



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ

**Μελέτη ψηφιακού ανιχνευτή μαστογραφίας
με τη χρήση γραμμικών συστημάτων**

ΙΑΣΩΝΑΣ ΒΑΣΙΟΣ

Αριθμός Μητρώου: 48016014

Επιβλέπων Καθηγητής

Νεκτάριος Καλύβας, Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα 28/02/2023

Η Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Ο Επιβλέπων Καθηγητής

Νεκτάριος Καλύβας

Αναπληρωτής Καθηγητής

[ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ]

Γεώργιος Φούντος

Καθηγητής

[ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ]

Χρήστος Μιχαήλ

Επίκουρος Καθηγητής

[ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ]

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/η υπογράφων/ουσα Ιάσωνας Βάσιος του Απόστολου, με αριθμό μητρώου 48016014 φοιτητής/τρια του Τμήματος Μηχανικών Βιοϊατρικής της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ημερομηνία

28/02/2023

Ο/Η Δηλών/ούσα

Βάσιος Ιάσωνας
Vasios Iasonas



Ευχαριστίες:

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Νεκτάριο Καλύβα για την καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια της τρέχουσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό την θεωρητική μελέτη ενός ανιχνευτή ακτίνων-Χ μαστογραφίας άμεσης ανίχνευσης με τη χρήση της θεωρίας γραμμικών συστημάτων για τη μοντελοποίηση του. Ο βασικός κορμός του μοντέλου στηρίχθηκε σε προ υπάρχουσα μελέτη αλλά έγινε προσθήκη επιπλέον στοιχείων. Τα στοιχεία αυτά αφορούν την ανάλυση της απόδοσης τεσσάρων ημιαγωγών (άμορφο Σελήνιο a-Se, Πυρίτιο Si, Γερμάνιο Ge, Αρσενιούχο γάλλιο GaAs) κάτω από διαφορετικές συνθήκες όσον αφορά το πάχος του ημιαγωγού, το ηλεκτρικό πεδίο στον ανιχνευτή, τον ηλεκτρονικό θόρυβο και την δόση της ακτινοβολίας με τον υπολογισμό των παραμέτρων της χωρικής διακριτικής ικανότητας (MTF), του κανονικοποιημένου φάσματος ισχύος θορύβου (NNPS) και του συντελεστή ανιχνευτικής κβαντικής αποδοτικότητας (DQE).

Αρχικά έγινε αναφορά στις ιοντίζουσες ακτινοβολίες εστιάζοντας στις ακτίνες-Χ και τους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης τους με την ύλη. Στη συνέχεια παρουσιάστηκε η χρήση των ακτίνων-Χ στην απεικόνιση του μαστού, με ανάλυση της ανατομίας του και των δυσκολιών που παρουσιάζει η απεικόνιση του και η βασική οργανολογία ενός μαστογράφου (πηγή ακτίνων-Χ, πίεστρο μαστού). Αναλυτικότερη αναφορά έγινε στους ανιχνευτές ακτίνων-Χ ως προς τον τρόπο λειτουργίας τους και το διαχωρισμό τους σύμφωνα με τον τρόπο δημιουργίας της ιατρικής εικόνας. Τέλος αναλύθηκαν οι παράμετροι που σχετίζονται με την ποιότητα εικόνας-ανιχνευτή.

Ακολούθως παρουσιάστηκε η θεωρία των γραμμικών συστημάτων που αποτελεί το βασικό εργαλείο μοντελοποίησης των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του ανιχνευτή με τη βοήθεια της γλώσσας προγραμματισμού MATLAB για την δημιουργία κώδικα. Ακολούθησε αναλυτική περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου και όλων των δεδομένων που αξιοποιήθηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Στο τελευταίο μέρος της εργασίας παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των υπολογισμών με γραφικές παραστάσεις των MTF, NNPS και DQE για κάθε ένα από τους 4 ημιαγωγούς στο ανάλογο σενάριο με εξαίρεση τις περιπτώσεις του ηλεκτρονικού θορύβου και της δόσης όπου παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματα για το άμορφο σελήνιο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αύξηση του πάχους του ημιαγωγού οδηγεί σε βελτίωση της απόδοσης του ανιχνευτή, αύξηση του DQE, με κάποια μείωση του MTF. Η αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου του ανιχνευτή επηρεάζει μόνο τον ημιαγωγό του a-Se βελτιώνοντας την απόδοση του. Σχετικά με τον ηλεκτρονικό θόρυβο η αύξηση του αυξάνει τον συνολικό θόρυβο χωρίς να επηρεάζει την διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή ενώ η αύξηση της δόσης αυξάνει την απόδοση με μείωση του NNPS και αύξηση του DQE εις βάρος όμως του ασθενή λόγω της αυξανόμενης δόσης που λαμβάνει.

Λέξεις Κλειδιά: Μαστογραφία, Θεωρία γραμμικών συστημάτων, ανιχνευτής ακτίνων Χ

Abstract

The purpose of this work is the theoretical study of a direct detection X-ray mammography detector using the theory of linear systems for its modeling. The main body of the model was based on a pre-existing study but additional elements were added. These data concern the performance analysis of four semiconductors (amorphous Selenium a-Se, Silicon Si, Germanium Ge, Gallium Arsenide GaAs) under different conditions in terms of semiconductor thickness, detector electric field, electronic noise and radiation dose by calculating the spatial resolution (MTF), normalized noise power spectrum (NNPS) and detective quantum efficiency (DQE) parameters.

Initially reference was made to ionizing radiation focusing on X-rays and their interaction mechanisms with matter. Then the use of X-rays in the imaging of the breast was presented, with an analysis of its anatomy and the difficulties presented by its imaging and the basic organology of a mammographer (X-ray source, breast presser). More detailed reference was made to X-ray detectors in terms of their operation and their separation according to the way the medical image is created. Finally, the parameters related to the image-detector quality were analyzed.

Following, the theory of linear systems was presented, which is the basic tool for modeling the processes that take place inside the detector with the help of the MATLAB programming language for creating the code. This was followed by a detailed description of the mathematical model and all the data used to derive the results.

In the last part of the paper, the results of the calculations were presented with graphical representations of MTF, NNPS and DQE for each of the 4 semiconductors in the analogous scenario with the exception of the cases of electronic noise and dose where only the results for amorphous selenium are presented. The results showed that increasing the semiconductor thickness leads to an improvement in detector performance, an increase in DQE, with some reduction in MTF. Increasing the electric field of the detector affects only the a-Se semiconductor improving its performance. Regarding the electronic noise, increasing it increases the overall noise without affecting the resolution of the detector while increasing the dose increases the performance by decreasing the NNPS and increasing the DQE at the expense of the patient due to the increasing dose he receives.

Keywords: Mammography, Theory of linear systems, X-ray detector

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	8
1.1 ΙΟΝΤΙΖΟΥΣΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ – ΑΚΤΙΝΕΣ Χ	8
1.1.1 Ακτίνες Χ	8
1.2 ΜΑΣΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ	11
1.2.1 Μαστογραφία	11
1.2.2 Παραγωγή Ακτίνων Χ	11
1.2.3 Πίεστρο Μαστού	12
1.2.4 Διάταξη ανίχνευσης ακτίνων Χ	13
1.3 ΨΗΦΙΑΚΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ	14
1.3.1 Συστήματα υπολογιστικής ακτινογραφίας – CR	15
1.3.2 Συστήματα ψηφιακής ακτινογραφίας – DR	16
1.4 ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΙΚΟΝΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ	19
1.4.1 Αντίθεση	19
1.4.2 Οξύτητα-Ασάφεια	19
1.4.3 Χωρική διακριτική ικανότητα – Συνάρτηση μεταφοράς διαμόρφωσης	19
1.4.4 Θόρυβος – Φάσμα ισχύος θορύβου	20
1.4.5 Ανιχνευτική Κβαντική αποδοτικότητα – DQE	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	23
2.1 ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	23
2.2 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MATLAB	25
2.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΡΘΡΟΥ	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	50
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	53
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	55
ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ:	60

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή – Θεωρητικό μέρος

1.1 Ιοντίζουσες ακτινοβολίες – Ακτίνες Χ

Με τον όρο ακτινοβολία εννοούμε τη διάδοση ενέργειας στο κενό ή στην ύλη με την μορφή κυμάτων, ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ή με την μορφή σωματιδίων, σωματιδιακή ακτινοβολία. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία χωρίζεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες με βάση την ενέργεια που μεταφέρει, σε ιοντίζουσα και μη ιοντίζουσα ακτινοβολία [1].

Οι ιοντίζουσες ακτινοβολίες έχουν αρκετή ενέργεια πάνω τους ($E > 10 \text{ eV}$) έτσι ώστε να μπορούν να προκαλέσουν ιονισμό σε άτομα, μόρια και να σπάσουν χημικούς δεσμούς. Ιονισμός είναι το φαινόμενο κατά το οποίο προκαλείται βίαιη απομάκρυνση ενός ή περισσότερων ηλεκτρονίων από τις στοιβάδες ενός ατόμου εξαιτίας κάποιου εξωτερικού αιτίου όπως η πρόσπτωση ακτινοβολίας ή ενός σωματιδίου. Τα αποτελέσματα της ιοντίζουσας ακτινοβολίας στους ζώντες οργανισμούς μπορούν να είναι ποικίλα καθώς λόγω της υψηλής ενέργειας της έχει επικίνδυνες βιολογικές επιδράσεις όπως: ρήξη χημικών δεσμών με επακόλουθο την δημιουργία δραστικών ελεύθερων ριζών που προκαλούν βλάβες στα ωφέλιμα μόρια του κυττάρου και μπορεί να οδηγήσει σε καρκινογένεση, γονιδιακές μεταλλάξεις, χρωμοσωμικές αλλοιώσεις κ.α. Στις ιοντίζουσες ακτινοβολίες ανήκουν η υπεριώδης ακτινοβολία, τα σωματίδια α , β , τα νετρόνια, οι ακτίνες γ και οι ακτίνες χ που θα είναι και το είδος της ακτινοβολίας που θα εξεταστεί παρακάτω [1].

Οι μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες δεν έχουν την απαραίτητη ενέργεια για να προκαλέσουν φαινόμενα ιονισμού αλλά μόνο να οδηγήσουν σε ηλεκτρικές, θερμικές ή χημικές επιδράσεις στα κύτταρα, ευεργετικές ή μη. Τα αποτελέσματα της μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας στους ζώντες οργανισμούς μπορεί να είναι: αύξηση της θερμοκρασίας των ιστών στην περιοχή έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εξαιτίας της μεγάλης περιεκτικότητας του ανθρώπινου οργανισμού σε νερό του οποίου τα μόρια λειτουργούν ως δίπολα, ενεργοποίηση των νευρικών κυττάρων και των μηχανισμών διάδοσης της νευρικής ώσης λόγω αλλαγής της χημικής ισορροπίας του κυττάρου. Στις μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες το ορατό φως, η υπέρυθη ακτινοβολία, τα μικροκύματα, τα ραδιοκύματα, η θερμική ακτινοβολία, τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία και ένα μέρος της υπεριώδους ακτινοβολίας [1].

1.1.1 Ακτίνες Χ

Οι ακτίνες Χ είναι μια μορφή ιοντίζουσας ακτινοβολίας που ανακαλύφθηκε το 1895 από τον W.C. Roentgen. Οι ακτίνες Χ συνιστούν μια υποκατηγορία του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας όπου αποτελούνται από φωτόνια υψηλής ενέργειας λίγων kV έως πολλών MV ή με μήκη κύματος από 10 pm έως 10 nm. Εξαιτίας της υψηλής τους ενέργειας οι ακτίνες Χ χαρακτηρίζονται ως διεισδυτικές δηλαδή ικανές να ταξιδέψουν σχετικά μεγάλες αποστάσεις μέσα από αντικείμενα χωρίς να εξασθενήσουν πολύ εξαιτίας απορρόφησης ή σκέδασης. Γι' αυτό το λόγο η χρήση τους βρίσκει ποικίλες εφαρμογές στη βιομηχανία, στην έρευνα και στην ιατρική [2],[4].

Τα φωτόνια των ακτίνων Χ καθώς διέρχονται από ένα υλικό όπως για παράδειγμα το ανθρώπινο σώμα, αλληλοεπιδρούν με τα σωματίδια του, του βιολογικούς ιστούς. Αυτό

οδηγεί στην εξασθένηση της έντασης της αρχικής δέσμης φωτονίων, όπου η ένταση της δέσμης που διαπερνά τους ιστούς I ισούται με την εκθετική μείωση της αρχικής έντασης I_0 (αριθμού φωτονίων) της δέσμης συναρτήσει του μήκους διαδρομής των φωτονίων στους ιστούς x και του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης (μ) σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση [2],[4]:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (1.1.1)$$

Ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης εξαρτάται από την ενέργεια των φωτονίων καθώς και από την πυκνότητα και τον ατομικό αριθμό (Z) του υλικού που διέρχονται τα φωτόνια. Μεγάλες τιμές μ οδηγούν σε γρήγορη εξασθένηση των φωτονίων. [2],[4]

Οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό των ιστών και οδηγούν στην εξασθένηση της δέσμης είναι οι παρακάτω:

1. **Ελαστική Σκέδαση Rayleigh:** Στο φαινόμενο αυτό τα φωτόνια X αλληλοεπιδρούν με τα ηλεκτρόνια των ατόμων με αποτέλεσμα την μεταβολή της διεύθυνσης διάδοσής τους χωρίς όμως την απώλεια ενέργειας. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε χαμηλές ενέργειες περίπου 10 keV και σε υλικά με υψηλό ατομικό αριθμό [2],[4].
2. **Ανελαστική Σκέδαση Compton:** σε αυτή την περίπτωση τα φωτόνια “συγκρούονται” με τα χαλαρά συνδεδεμένα ηλεκτρόνια ενός ατόμου. Όταν συμβεί αυτό ένα μέρος της ενέργειας του φωτονίου μεταφέρεται με τη μορφή κινητικής ενέργειας στο χαλαρά συνδεδεμένο ηλεκτρόνιο και παρατηρείται εκτροπή της διεύθυνσης διάδοσης του φωτονίου. Η γωνία εκτροπής του φωτονίου ονομάζεται γωνία σκεδάσεως Compton, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της τόσο μεγαλύτερη είναι και η ενέργεια που μεταφέρεται στο ηλεκτρόνιο και τόσο μικρότερη αυτή που παραμένει στο σκεδαζόμενο φωτόνιο. Το εκτρεπόμενο ηλεκτρόνιο υφίσταται ιονισμό και η ενέργεια που απομένει στο φωτόνιο ισούται με [2],[4]:

$$E_f = \frac{E_i}{1 + \left(\frac{E_i}{m \cdot c^2}\right) \cdot (1 - \cos\theta)} \quad (1.1.2)$$

Όπου E_f η ενέργεια του φωτονίου μετά τη σκέδαση, E_i η ενέργεια του φωτονίου πριν τη σκέδαση, m η μάζα του ηλεκτρονίου, c η ταχύτητα του φωτός και θ η γωνία σκέδασης του φωτονίου [2],[4].

3. **Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο:** Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο περιγράφει την σύγκρουση ενός φωτονίου X με ένα ηλεκτρόνιο εσωτερικής στοιβάδας ενός ατόμου. Όταν συμβαίνει αυτό το φωτόνιο αποδίδει όλη του την ενέργεια και εξαφανίζεται, ένα μέρος της ενέργειας καταναλώνεται για να υπερνικηθεί η ελκτική δύναμη που ασκεί ο πυρήνας του ατόμου στο ηλεκτρόνιο και να συμβεί ιονισμός ενώ το υπόλοιπο μέρος της ενέργειας μεταφέρεται ως κινητική ενέργεια στο αποσπασμένο ηλεκτρόνιο. Με τον ιονισμό του ατόμου δημιουργείται μια κενή θέση στην ενεργειακή στοιβάδα η οποία καλύπτεται από κάποιο ηλεκτρόνιο υψηλότερης στοιβάδας με ταυτόχρονη εκπομπή της περισσευούμενης ενέργειας

υπό τη μορφή ακτινοβολίας. Στη συνέχεια το αποσπασμένο ηλεκτρόνιο ταξιδεύει μέσα στην ύλη προκαλώντας ιονισμούς έως ότου απορροφηθεί. Η πιθανότητα να συμβεί φωτοηλεκτρικό φαινόμενο αυξάνεται όταν η ενέργεια της δέσμης είναι μικρή, η πυκνότητα του υλικού μεγάλη και ο ατομικός αριθμός των ατόμων του υλικού είναι υψηλός [2],[4].

4. **Δίδυμη γένεση:** Κατά το φαινόμενο της δίδυμους γένεσης ένα φωτόνιο υψηλής ενέργειας ($E \geq 1,022 \text{ MeV}$) αλληλοεπιδρά με τον πυρήνα ενός ατόμου, αποτέλεσμα αυτής της αλληλεπίδρασης είναι η εξαφάνιση του φωτονίου και η δημιουργία ενός ηλεκτρονίου e^- και ενός ποζιτρονίου e^+ [2],[4].

1.2 Μαστογραφική απεικόνιση ακτίνων Χ

Η χρήση των ακτίνων Χ στην ιατρική βρίσκει ποικίλες εφαρμογές με τον διαχωρισμό τους σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στην ακτινοδιαγνωστική και στην ακτινοθεραπεία. Στην ακτινοδιαγνωστική οι ενέργειες των ακτίνων Χ είναι της τάξης των λίγων keV έως 150 keV και παράγονται με την λυχνίες ακτίνων Χ ενώ στην ακτινοθεραπεία οι ενέργειες μπορεί να είναι της τάξης των πολλών MeV όπου για να επιτευχθεί αυτή η ενέργεια χρησιμοποιούνται διατάξεις που ονομάζονται γραμμικοί επιταχυντές. Η παρούσα εργασία εστιάζει στην χρήση των ακτίνων Χ για την απεικόνιση του γυναικείου μαστού σε συνδυασμό με άμεσους ψηφιακούς ανιχνευτές ακτίνων Χ.

1.2.1 Μαστογραφία

Η μαστογραφία είναι μια μη επεμβατική εξέταση που με την βοήθεια των ακτίνων-Χ έχει ως στόχο την πρόωρη ανακάλυψη τυχόν αλλοιώσεων στο γυναικείο μαστό που μπορούν να οδηγήσουν στην ανάπτυξη καρκινικών όγκων. Οι αλλοιώσεις αυτές είναι δύσκολο να εντοπιστούν εξαιτίας της φύσης των ιστών που εντοπίζονται στο μαστό, δεδομένου ότι οι συντελεστές εξασθένησης των καρκινικών ιστών είναι παραπλήσιοι με αυτούς των υγιή ιστών που αποτελούνται από αδενικές δομές περιβαλλόμενες από ινοαγγειακό και λιπώδη ιστό. Άλλο ένα εμπόδιο στην αναγνώριση των αλλοιώσεων αποτελούν και οι διαφορετικοί τύποι μαστού που υπάρχουν ως προς την πυκνότητα τους, με αυτούς υψηλής πυκνότητας να δυσχεραίνουν ακόμη περισσότερο τον εντοπισμό των αλλοιώσεων. Για τον λόγο αυτό η μαστογραφία είναι μια εξέταση που απαιτεί υψηλή διακριτική ικανότητα και υψηλό SNR (βλέπε παράγραφο 1.4 Χαρακτηριστικά ανιχνευτών). [2],[7]

Για να επιτευχθεί η βέλτιστη δυνατή εικόνα με υψηλό SNR είναι απαραίτητη η σωστή επιλογή παραμέτρων όπως: το υλικό της ανόδου, το φίλτρο (υλικό και πάχος) της λυχνίας, το είδος του ψηφιακού ανιχνευτή και ο αλγόριθμος επεξεργασίας της εικόνας. Ταυτόχρονα οι συνθήκες έκθεσης πρέπει να είναι τέτοιες ώστε η δόση στο μαστό να είναι στο χαμηλότερο δυνατό επίπεδο [2],[7].

Τα συστήματα μαστογραφικής απεικόνισης χωρίζονται σε 3 βασικά τμήματα: το τμήμα παραγωγής ακτίνων Χ, το πίεστρο του μαστού και τη διάταξη ανίχνευσης ακτίνων Χ.

1.2.2 Παραγωγή Ακτίνων Χ

Οι ακτίνες Χ παράγονται από τη λυχνία ακτίνων Χ, ένα κυλινδρικό υάλινο δοχείο όπου μέσα του βρίσκονται δύο κύριες διατάξεις η άνοδος και η κάθοδος σε κενό αέρος. Στην κάθοδο με τη θέρμανση ενός σύρματος βολφραμίου δημιουργείται ένας νέφος ηλεκτρονίων μέσω του φαινομένου της θερμιονικής εκπομπής, τα ηλεκτρόνια ως αρνητικά φορτισμένα σωματίδια επιταχύνονται προς την άνοδο εξαιτίας της υψηλής διαφοράς δυναμικού μεταξύ καθόδου και ανόδου, που είναι της τάξης των kV, αποκτώντας υψηλή κινητική ενέργεια. Η άνοδος αποτελείται από ένα δίσκο υπό κλίση επικαλυμμένο από στρώμα βολφραμίου W (στην μαστογραφία χρησιμοποιείται επίσης το μολυβδαίνιο Mo και το ρόδιο Rh) όπου περιστρέφεται με τη βοήθεια ενός ρότορα με μεγάλη ταχύτητα. Τα επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια προσκρούουν στο στρεφόμενο στόχο της ανόδου όπου επιβραδύνουν απότομα και η κινητική τους ενέργεια γίνεται κατά 99% θερμική και 1% ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ακτίνων Χ που ονομάζεται αλλιώς

“ακτινοβολία πεδήσεως”. Επιπλέον της ακτινοβολίας πεδήσεως εκπέμπεται και η χαρακτηριστική ακτινοβολία X του υλικού του στόχου της ανόδου εξαιτίας του ιονισμού που προκαλείται στα περιφερειακά ηλεκτρόνια των ατόμων της ανόδου λόγω των προσπιπτόντων ηλεκτρονίων. Απέναντι από την άνοδο βρίσκεται το παράθυρο Βηρυλλίου, ένα φύλλο από βηρύλλιο, που επιτρέπει τη διέλευση των ακτίνων X και όχι των σκεδαζόμενων ηλεκτρονίων [2],[7].

Η όλη διάταξη του υάλινου δοχείου περιέχεται σε ένα κύλινδρο αλουμινίου που στο εσωτερικό του και μεταξύ του υάλινου δοχείου βρίσκεται έλαιο που βοηθάει στην ψύξη της λυχνίας και την ηλεκτρική της μόνωση. Επιπλέον ο κύλινδρος αλουμινίου αποκόπτει τυχόν ακτίνες X προερχόμενες από οπισθοσκέδαση που είναι ανεπιθύμητες. Στο σημείο που γίνεται η έξοδος των ακτίνων X υπάρχει κατάλληλο φίλτρο, συνήθως αλουμίνιο Al της τάξης των λίγων mm που επιλέγεται με βάση την εξέταση που θα πραγματοποιηθεί με σκοπό την αποκοπή των ακτίνων X χαμηλής ενέργειας. Στη συνέχεια οι παραγόμενες ακτίνες X κατευθύνονται στο υπό εξέταση υποκείμενο [2],[7].

Το παραγόμενο φάσμα ακτίνων X που εξέρχεται από την λυχνία περιέχει μια ποικιλία ενεργειών φωτονίων X με μέγιστη ενέργεια αυτή που επιλέχθηκε στη λυχνία. Στη μαστογραφία όπως αναφέρθηκε εξαιτίας της δομής και της πυκνότητας των ιστών που βρίσκονται στο μαστό είναι δύσκολη η απεικόνιση τυχόν αλλοιώσεων σε σχέση με τους φυσιολογικούς ιστούς με ικανοποιητική αντίθεση εξαιτίας του παρόμοιου συντελεστή εξασθένησης των ακτίνων X μ (Εξίσωση 1.1.1). Επιπλέον ο συντελεστής εξασθένησης μ ελαττώνεται με την αύξηση της ενέργειας του φάσματος, έτσι είναι απαραίτητη η χρήση ενός «στενού» φάσματος από άποψη ενεργειών μεταξύ 17-24 keV. Στις ενέργειες αυτές το κύριο φαινόμενο αλληλεπίδρασης των ακτίνων X με τους ιστούς είναι το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Έτσι η παραγόμενη αντίθεση που εμφανίζεται στην τελική εικόνα είναι αποτέλεσμα του συντελεστή απορρόφησης των υπό εξέταση ιστών και του μήκους της διαδρομής που ακολουθούν τα φωτόνια X (βλέπε παρακάτω) [2],[7].

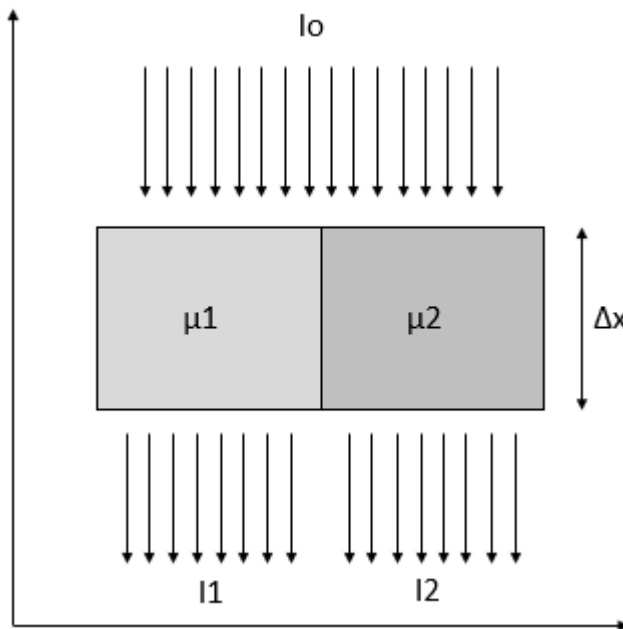
1.2.3 Πίεστρο Μαστού

Ένα ακόμη από τα βασικά μέρη που συναντάει κανείς σε ένα μαστογράφο είναι αυτό του πιέστρου του μαστού. Το πίεστρο είναι μια διάταξη από διαφανές πλαστικό που συμπιέζει το μαστό επάνω στην τράπεζα συγκράτησης του μαστού με σκοπό την ακινητοποίηση του για την αποφυγή ασάφειας εξαιτίας κίνησης αλλά και για να διευρυνθούν οι ανατομικές δομές και να αποκαλυφθούν τυχόν αλλοιώσεις που υπερκαλύπτονται από τους περιβάλλον ιστούς. Τέλος η σημαντικότερη λειτουργία που διαδραματίζει το πίεστρο είναι αυτή της δημιουργίας ομοιόμορφου πάχους ακτινοβολήσεως σε όλο το πεδίο [7].

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι ακτίνες X αλληλοεπιδρούν με την ύλη με 4 τρόπους: τη σκέδαση Compton, τη σκέδαση Rayleigh, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και τη δίδυμη γένεση, η οποία δε συναντάται στην ακτινοδιαγνωστική εξαιτίας των χαμηλών ενεργειών που χρησιμοποιούνται. Η συνολική εξασθένηση που υφίσταται μια δέσμη ακτίνων χ εκφράζεται από τη σχέση (1.1.1). Παρατηρώντας τη σχέση αυτή γίνεται αντιληπτό ότι η εξασθένηση της ακτινοβολίας που καταγράφεται στον ψηφιακό ανιχνευτή είναι αποτέλεσμα του πάχους του ιστού που διέρχεται η δέσμη και του συντελεστή γραμμικής εξασθένησης μ, που εξαρτάται από την ενέργεια των φωτονίων,

την πυκνότητα και τον ατομικό αριθμό των ιστών. Έτσι για περιοχές όπου γίνεται απεικόνιση ιστών με διαφορετική πυκνότητα και Z όπως για παράδειγμα στο θώρακα, η αντίθεση, δηλαδή η διαφορά στην ένταση της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί σε δύο διαφορετικές περιοχές, είναι μεγάλη και μπορεί να φανούν με ευκολία οι διαφορετικοί ιστοί εξαιτίας της διαφορετικής τους σύστασης ανεξάρτητα του μήκους της διαδρομής που διέρχονται οι ακτίνες X [2],[7].

Ο παραπάνω μηχανισμός όμως δεν είναι ικανός για απεικόνιση περιοχών όπου οι ιστοί έχουν παραπλήσιο Z και πυκνότητα όπως συμβαίνει στο μαστό. Με τη χρήση του πιάστρου το πάχος του υπό ακτινοβολία ιστού γίνεται ομοιόμορφο με αποτέλεσμα το μήκος της διαδρομής που ακολουθούν τα φωτόνια X να είναι ίδιο για όλο το πεδίο. Έτσι η παραγόμενη αντίθεση που καταγράφεται στον ανιχνευτή για δύο γειτονικές περιοχές είναι αποτέλεσμα του διαφορετικού συντελεστή απορρόφησης μ δηλαδή της σύστασης του ιστού [2],[7].



Εικόνα 1 Γραφική αναπαράσταση εξασθένησης της ακτινοβολίας σε γειτονικές περιοχές διαφορετικής σύστασης

1.2.4 Διάταξη ανίχνευσης ακτίνων X

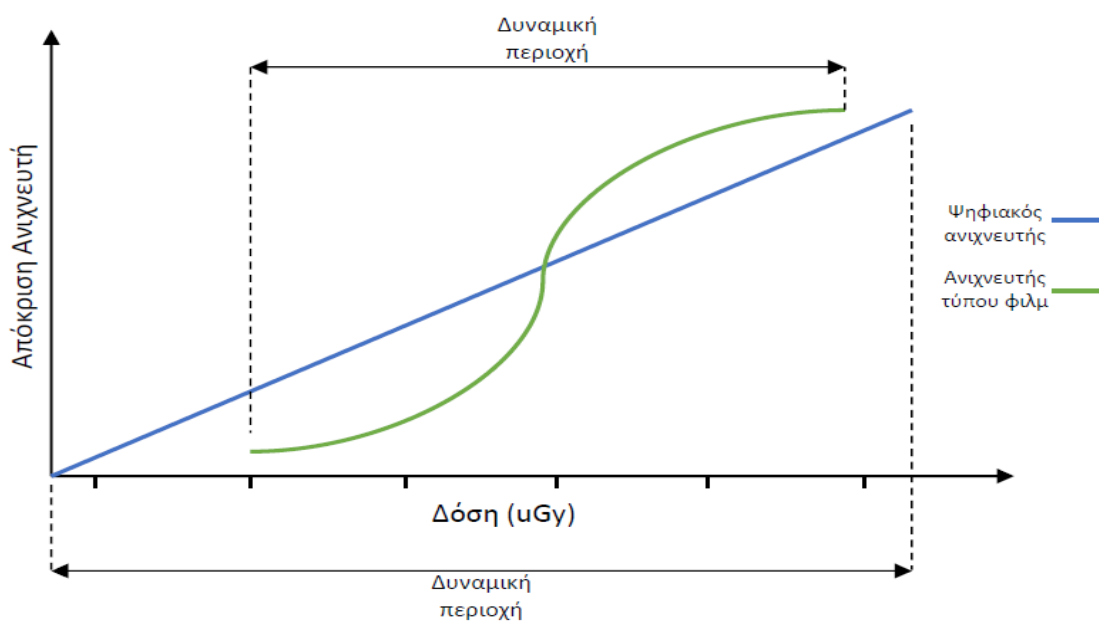
Ο ανιχνευτής ακτίνων X αναλαμβάνει να καταγράψει την εξερχόμενη ακτινοβολία από το μαστό. Τα φωτόνια X διέρχονται μέσα από τον ιστό του μαστού και στη συνέχεια προσπίπτουν πάνω στον ανιχνευτή ακτίνων X όπου μετατρέπονται σε ηλεκτρικό σήμα και εν τέλει στην τελική εικόνα (βλέπε παράγραφο 1.3). Η απεικόνιση του μαστού γίνεται με τη χρήση διαφορετικών αποχρώσεων του γκρι ανάλογα εξασθένηση που έχουν δεχτεί οι ακτίνες X καθώς διέρχονται από αυτόν. Οι ιστοί με μεγάλη πυκνότητα και υψηλό ατομικό αριθμό απορροφούν μεγάλη ποσότητα φωτονίων X με αποτέλεσμα να απεικονίζονται με αποχρώσεις του γκρι προς το λευκό υποδηλώνοντας μεγάλη εξασθένηση της ακτινοβολίας ενώ οι μαλακοί ιστοί απεικονίζονται με αποχρώσεις γκρι προς το λευκό υποδηλώνοντας μικρή εξασθένηση [2].

1.3 Ψηφιακοί ανιχνευτές ακτίνων Χ

Στην διαγνωστική ακτινολογία η πληροφορία που φέρνουν τα κβάντα των ακτίνων Χ αποτυπώνονται πάνω σε ένα ανιχνευτή, που έχει την δυνατότητα να αποτυπώνει την χωρική διακύμανση αλλά και την διακύμανση της έντασης των ακτίνων Χ. Πριν την χρήση της ψηφιακής τεχνολογίας στην ακτινολογία η αποτύπωση της πληροφορίας των ακτίνων Χ γινόταν πάνω σε αναλογικούς ανιχνευτές, που αποτελούνται από ένα φιλμ σε επαφή με μια φθορίζουσα επίστρωση screen-film (SF). Το φιλμ έχει την ιδιότητα να ανιχνεύει την προσπίπτουσα ακτινοβολία και να την μετατρέπει σε ορατό φως. Στη συνέχεια η οθόνη φωσφόρου που είναι προσκολλημένη στο φιλμ ανιχνεύει το φως και το μετατρέπει σε σήμα. Η ποσότητα του φωτός που παράγεται στο φιλμ είναι ανάλογη της έντασης της ακτινοβολίας που εξέρχεται από το υπό εξέταση δείγμα [13].

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας στα ψηφιακά συστήματα και στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές από την δεκαετία του 80' και μετά αναπτύχθηκαν τεχνολογίες που βρήκαν εφαρμογή στην ακτινοδιαγνωστική. Ο αναλογικός ανιχνευτής που έβρισκε χρήση μέχρι πρότινος αντικαταστάθηκε από τους ψηφιακούς ανιχνευτές. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να ξεπεραστούν πολλά προβλήματα που υπήρχαν με την χρήση των SF συστημάτων αλλά και να δημιουργηθούν νέα που απαιτούσαν ενδελεχή μελέτη για την επίλυση τους όπως η διατήρηση της ποιότητας της εικόνας κατά την ψηφιοποίηση και η διαχείριση της δόσης που λαμβάνει ο ασθενής [12],[13].

Το πρόβλημα διαχείρισης της δόσης αποτέλεσε αντικείμενο πολλών ερευνών έως την επίλυση του. Τα κλασικά ακτινογραφικά συστήματα υποφέρουν από το περιορισμένο δυναμικό εύρος του ακτινογραφικού φιλμ, η χαρακτηριστική καμπύλη έκθεσης-αντίθεσης ενός συστήματος SF είναι λογαριθμική και έχει την μορφή S, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να έχει περιορισμένη δυναμική περιοχή όπου η έκθεση ακολουθεί γραμμική σχέση με την αντίθεση όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2. Έτσι για μικρές και υψηλές τιμές έκθεσης η παραγόμενη αντίθεση δεν είναι ικανοποιητική με αποτέλεσμα να μην εξάγονται χρήσιμες διαγνωστικές πληροφορίες. Σε αντίθεση, η χαρακτηριστική καμπύλη



Εικόνα 2 Σύγκριση δυναμικής περιοχής συστημάτων με ανιχνευτή τύπου φιλμ και ψηφιακό ανιχνευτή.

αποτελεί την μόνη διαφορά με τα κλασικά συστήματα φιλμ, και περιέχει ένα υλικό φωσφόρου με τη μορφή κρυστάλλου συνήθως $BaFX:Eu^{2+}$ όπου στη θέση του X μπορούν να είναι ένα από τα αλογόνα Cl, Br ή I. Κατά το στάδιο 1) της ακτινοβόλησης του υλικού ο φώσφορος απορροφά και αποθηκεύει την ενέργεια των προσπιπτουσών ακτίνων X. Στην κρυσταλλική δομή του υλικού αποθηκεύεται μία λανθάνουσα μορφή της εικόνας σε υψηλές ενεργειακές στοιβάδες. Στη συνέχεια στο στάδιο 2) η κασέτα μεταφέρεται στη συσκευή ανάγνωσης της λανθάνουσας εικόνας. Εδώ με τη χρήση ενός συστήματος λείζερ κατάλληλου μήκους κύματος σαρώνεται η επιφάνεια του φωσφόρου και αποδιεγείρονται τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στις υψηλότερες στοιβάδες εκπέμποντας ταυτόχρονα μπλε φως έντασης ανάλογης με αυτής των ακτίνων X. Το εκπεμπόμενο φως συλλέγεται από ένα σύστημα οπτικών ινών και οδηγείται σε ένα φωτοπολλαπλασιαστή όπου παράγεται το ηλεκτρικό φορτίο-σήμα, στη συνέχεια με τη χρήση ενός αναλογοψηφιακού μετατροπέα το σήμα ψηφιοποιείται. Τα συστήματα αυτά έχουν την δυνατότητα να αποθηκεύουν την λανθάνουσα εικόνα για κάποιο χρονικό διάστημα με κόστος όμως την απώλεια σήματος εξαιτίας αυθόρμητης εκπομπής του φωσφόρου. Τέλος το τελευταίο βήμα 3) για την λήψη της εικόνας είναι η διαγραφή του ανιχνευτή από το εναπομείναν σήμα αποδιεγείροντας τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στις υψηλότερες στάθμες με την εκπομπή ενός λευκού φωτός υψηλής έντασης [2],[12].

1.3.2 Συστήματα ψηφιακής ακτινογραφίας – DR

Τη δεκαετία του 90' αναπτύχθηκαν τα συστήματα της ψηφιακής ακτινογραφίας DR. Στα συστήματα αυτά που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα οι ανιχνευτές ακτίνων X είναι μία διάταξη ανιχνευτών ενεργού μήτρας μεγάλης επιφάνειας (active matrix flat-panel detectors – AMFI). Η εισαγωγή της τεχνολογίας AMFI έδωσε τη δυνατότητα για μία σημαντική μείωση στη δόση που λαμβάνουν οι ασθενείς έως και 50% κατά την λήψη της ακτινογραφικής εικόνας σε σχέση με τα SF συστήματα χωρίς απώλεια στην ποιότητα της εικόνας εξαιτίας του υψηλού συντελεστή κβαντικής ανιχνευτικής αποδοτικότητας (DQE) και της δυναμικής περιοχής του ανιχνευτή. Τα συστήματα DR υπερέρχουν σε αποδοτικότητα των συστημάτων CR κατά 25-30% και από τα συστήματα SF κατά 25% [2],[12].

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν δύο τύπο ανιχνευτών, άμεσης και έμμεσης μετατροπής των ακτίνων X σε ηλεκτρικό φορτίο. Και στις δύο περιπτώσεις η βασικής δομή του ανιχνευτή βασίζεται στην τεχνολογία AMFI. Ο ανιχνευτής αποτελείται από μια υάλινη βάση μεγάλης διάστασης, πάνω σε αυτή τη βάση είναι τοποθετημένη μία μήτρα, υπό μορφή πλέγματος, φωτοδίοδων μεγάλου αριθμού τις τάξη των δεκάδων χιλιάδων φωτοδίοδων, λόγω του μικρού μεγέθους τους (aperture width– a) και την μεταξύ απόσταση των φωτοδίοδων (pixel pitch – d) που είναι της τάξης των δεκάδων μm. Κάθε φωτοδίοδος αποτελείται από άμορφο υδρογονωμένο πυρίτιο a-Si:H και συνθέτει ένα στοιχειώδες στοιχείο (pixel), μια τυπική τιμή Η φωτοδίοδος είναι συνδεδεμένη με ένα διακόπτη λεπτού υμενίου, που μπορεί να είναι τρανζίστορ λεπτού υμενίου (TFT) ή κάποια δίοδος ή τρανζίστορ. Στην επάνω επιφάνεια της μήτρας βρίσκεται μια φθορίζουσα οθόνη που αναλαμβάνει την ανίχνευση της ακτινοβολίας, ουσιαστικά η σύνθεση του ανιχνευτή ακτίνων X είναι αυτή που διαχωρίζει τα συστήματα DR σε

έμμεσης και άμεσης ανίχνευσης. Το πάχος της φθορίζουσας οθόνης είναι της τάξης των εκατοντάδων μm [2],[6],[12].

Άλλη μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται στα ψηφιακά συστήματα στη θέση των ανιχνευτών AMFI είναι η χρήση διατάξεων συσκευών συζευγμένου φορτίου (Charged Coupled Devices – CCD). Στους ανιχνευτές αυτού του τύπου όπως και στους AMFI στο πάνω μέρος υπάρχει μια φθορίζουσα οθόνη, συνήθως από $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$, μεγαλύτερων όμως διαστάσεων από αυτή των φωτοδιόδων. Αυτό δημιουργεί την ανάγκη για τη χρήση οπτικών ινών κατάλληλης κατασκευής και διαμέτρου έτσι ώστε να οδηγούν το φως από τη φθορίζουσα οθόνη στη διάταξη των φωτοδιόδων CCD. Η διάταξη των φωτοδιόδων συνίσταται από ολοκληρωμένα ημιαγωγικά κυκλώματα στοιχειωδών πυκνωτών-pixel όπου με την ύπαρξη διαφοράς δυναμικού μεταξύ κάθε pixel και την ύπαρξη ενός φρέατος δυναμικού σε σχέση με τον κάτω σπλισμό του πυκνωτή-διάταξης (οξειδίο του πυριτίου) το ηλεκτρικό φορτίο μεταφέρεται στην έξοδο της διάταξης, αποθηκεύεται και οδηγείται στα κυκλώματα ψηφιοποίησης. Τα συστήματα CCD προσφέρουν υψηλή διακριτική ικανότητα (βλέπε 1.4) και η καμπύλη απόκρισης τους είναι γραμμική με μεγάλο δυναμικό εύρος [2],[13].

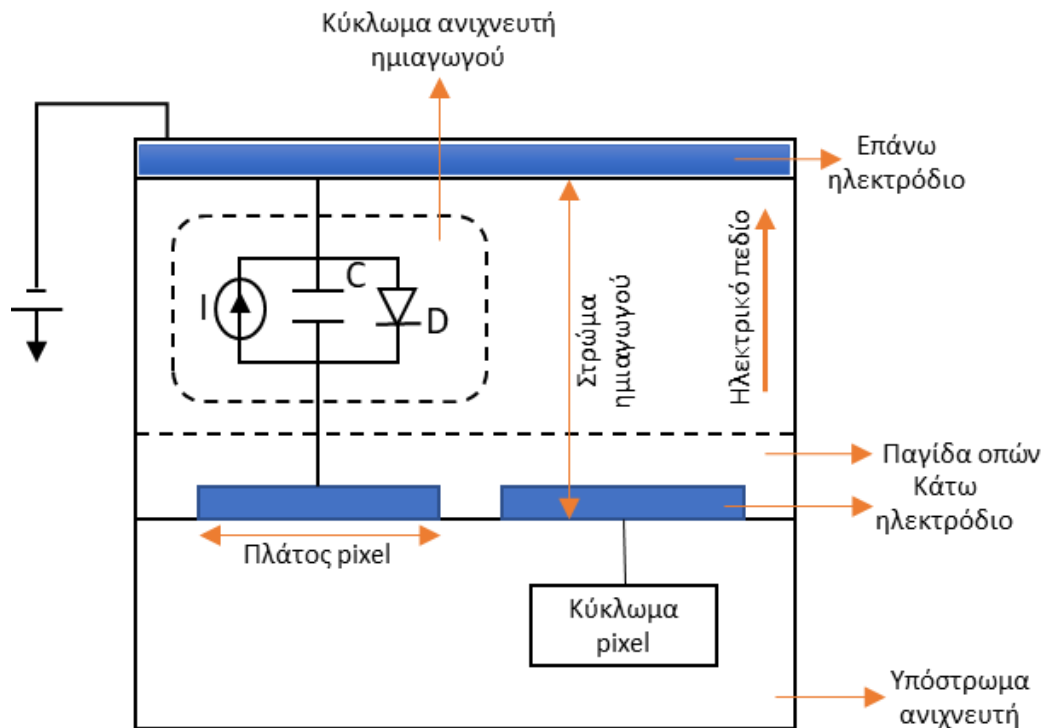
Στα συστήματα έμμεσης ανίχνευσης η ακτινοβολία καθώς προσπίπτει στην φθορίζουσα οθόνη που αποτελείται από φωσφορούχο υλικό CsI:Tl ή $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ μετατρέπεται σε φως που ανιχνεύεται από τις φωτοδιόδους άμορφου πυριτίου. Η δομή του φωσφορούχου υλικού μπορεί να είναι δομημένη (CsI:Tl) υπό τη μορφή «βελόνων» που περιορίζουν την σκέδαση του φωτός και βελτιώνουν την χωρική διακριτική ικανότητα (MTF) ή αδόμητη ($\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$) που ευνοεί την πλευρική σκέδαση του φωτός και την υποβάθμιση του MTF. Για κάθε ένα φωτόνιο X που απορροφάτε δημιουργούνται εκατοντάδες οπτικά φωτόνια γεγονός που οδηγεί σε αύξηση του παραγόμενου σήματος. Οι φωτοδιόδοι μετατρέπουν το φως σε ηλεκτρικό φορτίο που αποθηκεύεται σε πυκνωτές αποθήκευσης, ένας σε κάθε στοιχείο. Στη συνέχεια το φορτίο αυτό μέσω κατάλληλου κυκλώματος και διακοπών TFT κατά την φάση της ανάγνωσης, γραμμή προς γραμμή της μήτρας καταλήγουν σε ένα πολυπλέκτη και από εκεί σε αναλογοψηφιακούς μετατροπείς για την ψηφιοποίηση του σήματος [2],[5],[12],[13],[17].

Στα συστήματα άμεσης ανίχνευσης τη θέση της φθορίζουσας οθόνης λαμβάνει μια στρώση από άμορφο σελήνιο (a-Se). Πριν την έκθεση εφαρμόζεται στο a-Se ένα ηλεκτρικό πεδίο (Electric Field – F) της τάξεως δεκάδων $\text{V}/\mu\text{m}$. Κατά την έκθεση και την απορρόφηση των ακτίνων X από την στρώση του άμορφου σεληνίου δημιουργούνται ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων. Το φορτίο που παράγεται είναι ανάλογο της έντασης της δέσμης και ταξιδεύει σχεδόν κάθετα χωρίς μεγάλη πλευρική σκέδαση στο εσωτερικό του σεληνίου. Τέλος το φορτίο αυτό συλλέγεται από τα στοιχεία TFT που λειτουργούν ως πυκνωτές ενώ αποθηκεύεται, ενισχύεται και κωδικοποιείται με βάση του θέση του εκάστοτε pixel έως τη φάση της ανάγνωσης. Η διαδικασία που ακολουθείται κατά τη φάση της ανάγνωσης και ψηφιοποίησης του σήματος είναι ίδια με τα συστήματα έμμεσης ανίχνευσης. Τα συστήματα άμεσης ανίχνευσης το φορτίο που παράγεται κατά την απορρόφηση των ακτίνων X οδηγείται στον ανιχνευτή χωρίς πλευρική σκέδαση εξαιτίας του εφαρμοσμένου ηλεκτρικού πεδίου F. Έτσι τα μπορούν να χρησιμοποιηθούν παχύτερες στρώσεις a-Se χωρίς σημαντική ασάφεια με σκοπό την μεγαλύτερη

απορρόφηση της ακτινοβολίας και την καλύτερη κβαντική απόδοση του συστήματος [2],[6],[12],[13],[16].

Και στις δύο περιπτώσεις των ψηφιακών ανιχνευτών μεταξύ των pixel εμφανίζεται ένα κενό που αποτελεί την «νεκρή» ζώνη. Η νεκρή ζώνη είναι η περιοχή στον ανιχνευτή που δεν εμπλέκεται στην μετατροπή των απορροφημένων ακτίνων X σε ηλεκτρικό φορτίο. Η συνολική επιφάνεια των pixel που συμμετέχουν στην ανίχνευση των ακτίνων X και στο σχηματισμό του ηλεκτρικού φορτίου σε σχέση με την συνολική επιφάνεια του ανιχνευτή ορίζεται από το συντελεστή κάλυψης (Fill Factor – FF). Ο συντελεστής αυτός έχει συνήθως τυπικές τιμές 75-85% [6],[16].

Άλλο ένα χαρακτηριστικό των DR ανιχνευτών είναι ο τύπος του αισθητήρα που χρησιμοποιείται στα στοιχεία TFT, χωρίζονται στους active pixel sensor (APS) και passive pixel sensor (PPS). Στους PPS κάθε pixel αποτελείται από ένα TFT που λειτουργεί ως διακόπτης μεταφοράς του φορτίου από τον πυκνωτή στο εξωτερικό κύκλωμα ενώ στους APS κάθε pixel αποτελείται από ένα ή περισσότερα TFT που προκαλούν ενίσχυση και δίνουν την δυνατότητα να επιτευχθεί μεγαλύτερο DQE για χαμηλότερες δόσεις [16].



Εικόνα 4 Σχηματικό διάγραμμα ψηφιακού ανιχνευτή AMFI άμεσης ανίχνευσης a-Se

1.4 Ποιοτικά χαρακτηριστικά εικόνων ακτίνων Χ

Μια ιατρική εικόνα ακτινογραφίας αποτελεί μια αποτύπωση της εξασθένησης της ακτινοβολίας καθώς διέρχεται μέσα από το υπό εξέταση αντικείμενο. Για να θεωρηθεί μια ιατρική εικόνα ως «καλή» θα πρέπει να παρέχει στον γιατρό χρήσιμες διαγνωστικές πληροφορίες. Ο χαρακτηρισμός αυτός μπορεί να γίνει υποκειμενικά, από ένα έμπειρο ακτινολόγο που έχει τη δυνατότητα να εντοπίζει τις χρήσιμες πληροφορίες ανάμεσα στις υπόλοιπες αλλά και αντικειμενικά μέσω της αξιολόγησης ορισμένων αριθμητικών παραμέτρων που είναι άμεση απόρροια του συστήματος ανίχνευσης των ακτίνων Χ. Οι παράμετροι αυτοί είναι: η αντίθεση, η ασάφεια, η χωρική διακριτική ικανότητα, ο θόρυβος και η κβαντική ανιχνευτική αποδοτικότητα. Στην παρούσα εργασία ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί στις 3 τελευταίες παραμέτρους [2].

1.4.1 Αντίθεση

Η αντίθεση εκφράζει τις διαφορές στην ένταση της ακτινοβολίας που καταγράφονται σε διάφορες περιοχές της εικόνας ή αλλιώς την αναλογία διαφοράς του σήματος προς το μέσο σήμα που καταγράφεται σε μία εικόνα. Ο τύπος της αντίθεσης δίνεται από τη σχέση [2]:

$$Cs = \frac{\Delta I}{I_0} = 1 - e^{-\mu \cdot \Delta x} \quad (1.4.1)$$

Σύμφωνα με την σχέση αυτή η αντίθεση Cs – Contrast είναι άμεσα συνδεδεμένη με το πάχος της δομής που διέρχονται οι ακτίνες Χ και το υλικό της [2],[7].

1.4.2 Οξύτητα-Ασάφεια

Ως οξύτητα ορίζεται η ευκρίνεια με την οποία μπορούν να διακριθούν τα όρια δύο γειτονικών ανατομικών περιοχών. Σε ένα ιδανικό σύστημα η αποτύπωση δύο γειτονικών σημείων από το ακτινογραφικό σύστημα θα γινόταν με σαφή διαχωρισμό τους χωρίς να εμπλέκονται τα όρια τους. Αυτό σε πραγματικές συνθήκες δεν μπορεί να συμβεί και παρατηρείται μια αλλοιωμένη εικόνα στην οποία τα δύο σημεία φαίνονται να ενώνονται σαν δύο κηλίδες και να χάνεται η αντίθεση τους σε σχέση με το υπόβαθρο. Αυτό το φαινόμενο είναι αποτέλεσμα διάφορων διαδικασιών που προέρχονται από τον ασθενή και το απεικονιστικό σύστημα όπως είναι: 1) το φαινόμενο της παρασκιάς, 2) η κίνηση του ασθενούς και των οργάνων κατά την ακτινοβολήση, 3) η διάχυση του φωτός στην ενισχυτική πινακίδα τους ανιχνευτή και 4) ασάφεια κατά την απορρόφηση της ακτινοβολίας από τις υπό εξέταση δομές λόγω του διαφορετικού τους πάχους κατά το μήκος τους. Κάθε στάδιο που παρεμβάλλεται από την ακτινοβολήση έως το σχηματισμό της τελικής εικόνας προσθέτει ασάφεια στην τελική εικόνα [2].

1.4.3 Χωρική διακριτική ικανότητα – Συνάρτηση μεταφοράς διαμόρφωσης

Διακριτική ικανότητα είναι η δυνατότητα ενός συστήματος να απεικονίζει αντικείμενα μικρών διαστάσεων και ορίζεται ως η ελάχιστη απόσταση που θα πρέπει να έχουν μεταξύ τους δύο γειτονικές μικρές δομές έτσι ώστε να είναι δυνατή η διάκριση τους. Η διακριτική ικανότητα ενός συστήματος και η ασάφεια που αναφέρθηκε προηγουμένως μπορούν να ποσοτικοποιηθούν κάνοντας χρήση ομοιωμάτων από υλικό με υψηλό ατομικό αριθμό

και με σαφή - διακριτά όρια. Η προβολή κατανομής της έντασης της ακτινοβολίας του ομοιώματος που θα ληφθεί διαφέρει από την κατανομή που θα λαμβάναμε σε ένα ιδανικό σύστημα, η διαφορά αυτή οφείλεται στην ασάφεια που προστίθεται από κάθε στάδιο έως τη δημιουργία της εικόνας. Στην προκειμένη περίπτωση η ασάφεια ορίζεται από την συνάρτηση διασποράς σημείου, Point Spread Function – PSF. Το μέσο της μέγιστης τιμής της καμπύλης PSF, Full width Half Maximum – FWHM, αποτελεί ένα μέτρο της διακριτικής ικανότητας του συστήματος στο χώρο [2],[7].

Κάνοντας χρήση της συνάρτησης PSF και με ολοκλήρωση σε μία διεύθυνση προκύπτει η συνάρτηση γραμμικής διασποράς, Line Spread Function – LSF. Στη συνέχεια εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό Fourier στην LSF προκύπτει η συνάρτηση μεταφοράς διαμόρφωσης, Modulation Transfer Function – MTF. Η συνάρτηση MTF ουσιαστικά περιγράφει την μεταβολή και υποβάθμιση που υφίσταται το σήμα καθώς διέρχεται από διαφορετικά συστήματα έως ότου παραχθεί η τελική εικόνα. Κάθε στάδιο του συστήματος περιγράφεται από τη δική του συνάρτηση MTF όπου λειτουργεί αθροιστικά στο σχηματισμό της τελικής MTF [2],[7],[8],[11],[12].

Το σήμα καθώς διέρχεται από τα διάφορα στάδια ενός συστήματος από την είσοδο έως την έξοδο του παραμορφώνεται ή χάνεται. Οι πληροφορίες του σήματος που υφίσταται την μεγαλύτερη αλλοίωση είναι αυτές που προέρχονται από δομές μικρών διαστάσεων μικρή μεταξύ τους απόσταση ή αλλιώς από δομές υψηλών χωρικών συχνοτήτων. Έτσι παρατηρώντας την καμπύλη MTF ενός συστήματος βλέπουμε ότι καθώς αυξάνεται η χωρική συχνότητα, η τιμή της συνάρτησης ελαττώνεται. Λαμβάνει τιμές $0 \leq MTF \leq 1$ με μονάδες lp/mm (γραμμές ανά χιλιοστά) και αποτελεί μέτρο εκτίμησης της πιστότητας ενός συστήματος. Στη βιβλιογραφία ως μέτρο διακριτικής ικανότητας ενός συστήματος εξετάζεται η τιμή της συνάρτησης $MTF=0.1$ [2],[7],[8],[11],[12].

1.4.4 Θόρυβος – Φάσμα ισχύος θορύβου

Ο θόρυβος χαρακτηρίζει το σύνολο πληροφοριών που δεν έχουν διαγνωστική αξία σε μια εικόνα, ενώ ο λόγος σήματος προς θόρυβο SNR αποτελεί μια ποσοτικοποίηση της πληροφορίας που περιέχεται στην εικόνα. Όσο πιο κοντά στο ένα είναι η τιμή του παραπάνω λόγου τόσο μεγαλύτερη είναι η διαγνωστική αξία μίας εικόνας. Ο θόρυβος μερικές φορές είναι υποκειμενικός και εξαρτάται από την εμπειρία του τελικού αποδέκτη της εικόνας ή την πληροφορία που αναζητείτε. Διακρίνεται σε δύο κατηγορίες τον τυχαίο «στατιστικό» και στον συστηματικό θόρυβο. Συστηματικός είναι ο θόρυβος που συναντάται σε όλες τις εικόνες που λαμβάνονται από ένα σύστημα και μπορεί να εντοπισθεί και να εξαλειφθεί όπως για παράδειγμα ανατομικός θόρυβος που οφείλεται σε υπερκείμενες ανατομικές δομές κατά την ακτινογραφία, ενώ ο στατιστικός θόρυβος υπάγεται σε στατιστικούς νόμους και μπορεί μόνο να ελαττωθεί με τη χρήση τεχνικών βελτίωσης της εικόνας και της ψηφιακής της επεξεργασίας [2],[7],[8],[11],[12].

Μια ειδική κατηγορία του τυχαίου θορύβου είναι ο ακτινογραφικός θόρυβος. Ο ακτινογραφικός θόρυβος πηγάζει από το απεικονιστικό σύστημα με την εμφάνιση ανομοιογένειών στην τελική εικόνα που δεν οφείλονται σε εξωγενείς παράγοντες και γίνεται αντιληπτός κυρίως στην απεικόνιση δομών χαμηλής αντίθεσης. Συνιστώσα του ακτινογραφικού θορύβου είναι ο κβαντικός θόρυβος. Ο κβαντικός θόρυβος προέρχεται από την φύση των ακτίνων X και υποδηλώνει την ανεπάρκεια και ανομοιόμορφη

κατανομή της πληροφορίας, είναι καθαρά στατιστικός και έχει άμεσης σχέση με τον παραγόμενο αριθμό φωτονίων. Ο κβαντικός θόρυβος εμφανίζεται με την μορφή τυχαίων μεταβολών γύρω από την μέση τιμή του σήματος, ακολουθεί την κατανομή Poisson και μπορεί να περιγράψει σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\text{Μέση τιμή : } N \qquad \text{Τυπική απόκλιση: } \sqrt{N} \qquad (1.4.2)$$

Όπου N είναι ο αριθμός των φωτονίων – μέση τιμή σήματος και \sqrt{N} είναι ο θόρυβος – τυπική απόκλιση. Από τις δύο αυτές εκφράσεις προκύπτει η σχετική διακύμανση του κβαντικού θορύβου που προσπίπτει σε ένα ανιχνευτή:

$$\text{Σχετική διακύμανση θορύβου: } \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{N} \qquad (1.4.3)$$

Παρατηρώντας την σχέση (1.4.3) γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι για να ελαττωθεί η σχετική διακύμανση του κβαντικού θορύβου αρκεί να αυξηθεί ο αριθμός των εκπεμπόμενων φωτονίων, με συνέπεια όμως την αύξηση της λαμβανόμενης δόσης από τον ασθενή [2],[7],[8],[11],[12].

Μια μορφή απεικόνισης του θορύβου σε ένα ανιχνευτή και κατ' επέκταση σε μία εικόνα είναι η χρήση του φάσματος ισχύος θορύβου (Noise Power Spectrum – NPS). Με τη χρήση του NPS επιτυγχάνεται η απεικόνιση του θορύβου στο πεδίο των συχνοτήτων αντλώντας πληροφορίες για χαρακτηριστικά του όπως η ένταση και το μοτίβο που ακολουθεί σε όλο το εύρος των συχνοτήτων. Το φάσμα ισχύος θορύβου είναι ανάλογο του τετραγώνου της συνάρτησης μεταφοράς διαμόρφωσης του ανιχνευτή [2].

1.4.5 Ανιχνευτική Κβαντική Αποδοτικότητα – DQE

Η κβαντική ανιχνευτική αποδοτικότητα (Detective Quantum Efficiency – DQE) ορίζεται με βάση παρακάτω σχέση [7]:

$$DQE = \frac{SNR_{out}^2}{SNR_{in}^2} \qquad (1.4.4)$$

Όπου SNR_{out} είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο του σήματος εξόδου που απεικονίζονται από το σύστημα με τη μορφή εικόνας και SNR_{in} είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο που εισάγεται στο απεικονιστικό σύστημα, μέσω των φωτονίων-X. Το DQE δηλαδή εκφράζει στην ικανότητα ενός συστήματος να απορροφά τα φωτόνια και να τα χρησιμοποιεί για το σχηματισμό της τελικής εικόνας με το βέλτιστο δυνατό τρόπο. Ένα ιδανικό απεικονιστικό σύστημα έχει DQE ίσο με 1 [7].

Μία άλλη έκφραση του DQE είναι χρησιμοποιώντας την συνάρτηση MTF και την συνάρτηση NPS του συστήματος ως ακολούθως [7]:

$$DQE(u) = \frac{MTF(u)^2}{\bar{q} * NNPS(u)^2} \qquad (1.4.5)$$

Όπου u είναι η χωρική συχνότητα, MTF είναι η συνάρτηση μεταφοράς διαμόρφωσης του συστήματος, NNPS είναι η κανονικοποιημένη συνάρτηση NPS του συστήματος με τη μέση τιμή σήματος εξόδου στο τετράγωνο και τέλος \bar{q} είναι η μέση τιμή των φωτονίων που φτάνουν στην έξοδο του συστήματος. Με βάση την παραπάνω σχέση γίνεται αντιληπτό ότι το DQE εξαρτάται από το ηλικό MTF/NNPS με αποτέλεσμα επειδή το σήμα

Μελέτη ψηφιακού ανιχνευτή μαστογραφίας με τη χρήση γραμμικών συστημάτων

εξασθενεί ταχύτερα από το θόρυβο το DQE ελαττώνεται καθώς αυξάνονται η χωρική συχνότητα [2],[7],[8],[11],[12].

Κεφάλαιο 2 Υλικά και μέθοδοι

2.1 Γραμμικά συστήματα

Όλα τα απεικονιστικά συστήματα λειτουργούν με την ίδια βασική αρχή, εισάγεται σήμα και αναπόφευκτα θόρυβος στην είσοδο τους, το σήμα και ο θόρυβος περνούν μέσα από διάφορα στάδια και εξέρχονται από την έξοδο του συστήματος όπου προκύπτει η εικόνα που λαμβάνει ο τελικός χρήστης. Η χρήσιμη πληροφορία που εισέρχεται και εξέρχεται από την είσοδο και την έξοδο του συστήματος αντίστοιχα είναι το σήμα και η πληροφορία χωρίς διαγνωστική αξία ο θόρυβος. Κάθε απεικονιστικό σύστημα όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 1.4 χαρακτηρίζεται από τις παραμέτρους MTF, NPS και DQE που έχουν καθοριστική επίδραση στο σήμα και το θόρυβο που διέρχεται από το απεικονιστικό σύστημα. Όλες οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα από την δημιουργία του πρωταρχικού σήματος έως την έξοδο του σήματος και του θορύβου από το σύστημα μπορούν να περιγραφούν με τη βοήθεια της θεωρίας των γραμμικών συστημάτων [3].

Σύμφωνα με τη θεωρία των γραμμικών συστημάτων κάθε απεικονιστικό σύστημα μπορεί να χωριστεί σε επιμέρους διαδικασίες όπου η έξοδος της προηγούμενης είναι η είσοδος της επόμενης έως τον σχηματισμό της τελικής εικόνας. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να γίνει περιγραφή της συνεισφοράς που έχει στο σήμα και στο θόρυβο κάθε στάδιο που διέρχονται από αυτό με τη μαθηματική μοντελοποίηση των τυχαίων γραμμικών αλληλοδιαδοχικών διαδικασιών (linear cascaded systems) από την είσοδο έως την έξοδο του απεικονιστικού συστήματος. Για να γίνει αυτό εφικτό θα πρέπει να συντρέχουν κάποιες προϋποθέσεις που θα εξηγηθούν ακολούθως [3]:

- Το σύστημα πρέπει να είναι ή να θεωρείται γραμμικό (linearity) όταν η έξοδος του μπορεί να εκφραστεί ως σταθμισμένο άθροισμα των στοιχείων εισόδου. Τα περισσότερα απεικονιστικά συστήματα μπορούν να προσεγγιστούν ως γραμμικά [3].
- Το σύστημα θα πρέπει να είναι ή να θεωρείται αμετάβλητο μετατόπισης (χωρικά αμετάβλητο – shift-invariant) δηλαδή η συνάρτηση απόκρισης του συστήματος να μην αλλάζει σε συνάρτηση με την θέση στην εικόνα. Αυτό επιτρέπει την περιγραφή της συνάρτησης μεταφοράς χωρίς να είναι απαραίτητη η αναφορά του σημείου προέλευσης [3].

Οι διαδικασίες ανάλογα με την συμπεριφορά τους στο χώρο και το χρόνο χωρίζονται σε:

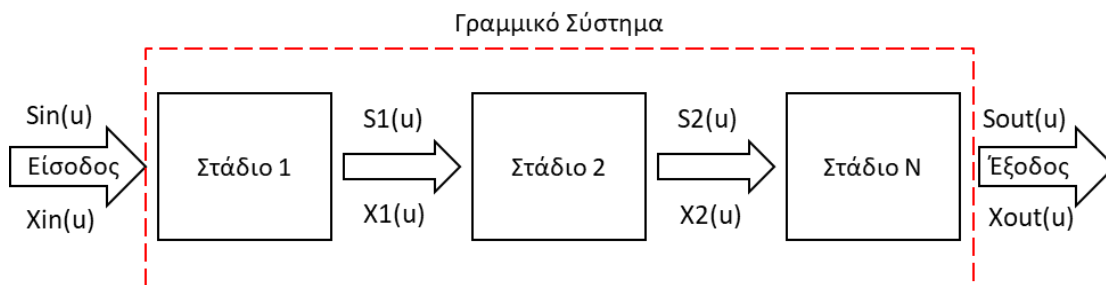
1. Καθορισμένες (Deterministic): Στις καθορισμένες διαδικασίες αν ξέρουμε τη τιμή μίας παραμέτρου μια χρονική στιγμή ή στο χώρο τότε τη συμπεριφορά του συστήματος είναι απολύτως προβλέψιμη [3].
2. Στοχαστικές (Stochastic): Στις στοχαστικές ή τυχαίες διαδικασίες ο μηχανισμός που επιφέρει διακυμάνσεις στην τιμή ενός σήματος καθορίζεται από μια στατιστική κατανομή ή την υπέρθεση πολλών [3].

Η διαφορά στις δύο παραπάνω κατηγορίες διαδικασιών εντοπίζεται στο σημείο όπου, αν θεωρηθεί ότι σε δύο συστήματα ένα καθορισμένο και ένα στοχαστικό εφαρμόσουμε στην είσοδο τους δύο ακριβώς ίδια σήματα, η έξοδος που θα καταγραφεί στο καθορισμένο σύστημα θα είναι ακριβώς ίδια όσες φορές και αν εκτελεστεί το πείραμα

ενώ στο στοχαστικό σύστημα η έξοδος θα είναι παρόμοια και θα χαρακτηρίζεται από μια μέση τιμή, τυπική απόκλιση και μία συνάρτηση αυτοσυσχέτισης [3].

Οι στοχαστικές διαδικασίες διακρίνονται σε:

1. Αυστηρά στάσιμες (strict sense stationary): Μία στοχαστική διαδικασία ανήκει σε αυτή την κατηγορία όταν η στατιστική της δεν επηρεάζεται από μια μετατόπιση στο χώρο ή στο χρόνο [3].
2. Στάσιμες υπό την ευρεία έννοια (wide sense stationary): Οι στοχαστικές διαδικασίες αυτής της κατηγορίας χαρακτηρίζονται από την σταθερή μέση τιμή αλλά την εξάρτηση της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης από την διαφορά των δύο θέσεων [3].
3. Εργοδικά στάσιμες υπό την ευρεία έννοια (ergodic wide sense stationary): στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι διαδικασίες όπου ο υπολογισμός της μέσης τιμής, της διακύμανσης, της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης και αυτοδιακύμανσης απαιτούν τη γνώση της συνάρτησης στατιστικής σε κάθε τιμή της θέσης [3].



Εικόνα 5 Γραφική αναπαράσταση γραμμικού συστήματος

Τα απεικονιστικά συστήματα μπορούν να προσεγγιστούν με τη χρήση των στάσιμων υπό την ευρεία έννοια διαδικασιών κάνοντας τις παραδοχές της γραμμικότητας και της μη εξάρτησης της απόκρισης του συστήματος από την θέση. Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα είναι η στοχαστική ενίσχυση, στοχαστική αλλοίωση και καθορισμένη αλλοίωση όπου με τον κατάλληλο συνδυασμό τους μπορεί να γίνει η μοντελοποίηση κάθε σταδίου στο σύστημα και να εξαχθούν οι εξισώσεις που το περιγράφουν [3].

Αναλυτικότερα για τις διεργασίες:

1. Στοχαστική ενίσχυση (Stochastic Gain): Σε αυτή τη διαδικασία το σήμα εξόδου αλλάζει τιμή ή και είδος. Η τιμή που θα πάρει μπορεί να είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη ανεξάρτητα από την ονομασία του όρου «ενίσχυση». Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν διεργασίες όπως η απορρόφηση των ακτίνων X από τα φθορίζοντα υλικά ή τον εκάστοτε ημιαγωγό όπου ο αριθμός των απορροφούμενων ακτίνων είναι μικρότερος σε σχέση με τις παραγόμενες. Τα στάδια στοχαστική ενίσχυσης χαρακτηρίζονται από μέση τιμή $\bar{\omega}$ και διακύμανση σ_{ω}^2 [3].
2. Στοχαστική ασάφεια (Stochastic Blur): Σε αυτή τη διαδικασία το σήμα εξόδου δεν λαμβάνει χώρα καμία αλλαγή ως προς την τιμή ή το είδος του αλλά υπάρχει τυχαία μετατόπιση στη θέση των φορέων στο χώρο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η διασπορά σε σχέση με το σημείο δημιουργίας τους των παραγόμενων φωτονίων μετά από την απορρόφηση των ακτίνων X από φθορίζον υλικό. Τα

στάδια αυτά χαρακτηρίζονται από μία συνάρτηση μεταφοράς διαμόρφωσης (MTF) στο πεδίο των χωρικών συχνοτήτων [3].

3. Καθορισμένη ασάφεια (Deterministic Blur): Σε αυτή τη διαδικασία δεν πραγματοποιείται συνήθως αλλαγή στην τιμή ή στο είδος του σήματος εξόδου αλλά εξαναγκασμένη αλλοίωση στη θέση των φορέων στο χώρο. Οι διαδικασίες του συγκεκριμένου σταδίου χαρακτηρίζονται και αυτές από μια συνάρτηση MTF στο πεδίο των χωρικών συχνοτήτων [3].

Παρακάτω ακολουθεί ένας συγκεντρωτική λίστα όπου φαίνονται οι εξισώσεις που χαρακτηρίζουν το σήμα και τον θόρυβο που εξέρχονται από το κάθε στάδιο του συστήματος [3].

- Στοχαστική Ενίσχυση (Stochastic Gain)

$$\text{Σήμα :} \quad \bar{X}_{out} = \bar{\omega} * \bar{X}_{in} \quad (2.2.1)$$

$$\text{Θόρυβος :} \quad S_{out}(u) = \bar{\omega}^2 * S_{in}(u) + \bar{X}_{in} * \sigma_{\omega}^2 \quad (2.2.2)$$

- Στοχαστική Ασάφεια (Stochastic Blur)

$$\text{Σήμα :} \quad \bar{X}_{out} = \bar{X}_{in} \quad (2.2.3)$$

$$\text{Θόρυβος :} \quad S_{out}(u) = (S_{in}(u) - \bar{X}_{in}) * MTF^2(u) + \bar{X}_{in} \quad (2.2.4)$$

- Καθορισμένη Ασάφεια (Deterministic Blur)

$$\text{Σήμα :} \quad \bar{X}_{out} = \bar{X}_{in} \quad (2.2.5)$$

$$\text{Θόρυβος :} \quad S_{out}(u) = S_{in}(u) * MTF^2(u) \quad (2.2.6)$$

2.2 Προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB

Η υλοποίηση του υπολογιστικού μοντέλου με τη χρήση των γραμμικών συστημάτων και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων έγινε στο προγραμματιστικό περιβάλλον του MATLAB. Το MATLAB είναι μια εφαρμογή αριθμητικής υπολογιστικής και προγραμματισμού ανεπτυγμένη από την εταιρεία MathWorks. Για την εργασία έγινε χρήση της έκδοσης R2021b που παρέχεται στην ακαδημαϊκή κοινότητα του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής μέσω της ενότητας Λογισμικού.

2.3 Εφαρμογή άρθρου

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μοντελοποίηση ενός άμεσου ανιχνευτή μαστογραφίας με ταυτόχρονη μελέτη των μεταβολών που παρατηρούνται στις παραμέτρους της χωρικής διακριτικής ικανότητας, του θορύβου και του συντελεστή κβαντικής αποδοτικότητας με την αλλαγή στοιχείων του ανιχνευτή. Η διαδικασία που θα περιγραφεί αναφέρετε στους ημιαγωγούς του άμορφου Σεληνίου (a-Se) του γερμανίου (Ge), πυριτίου (Si) και για το αρσενιούχο γάλλιο (GaAs). Τα αριθμητικά δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν παρατίθενται στο Παράρτημα.

Το γραμμικό σύστημα που θα περιγραφεί αναλυτικά παρακάτω λαμβάνει υπόψιν όλα τα στάδια από την εκπομπή των ακτίνων X από την λυχνία έως εξαγωγή του σήματος και του θορύβου από τα ηλεκτρονικά του ανιχνευτή. Αναλυτικότερα τα στάδια που λαμβάνουν χώρα σε ένα παθητικό ανιχνευτή άμεσης ανίχνευσης είναι ακόλουθα [6]:

Πίνακας 1 Στάδια Γραμμικού Συστήματος άμεσου ανιχνευτή [6]

α/α Σταδίου	Περιγραφή διαδικασίας
0	Παραγωγή ακτίνων X
1	Αλληλεπίδραση ακτίνων X με τον ημιαγωγό
2	Στοχαστική ασάφεια εξαιτίας του Φ.Φ
3	Μετατροπή ακτίνων X σε ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων
4	Συλλογή παραγόμενου φορτίου
5	Ασάφεια στρώματος φραγής ηλεκτρονίων
6	Ασάφεια λόγω διαστάσεων εικονοστοιχείου
7	Θόρυβος λόγω ορίου διακριτικής ικανότητας συστήματος
8	Θόρυβος ηλεκτρονικών διατάξεων

Ενώ στο Παράρτημα φαίνεται και το σχηματικό διάγραμμα στην Εικόνα 6.

Στάδιο 0: Παραγωγή ακτίνων X

Το φάσμα ακτίνων X που παράγεται από την λυχνία και προσπίπτει στον ανιχνευτή παράγεται μέσω του online εργαλείου προσομοίωσης της Siemens με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στο Παράρτημα [6],[19]:

Στο Γράφημα 31 φαίνεται το φάσμα των ακτίνων X από την ενέργεια των 5.5 keV έως τα 28 keV που είναι και η μέγιστη τάση της λυχνίας. Για κάθε ενέργεια με βήμα τα 0.5 keV στον κατακόρυφο άξονα φαίνονται τα φωτόνια φ_0 που αντιστοιχούν σε κάθε ενέργεια. Η μέση ροή των φωτονίων που προσπίπτουν στον ανιχνευτή δίνεται από την ακόλουθη σχέση [6]:

$$\bar{\varphi}_0 = \sum_{E=0}^{E_{max}} \varphi_0(E) \Delta E \quad (2.3.1)$$

Όπου $\bar{\varphi}_0$ η μέση ροή φωτονίων σε φωτόνια/mm²/μGy, E η ενέργεια των φωτονίων X σε keV και $\varphi_0(E)$ το φάσμα των ακτίνων X που πέφτει στον ανιχνευτή. Η μέση ροή ακτίνων X στην επιφάνεια του ανιχνευτή αποτελεί το σήμα εισόδου του γραμμικού συστήματος [6].

Μαζί με το σήμα εισόδου που αναφέρθηκε, στο σύστημα εισέρχεται και κβαντικός θόρυβος εξαιτίας της φύσης των ακτίνων X. Ο θόρυβος αυτό θεωρείται «λευκός θόρυβος» καθώς δεν εξαρτάται από την χωρική συχνότητα. Καθώς οι ακτίνες X ακολουθούν την κατανομή Poisson ο θόρυβος που εισέρχεται στο σύστημα δίνεται από την σχέση [6]:

$$S_{N0} = \bar{\varphi}_0 \quad (2.3.2)$$

Στάδιο 1: Αλληλεπίδραση ακτίνων X με τον ημιαγωγό

Οι ακτίνες X καθώς πέφτουν στον ανιχνευτή απορροφούνται από το υλικό του ημιαγωγού. Καθώς ένα μέρος από τις συνολικές ακτίνες X αλληλοεπιδρά με τον ημιαγωγό, το στάδιο αυτό είναι ένα στάδιο στοχαστικής ενίσχυσης όπου ο αριθμός των ακτίνων X ελαττώνεται. Η ενίσχυση αυτού του σταδίου έχει να κάνει με το κλάσμα της ενέργειας που απορροφά ο ανιχνευτής σε σχέση με αυτή που δέχεται και δίνεται από την σχέση [6]:

$$g_1 = \frac{\sum_{E=0}^{E_{max}} \varphi_0(E) \times (1 - e^{-\mu(E)dX}) \times E \times (\mu_{en}(E) / \mu(E)) \times \Delta E}{\sum_{E=0}^{E_{max}} \varphi_0(E) \times E \times \Delta E} \quad (2.3.3)$$

Όπου, dX είναι το πάχος στρώματος του ημιαγωγού σε cm, μ είναι ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης των ακτίνων X του ημιαγωγού σε cm²/g και ο συντελεστής μ_{en} που περιγράφει το κλάσμα της προσπίπτουσας ενέργειας ακτίνων X που μπορεί να απορροφηθεί από τα με μονάδες cm²/g. Οι συντελεστές για τον εκάστοτε ημιαγωγό παράχθηκαν μέσω του εργαλείου XMuDat και φαίνονται στο Παράρτημα [6],[15].

Καθώς πρόκειται για στάδιο στοχαστικής ενίσχυσης το σήμα και ο θόρυβος εξόδου από το στάδιο αυτό είναι [6]:

$$\bar{\varphi}_1 = g_1 \times \bar{\varphi}_0 \quad (2.3.4)$$

$$S_{N1} = g_1 \times \bar{\varphi}_0 \quad (2.3.5)$$

Στάδιο 2: Στοχαστική ασάφεια εξαιτίας του Φωτοηλεκτρικού Φαινομένου

Οι ακτίνες Χ καθώς προσπίπτουν στον ανιχνευτή αλληλοεπιδρούν με το υλικό του ημιαγωγού που βρίσκεται στο πάνω μέρος με τους βασικούς μηχανισμούς αλληλεπίδρασης των ακτίνων Χ με την ύλη που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 1.1. Επειδή αναφερόμαστε σε ανιχνευτή μαστογραφίας με μέγιστη ενέργεια τα 28 keV οι δύο μηχανισμοί που κυριαρχούν είναι αυτός του φωτοηλεκτρικού φαινομένου και της εκπομπής χαρακτηριστικής ακτινοβολίας από την Κ-στοιβάδα του ημιαγωγού, που δε θα ληφθεί υπόψιν λόγω της μικρής επιρροής της στην καμπύλη MTF του ανιχνευτή [6].

Κατά την απορρόφηση των ακτίνων Χ από το στρώμα του ημιαγωγού, απελευθερώνεται ένα ηλεκτρόνιο από το άτομο του ημιαγωγού. Αυτό το ηλεκτρόνιο που κουβαλά μεγάλη ποσότητα κινητικής ενέργειας ταξιδεύει στο εσωτερικό του στρώματος του ημιαγωγού όπου συγκρούεται τυχαία με άλλα άτομα του ημιαγωγού δημιουργώντας δευτερογενή ηλεκτρόνια έως ότου η κινητική του ενέργεια χαθεί. Η απόσταση που διένυσε το ηλεκτρόνιο καθορίζει την διασπορά του φορτίου που δημιουργήθηκε και την ασάφεια που είναι σχετική με αυτό το στάδιο. Η ασάφεια υπολογίζεται ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας και της ενέργειας ως εξής [6]:

$$T_{pe}(E, f) = e^{(-\pi^2 \delta^2 f^2)} \quad (2.3.6)$$

Όπου το δ δίνεται από την σχέση

$$\delta = \frac{R_{max}}{2.5} \quad (2.3.7)$$

Και ο αριθμητής R_{max} από την σχέση

$$R_{max} = \frac{2.761 \times 10^{-5} \times M_{at} \times (E - K_{edge})^{5/3}}{\rho \times Z^{8/9}} \quad (2.3.8)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις M_{at} είναι ο ατομικός αριθμός του στοιχείου ή της ένωσης σε g/mol , ρ είναι η πυκνότητα του υλικού σε g/cm^3 , Z ο ατομικός αριθμός του στοιχείου ενώ για την περίπτωση ένωσης το δραστικό πυρηνικό φορτίο Z^* μέσω του XMuDat, K_{edge} η ενέργεια της ενεργειακής στάθμης K για το κάθε στοιχείο ενώ στην περίπτωση ένωσης το στοιχείο με το μεγαλύτερο ατομικό αριθμό σε keV και τέλος f η χωρικές συχνότητες σε κύκλους/mm [6].

Η ασάφεια του σταδίου εκφρασμένη μόνο ως συνάρτηση της συχνότητας υπολογίζεται ως ο σταθμισμένος μέσος όρος όλων των απορροφούμενων φωτονίων ως εξής [6]:

$$T_{pe}(f) = \frac{\sum_{E=0}^{E_{max}} \varphi_0(E) T_{pe}(E, f) \Delta E}{\sum_{E=0}^{E_{max}} \varphi_0(E) \Delta E} \quad (2.3.9)$$

Όπου $T_{pe}(E, f)$ είναι το αποτέλεσμα της εξίσωσης 2.3.6 και $\varphi_0(E)$ το φάσμα των ακτίνων Χ.

Επομένως αφού πρόκειται για στάδιο στοχαστικής ασάφεια το σήμα και ο θόρυβος (φάσμα ισχύος θορύβου) που εξέρχονται από το στάδιο είναι [6]:

$$\bar{\varphi}_2(f) = \bar{\varphi}_1 \times T_{pe}(f) \quad (2.3.10)$$

$$S_{N2}(f) = T_{pe}^2(f) \times S_{N1} + (1 - T_{pe}^2(f))\bar{\varphi}_1 \quad (2.3.11)$$

Στάδιο 3: Μετατροπή ακτίνων X σε ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων

Για κάθε ακτίνα X που απορροφάτε από το στρώμα του ημιαγωγού παράγονται ζεύγη ηλεκτρονίων οπής. Το κέρδος μετατροπής των παραγόμενων ζευγών υπολογίζεται από την σχέση [6]:

$$g'_3(E) = \frac{E}{W_{\pm}(F, E)} \quad (2.3.12)$$

Όπου E είναι οι ενέργειες του φάσματος σε keV και $W_{\pm}(F, E)$ είναι η ελάχιστη ενέργεια που χρειάζεται για την δημιουργία ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής σε eV. Για το άμορφο σεληνίο η ενέργεια αυτή εξαρτάται από το πεδίο F που εφαρμόζεται στον ανιχνευτή σε $V/\mu m$ και υπολογίζεται από την σχέση [6],[14]:

$$W_{\pm}(F, E) = (6 + 300/F^{0.9})(0.38 + 4.8/E^{0.5}) \quad (2.3.13.1)$$

Ενώ για τους υπόλοιπους ημιαγωγούς από την σχέση:

$$W_{\pm} \cong 3E_g \quad (2.3.13.2)$$

Όπου E_g είναι η ενέργεια που απαιτείται για την δημιουργία ζεύγους οπής ηλεκτρονίου σε eV [6].

Το συνολικό κέρδος για το στάδιο υπολογίζεται από την σχέση [6]:

$$g_3 = \frac{\sum_{E=0}^{E_{max}} \varphi_0(E) \times \eta(E) \times g'_3(E) \times E \times \Delta E}{\sum_{E=0}^{E_{max}} \varphi_0(E) \times \eta(E) \times E \times \Delta E} \quad (2.3.14)$$

Ο όρος $\eta(E)$ που εκφράζει αποδοτικότητα κβαντικής ανίχνευσης ενέργειας μονοχρωματικών φωτονίων της παραπάνω εξίσωσης υπολογίζεται από την σχέση [6]:

$$\eta(E) = 1 - e^{-\mu(E)dX} \quad (2.3.15)$$

Όπου dX το πάχος του στρώματος του ημιαγωγού σε cm και μ ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης του ημιαγωγού.

Η διακύμανση του κέρδους του σταδίου δίνεται από την σχέση [6]:

$$\sigma_{g_3}^2 = \text{fanofactor} \times g_3(E) \quad (2.3.16)$$

Όπου g_3 είναι το κέρδος που υπολογίστηκε στην εξίσωση 2.3.14. Ο συντελεστής *fanofactor* θεωρώντας ότι ο αριθμός των ζευγών οπών-ηλεκτρονίων ακολουθεί κατανομή Poisson έχει τιμή ίση με ένα [6].

Πρόκειται για στάδιο στοχαστική ενίσχυσης και το σήμα και ο θόρυβος που εξέρχεται περιγράφεται από τις ακόλουθες εξισώσεις [6]:

$$\bar{\varphi}_3(f) = g_3 \times \bar{\varphi}_2(f) \quad (2.3.17)$$

$$S_{N3} = g_3^2 S_{N2} + \sigma_{g_3}^2 \bar{\varphi}_2(f) \quad (2.3.18)$$

Στάδιο 4: Συλλογή Φορτίου

Το φορτίο καθώς παράγεται στο στρώμα του ημιαγωγού και ταξιδεύει στο εσωτερικό του ανιχνευτή στο τέλος συλλέγεται από τα ηλεκτρόδια που βρίσκονται στο κάτω μέρος του ανιχνευτή. Η απόδοση συλλογής αυτού του φορτίου που είναι και το κέρδος σήματος του συγκεκριμένου σταδίου δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις [6]:

$$g_4 = \left[T_h \int_0^1 (1 - e^{-(x/T_h)}) dx + T_e \int_0^1 (1 - e^{-(1-x/T_e)}) dx \right] \quad (2.3.19)$$

Όπου η διακύμανση $\sigma_{g_4}^2$ δίνεται από τη σχέση [6]:

$$\begin{aligned} \sigma_{g_4}^2 = & \left[\int_0^1 T_h^2 dx + \int_0^1 T_e^2 dx - T_h^2 \int_0^1 (e^{-(2x/T_h)}) dx \right. \\ & - T_e^2 \int_0^1 (e^{-2(1-x/T_e)}) dx - 2T_h \int_0^1 (xe^{-(x/T_h)}) dx \\ & \left. - 2T_e \int_0^1 (1-x) (e^{-(1-x/T_e)}) dx \right] \quad (2.3.20) \end{aligned}$$

Ενώ οι συντελεστές T_e και T_h υπολογίζονται από τις σχέσεις [6]:

$$T_e = \frac{\mu_e T_e' F}{dX} \quad (2.3.21)$$

Και

$$T_h = \frac{\mu_h T_h' F}{dX} \quad (2.3.22)$$

Στις παραπάνω σχέσεις οι συντελεστές T_e και T_h αντιπροσωπεύουν την κινητικότητα των ηλεκτρονίων και των οπών αντίστοιχα, όπου T'_e και T'_h είναι οι χρόνοι «ζωής», σε μονάδες sec, των οπών και των ηλεκτρονίων πριν απορροφηθούν για τον εκάστοτε ημιαγωγό και F είναι το ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται μεταξύ του στρώματος του ημιαγωγού και τον ηλεκτρονίων συλλογής του φορτίου στο κάτω μέρος του [6].

Καθώς παρατηρείται μείωση του αριθμού του φορτίου, επειδή δεν συλλέγεται όλο από τα ηλεκτρόδια το συγκεκριμένο στάδιο είναι στάδιο στοχαστική ενίσχυσης με κέρδος g_4 και σήμα και θόρυβο εξόδου από το στάδιο [6]:

$$\bar{\varphi}_4(f) = g_{4 \times} \bar{\varphi}_3(f) \quad (2.3.23)$$

$$S_{N4} = g_4^2 S_{N3} + \sigma_{g4}^2 \bar{\varphi}_3(f) \quad (2.3.24)$$

Στάδιο 5: Ασάφεια στρώματος φραγής ηλεκτρονίων

Μεταξύ της επιφάνειας του ανιχνευτή όπου βρίσκεται το στρώμα του ημιαγωγού και τον ηλεκτροδίων που συλλέγουν το φορτίο στο κάτω μέρος του ανιχνευτή βρίσκεται μια παγίδα ηλεκτρονίων, ένα στρώμα, που εμποδίζει τη διέλευση τυχόν ηλεκτρονίων προς τα ηλεκτρόδια. Τα παγιδευμένα ηλεκτρόνια αναπτύσσουν ένα αρνητικό φορτίο που προκαλεί διασπορά του σήματος. Αυτή η διασπορά περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση [6]:

$$T_r(f) = \frac{dX \times \sinh[2\pi f(dX - l)]}{(dX - l) \times \sinh(2\pi f dX)} \quad (2.3.25)$$

Όπου l είναι το πάχος του στρώματος σε μm που δρα ως παγίδα ηλεκτρονίων και έχει περίπου το 3 με 4 % του πάχους του στρώματος του ημιαγωγού [6].

Το σήμα και ο θόρυβος που εξέρχονται από το στάδιο αυτό, καθώς πρόκειται για στάδιο στοχαστική ασάφειας υπολογίζονται από τις σχέσεις [6]:

$$\bar{\varphi}_5(f) = \bar{\varphi}_4(f) \times T_r(f) \quad (2.3.26)$$

$$S_{N5} = T_r^2(f) S_{N4} + (1 - T_r^2(f)) \bar{\varphi}_4(f) \quad (2.3.27)$$

Στάδιο 6: Ασάφεια λόγω διαστάσεων εικονοστοιχείου

Σύμφωνα με την δομή ενός άμεσου ανιχνευτή που φαίνεται και στην Εικόνα 4, στο πάνω μέρος του ανιχνευτή το ηλεκτρόδιο είναι συνεχές γεγονός που προκαλεί και τη συνεχόμενη χωρική διάδοση του φορτίου στο εσωτερικού του στρώματος του ημιαγωγού. Τα ηλεκτρόδια που βρίσκονται στο κάτω μέρος του ανιχνευτή δεν είναι συνεχή και κάθε ένα ηλεκτρόδιο αντιστοιχεί σε κάθε εικονοστοιχείο. Έτσι η λήψη του

φορτίου από τα ηλεκτρόδια επηρεάζεται από τις διαστάσεις των εικονοστοιχείων, γεγονός που οδηγεί και στην άμεση εξάρτηση της χωρικής διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή. Παρατηρείται ότι πραγματοποιείται μια εξαναγκασμένη αλλαγή της διασποράς του φορτίου στο χώρο. Η διασπορά αυτή υπολογίζεται από την σχέση [6]:

$$T_a(f) = |\sin c(a \times f)| \quad (2.3.28)$$

και το α υπολογίζεται από την σχέση [6]:

$$\alpha^2 = FF \times d^2 \quad (2.3.29)$$

Όπου α είναι το πλάτος του ηλεκτροδίου σε mm, και σχετίζεται με την μεταξύ απόσταση των εικονοστοιχείων d σε mm και τον συντελεστή πληρότητας FF (fill factor) όπου καθορίζεται την περιοχή που είναι ευαίσθητη στις ακτίνες X [6].

Στο συγκεκριμένο στάδιο παρατηρείται εξαναγκασμένη αλλαγή της κατανομής του σήματος στο χώρο εξαιτίας της ασυνέχειας του ηλεκτροδίου συλλογής του φορτίου στο κάτω μέρος του ανιχνευτή και ανήκει στην κατηγορία της καθορισμένης ασάφειας σύμφωνα με την θεωρία. Έτσι οι εξισώσεις που περιγράφουν το εξερχόμενο σήμα και θόρυβο από το στάδιο είναι οι εξής [6]:

$$\bar{\varphi}_6(f) = \alpha^2 \bar{\varphi}_5(f) \times T_a(f) \quad (2.3.30)$$

$$S_{N6}(f) = \alpha^4 T_a^2(f) S_{N5} \quad (2.3.31)$$

Στάδιο 7: Θόρυβος λόγο ορίου διακριτικής ικανότητας συστήματος

Η μέγιστη χωρική συχνότητα (κύκλοι/mm) που μπορεί να απεικονιστεί από τον ανιχνευτή ονομάζεται συχνότητα αποκοπής. Οποιοδήποτε αντικείμενο ή λεπτομέρεια με χωρική συχνότητα μεγαλύτερη από την συχνότητα αποκοπής του συστήματος απεικονίζεται ως ψευδένδειξη που ονομάζεται αλλοίωση (aliasing) και προσθέτει επιπλέον θόρυβο στο σύστημα. Ο θόρυβος αυτός υπολογίζεται με βάση την παρακάτω εξίσωση [9]:

$$S_{N7}(f) = \frac{d}{a} \times S_{N6}(f) \quad (2.3.32)$$

Όπου d είναι η απόσταση μεταξύ των εικονοστοιχείων και a το πλάτος του εικονοστοιχείου σε mm.

Στάδιο 8: Θόρυβος ηλεκτρονικών διατάξεων

Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα που ακολουθούν την συλλογή του φορτίου από τα ηλεκτρόδια όπως τα στοιχεία TFT, οι ενισχυτές και τα κυκλώματα ψηφιοποίησης του σήματος προσθέτουν θόρυβο. Ο θόρυβος αυτός υπολογίζεται από την σχέση [6]:

$$S_{N8}(f) = S_{N7}(f) + S_r \quad (2.3.33)$$

και

$$S_r = N_e^2 \times d^2 \quad (2.3.34)$$

Όπου στις παραπάνω εξισώσεις η τιμή του N_e αντιπροσωπεύει τον θόρυβο των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων με μονάδες e^{-rms} και προσδιορίζεται πειραματικά.

Μετά την εξαγωγή του σήματος και του θορύβου από το στάδιο 8 που αποτελεί το τελευταίο στάδιο του συστήματος το τελικό σήμα και ο θόρυβος ορίζονται από τις επόμενες σχέσεις [6]:

$$\bar{\varphi}(f) = \alpha^2 \times g_1 \times g_3 \times g_4 \times \bar{\varphi}_0 \quad (2.3.35)$$

$$NPS(f) = S_{N8}(f) \quad (2.3.36)$$

Οι υπολογισμοί των χαρακτηριστικών του ανιχνευτή $MTF(f)$, $NNPS(f)$ και $DQE(f)$ γίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις [6]:

$$MTF(f) = T_a(f) \times T_r(f) \times T_{pe}(f) \quad (2.3.37)$$

$$NNPS(f) = \frac{NPS(f)}{\bar{\varphi}^2} \quad (2.3.38)$$

$$DQE(f) = \frac{MTF(f)^2}{\bar{\varphi}_0 \times NNPS(f)} \quad (2.3.39)$$

Κεφάλαιο 3 Αποτελέσματα

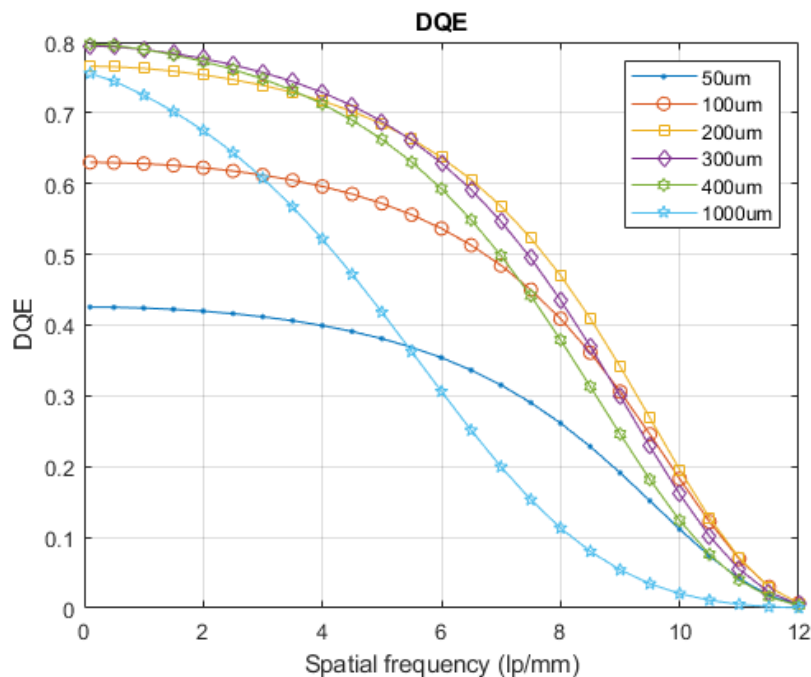
Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την μοντελοποίηση των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό των ανιχνευτών ημιαγωγού άμεσης ανίχνευσης ακτίνων Χ με την χρήση των γραμμικών συστημάτων. Στην έξοδο του γραμμικού συστήματος υπολογίστηκαν οι παράμετροι: συντελεστής μεταφοράς διαμόρφωσης (MTF), κανονικοποιημένο φάσμα ισχύος θορύβου (NNPS) και συντελεστής ανιχνευτικής κβαντικής αποδοτικότητας (DQE). Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 1.4 οι τρεις αυτές παράμετροι χαρακτηρίζουν ποιοτικά έναν ανιχνευτή.

Στα παρακάτω αποτελέσματα λήφθηκαν μετρήσεις των τριών αυτών παραμέτρων υπό διαφορετικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή αλλά και για διαφορετικά υλικά ημιαγωγού. Έτσι παρέχονται διαφορετικές καμπύλες για 4 διαφορετικές περιπτώσεις. Για διαφορετικό πάχος ημιαγωγού, για διαφορετικό εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο, για διαφοροποίηση της δόσης και για διαφορετικό ηλεκτρονικό θόρυβο για τα 4 διαφορετικά εξεταζόμενα υλικά.

Μεταβολή πάχους του ημιαγωγού

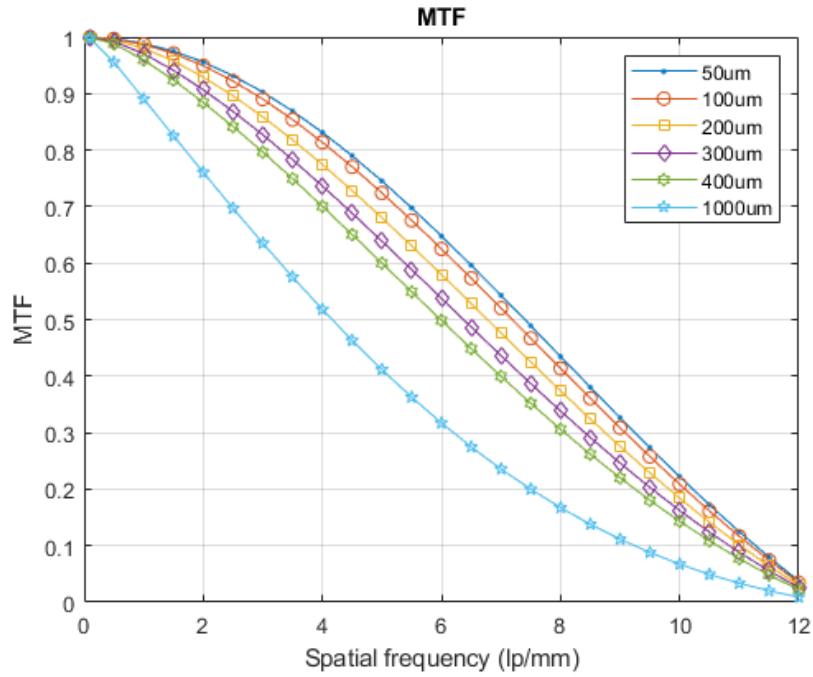
Χρησιμοποιώντας τον κώδικα που δημιουργήθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB, λήφθηκαν μετρήσεις για διαφορετικά πάχη στρώματος του ημιαγωγού στα $50 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$, $300 \mu\text{m}$, $400 \mu\text{m}$ και $1000 \mu\text{m}$ ως προς την χωρική συχνότητα όπως φαίνονται στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις:

- Για το άμορφο σελήνιο:

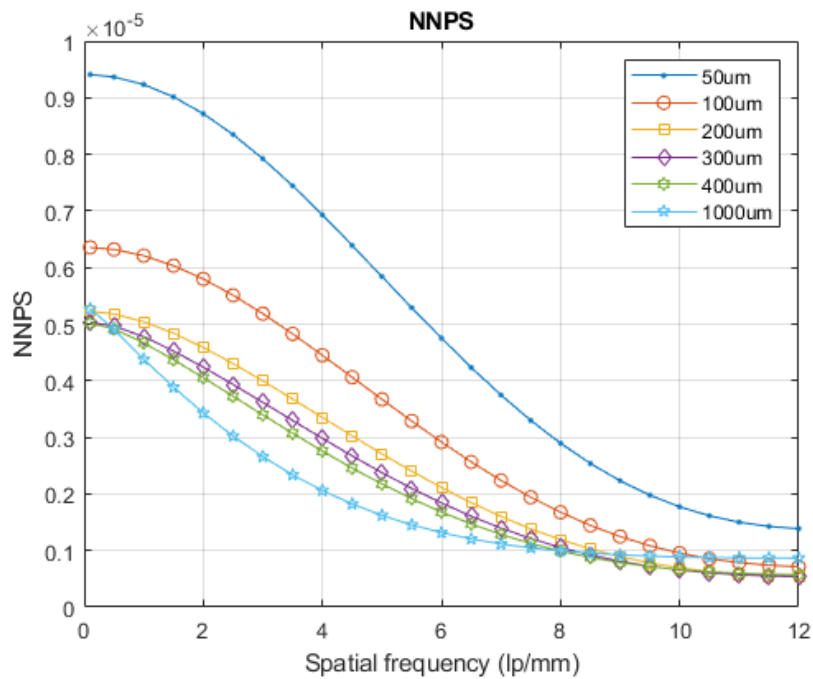


Γράφημα 1 Καμπύλη DQE ανιχνευτή α-Se (Air Kerma= 38 μGy & $F= 10 \text{ V}/\mu\text{m}$)

Μελέτη ψηφιακού ανιχνευτή μαστογραφίας με τη χρήση γραμμικών συστημάτων

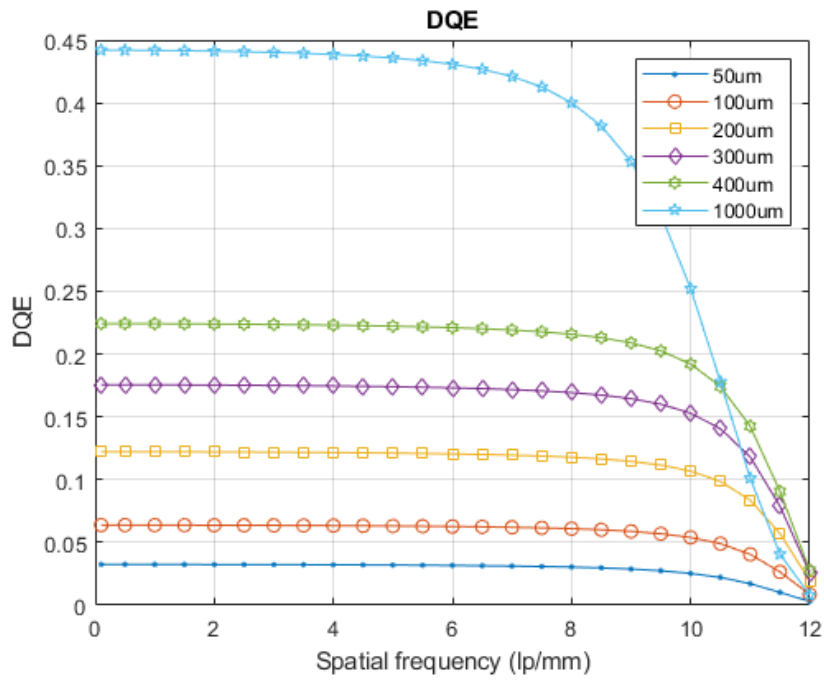


Γράφημα 2 Καμπύλη MTF ανιχνευτή α-Se (Air Kerma= 38 uGy & F= 10 V/um)

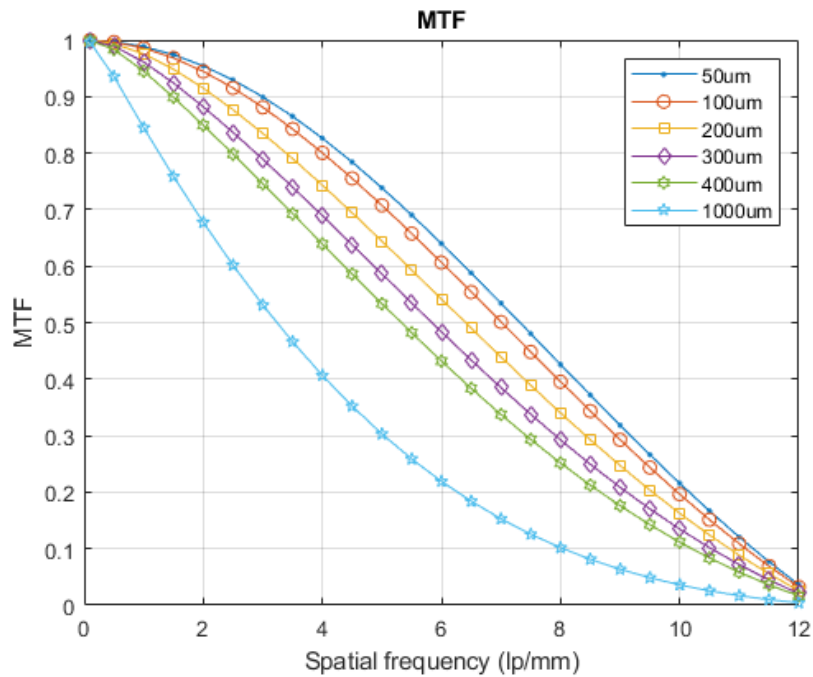


Γράφημα 3 Καμπύλη NNPS ανιχνευτή α-Se (Air Kerma= 38 uGy & F= 10 V/um)

- Για το Πυρίτιο:

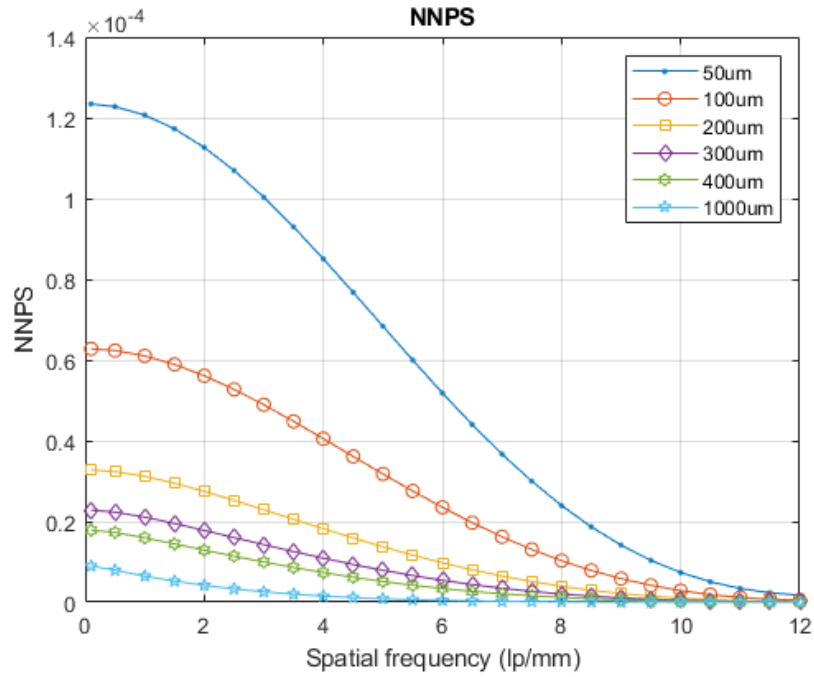


Γράφημα 4 Καμπύλη DQE ανιχνευτή Si (Air Kerma= 38 μ Gy & F= 10 V/ μ m)



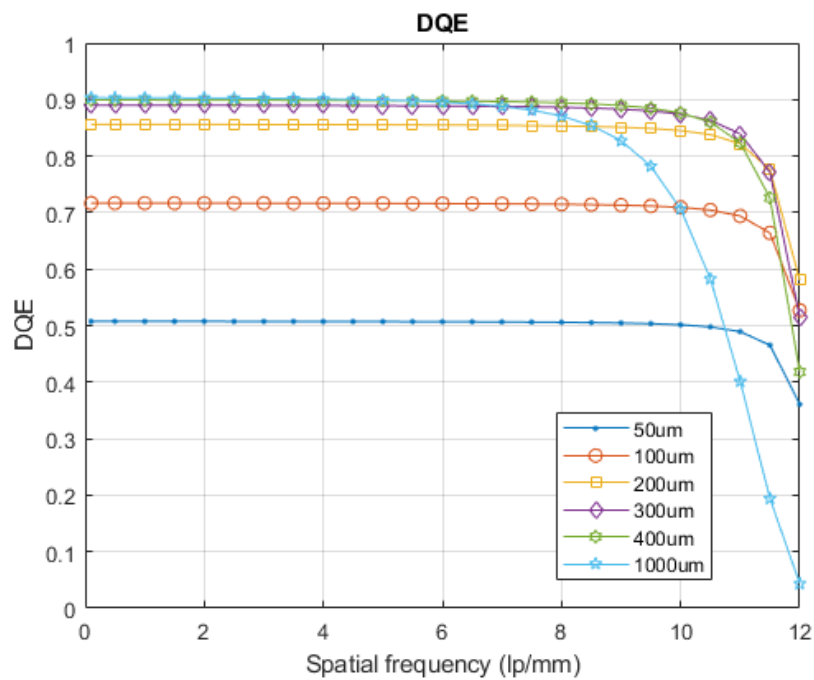
Γράφημα 5 Καμπύλη MTF ανιχνευτή Si (Air Kerma= 38 μ Gy & F= 10 V/ μ m)

Μελέτη ψηφιακού ανιχνευτή μαστογραφίας με τη χρήση γραμμικών συστημάτων



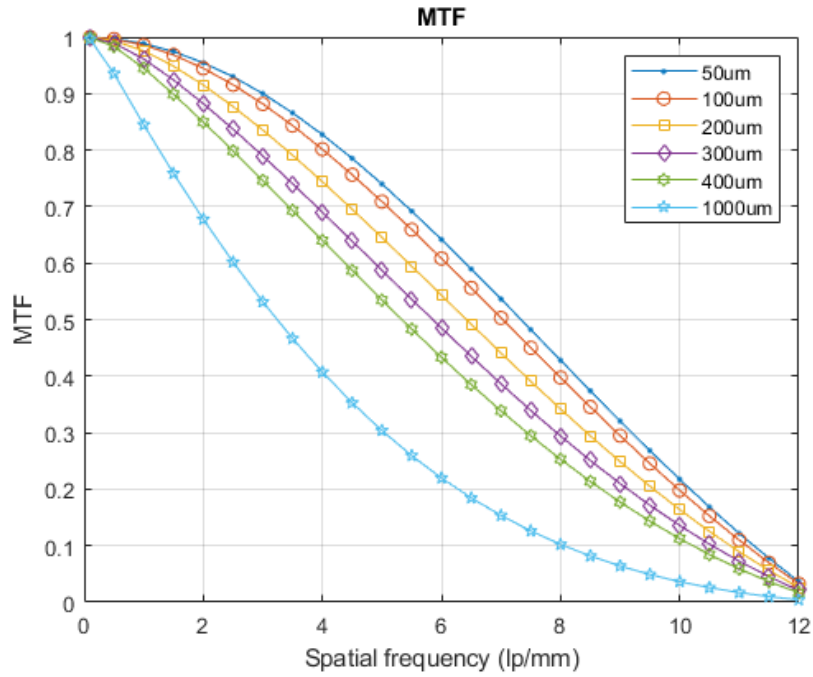
Γράφημα 6 Καμπύλη MTF ανιχνευτή Si (Air Kerma= 38 μGy & $F= 10 \text{ V}/\mu\text{m}$)

- Για το Γερμάνιο:

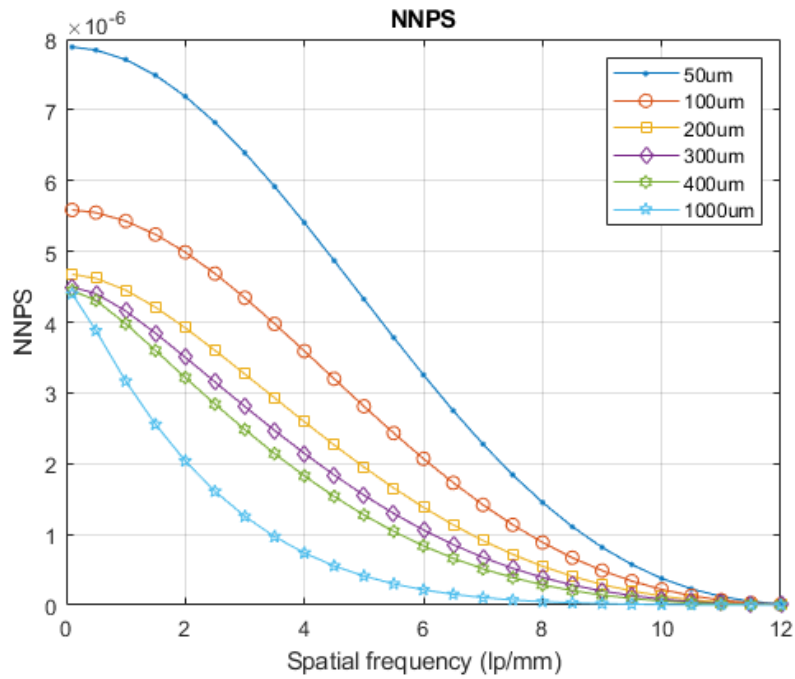


Γράφημα 7 Καμπύλη DQE ανιχνευτή Ge (Air Kerma= 38 μGy & $F= 10 \text{ V}/\mu\text{m}$)

Μελέτη ψηφιακού ανιχνευτή μαστογραφίας με τη χρήση γραμμικών συστημάτων

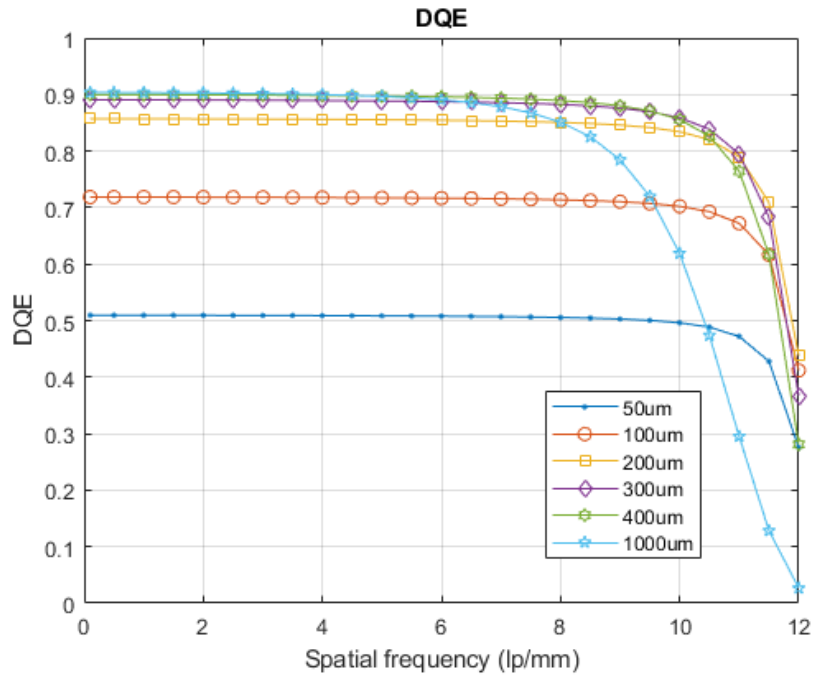


Γράφημα 8 Καμπύλη MTF ανιχνευτή Ge (Air Kerma= 38 μ Gy & F= 10 V/ μ m)

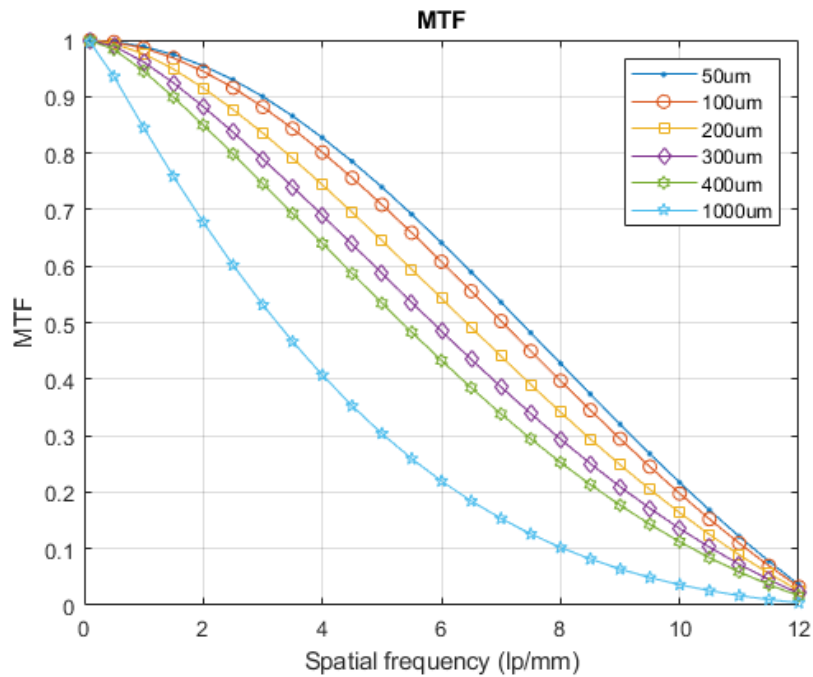


Γράφημα 9 Καμπύλη NNPS ανιχνευτή Ge (Air Kerma= 38 μ Gy & F= 10 V/ μ m))

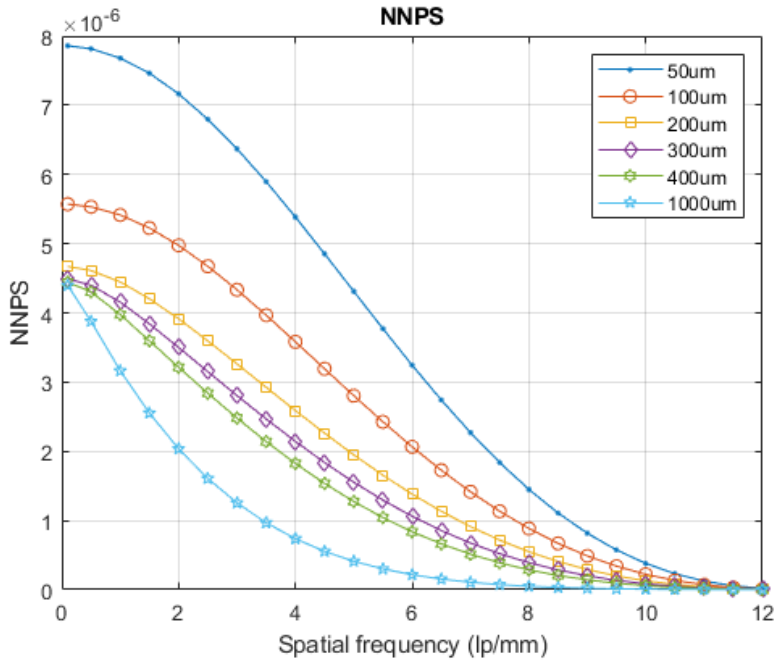
- Για το Αρσενικούχο γάλλιο:



Γράφημα 10 Καμπύλη DQE ανιχνευτή GaAs (Air Kerma= 38 uGy & F= 10 V/um)



Γράφημα 11 Καμπύλη MTF ανιχνευτή GaAs (Air Kerma= 38 uGy & F= 10 V/um)

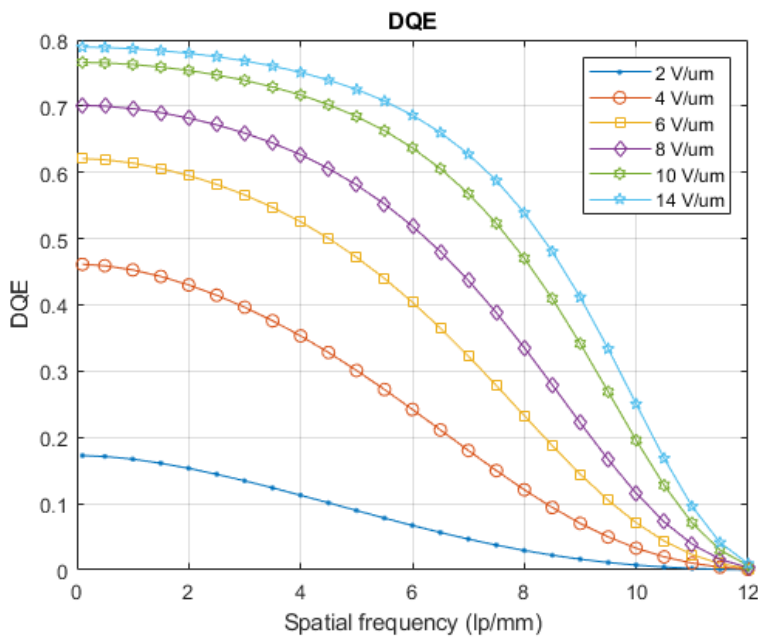


Γράφημα 12 Καμπύλη NNPS ανιχνευτή GaAs (Air Kerma= 38 μ Gy & F= 10 V/ μ m)

Μεταβολή ηλεκτρικού πεδίου

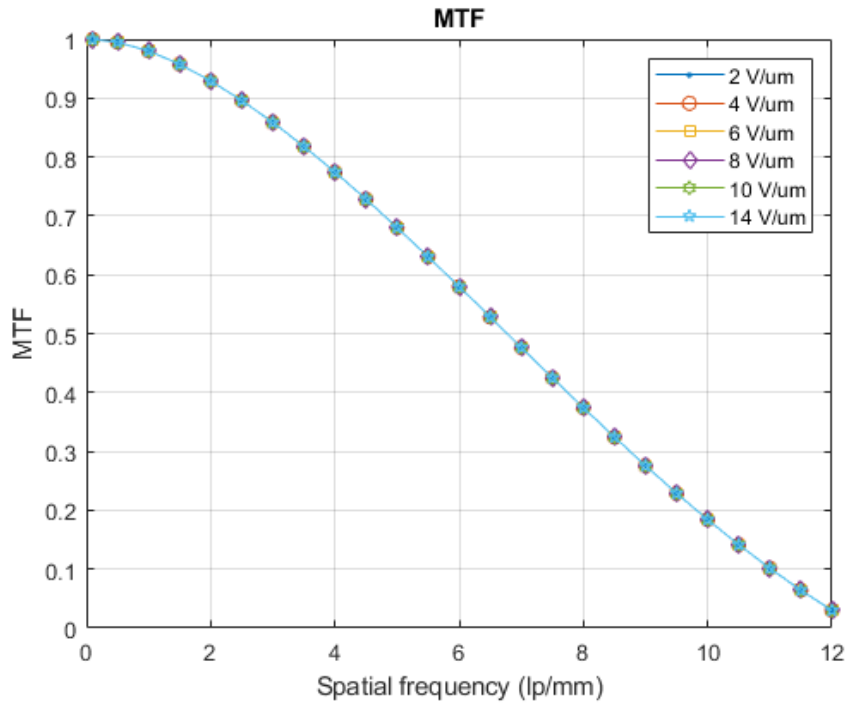
Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 1.3 όπου αναλύθηκε η δομή του ανιχνευτή άμεσης ανίχνευσης AMFI, στον ημιαγωγό εφαρμόζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ του άνω ηλεκτροδίου και των ηλεκτροδίων συλλογής του φορτίου στα rixel που βρίσκονται στην βάση του ανιχνευτή. Λήφθηκαν μετρήσεις και για τα 4 διαφορετικά υλικά υπολογίζοντας τις καμπύλες DQE, MTF και NNPS για διαφορετικό ηλεκτρικό πεδίο σε σχέση με τις χωρικές συχνότητες για τις εξής τιμές : 2 V/ μ m, 4 V/ μ m, 6 V/ μ m, 8 V/ μ m, 10 V/ μ m και 14 V/ μ m

- Για το άμορφο σελήνιο:

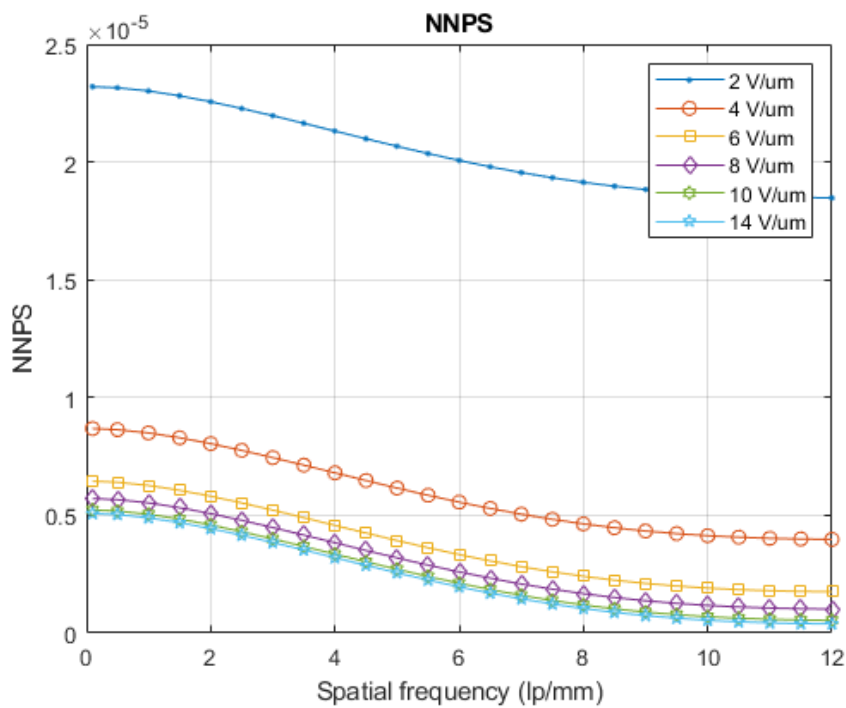


Γράφημα 13 Καμπύλη DQE ανιχνευτή a-Se (Air Kerma= 38 μ Gy & dSe= 200 μ m)

Μελέτη ψηφιακού ανιχνευτή μαστογραφίας με τη χρήση γραμμικών συστημάτων

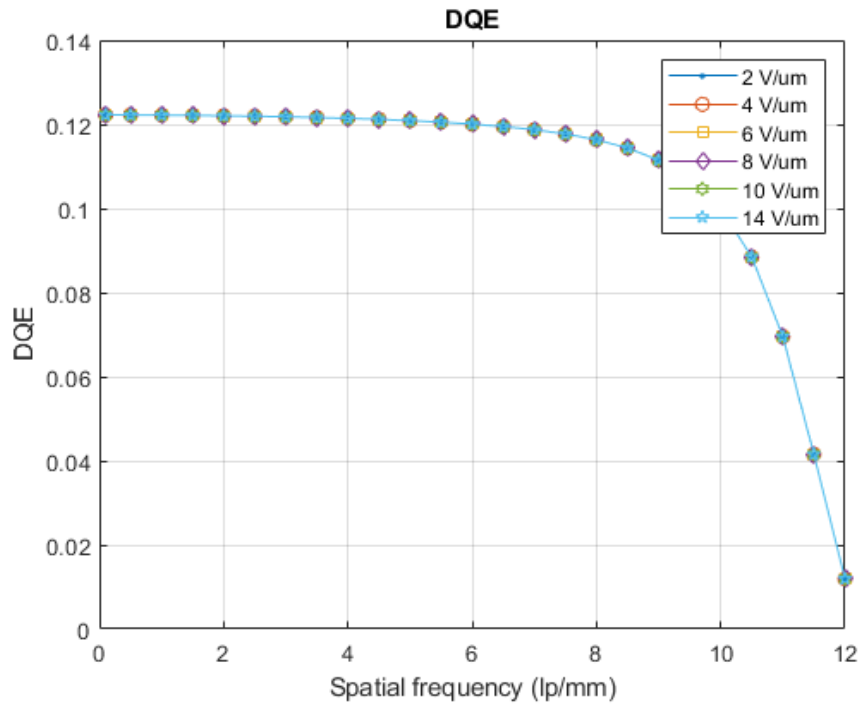


Γράφημα 14 Καμπύλη MTF ανιχνευτή α -Se (Air Kerma= 38 μ Gy & dSe= 200 μ m)

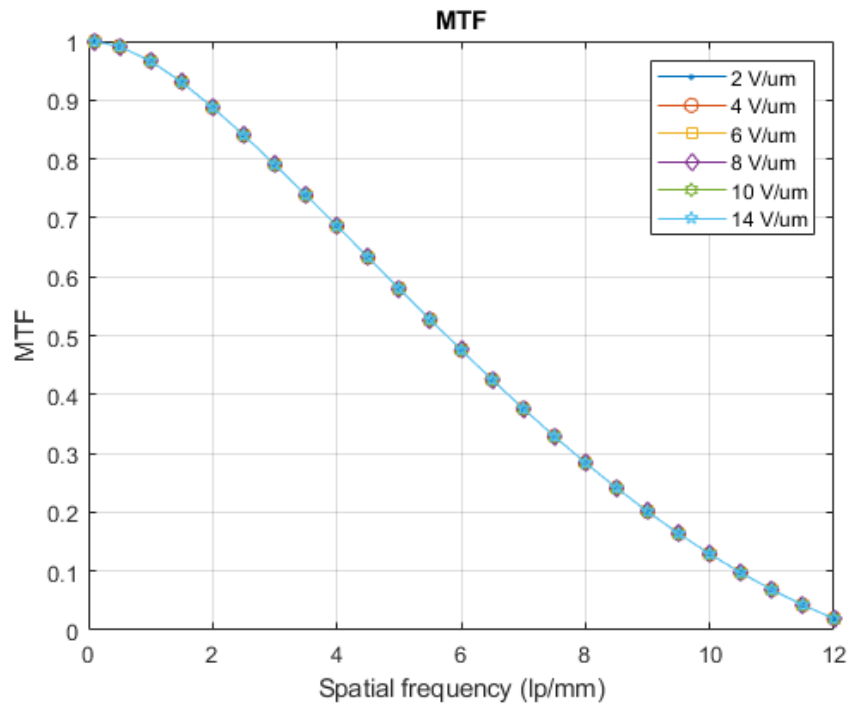


Γράφημα 15 Καμπύλη NNPS ανιχνευτή α -Se (Air Kerma= 38 μ Gy & dSe= 200 μ m)

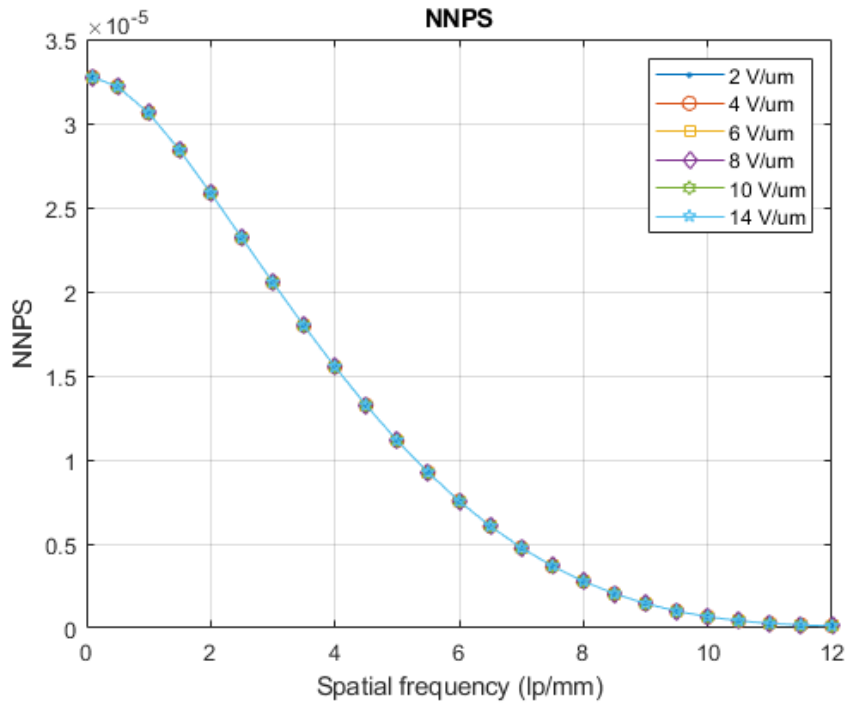
- Για το Πυρίτιο



Γράφημα 16 Καμπύλη DQE ανιχνευτή Si (Air Kerma= 38 μ Gy & dSe= 200 μ m)

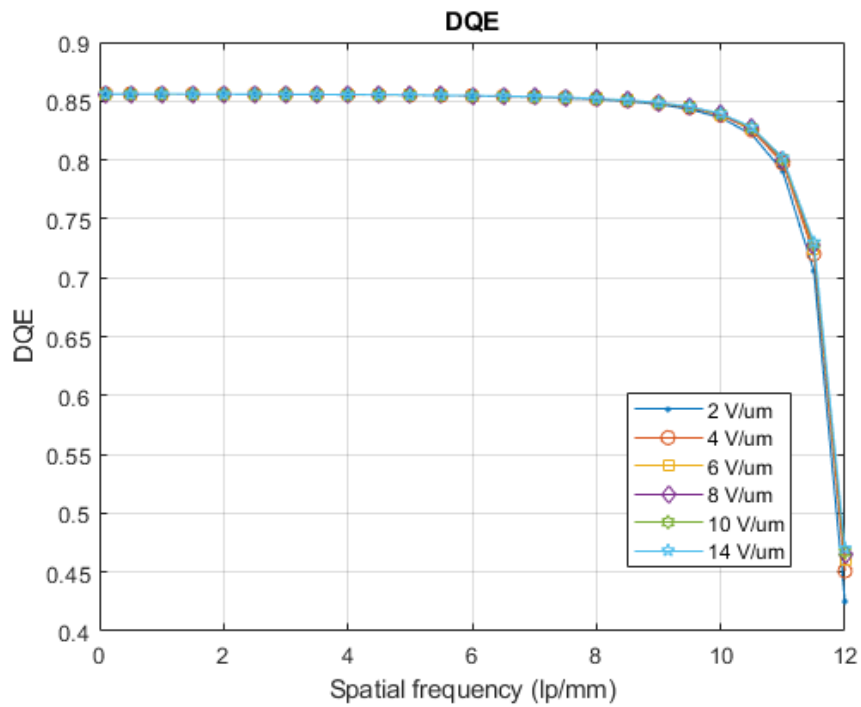


Γράφημα 17 Καμπύλη MTF ανιχνευτή Si (Air Kerma= 38 μ Gy & dSe= 200 μ m)



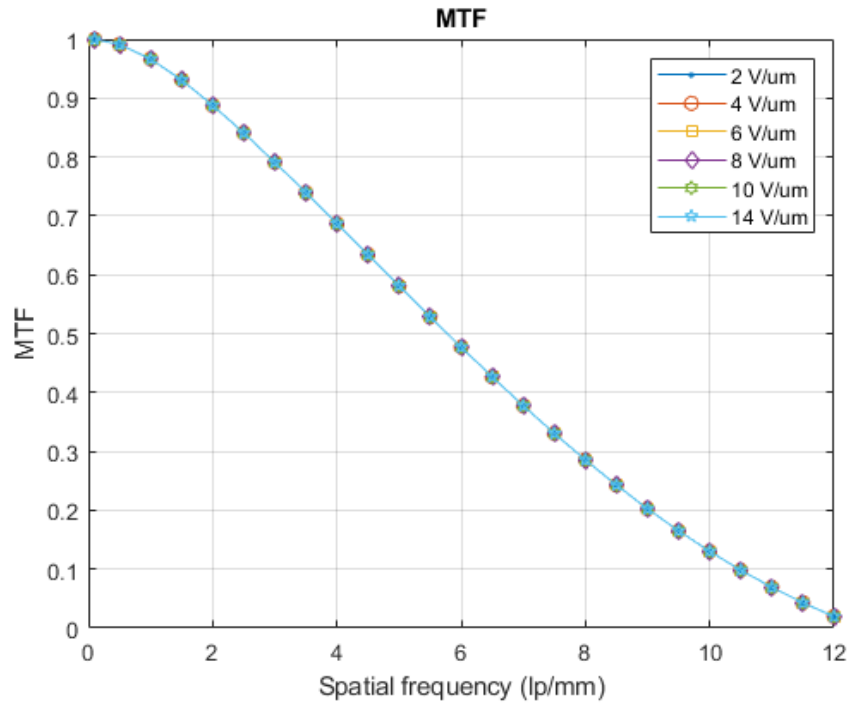
Γράφημα 18 Καμπύλη NNPS ανιχνευτή Si (Air Kerma= 38 μ Gy & dSe= 200 μ m)

- Για το Γερμάνιο

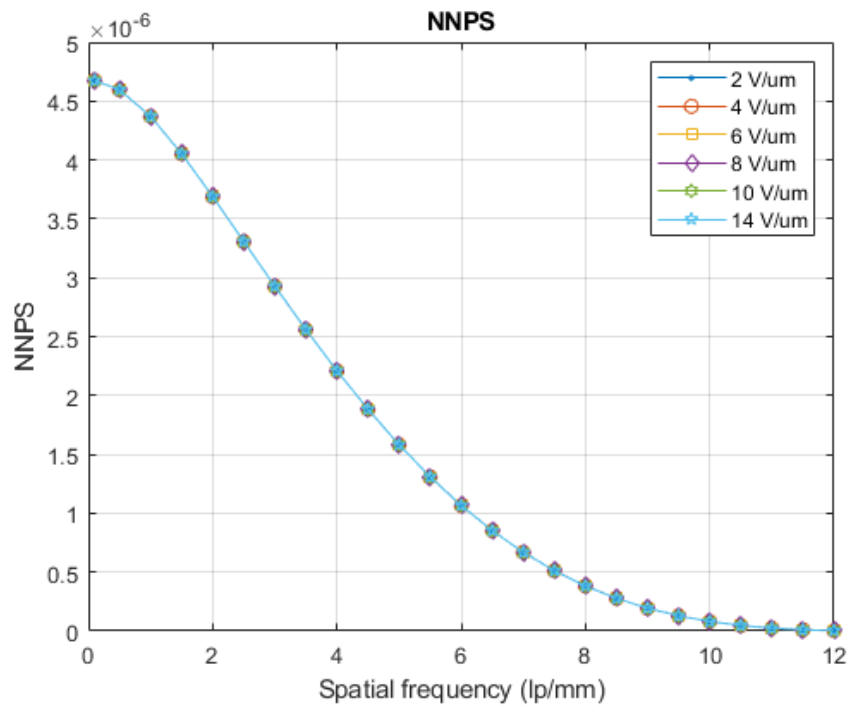


Γράφημα 19 Καμπύλη DQE ανιχνευτή Ge (Air Kerma= 38 μ Gy & dSe= 200 μ m)

Μελέτη ψηφιακού ανιχνευτή μαστογραφίας με τη χρήση γραμμικών συστημάτων

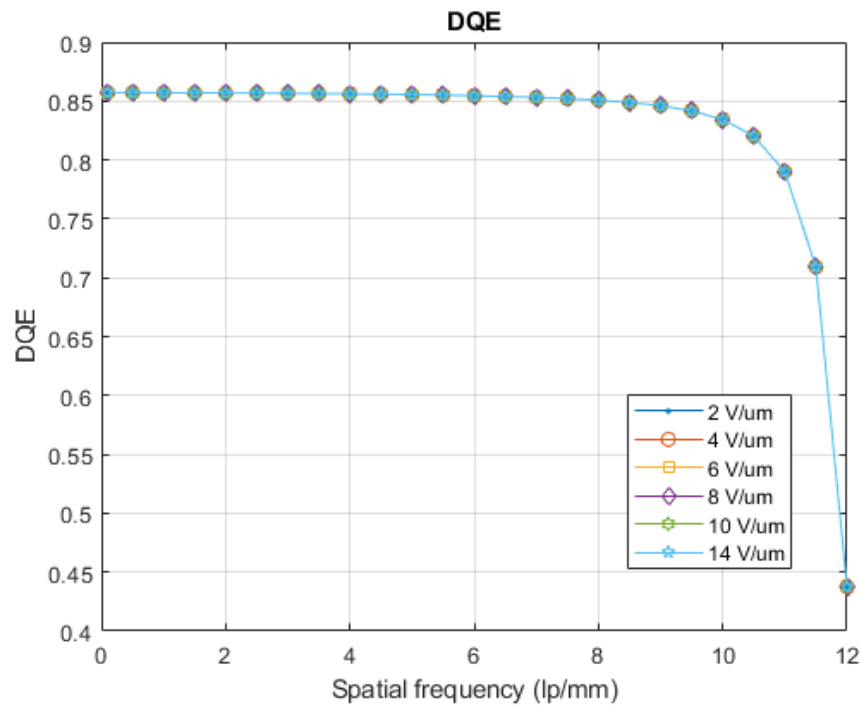


Γράφημα 20 Καμπύλη MTF ανιχνευτή Ge (Air Kerma= 38 μ Gy & dSe= 200 μ m)

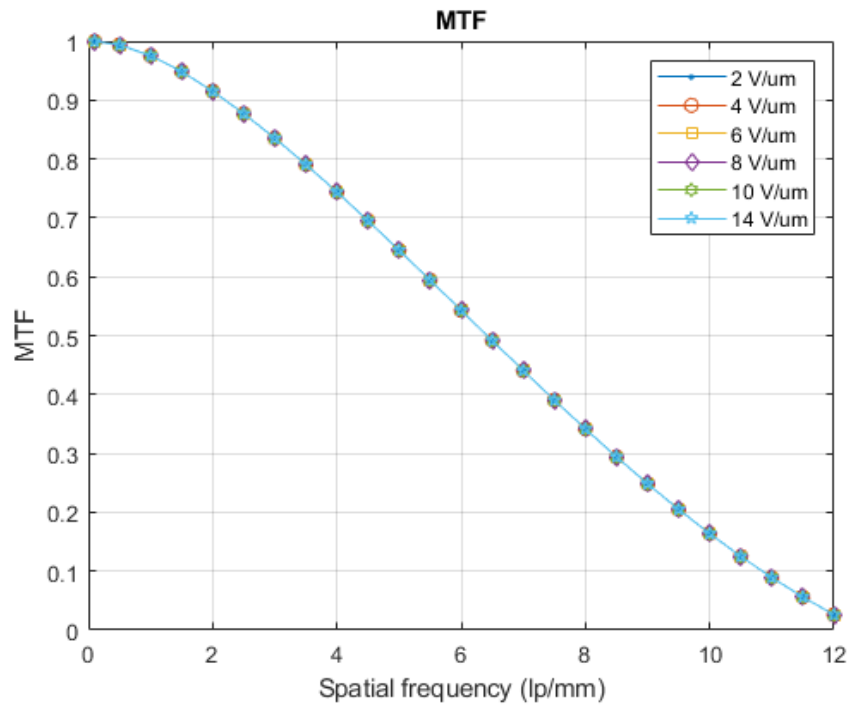


Γράφημα 21 Καμπύλη NNPS ανιχνευτή Ge (Air Kerma= 38 μ Gy & dSe= 200 μ m)

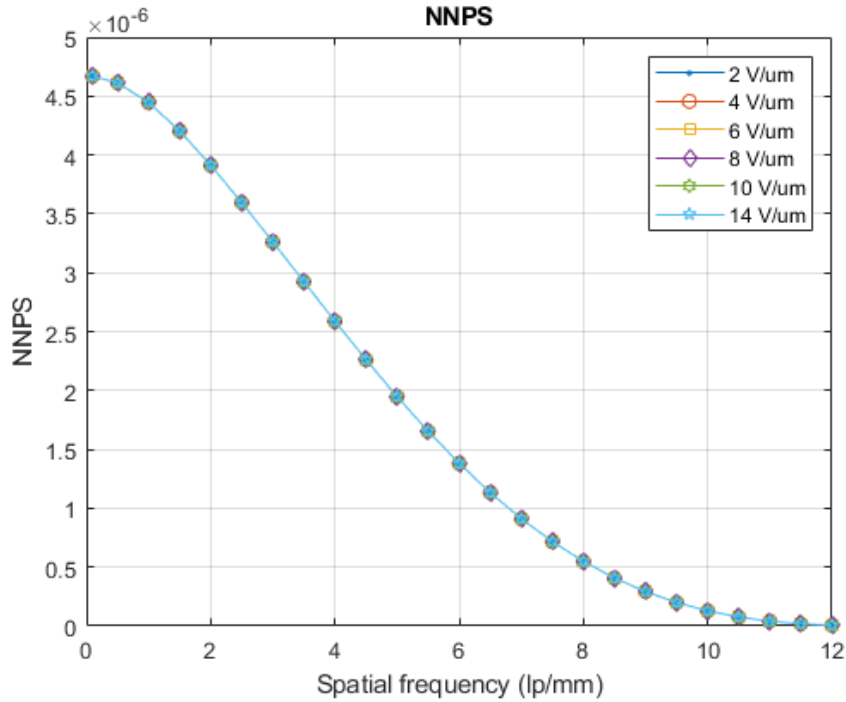
- Για το Αρσενιούχο γάλλιο



Γράφημα 22 Καμπύλη DQE ανιχνευτή GaAs (Air Kerma= 38 μ Gy & dSe= 200 μ m)



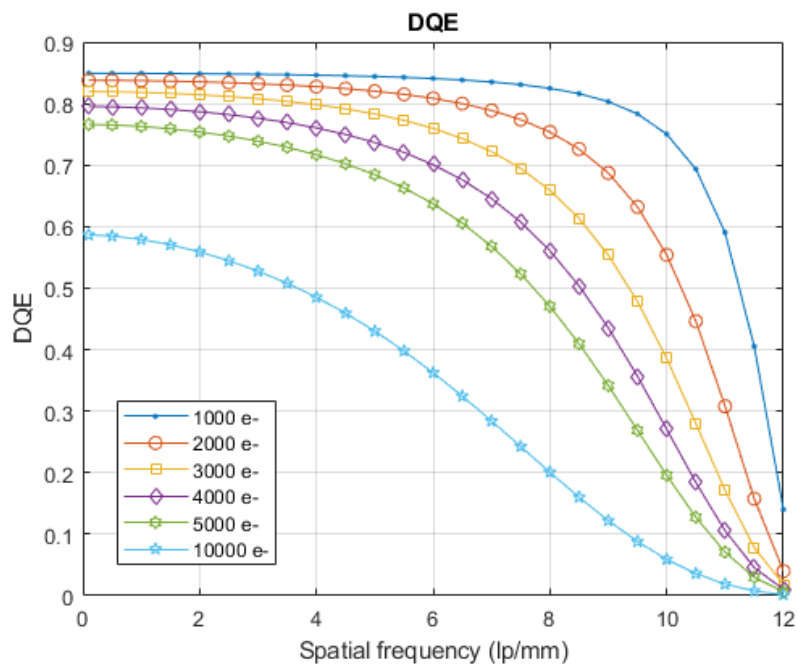
Γράφημα 23 Καμπύλη MTF ανιχνευτή GaAs (Air Kerma= 38 μ Gy & dSe= 200 μ m)



Γράφημα 24 Καμπύλη NNPS ανιχνευτή GaAs (Air Kerma= 38 μ Gy & dSe= 200 μ m)

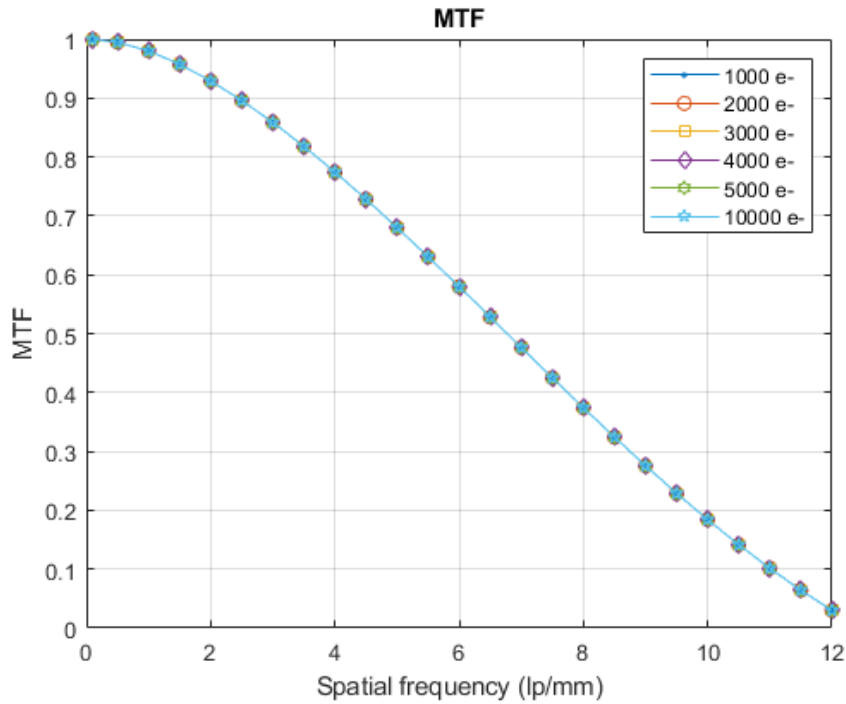
Ηλεκτρονικός θόρυβος κυκλωμάτων

Ακόμη μια παράμετρος που ελέγχθηκε η επίδραση της στην απόδοση του ανιχνευτή είναι ο ηλεκτρονικός θόρυβος που εισάγεται από τα κυκλώματα του συστήματος. Έτσι υπολογίσθηκαν οι τιμές των παραμέτρων DQE, MTF και NNPS για τιμές ηλεκτρονικού θορύβου στα 1000 e⁻, 2000 e⁻, 3000 e⁻, 4000 e⁻, 5000 e⁻ και 10000 e⁻ σε συνάρτηση με τις χωρικές συχνότητες. Οι υπολογισμοί έγιναν μόνο για τον ημιαγωγό του σεληνίου.

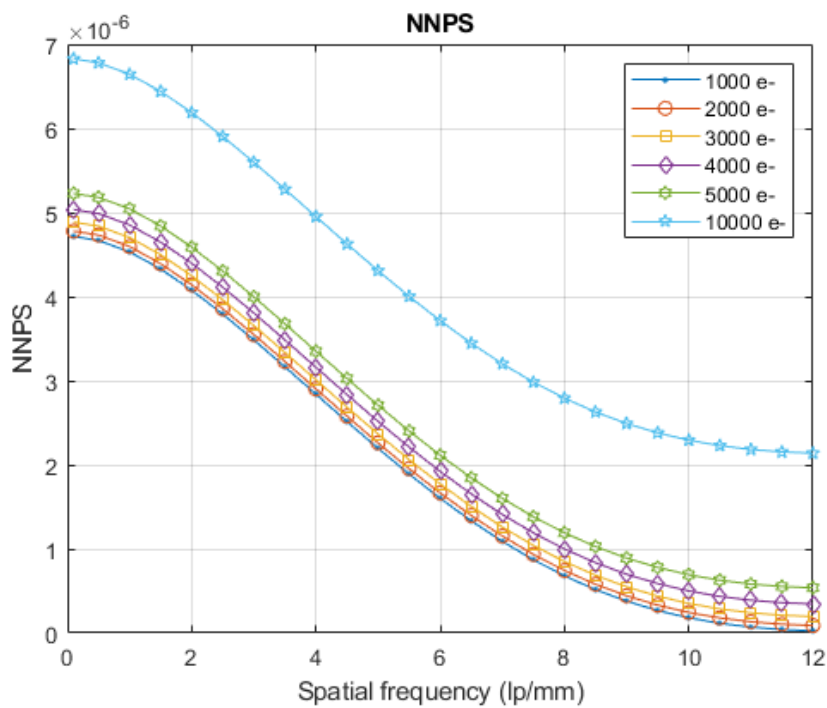


Γράφημα 25 Καμπύλη DQE ανιχνευτή a-Se (Air Kerma= 38 μ Gy, dSe= 200 μ m & F= 10 V/ μ m)

Μελέτη ψηφιακού ανιχνευτή μαστογραφίας με τη χρήση γραμμικών συστημάτων



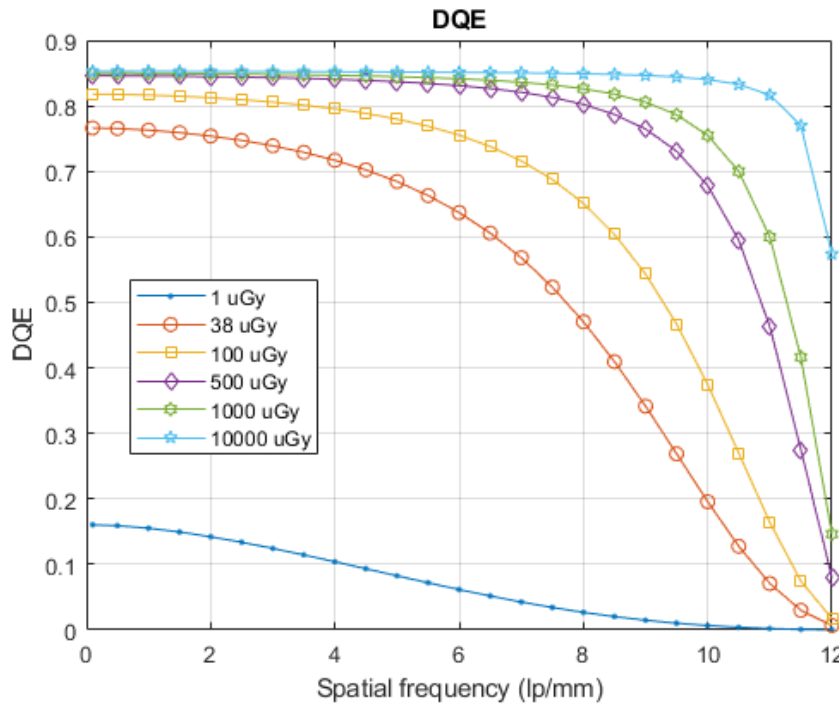
Γράφημα 26 Καμπύλη MTF ανιχνευτή α -Se (Air Kerma= 38 μ Gy, $dSe= 200 \mu$ m & $F= 10$ V/ μ m)



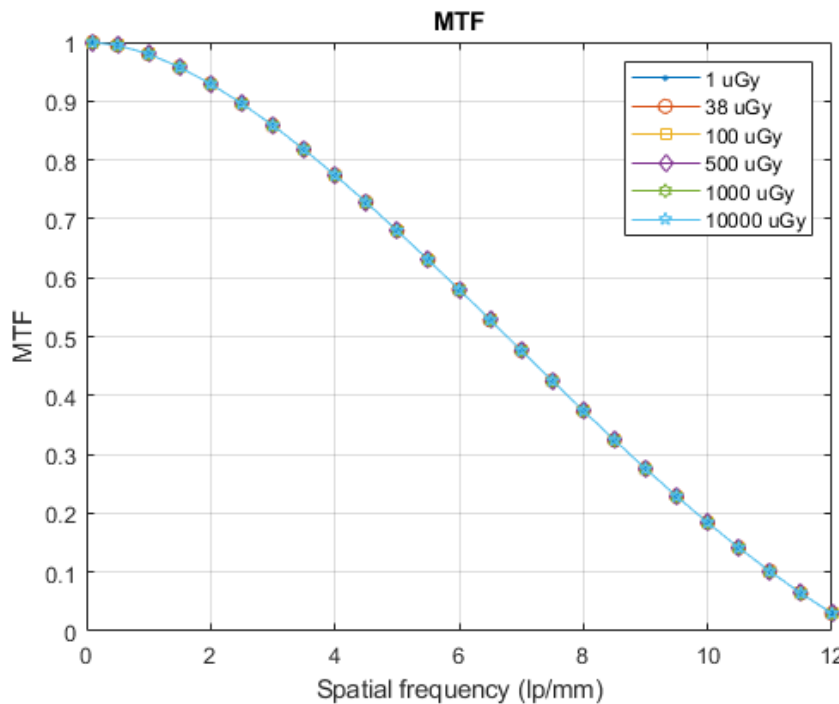
Γράφημα 27 Καμπύλη NNPS ανιχνευτή α -Se (Air Kerma= 38 μ Gy, $dSe= 200 \mu$ m & $F= 10$ V/ μ m)

Διαφοροποίηση δόσης στον ανιχνευτή (Air Kerma)

Ο τελευταίος υπολογισμός που πραγματοποιήθηκε είναι αυτός της επίδρασης της δόσης στην απόδοση του ανιχνευτή. Πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί των παραμέτρων DQE, NNPS και MTF για τον ημιαγωγό του άμορφου σεληνίου και τιμές δόσης 1 μGy , 38 μGy , 100 μGy , 500 μGy , 1000 μGy και 10000 μGy σε συνάρτηση με τις χωρικές συχνότητες.

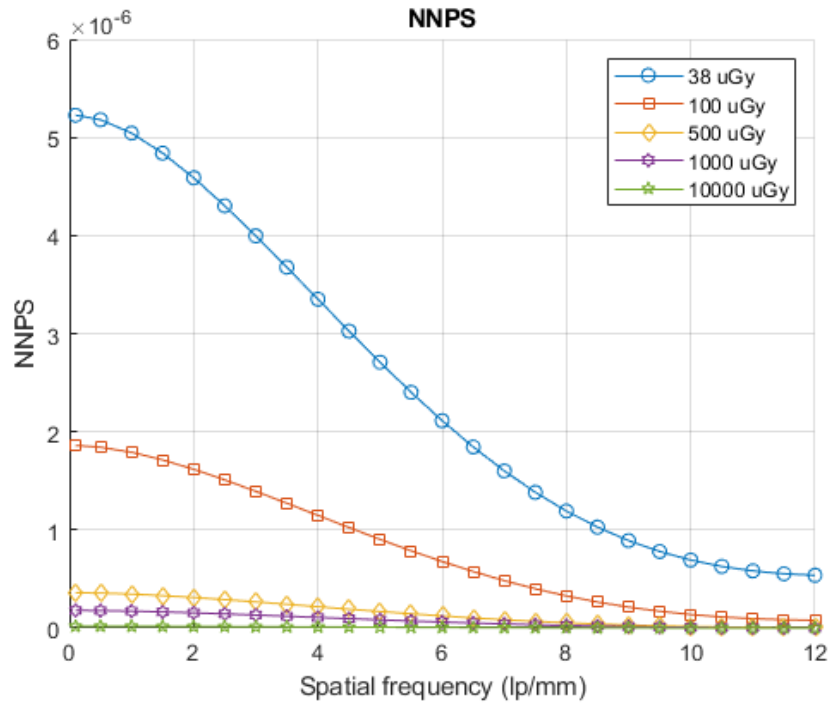


Γράφημα 28 Καμπύλη DQE ανιχνευτή $\alpha\text{-Se}$ (Air Kerma= 38 μGy , $d\text{Se}= 200 \mu\text{m}$ & $F= 10 \text{ V}/\mu\text{m}$)



Γράφημα 29 Καμπύλη MTF ανιχνευτή $\alpha\text{-Se}$ (Air Kerma= 38 μGy , $d\text{Se}= 200 \mu\text{m}$ & $F= 10 \text{ V}/\mu\text{m}$)

Μελέτη ψηφιακού ανιχνευτή μαστογραφίας με τη χρήση γραμμικών συστημάτων



Γράφημα 30 Καμπύλη NNPS ανιχνευτή *a-Se* (*Air Kerma*= 38 μGy , *dSe*= 200 μm & *F*= 10 $\text{V}/\mu\text{m}$)

Κεφάλαιο 4 Συμπεράσματα

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Έγιναν υπολογισμοί της απόδοσης ενός ανιχνευτή ημιαγωγού AMFI άμεσης ανίχνευσης για 4 διαφορετικά υλικά (a-Se, Si, Ge & GaAs) ως επέκταση των υπολογισμών που λαμβάνουν χώρα στο άρθρο που περιγράφεται το μαθηματικό μοντέλο [6]. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν κάτω από διαφορετικές συνθήκες όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή εξετάζοντας την επίδραση που έχει: το διαφορετικό πάχος στρώματος του ημιαγωγού, το ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται μεταξύ του άνω ηλεκτροδίου και του ηλεκτροδίου συλλογής του φορτίου, ο ηλεκτρονικός θόρυβος των κυκλωμάτων που ευθύνονται για την ψηφιοποίηση του ηλεκτρικού φορτίου και την εξαγωγή του σήματος και τέλος την επίδραση της δόσης (Air Kerma).

Ως πρώτη περίπτωση που εξετάστηκε είναι η επίδραση που έχει το πάχος του ημιαγωγού στην απόδοση του ανιχνευτή. Διατηρώντας όλες τις άλλες παραμέτρους του ανιχνευτή ίδιες, παρατηρήθηκε ότι όσο αυξήθηκε το πάχος του ημιαγωγού και για τα 4 υλικά μειώθηκε ο συντελεστής MTF που σχετίζεται άμεσα με την διακριτική ικανότητα του συστήματος (Γραφήματα 2,5,8,11). Για τον θόρυβο παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του πάχους του ημιαγωγού οδήγησε στη μείωση του συντελεστή NNPS (Γραφήματα 3,6,9,12) που αποτελεί μέτρο του θορύβου με τον υψηλότερο θόρυβο να παρατηρείται για τον ημιαγωγό του πυριτίου με το άμορφο σεληνίο να ακολουθεί και τέλος το γερμάνιο και το αρσενιούχο γάλλιο να δίνουν παραπλήσια αποτελέσματα. Τέλος όσον αφορά την κβαντική αποδοτικότητα που αποτελεί συνολικό μέτρο σύγκρισης μεταξύ των ημιαγωγών καθώς συνυπολογίζει την διακριτική ικανότητα, το θόρυβο και τη δόση παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του πάχους του ημιαγωγού οδήγησε σε ξεκάθαρη βελτίωση του συντελεστή DQE και στα 4 υλικά (Γραφήματα 1,4,7,10). Η αύξηση αυτή παρουσίασε μία ιδιαιτερότητα στο άμορφο σεληνίο όπως φαίνεται και στο Γράφημα 1 καθώς εκεί παρατηρήθηκε ότι από τα 50 μm στα 200 μm , 300 μm , 400 μm και 1000 μm ο συντελεστής DQE σχεδόν διπλασιάστηκε για τις χωρικές συχνότητες 0 έως 2 lp/mm με την αύξηση αυτή όμως για το πάχος των 1000 μm να οδηγεί σε απότομη πτώση του DQE από τα 2 lp/mm και έπειτα ακόμη και κάτω από το DQE των 50 μm .

Ως δεύτερη περίπτωση εξετάστηκε η επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των ηλεκτροδίων του ανιχνευτή και για τα 4 υλικά. Και σε αυτή την περίπτωση διατηρήθηκαν ίδιες όλες οι παράμετροι του ανιχνευτή με τη μεταβολή να πραγματοποιείται μόνο στο ηλεκτρικό πεδίο. Για το πυρίτιο, γερμάνιο και αρσενιούχο γάλλιο παρατηρήθηκε μηδαμινή μεταβολή στην απόδοση του ανιχνευτή και για τις 3 παραμέτρους (DQE, MTF, NNPS) που υπολογίσθηκαν (Γραφήματα 16 έως 24). Για τον ημιαγωγό του Σεληνίου παρατηρήθηκε ότι με αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνεται σημαντικά η απόδοση του ανιχνευτή με αύξηση του DQE (Γράφημα 13). Η μεταβολή αυτή οφείλεται στην ελάττωση του θορύβου που παρατηρείται καθώς όσο αυξάνεται το ηλεκτρικό πεδίο ο συντελεστής NNPS ελαττώνεται ενώ η διακριτική ικανότητα του συστήματος παραμένει αμετάβλητη.

Ως τρίτη περίπτωση εξετάστηκε η επίδραση του ηλεκτρονικού θορύβου που εισέρχεται στο σύστημα λόγω των κυκλωμάτων που πραγματοποιούν την ανάγνωση και

ψηφιοποίηση σήματος. Ο θόρυβος αυτός υπολογίζεται σε e – και πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για διάφορες τιμές του σε συνάρτηση με τις χωρικές συχνότητες. Οι υπολογισμοί λήφθηκαν μόνο για τον ημιαγωγό του άμορφου Σεληνίου καθώς παρατηρήθηκε η ίδια ακριβώς συμπεριφορά και για τους υπόλοιπους ημιαγωγούς. Έτσι εξετάστηκε η επίδραση που έχει στους συντελεστές DQE, MTF και NNPS ο ηλεκτρονικός θόρυβος για τις τιμές 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 και 10000 e –. Όπως ήταν αναμενόμενο η αύξηση του ηλεκτρονικού θορύβου προκαλεί υποβάθμιση της απόδοσης του ανιχνευτή με ελάττωση του DQE (Γράφημα 25). Η ελάττωση είναι απόρροια της αύξησης του συνολικού θορύβου με αύξηση του NNPS (Γράφημα 27) ενώ η διακριτική ικανότητα του συστήματος παραμένει σταθερή (Γράφημα 26) καθώς ο συντελεστής MTF δεν μεταβάλλεται επειδή ο ηλεκτρονικός θόρυβος εισέρχεται στο σύστημα στο τελικό στάδιο μετά την αλληλεπίδραση των ακτίνων X με τον ημιαγωγό και την συλλογή του φορτίου από τα ηλεκτρόδια στο κάτω μέρος του ανιχνευτή.

Η τελευταία περίπτωση που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία είναι η επίδραση που θα έχει στην απόδοση του ανιχνευτή η αύξηση της δόσης που δέχεται. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για τιμές δόσης 1, 38, 100, 500 μGy και 1, 10 mGy . Η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή παρέμεινε σταθερή ενώ ο θόρυβος και ο συντελεστής κβαντικής αποδοτικότητας ελαττώθηκαν και αυξήθηκαν αντίστοιχα με αύξηση της δόσης.

Ως γενικά συμπεράσματα από την παρούσα εργασία για τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν είναι τα παρακάτω:

1. Όσον αφορά το πάχος του ημιαγωγού παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του οδήγησε στην υποβάθμιση της διακριτικής ικανότητας του συστήματος. Η υποβάθμιση αυτή οφείλεται στην συγκέντρωση αρνητικού φορτίου στη ζώνη φραγής ηλεκτρονίων που βρίσκεται μεταξύ του άνω και κάτω ηλεκτροδίου. Με την αύξηση του πάχους του ημιαγωγού το πάχος της συγκεκριμένης ζώνης αυξάνεται με αποτέλεσμα τον εγκλωβισμό περισσότερων ηλεκτρονίων άρα και μεγαλύτερο αρνητικό φορτίο. Το φορτίο αυτό προκαλεί την διασπορά του σήματος που ανιχνεύουν τα ηλεκτρόδια της βάσης και έτσι υποβαθμίζεται η διακριτική ικανότητα (Εξίσωση 2.3.25). Από την άλλη πλευρά ο θόρυβος ελαττώνεται καθώς η αύξηση του πάχους ευνοεί την απορρόφηση περισσότερων ακτίνων X από το υλικό, με συνέπεια τη δημιουργία μεγαλύτερου κέρδους \rightarrow ισχυρότερου σήματος \rightarrow μικρότερο NNPS.

Η διαφορά που εντοπίζεται στην απόδοση μεταξύ των υλικών οφείλεται στην διαφορά του ατομικού αριθμού και πυκνότητας. Η διαφορά αυτή γίνεται πιο εύκολα αντιληπτή στην σύγκριση των Se, Ge και GaAs με το Si όπου έχουν μεγαλύτερη διαφορά στον ατομικό αριθμό. Τα υλικά υψηλότερου ατομικού αριθμού έχουν την ικανότητα να απορροφούν περισσότερες ακτίνες X άρα να παράγουν περισσότερο σήμα με αποτέλεσμα την βελτίωση του DQE.

2. Στην περίπτωση του ηλεκτρικού πεδίου η μοναδική μεταβολή παρατηρήθηκε στον ημιαγωγό του σεληνίου καθώς η ενέργεια που απαιτείται για την δημιουργία ζεύγους οπής-ηλεκτρονίου εξαρτάται από το ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται μεταξύ των ηλεκτροδίων [14]. Η μεταβολή αυτή στον θόρυβο που φάνηκε στο Γράφημα 15 οφείλεται στην ελάττωση της ενέργειας που απαιτείται για την δημιουργία ζεύγους οπής-ηλεκτρονίου με την αύξηση του ηλεκτρικού

πεδίου. Έτσι με βάση την εξίσωση 2.3.12 το κέρδος που παράγεται είναι μεγαλύτερο με αποτέλεσμα την μείωση του θορύβου και αύξηση του DQE .

3. Σχετικά με τον ηλεκτρονικό θόρυβο φάνηκε η αναμενόμενη επίδραση που έχει η αύξηση του στην υποβάθμιση του συντελεστή κβαντικής αποδοτικότητας DQE .
4. Η αύξηση της δόσης ουσιαστικά αυξάνει το συνολικό αριθμό ακτίνων X που προσκρούουν στην επιφάνεια του ανιχνευτή. Η αύξηση αυτή οδηγεί στην μείωση του κβαντικού θορύβου καθώς η διακύμανση του θορύβου όπως φαίνεται και στην εξίσωση 1.4.3 είναι αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού των φωτονίων X . Η μείωση του κβαντικού θορύβου και ως συνέπεια και του συνολικού θορύβου συνεπάγονται στην αύξηση του συντελεστή DQE σε βάρος του ασθενή λόγω αύξησης της λαμβανόμενης δόσης. (Γράφημα 28,30).

Περαιτέρω διερεύνηση της παρούσας εργασίας θα μπορούσε να είναι η τροποποίηση του γραμμικού συστήματος για να λαμβάνει υπόψη και την εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας της K στοιβάδας από το υλικό του ημιαγωγού αλλά και τις σκεδάσεις Compton που συμβαίνουν στο εσωτερικό του κάνοντας το μαθηματικό μοντέλο ακόμη πιο ακριβές. Άλλη μια παράμετρος που θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη είναι η δομή του υλικού στην επιφάνεια ανιχνευτή για παράδειγμα υλικά με κοκκώδη μορφή.

Βιβλιογραφία

- [1] Δημήτριος Νικολόπουλος, Σοφία Κόττου, Παναγιώτης Γιαννακόπουλος (2015) “Ακτινοβολίες περιβάλλοντος και άνθρωπος”, ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ, ISBN: 978-960-603-187-8 .
- [2] Ιωάννης Κανδαράκης (2007) “Ακτινοδιαγνωστική”, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ “ΑΡΑΚΥΝΘΟΣ”, ISBN: 978-960-89768-1-8
- [3] Καλύβας Ν. (2020) «Σημειώσεις Μαθήματος Επιστήμης Δημιουργίας Εικόνας», Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Σχολή Μηχανικών, Τμήμα Μηχανικών Βιοϊατρικής
- [4] Κυριάκος Ψαρράκος, Ελισάβετ Μολυβδά-Αθανασοπούλου, Άννα Γκοτζαμάνη-Ψαρράκου, Αναστάσιος Σιούντας (2012) “ΕΠΙΤΟΜΗ ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ”, University Studio Press A.E. , ISBN: 978-960-12-2092-5
- [5] Κώστας Παππάς, Κική Θεοδώρου (2019), “Ακτινοβολίες και Ακτινοπροστασία: Τόμος 2”, Εκδόσεις Π.Χ. Πασχαλίδης, ISBN:987-9925-563-29-6
- [6] Aunnasha Sengupta, Chumin Zhao, Anastasios Konstantinidis, Jerzy Kanicki (2019), “[Cascaded systems analysis of a-Se/a-Si and a-InGaZnO TFT passive and active pixel sensors for tomosynthesis](#)”, Physics in Medicine & Biology, Vol 64, Num 2, 22pp
- [7] Daniele Panetta, Marcello Demi (2014) “Comprehensive Biomedical Physics”, Volume 2, Elsevier, ISBN: 978-0-444-53633-4
- [8] D.R. Dance, S. Christophorides, A. D.A Maidment, I.D McLean, K.H. Ng (2014) “Diagnostic radiology physics: A handbook for teachers and students”, International Atomic Energy Agency (IAEA), ISBN: 978-92-0-131010-1
- [9] Ho Kyung Kim (2006) “Generalized cascaded model to assess noise transfer in scintillator-based x-ray imaging detectors”, APPLIED PHYSICS LETTERS, Vol. 89, Issue 23
- [10] Huang. Heyuan, Abbaszadeh Shiva (2019) , “[Recent Development of Amorphous Selenium-Based X-ray Detectors: A Review](#)”, IEEE Sensors Journal, Vol 20, Issue 4, Pages 1694-1704
- [11] Jacob Beutel, Harold L. Kundel, Richard L. Van Metter (2000), “Handbook of Medical Imaging, Volume 1. Physics and Psychophysics”, Spiepress, ISBN: 978-0-8194-7772-9
- [12] Luis Lanca, Augusto Silva (2013) “Digital Imaging Systems for Plain Radiography”, Springer, ISBN: 978-1-4614-5067-2
- [13] M J Yaffe, J A Rowlands (1997), “[X-ray detectors for digital radiography](#)”, Physics in Medicine & Biology, Vol 42, Num 1, Pages 1-39
- [14] M Z Kabir, Salman M. Arnab, Nour Hijazi (2019), “[Electron–hole pair creation energy in amorphous selenium: geminate versus columnar recombination](#)”, Springer, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, Vol 30, Issue 24, Pages 21059-21063
- [15] Nowotny R. (1998), “XMuDat: Photon attenuation data on PC”, International Atomic Energy Agency
- [16] Safa Kasap, Joel B. Frey, George Belev, Olivier Tousignant, Habib Mani, Jonathan Greenspan, Luc Laperriere, Oleksandr Bubon, Alla Reznik, Giovanni DeCrescenzo, Karim S. Karim, John A. Rowlands (2011), “[Amorphous and Polycrystalline Photoconductors for Direct Conversion Flat Panel X-Ray Image Sensors](#)”, PubMed

- [17] Youcef El-Mohri, Larry E. Antonuk, Qihua Zhao, Yi Wang, Yixin Li, Hong Du, Amit Sawant (2006), "[Performance of a high fill factor, indirect detection prototype flat-panel imager for mammography](#)", Medical Physics, Vol 34, Issue 1, Pages 315-327
- [18] www.matprop.ru New Semiconductor Materials, Biology systems, Characteristics and Properties
- [19] www.bps.healthcare.siemens-healthineers.com/booneweb/index.html X ray Spectrum Generator

Παράρτημα

Στο Κεφάλαιο 2.3 παρουσιάστηκε η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την κατασκευή του γραμμικού συστήματος σε κώδικα MATLAB. Έγινε μοντελοποίηση του άμεσου ανιχνευτή με τη χρήση διαφορετικών υλικών ως ημιαγωγό. Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται τα αριθμητικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή του φάσματος ακτίνων Χ, τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή αλλά και τις ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν ως ημιαγωγοί για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

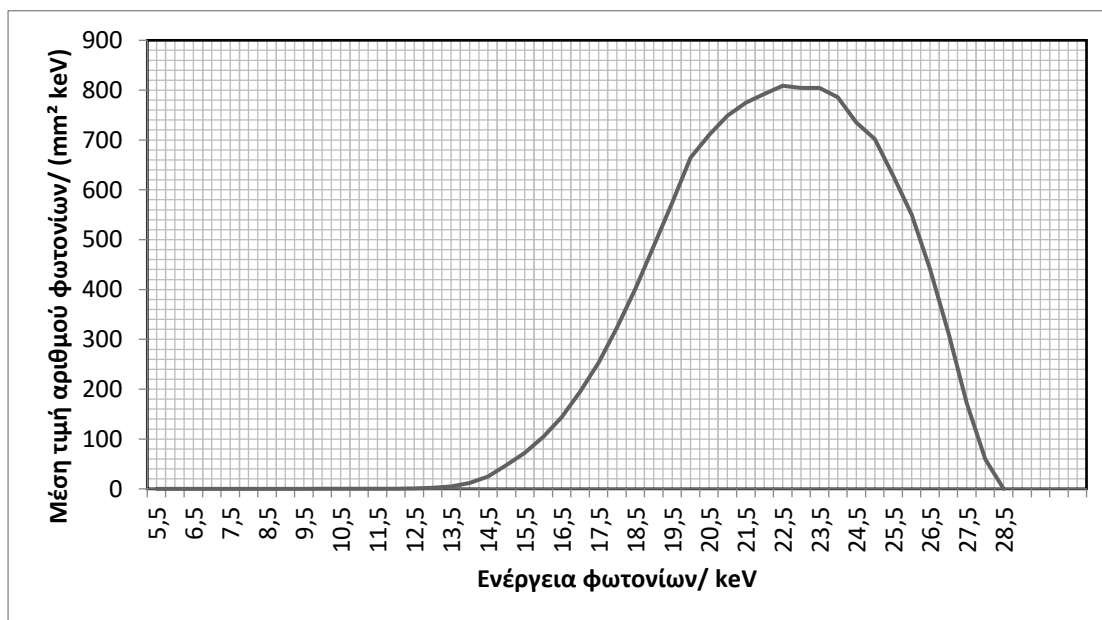
Φάσμα ακτίνων Χ:

Το παραγόμενο φάσμα ακτίνων Χ όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2.3 παράχθηκε μέσω του online εργαλείου προσομοίωσης που παρέχεται στο διαδίκτυο από την εταιρεία Siemens με τα παρακάτω χαρακτηριστικά [6],[19]:

Πίνακας 2 Χαρακτηριστικά Φάσματος [6]

Τάση λυχνίας	28 kVp
Υλικό ανόδου	Βολφράμιο (W)
Φίλτρο λυχνίας	2.5 mm Αλουμινίου (Al)
Μέση ενέργεια φάσματος	22.257 keV
Πάχος Υποδιπλασιασμού (HVL)	0.833 mm Al
Δόση στον ανιχνευτή (Air Kerma)	38 mGy

Ενώ η γραφική παράσταση του παραγόμενου φάσματος είναι η ακόλουθη:



Γράφημα 31 Φάσμα Ακτίνων Χ από λογισμικό προσομοίωσης [15]

Ανιχνευτή ακτίνων Χ

Τα δομικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή που χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση φαίνονται στον επόμενο πίνακα:

Πίνακας 3 Δομικά στοιχεία ανιχνευτή

Συντελεστής πληρότητας (FF)	0,89
Πλάτος εικονοστοιχείων (d)	85 (μm)
Απόσταση εικονοστοιχείων (a)	80 (μm)

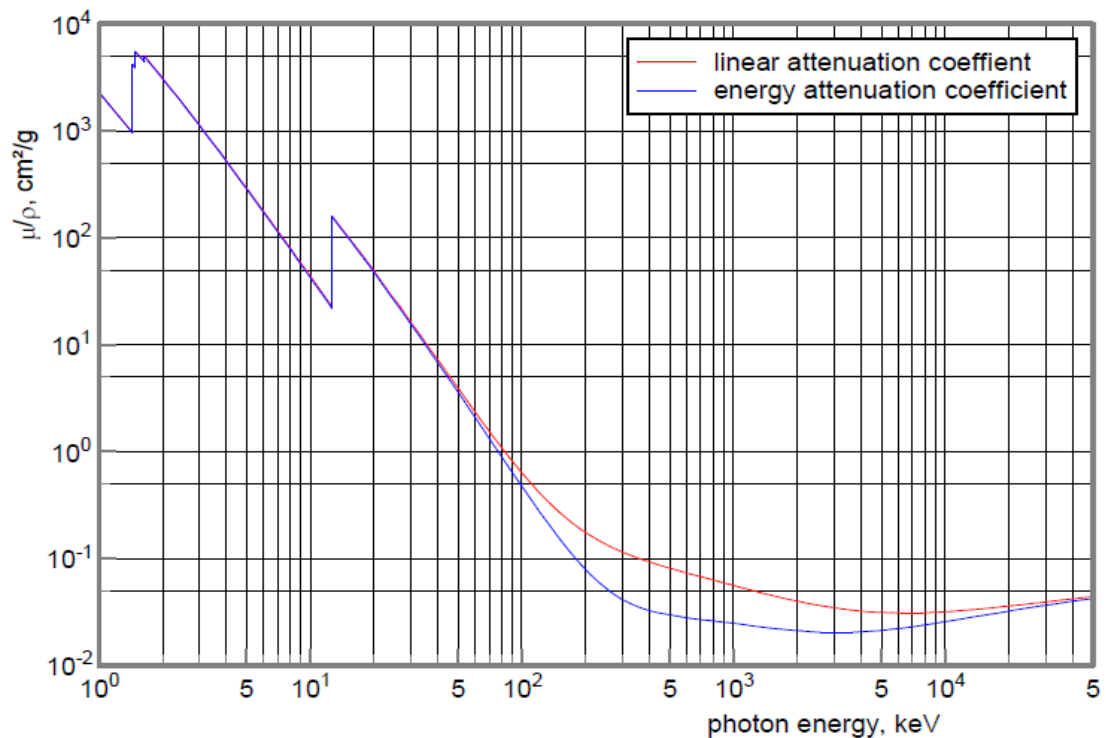
Δεδομένα για το άμορφο Σελήνιο – a-Se:

Τα αριθμητικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση του άμεσου ανιχνευτή ακτίνων Χ με ημιαγωγό το άμορφο σελήνιο είναι τα εξής [6],[15],[16],[18]:

Πίνακας 4 Δεδομένα a-Se

Πυκνότητα	4,5 g/cm^3
Ατομικός αριθμός (Z)	34
Μαζικός αριθμός (A)	78,97
Ενέργεια Κ στοιβάδας	12,66 keV
Ενέργεια παραγωγής ζεύγους οπής-ηλεκτρονίου (E_g)	2,2 eV
Κινητικότητα ηλεκτρονίων (μ_e)	0,003 $cm^2/V \times s$
Κινητικότητα οπών (μ_h)	0,12 $cm^2/V \times s$
Χρόνος ζωής ηλεκτρονίων (T'_e)	100 μs
Χρόνος ζωής οπών (T'_h)	20 μs

Ενώ οι συντελεστές γραμμικής και ενεργειακής εξασθένησης που λήφθηκαν από το λογισμικό XMuDat φαίνονται στο γράφημα που ακολουθεί:



Γράφημα 32 Συντελεστές γραμμικής και ενεργειακής εξασθένησης a-Se (15)

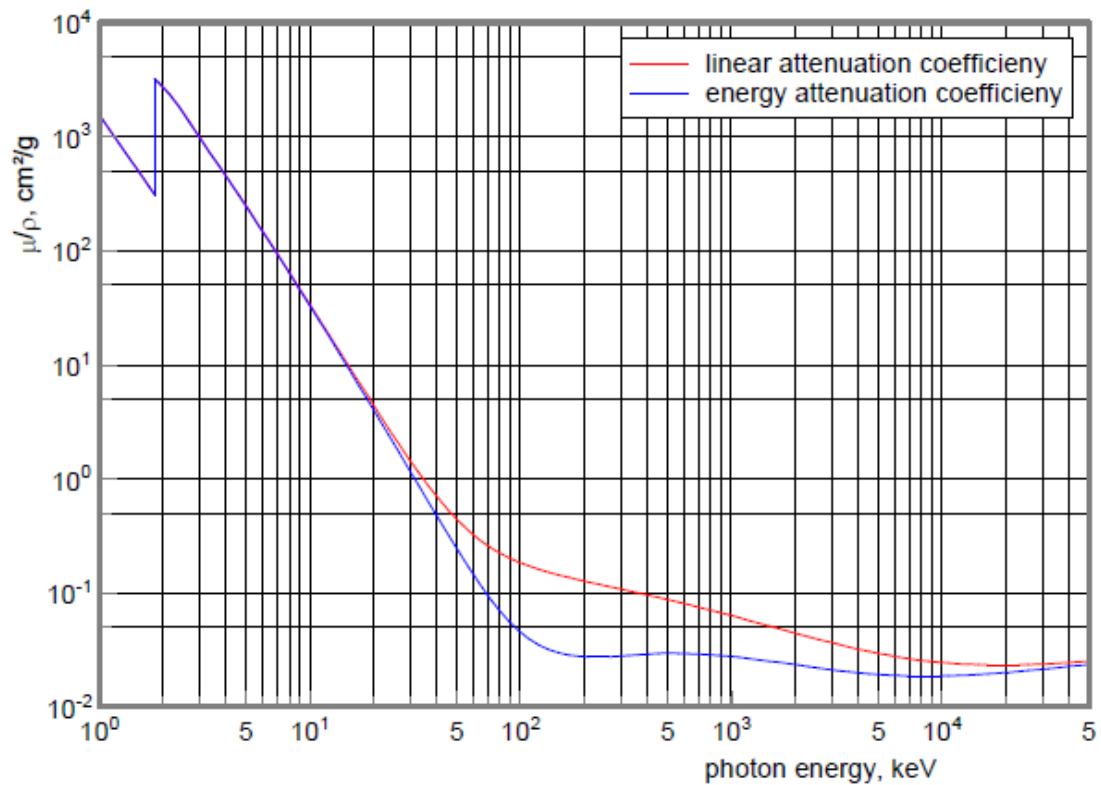
Δεδομένα για το Πυρίτιο – Si:

Τα αριθμητικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση του άμεσου ανιχνευτή ακτίνων Χ με ημιαγωγό το πυρίτιο είναι τα εξής [15],[18]:

Πίνακας 5 Δεδομένα Si

Πυκνότητα	2,33 g/cm ²
Ατομικός αριθμός (Z)	14
Μαζικός αριθμός (A)	28,0855
Ενέργεια Κ στοιβάδας	1,8389 keV
Ενέργεια παραγωγής ζεύγους οπής-ηλεκτρονίου (E_g)	1,12 eV
Κινητικότητα ηλεκτρονίων (μ_e)	1400 cm ² /V × s
Κινητικότητα οπών (μ_h)	450 cm ² /V × s
Χρόνος ζωής ηλεκτρονίων (T'_e)	300 μsec
Χρόνος ζωής οπών (T'_h)	100 μsec

Ενώ οι συντελεστές γραμμικής και ενεργειακής εξασθένησης που λήφθηκαν από το λογισμικό XMuDat φαίνονται στο γράφημα που ακολουθεί [15],[18]:



Γράφημα 33 Συντελεστές γραμμικής και ενεργειακής εξασθένησης Si (15)

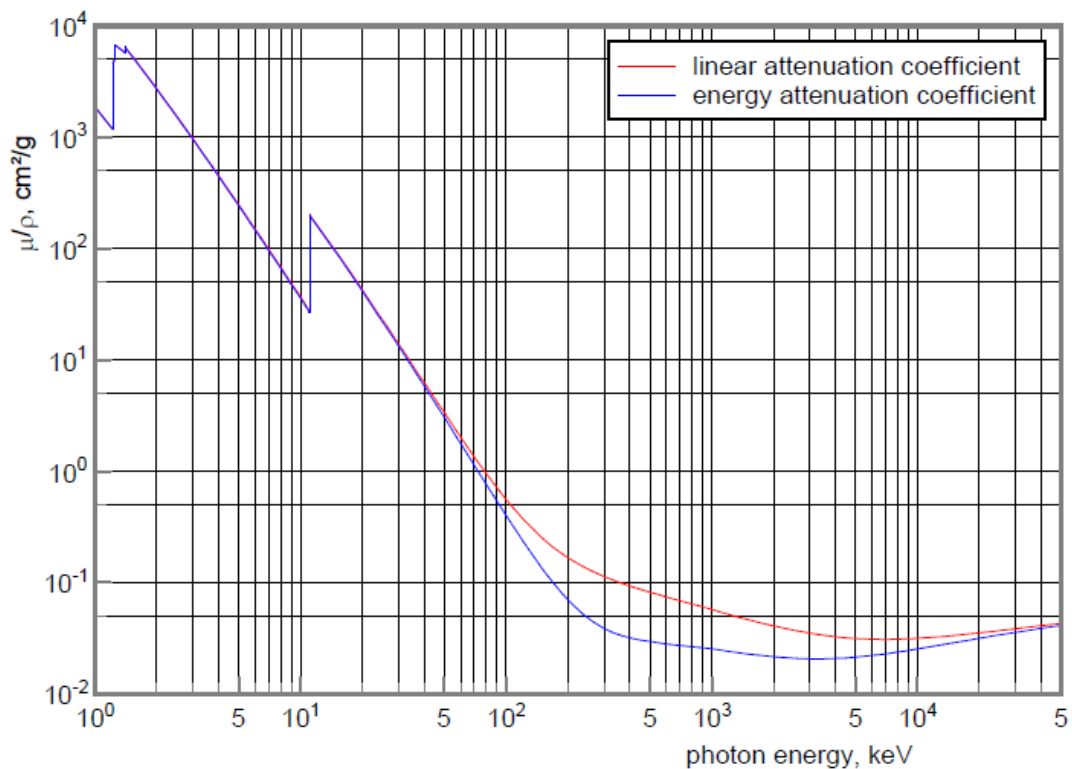
Δεδομένα για το Γερμάνιο – Ge:

Τα αριθμητικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση του άμεσου ανιχνευτή ακτίνων Χ με ημιαγωγό το γερμάνιο είναι τα εξής [15],[18]:

Πίνακας 6 Δεδομένα Ge

Πυκνότητα	5,32 g/cm ²
Ατομικός αριθμός (Z)	32
Μαζικός αριθμός (A)	72,64
Ενέργεια Κ στοιβάδας	11,1031 keV
Ενέργεια παραγωγής ζεύγους οπής-ηλεκτρονίου (E_g)	0,661 eV
Κινητικότητα ηλεκτρονίων (μ_e)	3900 cm ² /V × s
Κινητικότητα οπών (μ_h)	1900 cm ² /V × s
Χρόνος ζωής ηλεκτρονίων (T'_e)	0,001 μsec
Χρόνος ζωής οπών (T'_h)	0,001 μsec

Ενώ οι συντελεστές γραμμικής και ενεργειακής εξασθένησης που λήφθηκαν από το λογισμικό XMuDat φαίνονται στο γράφημα που ακολουθεί:



Γράφημα 34 Συντελεστές γραμμικής και ενεργειακής εξασθένησης Ge (15)

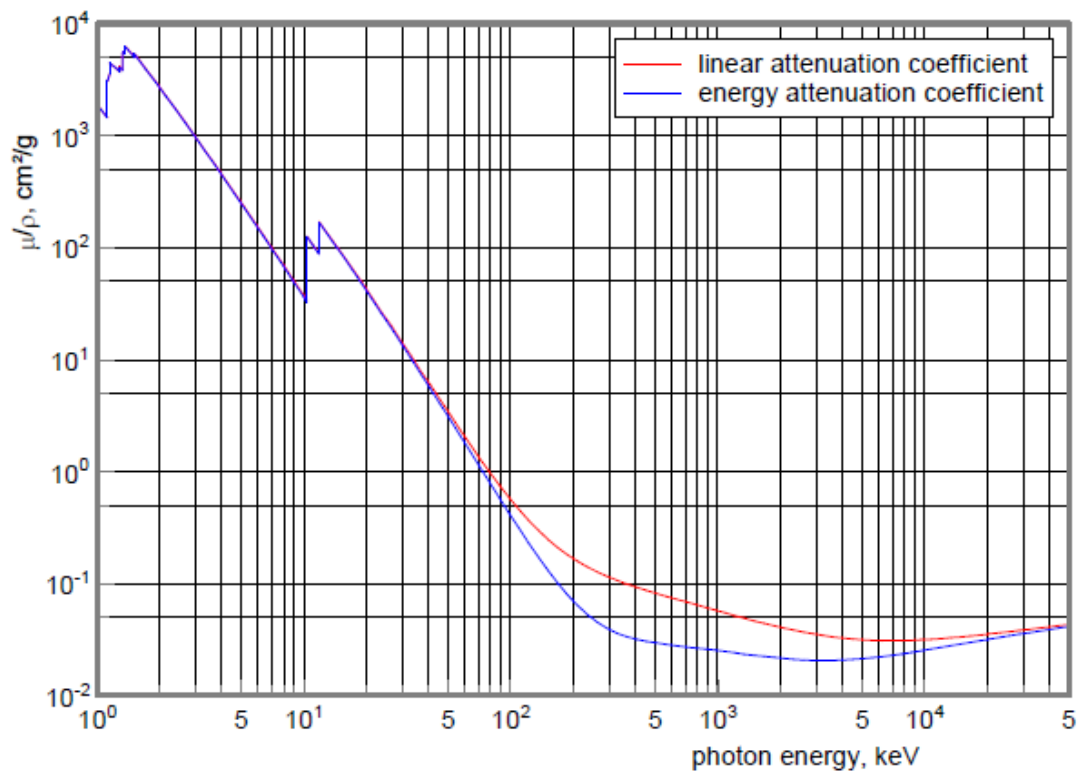
Δεδομένα για το Αρσενικούχο γάλλιο – GaAs:

Τα αριθμητικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση του άμεσου ανιχνευτή ακτίνων Χ με ημιαγωγό το αρσενικούχο γάλλιο είναι τα εξής [15],[18]:

Πίνακας 7 Δεδομένα GaAs

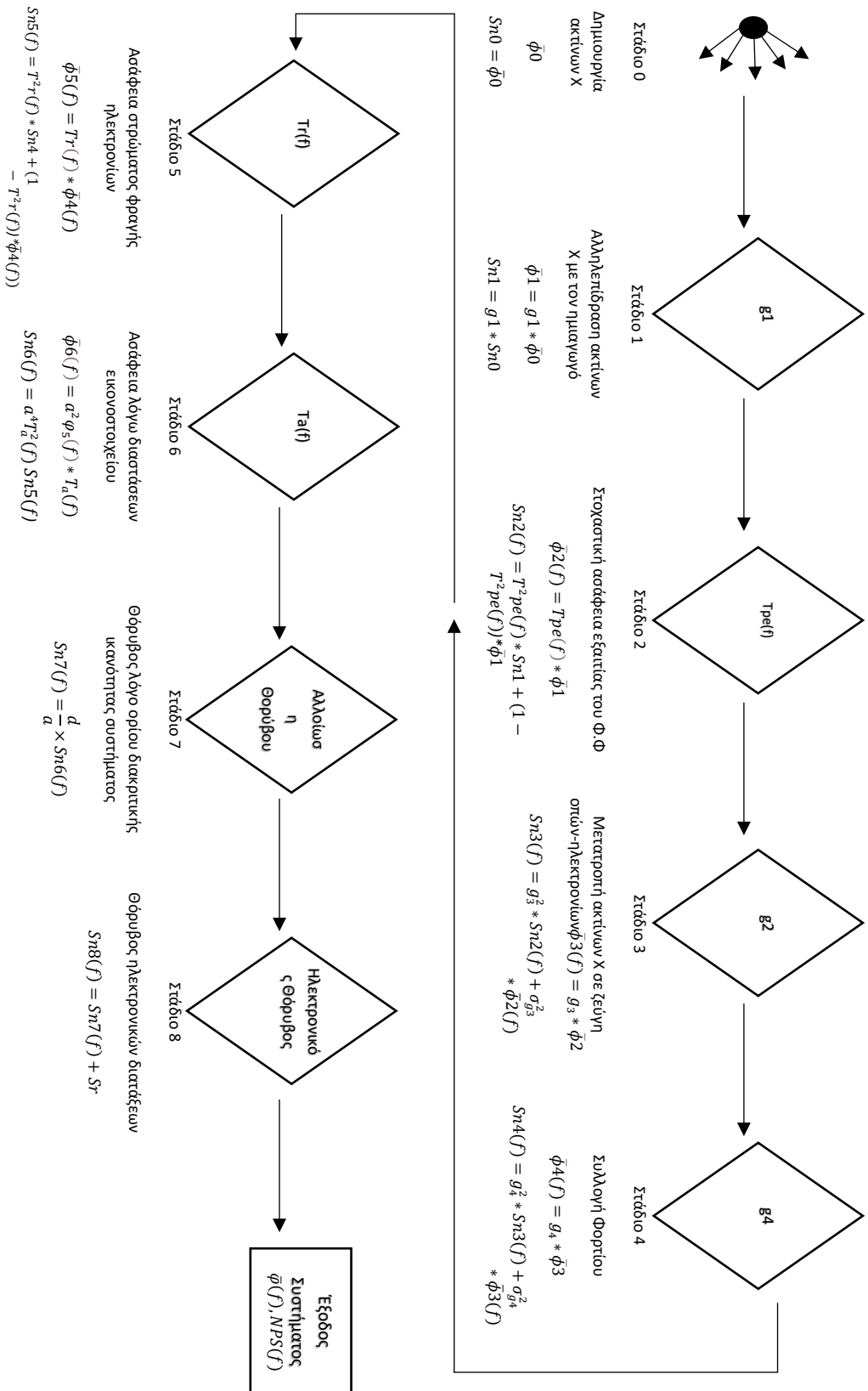
Πυκνότητα	5,31 g/cm ²
Ατομικός αριθμός (Z)	33 (As)
Μαζικός αριθμός (A)	144,65
Ενέργεια Κ στοιβάδας	11,8667 keV
Ενέργεια παραγωγής ζεύγους οπής-ηλεκτρονίου (E_g)	1,424 eV
Κινητικότητα ηλεκτρονίων (μ_e)	8500 cm ² /V × s
Κινητικότητα οπών (μ_h)	400 cm ² /V × s
Χρόνος ζωής ηλεκτρονίων (T'_e)	0,25 μsec
Χρόνος ζωής οπών (T'_h)	3 μsec

Ενώ οι συντελεστές γραμμικής και ενεργειακής εξασθένησης που λήφθηκαν από το λογισμικό XMuDat φαίνονται στο γράφημα που ακολουθεί:



Γράφημα 35 Συντελεστές γραμμικής και ενεργειακής εξασθένησης GaAs (15)

Σχηματικό διάγραμμα γραμμικού συστήματος:



Εικόνα 6 Σχηματικό διάγραμμα γραμμικού συστήματος