρια των επιδόσεων του CCD ως προς την κβαντική απόδοση και τη δυναμική περιοχή, δεν είναι οι μόνοι παράγοντες που επηρεάζουν αυτά τα χαρακτηριστικά. Ανάλογα με τον τύπο του CD (π.χ. εμπρόσθιας ή οπίσθιας ακτινοβόλησης) και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κατασκευής του (π.χ. τεχνικές λείανσης και ελεγχόμενου πάχους, τα στοιχεία των προσμίξεων, οι ουσίες των επιστρώσεων για τη ελάττωση της ανακλαστικότητας) τα όρια των επιδόσεων αξιοποιούνται καλύτερα ή ακόμα και διευρύνονται (ειδικά στην περιοχή των μικρών μηκών κύματος).

Έτσι όπως ήδη έχουμε αναφέρει, ένας τύπος CCD οπίσθιας ακτινοβόλησης με κατάλληλες ανακλαστικές επιστρώσεις, μπορεί να φτάσει τιμές κβαντικής απόδοσης πάνω από 80 % στην περιοχή 400 nm έως 800 nm.

Ωστόσο πρέπει να διακρίνουμε την ύπαρξη δύο περιπτώσεων καμπύλης φασματικής ευαισθησίας (καμπύλη κβαντικής απόδοσης) :

**α)** απόλυτη καμπύλη φασματικής ευαισθησίας στη οποία καταγράφουμε τις απόλυτες τιμές της κβαντικής απόδοσης συναρτήσει του μήκους κύματος.

**β)** σχετική καμπύλη φασματικής ευαισθησίας στην οποία θέτουμε τη μέγιστη τιμή κβαντικής απόδοσης ( $Q_{E,max}$ ) ίση με τη μονάδα και καταγράφουμε την κβαντική απόδοση στα υπόλοιπα

μήκη κύματος σχετικά με αυτή (δηλαδή καταγράφουμε το πηλίκο  $\frac{Q_{E,\lambda}}{Q_{E,max}}$ ).

Προφανώς από την απόλυτη καμπύλη φασματικής ευαισθησίας μπορεί πολύ εύκολα να προκύψει η σχετική καμπύλη, όμως δεν ισχύει το αντίστροφο διότι πρέπει πρώτα να προσδιορίσουμε τη μέγιστη κβαντική απόδοση ( $Q_{E,max}$ ).

Οι καμπύλες κβαντικής απόδοσης που δίδονται από του κατασκευαστές δεν αναφέρονται στη συγκεκριμένη συσκευή αλλά είναι αντιπροσωπευτικές του μοντέλου.

### 3.2 ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΚΑΜΕΡΑΣ

#### [Detective Efficiency]

Η κβαντική απόδοση που αναλύσαμε στην προηγούμενη παράγραφο είναι μέτρο της ανιχνευτικής ικανότητας (απόκρισης) του αισθητήρα του CCD, δηλαδή αντιπροσωπεύει την ικανότητα του κατά τη μετατροπή φωτεινού σήματος (φωτόνια) σε ηλεκτρικό σήμα (φορτία). Όμως έως την τελική καταγραφή του σήματος στην έξοδο, παρεμβάλλονται φαινόμενα και διαδικασίες (π.χ. ποιότητα μεταφορές φορτίου, μετατροπή σήματος σε τάση, ψηφιοποίηση του σήματος) λόγω των οποίων υπαισέρχονται διάφορα ήδη θορύβου που αλλοιώνουν το αρχικό

σήμα που ανιχνεύει το CCD. Προφανώς το καταγραφόμενο σήμα στην έξοδο, σε σχέση με το αρχικά ανιχνευόμενο σήμα (φωτόνια), είναι σημαντικό κριτήριο στην επιλογή μίας ανιχνευτικής διάταξης. Ειδικά στην περίπτωση μέτρησης χαμηλής έντασης σήματος, τα επίπεδα θορύβου που υπεισέρχονται (από τη φάση αμέσως μετά την ανίχνευση έως τη φάση της καταγραφής ) μπορεί να επισκιάσουν το σήμα και να έχουμε απώλεια της πληροφορίας.

Η ανιχνευτική ικανότητα (ή απόδοση) της κάμερας  $Q_D$  ορίζεται ως το πηλίκο:

$$Q_D = \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_{OUT}^2}{\left(\frac{S}{N}\right)_{IN}^2}$$

Όπου :  $Q_D$  η ανιχνευτική κβαντική απόδοση,

$\left(\frac{S}{N}\right)_{IN}^2$  ο λόγος σήματος προς θόρυβο κατά την είσοδο του σήματος [στη

διαδικασία μετατροπής των εισερχομένων φωτονίων σε ηλεκτρόνια, όπου ο θόρυβος  $N_{IN}$  είναι το άθροισμα του φωτονικού θορύβου και του θορύβου υποβάθρου του ουρανού ]

και  $\left(\frac{S}{N}\right)_{OUT}^2$  κατά την έξοδο [ στη φάση της καταγραφής του σήματος, όπου ο θόρυβος

$N_{OUT}$  περιέχει το σύνολο του θορύβου όλων των ειδών :

$N_{OUT} = N_{IN} + (\text{θερμονικό θόρυβο}) + (\text{θόρυβο ανάγνωσης}) + (\text{θόρυβο κατά τη μεταφορά}) ]$   
αντίστοιχα.

### 3.3 ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

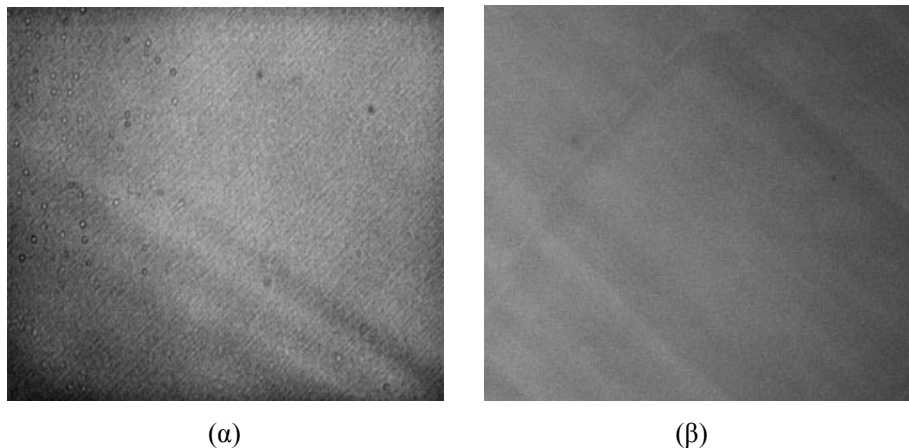
#### [Photon Response Non-Uniformity, PRNU]

Τα CCD είναι ανιχνευτικές διατάξεις που παρουσιάζουν διακυμάνσεις ευαισθησίας, από pixel σε pixel πάνω στην επιφάνειά τους, οι οποίες μερικές φορές είναι της τάξεως του 20 %.

Όμως λόγω της πολύ καλής γραμμικής απόκρισης των CCD, πολλά συστηματικά σφάλματα μπορούν να διορθωθούν σχετικά εύκολα. Έτσι για τη διόρθωση της ανομοιομορφίας της ευαισθησίας των pixel εφαρμόζουμε την τεχνική «Flat fielding» (φωτομετρική διόρθωση ) η οποία έχει καλά αποτελέσματα όταν χρησιμοποιούμε φως ίδιου χρώματος με αυτό της εικόνας που θέλουμε να διορθώσουμε. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι διαφορές ευαισθησίας μπορεί να έχουμε και λόγω χρώματος. Στη διαδικασία «Flat Fielding» (ισοφωτισμένο πεδίο) λαμβάνουμε την εικόνα (Flat Frame ) ενός ομοιόμορφα φωτισμένου πεδίου. Τότε λόγω της ανομοιομορφίας ευαισθησίας

των pixel, δεν λαμβάνουμε το ίδιο σήμα από όλα τα pixel όπως θα αναμέναμε. Για τη διόρθωση μιας εικόνας διαιρούμε την εικόνα που θέλουμε να διορθώσουμε με το αντίστοιχο Flat Frame, που έχει ληφθεί με το ίδιο οπτικό σύστημα και κατά την ίδια χρονική περίοδο.

Στις εικόνες 1 (α) και 1(β), [20], φαίνονται τα αποτελέσματα της ανομοιόμορφης φωτοαπόκρισης των εικονοστοιχείων, για δύο CCD, τα οποία φωτίζονται ομοιόμορφα.



**Εικόνα 1:** Διακύμανση της φωτοαπόκρισης σε CCD .

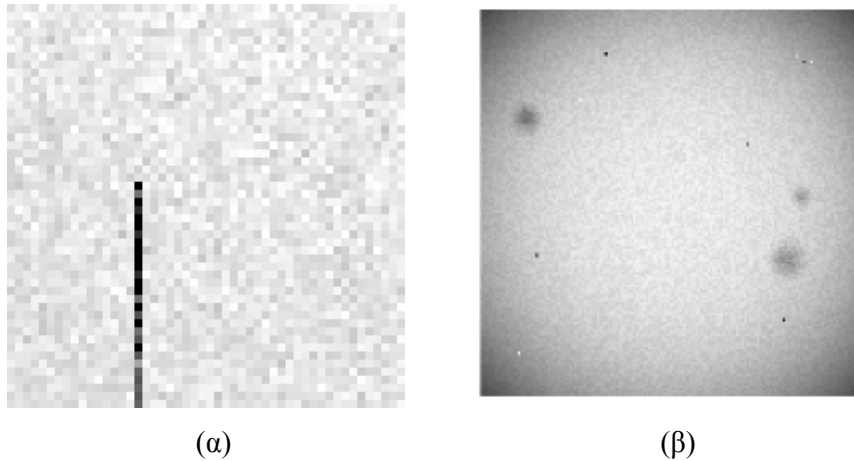
Οι αιτίες που προκαλούν αυτό το φαινόμενο διακρίνονται σε ενδογενείς και σε εξωτερικούς παράγοντες. Στους ενδογενείς παράγοντες συμπεριλαμβάνονται διαφορές στο πάχος των ηλεκτροδίων ή του διηλεκτρικού, που επηρεάζουν την απορρόφηση φωτονίων στην περίπτωση ενός εμπρόσθιας ακτινοβόλησης CCD. Στην περίπτωση ενός φωτιζόμενου από πίσω CCD, αντίστοιχες διαφορές στην ευαισθησία προκαλούνται από διαφορές του πάχους του υποστρώματος. Επίσης κατά την κατασκευή του τσιπ είναι δυνατόν να συμβούν μικρές διαφορές στις διαστάσεις των pixel, όπως και απόθεση μικροσκοπικών κόκκων σκόνης στην επιφάνειά του [ παρόλο που η κατασκευή γίνεται σε ειδικούς χώρους (clean room ) ]. Ακόμα η λείανση και οι επιστρώσεις που χρησιμοποιούνται για ελάττωση της ανακλαστικότητας, δεν είναι εντελώς ομοιόμορφες σε ολόκληρη την επιφάνεια του CCD.

Ωστόσο συχνά εμφανίζεται και η περίπτωση μεμονωμένων εικονοκυττάρων (Black Pixel) ή μεμονωμένων στηλών (Black Column), με πολύ μικρότερη φωτοαπόκριση από τον μέσο όρο (λιγότερο από το 75%). Αυτές οι περιοχές του αισθητήρα θεωρούνται ελαττωματικές και αφού εντοπιστούν, απομονώνονται με τεχνικές επεξεργασίας της εικόνας.

Οι εξωτερικοί παράγοντες έχουν να κάνουν κυρίως με τα οπτικά μέρη του συστήματος. Έτσι εκτός από κόκκους σκόνης, πολλοί φακοί ελαττώνουν την ένταση της ακτινοβολίας από τις άκρες του πεδίου (vigneting ). Οι εξωτερικοί παράγοντες μεταβάλλονται εύκολα π.χ. με τη μετακίνηση κάποιας διάταξης του οπτικού συστήματος και αυτό επιβάλλει να ρυθμίζουμε

κατάλληλα τις εικόνες μας συχνά. Επίσης και τα ενδογενή χαρακτηριστικά των pixel μπορεί να μεταβληθούν με την πάροδο του χρόνου, είτε από τη μεταβολή της θερμοκρασίας ( ιδιαίτερα σε ψυχόμενα CCD με  $LN_2$ , σε θερμοκρασίες μικρότερες των  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ), είτε από επιδράσεις ιονίζουσας ακτινοβολίας.

Στις εικόνες 2 (α) και 2 (β), [23], καταγράφονται δύο Flat Frames, όπου είναι εμφανής η επίδραση στην εικόνα, (α) λόγω ελαττωματικών pixel και (β) λόγω των εξωτερικών παραγόντων.



**Εικόνα 2:** (α) Ισοφωτισμένο πεδίο (flat frame) στο οποίο εντοπίζονται μία ελαττωματική στήλη (Black Column)  
(β) Ισοφωτισμένο πεδίο (flat frame), στο οποίο η μείωση του φωτός στα άκρα του πεδίου οφείλεται στο οπτικό σύστημα, ενώ οι τρεις σκοτεινές κηλίδες οφείλονται σε κόκκους σκόνης πάνω στο τζάμι του CCD.

### 3.4 ΑΠΟΛΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΦΟΡΤΙΟΥ [ Charge Transfer Efficiency, CTE]

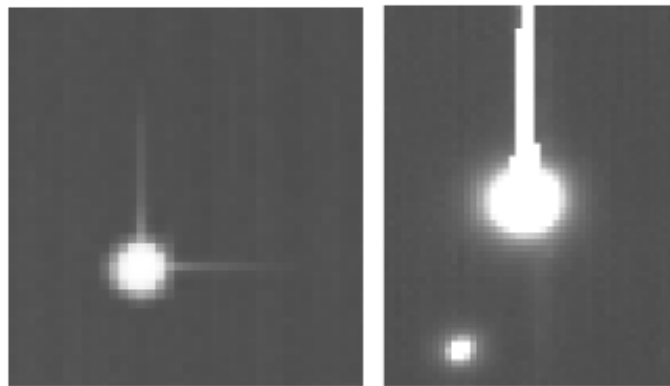
Η σύζευξη του φορτίου δεν είναι ποτέ τέλεια, αλλά λόγω διαφόρων ανωμαλιών στο πυρίτιο είναι δυνατόν μέρος του φορτίου να μένει πίσω σε κάθε μεταφορά. Το φαινόμενο αυτό της παρακράτησης φορτίου κυρίως συμβαίνει όταν:

- (α) τα πηγάδια δυναμικού είναι σχεδόν άδεια ,
- (β) τα πηγάδια δυναμικού είναι σχεδόν γεμάτα ,
- (γ) όταν ένα ελαττωματικό pixel βρίσκεται στην διαδρομή.

α) Μερικές φορές μικρές ανωμαλίες (παγίδες – traps), που προκύπτουν είτε από χημικές ατέλειες που καταφέρνουν να διαχυθούν στην ζώνη μεταφοράς του φορτίου, είτε από την

επίδραση της ιονίζουσας ακτινοβολίας στη δομή του πυριτίου, είναι δυνατόν να παγιδέψουν μικρό μέρος του φορτίου. Επειδή αυτές οι παγίδες λειτουργούν σαν σφουγγάρια που μαζεύουν φορτία, αλλά τα ελευθερώνουν με διάφορες σταθερές χρόνου (όποτε τα διαβάζουμε στα επόμενα pixel), το φαινόμενο εισάγει θόρυβο στην εικόνα και συνεπώς είναι απαραίτητη η καλή ποιότητα μεταφοράς, ώστε να πετύχουμε τα χαμηλότερα δυνατά επίπεδα θορύβου. Αυτές οι παγίδες επειδή έχουν μικρές χωρητικότητες (π.χ.  $100 e^-$ ) δημιουργούν προβλήματα στην περίπτωση που τα πηγάδια δυναμικού είναι σχεδόν άδεια. Μια λύση στο πρόβλημα αυτό είναι πριν την κυρίως έκθεση να γίνει μια σύντομη έκθεση (preflashing) με ένα LED, ώστε να προστεθεί ένα αρχικό σήμα (π.χ.  $500 e^-$ ) που θα γεμίσει τις παγίδες. Συνήθως στις αστρονομικές παρατηρήσεις δεν υπάρχει ανάγκη να γίνει κάτι τέτοιο, λόγω του φωτεινού υπόβαθρου του ουρανού, αλλά και λόγω του ρεύματος σκότους, που εξαιτίας των μεγάλων εκθέσεων μπορεί να ξεπεράσει αυτά τα επίπεδα. Εξαίρεση αποτελεί η φασματοσκοπία όπου το υπόβαθρο είναι πολύ σκοτεινό και συνεπώς το preflashing, μπορεί να είναι απαραίτητο.

β) Στην περίπτωση που τα πηγάδια είναι σχεδόν γεμάτα τότε το συνολικό δυναμικό αλλοιώνεται από το αρνητικό δυναμικό των ηλεκτρονίων, με αποτέλεσμα η σύζευξη να μην είναι τέλεια και μέρος του πακέτου των ηλεκτρονίων να μένει πίσω (οπότε το διαβάζουμε στα επόμενα pixel). Στην περίπτωση αυτή σχηματίζονται στην εικόνα φωτεινά άστρα, στα οποία διακρίνουμε μια αμυδρά φωτεινή ουρά, που εκτείνεται προς την αντίθετη κατεύθυνση, απ' αυτήν προς την οποία εκτελείται η μεταφορά των φορτίων κατά μήκος των στηλών (εικόνα 3), [23].

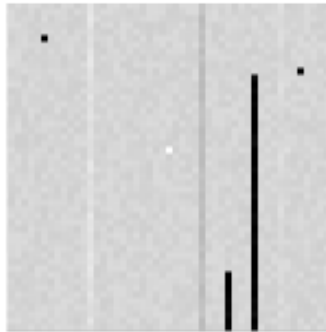


**Εικόνα 3:** Αριστερά διακρίνονται οι ουρές που οφείλονται σε κακή μεταφορά φορτίου, κατά μήκος των στηλών (κατακόρυφη ουρά), αλλά και λόγω του σειριακού καταχωρητή (οριζόντια ουρά). Δεξιά βλέπουμε την ουρά που σχηματίζεται όταν πολύ ισχυρό φως πέφτει σε κάποια pixel τα οποία ξεχειλίζουν (Blooming).



Το φαινόμενο αυτό μοιάζει αρκετά με αυτό του Blooming στην εικόνα, αλλά τα δύο φαινόμενα δεν πρέπει να συγχέονται. Το Blooming προκαλείται από την υπερχειλίση των φορτίων πάνω και κάτω κατά μήκος των στηλών, όταν ξεπεραστεί η χωρητικότητα του πηγαδιού δυναμικού και όχι από κακή μεταφορά.

γ) Η τρίτη περίπτωση, του ελαττωματικού pixel, μπορεί να είναι πολύ σοβαρή, αφού ένα τέτοιο pixel μπορεί να εμποδίσει την ανάγνωση των επόμενων στην στήλη pixel, μπλοκάροντας ακόμα και όλη την στήλη αν βρίσκεται στην αρχή (εικόνα 4), [23]. Ένα τέτοιο pixel μπορεί να προκληθεί από λάθος κατασκευαστικό, σχεδιασμού, βραχυκύκλωμα στο σημείο αυτό των πυλών ή κάποιο κομμένο ηλεκτρόδιο.



**Εικόνα 4:** Το CCD φωτίστηκε ομοιόμορφα, όποτε διάφορα ελαττώματα αποκαλύπτονται. Συγκεκριμένα υπάρχουν 3 ελαττωματικά pixel, 2 μπλοκαρισμένες στήλες και δύο στήλες με σημαντική διαφορά ευαισθησίας από τις υπόλοιπες στήλες.

Συνήθως επειδή είναι πολύ λίγα αυτά τα ελαττωματικά pixel που υπάρχουν σε ένα CCD, το πρόβλημα είναι περισσότερο αισθητικό, αλλά μπορεί να διορθωθεί με προγράμματα επεξεργασίας εικόνας, τα οποία με δειγματοληψία από τα διπλανά pixel αποδίδουν στα pixel της μπλοκαρισμένης στήλης την πιο πιθανή τιμή σήματος.

Εκτός από αυτούς τους παράγοντες που αναφέρθηκαν μέχρι τώρα και οι οποίοι είναι χαρακτηριστικά του CCD, την αποδοτικότητα της μεταφοράς φορτίου επηρεάζουν και εξωτερικοί παράγοντες, όπως η θερμοκρασία και ο χρονισμός που επιβάλλεται από το κύκλωμα οδήγησης. Ειδικότερα με την μείωση της θερμοκρασίας μειώνεται η αποτελεσματικότητα της μεταφοράς του φορτίου, γιατί μειώνεται η ευκινησία των ηλεκτρονίων. Μάλιστα σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ( $-150^{\circ}C$  και κάτω) η μεταφορά των φορτίων γίνεται πολύ κακή, έως και αδύνατη, [1], [23], [24].

Αν και η επίδραση της θερμοκρασίας είναι ξεκάθαρη, η επίδραση του χρονισμού δεν είναι και τόσο ξεκάθαρη. Αυτό γιατί δεν παίζει ρόλο μόνο η συχνότητα των παλμών (που τυπικά δεν είναι πάνω από 1MHz), αλλά σημαντικό ρόλο παίζουν οι χρόνοι μετάβασης από υψηλό σε

χαμηλό δυναμικό και το αντίθετο (rise-fall times). Αν οι χρόνοι αυτοί είναι πολύ γρήγοροι τότε υπάρχει πιθανότητα μέρος του φορτίου να μείνει πίσω. Γενικά οι μικροί χρόνοι μετάβασης από ένα δυναμικό σε ένα άλλο δεν ευνοούν την αποτελεσματική μεταφορά του φορτίου. Επιπλέον σημαντικό ρόλο παίζει και βαθμός αλληλοεπικάλυψης των φάσεων κατά τις μεταβάσεις, αλλά αυτή η επίδραση είναι πιο δύσκολο να περιγραφεί. Συνήθως συμφέρει η αιχμή ανόδου να επικαλύπτει την αιχμή καθόδου. Η αποδοτικότητα της μεταφοράς του φορτίου συνήθως εκφράζεται με τον συντελεστή απόδοσης μεταφοράς φορτίου CTE (Charge Transfer Efficiency) ή με τον συντελεστή της μη αποδοτικής μεταφοράς φορτίου CTI (Charge Transfer Inefficiency). Ο συντελεστής αυτός είναι ο λόγος των ηλεκτρονίων που μεταφέρονται επιτυχώς, σε μια μεταφορά, προς το αρχικό πόσο των ηλεκτρονίων που υπήρχαν στο πακέτο των ηλεκτρονίων πριν την μεταφορά. Συνεπώς ένα τέλειο CCD θα έχει CTE=1, ενώ οι συνήθεις τιμές για το CTE κυμαίνονται στα 0,99999 και καλύτερα. Με CTE=0,99999 μόνο ένα ηλεκτρόνιο κατά μέσο όρο μένει πίσω στα 10000 ηλεκτρόνια, ανά μεταφορά. Αν και κανείς θα νόμιζε ότι αυτή η διαφορά του CTE από την μονάδα είναι αμελητέα για να ασχολούμαστε, ωστόσο επειδή σε ένα CCD χρειάζονται πολλές μεταφορές πριν το κάθε πακέτο ηλεκτρονίων φτάσει στην βαθμίδα εξόδου, τα ηλεκτρόνια που μένουν πίσω θα είναι:

$$Q_d = Q_0(1 - CTE^N),$$

Όπου:  $Q_d$  το φορτίο που παρακρατείται μετά από N μεταφορές

και  $Q_0$  το αρχικό φορτίο του πακέτου πριν την ανάγνωση.

Επειδή το CTE υψώνεται εις την N, αυτή η τόσο μικρή διαφορά του CTE από την μονάδα γίνεται υπολογίσιμη. Για παράδειγμα με CTE=0,99999 και N=500, τελικά χάνεται το 0,5 % του φορτίου, όταν φτάνει στην έξοδο. Έτσι ένα πακέτο 10000 e<sup>-</sup> όταν φτάσει στην έξοδο μετά από 500 μεταφορές θα έχει 9950 e<sup>-</sup>. Από αυτά γίνεται κατανοητό ότι το να έχουμε καλό CTE γίνεται επιτακτικό σε CCD με πολλά pixel. Συνήθως το CTE μετριέται με βάση την παραπάνω σχέση, αλλά η μέτρηση δεν είναι και τόσο εύκολη.

Δύο τεχνικές συνήθως χρησιμοποιούνται, είτε το διάβασμα παραπάνω pixel από όσα υπάρχουν πραγματικά στο CCD (overscanning), είτε η εξέταση των κουκκίδων που αφήνουν ακτίνες-X στο CCD. Στην πρώτη τεχνική φωτίζουμε ομοιόμορφα το CCD με φως και έπειτα το διαβάσουμε στέλνοντας παραπάνω παλμούς στις φάσεις, ως αν το CCD είχε περισσότερες γραμμές και στήλες. Το φορτίο που μένει πίσω από το τελευταίο pixel θα το διαβάσουμε στο επόμενο του, που κανονικά βέβαια δεν υπάρχει, συνεπώς με αυτή την τεχνική απλώς ξαναδιαβάζουμε το τελευταίο pixel. Άρα γνωρίζοντας τα  $Q_d$ ,  $Q_0$  καθώς και τον αριθμό των μεταφορών N, εύκολα υπολογίζουμε το CTE. Βέβαια το πρόβλημα με αυτή την μέθοδο είναι ότι στην πραγματικότητα στο  $Q_d$  συνεισφέρουν και όλα τα pixel, πριν το

τελευταίο. Αυτό το πρόβλημα λύνεται αν όπου  $Q_0$  βάλουμε το συνολικό φορτίο, ενώ  $Q_d$  θα είναι το συνολικό φορτίο που παρακρατήθηκε από μία στήλη ή γραμμή.

Μια καλύτερη μέθοδος που χρησιμοποιείται σε επαγγελματικά εργαστήρια, για τον προσδιορισμό του CTE είναι αυτή των ακτίνων-X. Σε αυτή την μέθοδο χρησιμοποιείται μια μικρή πηγή ακτίνων-X χαμηλής ενεργότητας, με ενέργειες της τάξεως των 5 KeV. Όταν ένα φωτόνιο X αλληλεπιδράσει με το πυρίτιο τότε παράγει χιλιάδες ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών (παράγεται ένα ζεύγος ανά 3,65 eV ενέργειας του φωτονίου X). Επειδή συνήθως όλα τα ηλεκτρόνια θα παραχθούν μέσα σε ένα μόνο pixel και η αβεβαιότητα για τον αριθμό των ηλεκτρονίων είναι πολύ μικρή (τυπικά  $15e^-$  στα 5 keV), μπορούμε να ξέρουμε με καλή ακρίβεια από πριν το  $Q_0$ , ενώ το  $Q_d$  είναι εύκολα μετρήσιμο από την εικόνα. Βέβαια για μεγαλύτερη ακρίβεια είναι καλύτερα να υπολογίσουμε από την εικόνα το ακριβές φορτίο  $Q_0$ , δηλαδή  $Q_0 = Q_p + Q_d$ , όπου  $Q_p$  το φορτίο που μετράμε από την κουκκίδα που άφησε η ακτίνα X.

### 3.5 ΔΙΑΧΥΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

Τα ηλεκτρόνια που συλλέγονται στα pixel, συγκεντρώνονται και μεταφέρονται ελεγχόμενα με την κατάλληλη εφαρμογή τάσεων (χρονισμός) όπως έχουμε ήδη αναφέρει. Υπάρχει όμως μικρή πιθανότητα κάποιο ηλεκτρόνιο να διαφύγει από το pixel στο οποίο ανήκει προς κάποιο γειτονικό pixel. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται διάχυση φορτίου και παρ' όλο που η επίδρασή του στο συνολικό θόρυβο είναι πολύ μικρή, λόγω της βελτιστοποίησης των CCD, ακόμα και αυτός ο παράγοντας θορύβου γίνονται προσπάθειες να εξαιρεθεί. Καλύτερη λύση αποτελεί η χρήση πυριτίου με μεγάλη ειδική αντίσταση, έτσι ώστε το πλέγμα του πυριτίου να συγκρατεί τα ηλεκτρόνια στην θέση τους.

### 3.6 BINNING

Πολλές επιστημονικές κάμερες CCD, διαθέτουν την προδιαγραφή για εφαρμογή μιας on-chip λειτουργίας <<pixel-binning>> (ομαδοποίησης ή ενοποίησης των pixels), ως ένας άλλος

μηχανισμός αύξησης του SNR, τόσο ώστε να επιτυγχάνουμε συνθήκες περιορισμού από τον φωτονικό θόρυβο σε χαμηλότερα επίπεδα φωτισμού και σε μικρότερους χρόνους έκθεσης. Με αυτή την εφαρμογή είναι εφικτός ο συνδυασμός (άθροιση) του σήματος που συλλέχθηκε από δύο ή περισσότερα pixel, πάνω στο chip του CCD και πριν από τη διαδικασία ανάγνωσης. Έτσι καταφέρνουμε να αυξήσουμε την τιμή του σήματος, αυξάνοντας παράλληλα και το SNR, αφού ο θόρυβος ανάγνωσης που υπεισέρχεται, τείνει να έχει την ίδια τιμή όπως σ' ένα γεγονός ανάγνωσης σήματος από ένα και μόνο pixel.

Η ομαδοποίηση των pixels μπορεί να εφαρμόζεται κατ' επιλογή οριζόντια (pixels στην ίδια γραμμή), κατακόρυφα (pixels στην ίδια στήλη) ή για περιοχές της επιφάνειας του αισθητήρα καθεμιά απ' τις οποίες, αντιστοιχεί σε  $n \times n = n^2$  pixels (superpixel, π.χ. 2x2, 2x3).

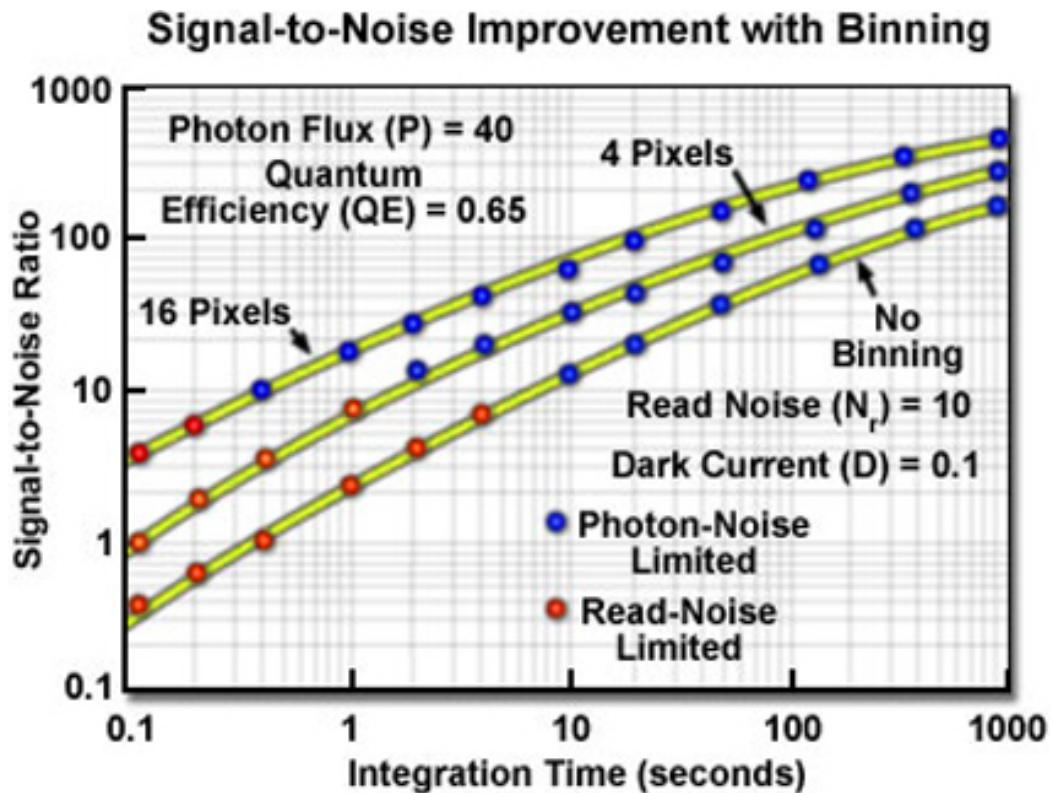
Επιπλέον πλεονέκτημα είναι η ελάττωση του χρόνου ανάγνωσης, αφού ελαττώνεται και το πλήθος των βημάτων ανάγνωσης. Η εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του SNR, κατά την εφαρμογή της ομαδοποίησης (binning) τροποποιείται ως εξής, [5]:

$$\text{SNR} = \frac{M \cdot I_S \cdot Q_E \cdot t}{\sqrt{M \cdot (I_S \cdot Q_E \cdot t + I_D \cdot t) + N_R^2 + N_C^2}},$$

όπου: M το πλήθος των ομαδοποιημένων (binned) pixels ( $M = n \times n = n^2$ ) και θεωρούμε ότι το σήμα σε καθένα από αυτά είναι το ίδιο.

Στο σχήμα 3, [5], παρουσιάζονται τα αποτελέσματα διαφορετικών τιμών binning, σε καμπύλες που παριστάνουν τη σχέση του SNR με το χρόνο έκθεσης. Οι τρεις καμπύλες χαράσσονται για τις ίδιες τυπικές προδιαγραφές ενός CCD (όπως αναφέρεται στο γράφημα) και για πολύ χαμηλή προσπίπτουσα ένταση φωτός στον αισθητήρα, ίση με 40 φωτόνια/ pixel/sec. Όπως προκύπτει από το διάγραμμα, χωρίς ομαδοποίηση απαιτείται χρόνος έκθεσης περίπου 4 sec για την επίτευξη επιπέδου σήματος περιορισμένου από τον φωτονικό θόρυβο. Με την εφαρμογή 16 pixel-binning ένα ισοδύναμο SNR, στις ίδιες συνθήκες λειτουργίας, επιτυγχάνεται σε χρόνο έκθεσης μόλις 0,25 sec. Μία άλλη θεώρηση είναι ότι στον ίδιο χρόνο έκθεσης των 4 sec η εικόνα που αποκτήθηκε με τη χρήση 16 pixel-binning υπερτερεί κατά περίπου πενταπλάσια βελτίωση του SNR σε σύγκριση με την μη ομαδοποιημένη (unbinned) λειτουργία. Βέβαια βασικά μειονεκτήματα της ομαδοποίησης των pixels είναι η απώλεια της χωρικής ανάλυσης και η αύξηση του σκοτεινού ρεύματος, τα οποία όμως αντισταθμίζονται αρκετά από τη σημαντική βελτίωση του SNR.

Άλλωστε η εφαρμογή του binning είναι πολύ χρήσιμη για την προεπισκόπηση της εικόνας, η οποία διευκολύνει την εστίαση.

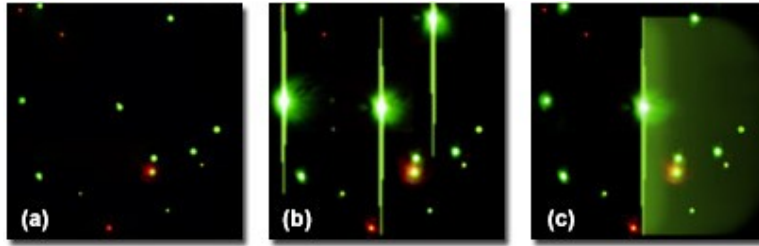


**Σχήμα 3:** Γραφικές παραστάσεις του SNR σε σχέση με το χρόνο ολοκλήρωσης, όπου παρατηρούμε τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής του binning, ως προς την επίτευξη του ορίου του φωτονικού θορύβου σε μικρότερους χρόνους έκθεσης και χαμηλότερα επίπεδα σήματος.

### 3.7 ΥΠΕΡΧΕΙΛΙΣΗ [BLOOMING]

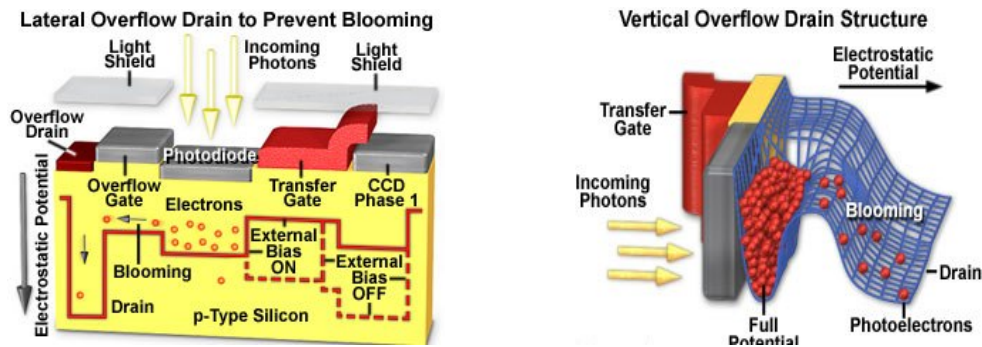
Ο παρατηρήσεις πολύ φωτεινών αντικειμένων μπορεί να οδηγήσουν στη συλλογή τόσο μεγάλου πλήθους φωτοηλεκτρονίων, ώστε ένα ή περισσότερα pixels να φτάσουν σε κόρο και να συμβεί υπερχειλίση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την έντονη διαρροή φορτίου (bleeding), προς τις δύο αντίθετες κατευθύνσεις κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς του φορτίου.

Σ' αυτή την περίπτωση διάφορα ανεπιθύμητα αποτελέσματα μπορεί να εμφανιστούν στην έξοδο της κάμερας που μπορεί να είναι λευκές λωρίδες στην εικόνα και λανθασμένες τιμές σήματος σε μεγάλο πλήθος pixels (όπως φαίνεται και στο σχήμα 4, [5]) ή ακόμα και σε πλήρη κατάρρευση της διαδικασίας ανάγνωσης και ενίσχυσης, οπότε παράγεται μια εντελώς σκοτεινή εικόνα, ενώ παράλληλα καταστρέφεται η γραμμική απόκριση του CCD.



**Σχήμα 4:** Εικόνες στις οποίες εμφανίζονται τα ανεπιθύμητα αποτελέσματα της υπερχειλίσης.

Μεταξύ των πιθανών μηχανισμών για τον περιορισμό των επιπτώσεων της υπερχειλίσης, η πιο κοινή προσέγγιση είναι να συμπεριληφθούν στο σχεδιασμό και στην κατασκευή του αισθητήρα, δομές <<antiblooming>>, οι οποίες λειτουργούν ως φρεάτια συλλογής ηλεκτρονίων σε περίπτωση υπερχειλίσης. Οι δύο πιο κοινοί τύποι δομών antiblooming που ενσωματώνονται στον αισθητήρα είναι για την κατακόρυφη και την πλευρική αποστράγγιση της υπερχειλίσης (Vertical Overflow Drain, VOD - Lateral Overflow Drain, LOD), και αναπαριστούνται στο σχήμα 5, [5].



**Σχήμα 5**

Όμως η καλύτερη αντιμετώπιση των φαινομένων υπερχειλίσης, είναι η λειτουργία της κάμερας σε συνθήκες εντός του ορίου της μέγιστης χωρητικότητας (FWC) των pixels. Μία μέθοδος είναι η κατάλληλη ρύθμιση του κέρδους του αναλογικοψηφιακού μετατροπέα, ώστε το βάθος των bit να καλύπτει μόνο τη δυναμική περιοχή της κάμερας, για την οποία διατηρείται η γραμμική απόκριση δηλαδή μακριά από την κατάσταση κορεσμού των pixels.

### 3.8 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Γενικά η επίδραση της ακτινοβολίας προκαλεί δύο τύπους βλαβών στον αισθητήρα.

Ο ένας τύπος είναι βλάβες στη διεπαφή οξειδίου-πυριτίου μέσω του φαινομένου ιονισμού των ατόμων. Αυτό το είδος επίδρασης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του επιφανειακού σκοτεινού ρεύματος, την αύξηση του θορύβου στον ενισχυτή και την μεταβολή της γραμμικής απόκρισης του αισθητήρα.

Ο δεύτερος τύπος βλάβης προκαλείται από ενεργητικά σωματίδια όπως νετρόνια ή πρωτόνια. Τα σωματίδια αυτά συγκρούονται με τα άτομα του πυριτίου και τα εκτοπίζουν δημιουργώντας έτσι κενά εντός του πλέγματος. Τα περισσότερα ζεύγη ατόμου – κενού που δημιουργούνται, επανασυνδέονται χωρίς περαιτέρω προβλήματα, ενώ γενικά περίπου το 2% αυτών παραμένουν. Τα κενά που δεν ανασυνδιάζονται παρουσιάζουν αστάθεια και μεταναστεύουν προς ευνοϊκότερες θέσεις στο πλέγμα, με αποτέλεσμα να εγκλωβίζονται τελικά στις περιοχές των προσμίξεων εντός του πυριτίου, λειτουργώντας αφ' ενός ως παγίδες που δυσχεραίνουν τη μεταφορά του φορτίου (CTE) αφετέρου ως κέντρα παραγωγής σκοτεινού ρεύματος, [24], [21].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

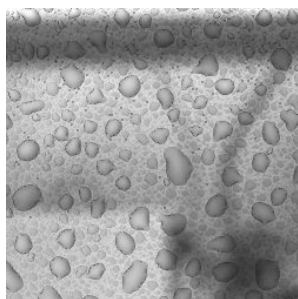
### ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ CCD ΣΕ ΧΑΜΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ

#### 4.1 ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΚΕΝΟΥ ΠΡΙΝ ΑΠΟ ΤΗ ΨΥΞΗ

Κατά τη ψύξη ενός CCD σε θερμοκρασίες κάτω από  $0^{\circ}\text{C}$ , είναι απαραίτητη η επίτευξη κενού για δύο λόγους.

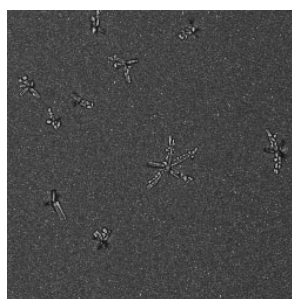
Ο πρώτος είναι για την πιο εύκολη ψύξη αλλά και διατήρηση της χαμηλής θερμοκρασίας για μεγάλο χρονικό διάστημα, καθώς η απουσία αέρα ελαχιστοποιεί την αγωγή θερμότητας από το περιβάλλον προς τον αισθητήρα του CCD.

Ο δεύτερος λόγος είναι πιο σοβαρός διότι σχετίζεται όχι μόνο με την καλύτερη απόδοση του CCD αλλά και με τον κίνδυνο να προκληθούν ανεπανόρθωτες βλάβες στον αισθητήρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε θερμοκρασίες κοντά στους  $0^{\circ}\text{C}$  τα μόρια του αέρα θα συμπυκνώνονται και θα δημιουργούν υγρασία πάνω στην επιφάνεια του αισθητήρα, με αποτέλεσμα να ελαττώνουν την συλλεκτική του ικανότητα. Το χειρότερο όμως που μπορεί να συμβεί, είναι η δημιουργία κρυστάλλων πάνω στην επιφάνεια του αισθητήρα. Αυτό συνήθως έχει καταστροφικές συνέπειες, αφού οι μικροφακοί του CCD, που κατασκευάζονται από ένα σχετικά μαλακό υλικό, θα παραμορφωθούν και δεν θα αποκρίνονται σωστά στην προσπίπτουσα φωτεινή ακτινοβολία. Σε αυτή την περίπτωση η βλάβη είναι μόνιμη και η μόνη λύση είναι η αντικατάσταση του αισθητήρα. Στις εικόνες 1 και 2, [20], φαίνονται τα αποτελέσματα της συμπύκνωσης των μορίων του αέρα πάνω στην επιφάνεια του αισθητήρα του CCD.



Εικόνα 1

**Εικόνα 1:** Έντονη συμπύκνωση υδρατμών στην επιφάνεια του ccd.



Εικόνα 2

**Εικόνα 2:** Δημιουργία παγοκρυστάλλων στην επιφάνεια του ccd.

Ο σχηματισμός υγρασίας ή κρυστάλλων στον αισθητήρα λόγω μη ικανοποιητικού κενού, μπορεί να μην παρατηρηθεί άμεσα στην εικόνα, αφού θα έχει ως αποτέλεσμα μία τοπική αμυδρή θολούρα



που μπορεί να θεωρηθεί ότι προέρχεται είτε από κακή εστίαση είτε από κάποιο νέφος στο χώρο από τον οποίο συλλέγεται το σήμα. Αν γίνει αντιληπτό κάποιο φαινόμενο εμφάνισης υγρασίας στον αισθητήρα πρέπει αμέσως να διακοπεί η λειτουργία του CCD.

Η άντληση του αέρα για τη δημιουργία υψηλού κενού ( της τάξης τουλάχιστον  $10^{-5}$  torr), πρέπει να επαναλαμβάνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. 6 μήνες ή 1 χρόνος) ανάλογα με τις προδιαγραφές της κάμερας.

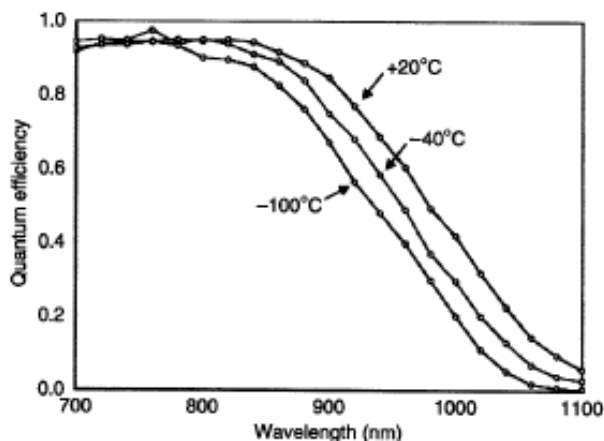
Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τη χρήση αντλίας υψηλού κενού, διαρκεί περίπου 48 ώρες και είναι γνωστή γενικά ως “rump and bake”( άντληση και ψήσιμο), αφού πρέπει να γίνεται έχοντας την κάμερα σε υψηλή θερμοκρασία για πιο αποτελεσματική άντληση του αέρα.

Μια άλλη λύση είναι η αντικατάσταση του αέρα με ξηρό άζωτο. Με αυτόν τον τρόπο δεδομένου ότι δεν υπάρχει διαφορά πίεσης και σε συνδυασμό με κάποια αποξηραντική ουσία για την απορρόφηση τυχόν υγρασίας από τις διαρροές, το σύστημα μπορεί να λειτουργεί σε άριστη απόδοση για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα ( πέντε έως δέκα χρόνια ) χωρίς συντήρηση.

#### 4.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ

Η κβαντική απόδοση (ιδιαίτερα στο υπέρυθρο τμήμα του φάσματος ) εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Στο σχήμα 3, [1], [2], δίνονται οι σχετικές καμπύλες ευαισθησίας, για το ίδιο CCD, σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες λειτουργίας ( $-100^{\circ}\text{C}$  ,  $-40^{\circ}\text{C}$  ,  $+20^{\circ}\text{C}$  ), από το οποίο προκύπτει ότι για μήκη κύματος μεγαλύτερα από 800nm οι αποκλίσεις στις κβαντικές αποδόσεις φτάνουν το 20%.

Από το σχήμα 1 δεν προκύπτει ότι το CCD έχει καλύτερη κβαντική απόδοση στη θερμοκρασία  $+20^{\circ}\text{C}$  διότι πρέπει να λάβουμε υπόψη και τις επιδράσεις του θορύβου.



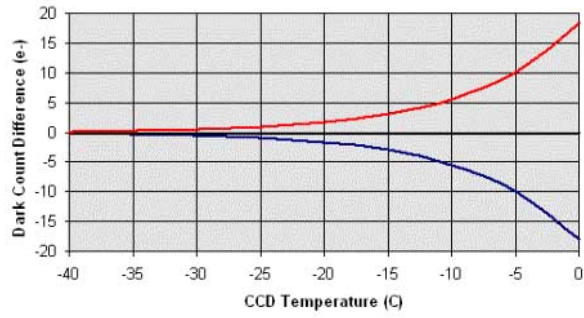
**Σχήμα 1:** Η κβαντική απόδοση ενός CCD για τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες λειτουργίας.

### 4.3 ΣΦΑΛΜΑ ΛΟΓΩ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει η θερμοκρασία του ccd σχετίζεται άμεσα με την παραγωγή του σκοτεινού ρεύματος και κατ' επέκταση με τα επίπεδα σκοτεινού θορύβου. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με ψύξη του CCD (ώστε να ελαττωθεί το ρεύμα σκότους) και με την επεξεργασία της εικόνας αφαιρώντας το dark frame, το οποίο λαμβάνεται για τον ίδιο χρόνο έκθεσης και στην ίδια θερμοκρασία κατά την λήψη της εικόνας που θέλουμε να διορθώσουμε αλλά με την κάμερα φωτοστεγανή. Ωστόσο στην πράξη η θερμοκρασία κατά την λήψη του dark frame και της εικόνας που θέλουμε να διορθώσουμε δεν μπορεί να είναι ακριβώς η ίδια. Παρόλα τα συστήματα σταθεροποίησης της θερμοκρασίας που διαθέτουν οι κάμερες CCD, πάντα υπάρχουν διακυμάνσεις οι οποίες προκαλούν επίσης διακυμάνσεις και στην τιμή του σκοτεινού θορύβου, που αφαιρούμε κατά την διόρθωση μιας εικόνας. Κάμερες υψηλών επιδόσεων διαθέτουν συστήματα σταθεροποίησης της θερμοκρασίας με σφάλμα  $\pm 0,1$  βαθμούς C, προδιαγραφή η οποία εκφράζεται ως 1- sigma. Αυτό δεν σημαίνει ότι η θερμοκρασία του CCD κυμαίνεται κατά  $\pm 0,1$  °C σε σχέση με την ονομαστική τιμή (μέση τιμή), αλλά ότι στο 68% ενός χρονικού διαστήματος το σφάλμα είναι  $\pm 0,1$  °C και στο 95% του χρονικού διαστήματος τα όρια του σφάλματος  $\pm 0,2$  °C (2 – sigma). Επίσης αβεβαιότητα στην τιμή της θερμοκρασίας, μπορεί να υπεισέρχεται από το γεγονός ότι ο ρυθμιστής μετρά την θερμοκρασία σε σχέση με ένα ατμοσφαιρικό δείγμα θερμοκρασίας. Σε εργαστηριακό περιβάλλον όπου η θερμοκρασία του χώρου είναι σχετικά σταθερή αυτό δεν αποτελεί σημαντικό πρόβλημα. Όμως για αστρονομικές παρατηρήσεις συνήθως η κάμερα βρίσκεται σε περιβάλλον που η θερμοκρασία παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις κατά την διάρκεια της νύχτας.

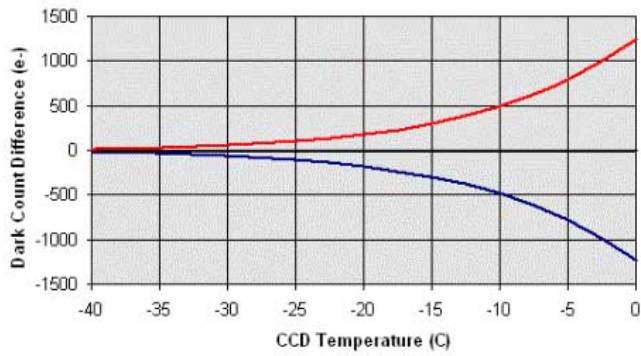
Άρα η ακριβής μέτρηση της θερμοκρασίας καθώς και η σταθεροποίηση της, από τα συστήματα ελέγχου θερμοκρασίας, κατά την διάρκεια λήψης των dark frames και των εικόνων που θα διορθώσουμε, είναι παράγοντες που επηρεάζουν τον θόρυβο που υπεισέρχεται στη μέτρηση μας. Και τα δύο αυτά προβλήματα αντιμετωπίζονται με την ψύξη της CCD σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το ρεύμα σκότους οπότε και οι μικρές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας να έχουν αμελητέα επίδραση στις μετρήσεις μας. Στα σχήματα 2, 3 και 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών μοντέλων, που υπολογίζουν το dark count τριών CCD σε σχέση με τις στατιστικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας.

Dark Count Difference for  $\pm 0.2\text{C}$  Variation.  
300 sec exposure, KAF-0400 CCD, 9 micron pixels.



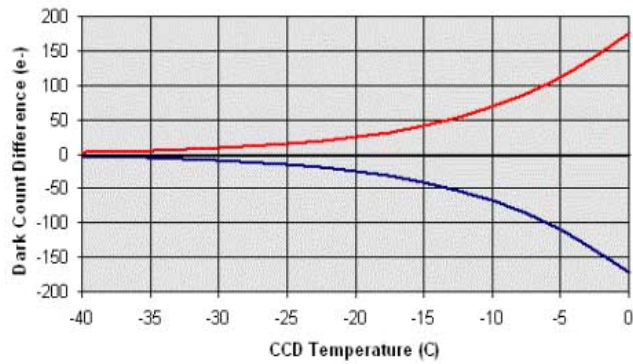
Σχήμα 2: kaf -0400ccd 9 micron pixels

Dark Count Difference for  $\pm 0.2\text{C}$  Variation.  
300 sec exposure, SITe CCD, 24 micron pixels.



Σχήμα 3: site ccd 9 micron pixels

Dark Count Difference for  $\pm 0.2\text{C}$  Variation.  
300 sec exposure, SITe CCD, scaled to 9 micron pixel.



Σχήμα 4: site ccd 24 micron pixels

Η μειοψηφία των pixel που έχουν ρεύμα σκότους πάνω από το πενταπλάσιο της μέσης τιμής, δεν έχουν ληφθεί υπ' όψιν. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει για ένα CCD Kodak KAF-04000 CCD το οποίο έχει 9 micron pixels, και για ένα site Si -502a CCD το οποίο έχει 24 micron pixels. Ο αισθητήρας Site έχει μεγαλύτερη παραγωγή σκοτεινού ρεύματος και γι' αυτό έχει και μεγαλύτερη ευαισθησία στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας όπως φαίνεται στα διαγράμματα.

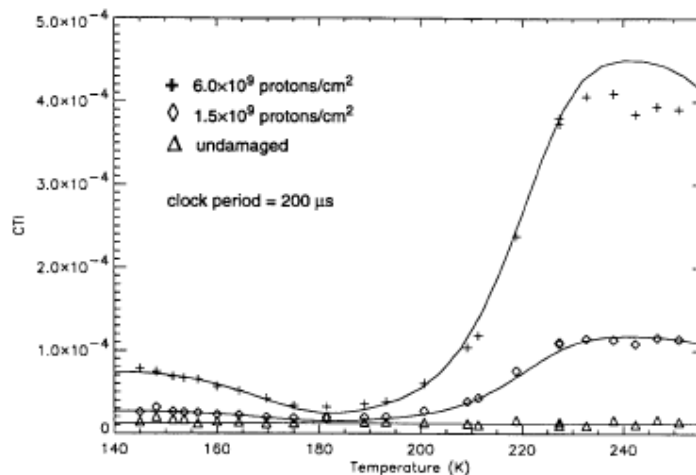
#### 4.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΦΟΡΤΙΟΥ (CTE)

Η ποιότητα μεταφοράς φορτίου (CTE) από pixel σε pixel στον αισθητήρα, επηρεάζεται από το πλήθος των ατελειών του πλέγματος (οι οποίες λειτουργούν ως παγίδες φορτίου όπως έχουμε αναφέρει), από τη συχνότητα των εφαρμοζόμενων τάσεων χρονισμού αλλά και από την θερμοκρασία.

Ένα άλλο μέγεθος που συχνά χρησιμοποιείται ως κριτήριο της αποδοτικής μεταφοράς φορτίου, είναι ο συντελεστής CTI (Charge Transfer Inefficiency) όπως ήδη έχει αναφερθεί, που ορίζεται από τη σχέση:

$$CTI = 1 - CTE$$

Από το διάγραμμα που ακολουθεί (σχήμα 5, [24]) βλέπουμε την εξάρτηση του CTI από την θερμοκρασία, όπου για το συγκεκριμένο αισθητήρα επιτυγχάνεται πολύ καλή ποιότητα μεταφοράς φορτίου σε θερμοκρασίες κάτω από τους 190 K (-83 °C).

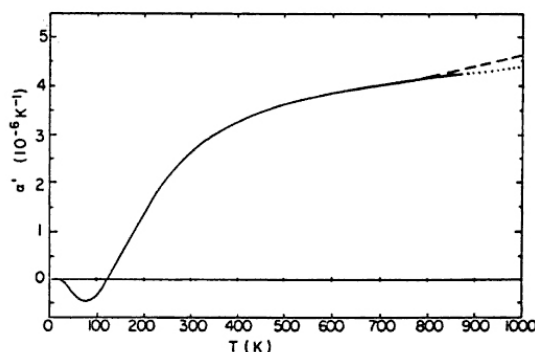


Σχήμα 5: Γραφική παράσταση του CTI σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

#### 4.5 ΑΛΛΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΛΟΓΩ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ ΤΩΝ PIXELS

Κατά την ψύξη της CCD από τη θερμοκρασία δωματίου σε θερμοκρασίες υγρού αζώτου, τα pixels του αισθητήρα συστέλλονται, φαινόμενο το οποίο μπορεί να προκαλέσει μεταβολή στην απόκρισή τους, [25]. Επίσης από την επαναλαμβανόμενη διαδικασία ψύξης, κάθε φορά που χρησιμοποιείται η κάμερα, είναι πιθανή η αλλοίωση της απόδοσης του αισθητήρα σε βάθος χρόνου.

Η εξάρτηση του θερμικού συντελεστή ( $\alpha$ ) του πυριτίου από τη θερμοκρασία παρουσιάζεται στο διάγραμμα του σχήματος 6, ενώ η γραμμική μεταβολή του σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία δίνεται από τη σχέση:  $dL=\alpha \cdot L \cdot dT$



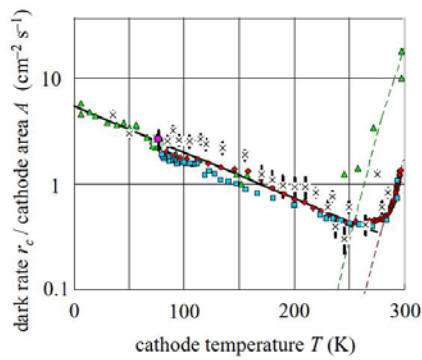
**Σχήμα 6:** Διάγραμμα της εξάρτησης του θερμικού συντελεστή διαστολής του πυριτίου σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.

#### 4.6 ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ [CRYOGENIC ELECTRON PHENOMENON]

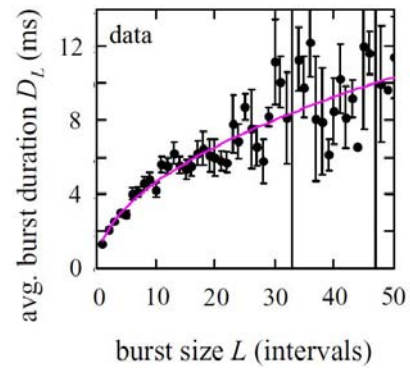
Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, απουσία φωτός, παρατηρήθηκε η αυθόρμητη εκπομπή ηλεκτρονίων από την κάθοδο ενός φωτοπολλαπλασιαστή. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε για πρώτη φορά πριν περίπου 50 χρόνια και ονομάστηκε «CRYOGENIC ELECTRON PHENOMENON».

Σε μία πρόσφατη μελέτη, ο καθηγητής φυσικής στο πανεπιστήμιο της Ιντιάνα, Hans –Otto Mayer, μελέτησε περαιτέρω το φαινόμενο, τοποθετώντας έναν φωτοπολλαπλασιαστή σε άδειο δοχείο, το οποίο στην συνέχεια βύθισε για μία ημέρα σε υγρό αζώτο, ψύχοντας έτσι τον φωτοπολλαπλασιαστή στους 80K ( $-193^{\circ}C$ ) και την επόμενη ημέρα σε υγρό ήλιο ψύχοντας τον στους 4 K ( $-296^{\circ}C$ ). Στα πειράματα αυτά ο Mayer διαπίστωσε ότι ηλεκτρόνια εκπέμπονται με «εκρηκτικό» τρόπο, σαν ριπές σε τυχαία χρονικά διαστήματα και ότι η εκπομπή των ηλεκτρονίων μέσα σε μία έκρηξη έχει ελαττούμενο ρυθμό. Ακόμα παρατήρησε ότι καθώς ελαττώνεται η

θερμοκρασία το ποσοστό των «εκρήξεων» αυξάνεται, καθώς επίσης αυξάνεται και το πλήθος των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων ανά έκρηξη (σχήμα 5α). Η χρονική διάρκεια κάθε έκρηξης παρουσιάζει ποικιλία. Ανάμεσα στις ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις είναι ότι το ποσοστό των γεγονότων εκπομπής ηλεκτρονίων δεν εξαρτάται από τον ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας (είτε αύξηση είτε ελάττωση) αλλά μόνο από την τρέχουσα τιμή θερμοκρασίας. Συνολικά οι ιδιότητες των κρυογενικών εκπομπών ηλεκτρονίων, δεν ταιριάζουν με καμία γνωστή αυθόρμητη διαδικασία εκπομπής συμπεριλαμβανομένης της θερμικής εκπομπής, της εκπομπής πεδίου και της ραδιενεργής ή διεισδυτικής ακτινοβολίας όπως ή κοσμική ακτινοβολία. Ο Mayer πρότεινε ότι αυτή ιδιόμορφη εκπομπή ηλεκτρονίων, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζει, θα μπορούσε να είναι το αποτέλεσμα ενός μηχανισμού παγίδευσης και πρόσθεσε ότι πρέπει να διερευνηθεί αν το ίδιο φαινόμενο εμφανίζεται και σε άλλες διατάξεις.



(α)



(β)

**Σχήμα 5:** (α) Γεγονότα εκρήξεων ηλεκτρονίων σε σχέση με τη θερμοκρασία.  
(β) Διάρκεια των εκρήξεων σε σχέση με τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των συμβάντων.

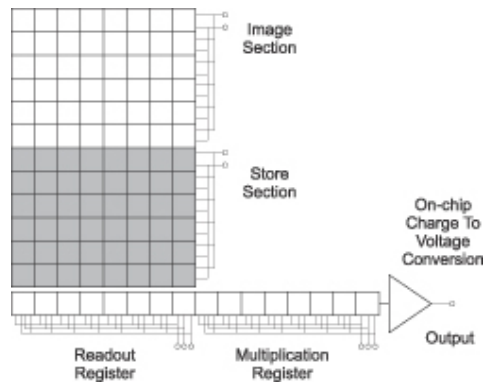
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟΙ ΤΥΠΟΙ CCD ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ

#### **5.1 EMCCDs (Electron Multiplaying Charge-Coupled Devices)**

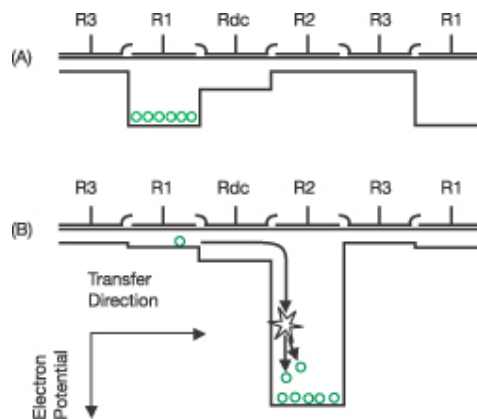
Ένα από τα λίγα σημαντικά μειονεκτήματα των συμβατικών καμερών CCD υψηλής απόδοσης, είναι ότι τα πολύ χαμηλά επίπεδα σήματος, συνήθως πέφτουν κάτω από το κατώφλι του θορύβου ανάγνωσης του αισθητήρα, περιορίζοντας τις δυνατότητες απεικόνισης σε ορισμένους παραγωγικούς τομείς έρευνας, που απαιτούν ταχεία λήψη σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα φωτός. Μια καινοτόμος μέθοδος για την ενίσχυση σημάτων χαμηλού φωτισμού, σε επίπεδο πάνω από τον θόρυβο ανάγνωσης ενός CCD, χρησιμοποιεί τον πολλαπλασιασμό των ηλεκτρονίων. Ουσιαστικά η EMCCD είναι ένας αισθητήρας εικόνας, ικανός να ανιχνεύει έστω και ένα μόνο φωτόνιο χωρίς ενισχυτή, επιτυγχάνοντάς το μέσω μιας ενσωματωμένης στο chip, δομής πολλαπλασιασμού ηλεκτρονίων. Οι κλασσικές κάμερες CCD παρέχουν υψηλή ευαισθησία, θόρυβο ανάγνωσης μικρότερο από 10 e/pixel αλλά με μειονέκτημα μεγάλο χρόνο ανάγνωσης. Ο περιορισμός στην ταχύτητα ανάγνωσης, προέρχεται από το μικρό εύρος ζώνης του ενισχυτή, ώστε να επιτυγχάνεται μικρός θόρυβος ανάγνωσης, για ταχύτητες ανάγνωσης που δεν ξεπερνούν το 1 MHz. Με τις EMCCDs ξεπεράστηκε αυτό το εμπόδιο, ενισχύοντας το σήμα πριν τον ενισχυτή και γι' αυτό παρουσιάζουν πρωτοφανή ευαισθησία σε πολύ υψηλότερες ταχύτητες ανάγνωσης. Με την ενίσχυση του σήματος κατά αυτό τον τρόπο ο θόρυβος ανάγνωσης παρακάμπτεται και δεν αποτελεί απαγορευτικό παράγοντα για μεγάλες ταχύτητες ανάγνωσης. Η αρχιτεκτονική ενός EMCCD αποτελείται συνήθως από ένα CCD μεταφοράς πλαισίου (frame transfer CCD) όπως φαίνεται στο σχήμα (1). Τα frame transfer CCD διαθέτουν δύο τομείς, εκ των οποίων ο ένας χρησιμοποιείται για την λήψη του σήματος και ο άλλος για την αποθήκευσή του πριν την διαδικασία ανάγνωσης.

Ο αποθηκευτικός χώρος είναι συνήθως ίδιου μεγέθους με την περιοχή που χρησιμοποιείται για την λήψη του σήματος (αισθητήρας) και καλύπτεται από φωτοστεγανή μάσκα κατασκευασμένη συνήθως από αλουμίνιο.



**Σχήμα 1:** frame transfer CCD, σε ένα EMCCD

Κατά την διάρκεια μιας έκθεσης το σήμα συλλέγεται από τον αισθητήρα και αυτομάτως μετακινείται στον αποθηκευτικό χώρο από όπου τελικά διαβιβάζεται στην έξοδο για την ανάγνωσή του. Παράλληλα με αυτήν την διαδικασία η περιοχή του αισθητήρα βρίσκεται σε κατάσταση λήψης της επόμενης εικόνας. Κατά την μετακίνηση του σήματος προς την έξοδο, το σήμα διαβιβάζεται μέσω του καταχωρητή πολλαπλασιασμού, όπου και ενισχύεται προτού την ανάγνωσή του από τον ενισχυτή φορτίου. Η διαδικασία ενίσχυσης του σήματος στον καταχωρητή πολλαπλασιασμού του φορτίου αναπαρίσταται στο σχήμα 2, [4].



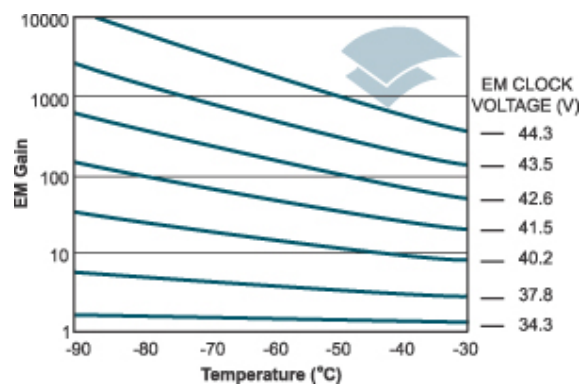
**Σχήμα 2:** Αναπαράσταση της ενίσχυσης του σήματος, κατά τη μεταφορά του στον καταχωρητή ενός EMCCD.

Ο καταχωρητής πολλαπλασιασμού αποτελείται από εκατοντάδες κελιά, όπου σε καθένα από αυτά λαμβάνει χώρα η ενίσχυση μέσω μιας φυσικής διαδικασίας, η οποία είναι γνωστή ως ‘φορτίο



επαγόμενο από ρολόι' (clock-induced charge) ή 'νόθο φορτίο' (Spurious charge). Το φαινόμενο Clock-induced παραδοσιακά θεωρείται ως πηγή θορύβου και είναι ανεπιθύμητο, αυτό όμως δεν ισχύει στις EMCCDs. Όταν το φορτίο διαβιβάζεται μέσα από έναν καταχωρητή πολλαπλασιασμού, υπάρχει μια πολύ μικρή αλλά πεπερασμένη πιθανότητα, να δημιουργηθούν επιπλέον φορτία σύμφωνα με μια διαδικασία γνωστή ως "Impact ionization" (ιονισμός από κρούση). Ο ιονισμός κρούσης συμβαίνει όταν ένα φορτίο έχει αρκετή ενέργεια ώστε να δημιουργήσει ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής και ως εκ τούτου ένα ελεύθερο φορτίο στη ζώνη αγωγιμότητας διπλασιάζεται με αποτέλεσμα να έχουμε ενίσχυση. Για να αξιοποιήσουμε αυτή τη διαδικασία, προσαρμόζουμε τη λειτουργία του EMCCD με δύο τρόπους.

Αρχικά για να αυξήσουμε την πιθανότητα παραγωγής ενός δεύτερου ηλεκτρονίου, αυξάνουμε την ενέργεια του αρχικού ηλεκτρονίου, επιταχύνοντάς το με εφαρμογή υψηλότερης τάσης χρονισμού. Δεύτερον η EMCCD είναι σχεδιασμένη με τέτοιο τρόπο, ώστε να διαθέτει εκατοντάδες κελιά, στα οποία μπορούν να συμβούν φαινόμενα ιονισμού από κρούση, οπότε ακόμα και αν η πιθανότητα ενίσχυσης ή πολλαπλασιασμού είναι μικρή σε ένα μεμονωμένο κελί, για το σύνολο των κελιών σε όλη την έκταση του καταχωρητή, αυτή η πιθανότητα είναι πολύ μεγάλη και μπορεί να επιτευχθεί κέρδος ενίσχυσης έως και χίλιες φορές. Η πιθανότητα πολλαπλασιασμού του φορτίου ποικίλει σε σχέση με την θερμοκρασία και συγκεκριμένα, όσο μικρότερη είναι η θερμοκρασία τόσο μεγαλύτερη είναι αυτή η πιθανότητα και συνεπώς τόσο μεγαλύτερη είναι η ενίσχυση του σήματος. Η πιθανότητα αυξάνεται επίσης με την αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης στον καταχωρητή πολλαπλασιασμού (σχήμα 3), [4].

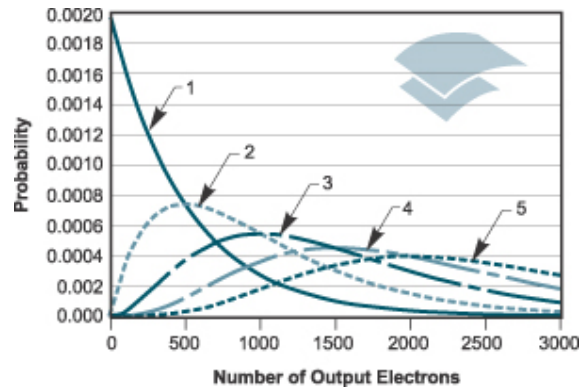


**Σχήμα 3:** Διάγραμμα του κέρδους ενίσχυσης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και την εφαρμοζόμενη τάση στην οποία επιταχύνονται τα ηλεκτρόνια.

Με την κατάλληλη ρύθμιση της θερμοκρασίας και της τάσης που εφαρμόζεται στον αισθητήρα, η EMCCD κάμερα είναι ικανή να επιτύχει πρακτικό κέρδος ενίσχυσης, από μερικές μονάδες έως και χιλιάδες, με εφαρμογή τάσης 20-50 V, ανάλογα με τον αισθητήρα.

### ΘΟΡΥΒΟΣ ΚΑΙ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΕΝΟΣ EMCCD

Οι EMCCD κάμερες ανήκουν στην ίδια ποικιλία ανιχνευτών όπως και οι απλές CCD και ως εκ τούτου παρουσιάζουν ανάλογες ιδιότητες και κβαντικές επιδόσεις. Επίσης παρουσιάζουν ανάλογη συμπεριφορά ως προς τα θέματα θορύβου με μια μόνο διαφορά. Η διαδικασία ενίσχυσης προσθέτει επιπλέον θόρυβο ο οποίος πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν και οδηγεί σε έναν παράγοντα θορύβου μεγαλύτερο της μονάδας. Το ακριβές κέρδος ενίσχυσης ενός φορτίου που εισέρχεται στον καταχωρητή πολλαπλασιασμού ενός αισθητήρα EMCCD, είναι αδύνατον να το γνωρίζουμε αφού οι διαδικασίες ενισχύσεως υπόκεινται στην στατιστική. Μπορούμε όμως να υπολογίσουμε την πιθανότητα κατανομής του φορτίου στην έξοδο για δοσμένο φορτίο στην είσοδο. Στο σχήμα (4), [4], έχει σχεδιασθεί το διάγραμμα της πιθανότητας απόκτησης μιας συγκεκριμένης τιμής φορτίου στην έξοδο, για διάφορες τιμές εισόδου, σε έναν τυπικό EM καταχωρητή με κέρδος περίπου 500.



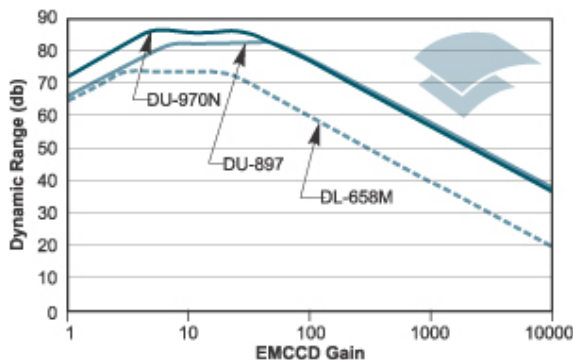
**Σχήμα 4:** Διάγραμμα της πιθανότητας των διαφόρων τιμών εξόδου, για συγκεκριμένες τιμές σήματος, σε έναν EM καταχωρητή ενίσχυσης, με κέρδος περίπου 500.

Για την μέτρηση ενός σήματος εξόδου 1000 ηλεκτρονίων, μπορούμε να δούμε από το διάγραμμα, ότι υπάρχει εύλογη πιθανότητα το σήμα εξόδου που προκύπτει, να προέρχεται είτε από 1,2,3,4 ή ακόμα και 5 ηλεκτρόνια στην είσοδο. Για υψηλές απολαβές (μεγαλύτερες από 30), αυτή η αβεβαιότητα, εισάγει μία πρόσθετη συνιστώσα θορύβου (σε σχέση με τα κλασικά CCDs), η οποία εξαρτάται από το σήμα εισόδου. Στο όριο που έχουμε ρυθμό πρόσπτωσης μικρότερο από  $1e/\text{pixel}$  σε μία έκθεση, η EMCCD μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καταμετρητής φωτονίων. Σε αυτή την περίπτωση, τίθεται στον ενισχυτή ένα κατώτερο όριο, πάνω από τη συνήθη κατάσταση λειτουργίας ανάγνωσης του ενισχυτή, ώστε κάθε γεγονός (μέτρησης ηλεκτρονίου) να υπολογίζεται ως μεμονωμένο φωτόνιο. Σε αυτή τη λειτουργία, με ένα κατάλληλο υψηλό κέρδος, μπορεί να

καταμετρηθεί ένα επίσης υψηλό ποσοστό (μεγαλύτερο από 90%) γεγονότων πρόσπτωσης φωτονίων, χωρίς να επηρεαστούν από την επίδραση του παράγοντα θορύβου.

### ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ EMCCD

Το κέρδος ενίσχυσης της EMCCD περιπλέκει τον προσδιορισμό της δυναμικής περιοχής της κάμερας. Αρχικά καθώς εφαρμόζεται το κέρδος ενίσχυσης EM, η δυναμική περιοχή αυξάνεται. Το κέρδος EM μειώνει την επίδραση του θορύβου ανάγνωσης, αλλά η μεγαλύτερη χωρητικότητα στον καταχωρητή, μπορεί να φιλοξενήσει το ενισχυμένο σήμα. Όταν πλέον ο καταχωρητής δεν μπορεί να φιλοξενήσει το ενισχυμένο σήμα ενός pixel, η δυναμική περιοχή σταθεροποιείται. Αν το κέρδος είναι επαρκές για την μείωση του θορύβου κάτω από τα επίπεδα του ενός φωτονίου, τότε η δυναμική περιοχή μειώνεται κατά πολύ (σχήμα 5), [4].



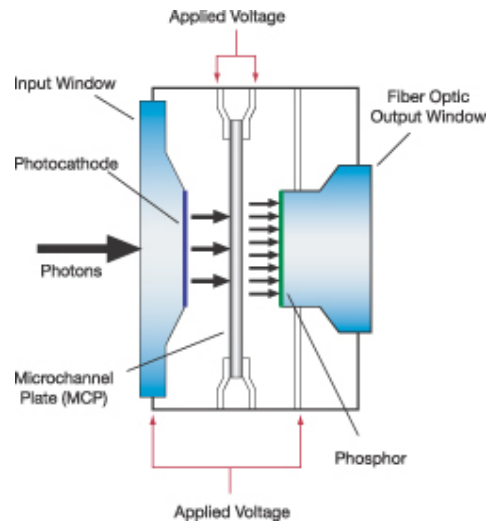
**Σχήμα 5:** Διάγραμμα της μεταβολής της δυναμικής περιοχής ενός EMCCD, σε σχέση με το κέρδος.

### 5.2 ICCD [Intensified CCD]

Τα εντατικοποιημένα CCD (intensified CCD's), είναι κάμερες που μπορούν επίσης να εκμεταλλευτούν το κέρδος ενίσχυσης για να ξεπεράσουν το όριο του θορύβου ανάγνωσης, αλλά έχουν το επιπλέον πλεονέκτημα της λειτουργίας σε πολύ μεγαλύτερες συχνότητες, ως προς την εφαρμογή των τάσεων χρονισμού στις πύλες (gating). Η δημιουργία πύλης και η ενίσχυση συμβαίνουν μέσα στο σωλήνα ενίσχυσης εικόνας (Photo – Multiplier Tube, PMT), ο οποίος είναι ένας σωλήνας κενού, που περιλαμβάνει μια φωτοκάθοδο, μια πλάκα μικροδιαύλων (MCP, Micro Channel Plate) και μια οθόνη φωσφόρου, οι ιδιότητες των οποίων καθορίζουν και την απόδοση της διάταξης.

Η φωτοκάθοδος είναι τοποθετημένη στην εσωτερική επιφάνεια ενός παραθύρου από το οποίο εισέρχεται το φως (σήμα). Όταν ένα φωτόνιο προσπίπτει στη φωτοκάθοδο, εκπέμπεται ένα

φωτοηλεκτρόνιο, το οποίο στη συνέχεια έλκεται προς την πλάκα MCP από ένα ηλεκτρικό πεδίο, όπως φαίνεται στο σχήμα 6, [4].

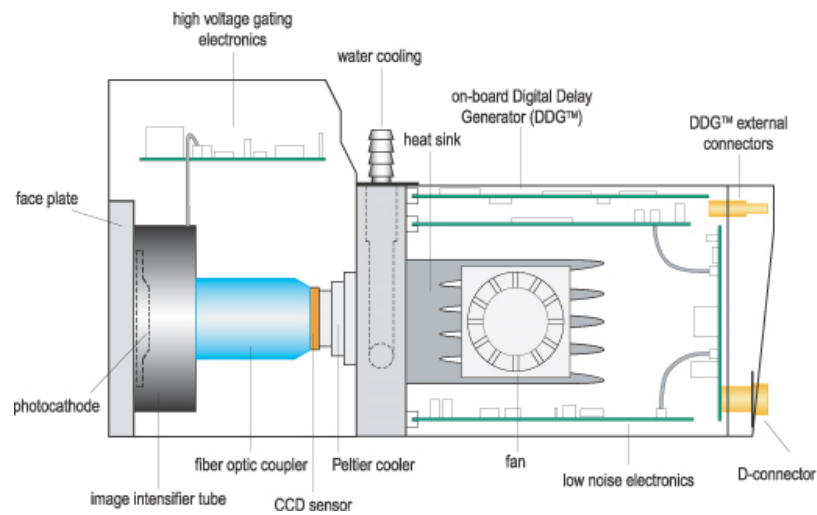


**Σχήμα 6:** Σωλήνας κενού με την φωτοκάθοδο, την πλάκα μικροδιαύλων και την οθόνη φωσφόρου σε έναν ενισχυτή εικόνας PMT.

Το μικροδιαυλικό πλακίδιο (MCP) είναι ένας λεπτός δίσκος (πάχους περίπου 1 mm), το οποίο περιέχει κυψελοειδείς δομές από διαύλους γυαλιού, τυπικού μεγέθους 6-10mm, καθένα από τα οποία διαθέτει επίστρωση αντίστασης. Ένα υψηλό δυναμικό που εφαρμόζεται σε όλη την έκταση του MCP, επιτρέπει στα φωτοηλεκτρόνια να επιταχυνθούν κατά μήκος ενός καναλιού του δίσκου. Όταν ένα επιταχυνόμενο φωτοηλεκτρόνιο αποκτήσει αρκετή ενέργεια, παράγει δευτερεύοντα ηλεκτρόνια από τα τοιχώματα των καναλιών, τα οποία με όμοιο τρόπο συμπαρασύρουν επι πλέον ηλεκτρόνια, έτσι ώστε στην έξοδο του MCP να παράγεται ένα σύννεφο ηλεκτρονίων. Με αυτή τη διαδικασία μπορεί εύκολα να επιτευχθεί κέρδος πάνω από 10.000. Το ποσοστό του πολλαπλασιασμού των ηλεκτρονίων εξαρτάται από την τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης απολαβής (gain voltage) στην πλάκα MCP, η οποία είναι ελεγχόμενη. Η έξοδος του ενισχυτή εικόνας συνδέεται με το CCD συνήθως χρησιμοποιώντας ένα ζεύγος οπτικών ινών, όπως φαίνεται στο σχήμα 7, [4].

Τα ζεύγη οπτικών ινών είναι από τη φύση τους συμπαγή, με χαμηλά επίπεδα οπτικής παραμόρφωσης. Έτσι, λόγω της υψηλής απόδοσης του συστήματος των οπτικών ινών, ο ενισχυτής εικόνας μπορεί να λειτουργεί σε χαμηλότερα κέρδη και αυτό με τη σειρά του έχει ως αποτέλεσμα καλύτερες επιδόσεις ως προς τη δυναμική περιοχή της κάμερας (καλύτερη από 15-bit), λόγω της ενίσχυσης. Μια εναλλακτική μέθοδος σύνδεσης, είναι η χρήση φακού ζεύξης μεταξύ της εξόδου του ενισχυτή εικόνας και του CCD (lens – coupled ICCD). Αυτή η μέθοδος ζεύξης έχει το

πλεονέκτημα ότι καθιστά δυνατή τη μετακίνηση του ενισχυτή εικόνας, επιτρέποντας έτσι τη χρήση της CCD και σε άλλες εφαρμογές χωρίς ενίσχυση.



**Σχήμα 7:** Δομή ενός ICCD (Intensified CCD).

Με έναν κατάλληλο, υψηλής απόδοσης ενισχυτή εικόνας, η διάταξη ζεύξης με φακό, μπορεί επίσης να παράγει καλύτερη ποιότητα εικόνας, καθώς έτσι απαλλασσόμαστε από τις διακυμάνσεις και τις κηλίδες που προκύπτουν στην εικόνα, λόγω της μετάδοσης του σήματος από τη μία οπτική ίνα στην άλλη. Μειονεκτήματα της μεθόδου ζεύξης με φακό είναι το μεγάλο μέγεθός τους, χαμηλότερη απόδοση ζεύξης και αύξηση της διασποράς του σήματος.

Για την λειτουργία του ενισχυτή εικόνας απαιτούνται εξειδικευμένες διατάξεις παροχής ρεύματος, αφού για την επίτευξη πολύ μικρών χρονικών διαστημάτων χρονοισμού των πυλών (gating), απαιτείται η δημιουργία υψηλής τάσης παλμών (200 V) με διάρκεια της τάξεως του 1ns.

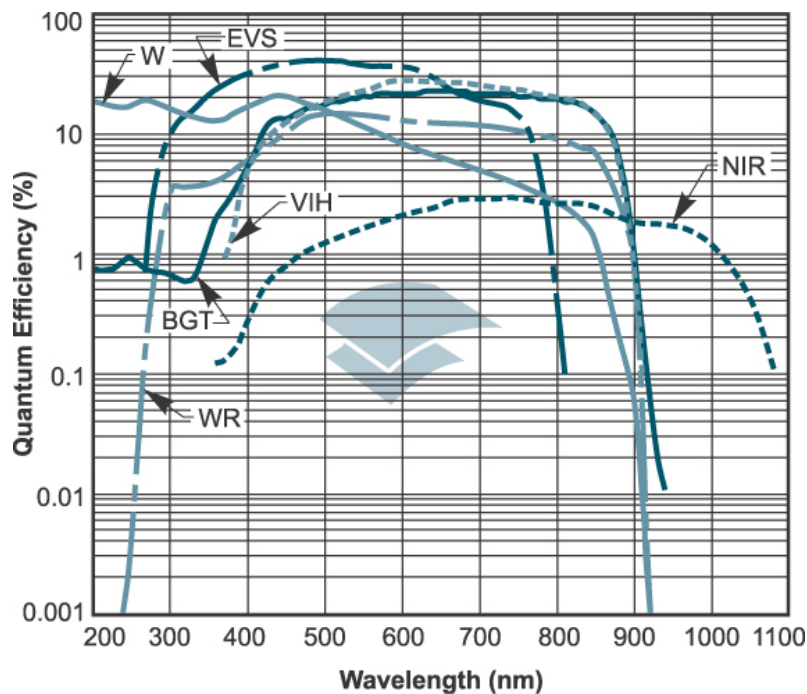
Για τη ρύθμιση του κέρδους, πρέπει να εφαρμόζεται μια σταθερή τάση στη πλάκα του MCP, συνήθως της τάξης των 600 έως 900 volt, ενώ για τη λήψη εικόνων υψηλής ευκρίνειας πρέπει η τάση στην οθόνη φωσφόρου να είναι κατά κανόνα 4KV έως 8KV, ανάλογα με το είδος του φωσφόρου και του σωλήνα. Η φασματική απόκριση ενός ICCD καθορίζεται κυρίως από το υλικό της φωτοκαθόδου στον ενισχυτή εικόνας. Υπάρχει πλήθος ενισχυτών εικόνας που χρησιμοποιούνται στις επιστημονικές εφαρμογές, οι οποίοι έχουν ταξινομηθεί σε σχέση με τη χρήση τους σε στρατιωτικές εφαρμογές, όπου αρχικά αναπτύχθηκε η εφαρμογή τους.

Οι πρώτοι ενισχυτές εικόνας είχαν ταξινομηθεί ως 'Gen II intensifiers' (Γενικός II ενισχυτής). Οι ενισχυτές Gen I χρησιμοποιούσαν διαφορετική κατασκευή, στην οποία δεν διέθεταν την πλάκα MCP και πλέον δεν χρησιμοποιούνται ευρέως. Οι Gen II διαθέτουν φωτοκάθοδο από Bi ή μείγμα αλκαλίων (multi alkali). Ένα νέο μοντέλο Gen III αντικαθιστά τώρα τον Gen II περισσότερο στις

στρατιωτικές εφαρμογές, στο οποίο χρησιμοποιείται φωτοκάθοδος ημιαγωγού. Μια ακόμα πιο πρόσφατη εξέλιξή τους που έχει αναπτυχθεί είναι οι ενισχυτές ‘Gen III filmless photocathodes’. Όλοι αυτοί οι ενισχυτές εικόνες χρησιμοποιούνται ευρέως σε επιστημονικές εφαρμογές απεικόνισης ή φασματοσκοπίας, λόγω των πολύ σημαντικών ιδιοτήτων τους, που περιγράφονται πιο κάτω.

### ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ( $Q_E$ ) ΤΟΥ GEN II ΕΝΙΣΧΥΤΗ

Ένα Gen II ICCD έχει ενσωματωμένη μία φωτοκάθοδο από Bi ή μείγμα αλκαλίων, στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούνται επίσης στους φωτοπολλαπλασιαστές. Η φωτοκάθοδος στα Gen II συνήθως προσαρμόζεται σε ένα παράθυρο από χαλαζία, το οποίο επιτρέπει την επέκταση στην απόκριση της φωτοκαθόδου στο υπεριώδες (περίπου έως τα 180nm). Το παράθυρο χαλαζία μπορεί να αντικατασταθεί από ένα παράθυρο φθοριούχου μαγνησίου, ώστε η απόκριση να φτάνει έως τα 120nm. Το μείγμα και το πάχος της φωτοκαθόδου μπορούν να ρυθμιστούν κατάλληλα για τη βελτιστοποίηση της φωτοαπόκρισης σε διαφορετικές φασματικές περιοχές. Για παράδειγμα η Andor προσφέρει τρεις βασικές επιλογές ενός ενισχυτή εικόνας Gen II, τον ‘w’, τον ‘wr’ και τον ‘wu’, οι οποίοι παρουσιάζουν βελτιστοποιημένη απόκριση για το ορατό, για το εγγύς υπέρυθρο και για το υπεριώδες τμήμα του φάσματος αντίστοιχα (σχήμα 8), [4].



**Σχήμα 8:** Διάγραμμα στο οποίο παρουσιάζονται οι κβαντικές αποδόσεις των διαφόρων τύπων Gen II ICCD.

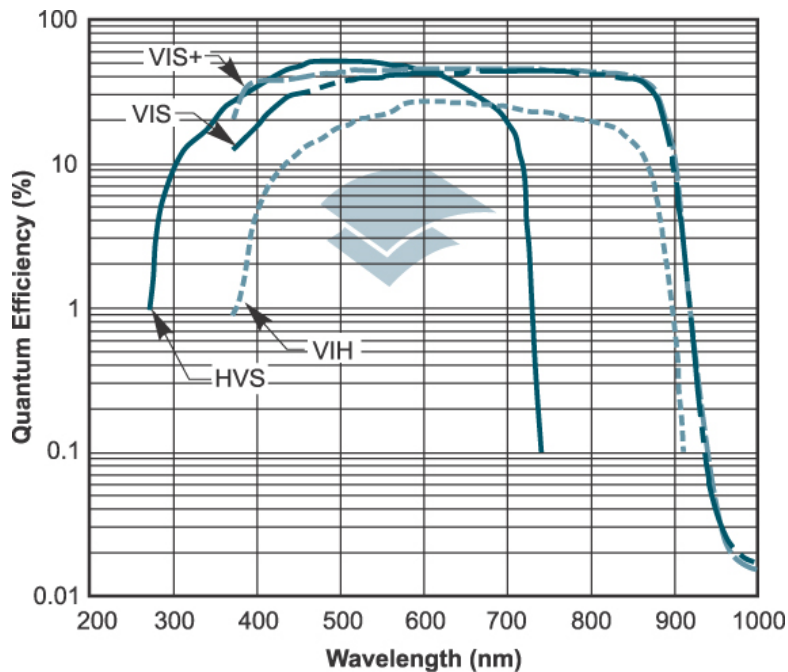
### **ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ GEN III Filmed and Filmless ΕΝΙΣΧΥΤΗ**

Ένας Gen III ενισχυτής εικόνας διαθέτει ενσωματωμένη μια φωτοκάθοδο από ημιαγωγό γαλλίου – αρσενικού (GaAs). Αυτή η φωτοκάθοδος διατίθεται σε ένα μόνο είδος γυάλινου παραθύρου, που περιορίζει τη φωτοαπόκριση σε μήκη κύματος μεγαλύτερα από 350nm, ενώ παρέχει πολύ καλή απόκριση στο ορατό και στο εγγύς υπέρυθρο τμήμα του φάσματος.

Επίσης, είναι πολύ λεπτή, ευαίσθητη και παρουσιάζονται φαινόμενα συσσώρευσης προσμείξεων στο σωλήνα ενίσχυσης, με αποτέλεσμα τη δυσλειτουργία της κατά τη χρήση σε δυσμενών συνθηκών, όπως για παράδειγμα σε στρατιωτικές εφαρμογές. Για την προστασία της φωτοκαθόδου, χρησιμοποιείται μια λεπτή επίστρωση αλουμινίου στην επιφάνεια της MCP, η οποία αποτρέπει την επιτάχυνση ιόντων πρόσμιξης πίσω από την MCP, κι ως εκ τούτου επιμηκύνεται η διάρκεια ζωής του ενισχυτή εικόνας. Ωστόσο, το προστατευτικό αυτό στρώμα έχει ένα μειονέκτημα, δεδομένου ότι εμποδίζει και την κίνηση των φωτοηλεκτρονίων που εκπέμπονται από την κάθοδο, πρόβλημα το οποίο για να ξεπεραστεί απαιτείται η εφαρμογή πολύ υψηλότερης τάσης (της τάξης των 1000V), σε σχέση με την τάση σε ένα ενισχυτή Gen II (όπου η αντίστοιχη τιμή τάσης είναι περίπου 200V).

Γενικά δυο είναι οι συνέπειες της ύπαρξης του προστατευτικού στρώματος. Αφενός αυξάνει το παράγοντα θορύβου, που προκύπτει από την διαδικασία ενίσχυσης και ως εκ τούτου περιορίζει το SNR, αφετέρου η εφαρμοζόμενη υψηλότερη τάση καθιστά δυσκολότερη την επίτευξη μικρών χρόνων gating, με αποτέλεσμα ο Gen III να είναι 2-3 φορές πιο αργός από ένα Gen II ενισχυτή εικόνας.

Ένας Gen III filmless ενισχυτής εικόνας, περιλαμβάνει επίσης φωτοκάθοδο κατασκευασμένη από ημιαγωγό γαλλίου – αρσενικού (GaAs), αλλά συνήθως έχει βελτιστοποιημένη φωτοαπόκριση σε συγκεκριμένες φασματικές περιοχές, με τη μέθοδο της κατάλληλης ρύθμισης του πάχους και των συστατικών της φωτοκαθόδου. Η φωτοκάθοδος επίσης διατίθεται με παράθυρο από γυαλί με μεγάλο φασματικό εύρος ώστε να επιτρέπει καλύτερη απόκριση στο κυανό τμήμα. Όπως υποδηλώνει το όνομά του είναι ένας Gen III χωρίς προστατευτικό στρώμα στη πλάκα MCP, αφού με την βελτίωση των διαδικασιών παραγωγής δεν τίθεται πλέον ζήτημα για το χρόνο ζωής των επιστημονικών Gen III filmless ICCDs. Η αφαίρεση του προστατευτικού καλύμματος εξαλείφει και τα προβλήματα του υψηλότερου παράγοντα θορύβου καθώς και του αργού gating. Η Andor προσφέρει δυο Gen III filmless, έναν ο οποίος είναι ρυθμιζόμενος για καλύτερη απόκριση στο ορατό και στο εγγύς υπέρυθρο VIH (360-910nm) κι έναν με καλύτερη απόκριση στο ορατό και στο κυανό τμήμα HVS (279-740nm), σχήμα 9, [4].



**Σχήμα 9:** Διάγραμμα στο οποίο παρουσιάζονται οι κβαντικές αποδόσεις των διαφόρων τύπων Gen III και Gen III filmless ICCD.

### ΘΟΡΥΒΟΣ ΚΑΙ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΕΝΟΣ ICCD

Ο θόρυβος κατ' επέκταση ενός ICCD καθορίζεται από τον ενισχυτή εικόνας που διαθέτει. Η ενίσχυση του σήματος είναι τέτοια ώστε ο θόρυβος από το υπόλοιπο τμήμα της κάμερας δεν είναι πλέον ο κυρίαρχος. Συνεπώς ένα ICCD μπορεί να θεωρηθεί σαν μια κάμερα, στην οποία ο θόρυβος ανάγνωσης είναι σχεδόν αμελητέος. Βέβαια θα υπάρχει ακόμα ο θερμοϊονικός θόρυβος, ο οποίος επειδή δημιουργείται και στην φωτοκάθοδο θα ενισχύεται επίσης μαζί με το σήμα. Το ρεύμα σκότους στους ενισχυτές εικόνας παραδοσιακά ονομάζεται EBI (effective background illumination) και δεν αποτελεί κυρίαρχη συνιστώσα θορύβου όταν εφαρμόζουμε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα χρονισμού των πυλών (gating).



## ΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΥΛΩΝ (GATING)

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των ICCD έναντι των EMCCD και των CCD είναι οι οπτικές τους ιδιότητες ως προς τη λειτουργία του κλείστρου τους (shuttering).

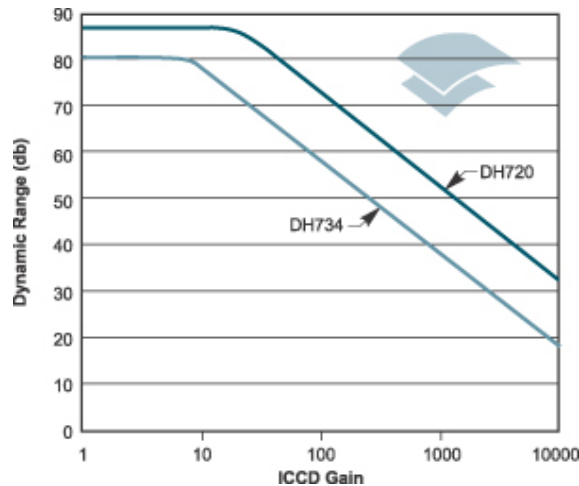
Ο ενισχυτής εικόνας μπορεί να λειτουργήσει ως ένας πολύ γρήγορος οπτικός διακόπτης, συλλαμβάνοντας ένα οπτικό σήμα σε δισεκατομμυριοστά του δευτερολέπτου. Με την εφαρμογή αρνητικής τάσης ανάμεσα στη φωτοκάθοδο και στη MCP, συνήθως μικρότερη των  $-150\text{V}$  για έναν Gen II, τα παραγόμενα φωτοηλεκτρόνια απομακρύνονται άμεσα από τη φωτοκάθοδο και κατά μήκος του ενδιάμεσου χάσματος, κατευθυνόμενα στη MCP όπου ενισχύονται. Σε αυτή τη κατάσταση ο ενισχυτής είναι 'gated on'. Ύστερα με εφαρμογή μιας μικρής θετικής τάσης, συνήθως  $50\text{V}$ , τα φωτοηλεκτρόνια δεν μπορούν να διασχίσουν το χάσμα όπου σε αυτή τη κατάσταση ο ενισχυτής είναι 'gated off'. Ο ελάχιστος χρόνος μεταξύ δυο καταστάσεων 'on' και 'off' του ενισχυτή (minimum gate time), εξαρτάται από διάφορους παράγοντες αλλά κυρίως σχετίζεται με τη δομή της φωτοκαθόδου και τα ηλεκτρονικά κυκλώματα του gating. Οι Gen III filmless μπορούν να φτάσουν σε χρόνους gating μικρότερους από  $2\text{nsec}$ , ενώ οι Gen III filmed είναι πιο αργοί, συνήθως με χρόνους άνω των  $5\text{nsec}$ . Οι Gen II είναι ακόμα πιο αργοί, με χρόνους gating συνήθως  $5\text{nsec}$ , αλλά εφαρμόζοντας ένα λεπτό υπόστρωμα μετάλλου, είναι δυνατό να φτάσουν σε χρόνους μικρότερους των  $2\text{nsec}$ , θυσιάζοντας όμως έτσι κατά ένα ποσοστό, τις επιδόσεις της καθόδου ως προς την κβαντική της απόδοση.

Στους Gen II και III filmless ενισχυτές υπάρχουν ειδικές μονάδες κυκλωμάτων, που καθιστούν δυνατή την επιλογή του επιθυμητού χρόνου gating σε  $\text{nsec}$ , έτσι ώστε ο ενισχυτής να λειτουργεί κατ' επιλογή μας είτε σε συχνότητα  $50\text{KHZ}$  σε απλές εφαρμογές, είτε σε συχνότητα  $500\text{KHZ}$  για ειδικές εφαρμογές.

Παρόλο που μια κάμερα CCD δεν μπορεί να λειτουργεί σε αυτούς τους ρυθμούς ανάγνωσης, υπάρχουν πλεονεκτήματα στην ανεξάρτητη λειτουργία και επιλογή του χρόνου πύλης, στον ενισχυτή εικόνας. Το πλεονέκτημα έγκειται στο γεγονός ότι είναι δυνατή η δειγματοληψία και η ενίσχυση επαναλαμβανόμενων σημάτων από τον ενισχυτή εικόνας, τα οποία στην έξοδό του, πάνω στο CCD θα αθροίζονται και θα διαβάζονται σαν ένα πιο ισχυρό σήμα, το οποίο διαφορετικά δεν θα μπορούσε να ανιχνευθεί.

## ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ

Η δυναμική περιοχή ενός ICCD, διέπεται από τη δυναμική περιοχή του τμήματος του CCD και ποικίλλει ανάλογα με την απολαβή στον ενισχυτή εικόνας. Μία υψηλότερη δυναμική περιοχή του CCD που χρησιμοποιείται στην ICCD θα έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη δυναμική περιοχή του ICCD. Καθώς το κέρδος ενίσχυσης αυξάνεται, τα ασθενέστερα σήματα που μπορούν να ανιχνευθούν, αντισταθμίζονται από τον ελάχιστο θόρυβο ανάγνωσης, ώστε η δυναμική περιοχή να παραμένει σταθερή. Όταν ο θόρυβος ανάγνωσης φτάσει κάτω από το επίπεδο ενός φωτονίου η δυναμική περιοχή του ICCD αρχίζει να ελαττώνεται με την περαιτέρω αύξηση της απολαβής. Στο διάγραμμα του σχήματος 10, [4], μπορούμε να διακρίνουμε πως η δυναμική περιοχή του CCD καθορίζει το αρχικό δυναμικό εύρος της κάμερας ICCD.



**Σχήμα 10:** Διάγραμμα της δυναμικής περιοχής ενός ICCD σε σχέση με το κέρδος ενίσχυσης.

## ΡΥΘΜΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ [FRAME RATES]

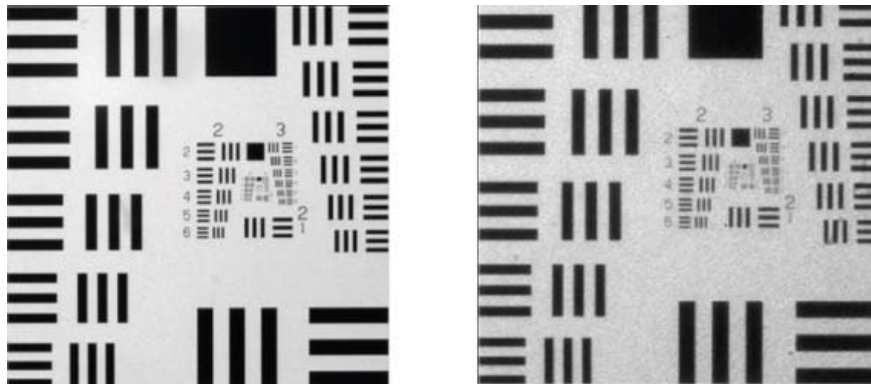
Ο ρυθμός μεταφοράς των δεδομένων μιας εικόνας, διέπεται από τις προδιαγραφές του CCD. Ιδιαίτερα από το πλήθος των pixels και από τον ρυθμό ανάγνωσης. Ένα σημείο που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, είναι η επιλογή του φωσφόρου για λειτουργία σε υψηλούς ρυθμούς λήψης. Το πρότυπο φωσφόρο που χρησιμοποιείται στον ενισχυτή εικόνας ενός ICCD ονομάζεται 'P43'. Αυτός ο τύπος φωσφόρου έχει τη βέλτιστη απόδοση φωτός στην έξοδο την οποία πρέπει να ανιχνεύει ένα CCD, ενώ συνάμα έχει σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής. Κατά την εκπομπή του το φως αποσυντίθεται κι ένα ποσοστό της συνολικής του τιμής καθυστερεί (μένει πίσω).

Σε χρόνο 1 msec υφίσταται 10% διάσπαση, ενώ σε 10 msec η διάσπαση είναι περίπου 1%. Έτσι, αν εφαρμόσουμε λειτουργία υψηλού ρυθμού ανάγνωσης, στην οποία διαβάζονται 100 πλαίσια/sec, τότε 1% του σήματος από το πρώτο καρέ θα εμφανιστεί στο δεύτερο κ.ο.κ.

Για να εξαλείψουμε την επίδραση αυτού του φαινομένου, κατά το χρόνο ολοκλήρωσης είναι προτιμότερο να χρησιμοποιήσουμε ένα γρηγορότερο φώσφορο, όπως P46, ο οποίος εκπέμπει φως διασπώμενο κατά 10% σε 100 nsec και 1% σε 2 msec, οπότε η επικάλυψη των σημάτων κατά την ανάγνωσή τους είναι αμελητέα. Η εκπομπή φωτός του P46 δεν είναι η βέλτιστη αλλά αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί με την αύξηση της απολαβής στον ενισχυτή εικόνας.

### ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ [RESOLUTION]

Η ICCD κάμερες έχουν χαμηλότερη ανάλυση από την κλασική CCD, όπως φαίνεται από το σχήμα 11, [16]. Στον ενισχυτή εικόνας τόσο η πλάκα MCP όσο και ο φώσφορος, υποβαθμίζουν το MTF (Modulation Transfer Function) σε τέτοιο επίπεδο που ακόμα κι ένα γυμνό CCD θα είχε. Με πιο πρόσφατες τεχνικές κατά την εναπόθεση λεπτότερου στρώματος φωσφόρου, που μειώνουν τις ανομοιομορφίες και ελαττώνουν τις σπές στην πλάκα MCP, η ανάλυση βελτιώνεται σημαντικά, αλλά συνήθως περιορίζεται σε ανάλυση μικρότερη από 60 ζεύγη γραμμών ανά mm (60 line pairs/mm).



**Σχήμα 11:** Ανάλυση ενός κλασικού CCD (αριστερά) και ενός ICCD (δεξιά).

### 5.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ CCD EMCCD και ICCD

Για να γίνει πιο λεπτομερής σύγκριση μεταξύ των CCD , EMCCD και ICCD καμερών, πρέπει να επεκτείνουμε την ανάλυση του SNR που αναπτύχθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, ώστε να συμπεριλάβουμε και μια επιπλέον παράμετρο η οποία αναφέρεται ως παράγοντας θορύβου (Noise Factor, F ).

Σε οποιαδήποτε διαδικασία ενίσχυσης ενός σήματος, ενισχύεται παράλληλα και ο θόρυβος που έχει ενσωματωθεί στο σήμα. Η επιπλέον, πέραν της αναμενόμενης αύξησης του προϋπάρχοντος θορύβου κατά την διαδικασία ενίσχυσης αντιπροσωπεύεται, από τον παράγοντα θορύβου F ο οποίος ορίζεται ως εξής :

$$F^2 = \frac{N_{out}^2}{M^2 \cdot N_{in}^2}$$

Όπου M είναι το κέρδος της ενίσχυσης  
 $N_{in}$  ο συνολικός θόρυβος στο σήμα πριν την ενίσχυση  
 $N_{out}$  ο θόρυβος στην έξοδο του ενισχυτή που οφείλεται μόνο στην ενίσχυση του  $N_{in}$

Ένας ιδανικός ενισχυτής , θα είχε παράγοντα θορύβου  $F=1$ . Έτσι μια πιο ακριβής έκφραση για το SNR , σε σχέση με αυτή που αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, προκειμένου η σύγκριση μεταξύ των τριών τύπων CCD να είναι αξιόπιστη, είναι η εξής :

$$SNR = \frac{M \cdot S}{F^2 \cdot M^2 (N_p^2 + N_B^2 + N_D^2 + N_C^2) + N_R^2}$$

Η

$$SNR = \frac{S}{F^2 \cdot (N_p^2 + N_B^2 + N_D^2 + N_C^2) + \frac{N_R^2}{M^2}}$$

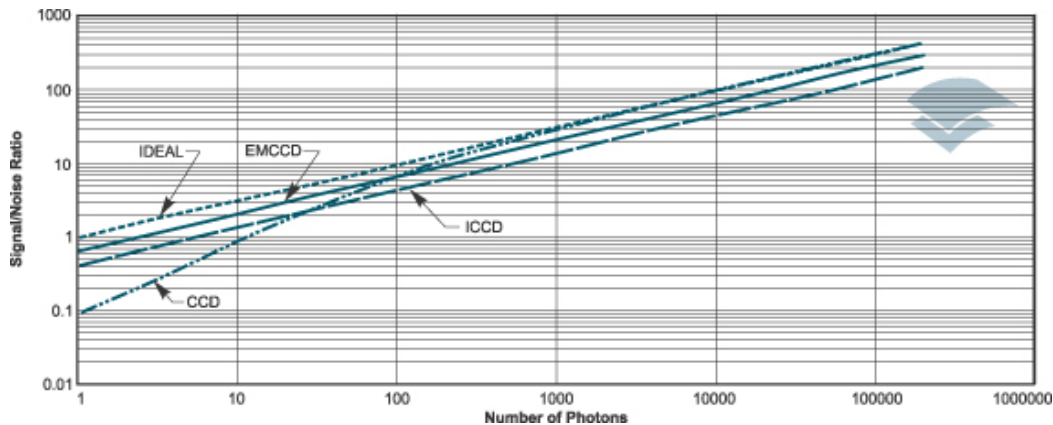
Όπου S το σήμα  
 $N_p$  ο φωτονικός θόρυβος  
 $N_B$  ο θόρυβος υποβάθρου  
 $N_D$  ο θερμοϊονικός θόρυβος  
 $N_C$  Ο θόρυβος χρονισμού  
 $N_R$  ο θόρυβος ανάγνωσης

Να σημειωθεί ότι οι συνιστώσες θορύβου  $N_p$ ,  $N_B$ ,  $N_D$  και  $N_C$  υπεισέρχονται στο σήμα πριν την ενίσχυσή του και ως εκ τούτου πολλαπλασιάζονται με το κέρδος ενίσχυσης  $M$  καθώς επίσης και με τον παράγοντα θορύβου  $F$ .

Με χρήση της προηγούμενης εξίσωσης και τις παραμέτρους που αναφέρονται στον πίνακα 1, τα αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ CCD, EMCCD και ICCD δεικνύονται στο διάγραμμα του σχήματος 12, [16].

	Ideal	CCD	EMCCD	ICCD
Κβαντική Απόδοση ( $Q_E$ )	100%	93%	93%	50%
Θόρυβος Ανάγνωσης	0	10	60	20
Απολαβή	1	1	1,000	1,000
Spurious Noise	0	0,05	0,05	0
Θόρυβος Σκότους	0	0,001	0,001	0,001
Παράγοντας Θορύβου	1	1	1,46	1,6

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1:** Χαρακτηριστικά των CCD, EMCCD και ICCD σε σχέση με τις ιδανικές τιμές.



**Σχήμα 12:** Διάγραμμα σύγκρισης του SNR, μεταξύ CCD, EMCCD και ICCD.

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα, στο όριο των χαμηλών σημάτων φωτός και επίσης χαμηλών τιμών SNR, οι κάμερες EMCCD και ICCD έχουν την υψηλότερη ευαισθησία και μπορούν να επιτύχουν ανίχνευση με  $SNR > 1$ , για επίπεδα φωτισμού μικρότερα από 10 φωτόνια ανά pixel. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα των EMCCD και των ICCD, είναι η μεγαλύτερη ταχύτητα ανάγνωσης, με αποτέλεσμα ένα σήμα να μπορεί να ανιχνευτεί από 10 έως και 100 φορές πιο γρήγορα σε

σύγκριση με μια απλή CCD. Κατά την λειτουργία ολοκλήρωσης η EMCCD υπερέχει της ICCD καθότι έχει υψηλότερη κβαντική απόδοση και χαμηλότερο παράγοντα θορύβου. Για υψηλότερες τιμές SNR, καθώς η ένταση του ανιχνευόμενου σήματος αυξάνεται, η CCD αρχίζει να υπερέχει σε επιδόσεις έναντι των EMCCD και ICCD και έχοντας σχεδόν τέλει παράγοντα θορύβου ( $F \approx 1$ ) όπως επίσης και κβαντική απόδοση, προσεγγίζει πολύ γρήγορα τις επιδόσεις ενός ιδανικού ανιχνευτή. Η EMCCD μπορεί να τεθεί σε λειτουργία όμοια με ενός απλού CCD, μειώνοντας το κέρδος ενίσχυσης στη μονάδα και με μικρότερη ταχύτητα ανάγνωσης, ώστε να επιτυγχάνει αντίστοιχες αποδόσεις.

Στο όριο των πολύ χαμηλών σημάτων, για ροή φωτονίων μικρότερο από 1 φωτόνιο ανά pixel (κατά μέσο όρο) σε κάθε γεγονός ανάγνωσης, τα EMCCD και ICCD μπορούν να τεθούν σε λειτουργία καταμέτρησης φωτονίων σε αντίθεση με τα CCD. Λόγω της υψηλότερης κβαντικής απόδοσης, τα EMCCD υπερέχουν των ICCD's, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να συμβεί και το αντίστροφο, αν ο ενισχυτής εικόνας της ICCD έχει χαμηλότερο EBI (Effective Background Illumination), από τον θόρυβο μιας EMCCD που οφείλεται στον ιονισμό από κρούση. Στο όριο των πολύ ασθενών σημάτων, παρατηρούμε ότι το SNR μιας CCD είναι πολύ μικρό, λόγω της σταθερής τιμής του θορύβου ανάγνωσης, περιορισμός που διατηρείται έως ότου η ένταση της φωτεινής ροής αυξηθεί τόσο ώστε η τετραγωνική ρίζα του σήματος να γίνει μεγαλύτερη από τον θόρυβο ανάγνωσης (οπότε το SNR θα περιορίζεται από τον φωτονικό θόρυβο).

Άρα γενικά τα EMCCD και τα ICCD υπερέχουν στην ανίχνευση εξαιρετικά ασθενών σημάτων αφού λόγω του κέρδους ενίσχυσης ξεπερνούν τον περιορισμό του SNR από τον θόρυβο ανάγνωσης.

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα συστατικά των διατάξεων ενίσχυσης στις EMCCD και στις ICCD (όπως για παράδειγμα ο καταχωρητής ενίσχυσης και η πλάκα MCP) παρουσιάζουν φθίνουσα απόδοση με την χρονική διάρκεια χρήσης τους. Η ρυθμός ελάττωσης της απόδοσής τους είναι μεγαλύτερος κατά τη λειτουργία με υψηλό κέρδος ενίσχυσης, αφού τότε θα είναι μεγαλύτερη και η επιβάρυνση των διατάξεων ενίσχυσης, με την εφαρμογή υψηλότερων τάσεων για την εξαγωγή περισσότερου φορτίου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΨΥΧΟΜΕΝΗΣ ΜΕ ΥΓΡΟ ΑΖΩΤΟ ΚΑΜΕΡΑΣ, ΜΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ CCD 30-11 ΤΗΣ E2V

#### 6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΤΗΣ ΚΑΜΕΡΑΣ

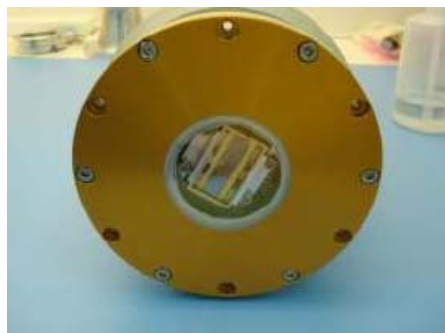
Η διάταξη της ψυχόμενης με υγρό άζωτο ( $LN_2$ ) κάμερας που χρησιμοποιήσαμε αποτελείται από  $LN_2$  κρυογονικό θάλαμο, αισθητήρα CCD, μονάδα ηλεκτρονικού ελεγκτή που συνοδεύεται από κατάλληλο λογισμικό.

- ✓ Ο κρυογενικός θάλαμος (Dewar) έχει κατασκευαστεί από τη Kadel Engineering Corporation σύμφωνα με τις εξής προδιαγραφές:
- ✓ Δοχείο από αλουμίνιο που περιέχει κέλυφος κενού.
- ✓ Gettering για μεγάλη διάρκεια κενού.
- ✓ Πολλαπλών επιπέδων υψηλή μόνωση για μικρές απώλειες ακτινοβολίας.
- ✓ Δομές και καλωδιώσεις χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας.
- ✓ Ερμητικές κεραμικές ηλεκτρικές συνδέσεις.
- ✓ Κατάλληλη διάταξη επαφής.
- ✓ Οπτικό παράθυρο διαμέτρου 50 mm και πάχους 2 mm.
- ✓ Χωρητικότητα  $LN_2$  1,3 L με αυτονομία 40 h στη Standard τοποθέτηση ή χωρητικότητα 0, 54 L με αυτονομία 16 h σε όλες τις τοποθετήσεις.

Η μορφή και η εσωτερική δομή του κρυογονικού θαλάμου δυκνείται στα σχήματα (1) .



(α)



(β)

**Σχήμα 1:** (α) Ο κρυογενικός θάλαμος που ψύχει τον αισθητήρα CCD της e2V σε θερμοκρασία υγρού αζώτου. (β) Φωτογραφία του παραθύρου του κρυογονικού θαλάμου, όπου φαίνεται το CCD.

Ο αισθητήρας CCD 30-11 (εταιρεία κατασκευής E2V), είναι υψηλής απόδοσης για επιστημονικές εφαρμογές, οπισθοφωτιζόμενος και διαθέτει εξελιγμένο αναστροφέα για λειτουργία με αναστραμμένη τάση AIMO (Advanced Inverted Mode Operation).

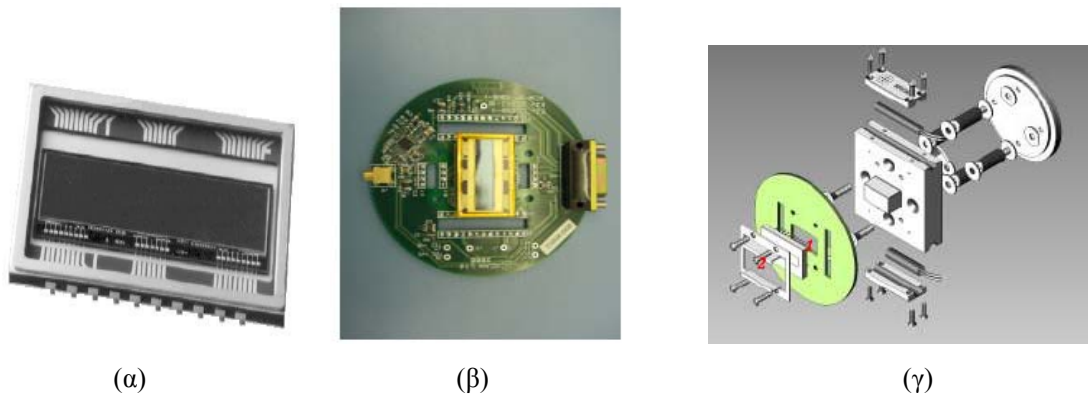
Η περιοχή απεικόνισης του αισθητήρα είναι 26,6×6,7mm,(ή 1,05×0,26 ίντσες) και αποτελείται από συστοιχία 1024×256 pixels τετράγωνου σχήματος και διαστάσεων 26×26μm το καθένα.

Διαθέτει λειτουργία χρονισμού τριών φάσεων με θαμμένο κανάλι και έχει υποστεί κατάλληλη επεξεργασία με αντιανακλαστικές επιστρώσεις (AR) για βελτιστοποίηση της κβαντικής απόδοσης στο εγγύς υπέρυθρο.

Ο καταχωρητής εξόδου οργανώνεται κατά μήκος της μεγάλης διάστασης των 1024 pixels του αισθητήρα και περιέχει κανάλι Antiblooming, ώστε να επιτρέπει Binning υψηλής ταχύτητας ανάγνωσης των χαμηλού επιπέδου σημάτων.

Το ρεύμα διαρροής,(Leakage Current),είναι  $0,5 \text{ nA/cm}^2$  και ο θόρυβος ανάγνωσης  $5 e^-/\text{pixel/sec}$ . Επίσης, ο εξελιγμένος ενισχυτής εξόδου είναι απαλλαγμένος από το φαινόμενο εκπομπής φωτός,(Amplifier Glow).

Ο αισθητήρας είναι συσκευασμένος σε ένα κεραμικό πλαίσιο των 20 pin DIL, έχει προδιαγραφές ελάχιστης θερμοκρασίας λειτουργίας τους 73 K ( $-200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), και συναρμολογήθηκε στη κατάλληλη διεπαφή του κρυογονικού θαλάμου, μέσα σε clean room, με δύο από τις τέσσερις διαθέσιμες βίδες, γιά την ελαχιστοποίηση της θερμικής αγωγιμότητας (σχήμα 2).



**Σχήμα 2:** (α) ο αισθητήρας CCD με το πλαίσιο κεραμικού υλικού.

(β) Ο αισθητήρας CCD (CCD head) της e2V με την ηλεκτρονική κάρτα προενισχυτή και διαχείρισης του αναλογικού σήματος.

(γ) Μηχανική συναρμολόγηση της βάσης του αισθητήρα CCD (1) στο παράθυρο (2) του κρυογονικού θαλάμου.

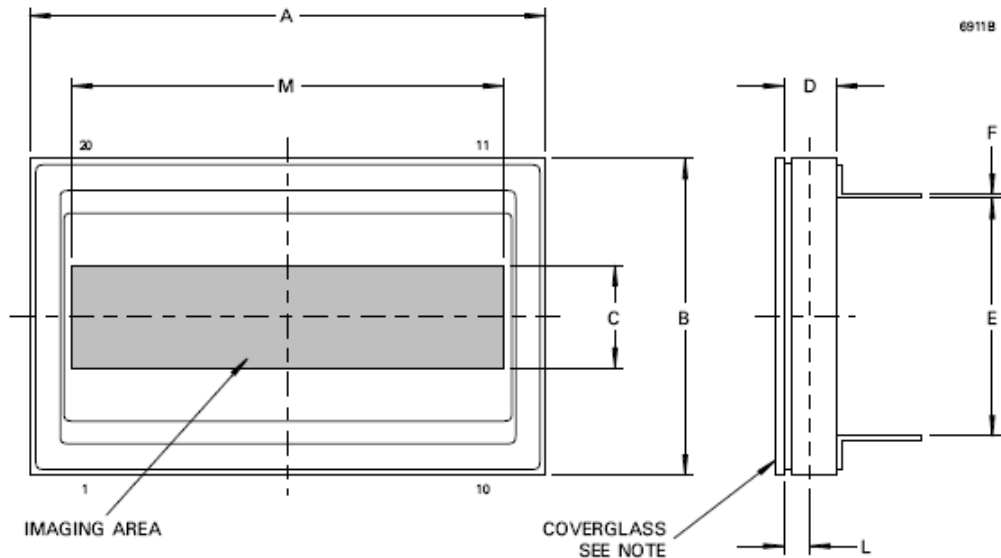


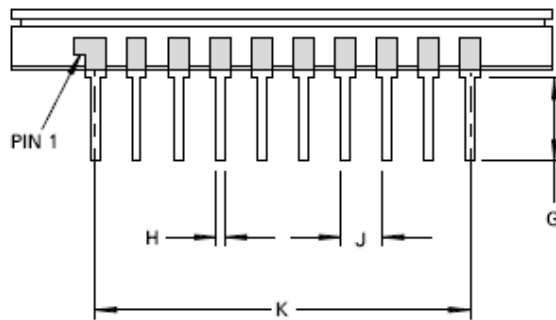
Η μονάδα ηλεκτρονικού ελεγκτή (σχήμα 3), καθώς και το αντίστοιχο λογισμικό που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του αισθητήρα όπως και για την διαχείριση των δεδομένων, διατίθενται από την εταιρεία XCAM,[6].



**Σχήμα 3:** Η μονάδα του ηλεκτρονικού ελεγκτή της XCAM

Παρακάτω αναφέρονται αναλυτικότερα τα χαρακτηριστικά και οι προδιαγραφές της κάμερας, καθώς επίσης και τα διαγράμματα της κβαντικής απόδοσης με το μήκος κύματος, του θορύβου των κυκλωμάτων των CCD με τη συχνότητα και του θερμικού ρεύματος με τη θερμοκρασία.





Ref	Millimetres
A	$32.89 \pm 0.38$
B	$20.07 \pm 0.25$
C	6.7
D	$3.30 \pm 0.33$
E	$15.24 \pm 0.25$
F	$0.254 \begin{matrix} + 0.051 \\ - 0.025 \end{matrix}$
G	5.2
H	$0.46 \pm 0.05$
J	$2.54 \pm 0.13$
K	$22.86 \pm 0.13$
L	$1.65 \pm 0.56$
M	26.6

**Σχήμα 4:** Οι διαστάσεις του αισθητήρα CCD30-11.

#### ***Βασικά χαρακτηριστικά***

- Διάταξη των pixels 1024 x 256
- Τετράγωνα pixels πλευράς 26 μm
- Περιοχή απεικόνισης 26,6 x 6,7 mm
- Ευρύ δυναμικό εύρος
- Συμμετρική αντιστατική προστασία πύλης
- Οπισθοφωτιζόμενη διάταξη για ενισχυμένη κβαντική απόδοση
- 3 αντι-ανακλαστικές (AR) επιστρώσεις
- Λειτουργία με Εξελιγμένο Αναστροφέα Advanced Inverted Mode Operation (Aimo)
- Καταχωρητής readout με anti-blooming
- Μηδενική εκπομπή φωτός στην έξοδο του ενισχυτή

#### ***Τυπικές επιδόσεις***

- Συχνότητα readout των pixels: **20 – 5000 kHz**
- Ευαισθησία εξόδου του ενισχυτή: **1.5 μV/ e<sup>-</sup>**
- Μέγιστο σήμα: **500 ke<sup>-</sup> / pixel**
- Ρυναμικό εύρος: **83000:1**
- Φασματικό εύρος: **200–1060 nm**
- Θόρυβος readout (στους 233K, 20kHz): **6e<sup>-</sup> r.m.s.**

- Κβαντική απόδοση στα 500 nm: **78%**
- Μέγιστη τάση εξόδου: **750 MV**

### **Προσδιορισμός ατελειών**

Παγίδες: Είναι τα pixels στα οποία κρατείται για ένα διάστημα το φορτίο. Λαμβάνονται υπόψη αν έχουν χωρητικότητα μεγαλύτερη από 200 e<sup>-</sup> στους 233K.

Στήλες ολίσθησης: Λαμβάνονται υπόψη αν έχουν πλάτος μεγαλύτερο από 200 e<sup>-</sup>.

Μελανά σημεία: Λαμβάνονται υπόψη όταν έχουν απόκριση λιγότερη από το 80% του μέσου σήματος της περιοχής.

Λευκά σημεία: Λαμβάνονται υπόψη όταν έχουν ένα ρυθμό παραγωγής 100 φορές το μέγιστο ρυθμό παραγωγής σκοτεινού σήματος στους 293 K. Η συνηθισμένη εξάρτηση θερμοκρασίας των λευκών σημείων είναι διαφορετική από το μέσο σκοτεινό σήμα και δίνεται από τη σχέση:

$$Q_d/Q_{d0} = 122 T^3 e^{-6400/T}$$

Λευκή στήλη: Είναι μια στήλη που περιέχει τουλάχιστον 9 λευκές ατέλειες.

Μελανή στήλη: Είναι μια στήλη που περιέχει τουλάχιστον 9 μελανές ατέλειες.

### **Περιορισμοί ατελειών**

<i>Ατέλειες</i>	<i>A' Βαθμού</i>	<i>B' Βαθμού</i>	<i>Σχόλια</i>
Black pixels	≤ 80	≤ 160	για κάθε 10 <sup>6</sup> pixels
Hot pixels	≤ 60	≤ 120	για κάθε 10 <sup>6</sup> pixels
Black columns	≤ 1	≤ 4	για κάθε 10 <sup>3</sup> pixels
Hot columns	≤ 1	≤ 4	για κάθε 10 <sup>3</sup> pixels
Traps	≤ 4	≤ 8	για κάθε 10 <sup>6</sup> pixels

### Περιορισμοί θερμοκρασίας

	Ελάχιστη Θερμοκρασία (K)	Τυπική	Μέγιστη Θερμοκρασία (K)
Αποθήκευση	73	-	373
Λειτουργία	73	233	323

Μέγιστος ρυθμός θέρμανσης-ψύξης συσκευής: **5K / min**

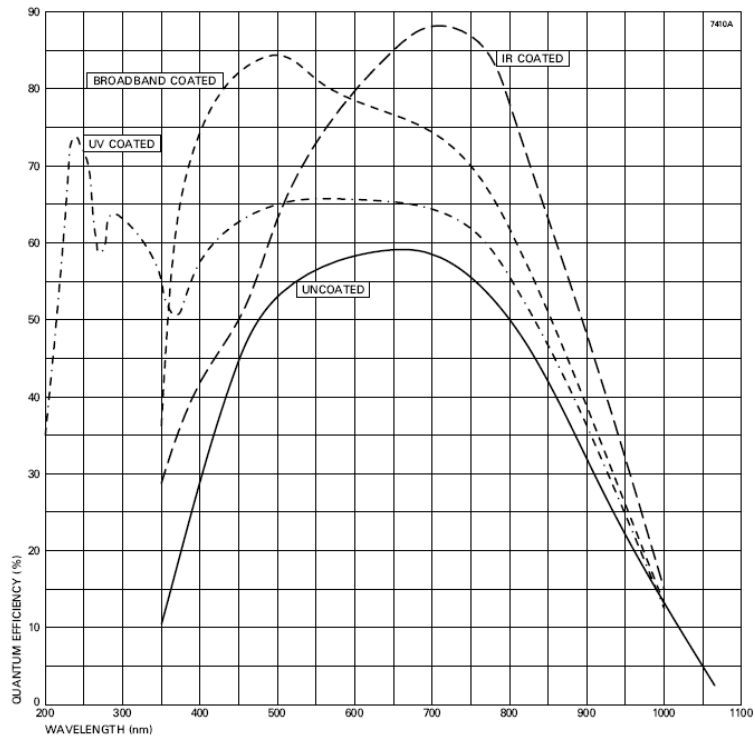
Παρακάτω ακολουθούν γραφικές παραστάσεις και πίνακες με διάφορα χαρακτηριστικά και αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μεγεθών του CCD,[6].

	Min	Typical	Max	
Peak charge storage (see note 1)	400k	500k	-	$e^- / \text{pixel}$
Peak output voltage (unbinned)	-	750	-	mV
Dark signal at 293 K (see note 2)	-	1000	2000	$e^- / \text{pixel/s}$
Charge transfer efficiency (see note 3): parallel	-	99.9999	-	%
serial	-	99.9993	-	%
Output amplifier sensitivity	1.3	1.8	2.3	$\mu\text{V}/e^-$
Readout noise at 233 K (see note 4)	-	6	8	rms $e^- / \text{pixel}$
Readout frequency (see note 5)	-	20	5000	kHz
Dark signal non-uniformity at 293 K (std. deviation)	-	250	500	$e^- / \text{pixel/s}$
Binned column dark signal non-uniformity at 293 K (std. deviation)	-	30	60	$e^- / \text{pixel/s}$
Output node capacity relative to image section	-	2.0	-	

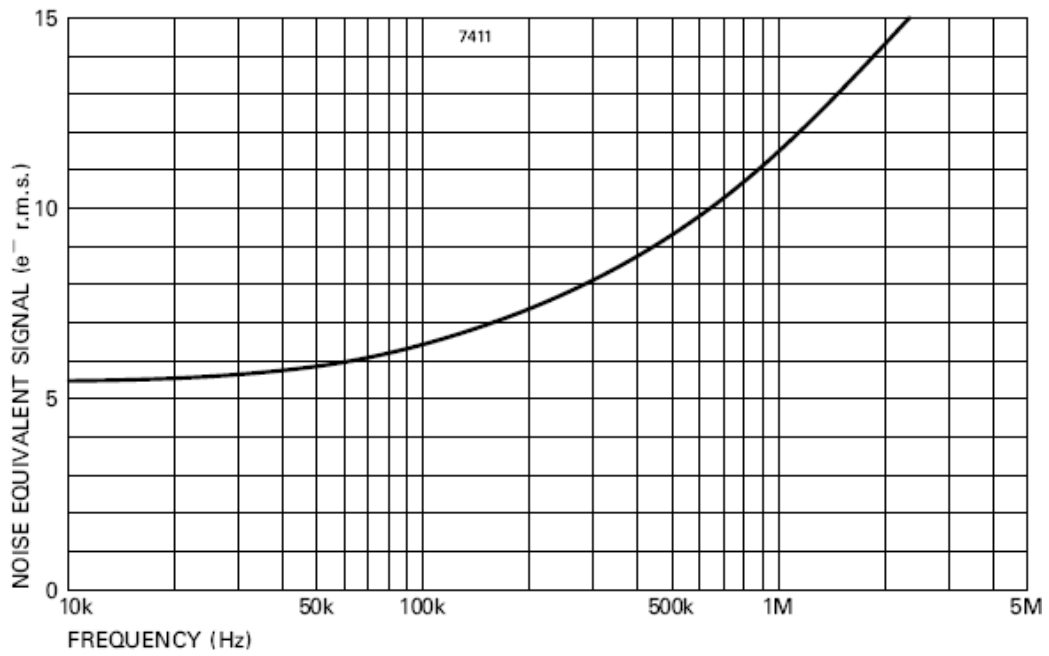
**Σχήμα 5:** Οι επιδόσεις του CCD

Wavelength (nm)	Minimum Response (QE)				Response Non-uniformity (1σ)	
	UV Coated	IR Coated	Broadband Coated	Uncoated		
300	45	not specified	not specified	not specified	-	%
350	50	20	25	10	5	%
400	55	30	55	25	3	%
500	60	55	75	55	3	%
650	60	80	75	50	3	%
900	30	35	30	30	5	%

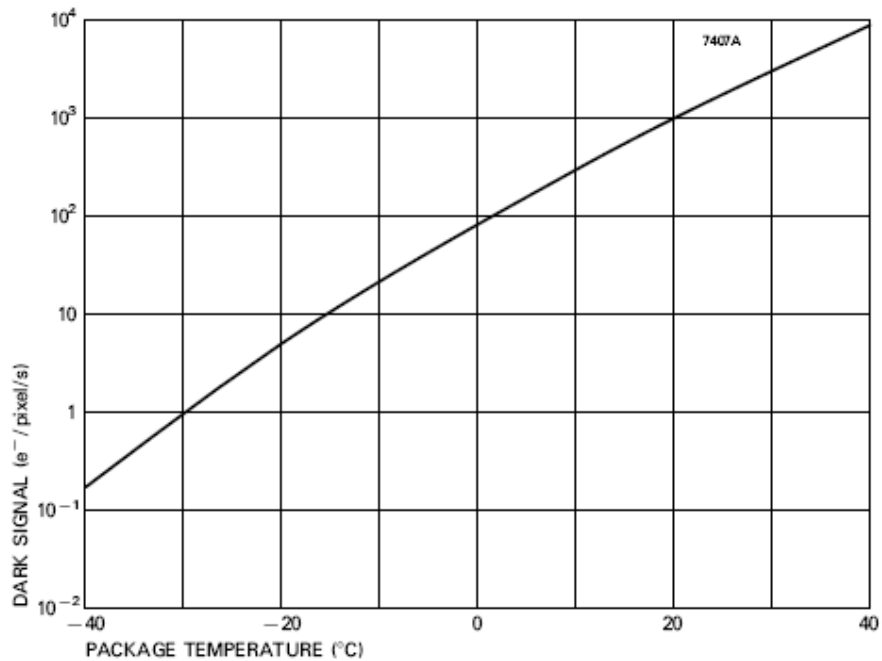
**Σχήμα 6:** Η φασματική απόκριση του CCD



Σχήμα 7: Τυπική φασματική απόκριση του CCD στους  $-20^{\circ}C$ .



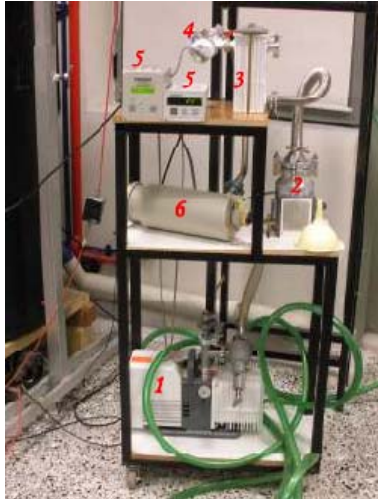
Σχήμα 8: Θόρυβος κυκλώματος του CCD.



**Σχήμα 9:** Γραφική παράσταση σκοτεινού σήματος συναρτήσει της θερμοκρασίας.

## 6.2 ΧΡΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Για την επίτευξη κενού στον κρυογενικό θάλαμο της CCD, χρησιμοποιήθηκε ένα υψηλό σύστημα κενού (σχήματα 10), ενώ η διαδικασία εκκένωσης διαρκεί περίπου από 5 ώρες έως 24 ώρες. Η διάταξη περιλάμβανε παγίδα λαδιού, για την αποφυγή της εισροής ατμών λαδιού από την μηχανική αντλία προς τον κρυογονικό θάλαμο. Η πίεση που επιτεύχθηκε ήταν της τάξης των  $2 \times 10^{-5}$  mbar. Οι δοκιμές μας έγιναν σε θερμοκρασία που κυμαινόταν από  $-80^{\circ}\text{C}$  έως  $-121^{\circ}\text{C}$ . Στη χαμηλότερη θερμοκρασία με πλήρως καλυμμένο το παράθυρο εισόδου έγιναν λήψεις σκοτεινών εικόνων με χρόνο έκθεσης 1s.



(α)



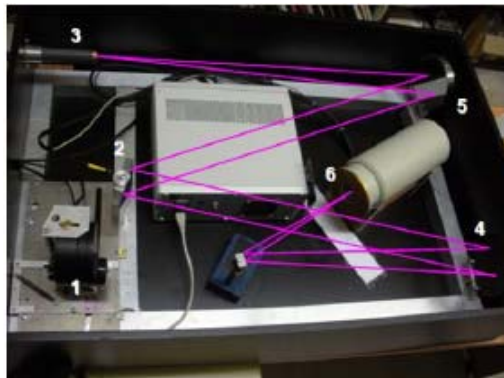
(β)

**Σχήμα 10:** (α) Το σύστημα υψηλού κενού, που αποτελείται από τα εξής τμήματα: (1) τη μηχανική αντλία λαδιού, (2) την αντλία turbo, (3) την κρυοπαγίδα (με υγρό άζωτο), (4) το μανόμετρο Pirani, (5) τα όργανα μέτρησης της πίεσης και των στροφών (μέγιστη τιμή 28000 rpm) της εταιρείας ALCATEL και φυσικά (6) ο κρυογονικός θάλαμος της CCD .

(β) Από αριστερά προς τα δεξιά φαίνονται η μηχανική αντλία, η αντλία turbo με το θάλαμο της CCD, η κρυοπαγίδα με το μανόμετρο Pirani και τα όργανα μέτρησης της πίεσης και των στροφών.

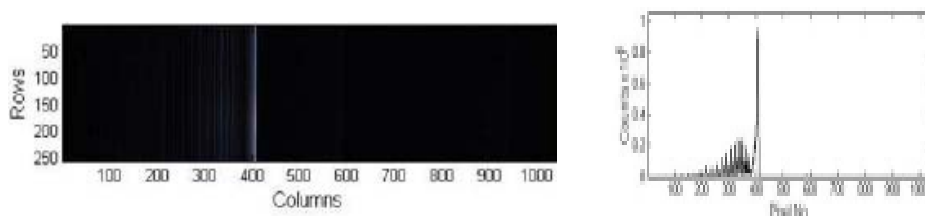
#### A) ΛΗΨΗ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές μετρήσεις από  $-80^{\circ}\text{C}$  έως  $-120^{\circ}\text{C}$ , μέσω του αισθητήρα 30-11 της e2V, τοποθετώντας τον αισθητήρα μέσα στο χώρο του φασματογράφου, όπου με τη χρήση κατάλληλων κατόπτρων επιτυγχάνεται η εκτροπή της δέσμης στην επιφάνεια του αισθητήρα (σχήμα 11), [15], [16].

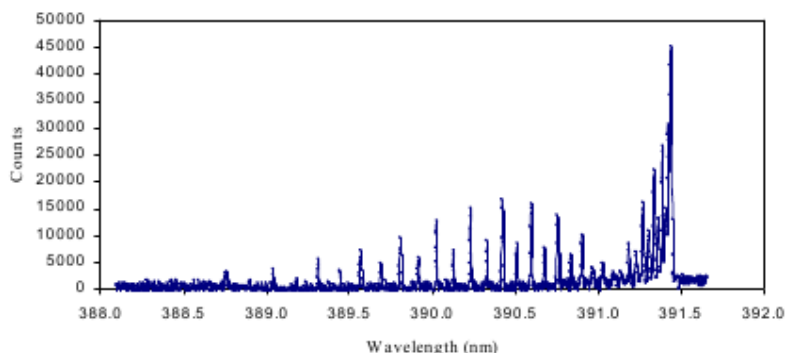


**Σχήμα 11 :** Η δέσμη από το κάτοπτρο εξόδου αντί να εστιαστεί στον αρχικό αισθητήρα (1), εκτρέπεται προς τον αισθητήρα 30-11 της e2V (6). Το ορθογώνιο κουτί που φαίνεται στην εικόνα είναι η μονάδα ελεγκτική και συλλογής δεδομένων.

Για την κύρια ζώνη της μετάβασης 1N(0,0) στα 391.44 nm, στους  $-121\text{ }^{\circ}\text{C}$  με χρόνο έκθεσης 300s, τα αποτελέσματα των μετρήσεων που λήφθηκαν παρουσιάζονται στα σχήματα 12 και 13 που ακολουθούν, [15], [16]. Η τυπική απόκλιση του συνολικού θορύβου (που υπολογίστηκε στην περιοχή απουσίας σήματος) είναι περίπου 307 παλμοί. Το σήμα στην ασθενική γραμμή 394.3 nm είναι 13000 παλμοί με SNR=43. Επίπεδα έντασης της γραμμής 394.3 nm ή και χαμηλότερα αναμένονται στη δέσμη ηλεκτρονίων των επιταχυντών. Αντίθετα για τη γραμμή 391.44 nm το σήμα ήταν 955000 παλμοί δίνοντας ένα SNR=319 που είναι ικανοποιητική τιμή,[15], [17].



**Σχήμα 12:** Ενδεικτική εικόνα (αριστερά) της μετάβασης 1N(0,0) στα 391,44 nm και το αντίστοιχο φάσμα (δεξιά).



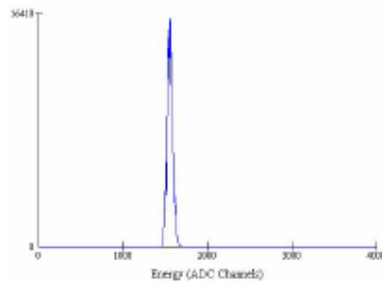
**Σχήμα 13:** Πειραματικό φάσμα της γραμμής 391.44 nm, με χρόνο έκθεσης 5 min, όπου φαίνεται η συστοιχία των γραμμών περιστροφής του μορίου του αζώτου.

## B) ΜΕΛΕΤΗ ΘΟΡΥΒΟΥ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ CCD30-11

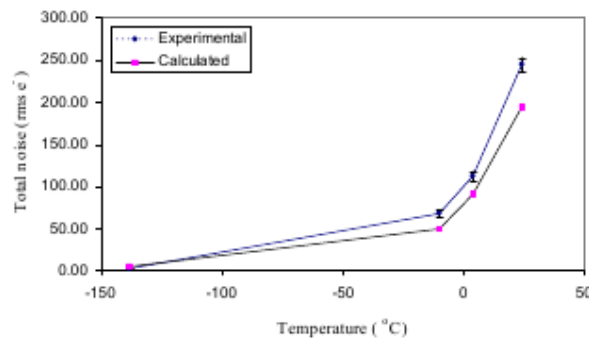
Έγιναν πειραματικές μετρήσεις σε διάφορες θερμοκρασίες, από  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$  μέχρι  $-138\text{ }^{\circ}\text{C}$  με τελείως κλειστό παράθυρο του CCD σε σκοτεινό εργαστήριο. Οι χρόνοι μέτρησης ήταν



διαφορετικοί και τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα, [19], [15], [16].



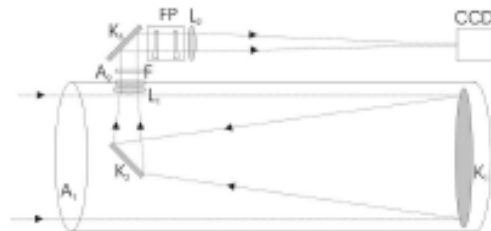
**Σχήμα 14:** Στατιστική κατανομή του αριθμού παλμών σε όλες τις κυψελίδες του CCD σε τελείως σκοτεινές συνθήκες θερμοκρασία δωματίου και σε χρόνο 1 s.



**Σχήμα 15:** Συγκριτικό διάγραμμα ολικού θορύβου ανάγνωσης μεταξύ πειραματικών τιμών και υπολογισμένων με βάση το θεωρητικό μοντέλο του κατασκευαστή.

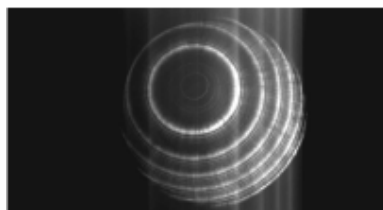
### Γ) ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ CCD 30-11 ΤΗΣ Ε2V ΣΕ ΠΡΟΤΟΤΥΠΟ, ΥΨΗΛΗΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΚΥΣΗΣ LIDAR (HSRL)

Το πρωτότυπο Υψηλής Φασματικής Ανάλυσης Lidar (HSRL), αποτελείται από μια δέσμη λέιζερ ως πηγή και δύο Fabry-Perot etalons ως δέκτες έχοντας τις κατάλληλες ελεύθερες φασματικές περιοχές (σχήμα 16), [19], [16], [15].



**Σχήμα 16 :** Αντιπροσωπευτικό διάγραμμα του προτύπου HSRL με το Νευτώνειο τηλεσκόπιο και ένα από τα δύο Fabry-Perot etalons προσαρμοσμένο σε αυτό.

Ένα αρκετά πρώιμο δείγμα των αποτελεσμάτων από δοκιμαστικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με το laser DPSS CW στα 532 nm, και τον αισθητήρα CCD 30-11 της E2V σε θερμοκρασία  $-130^{\circ}C$ , παρουσιάζεται στο σχήμα 17, [17], [16], [15].



**Σχήμα 17 :** Λήψη συμβολογράμματος από τον αισθητήρα CCD 30-11 της E2V σε θερμοκρασία  $-130^{\circ}C$ .

### 6.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Η κατάλληλη επιλογή CCD ως ανιχνευτική διάταξη ακτινοβολίας, καθώς και ο τρόπος χρήσης, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος της εφαρμογής. Γενικά στόχος είναι πάντα η επίτευξη όσο το δυνατόν υψηλότερης τιμής SNR, κάτι που μπορούμε να το πετύχουμε με διάφορους τρόπους, λόγω του πλήθους των παραγόντων από τους οποίους εξαρτάται το SNR (ένταση σήματος, συνιστώσες που συνεισφέρουν στο συνολικό θόρυβο).

Οι κυρίαρχες πηγές θορύβου είναι ο φωτονικός θόρυβος, ο θόρυβος ανάγνωσης και ο θερμοϊονικός θόρυβος. Καθώς με τη ψύξη της κάμερας σε θερμοκρασίες υγρού αζώτου είναι δυνατή η εξάλειψη του θερμοϊονικού θορύβου, το SNR θα περιορίζεται είτε από τον θόρυβο ανάγνωσης είτε από τον φωτονικό θόρυβο.

Η ψύξη όμως της κάμερας με υγρό άζωτο μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στην απόδοσή της, αφού επηρεάζεται η κβαντική απόδοση, η ποιότητα μεταφοράς φορτίου και το μέγεθος των pixels από τις μεγάλες μεταβολές της θερμοκρασίας.

Ειδικά η αλλοίωση της συνολικής απόδοσης του αισθητήρα, λόγω των επαναλαμβανόμενων συστολών-διαστολών, πρέπει να μελετηθεί εκτενέστερα με λήψη περισσότερων μετρήσεων, σε διάφορες θερμοκρασίες και σε βάθος χρόνου (μετά από πολλές χρήσεις), ώστε με κατάλληλη επεξεργασία και συσχέτισμό των μετρήσεων να διαπιστωθεί το μέγεθος αυτής της επίδρασης.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

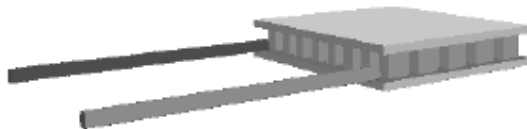
#### ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΡΟΠΟΙ ΨΥΞΗΣ ΕΝΟΣ CCD

Οι βασικοί τρόποι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ψύξη μίας κάμερας είναι: **A)** ψυκτικές μηχανές κλειστού κύκλου, **B)** με ξηρό πάγο, **Γ)** θερμοηλεκτρικές μονάδες Peltier , **Δ)** με υγρό άζωτο.

**A)** Ψυκτικές μηχανές κλειστού κύκλου οι οποίες λειτουργούν με κύκλους συμπίεσης/αποσυμπίεσης αερίου ή με πτητικό υγρό. Είναι ογκώδεις συσκευές, πολύ ακριβές και προορίζονται για χρήση μόνο σε συγκεκριμένα μέρη και για την αφαίρεση μεγάλων θερμικών φορτίων (π.χ. σε επαγγελματικά εργαστήρια).

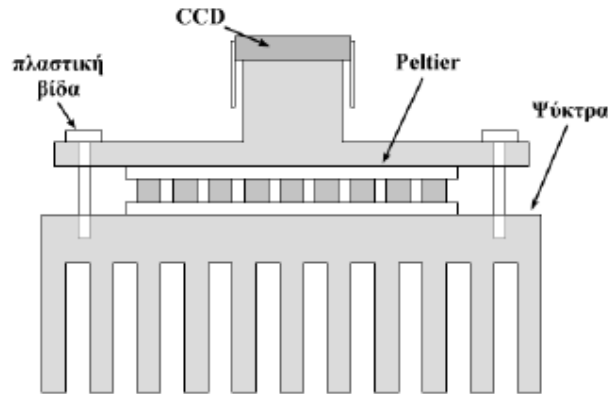
**B)** Πολύ λίγα συστήματα χρησιμοποιούν ψύξη με ξηρό πάγο ( $-76\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), παρά το γεγονός ότι είναι εύκολο να κατασκευαστούν τέτοιες μονάδες, ενώ και η τιμή του ξηρού πάγου είναι πραγματικά χαμηλή. Ο λόγος είναι ότι τέτοια συστήματα είναι δύσχρηστα εξαιτίας της ανάγκης για συνεχή ανανέωση του ξηρού πάγου. Βέβαια αυτό το πρόβλημα μπορεί μερικώς να λυθεί με “μηχανή” παραγωγής ξηρού πάγου η οποία είναι μάλιστα αρκετά φτηνή, αλλά και πάλι υπάρχει το πρόβλημα ότι θα πρέπει κανείς να διαθέτει και μια φιάλη υψηλής πίεσης, η οποία είναι πολύ βαριά. Αν όμως η συσκευή προορίζεται για χρήση σε συγκεκριμένο μέρος (π.χ. ένα εργαστήριο) τότε αυτό μπορεί να μην είναι πρόβλημα.

**Γ)** Τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία (σχήμα 1) είναι ένας πολύ απλός και κομψός τρόπος ψύξης, αφού έχουν πολύ μικρό όγκο, (τυπικά έχουν μήκος-πλάτος της τάξης των 3cm και πάχος μόλις 3~4mm) και για την λειτουργία τους απαιτείται μόνο κάποιο τροφοδοτικό με σταθεροποίηση τάσης 10% ή καλύτερη.

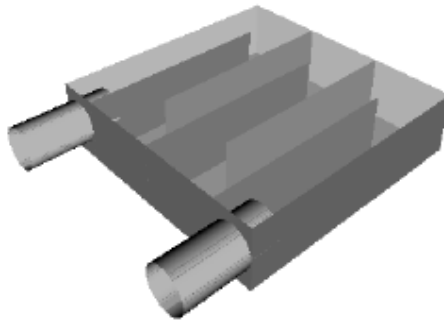


**Σήμα 1:** Ένα θερμοηλεκτρικό στοιχείο Peltier

Οι μονάδες αυτές λειτουργούν σαν αντλίες θερμότητας, δηλαδή απορροφούν θερμότητα από την μία επιφάνεια τους (την ψυχρή) και την αποβάλλουν στην άλλη επιφάνεια (την θερμή), μαζί βέβαια με την θερμότητα που καταναλώνουν οι ίδιες οι μονάδες (τυπικά ένα μεσαίου μεγέθους peltier καταναλώνει 20W). Συνήθως η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας που μπορεί να επιτευχθεί ανάμεσα στις δύο επιφάνειες, είναι περίπου  $70^{\circ}\text{C}$  (όταν δεν υπάρχει θερμικό φορτίο στην ψυχρή πλευρά), έτσι με τέτοια στοιχεία μπορούμε να φτάσουμε θερμοκρασίες της τάξεως των  $-30^{\circ}\text{C}$ . Όμως, επειδή η θερμή επιφάνεια θερμαίνεται από την θερμότητα που αναπτύσσεται σε αυτή, είναι απαραίτητο, με κάποιο τρόπο η θερμότητα να απομακρυνθεί, αλλιώς θα μειωθεί η απόδοση του στοιχείου και δεν θα μπορέσει να διατηρήσει την επιθυμητή θερμοκρασία στην ψυχρή του πλευρά. Συνεπώς είναι απαραίτητο να τοποθετηθεί σε επαφή με την θερμή επιφάνεια του peltier, είτε μια καλή ψήκτρα (σχήμα 2), είτε ένα σύστημα κυκλοφορίας υγρού (σχήμα 3). Στην περίπτωση της ψήκτρας είναι καλύτερα να προστεθεί και ένα ανεμιστηράκι. Ωστόσο στην περίπτωση της ψήκτρας η θερμοκρασία της θερμής επιφάνειας θα είναι πάντα μεγαλύτερη από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος (θερμοκρασία αέρα), αφού μόνο τότε θα συμβαίνει μεταφορά θερμότητας προς τον αέρα. Αυτό σημαίνει ότι σε θερμές καλοκαιρινές μέρες, μπορεί να μειωθεί σημαντικά η απόδοση του συστήματος και το περίβλημα της κάμερας να γίνει πολύ ζεστό. Η περίπτωση ωστόσο του συστήματος κυκλοφορίας υγρού, είναι αρκετά πλεονεκτικότερη, αφού και με μια πολύ χαμηλή ροή (π.χ. 1lt/30min) μπορεί να έχουμε ικανοποιητική απαγωγή θερμότητας (το υγρό μπορεί να είναι απεσταγμένο νερό με προσθήκη αλκοόλης). Αν και δεν είναι ιδιαίτερα δύσκολο να κατασκευαστεί σύστημα με κυκλοφορία υγρού, είναι πιο δύσκολο από την ψήκτρα με το ανεμιστηράκι, λόγω της ανάγκης για σωλίνες μεταφοράς του υγρού, τρόμπας για την άντληση και μιας δεξαμενής 5~10lt. Για αυτούς τους λόγους σε πολλά σχέδια που απευθύνονται σε ευρύ κοινό χρηστών, προτιμάται η λύση της αερόψυκτης κάμερας.



**Σχήμα 2:** Συναρμολόγηση του ψυκτικού συστήματος με Peltier και ψήκτρα για την αποβολή της θερμότητας.



**Σχήμα 3:** Λαβύρινθος κυκλοφορίας υγρού για την πιο αποτελεσματική απαγωγή της θερμότητας. Εδώ βλέπουμε την εσωτερική κατασκευή του.

Επιπλέον, αρκετές φορές για να αυξηθεί η αποδοτικότητα ενός ψυκτικού συστήματος με peltier, χρησιμοποιούνται δύο ή και τρία peltier, τοποθετημένα ώστε η θερμή επιφάνεια του ενός να έρχεται σε επαφή με την ψυχρή επιφάνεια του άλλου. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να γίνει πιο αποτελεσματική η αποβολή της θερμότητας που αποβάλλει το πρώτο peltier (του οποίου η ψυχρή πλευρά έρχεται σε επαφή με το CCD) και έτσι μπορεί να κρατηθεί η θερμή του πλευρά σε λίγο πιο χαμηλή θερμοκρασία από του περιβάλλοντος. Βέβαια σε αυτή την περίπτωση είναι δύσκολο να απάγουμε την θερμότητα με ένα αερόψυκτο σύστημα, αφού στην θερμή πλευρά του τελευταίου peltier, θα λάβουμε την κατανάλωση και των δύο (ή τριών) peltier και συνεπώς θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί κυκλοφορία υγρού. Βέβαια με ένα σωστά σχεδιασμένο τέτοιο σύστημα μπορούμε να φτάσουμε θερμοκρασίες  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  έως  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Δ) Με υγρό άζωτο ( $LN_2$ ), μέθοδος η οποία παρόλο που έχει κάποιες δυσκολίες στη χρήση (π.χ. απαιτείται η δημιουργία υψηλού κενού και χρειάζεται προσοχή κατά τη χρήση του υγρού αζώτου) έχει το βασικό πλεονέκτημα ότι είναι δυνατή η ψύξη σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ( $-120\text{ }^{\circ}C$  ή και χαμηλότερες). Βέβαια πρέπει να διαθέτουμε και CCD με ανάλογες προδιαγραφές για λειτουργία σε αυτές τις θερμοκρασίες, διότι πέρα από τα ευεργετικά αποτελέσματα ως προς την ελάττωση του ρεύματος σκότους, η ψύξη σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες δημιουργεί και προβλήματα.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Steve B. Howell, Handbook of CCD Astronomy.
- [2] Σπυρόπουλος Α.Ν., Πειραματική μελέτη του φάσματος του νυχτερινού ουρανού για χρήση σε ανιχνευτές κοσμικών ακτίνων υπερυψηλών ενεργειών.
- [3] Γούδης Χ. Αστέρες και μεσοαστρική ύλη.
- [4] [www.andor.com](http://www.andor.com).
- [5] [www.hamamatsu.com](http://www.hamamatsu.com), Thomas J. Fellers and Michael W. Davidson - National High Magnetic Field Laboratory, 1800 East Paul Dirac Dr., The Florida State University, Tallahassee, Florida, 32310.
- [6] [www.e2v.com](http://www.e2v.com).
- [7] [www.xcam.co.uk](http://www.xcam.co.uk).
- [8] Martinez P., Klotz A. : 1998, A Practical Guide to CCD Astronomy, Cambridge University Press, Cambridge.
- [9] Berry R., Burnell J. : 2001, The Handbook of Astronomical Image Processing, Willmann-Bell, Inc., Richmond.
- [10] Budding E. : 1993, Astronomical Photometry, Cambridge University Press, Cambridge.
- [11] Smith R.C. : 1995, Observational Astrophysics, Cambridge University Press, Cambridge.
- [12] Scott Birney D., : 1991, Observational Astronomy, Cambridge University Press, Cambridge.
- [13] Buil C. : 1991, CCD Astronomy, Willmann-Bell, Inc., Richmond, Virginia.
- [14] Martinez P., Klotz A. : 1998, A Practical Guide to CCD Astronomy, Cambridge University Press, Cambridge.
- [15] Γκίκα Β. : Απόδοση ατμοσφαιρικού φθορισμού κοσμικών ακτίνων υπερυψηλών ενεργειών.
- [16] Κουτελιέρης Γ. : Μελέτη χρήσης και επίδοσης αισθητήρων ccd στην κοντινή υπεριώδη περιοχή.
- [17] S. MALTEZOS , E. FOKITIS, V. GIKA, P. FETFATZIS, G. KOUTELIERIS, E. GALANIS AND N. MARAGOS Physics Department, National Technical University of Athens, Heroon Polytechniou 9 Zografou, Athens, 15780, Greece. : NITROGEN MOLECULAR SPECTRA OF AIR FLUORESCENCE EMULATOR USING A LN 2 COOLED CCD
- [18] [www.emccd.com](http://www.emccd.com).
- [19] E. Fokitis , P. Fetfatzis , A. Georgakopoulou , V. Gika , M. Kompitsas , S. Maltezos , I. Manthos , A. Papayannis , and A. Aravantinos . : (31th International Cosmic Ray Conference)

Review of High Spectral Resolution Techniques for Measurements of the Aerosol Phase Function and Application in Extensive AirShower Detector Atmospheric Monitoring.

[20] [www.darkerview.com](http://www.darkerview.com).

[21] Cheryl J. Marshall (NASA-GSFC) and Paul W. Marshall (NASA-GSFC Multi-Engineering Disciplinary Support Contract Task 1058).

[22] R. J. Stover <sup>a</sup>, M. Wei <sup>a</sup>, Y. Lee <sup>c</sup>, D. K. Gilmore <sup>a</sup>, S. E. Holland <sup>b</sup>, D. E. Groom <sup>b</sup>, W. W. Moses <sup>b</sup>, S. Perlmutter <sup>b</sup>, G. Goldhaber <sup>b</sup>, C. Pennypacker <sup>b</sup>, N. W. Wang <sup>b</sup>, and N. Palaio <sup>b</sup> <sup>a</sup> University of California Observatories/Lick Observatory, University of California Santa Cruz <sup>b</sup> Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley <sup>c</sup> Beijing Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences.

[23] ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ ΘΕΩΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΤΙΚΩΝ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ CCD. Π. Γεωργόπουλου, Φυσικού, επιστημονικού συνεργάτη Εθνικού Αστεροσκοπείου της Εκπαίδευσης «ΕΥΔΟΕΟΣ» και Ν.Χ.Σολωμού, Εκτ. Καθ. Φυσικής ΣΝΔ.

[24] Charge Transfer Efficiency in Proton Damaged CCD's, T. Hardy, Member, IEEE, R. Murowinski, Member, IEEE, and M. J. Deen, Senior Member, IEEE.

[25] A two-channel Fabry-Perot interferometer with thermoelectric-cooled CCD detectors for neutral wind measurement in the upper atmosphere K. Shiokawa <sup>1</sup>, T. Kadota <sup>1</sup>, Y. Otsuka <sup>1</sup>, T. Ogasawara <sup>1</sup>, T. Nakamura <sup>2</sup>, and S. Fukao <sup>2</sup> <sup>1</sup> Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Toyokawa 442-8507, Japan <sup>2</sup> Radio Science Center for Space and Atmosphere, Kyoto University, Gokanosho, Uji, Kyoto 611-0011, Japan (Received March 7, 2003; Revised April 21, 2003; Accepted April 28, 2003).

[26] Αντωνακόπουλος Γ., Λασκαρίδης Π. : 1983, Πρακτική Αστρονομία.

[27] Αυγολούπης Σ., Σειραδάκης Ι. : 1987, Παρατηρησιακή Αστρονομία.