



Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Κρήτης

*Ανάπτυξη πειραματικής διάταξης  
μέτρησης έντασης δέσμης RHEED σε  
σύστημα MBE και μελέτη της εκρόφησης  
Γαλλίου από υποστρώματα GaN*

Διπλωματική Εργασία

Παρουσίαση: Χέβας Λουκάς ph3498

Επιβλέπων: επικ. Καθηγητής Ηλιόπουλος Ελευθέριος

Ηράκλειο 2017



## Περίληψη

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι αφ' ενός η μελέτη και κατασκευή μιας πειραματικής διάταξης ικανής να πάρει μετρήσεις φωτεινότητας από τη φθορίζουσα οθόνη συστήματος RHEED και αφ' ετέρου η χρήση της διάταξης αυτής για τη μελέτη του μηχανισμού εκρόφησης (desorption) γαλλίου από υπόστρωμα νιτριδίου του γαλλίου (GaN) υπό διάφορες συνθήκες θερμοκρασίας και εναποτιθέμενης ποσότητας γαλλίου κατά την επιταξιακή ανάπτυξη με τεχνική επιταξίας με μοριακές δέσμες (MBE). Για το σκοπό αυτό, η συσκευή θα πρέπει να αποτελείται από μια βαθμίδα φωτοδιόδου και κατάλληλου ενισχυτή καθώς και μια βαθμίδα βαθυπερατού φίλτρου με σκοπό την αποκοπή ανεπιθύμητου θορύβου στις μετρήσεις.

Αρχικά παρουσιάζονται σε θεωρητικό επίπεδο θέματα που άπτονται της εργασίας αυτής όπως το GaN και η τεχνική MBE και μετά ακολουθεί το κυρίως σώμα της εργασίας σε δύο τμήματα. Στο πρώτο τμήμα αναλύεται κατά μέρη η συσκευή και επεξηγείται η λειτουργία και το σκεπτικό πίσω από τον σχεδιασμό και την κατασκευή της, ενώ στο δεύτερο τμήμα παρουσιάζονται οι μετρήσεις που αποκτήθηκαν με χρήση της. Εν συνεχεία επεξηγείται η ανάλυση των μετρήσεων καθώς και η εξαγωγή πληροφορίας για τις ενέργειες ενεργοποίησης (activation energy) που χαρακτηρίζουν την εκρόφηση γαλλίου από τις διαφορετικές δομές που δημιουργούνται πάνω στο GaN στις συνθήκες που μελετήθηκαν.

# Περιεχόμενα

## Περίληψη

1. Θεωρία
  - 1.1. GaN
  - 1.2. Επιταξιακή ανάπτυξη, MBE, Rheed
  - 1.3. Φωτοдиодοι και ανίχνευση φωτός
  - 1.4. Φίλτρα
2. Μελέτη και υλοποίηση της μετρητικής διάταξης
  - 2.1. Απαιτήσεις και παράμετροι σχεδίασης
  - 2.2. Φωτοдиодος και ενίσχυση
  - 2.3. Βαθυπερατό φίλτρο
  - 2.4. Τροφοδοσία και περίβλημα.
3. Μετρήσεις και Ανάλυση
  - 3.1. Διεξαγωγή μετρήσεων
  - 3.2. Ανάλυση για το bilayer
  - 3.3. Ανάλυση για τα droplets
4. Σχόλια
5. Βιβλιογραφία

## Παράρτημα

# 1. Θεωρία

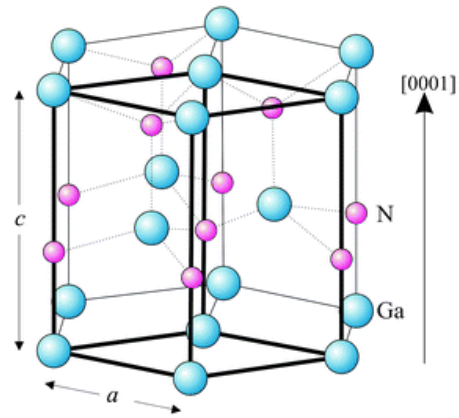
Σε αυτό το μέρος της εργασίας θα παρουσιαστούν σε θεωρητικό επίπεδο έννοιες και φαινόμενα απαραίτητα τόσο στο κομμάτι της πρακτικής υλοποίησης, όσο και της μέτρησης και ανάλυσης των δεδομένων που θα προκύψουν.

Συγκεκριμένα, θα γίνει μια σύντομη παρουσίαση του ημιαγωγού του οποίου κάποιες ιδιότητες μελετώνται σε αυτή την εργασία, το νιτρίδιο του γαλλίου, καθώς και των συνθηκών υπό τις οποίες γίνεται αυτή η μελέτη, δηλαδή την τεχνολογία επιταξίας με μοριακές δέσμες, όπως και του τρόπου απόκτησης πληροφοριών κατά τη διάρκεια της παραπάνω διαδικασίας, του συστήματος RHEED. Καθώς οι πληροφορίες που παίρνουμε από το RHEED είναι υπό τη μορφή φωτός, θα γίνει και παρουσίαση του τρόπου μετατροπής φωτεινών σημάτων σε μετρήσιμες τάσεις, με χρήση κατάλληλου κυκλώματος φωτοδιόδου και απαλλαγή αυτών των μετρήσεων από τυχόν θορύβους με κυκλώματα φίλτρων. Τέλος θα γίνει και μια σύντομη αναφορά σε χρήσιμα εργαλεία λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν.

## 1.1 Νιτρίδιο του Γαλλίου, GaN

Το νιτρίδιο του γαλλίου (από εδώ και πέρα θα αναφέρεται ως GaN χάρην συντομίας) είναι ένας σύνθετος III-V ημιαγωγός που αποτελείται από ίσα μέρη γαλλίου και αζώτου. Κρυσταλλώνεται σε δομή βουρτσίτη (Wurtzite), η οποία είναι εξαγωνικού τύπου όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα. Η μοναδιαία κυψελίδα φαίνεται με εντονότερες γραμμές και οι διαστάσεις της είναι  $a = 3,186\text{\AA}$  και  $c = 5,1885\text{\AA}$ .

Ως ημιαγωγός, έχει άμεσο χάσμα πλάτους  $3,4\text{eV}$ . Τα πλεονεκτήματα που αυτό προσφέρει είναι κατά βάση η καταλληλότητα του για κατασκευή οπτοηλεκτρονικών διατάξεων εκπομπής στο μπλε και υπεριώδες μέρος του φάσματος (όπως LED ή διοδικά laser), συμπληρώνοντας την ήδη υπάρχουσα τεχνολογία (GaAs, GaP) που έδινε πηγές φωτός μέχρι τα πράσινα μήκη κύματος. Επιπλέον μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κατασκευή τρανζίστορ τα οποία χάρη στο μεγάλο ενεργειακό χάσμα και την υψηλή θερμοκρασία τήξης του (μεγαλύτερη των  $2500^\circ\text{C}$ ) είναι ικανά να εργαστούν σε θερμοκρασίες ως και  $400^\circ\text{C}$  (το μεγαλύτερο ενεργειακό χάσμα, σε σχέση με το πυρίτιο, κάνει λιγότερο έντονο το φαινόμενο της θερμικής διέγερσης φορέων μέχρι μεγαλύτερο όριο θερμοκρασίας).



Πηγή: Tongtong Zhu, R. A. Oliver, "Unintentional doping in GaN", Physical Chemistry Chemical Physics, 2012.14. 9558-9573

Η κατασκευή μεγάλων μονοκρυστάλλων GaN με τη μέθοδο Czochralski δεν είναι επί του παρόντος εφικτή όπως για τους άλλους κοινά χρησιμοποιούμενους ημιαγωγούς και γι' αυτό χρησιμοποιούνται υποστρώματα (wafers) άλλων υλικών με κοντινές πλεγματικές σταθερές, όπως το ζαφείρι ή το καρβίδιο του πυριτίου (SiC) πάνω στα οποία αναπτύσσονται επιταξιακά στρώματα GaN. Κύρια μέθοδος για τη βιομηχανική παραγωγή συσκευών GaN είναι η MOVPE, ενώ για ερευνητικούς σκοπούς λόγω της χαμηλής ταχύτητας αλλά και του πολύ καλού ελέγχου της ανάπτυξης, προτιμάται η τεχνική MBE (αναλυτικότερα παρουσιάζονται παρακάτω).

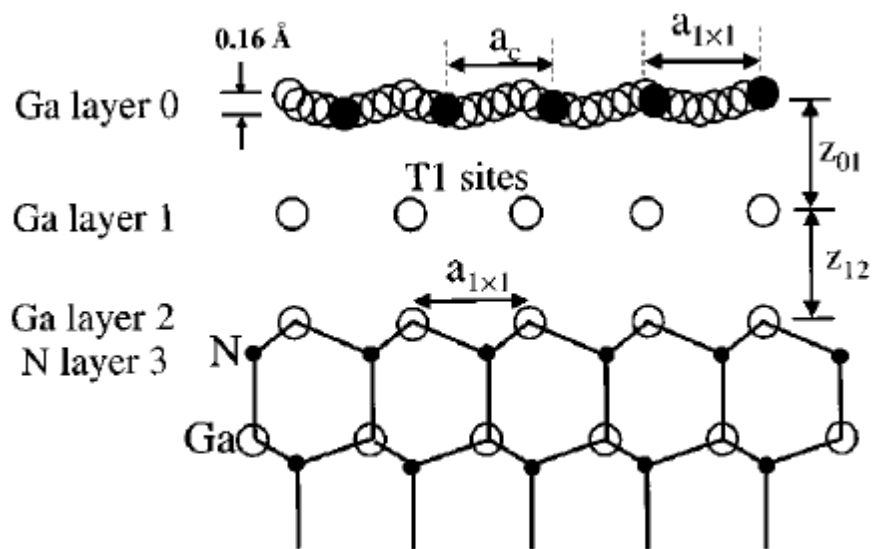
### Ga on GaN growth

Ο κύριος όγκος των πειραματικών μετρήσεων αυτής της εργασίας πάρθηκαν κατά την επιταξία γαλλίου πάνω σε GaN με μέθοδο MBE. Είναι χρήσιμο λοιπόν να γίνει μια βασική περιγραφή της διαδικασίας.

Κατά την εναπόθεση Ga πάνω σε υπόστρωμα GaN στο επίπεδο (0001), απουσία αζώτου και παρουσία περίσσειας Ga σε κατάλληλες θερμοκρασίες έχει προβλεφθεί θεωρητικά η δημιουργία ενός διπλού μονοατομικού στρώματος (bilayer) Ga ως η ενεργειακά πιο συμφέρουσα αναδιάταξη της επιφάνειας. Συγκεκριμένα προβλέπεται το πρώτο μονοατομικό στρώμα (monolayer ή σύντομα ML) Ga να

ακολουθεί την δομή του υποκείμενου GaN σε μέσο ύψος τα  $z_{12} = 2,54\text{\AA}$  από αυτό. Το δεύτερο ML δημιουργείται σε μέσο ύψος  $z_{01} = 2,37\text{\AA}$ , είναι δυσανάλογο προς το πρώτο ML και πλευρικά συμπιεσμένο, με τις αποστάσεις μεταξύ των ατόμων να πλησιάζουν τις αποστάσεις στο καθαρό γάλλιο ( $2,7\text{\AA}$ ). Η όλη δομή αυτού του bilayer αναμένεται να περιέχει ποσότητα Ga ίση με 2,33ML.

Τα παραπάνω αναπαρίστανται στο παρακάτω σχήμα.



Πηγή: J. E. Northrup, J. Neugebauer, R. M. Feenstra, A. R. Smith, "Structure of GaN(0001): The laterally contracted Ga bilayer model", Physical Review B Vol. 61, Iss. 15 — 15 April 2000

Για συνεχιζόμενη ροή Ga αναμένεται να δημιουργηθούν στην επιφάνεια του bilayer διδιάστατες νησίδες, οι οποίες μεγαλώνοντας με την ενσωμάτωση Ga αποκτούν τριδιάστατη δομή σταγονιδίων (droplets). Εάν η προσθήκη Ga συνεχιστεί, δεν αναμένεται να δημιουργηθούν περαιτέρω κρυσταλλικές δομές, με την επιφάνεια να καλύπτεται εντέλει από στρώμα υγρού Ga.

Η παραπάνω ανάλυση βασίζεται στην ανάλυση των J. E. Northrup et al. [1] οι οποίοι πρώτοι πρότειναν και μελέτησαν το μοντέλο του πλευρικά συμπιεσμένου διπλού μονοατομικού στρώματος (laterally contracted bilayer) κατά την επιταξία Ga on Ga.

## **1.2 Επιταξιακή ανάπτυξη, MBE, Rheed**

Ο όρος «επιταξία» αναφέρεται στην εναπόθεση κρυσταλλικής δομής πάνω σε επίσης κρυσταλλικό υπόστρωμα. Στην περίπτωση που η υπερκείμενη δομή και το υπόστρωμα αποτελούνται από το ίδιο υλικό γίνεται λόγος για «ομοεπιταξία» ενώ σε περίπτωση διαφορετικών υλικών για «ετεροεπιταξία». Χαρακτηριστικό των μεθόδων επιταξιακής ανάπτυξης (και απαραίτητο στοιχείο για την ανάπτυξη ημιαγωγικών διατάξεων) είναι ότι η δομή που κατασκευάζεται ακολουθεί την κρυσταλλική δομή του υποστρώματος, παρόλο που φυσικά υπάρχουν περιορισμοί λόγω διαφορών στην κρυσταλλική δομή των δύο υλικών ή στην πλεγματική σταθερά τους. Τέτοιες διαφορές παράγουν εσωτερικές τάσεις και συχνά έχουν ως αποτέλεσμα ατέλειες διαφόρων τύπων. Σημαντικό τμήμα της εξέλιξης των τεχνικών επιταξίας είναι η εύρεση των συνθηκών που θα ελαχιστοποιούν τέτοια προβλήματα και θα παράγουν κρυσταλλικές δομές υψηλής καθαρότητας και, όσο το δυνατόν, ελεύθερες ατελειών. Οι πιο κοινοί τρόποι επιταξίας σήμερα είναι η επιταξία υγρής φάσης, αέριας φάσης και η επιταξία με μοριακές δέσμες. Στις πρώτες δύο θα γίνει σύντομη μόνο αναφορά.

### **Επιταξία υγρής φάσης**

Το υπόστρωμα, μέσω κατάλληλης μηχανικής διάταξης, έρχεται σε επαφή με τήγμα ή διάλυμα που περιέχει τα επιθυμητά στοιχεία, το οποίο στερεοποιείται στην επιφάνεια του υποστρώματος δημιουργώντας (σχετικά) παχύτερα στρώματα. Είναι γρήγορη μέθοδος αλλά όχι τόσο ακριβής.

### **Επιταξία αέριας φάσης**

Το υπόστρωμα κρατιέται εν κενώ σε σταθερή θερμοκρασία και οδηγούνται πάνω στην επιφάνειά του ροές αερίων που περιέχουν τα ζητούμενα στοιχεία. Τα αέρια υφίστανται πυρόλυση κατά τη διαδρομή τους μέχρι το υπόστρωμα, με αποτέλεσμα κατά την επαφή τους με αυτό να μπορούν να αφήσουν μόνο τα χρήσιμα στοιχεία τα οποία ενσωματώνονται στον αναπτυσσόμενο κρύσταλλο. Αέρια που χρησιμοποιούνται συχνά είναι το σιλάνιο ( $\text{SiH}_4$ ) ή το τετραχλωρίδιο του πυριτίου ( $\text{SiCl}_4$ ) για την ανάπτυξη ημιαγωγών πυριτίου, ενώ για σύνθετους III-V ημιαγωγούς χρησιμοποιούνται αέρια όπως η αρσίνη ( $\text{AsH}_3$ ), φωσφίνη ( $\text{PH}_3$ ), αμμωνία ( $\text{NH}_3$ ), τριμεθυλογάλλιο ( $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$ ), τριμεθυλοϊνδίο ( $\text{In}(\text{CH}_3)_3$ ) και άλλα. Είναι ο κύριος τρόπος βιομηχανικής παραγωγής σύνθετων III-V ημιαγωγών καθώς με μακροχρόνια έρευνα έχουν μελετηθεί οι μηχανισμοί και οι συνθήκες για την γρήγορη και μαζική παραγωγή ηλεκτρονικών και οπτοηλεκτρονικών διατάξεων. Όταν χρησιμοποιούνται ενώσεις του παραπάνω τύπου με οργανικά τμήματα ονομάζεται και *MOVPE* (metal-organic vapor phase epitaxy).

### **Επιταξία με Μοριακές Δέσμες, Molecular Beam Epitaxy (MBE):**

Αυτή η τεχνική επιταξίας λαμβάνει χώρα σε θάλαμο υπέρ-υψηλού κενού (UHV), της τάξεως των  $10^{-10}$  Torr. Το υπόστρωμα αφότου καθαριστεί χημικά και θερμικά, εισάγεται στο θάλαμο κενού και σταθεροποιείται σε κατάλληλο στήριγμα το οποίο διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία της τάξεως των μερικών εκατοντάδων βαθμών κελσίου και έχει τη δυνατότητα να περιστρέφεται. Ως πηγές στοιχείων εδώ χρησιμοποιούνται ειδικές διατάξεις ονομαζόμενες *effusion cells* ή "Knudsen cells" (ή

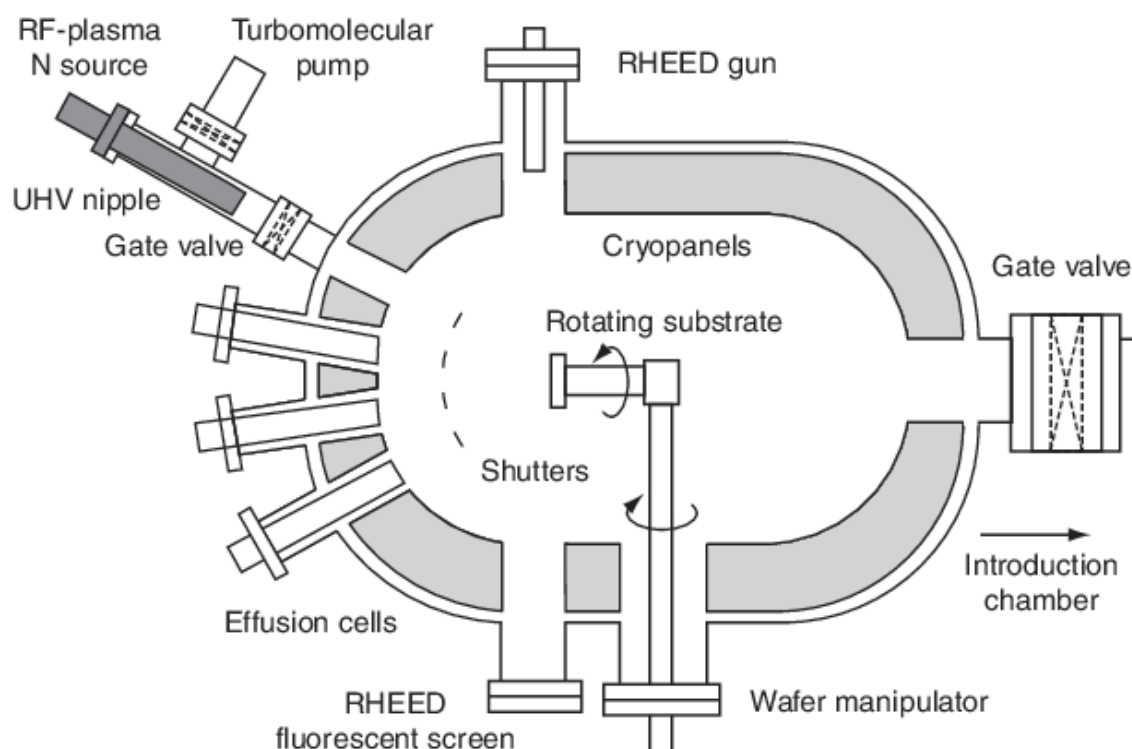


σύντομα K-cells) προς τιμήν του επιστήμονα που τις εφεύρε και τις μελέτησε. Η λέξη *effusion* δεν έχει ακριβή μετάφραση, αλλά περιφραστικά αποδίδεται ως η κίνηση μορίων αερίου διαμέσου οπής με διάμετρο μικρότερη από το μήκος ελεύθερης διαδρομής τους. Οι διατάξεις αυτές αποτελούνται από ένα πυράντοχο δοχείο τήξης (χωνευτήριο) και αντιστάσεις θέρμανσης. Μέσα στο δοχείο περιέχονται στοιχεία υψηλής καθαρότητας τα οποία θερμαίνονται και εξαχνώνονται. Τα μόρια που εξαχνώνονται περνούν από μικρή σχετικά οπή (εξ ου και το όνομα *effusion*) και λόγω του προσανατολισμού της διάταξης κατευθύνονται προς το υπόστρωμα. Συνήθως υπάρχει μπροστά από την οπή ελεγχόμενο πέτασμα (*shutter*) για αποκοπή της ροής. Σε τέτοιες συνθήκες κενού η μέση ελεύθερη διαδρομή ενός μορίου είναι αρκετά μεγάλη με αποτέλεσμα τα μόρια να ταξιδεύουν μέσα στον θάλαμο κενού χωρίς να συγκρούονται και να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Η τυπική απόσταση από τα K-cells μέχρι το υπόστρωμα είναι της τάξεως των 20cm. Σχηματίζονται έτσι δέσμες μορίων, απ' όπου παίρνει και το όνομά της αυτή η τεχνική. Τα μόρια αυτά συναντώντας το υπόστρωμα προσροφώνται (*adsorption*) στην επιφάνειά του και είτε ενσωματώνονται στην δημιουργούμενη κρυσταλλική δομή, είτε εκροφώνται (*desorption*) στον θάλαμο κενού. Η ταχύτητα της επιταξίας είναι αρκετά μικρή, συχνά της τάξης των μερικών μm την ώρα, κάτι που κάνει την τεχνική MBE πολύ κατάλληλη για δημιουργία λεπτών ημιαγωγικών υμενίων, με καλό έλεγχο της ανάπτυξης και ακρίβεια μονοατομικών στρωμάτων (*monolayers*), αν και σχετικά αργή για τη μαζική παραγωγή ημιαγωγών σε βιομηχανικό επίπεδο. Κύριος τομέας εφαρμογής είναι η έρευνα πάνω σε σύνθετους ημιαγωγούς όπως το GaAs ή το GaN και διαφόρων κραμάτων τους, καθώς είναι δυνατή η χρήση στερεών πηγών σε αντίθεση με την επιταξία αέριας φάσης που απαιτεί συχνά επικίνδυνα αέρια ( $\text{SiH}_4$ ,  $\text{AsH}_3$ ). Στην περίπτωση των III-N ημιαγωγών (δηλαδή στη γενική κατηγορία των νιτρίδιων) απαιτείται και πηγή αζώτου. Καθώς το μοριακό  $\text{N}_2$  είναι αρκετά αδρανές, υπάρχουν μερικοί τρόποι παραγωγής ατόμων N, ικανών να ενσωματωθούν στον αναπτυσσόμενο κρύσταλλο. Ένας τρόπος είναι η διέγερση μορίων  $\text{N}_2$  με χρήση υψηλών συχνοτήτων είτε στην περιοχή των ραδιοκυμάτων είτε των μικροκυμάτων και παραγωγή πλάσματος που αποτελείται από διάφορες ιονισμένες καταστάσεις ατομικού αζώτου. Σε αυτή την περίπτωση γίνεται λόγος για MBE υποβοηθούμενο από πλάσμα (PAMBE, *plasma assisted MBE*).

Ο κυρίως θάλαμος της συσκευής (*growth chamber*) συνδέεται με δευτερεύοντες θαλάμους οι οποίοι διατηρούνται επίσης σε συνθήκες κενού και χρησιμοποιούνται για τη φόρτωση, μεταφορά και θερμική επεξεργασία των υποστρωμάτων πριν και μετά την εναπόθεση. Μεταξύ τους υπάρχουν βαλβίδες για την απομόνωση της μιας βαθμίδας από την επόμενη. Εντός του κυρίως θαλάμου της συσκευής, πέραν των K-cells και του υποστηρίγματος για το υπόστρωμα (*substrate holder*), υπάρχουν και άλλες διατάξεις για τον έλεγχο της διαδικασίας και την διατήρηση των συνθηκών κενού. Τον μεγαλύτερο ρόλο στην άντληση παίζουν συνήθως *turbo-μοριακές* αντλίες αλλά για τη συντήρηση του κενού συχνά χρησιμοποιούνται αντλίες εξάχνωσης τιτανίου και ψυχόμενα τοιχεία (*cryopanels*) που τοποθετούνται γύρω από το υπόστρωμα. Τα τελευταία ψύχονται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα όταν άτομα ή μόρια που βρίσκονται στο χώρο

προσκρούσουν πάνω τους, να χάνουν την κινητική τους ενέργεια και να προσροφώνται στην επιφάνειά τους. Για τον έλεγχο της επιφάνειας του κρυστάλλου κατά την εναπόθεση χρησιμοποιείται συχνά σύστημα RHEED, που αποτελείται από ένα κανόνι ηλεκτρονίων (τυπικής ενέργειας μερικών δεκάδων keV) και μια φθορίζουσα οθόνη για την παρακολούθηση. (αναλυτικότερη περιγραφή γίνεται πιο κάτω)

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται χοντρικά η διάταξη ενός PAMBE. Φαίνεται ο θάλαμος εναπόθεσης, χωρίς τους βοηθητικούς θαλάμους, οι οποίοι θα βρισκόντουσαν στα δεξιά.



Πηγή: P. Frigeri, L. Seravalli, G. Trevisi, S. Franchi, "Molecular Beam Epitaxy: An Overview" excerpted from "Comprehensive Semiconductor Science and Technology", Elsevier, Amsterdam, volume 3, 480 (2011) pp.484

### **RHEED, Reflection High-Energy Electron Diffraction**

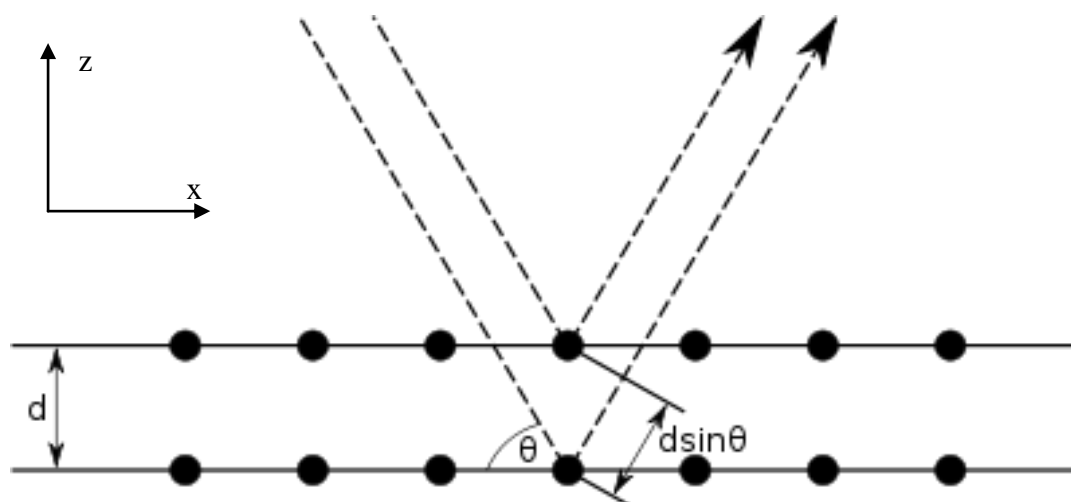
Καθώς στόχος αυτής της εργασίας είναι οι φωτομετρικές παρατηρήσεις στην οθόνη του RHEED, κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια αναλυτικότερη παρουσίαση του συστήματος εδώ.

Το σύστημα RHEED όπως αναφέρεται και παραπάνω, αποτελείται από μια πηγή ηλεκτρονίων, τυπικών ενεργειών μεταξύ 10keV και 30keV, τα οποία προσπίπτουν υπό πολύ μικρές γωνίες (1-3 μοίρες) στην επιφάνεια του κρυστάλλου, περιθλώνται από τα επιφανειακά στρώματά του και χτυπώντας τη φθορίζουσα οθόνη παράγουν συνδυασμούς κηλίδων ή γραμμών, από τις οποίες μπορεί να εξαχθεί πληροφορία για τη δομή της κρυσταλλικής επιφάνειας. Σε αντίθεση με μια παρόμοια μέθοδο ανάλυσης επιφανειών, LEED (low energy electron diffraction) όπου η

ανίχνευση των ηλεκτρονίων γίνεται ακριβώς κάθετα πάνω από την επιφάνεια, η παραγωγή και η ανίχνευση των ηλεκτρονίων γίνεται μακριά από την κρυσταλλική ανάπτυξη και άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά της διάρκειας της εναπόθεσης για ανάλυση της επιφάνειας σε πραγματικό χρόνο, χωρίς να εμποδίζει τις εισερχόμενες μοριακές ροές. Οι πληροφορίες που μπορούμε να πάρουμε αφορούν την περιοδικότητα των μορίων της επιφάνειας, τη σύστασή της (αφορά σύνθετους ημιαγωγούς κατά βάση) αλλά και τον τρόπο που γίνεται η επιταξιακή ανάπτυξη (στρωματικά ή τριδιάστατα).

Στην οθόνη παρατηρούμε γραμμές όπου οι ανακλώμενες δέσμες ηλεκτρονίων συμβάλλουν ενισχυτικά, όπως προβλέπει και ο νόμος του Bragg. Αν θεωρήσουμε ότι το παρακάτω σχήμα (η γωνία  $\theta$  είναι κατά πολύ μεγαλύτερη αυτών που χρησιμοποιούνται σε συστήματα RHEED) απεικονίζει άτομα διατεταγμένα στο επίπεδο x-y, το επίπεδο στο οποίο βρίσκεται η επιφάνεια του αναπτυσσόμενου κρυστάλλου, ο νόμος του Bragg δίνει για ενισχυτική συμβολή:

$$2d\sin\theta = n\lambda = 2L$$



Πηγή: Furiouslettuce - Own work by uploader - SVG version of file at <http://en.wikipedia.org/wiki/File:DiffractionPlanes.png>, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6487785>

Η κάτω δέσμη διανύει  $2d\sin\theta=2L$  μεγαλύτερη απόσταση.  $d$  είναι η πλεγματική σταθερά του κρυστάλλου. Έτσι παίρνουμε πληροφορίες για την περιοδικότητα κατά τον x άξονα. Περιστρέφοντας το δείγμα κατά 90 μοίρες μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες και για τον y άξονα. (σε εξαγωνικές δομές παίρνουμε διαφορετική πληροφορία για κάθε περιστροφή 60 μοιρών).

Κατά τρόπο ανάλογο με τον παραπάνω, λείες επιφάνειες παράγουν έντονες γραμμές στην οθόνη, ενώ τραχιές επιφάνειες παράγουν διάστικτες γραμμές χαμηλότερης φωτεινότητας. Η φωτεινότητα μειώνεται και λόγω της οπισθοσκέδασης των ηλεκτρονίων σε τυχαίες γωνίες από τριδιάσταστες δομές. Αυτό μας επιτρέπει να «βλέπουμε» τη συμπλήρωση κάθε ML (όταν η επιταξία γίνεται στρωματικά ή “layer by layer”), καθώς η φωτεινότητα θα πάρει μια μέγιστη τιμή για κάθε συμπληρωμένο στρώμα ή να παρατηρούμε την τράχυνση της επιφάνειας, λόγω π.χ. δημιουργίας νησίδων.

## **1.3 Φωτοδιόδοι και ανίχνευση φωτός**

### **Φωτοδιόδοι**

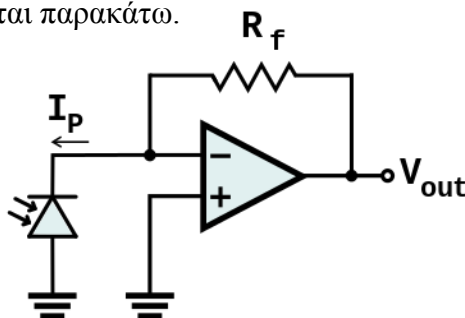
Κάθε ημιαγωγική επαφή pn εάν φωτιστεί με κατάλληλου μήκους φως θα αναπτύξει μια τάση στα άκρα της ή θα άγει κάποιο ρεύμα. Η φυσική εξήγηση είναι ότι φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα ενός ημιαγωγού είναι ικανά να διεγείρουν ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους, τα οποία περνάνε στη ζώνη αγωγιμότητας αφήνοντας πίσω τους οπές. Οι φορείς αυτοί έχουν τη δυνατότητα κίνησης πάνω στο κρυσταλλικό πλέγμα του ημιαγωγού. Σε μια επαφή pn οι φορείς που παράγονται επιταχύνονται από το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο της περιοχής απογύμνωσης και επιταχύνονται, προς την n περιοχή (κάθοδος) τα ηλεκτρόνια και προς τη p περιοχή οι οπές. Αν η διάταξη είναι ασύνδετη, δημιουργείται τάση στα άκρα της, ενώ αν είναι τμήμα ενός κυκλώματος μπορεί να περάσει κάποιο ρεύμα. Συνήθως αυτό είναι ανεπιθύμητο φαινόμενο και γι' αυτόν το λόγο τα περισσότερα ημιαγωγικά εξαρτήματα κατασκευάζονται με αδιαφανές περίβλημα. Οι φωτοδιόδοι είναι, όπως δηλώνει και το όνομά τους, ημιαγωγικές επαφές pn οι οποίες έχουν σαν κύριο σκοπό την ανίχνευση φωτός και άρα έχουν κατασκευή βελτιστοποιημένη γι' αυτό το σκοπό. Έχουν πάντα διαφανές περίβλημα (τουλάχιστον στα μήκη κύματος για τα οποία είναι σχεδιασμένη η εκάστοτε φωτοδιόδος) και η επαφή έχει μεγάλο εμβαδό (σε σχέση με τις κοινές διόδους) που της δίνει μεγαλύτερη περιοχή ευαίσθητη σε εισερχόμενα φωτόνια (χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι τα φωτοβολταϊκά κελιά που χρησιμοποιούνται για παραγωγή ενέργειας). Η ταχύτητα απόκρισης όμως μειώνεται καθώς η ενεργός περιοχή μεγαλώνει, λόγω της αύξησης της χωρητικότητας της επαφής. Ανάλογα με το εύρος μηκών κύματος που πρέπει να ανιχνεύσουν, χρησιμοποιούνται διαφορετικοί ημιαγωγοί για την κατασκευή τους, με το πυρίτιο να είναι μια συχνή επιλογή με εύρος απόκρισης από τα 1900 έως τα 11000 Angstrom περίπου. Σε αντίθεση με τις κοινές διόδους είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν υπό καθεστώς ανάστροφης πόλωσης με μικρή αντοχή σε ρεύμα ορθής λειτουργίας (σε σύγκριση πάντα με τις κοινές διόδους ανόρθωσης αντίστοιχου μεγέθους). Επιθυμητά χαρακτηριστικά τους είναι ο όσο το δυνατό μεγαλύτερος συντελεστής κβαντικής απόδοσης (ο λόγος των παραγόμενων φωτοηλεκτρονίων ως προς τα εισερχόμενα φωτόνια) που κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 0,6 και 0,8 περίπου και το χαμηλό ρεύμα σκοταδιού, το ρεύμα βραχυκύκλωσης που παράγει η φωτοδιόδος όταν δεν φωτίζεται.

Οι τρόποι χρήσης τους για ανίχνευση φωτός είναι βασικά δύο, η φωτοαγωγιμική και η φωτοβολταϊκή λειτουργία. Στην πρώτη περίπτωση εφαρμόζεται ανάστροφη πόλωση στην επαφή με αποτέλεσμα η περιοχή απογύμνωσης να μεγαλώνει. Αφενός μειώνεται η χωρητικότητα της επαφής και δίνεται περισσότερη ενέργεια στους φορείς που διεγείρονται από εισερχόμενα φωτόνια, χαρακτηριστικά που ευνοούν λειτουργία σε υψηλές συχνότητες, αφετέρου όμως αυξάνονται τα ρεύματα σκοταδιού (οι θερμικά διεγερμένοι φορείς επιταχύνονται επίσης) και αυξάνεται ο θόρυβος με αποτέλεσμα να μην είναι κατάλληλος τρόπος λειτουργίας για ανίχνευση πολύ ασθενών φωτεινών πηγών. Κατά τη φωτοβολταϊκή λειτουργία η διόδος δεν πολώνεται εξωτερικά και η

ανίχνευση φωτός μετράται είτε ως παραγόμενη τάση, είτε ως παραγόμενο ρεύμα. Συνήθως προτιμάται η μέτρηση του ρεύματος λόγω της γραμμικής του σχέσης με την εισερχόμενη ροή φωτονίων (η αντίστοιχη σχέση για την παραγόμενη τάση είναι συνήθως λογαριθμικού τύπου). Αυτός ο τρόπος λειτουργίας εμφανίζει σημαντικά χαμηλότερο θόρυβο και ρεύματα σκοταδιού και είναι ο ενδεδειγμένος για ανίχνευση φωτεινών πηγών χαμηλής έντασης. Πρόσθετη δυσκολία αυτού του τρόπου λειτουργίας είναι ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης μιας φωτοδιόδου είναι της τάξης των pA έως nA. Απαιτείται λοιπόν κατάλληλη διάταξη και σχεδιασμός, ώστε να ενισχυθούν τέτοιας κλίμακας ρεύματα και να γίνει δυνατή η μέτρησή τους με πιο κοινά όργανα.

### Ενίσχυση φωτοδιόδων σε φωτοβολταϊκή λειτουργία

Για τους παραπάνω λόγους η βέλτιστη και γραμμικότερη μέτρηση μιας ασθενούς φωτεινής πηγής απαιτεί την ενίσχυση πολύ μικρών ρευμάτων. Η κατάλληλη διάταξη για αυτόν το σκοπό ονομάζεται ενισχυτής διεμπέδησης (transimpedance amplifier), παίρνει δηλαδή μια είσοδο υπό μορφή ρεύματος και έχει έξοδο σε μορφή τάσης, παρέχοντας την απαιτούμενη ενίσχυση. Το απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα φαίνεται παρακάτω.



Πηγή: By Zen-in - Inkscape edit of Op-Amp\_Inverting\_Amp.svg on Wikipedia, CC BY-SA 3.0, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?curid=41096484>

Αν δεν υπήρχε ο τελεστικός ενισχυτής, η κάθοδος της φωτοδιόδου θα εμφάνιζε αρνητικό δυναμικό σε σχέση με την άνοδο. Σε αυτή τη σχεδίαση, βάσει της λειτουργίας των τελεστικών ενισχυτών, η κάθοδος έρχεται στο ίδιο δυναμικό με την άνοδο (η φωτοδιόδος είναι βραχυκυκλωμένη) και το κύκλωμα μετρά το ρεύμα βραχυκύκλωσης της φωτοδιόδου με τη φορά που φαίνεται στο σχήμα. Στον κόμβο της αναστρέφουσας εισόδου και με την παραδοχή ότι δεν εισέρχεται ρεύμα στον ενισχυτή, ο νόμος ρευμάτων του Kirchhoff απαιτεί το ρεύμα  $I_p$  της φωτοδιόδου να ισούται με το ρεύμα που θα περάσει μέσα από την αντίσταση ανατροφοδότησης  $R_f$  (feedback resistor) και θα έχει προέλθει από την τάση εξόδου  $V_{out}$  του ενισχυτή. Δηλαδή:

$$-I_p = I_{R_f} = \frac{V_{out}}{R_f}$$

Προκύπτει έτσι πολύ εύκολα η τάση εξόδου και ο λόγος ενίσχυσης:

$$V_{out} = -I_p * R_f$$

## **Πρακτικοί περιορισμοί στην υλοποίηση**

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα ρεύματα που πρέπει να ανιχνευθούν είναι εξαιρετικά μικρά, άρα ο τελεστικός ενισχυτής που θα επιλεγεί πρέπει να έχει πολύ μεγάλη αντίσταση εισόδου, ώστε να ισχύει η παραδοχή ότι δεν εισέρχεται ρεύμα στις εισόδους του και πολύ μεγάλη ευαισθησία. Συνήθως οι ενισχυτές που προορίζονται για τέτοια χρήση έχουν ευαισθησία εισόδου της τάξεως των  $fA$  ή το πολύ μερικών  $nA$ . Τέτοια ευαισθησία εισόδου, σε συνδυασμό με την απαιτούμενη ενίσχυση (πολύ συχνά της τάξεως  $10^7$ - $10^9$ ) μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικά σφάλματα ενισχύοντας παρασιτικά ρεύματα που ρέουν στην επιφάνεια του τυπωμένου κυκλώματος (πλακέτα, pcb) ή ακόμα και κατά μήκος των περιβλημάτων των εξαρτημάτων. Απαιτείται λοιπόν αυστηρός καθαρισμός της πλακέτας και σφράγιση της με κατάλληλο βερνίκι. Επίσης συχνά κρίνεται σκόπιμη η θωράκιση των εισόδων του τελεστικού ενισχυτή από οποιαδήποτε ρεύματα διαρροής με χρήση προστατευτικού δακτυλίου (guard ring), ενός διαδρόμου πάνω στην πλακέτα που δεν καλύπτεται από βερνίκι, περικυκλώνει τις εισόδους και κρατιέται στο ίδιο δυναμικό με αυτές (αν βρίσκονται στο ίδιο δυναμικό δεν θα περάσει ρεύμα μεταξύ τους), με σκοπό την παροχέτευση των παρασιτικών ρευμάτων. Κατά κανόνα επίσης τοποθετείται μια μικρή χωρητικότητα παράλληλα με την αντίσταση ανατροφοδότησης για περιορισμό του άνω ορίου του εύρους συχνοτήτων οι οποίες ενισχύονται και αποφυγή ανεξέλεγκτων ταλαντώσεων. Τέλος, όπως θα πρέπει να είναι προφανές, μια τέτοια διάταξη απαιτεί πολύ σταθερή τροφοδοσία και μεταλλικό γειωμένο περίβλημα για θωράκιση από ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο.

## 1.4 Φίλτρα

Φίλτρα ονομάζονται κυκλώματα τα οποία επεξεργάζονται ηλεκτρικά σήματα ως προς τις συχνότητές που τα αποτελούν. Χρησιμοποιούνται για να περάσουν επιλεκτικά κάποιες συχνότητες, αποκόπτοντας άλλες, ή για να διαμορφώσουν το σήμα μεταβάλλοντας τη φάση κάποιων συχνοτήτων του.

Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός φίλτρου είναι τα εξής:

- Η απόκριση. Μπορεί να είναι
  1. *Υπιπερατά (high-pass)*, αποκόπτουν συχνότητες κάτω από κάποιο όριο .
  2. *Βαθυπερατά (low-pass)*, αποκόπτουν συχνότητες πάνω από κάποιο όριο.
  3. *Ζωνοπερατά (band-pass)*, αφήνουν να περάσουν σήματα εντός ενός καθορισμένου εύρους συχνοτήτων.
  4. *Ζωνοφρακτικά (band-stop)*, αποκόπτουν σήματα εντός ενός καθορισμένου εύρους συχνοτήτων.
  5. *Ολοπερατά (all-pass)*, αφήνουν όλες τις συχνότητες να περάσουν, εισάγοντας διαφορετική καθυστέρηση σε κάποιες, αλλάζοντας δηλαδή τη φάση τους.

Εδώ θα αναφερθώ μόνο στους πρώτους δύο τύπους καθώς αυτοί είναι οι πιο σχετικοί με το θέμα της εργασίας μου.

- Χαρακτηριστική συχνότητα ή συχνότητα αποκοπής (corner/cutoff frequency)  
Χαρακτηριστική συχνότητα ονομάζεται η συχνότητα γύρω από την οποία το φίλτρο επιφέρει αλλαγές στο εισερχόμενο σήμα. Για τα υπιπερατά και βαθυπερατά φίλτρα ορίζεται ως η συχνότητα στην οποία το πλάτος του εξερχόμενου σήματος έχει εξασθενήσει κατά 3dB σε σχέση με του εισερχόμενου. Ζώνη διέλευσης (pass-band) ονομάζεται η περιοχή συχνοτήτων η οποία περνά από το φίλτρο χωρίς μεταβολή και ζώνη αποκοπής η περιοχή συχνοτήτων που αποκόπτονται πλήρως. Ενδιάμεσά τους, γύρω από τη χαρακτηριστική συχνότητα βρίσκεται η μεταβατική περιοχή, που το σήμα αρχίζει να εξασθενείται αλλά όχι πλήρως.  
Στα ζωνοπερατά και ζωνοφρακτικά φίλτρα χαρακτηριστική συχνότητα είναι η κεντρική συχνότητα εκατέρωθεν της οποίας αποκόπτεται ή επιτρέπεται η διέλευση του σήματος.
- Η χρήση μόνο παθητικών ή και ενεργών στοιχείων. (passive/active filters)  
Ο διαχωρισμός εδώ είναι προφανής. Τα παθητικά φίλτρα απαρτίζονται μόνο από αντιστάσεις, πυκνωτές και πηνία, ενώ τα ενεργά συμπεριλαμβάνουν και τελεστικούς ενισχυτές ή και τρανζίστορ. Τα πρώτα και πιο απλά φίλτρα που κατασκευάστηκαν ήταν παθητικά, καθώς πρωτομελετήθηκαν σε εποχές που δεν υπήρχαν ενεργά στοιχεία. Τέτοια φίλτρα έχουν πλεονέκτημα έναντι των ενεργών στη διαχείριση μεγάλων ισχύων, κάτι που περιορίζεται συνήθως από τα χαρακτηριστικά των τελεστικών ενισχυτών ενός ενεργού φίλτρου. Επίσης είναι

συχνά πιο οικονομικά στην κατασκευή τους (εκτός των περιπτώσεων που απαιτούνται μεγάλα πηνία). Γι' αυτούς τους λόγους χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα σε εφαρμογές υψηλής ισχύος, υψηλής συχνότητας (όπου δεν υπάρχουν επαρκώς γρήγοροι τελεστικοί ενισχυτές ή το κόστος τους είναι απαγορευτικό) ή σε εφαρμογές που η υψηλή ακρίβεια δεν είναι πρώτης σημασίας. Επίσης δεν απαιτούν επιπλέον τροφοδοσία για να λειτουργήσουν.

Από την άλλη πλευρά, τα ενεργά φίλτρα προσφέρουν δυνατότητες ενίσχυσης του σήματος (σε αντίθεση με τα παθητικά, που μπορούν μόνο να εξασθενήσουν το διερχόμενο σήμα) όπως επίσης και απεμπλοκή των προηγούμενων βαθμίδων από τις επόμενες, χαρακτηριστικό που οφείλεται στην πολύ μεγάλη (σχεδόν άπειρη) εμπέδηση εισόδου των τελεστικών ενισχυτών και την πολύ μικρή εμπέδηση εξόδου. Άλλο προτέρημα των ενεργών φίλτρων, πολύ σημαντικό στη σημερινή τεχνολογία, είναι δυνατότητα υλοποίησης τους σε πολύ μικρό μέγεθος, συχνά και ενσωμάτωσή τους σε ολοκληρωμένα κυκλώματα. Λόγω του μικρού μεγέθους ευνοείται και η αυτοματοποιημένη συναρμολόγηση σε γραμμές παραγωγής κάτι που με τη σειρά του ρίχνει το κόστος παραγωγής.

- Τύπος απόκρισης

Ένα ιδανικό φίλτρο θα έχει:

- Επίπεδη ζώνη διέλευσης, δηλαδή το πλάτος του σήματος που διέρχεται δεν θα υφίσταται καμία μεταβολή
- Άμεσο πέρασμα από τη ζώνη διέλευσης στη ζώνη αποκοπής, χωρίς ενδιάμεση περιοχή
- Γραμμική απόκριση φάσης κοντά στην χαρακτηριστική συχνότητα, δηλαδή το σχήμα του σήματος στο πεδίο του χρόνου δεν υφίσταται μεταβολή μετά τη διέλευση από το φίλτρο

Πρακτικά, αυτά τα χαρακτηριστικά όχι μόνο δεν μπορούν να επιτευχθούν πλήρως ταυτόχρονα αλλά είναι και αλληλένδετα. Πρέπει δηλαδή να επιλεγεί κατά το σχεδιασμό ενός φίλτρου κάποιο από τα τρία που θα βελτιστοποιηθεί εις βάρος των άλλων.

Υπάρχουν τρεις βασικές προσεγγίσεις στο ιδανικό φίλτρο, η προσέγγιση Butterworth, η προσέγγιση Chebyshev και η προσέγγιση Bessel. Πέραν αυτών υπάρχουν και άλλοι σχεδιασμοί που εξυπηρετούν ιδιαίτερες ανάγκες επεξεργασίας σημάτων, όπως τα ελλειπτικά (elliptical ή Cauer), τα Γκαουσιανά, Linkwitz-Riley κ.α. Εδώ θα αναφερθώ στα πρώτα τρία:

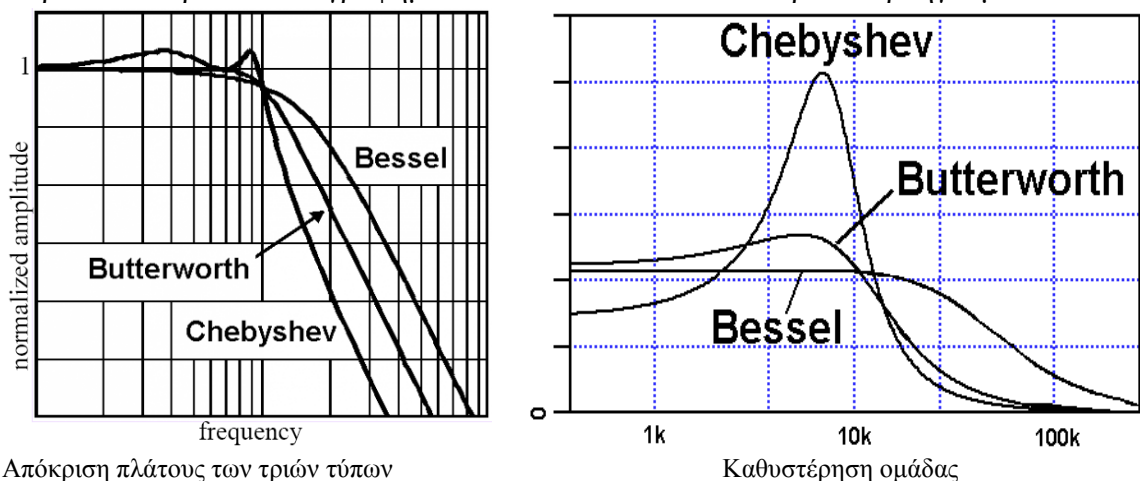
1. Προσέγγιση Butterworth ή επίπεδης ζώνης διέλευσης (Maximally flat pass-band). Αυτός ο σχεδιασμός επιφέρει την ελάχιστη μεταβολή στο πλάτος του διερχόμενου σήματος και άρα προτιμάται στις περιπτώσεις που η επιθυμητή πληροφορία βρίσκεται στην ακριβή τιμή πλάτους του σήματος. Ένα τέτοιο φίλτρο πρώτης τάξης παρουσιάζει κατά τη μετάβαση προς τη ζώνη αποκοπής εξασθένηση 20dB/decade, η οποία ξεκινά πριν τη συχνότητα αποκοπής ενώ η φάση μεταβάλλεται κατά 90 μοίρες, ξεκινώντας από 0 μοίρες για το 1/10 της συχνότητας αποκοπής και



φτάνοντας τις 90 μοίρες στη δεκαπλάσια συχνότητα. Είναι συχνά το μέτρο σύγκρισης για τις αποκρίσεις των άλλων σχεδιασμών.

2. Προσέγγιση Chebyshev. Εδώ θυσιάζεται η ακεραιότητα του διερχόμενου σήματος, καθώς εισάγεται κυμάτωση στη ζώνη διέλευσης, με αντάλλαγμα την πιο απότομη μετάβαση στη ζώνη αποκοπής. Τέτοια φίλτρα χρησιμοποιούνται όταν η επιθυμητή πληροφορία βρίσκεται στην τιμή της συχνότητας. Παράδειγμα χρήσης προσέγγισης Chebyshev είναι η αποκοπή αρμονικών σε ταλαντωτές ή η μετατροπή τετραγωνικών παλμών σε ημιτονοειδείς, όπου και στις δυο περιπτώσεις αναμένουμε μια βασική συχνότητα στη ζώνη διέλευσης και θέλουμε να αποκόψουμε τα πολλαπλάσιά της. Συνήθως δεν χρησιμοποιείται ο παραπάνω ορισμός της συχνότητας αποκοπής (συχνότητα για εξασθένηση -3dB) αλλά ορίζεται η συχνότητα όπου το πλάτος του σήματος γίνεται για τελευταία φορά ίσο με το ελάχιστο της κυμάτωσης στη ζώνη διέλευσης. Έχει χειρότερη απόκριση φάσης από τους άλλους δύο τύπους.
3. Προσέγγιση Bessel (maximally flat group delay). Έχει την πιο αργή εξασθένηση σήματος από τους τρεις αυτούς τύπους με αντάλλαγμα την πιο ομαλή μεταβολή φάσης κατά το πέρασμα στη ζώνη αποκοπής. Επωμένο διαφορετικά αυτό σημαίνει ότι οι συχνότητες γύρω από τη συχνότητα αποκοπής καθυστερούνται κατά τον ίδιο χρόνο, με αποτέλεσμα η μορφή του σήματος να παραμορφώνεται κατά το ελάχιστο. Βρίσκουν χρήση σε φίλτρα ήχου, καθώς εκεί παραμόρφωση της μορφής του σήματος συνεπάγεται αισθητή μεταβολή στον ήχο που τελικά αναπαράγεται.

Παρακάτω παρατίθενται γραφήματα που αποδίδουν πιο καθαρά τα προηγούμενα



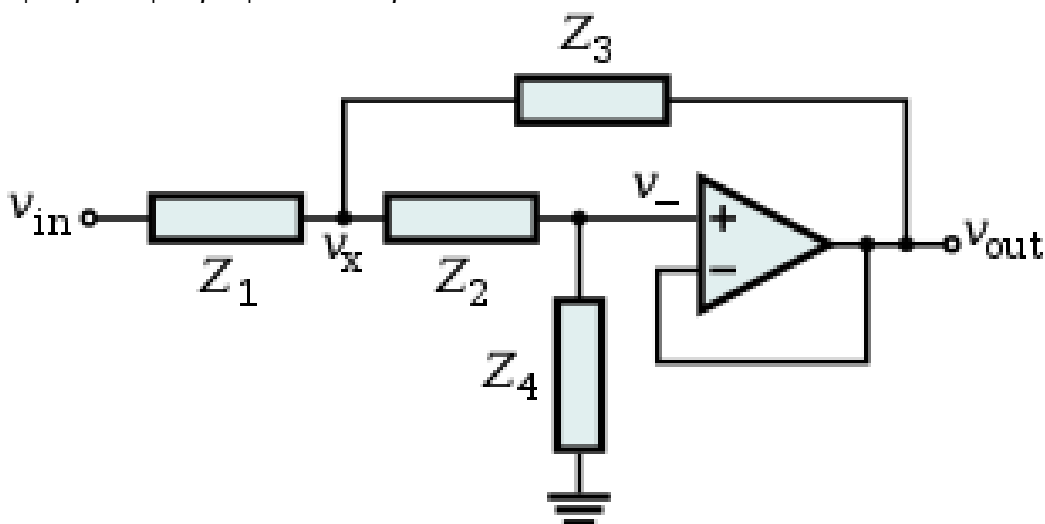
Απόκριση πλάτους των τριών τύπων

Καθυστέρηση ομάδας

- **Τάξη.** Η τάξη του φίλτρου καθορίζει την κλίση της απόκρισης πλάτους στη ζώνη αποκοπής καθώς και τη συνολική μεταβολή φάσης. Στα φίλτρα 1ης τάξης το σήμα εξασθενείται κατά 20dB για κάθε δεκαπλασιασμό της συχνότητας, ενώ σε ένα φίλτρο n-ής τάξης το σήμα εξασθενείται κατά  $n \cdot 20\text{dB/dec}$ . Όμοια, ένα φίλτρο

πρώτης τάξης επιφέρει συνολική αλλαγή φάσης 90 μοιρών, ενώ ένα n-ής n\*90 μοιρών. Η απλούστερη μέθοδος για την κατασκευή φίλτρου μεγαλύτερης τάξης είναι η σύνδεση στη σειρά βαθμίδων μικρότερης τάξης. Καθώς οι περισσότερες τοπολογίες ενεργών φίλτρων παράγουν σαν βασική μονάδα βαθμίδες 2ας τάξης, για φίλτρο άρτιας τάξης n συνδέονται σε σειρά  $\frac{n}{2}$  2ας τάξης βαθμίδες, ενώ για φίλτρο περιττής τάξης n συνδέονται σε σειρά  $\frac{n-1}{2}$  βαθμίδες 2ας τάξης ακολουθούμενες από μια πρωτοτάξια βαθμίδα, συνήθως τύπου RC συχνά μαζί με έναν ενισχυτή απομόνωσης (buffer amplifier). Ο σχεδιασμός ενός φίλτρου γίνεται όλο και πιο δύσκολος καθώς αυξάνεται η τάξη του, κάτι που ισχύει ιδιαίτερα για τα παθητικά φίλτρα, καθώς οι επιμέρους βαθμίδες τους αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Τέλος, φίλτρα μεγαλύτερης τάξης αποκλίνουν πιο εύκολα από τον σχεδιασμό τους με τις αποκλίσεις των στοιχείων που τα απαρτίζουν από τις θεωρητικές τιμές και είναι πιο επιρρεπή σε ασταθή συμπεριφορά και ταλαντώσεις, κάτι που κάνει την υλοποίηση δυσκολότερη.

- Τοπολογία ενεργών φίλτρων. Υπάρχουν πολλές τοπολογίες για τον σχεδιασμό ενός ενεργού φίλτρου, που αρμόζουν περισσότερο ή λιγότερο σε εξειδικευμένες απαιτήσεις. Παραδείγματα είναι τα “biquad”, “multiple feedback”, “Fliege”, “Sallen-Key” κ.α. Εδώ θα αναλύσω την τοπολογία Sallen-Key καθώς είναι αρκετά συχνή η χρήση της, υπάρχει αρκετή βιβλιογραφία που διευκολύνει το σχεδιασμό και είναι η τοπολογία που χρησιμοποιήθηκε τελικά στην εργασία. Βασικό χαρακτηριστικό είναι πως ο τελεστικός ενισχυτής εκτελεί χρέη buffer ενισχυτή, κάτι που δίνει πολλές αρκετή ελευθερία στην επιλογή του, αφού τα χαρακτηριστικά του δεν επηρεάζουν την απόκριση του φίλτρου. Η γενική μορφή αυτής της τοπολογίας, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για βαθυπερατά και υπερπερατά φίλτρα φαίνεται παρακάτω:



Πηγή: By Inductiveload - Own work, Public Domain,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5786095>

Τοπολογία Sallen-Key, γενική μορφή

Από το βασικό αξίωμα για τον ιδανικό τελεστικό ενισχυτή θα έχουμε

$$V_- = V_+ = V_{out}$$

Από τον νόμο του Kirchhoff για τα ρεύματα στον κόμβο  $V_x$  έχουμε:

$$\frac{V_{in} - V_x}{Z_1} = \frac{V_x - V_{out}}{Z_3} + \frac{V_x - V_-}{Z_2}$$

Και συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις:

$$\frac{V_{in} - V_x}{Z_1} = \frac{V_x - V_{out}}{Z_3} + \frac{V_x - V_{out}}{Z_2}$$

Από τον νόμο του Kirchhoff για τα ρεύματα στον κόμβο της μη αναστρέφουσας εισόδου παίρνουμε:

$$\frac{V_x - V_{out}}{Z_2} = \frac{V_{out}}{Z_4} \implies V_x = V_{out} \left( \frac{Z_2}{Z_4} + 1 \right)$$

Άρα αντικαθιστώντας το  $V_x$

$$\frac{V_{in} - V_{out} \left( \frac{Z_2}{Z_4} + 1 \right)}{Z_1} = \frac{V_{out} \left( \frac{Z_2}{Z_4} + 1 \right) - V_{out}}{Z_3} + \frac{V_{out} \left( \frac{Z_2}{Z_4} + 1 \right) - V_{out}}{Z_2}$$

Και αναδιατάσσοντας τους όρους παίρνουμε τη συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z_3 Z_4}{Z_1 Z_2 + Z_3 (Z_1 + Z_2) + Z_3 Z_4}$$

### **Μαθηματική περιγραφή φίλτρων στο πεδίο των συχνοτήτων και συναρτήσεις μεταφοράς.**

Καθώς τα φίλτρα είναι διατάξεις με κύριο σκοπό τον διαχωρισμό συχνοτήτων, είναι λογικό η μαθηματική περιγραφή τους να γίνεται στο πεδίο των συχνοτήτων για σήματα ανεξάρτητα του χρόνου. Η συνάρτηση που περιγράφει την απόκριση ενός συστήματος ονομάζεται συνάρτηση μεταφοράς και στη γενική της μορφή ορίζεται ως η σχέση ανάμεσα στην απόκριση της διάταξης, ως προς τον εξαναγκασμό στην είσοδό της, δηλαδή  $H(s) = \frac{R(s)}{F(s)} = \frac{R(s)}{F(s)}$ . Τα μεγέθη  $\mathbf{R}(s)$ ,  $\mathbf{F}(s)$  είναι συναρτήσεις στο πεδίο των συχνοτήτων, όπου με  $s$  συμβολίζουμε τη γενικευμένη μιγαδική συχνότητα,  $s = \sigma + j\omega$ .

Η σύνδεση μεταξύ των μεγεθών στο πεδίο του χρόνου και των αντίστοιχων στο πεδίο των συχνοτήτων γίνεται μέσω μετασχηματισμού Laplace και το βασικό κέρδος έγκειται στη μετατροπή των διαφορικών εξισώσεων που έχουμε στο πεδίο του χρόνου, σε αλγεβρικές εξισώσεις στο πεδίο των συχνοτήτων.

Πιο συγκεκριμένα, η αναπαράσταση στο χώρο των συχνοτήτων έχει τη μορφή φασικού διανύσματος (phasor). Η αναπαράσταση ενός αρμονικά μεταβαλλόμενου μεγέθους στα πεδία του χρόνου και των συχνοτήτων θα είναι:

$$a(t) = A * e^{\sigma t} * \cos(\omega t + \varphi) \leftrightarrow \mathbf{A}(s) = A * e^{j\varphi}$$

Από το παραπάνω φαίνεται και η σύνδεση  $a_{(t)} = Re\{\mathbf{A}_{(s)} * e^{s*t}\}$

Ξεκινώντας από τις αποκρίσεις/εξαναγκασμούς που, για τα περισσότερα κυκλώματα στα οποία απαιτείται μαθηματική ανάλυση, παίρνουν μορφή διαφορικών εξισώσεων

$$\sum_{k=0}^m r_k \frac{d^k R_{(t)}}{dt^k} = \sum_{l=0}^n f_l \frac{d^k F_{(t)}}{dt^k}$$

περνάμε σε μια συνάρτηση μεταφοράς στο πεδίο των συχνοτήτων της μορφής:

$$H_{(s)} = \frac{\sum_{k=0}^m (r_k * s^k)}{\sum_{l=0}^n (f_l * s^l)}$$

με τα  $r_k$  και  $f_l$  να είναι πραγματικοί συντελεστές.

Αν γνωρίζουμε τις ρίζες των πολωνύμων, μπορούμε να γράψουμε ισοδύναμα

$$H_{(s)} = C \frac{\prod_{k=0}^m (s - z_k)}{\prod_{l=0}^n (s - p_l)}$$

με  $C$  μια πραγματική πολλαπλασιαστική σταθερά. Τις  $m$  ρίζες ( $z_k$ ) του αριθμητή τις ονομάζουμε «ρίζες» ή «μηδενικά» του συστήματος, ενώ τις  $n$  ρίζες ( $p_l$ ) του παρονομαστή «πόλους» ή «φυσικές συχνότητες» του συστήματος. Τα μηδενικά μηδενίζουν τη συνάρτηση μεταφοράς, ενώ οι πόλοι την απειρίζουν. Επίσης, εάν ένας πόλος ή ένα μηδενικό εμφανίζονται παραπάνω από μία φορά, μιλάμε για αντίστοιχη πολλαπλότητα. Τέλος συνηθίζεται όταν ο βαθμός του πολωνύμου του αριθμητή είναι μικρότερος από αυτόν του παρονομαστή να λέμε ότι τα υπόλοιπα μηδενικά βρίσκονται στο άπειρο και πρέπει, για να είναι σταθερό το σύστημα, ο βαθμός του αριθμητή να είναι μικρότερος ή το πολύ ίσος με το βαθμό του παρονομαστή.

Τα παραπάνω μπορούν να εφαρμοστούν για την περιγραφή της απόκρισης τυχαίας διάταξης μίας εισόδου και μίας εξόδου σε τυχαίο εξαναγκασμό. Φυσικά μπορούν να εφαρμοστούν και στην ανάλυση και το σχεδιασμό φίλτρων. Εδώ, ο βαθμός του παρονομαστή της συνάρτησης μεταφοράς καθορίζει την τάξη του φίλτρου. Στον σχεδιασμό, ιδιαίτερη σημασία αποκτά η γενική μορφή της  $H_{(s)}$  που έχει πολυώνυμο δευτέρου βαθμού στον αριθμητή και στον παρονομαστή. Ο βασικός λόγος για αυτό είναι πως (όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω), τα περισσότερα φίλτρα μεγαλύτερης τάξης κατασκευάζονται συνδέοντας φίλτρα 2ης τάξης σε σειρά. Μαθηματικά αυτό σημαίνει πολλαπλασιασμό συναρτήσεων μεταφοράς του παρακάτω τύπου:

$$H_{(s)} = \frac{r_2 s^2 + r_1 s + r_0}{f_2 s^2 + f_1 s + f_0}$$

Για παράδειγμα, στη βιβλιογραφία, η συνάρτηση μεταφοράς για ένα βαθυπερατό φίλτρο 2n-ης τάξης συνήθως δίνεται ως:

$$H_{(s)} = \frac{A_0}{\prod_i (b_i s^2 + a_i s + 1)}$$

με τις τιμές των  $a$  και  $b$  να καθορίζουν τον τύπο της απόκρισης του.

### Πρακτική σχεδίαση ενός φίλτρου

Στη σχεδίαση ενός πραγματικού φίλτρου πρώτο βήμα είναι να καθοριστούν οι παράμετροι που αναπτύχθηκαν στην αρχή της ενότητας. Επιλέγεται η συχνότητα αποκοπής, η απόκριση και ο τύπος της βάσει των απαιτήσεων της εκάστοτε εφαρμογής. Έπειτα πρέπει να ζυγιστούν οι δυσκολίες σχεδίασης-υλοποίησης με την αναγκαιότητα για απότομη αποκοπή, ώστε να βρεθεί συμβιβασμός μεταξύ τους και να αποφασιστεί η τάξη και η τοπολογία του φίλτρου. Όπως αναφέρθηκε ήδη, οι διάφορες τοπολογίες ταιριάζουν καλύτερα σε κάποιες εφαρμογές και δυστυχώς η βελτιστοποίηση της απόκρισης είναι ανάλογη της δυσκολίας του σχεδιασμού. Αφού ληφθούν αυτές οι αποφάσεις, συνήθως επιλέγονται ενδεικτικές τιμές εκκίνησης για τα παθητικά στοιχεία, με τη βοήθεια της εκτενούς βιβλιογραφίας που υπάρχει σε αυτόν τον τομέα και ξεκινά ένας κύκλος υπολογισμών, προσομοίωσης (σε κατάλληλα προγράμματα) και σύγκρισης με τις ανάγκες της εφαρμογής, έως ότου βρεθούν οι βέλτιστες τιμές.

Μια ενδιαφέρουσα σημείωση: Από την προηγούμενη μαθηματική περιγραφή μπορεί να καταλήξει κανείς στο συμπέρασμα ότι για την κατασκευή ενός φίλτρου, παραδείγματος χάριν, Butterworth 4ης τάξης με συχνότητα αποκοπής  $f$  αρκεί να συνδεθούν 2 δευτεροτάξιες βαθμίδες Butterworth με την ίδια συχνότητα αποκοπής  $f$ . Στην πράξη αυτός ο τρόπος συνήθως δεν εφαρμόζεται, με την κοινή πρακτική να είναι η κάθε δευτεροτάξια βαθμίδα να έχει διαφορετικό τύπο απόκρισης και συχνά σε λίγο διαφορετική συχνότητα αποκοπής, ώστε η *συνολική* απόκριση να έχει τα ζητούμενα χαρακτηριστικά.

## **2. Μελέτη και υλοποίηση της μετρητικής διάταξης**

Σε αυτό το μέρος παρουσιάζονται οι προϋποθέσεις τις οποίες θεωρήθηκε κατά τον σχεδιασμό ότι έπρεπε να πληροί η διάταξη με την οποία έγιναν οι μετρήσεις. Γίνεται ανάλυση των επιμέρους τμημάτων της διάταξης, από τον θεωρητικό σχεδιασμό τους μέχρι και την τελική τους υλοποίηση και χαρακτηρισμό. Επίσης παρουσιάζονται κάποια από τα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν μαζί με τους λόγους για την επιλογή τους.

## **2.1 Απαιτήσεις και παράμετροι σχεδίασης**

Η εφαρμογή για την οποία κατασκευάστηκε αυτή η διάταξη καθορίζει και τα βασικά της χαρακτηριστικά. Πρέπει να μετρηθεί με ακρίβεια η φωτεινότητα σημείων μιας μονοχρωματικής οθόνης φθορισμού με μήκος κύματος στην περιοχή των 450nm. Καθώς ο φθορισμός προέρχεται από δέσμη ηλεκτρονίων τα οποία διανύουν μια σημαντική απόσταση εν κενώ, παρουσία άλλων ηλεκτρικών συσκευών σε λειτουργία, όπως αντλίες, κινητήρες και θερμαντικά στοιχεία, αναμένεται να υπάρχει πρόβλημα ηλεκτρικού θορύβου ο οποίος θα αφήσει το αποτύπωμά του στη δέσμη ηλεκτρονίων, κάτι που θα μεταφραστεί εντέλλει σαν αυξομείωση της φωτεινότητας της οθόνης. Καθώς οι περισσότερες συσκευές λειτουργούν στη συχνότητα 50Hz του δικτύου ηλεκτροδότησης, αυτή είναι και η ελάχιστη συχνότητα θορύβου που θα πρέπει να αποκοπεί. Φυσικά αναμένουμε πολλαπλάσια αυτής της συχνότητας καθώς και πιο υψίσυχο θόρυβο. Τέλος η πλατφόρμα συλλογής δεδομένων που θα χρησιμοποιηθεί έχει μέγιστη τάση εισόδου τα 10V.

Άρα συνολικά οι απαιτήσεις που πρέπει να πληροί η τελική διάταξη είναι:

- Γραμμική μετατροπή φωτεινής έντασης δεδομένου μήκους κύματος (450nm) σε τάση
- Επαρκής εξασθένιση συχνοτήτων άνω των 50Hz
- Έξοδος τάσης από 0V έως το πολύ 10V

## 2.2 Φωτοδίοδος και ενίσχυση

Πρώτο στάδιο της μέτρησης είναι η μετατροπή της φωτεινής έντασης σε τάση κατάλληλου πλάτους. Εξετάζοντας διάφορες δυνατές επιλογές καταλήξαμε τελικά στη φωτοδίοδο BPW21R από την εταιρεία Vishay. Όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα, τα οποία πάρθηκαν από το datasheet, η φωτοδίοδος αυτή παρουσιάζει εξαιρετικά γραμμική σχέση μεταξύ του ρεύματος βραχυκύκλωσης σε ένα μεγάλο εύρος φωτεινότητων καθώς και καλή απόκριση στο μήκος κύματος που μας ενδιαφέρει (450nm), περίπου 70% της μέγιστης ευαισθησίας της. Το εμβαδό της ενεργού περιοχής είναι, σύμφωνα με τον κατασκευαστή,  $7,5\text{mm}^2$ . Μετρήσεις του ρεύματος βραχυκύκλωσης με τη φωτοδίοδο στραμμένη προς την οθόνη του RHEED μας έδωσαν τιμές της τάξεως των μερικών δεκάδων nA το πολύ.

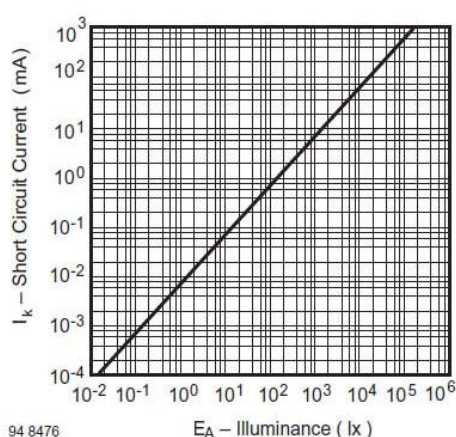


Fig. 3 Short Circuit Current vs. Illuminance

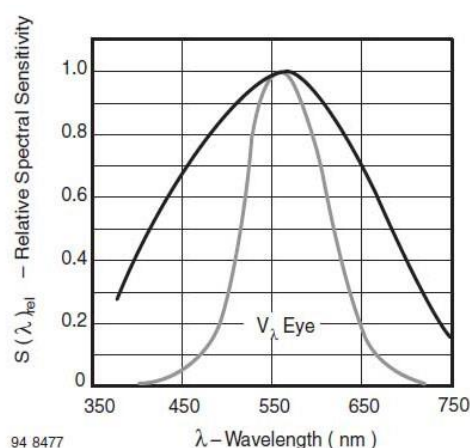


Fig. 5 Relative Spectral Sensitivity vs. Wavelength

Πηγή: Vishay Semiconductors, BPW21R datasheet, Document Number 81519, Rev. 1.4, 11-May-04

Για την ενίσχυση του ρεύματος που θα δώσει η φωτοδίοδος επιλέχθηκε η συνδεσμολογία ενισχυτή διεμπέδησης (transimpedance amplifier) με τη δίοδο στη φωτοβολταϊκή λειτουργία για τους λόγους που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 1.3 της θεωρίας. (Επαναλαμβάνοντας σύντομα, η γραμμική σχέση ρεύματος βραχυκύκλωσης και φωτεινότητας και η πολύ καλή ευαισθησία σε χαμηλές φωτεινότητες.) Η χαμηλή ταχύτητα απόκρισης της φωτοδίοδου στη φωτοβολταϊκή λειτουργία δεν μας επηρεάζει στη συγκεκριμένη εφαρμογή, αφού οι μεταβολές που περιμένουμε να παρατηρήσουμε συμβαίνουν αρκετά αργά, σε χρόνο μερικών δευτερολέπτων. Για να γίνει η επαρκής ενίσχυση και να εκμεταλλευτούμε στο μέγιστο το εύρος απόκρισης της φωτοδίοδου απαιτείται κατάλληλος τελεστικός ενισχυτής, με ευαισθησία εισόδου αρκετά καλύτερη από τα nA που μετρήσαμε ως μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Για αυτή τη θέση επιλέχθηκε ο ενισχυτής OPA129 της εταιρείας Burr-Brown. Κριτήρια επιλογής ήταν το πολύ χαμηλό bias current της τάξεως των 30fA, ο χαμηλός θόρυβος και το είδος του περιβλήματος. Συγκεκριμένα ο κατασκευαστής έχει προβλέψει και έχει αφήσει χωρίς εσωτερική σύνδεση ακροδέκτες (συγκεκριμένα τα pins 1 και 4) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως τμήμα κλειστής διαδρομής χαλκού πάνω στο τυπωμένο κύκλωμα περικλείοντας τις εισόδους, δημιουργώντας guard ring. Πέραν τούτου επιλέξαμε την έκδοση επιφανειακής στήριξης, καθώς έτσι είναι απαραίτητη η



χρήση guard ring μόνο στη μια πλευρά του τυπωμένου κυκλώματος. Στην περίπτωση “through-hole” εξαρτήματος, αυτόματα το τυπωμένο κύκλωμα θα έπρεπε να σχεδιαστεί με δύο πλευρές, με guard ring και στις δύο, αυξάνοντας έτσι τη δυσκολία κατασκευής του.

Για αντίσταση ανατροφοδότησης επιλέχθηκε τιμή  $R_f=100M\Omega$  η οποία θα δώσει τάση  $10^8$  φορές το ρεύμα εισόδου. Τοποθετήθηκε επίσης πυκνωτής στο βρόχο ανατροφοδότησης με τιμή  $C_f=82pF$ . Χρησιμοποιήθηκε πυκνωτής μίκας για την μεγάλη σταθερότητά του στο χρόνο και στις μεταβολές της θερμοκρασίας καθώς και τις πολύ χαμηλές απώλειες του διηλεκτρικού αυτού. Δημιουργείται έτσι βαθυπερατό φίλτρο 1ης τάξης στην ανατροφοδότηση με χαρακτηριστική συχνότητα  $f = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \cong 19,4Hz$ .

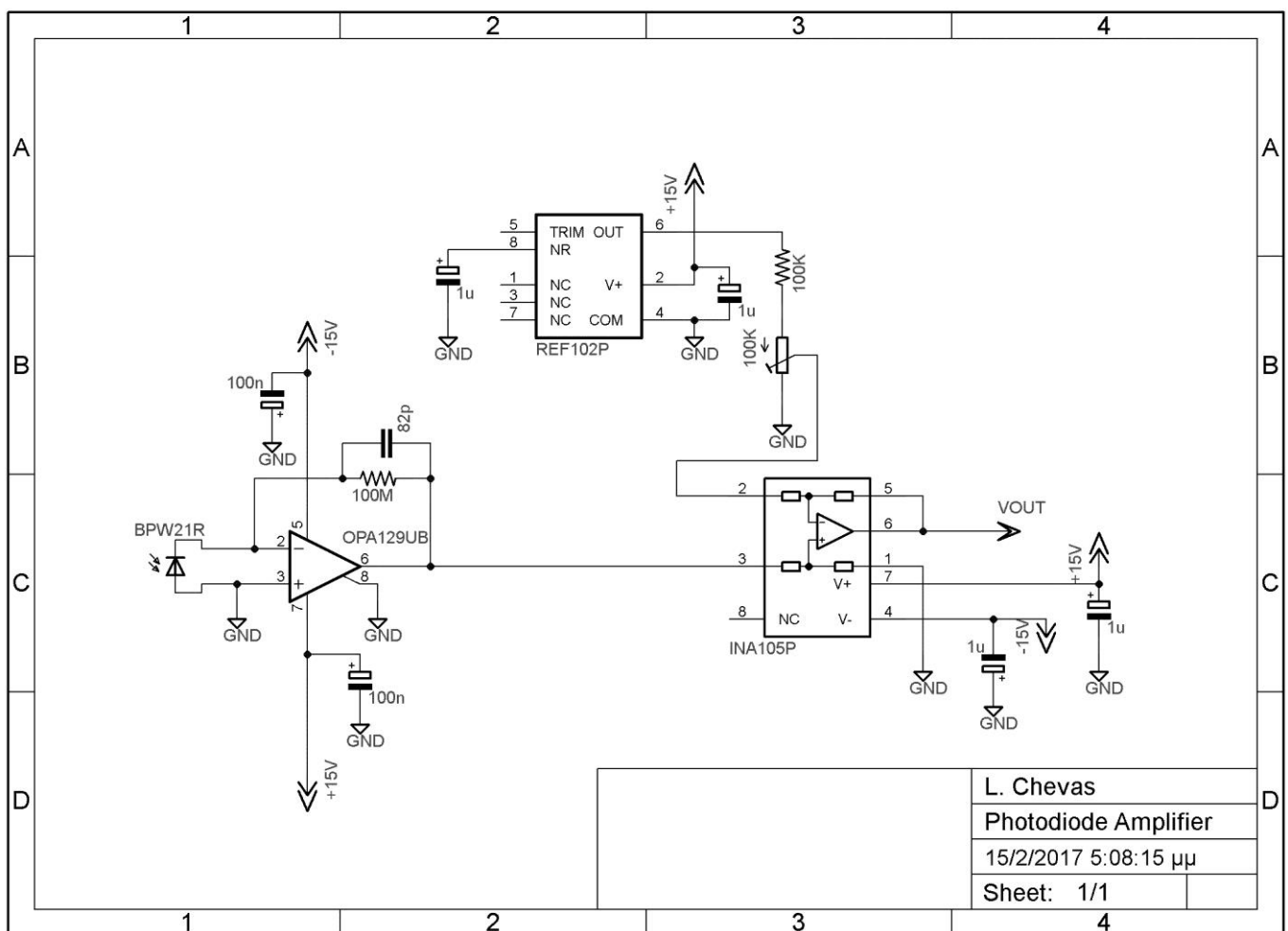
Υπό άλλες συνθήκες ο υπολογισμός του πυκνωτή αυτού θα ήταν ένα πιο σύνθετο ζήτημα και θα έπρεπε ενδεχομένως να αναθεωρηθεί το μέγεθος της  $R_f$  (άρα και το κέρδος της βαθμίδας) ανάλογα με το αναγκαίο εύρος συχνοτήτων στο οποίο θα χρησιμοποιηθεί η διάταξη, λαμβάνοντας περισσότερα χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων υπ’ όψιν (όπως η συχνότητα στην οποία το κέρδος του ενισχυτή γίνεται μονάδα, η εσωτερική αντίσταση και η εσωτερική χωρητικότητα της φωτοδιόδου). Όπως είναι προφανές ακόμα και για χαμηλής συχνότητας εφαρμογές, χαρακτηριστική συχνότητα 19,4Hz δίνει φτωχό λειτουργικό εύρος συχνοτήτων. Αν για παράδειγμα γίνει ο πιο αναλυτικός υπολογισμός (δεν παρατίθεται καθώς είναι εκτός του σκοπού της παρούσας εργασίας), παίρνουμε ότι ελάχιστη χωρητικότητα  $C_f$  που εγγυάται σταθερότητα (όχι ανεπιθύμητες ταλαντώσεις) είναι περίπου το 1,3pF η οποία δίνει χαρακτηριστική συχνότητα περίπου 1200Hz. Αυτή η συχνότητα πάλι μπορεί να θεωρηθεί πολύ χαμηλή για κάποιες εφαρμογές και φαίνεται έτσι η πιθανή ανάγκη για μείωση της  $R_f$ . Ευτυχώς η συγκεκριμένη εφαρμογή μόνο όφελος έχει από την τόσο χαμηλή χαρακτηριστική συχνότητα καθώς, όπως αναφέρθηκε ήδη, οι παρατηρούμενες μεταβολές είναι πολύ αργές και υπάρχει γενικότερη ανάγκη αποκοπής τυχόν θορύβου.

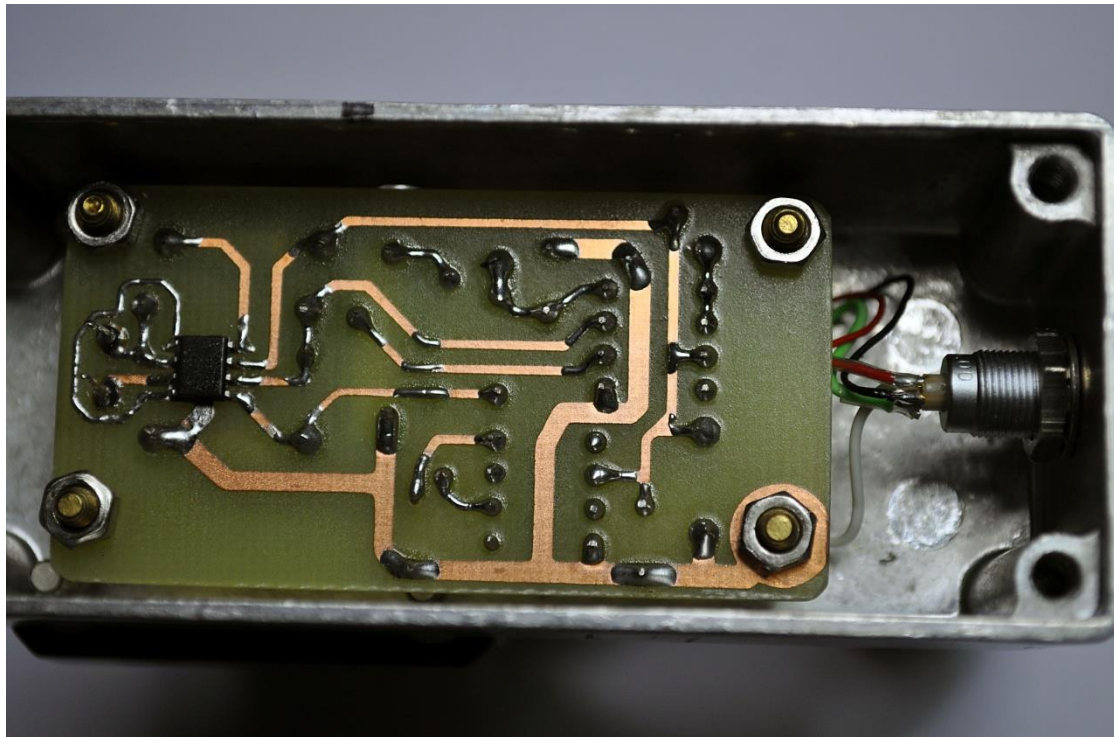
Επόμενο βήμα στο σχεδιασμό ήταν η πρόβλεψη για διόρθωση τυχόν dc-offset που θα εμφανιζόταν λόγω ρευμάτων σκοταδιού ή άλλων φωτεινών πηγών. Αυτό έγινε με τη χρήση ενός διαφορικού ενισχυτή όπου χρησιμοποιήθηκε instrumentation amplifier, ο INA105 της Texas-instruments. Στη θετική του είσοδο έρχεται το σήμα από τον ενισχυτή της φωτοδιόδου και στην αρνητική έρχεται τάση που ορίζεται από μεταβλητή αντίσταση trimmer σύρματος πολλών στροφών για μεγαλύτερη ακρίβεια. Η μεταβλητή αντίσταση λειτουργεί σαν διαιρέτης τάσης και τροφοδοτείται από πηγή τάσης αναφοράς ακριβείας, την REF102A, μια πηγή σταθερών 10VDC  $\pm 0,01V$  και παρέκκλισης 10ppm/ $^{\circ}C$ . Έτσι δίνεται η δυνατότητα μηδενισμού του σήματος εξόδου για συνθήκες σκοταδιού. Για τη σταθεροποίηση της τοπικής τροφοδοσίας, η οποία είναι συμμετρική  $\pm 15V$ , χρησιμοποιήθηκαν πυκνωτές τανταλίου.

Το τυπωμένο κύκλωμα (pcb) κατασκευάστηκε με τη φωτοευαίσθητη μέθοδο, και αφού κολλήθηκαν τα εξαρτήματα, μετά από προσεκτικό καθάρισμα με ακετόνη σφραγίστηκε με κατάλληλο βερνίκι. Η διασύνδεση με την υπόλοιπη διάταξη γίνεται

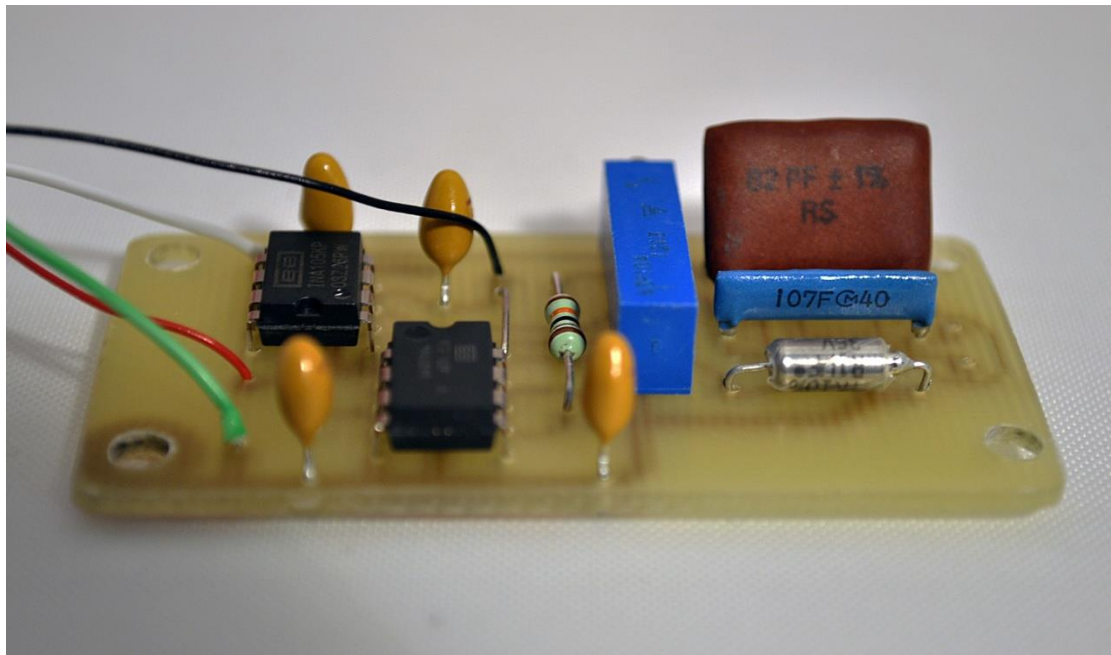
μέσω Lemo-connector με επίχρυσες επαφές και θωρακισμένου καλωδίου. Η όλη κατασκευή τοποθετήθηκε σε μεταλλικό περίβλημα το οποίο έχει επαφή με τη γείωση του κυκλώματος. Η φωτοδίοδος βρίσκεται πάνω σε κατάλληλη οπτική διάταξη για την εστίαση του φωτός στην ενεργό περιοχή της. Η οπτική διάταξη αποτελείται από υποστηρίγματα και δύο κινητούς φορείς φακών, αμφίκυρτων, με εστιακό μήκος 15mm και 30mm. Τα οπτικά εξαρτήματα αγοράστηκαν από την Thor-Labs. Καθώς το περίβλημα της φωτοδίοδου είναι συνδεδεμένο με την κάθοδό της, η οπτική διάταξη δεν μπορεί να γειωθεί και έτσι χρησιμοποιήθηκαν πλαστικοί αποστάτες μεταξύ του στηρίγματος των οπτικών και του μεταλλικού κουτιού της κατασκευής.

Όλη η παραπάνω περιγραφή συνοψίζεται στο σχηματικό διάγραμμα και τις φωτογραφίες που ακολουθούν

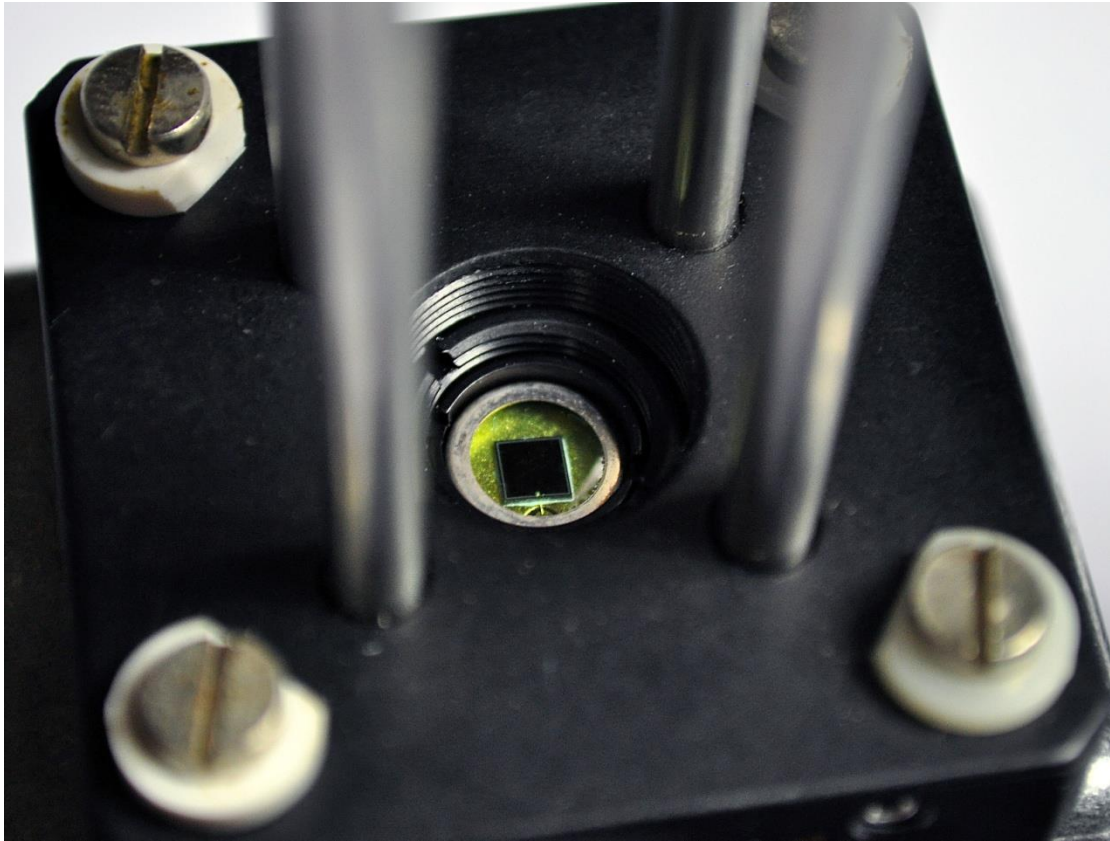




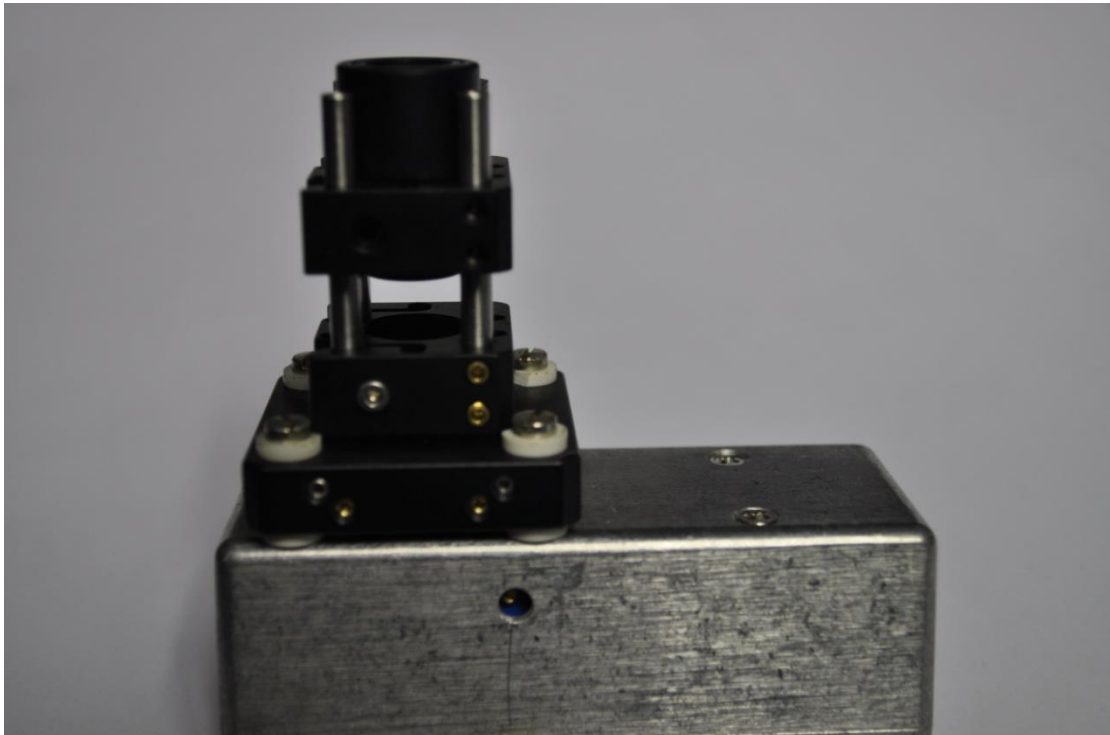
Εσωτερική όψη της διάταξης και του κάτω επιπέδου του pcb, αριστερά φαίνεται ο OPA129 καθώς και το guard ring γύρω από τις εισόδους του ενισχυτή.



Πάνω όψη του pcb



Η φωτοδίοδος στην τελική της θέση



Η τελική διάταξη με τα οπτικά στη θέση τους. Φαίνεται η οπή για την πρόσβαση στο ποτενσιόμετρο μηδενισμού του σήματος, καθώς και η απομόνωση των οπτικών από το μεταλλικό περίβλημα.

## **2.3 Βαθυπερατό φίλτρο**

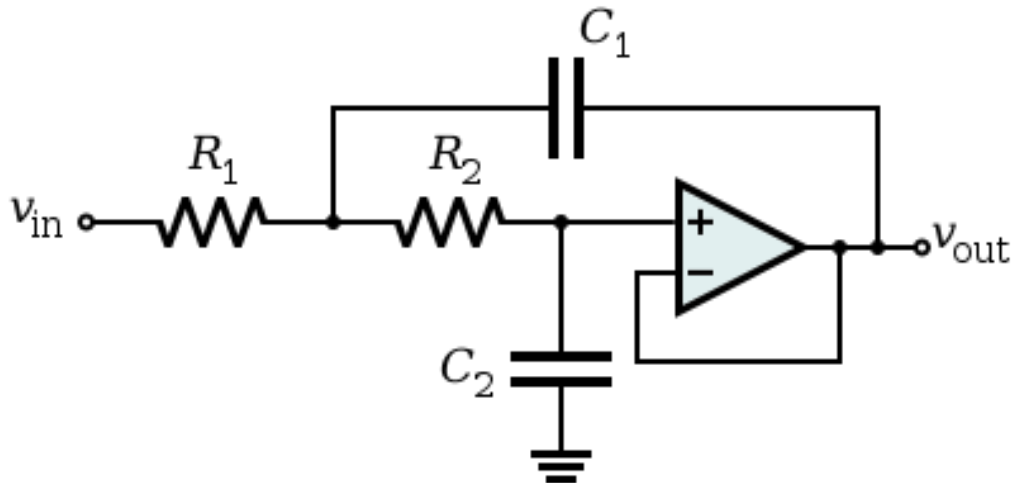
Κατά τον σχεδιασμό της διάταξης υπήρχε η υποψία ότι η φωτεινότητα της οθόνης του RHEED θα εμφάνιζε διαμόρφωση στην ένταση κατ' αντιστοιχία με τις διάφορες πηγές ηλεκτρικού θορύβου που υπάρχουν στο χώρο του MBE όπως και εντός του growth chamber. Βασικό πρόβλημα θα αποτελούσε προφανώς η συχνότητα των 50Hz του δικτύου ηλεκτροδότησης και για αυτό τον σκοπό σχεδιάστηκε βαθυπερατό φίλτρο το οποίο να έχει ήδη αρκετή εξασθένηση στα 50Hz ώστε να είναι δυνατή η παρατήρηση μεταβολών στο σήμα χωρίς το εμπόδιο του θορύβου.

Σαν καλός συμβιβασμός μεταξύ απόδοσης και κατασκευαστικής δυσκολίας επιλέχθηκε ένα φίλτρο 6<sup>ης</sup> τάξης. (πρέπει να ξανατονιστεί ότι καθώς μεγαλώνει η τάξη ενός φίλτρου αυξάνει ο κίνδυνος αστάθειας-ταλάντωσης και μικρές αποκλίσεις από τις θεωρητικές τιμές των υλικών μπορούν να μεταβάλλουν τον τύπο απόκρισης ευκολότερα). Καθώς το βασικό ζητούμενο της όλης συσκευής είναι η ακριβής μέτρηση της φωτεινότητας, η οποία μετατρέπεται σε σήμα τάσης, ήταν προφανές πως ο μόνος κατάλληλος τύπος απόκρισης θα ήταν η προσέγγιση Butterworth, η οποία διατηρεί όσο το δυνατό απαραμόρφωτη τη ζώνη διέλευσης. Επίσης μάλλον μονόδρομος ήταν η επιλογή ενεργού φίλτρο έναντι παθητικού, αφού ένα παθητικό θα απαιτούσε χρήση πηνίων, τα οποία θα ήταν ογκώδη για τόσο χαμηλές συχνότητες και γενικότερα δεν θα μπορούσαν εύκολα και οικονομικά να βρεθούν σε κατάλληλες ανοχές για μια τόσο επακριβή λειτουργία. Από την άλλη πλευρά, ένα ενεργό φίλτρο μπορεί να υλοποιηθεί με χρήση μόνο πυκνωτών, αντιστάσεων και τελεστικών ενισχυτών, εξαρτήματα που μπορούν να βρεθούν σχετικά εύκολα σε προμηθευτές και μάλιστα σε διάφορες βαθμίδες ποιότητας και ακρίβειας. Πρόσθετο πλεονέκτημα είναι η απομόνωση της μιας βαθμίδας του φίλτρου από την επόμενη, άρα και της εξόδου από την είσοδο, κάτι που τα παθητικά φίλτρα δεν προσφέρουν. Τέλος επιλέχθηκε τοπολογία Sallen-Key ως μια εύχρηστη γενικής χρήσης τοπολογία φίλτρου, με αρκετή βιβλιογραφία διεθνώς για να υποστηρίξει τον σχεδιασμό.

Ως τώρα όμως δεν έχει γίνει αναφορά στην συχνότητα αποκοπής του φίλτρου και αυτό διότι υπάρχει μια αμφίδρομη σχέση μεταξύ των τιμών των εξαρτημάτων και της συχνότητας αποκοπής. Δηλαδή αν επιλεγεί μια συχνότητα και γίνουν οι υπολογισμοί για τις τιμές των εξαρτημάτων, το πιθανότερο είναι οι τιμές αυτές να μην ταιριάζουν ακριβώς με αυτές των πραγματικών εξαρτημάτων. Πρέπει έτσι να γίνουν αρκετές φορές οι υπολογισμοί, κάθε φορά προσαρμόζοντας τις τιμές κάποιων εξαρτημάτων και ελέγχοντας αν το αποτέλεσμα (η συχνότητα) είναι εντός ενός αποδεκτού εύρους. Αυτή τη διαδικασία βελτιστοποίησης βοηθούνε πολύ υπολογιστικά προγράμματα που κάνουν τους (συχνά όχι γρήγορους) υπολογισμούς. Στο τέλος, όταν πάρει κανείς τιμές εξαρτημάτων που να βρίσκονται αρκετά κοντά σε αυτές που μπορεί να προμηθευτεί, είναι πολύ χρήσιμο να χρησιμοποιηθεί πρόγραμμα προσομοίωσης για να επιβεβαιωθεί η αναμενόμενη απόκριση του φίλτρου, χρησιμοποιώντας τις πραγματικές τιμές.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή θεωρήθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν πυκνωτές μίκας, για την πολύ καλή αντοχή τους στο χρόνο και την ελάχιστη μεταβολή της χωρητικότητάς τους με τη θερμοκρασία. Αυτό περιπλέκει κι άλλο τον

σχεδιασμό, αφού πυκνωτές μίκας είναι διαθέσιμοι σε μικρό εύρος χωρητικότητας και σχετικά μικρές τιμές χωρητικότητας. Με βασική απαίτηση η συχνότητα αποκοπής να βρίσκεται μεταξύ περίπου 10Hz και 20Hz και λαμβάνοντας υπ' όψιν τις διαθέσιμες τιμές αντιστάσεων (σε ανοχή 1% της σειράς E96) και πυκνωτών καταλήξαμε στο παρακάτω σχέδιο για την κάθε βαθμίδα  $2^{n6}$  τάξης. Το συνολικό φίλτρο αποτελείται από τρεις τέτοιες βαθμίδες σε σειρά και έχει συνολικό κέρδος τάσης ίσο με μονάδα.



Πηγή: Bv Inductiveload - Own work. Public Domain. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5786242>

Εδώ φαίνονται οι τιμές των εξαρτημάτων για την κάθε βαθμίδα:

|            | R1     | R2     | C1    | C2     | προσέγγιση  |
|------------|--------|--------|-------|--------|-------------|
| 1η βαθμίδα | 62kΩ   | 560 kΩ | 100nF | 33nF   | Bessel      |
| 2η βαθμίδα | 82 kΩ  | 620 kΩ | 100nF | 22 nF  | Butterworth |
| 3η βαθμίδα | 270 kΩ | 910 kΩ | 100nF | 4.7 nF | Chebyshev   |

Αυτές οι τιμές δίνουν συνολική συχνότητα αποκοπής περίπου 14,5Hz. Φαίνεται επίσης κάτι που αναφέρθηκε και στην παράγραφο της θεωρίας που αφορούσε τα φίλτρα, ότι δεν χρησιμοποιούνται πανομοιότυπες βαθμίδες, αλλά η κάθε μία έχει διαφορετική απόκριση και συχνότητα αποκοπής.

Από τη γενική μορφή της συναρτήσεως μεταφοράς για την τοπολογία Sallen-Key (η οποία υπάρχει στην παράγραφο της θεωρίας) και αντικαθιστώντας τις γενικευμένες εμπεδήσεις των εξαρτημάτων για τη βαθυπερατή συνδεσμολογία ως  $Z_1=R_1$ ,  $Z_2=R_2$ ,  $Z_3=\frac{1}{sC_1}$ ,  $Z_4=\frac{1}{sC_2}$  παίρνουμε:

$$H_s = \frac{\frac{1}{sC_1} \frac{1}{sC_2}}{R_1 R_2 + \frac{1}{sC_1} (R_1 + R_2) + \frac{1}{sC_1} \frac{1}{sC_2}}$$

Αναδιατάσσοντας τη σχέση και εμφανίζοντας τις ποσότητες:

$$\text{χαρακτηριστική συχνότητα: } \omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

$$\text{και εξασθένιση: } 2\alpha = \frac{1}{C_1} \left( \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right)$$

παίρνουμε τη συνάρτηση μεταφοράς της κάθε δευτεροτάξιας βαθμίδας ως:

$$H_s = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\alpha s + \omega_0^2}$$

Άρα η συνάρτηση μεταφοράς του συνολικού φίλτρου θα είναι το γινόμενο των συναρτήσεων των τριών βαθμίδων, δηλαδή:

$$H_s = H_1 H_2 H_3 = \frac{\omega_{01}^2}{s^2 + 2\alpha_1 s + \omega_{01}^2} * \frac{\omega_{02}^2}{s^2 + 2\alpha_2 s + \omega_{02}^2} * \frac{\omega_{03}^2}{s^2 + 2\alpha_3 s + \omega_{03}^2}$$

Βάζοντας τις παραπάνω τιμές έχουμε:

$$\omega_{01} = 93,42 \text{ rad/s} \Rightarrow f_{01} = 14,87 \text{ Hz}$$

$$\omega_{02} = 94,56 \text{ rad/s} \Rightarrow f_{02} = 15,05 \text{ Hz}$$

$$\omega_{03} = 93,06 \text{ rad/s} \Rightarrow f_{03} = 14,81 \text{ Hz}$$

$$2\alpha_1 = 179,15 \text{ s}^{-1}$$

$$2\alpha_2 = 138,08 \text{ s}^{-1}$$

$$2\alpha_3 = 48,03 \text{ s}^{-1}$$

Και άρα η ολική συνάρτηση μεταφοράς γίνεται:

$$H_s = \frac{\omega_{01}^2 \omega_{02}^2 \omega_{03}^2}{s^6 x_6 + s^5 x_5 + s^4 x_4 + s^3 x_3 + s^2 x_2 + s^1 x_1 + x_0}$$

Συντελεστές:

$$x_6 = 1$$

$$x_5 = 2\alpha_1 + 2\alpha_2 + 2\alpha_3$$

$$x_4 = 4\alpha_1 \alpha_2 + 4\alpha_2 \alpha_3 + 4\alpha_1 \alpha_3 + \omega_{01}^2 + \omega_{02}^2 + \omega_{03}^2$$

$$x_3 = 8\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 + 2\alpha_1 \omega_{02}^2 + 2\alpha_1 \omega_{03}^2 + 2\alpha_2 \omega_{01}^2 + 2\alpha_2 \omega_{03}^2 + 2\alpha_3 \omega_{01}^2 + 2\alpha_3 \omega_{02}^2$$

$$x_2 = 4\alpha_1 \alpha_2 \omega_{03}^2 + 4\alpha_2 \alpha_3 \omega_{01}^2 + 4\alpha_1 \alpha_3 \omega_{02}^2 + \omega_{01}^2 \omega_{02}^2 + \omega_{02}^2 \omega_{03}^2 + \omega_{01}^2 \omega_{03}^2$$

$$x_1 = 2\alpha_1 \omega_{02}^2 \omega_{03}^2 + 2\alpha_2 \omega_{01}^2 \omega_{03}^2 + 2\alpha_3 \omega_{01}^2 \omega_{02}^2$$

$$x_0 = \omega_{01}^2 \omega_{02}^2 \omega_{03}^2$$

Ή αντικαθιστώντας τιμές:

$$x_6 = 1$$

$$x_5 = 365,25 \text{ s}^{-1}$$

$$x_4 = 66300,04 \text{ s}^{-2}$$

$$x_3 = 7590462,85 \text{ s}^{-3}$$

$$x_2 = 580046585,60 \text{ s}^{-4}$$

$$x_1 = 28053729801 \text{ s}^{-5}$$

$$x_0 = 6,75733 * 10^{11} \text{ s}^{-6}$$

Ο αριθμητής δεν έχει ρίζες ενώ ο παρονομαστής έχει έξι, άρα σε ορολογία φίλτρων, η συνάρτηση μεταφοράς έχει έξι μηδενικά στο άπειρο και έξι πόλους σε έξι μιγαδικές συχνότητες.

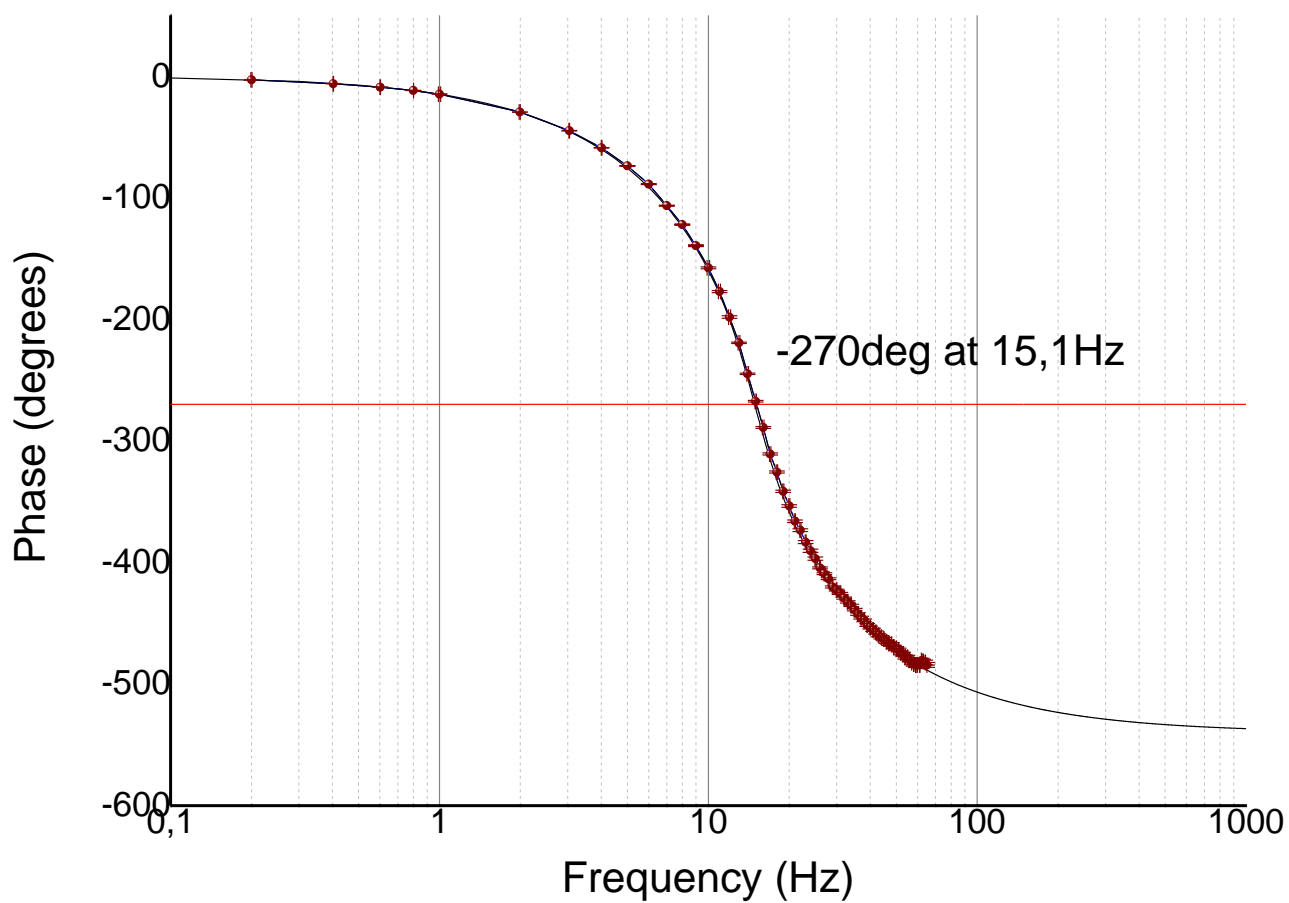
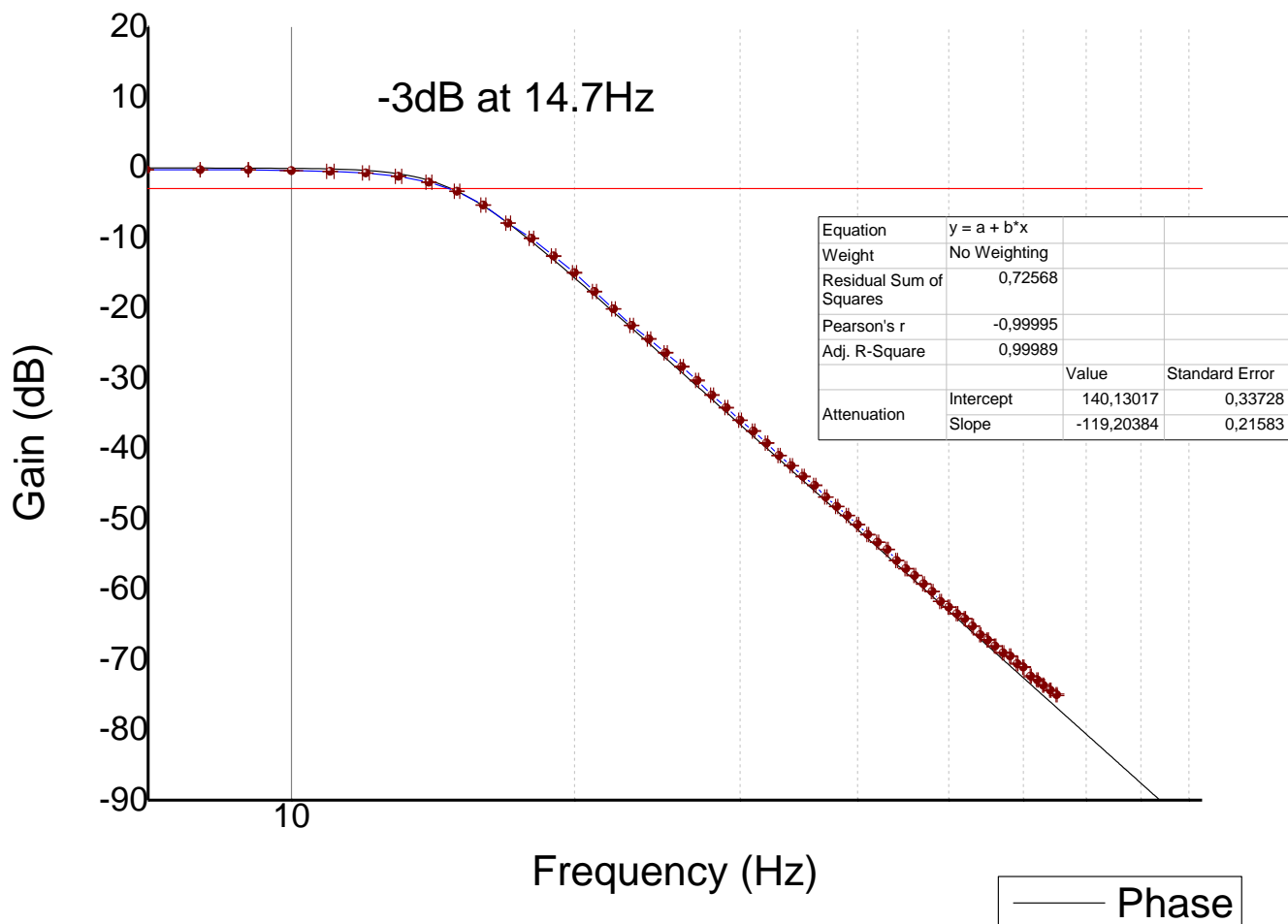
Το φίλτρο τελικά κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας πυκνωτές πολυπροπυλενίου ανοχής  $\pm 1\%$  στις θέσεις C1 καθώς δεν υπήρχαν καλύτερης ποιότητας σε αυτή τη χωρητικότητα, πυκνωτές μίκας ανοχής  $\pm 1\%$  στη θέση C2 και αντιστάσεις ανοχής  $\pm 1\%$ . Οι τελεστικοί ενισχυτές που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι MC33078, διπλοί τελεστικοί ενισχυτές χαμηλού θορύβου με διπολικά τρανζίστορ στην είσοδο. Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι ένα πλεονέκτημα της τοπολογίας Sallen-Key είναι ότι δεν έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις για τους τελεστικούς ενισχυτές. Ο τέταρτος ενισχυτής που δεν χρειάζεται στο κύκλωμα εξουδετερώθηκε ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος ταλάντωσης, με το να συνδεθεί ως buffer και η μη αναστρέφουσα είσοδός του να γειωθεί. Για τη σωστή λειτουργία των τελεστικών ενισχυτών χρησιμοποιήθηκε συμμετρική τροφοδοσία  $\pm 15V$ , η οποία επιπροσθέτως φιλτράρεται τοπικά πάνω στο τυπωμένο κύκλωμα με ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές  $470\mu F$  και αποπνικτικά πηνία ραδιοσυχνοτήτων (RF-beads). Το τυπωμένο κύκλωμα κατασκευάστηκε με τη φωτοευαίσθητη μέθοδο και σφραγίστηκε με κατάλληλο βερνίκι.

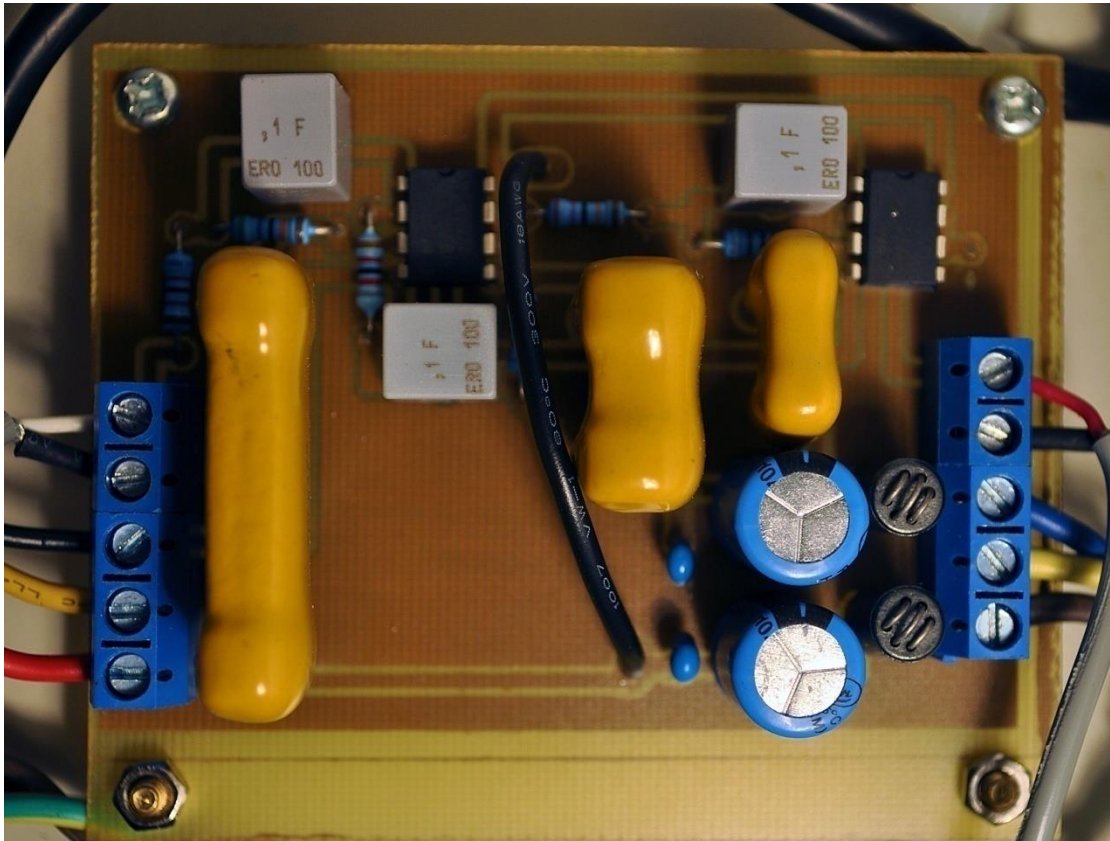
Μετά το πέρας της συναρμολόγησης, χρησιμοποιήθηκαν παλμογράφος και γεννήτρια συχνοτήτων (από τον εξοπλισμό του προπτυχιακού εργαστηρίου ηλεκτρισμού) για τον χαρακτηρισμό του φίλτρου και την επιβεβαίωση των ιδιοτήτων του. Το παρακάτω γράφημα απεικονίζει την απόκριση πλάτους του φίλτρου. Η λεπτή μαύρη γραμμή προέρχεται από την προσομοίωση του κυκλώματος με τον προσομοιωτή QUCS και η γραμμή με τους κύκλους απεικονίζει τις μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο. Φαίνεται σχεδόν πλήρης ταύτιση της μέτρησης με αυτό που περιμέναμε από την προσομοίωση. Η συχνότητα αποκοπής (σχεδιάστηκε και η ευθεία  $-3dB$  στο γράφημα) προβλέπεται στα  $14,8Hz$  από την προσομοίωση (με ιδανικά εξαρτήματα) και υπολογίζεται στα  **$14,7Hz$**  από το γράφημα. Επίσης έχει προσαρμοστεί ευθεία με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων στο origin από την οποία προκύπτει κλίση  **$119,2dB/dec$**  σχεδόν ακριβώς όπως αναμένεται για ένα φίλτρο  $6^{th}$  τάξης ( $120dB/dec$ ). Φαίνεται, τέλος, **εξασθένιση  $62,53dB$  στα  $50Hz$** , το οποίο μεταφράζεται σε περίπου 1300 φορές μειωμένη τάση θορύβου σε αυτή τη συχνότητα.

Για πληρότητα μετρήθηκε και η μεταβολή φάσης ως προς τη συχνότητα, και το σχετικό γράφημα στο οποίο παρουσιάζεται και η καμπύλη από την προσομοίωση παρατίθεται παρακάτω. Παρατηρείται η αναμενόμενη μεταβολή φάσης  $270$  μοιρών κοντά στη συχνότητα αποκοπής και υπάρχει πάλι πολύ καλή συμφωνία με την προσομοίωση.

Στο παράρτημα της εργασίας βρίσκονται και τα γραφήματα των προσομοιώσεων για την κάθε βαθμίδα. Δεν έχουν άμεση σημασία για την τελική χρήση του φίλτρου, αλλά παρουσιάζουν αρκετό ενδιαφέρον ώστε να συμπεριληφθούν.







Κάτοψη του συναρμολογημένου φίλτρου.

## **2.4 Τροφοδοσία και περίβλημα**

Όπως θα πρέπει να έχει φανεί και από τις προηγούμενες παραγράφους, μια τέτοια συσκευή λειτουργεί βέλτιστα, μόνο όταν υποστηρίζεται από ένα καλής ποιότητας τροφοδοτικό, σταθεροποιημένης τάσης dc και χαμηλού θορύβου. Για αυτόν το λόγο έγινε πολύ στοχευμένα επιλογή τροφοδοτικού με γραμμική σταθεροποίηση αντί παλμοτροφοδοτικού, που θα είχε μικρότερο όγκο και κόστος αλλά θα εισήγαγε υψίσυχο θόρυβο στο κύκλωμα. Πρόκειται για εγκιβωτισμένο σε ρητίνη τροφοδοτικό από την εταιρεία Computronics, συμμετρικής  $\pm 15Vdc$  τάσης, μέγιστης ισχύος 5W, τα οποία είναι υπέρ-αρκετά για την λειτουργία της διάταξης μας. Έχει μέγιστη κυμάτωση (ripple) 1mV με load και line regulation της τάξεως του 0,1%.

Τοποθετήθηκε πάνω σε τυπωμένο κύκλωμα με τις κατάλληλες επαφές για τη σύνδεσή του στο δίκτυο ηλεκτροδότησης και την υπόλοιπη διάταξη, τηκόμενη ασφάλεια για περίπτωση δυσλειτουργίας, καθώς και ενδεικτικό LED λειτουργίας.

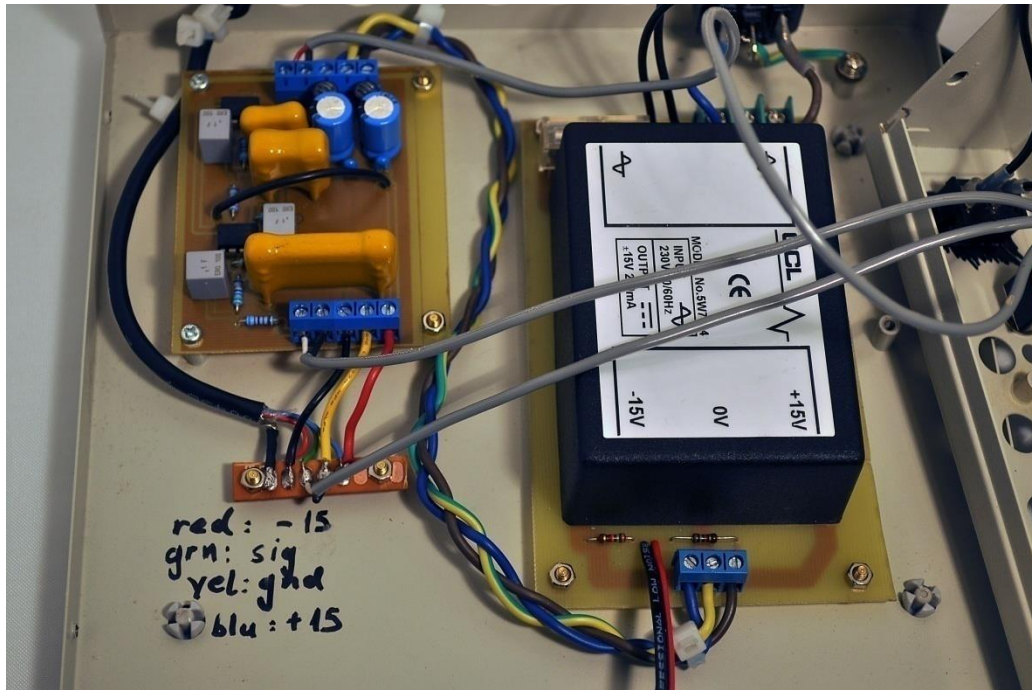
Η μέτρηση της τάσης του χωρίς φορτίο έδωσε τιμές:  
+15,50V $\pm$ 0,025V με 0,190mV  $\pm$ 0,005mV κυμάτωση  
-15,45V $\pm$ 0,025V με 0,190mV  $\pm$ 0,005mV κυμάτωση

και με φορτίο το φίλτρο, με την είσοδό του ασύνδετη (floating) σαν χειρότερη περίπτωση:

+15,45V $\pm$ 0,025V με 0,790mV  $\pm$ 0,005mV κυμάτωση  
-15,50V $\pm$ 0,025V με 0,750mV  $\pm$ 0,005mV κυμάτωση

Το τροφοδοτικό και το φίλτρο τοποθετήθηκαν πάνω σε αποστάτες, μέσα σε γειωμένο μεταλλικό κουτί. Στην πρόσοψη του κουτιού τοποθετήθηκε διακόπτης τροφοδοσίας και το ενδεικτικό LED καθώς και διακόπτης που δίνει τη δυνατότητα χρήσης ή παράκαμψης του φίλτρου. Για την σύνδεση της διάταξης με το καταγραφικό επιλέχθηκε συνδετήρας (connector) BNC, ο οποίος τοποθετήθηκε επίσης στην πρόσοψη. Όλες οι εσωτερικές συνδέσεις που μεταφέρουν σήματα έγιναν με θωρακισμένο ομοαξονικό καλώδιο. Όταν επιλεγεί παράκαμψη του φίλτρου, το σήμα από τον ενισχυτή της φωτοδίοδου στέλνεται απευθείας στο BNC εξόδου, και η είσοδος του φίλτρου γειώνεται, προς αποφυγή απρόβλεπτης συμπεριφοράς του. Στην πίσω πλευρά του κουτιού βρίσκονται η σύνδεση για το καλώδιο τροφοδοσίας του δικτύου και το θωρακισμένο καλώδιο που επικοινωνεί με τη φωτοδίοδο.

Παρατίθενται φωτογραφίες της διάταξης τροφοδοτικού-φίλτρου στο σύνολό της.



Φωτογραφία του εσωτερικού της συσκευής



Εξωτερική φωτογραφία.

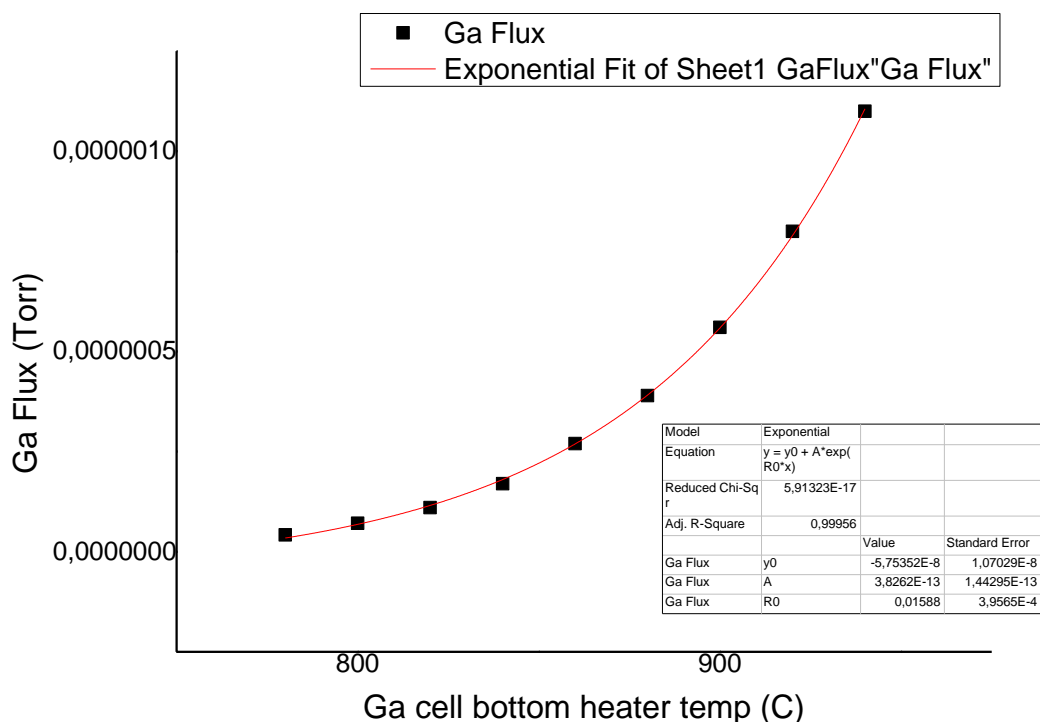
### **3. Μετρήσεις και ανάλυση**

Σε αυτό το μέρος παρουσιάζεται η μέθοδος που ακολουθήθηκε για να παρθούν μετρήσεις που να επιτρέψουν την ανάλυση της επιταξίας γαλλίου πάνω σε υπόστρωμα νιτριδίου του γαλλίου. Επίσης παρουσιάζεται η ανάλυση που έγινε στις δύο διαφορετικές δομές που δημιουργούνται σε τέτοιες συνθήκες επιταξίας, δηλαδή τη δομή του bilayer και των droplets καθώς και τα δεδομένα που προκύπτουν από αυτή την ανάλυση.

### 3.1 Διεξαγωγή μετρήσεων

Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων αυτής της εργασίας, η φωτοδιόδος με τα οπτικά στοιχεία της στερεώθηκαν σε κατάλληλη βάση η οποία τοποθετήθηκε έτσι ώστε ο μπροστινός φακός της διάταξης να έρχεται σχεδόν σε επαφή με την οθόνη του RHEED. Η απόσταση μεταξύ των δύο φακών και της φωτοδιόδου ρυθμίστηκε πειραματικά έως ότου πάρθηκε η μέγιστη ένταση από τη συσκευή καταγραφής, με τη διάταξη να εστιάζει απευθείας στην κηλίδα του RHEED χωρίς την περίθλαση/ανάκλαση από κάποιο υπόστρωμα.

Για να μπορούμε να γνωρίζουμε τη ροή Ga, στην αρχή κάθε ημέρας μετρήσεων πήραμε μετρήσεις της ροής Ga (από τον μετρητή πίεσης στο πίσω μέρος του substrate holder) σε σχέση με τη θερμοκρασία του κατώτερου θερμαντικού στοιχείου του K-cell Ga. Η θερμοκρασία του ανώτερου θερμαντικού στοιχείου ορίστηκε πάντα 70°C μεγαλύτερη από αυτή του κατώτερου. Κάνοντας το γράφημα της ροής Ga ως προς τη θερμοκρασία του K-cell και εφαρμόζοντας μια εκθετική προσέγγιση, παίρναμε τη θερμοκρασία στην οποία έπρεπε να ρυθμιστεί το K-cell για να έχουμε την επιθυμητή ροή Ga προς το υπόστρωμα. Επίσης, καθώς ο μετρητής πίεσης έδινε μέτρηση σε Torr ενώ σε εμάς ήταν χρησιμότερη η αντίστοιχη ποσότητα γαλλίου σε monolayer ανά δευτερόλεπτο, χρησιμοποιήθηκε και η μετατροπή:  $1,0376 \cdot 10^{-6} \text{ Torr} \leftrightarrow 0,2594 \text{ nm/s Ga equivalent} \leftrightarrow 1 \text{ ML/s Ga equivalent}$  απουσία φαινόμενων εκρόφησης και χρησιμοποιώντας σαν ύψος ενός ML τη μισή πλεγματική σταθερά του GaN στη [0001] διεύθυνση,  $c = 5,1885 \text{ \AA}$ . Αυτό απεικονίζεται στο παρακάτω γράφημα:



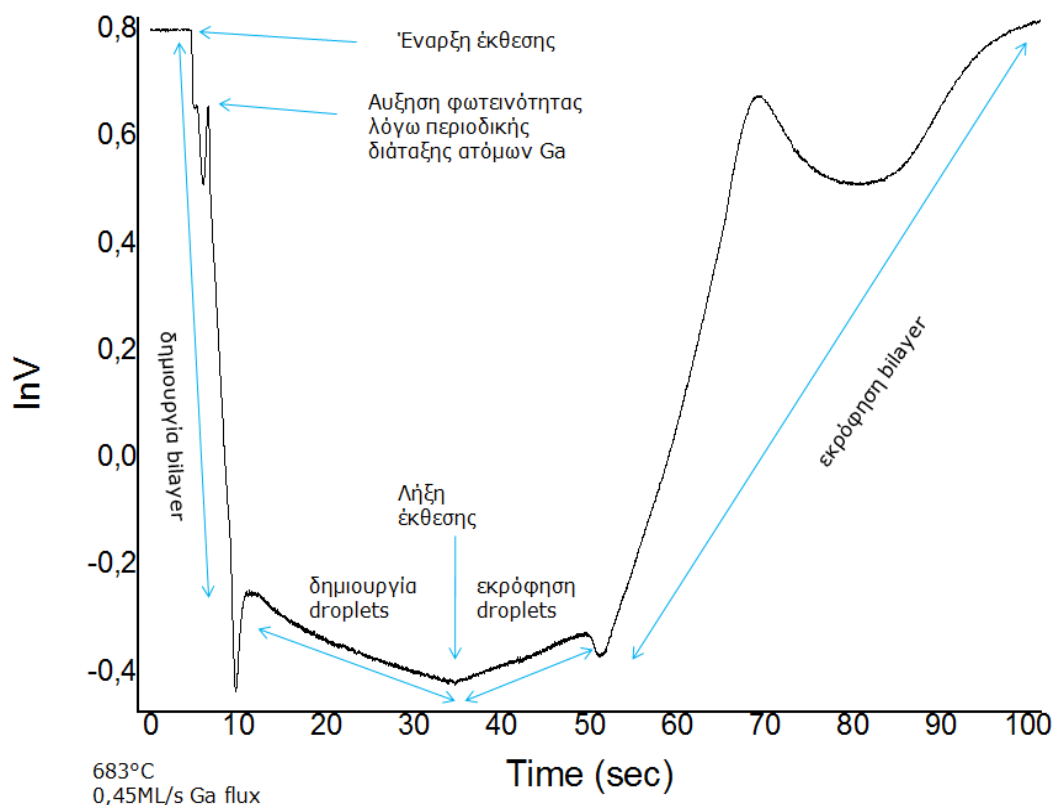
Η σχέση που πήραμε είναι:

$y = y_0 + Ae^{R_0 x}$  με  $y$  τη ροή Ga σε Torr και  $x$  τη θερμοκρασία.

(οι συγκεκριμένοι αριθμοί αφορούν κάποια από τις ημέρες κατά τις οποίες πήραμε μετρήσεις και λόγω της μεταβολής τους με το χρόνο δεν έχουν μεγάλη σημασία μακροπρόθεσμα).

Επιλύοντας ως προς  $x$ , δηλαδή  $x = \frac{1}{R_0} \ln \left( \frac{y - y_0}{A} \right)$  παίρνουμε την απαιτούμενη θερμοκρασία για ζητούμενη πίεση Ga ( $y$ ).

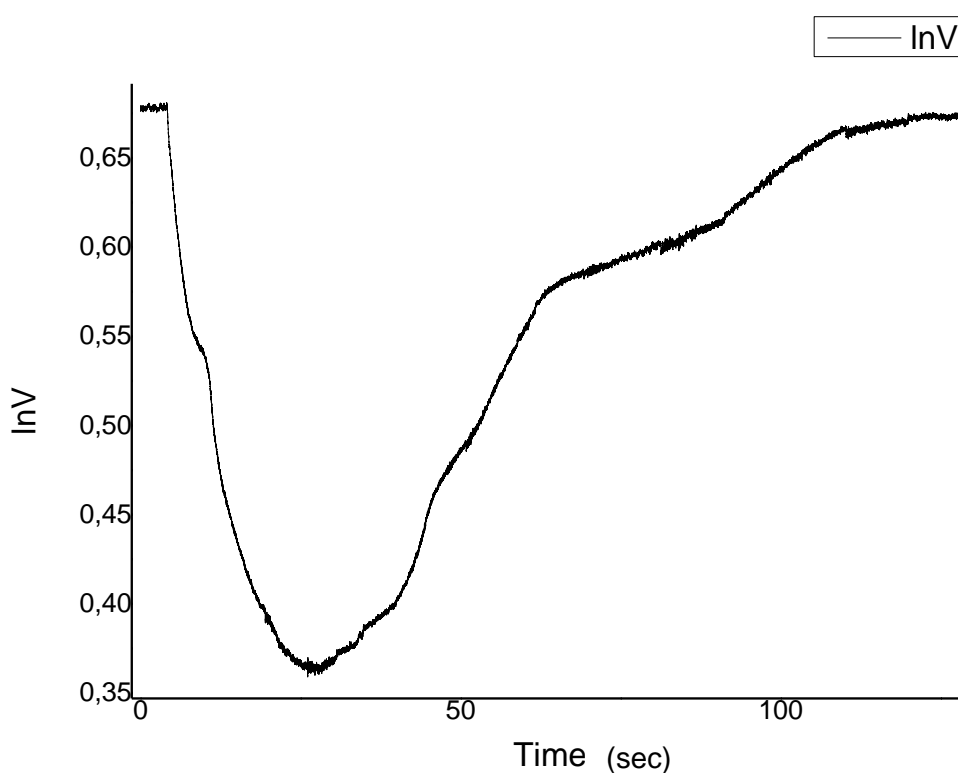
Ως υπόστρωμα χρησιμοποιήθηκε τμήμα από wafer GaN on sapphire, Ga-polar κολλημένο με ίνδιο πάνω σε βάση μολυβδαινίου. Πήραμε μετρήσεις για πέντε θερμοκρασίες υποστρώματος, συγκεκριμένα για: 675°C, 683°C, 690°C, 705°C, 720°C και 735°C καθώς θεωρήθηκε ότι φαινόμενα εκρόφησης θα γινόντουσαν σαφώς αντιληπτά σε τέτοιες θερμοκρασίες. Για κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις εκθέσαμε το υπόστρωμα σε διαφορετικές τιμές ροής Ga για 30 δευτερόλεπτα κάθε φορά καταγράφοντας τη φωτεινότητα του RHEED και έπειτα αφήσαμε αρκετό χρόνο ώστε η ποσότητα Ga που συσσωρευόταν στην επιφάνεια να εκροφηθεί και η φωτεινότητα του RHEED να επιστρέψει στα αρχικά επίπεδα. Αυτή η διαδικασία επαναλήφθηκε δύο φορές για κάθε τιμή ροής Ga. Οι μετρήσεις παραστήθηκαν σε γραφήματα φυσικού λογαρίθμου της μετρούμενης τάσης ως προς το χρόνο. Εδώ παρουσιάζεται η γενική μορφή των μετρήσεων που πήραμε. Το συγκεκριμένο γράφημα αφορά εισερχόμενη ροή Ga 0,45ML/s σε θερμοκρασία υποστρώματος 683°C



Όπως εξηγήθηκε και στο κεφάλαιο της θεωρίας, παρατηρείται γρήγορη πτώση τη φωτεινότητας του RHEED καθώς δημιουργείται πρώτα το bilayer και έπειτα βραδύτερη πτώση της φωτεινότητας καθώς δημιουργούνται droplets. Μετά το τέλος της έκθεσης σε Ga εκροφώνται πρώτα τα droplets και έπειτα το υποκείμενο bilayer.

Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν είναι όλες οι ροές Ga ικανές να δημιουργήσουν droplets ή και ολοκληρωμένο bilayer εάν η θερμοκρασία του υποστρώματος είναι τέτοια ώστε ο ρυθμός εκρόφησης να είναι μεγαλύτερος. Μια τέτοια έκθεση παρουσιάζει την παρακάτω μορφολογία:

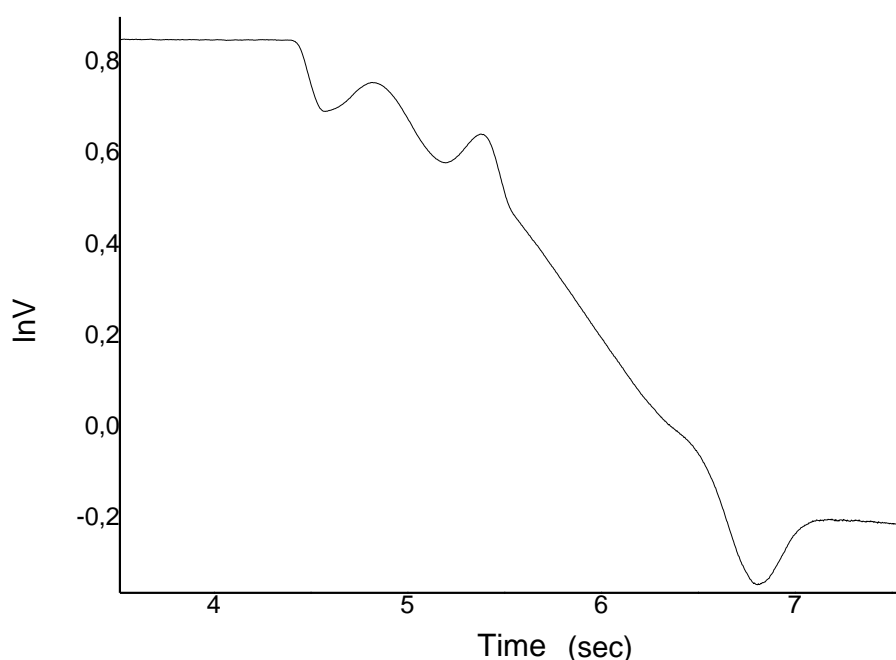
Η παρακάτω καμπύλη αφορά έκθεση 0,15ML/s Ga σε θερμοκρασία υποστρώματος 690°C





### **3.2 Ανάλυση για το Bilayer**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κατά την εναπόθεση Ga σε υπόστρωμα GaN, δεδομένου ότι η εισερχόμενη ροή Ga είναι μεγαλύτερη από την εκροφώμενη ροή, δημιουργείται αρχικά ένα διπλό μονοατομικό στρώμα Ga (bilayer). Εδώ αξίζει να παρατεθεί ένα τμήμα των μετρήσεων που λήφθηκαν στο οποίο φαίνονται κάποια ενδιαφέροντα σημεία. (το συγκεκριμένο γράφημα αφορά μέτρηση για ροή Ga ίση με 0,85ML/s σε θερμοκρασία υποστρώματος 683°C)

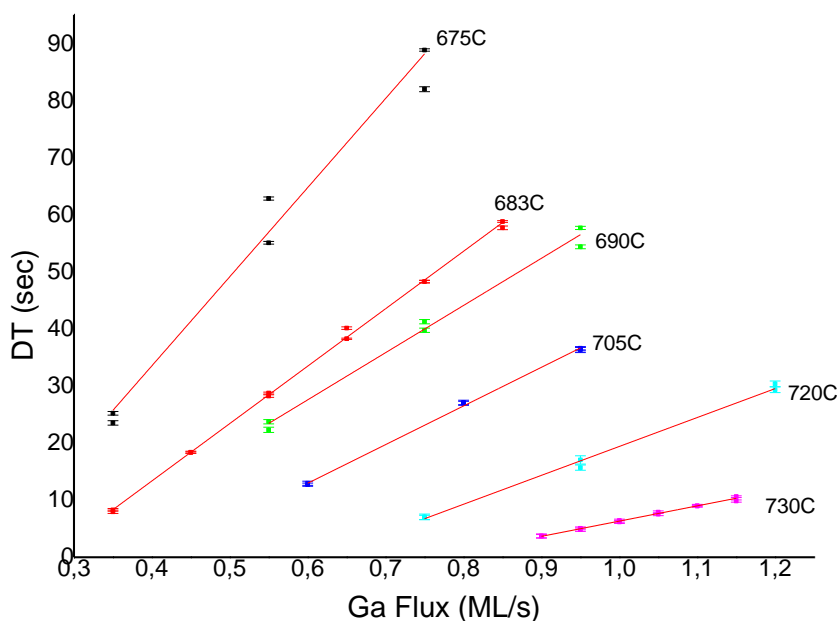


Παρατηρούνται δύο τοπικά μέγιστα και υπολογίζοντας τη συνολική ποσότητα Ga που έχει εναποτεθεί στην επιφάνεια ως εκείνο το σημείο (ως γινόμενο ροής επί τον χρόνο) βρίσκουμε ότι το πρώτο μέγιστο παρατηρείται για περίπου 1/3ML ενώ το δεύτερο για περίπου 5/6ML. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στην προτίμηση των εισερχομένων ατόμων Ga να καταλάβουν συγκεκριμένες πλεγματικές θέσεις, με αποτέλεσμα τη στιγμιαία δημιουργία μιας σχετικά περιοδικής και άρα πιο «ανακλαστικής» επιφάνειας, την οποία εμείς παρατηρήσαμε σαν μέγιστο στη φωτεινότητα. Τα δύο τοπικά ελάχιστα παρατηρούνται για περίπου 1/6ML και 2/3ML αντίστοιχα. Το ολικό ελάχιστο που φαίνεται, αντιστοιχεί σε ποσότητα περίπου ίση με 2,3-2,4ML Ga σε πολύ καλή συμφωνία με το μοντέλο για το bilayer που προτάθηκε από τους J. E. Northrup et al. [1] το οποίο προτείνει ως ενεργειακά σταθερότερη δομή ένα bilayer που θα περιέχει συνολικά περίπου 2,3ML Ga.

Για τον υπολογισμό του ρυθμού εκρόφησης από το bilayer ακολουθήθηκε η παρακάτω μεθοδολογία. Σε όλα τα γραφήματα που παρουσίασαν δημιουργία droplets μετρήθηκε ο χρόνος που απαιτήθηκε ώστε αυτά να εκροφηθούν πλήρως. Έγινε

γράφημα για κάθε θερμοκρασία υποστρώματος, του χρόνου εκρόφησης ως προς την εισερχόμενη ροή Ga και προσαρμόστηκε στα δεδομένα ευθεία ελαχίστων τετραγώνων. Το σημείο τομής της με τον άξονα των x, αντιπροσωπεύει την εισερχόμενη ροή Ga για την οποία τα droplets χρειάζονται ακριβώς 0s για να εκροφηθούν ή, ειπωμένο διαφορετικά, οριακά δεν δημιουργούνται droplets. Σε εκείνη τη ροή ο ρυθμός εκρόφησης από το bilayer ανταγωνίζεται επακριβώς την εισερχόμενη ροή Ga.

Παρατίθεται και το σχετικό γράφημα που δείχνει συγκεντρωτικά τα δεδομένα για όλες τις θερμοκρασίες.



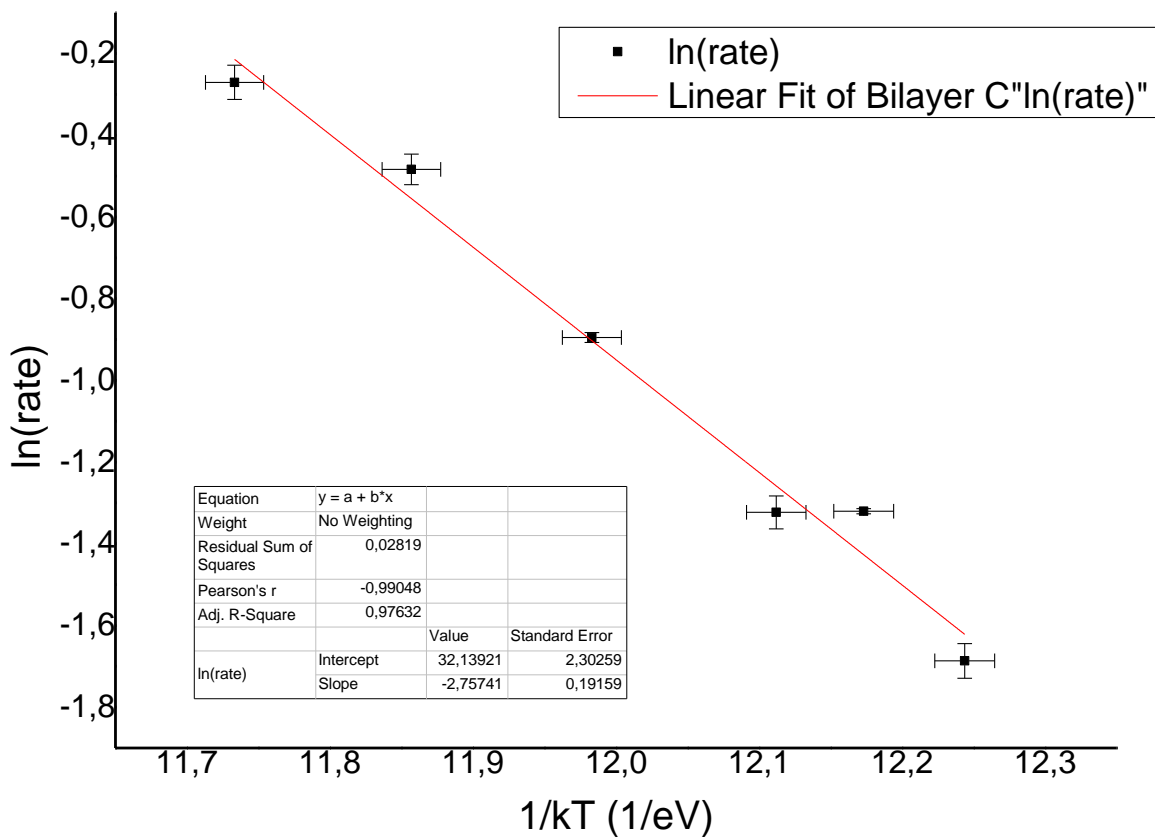
Με αυτόν τον τρόπο υπολογίστηκαν ρυθμοί εκρόφησης από το bilayer για τις διάφορες θερμοκρασίες υποστρώματος:

| Θερμοκρασία (°C) | Desorption Rate (ML/s) | Σφάλμα (ML/s) |
|------------------|------------------------|---------------|
| 675              | 0,1851                 | 0,0079        |
| 683              | 0,2671                 | 0,0017        |
| 690              | 0,2663                 | 0,0107        |
| 705              | 0,4085                 | 0,0050        |
| 720              | 0,6167                 | 0,0230        |
| 735              | 0,7628                 | 0,0319        |

Για να υπολογιστεί το activation energy για την εκρόφηση Ga από το bilayer, έπρεπε πρώτα να μετρηθεί η σχέση μεταξύ της ρυθμισμένης θερμοκρασίας της βάσης στήριξης του υποστρώματος (την οποία ρυθμίζαμε εμείς) και της πραγματικής θερμοκρασίας του υποστρώματος, η οποία μετρήθηκε με πυρόμετρο. Αφού υπολογίστηκε η πραγματική θερμοκρασία (οι μετρήσεις που έγιναν με το πυρόμετρο υπάρχουν στο παράρτημα) και έγινε η μετατροπή σε eV υπολογίστηκε ο φυσικός

λογαρίθμος του ρυθμού εκρόφησης και έγινε το διάγραμμα Arrhenius του λογαρίθμου του ρυθμού ως προς το αντίστροφο της ενέργειας (σε eV). Τα αποτελέσματα και το γράφημα Arrhenius φαίνονται παρακάτω:

| $T_{\text{actual}} (^{\circ}\text{C})$ | $1/kT (1/\text{eV})$ | $\Delta(1/kT) (1/\text{eV})$ | $\ln(\text{rate})$ | $\Delta\ln(\text{rate})$ |
|--|----------------------|------------------------------|--------------------|--------------------------|
| 674,65                                 | 12,2437              | 0,0209                       | -1,6867            | 0,0424                   |
| 680,14                                 | 12,1731              | 0,0209                       | -1,3202            | 0,0063                   |
| 684,95                                 | 12,1120              | 0,0208                       | -1,3231            | 0,0402                   |
| 695,26                                 | 11,9831              | 0,0206                       | -0,8953            | 0,0121                   |
| 705,57                                 | 11,8569              | 0,0205                       | -0,4834            | 0,0373                   |
| 715,87                                 | 11,7333              | 0,0203                       | -0,2707            | 0,0419                   |



Προσαρμόζοντας ευθεία ελαχίστων τετραγώνων, παίρνουμε από την κλίση το activation energy για εκρόφηση Ga από το άνω στρώμα του bilayer να ισούται με:

$$E = 2,76\text{eV} \pm 0,19\text{eV}$$

### 3.3 Ανάλυση για τα droplets

Για τα droplets προτάθηκε αρχικά μια παρόμοια διαδικασία με το bilayer. Με την αρχική υπόθεση ότι το bilayer δεν συμμετέχει καθόλου στο φαινόμενο και ότι όλη η εκρόφηση συμβαίνει από τα droplets, έως ότου αυτά εξαφανιστούν πλήρως, η αρχική σκέψη ήταν η εξής:

Εάν ορίσουμε  $\Delta T_1$  και  $\Delta T_2$  τους χρόνους δημιουργίας και εκρόφησης των droplets και  $F$  και  $k_{dr}$  την εισερχόμενη ροή και την εκροφώμενη ροή  $G_a$  αντίστοιχα, είναι εύλογη η σχέση:  $\Delta T_1 * (F - k_{dr}) = \Delta T_2 * k_{dr}$  η οποία εύκολα λύνεται ως προς το ζητούμενο  $k_{dr} = \frac{\Delta T_1 * F}{\Delta T_1 + \Delta T_2}$ .

Δυστυχώς αυτό το μοντέλο αποδείχθηκε πολύ απλοϊκό και τα αποτελέσματα που έδωσε δεν ήταν αποδεκτά. Για πληρότητα το διάγραμμα Arrhenius και το activation energy που προκύπτει από αυτή τη μέθοδο υπάρχουν στο παράρτημα. Φάνηκε έτσι ότι ένα πιο σύνθετο μοντέλο ήταν απαραίτητο. Σύμφωνα με πιο αναλυτική προσέγγιση του ζητήματος από τους O. Brandt et al. [2], ο συνολικός μηχανισμός περιέχει ταυτόχρονα εκρόφηση από το bilayer και τα droplets καθώς και διάχυση  $G_a$  από τα droplets προς το bilayer για να αναπληρωθεί η ποσότητα  $G_a$  που χάνεται και να διατηρηθεί η δομή του bilayer.

Το βελτιωμένο μοντέλο στο οποίο καταλήξαμε είναι το εξής:

Ονομάζουμε:

- “**n**” την συνολική επιφάνεια του bilayer που καλύπτεται από droplets.
- “**k<sub>2</sub>**” και “**k<sub>dr</sub>**” τους ρυθμούς εκρόφησης από το bilayer και τα droplets αντίστοιχα.
- “**I**” την ένταση που μετράμε με τη φωτοδίοδο και “**I<sub>2</sub>**” την ένταση που μετράμε αμέσως πριν αρχίσουν να δημιουργούνται droplets, η οποία προέρχεται δηλαδή εξ’ ολοκλήρου από το ακάλυπτο bilayer.

Επίσης πρέπει να γίνουν οι παρακάτω υποθέσεις εργασίας:

- Ο ρυθμός διάχυσης από τα droplets στο bilayer είναι πολύ μικρός και παραλείποντάς τον έχω μικρό μόνο σφάλμα.
- Η επιφάνεια **n** αντιπροσωπεύει την επιφάνεια των droplets από την οποία έχω εκρόφηση. (δηλαδή τα droplets θεωρώ ότι είναι σχεδόν διδιάστατα).

Άρα η μεταβολή της επιφάνειας που καλύπτεται από droplets θα περιγράφεται ως:

$$\frac{dn}{dt} = -k_{dr}n - k_2(1 - n) = -(k_{dr} - k_2)n - k_2$$

και θεωρώντας ότι η ένταση που λαμβάνουμε στην οθόνη του RHEED έχει την παρακάτω σχέση με την κάλυψη (**n**) όπως προτάθηκε από τους O.Brandt et al. [2]

$$I = I_2 * e^{-bn} \Rightarrow \ln I = -bn + \ln I_2$$

Επιλύοντας την διαφορική εξίσωση ως προς  $n$  παίρνουμε

$$n = \left( \frac{e^{-c(k_{dr}-k_2)}}{k_{dr} - k_2} \right) e^{-(k_{dr}-k_2)t} - \frac{k_2}{k_{dr} - k_2}$$

και αντικαθιστώντας στη σχέση της έντασης  $I$  παίρνουμε

$$\ln I = \left( -b * \frac{e^{-c(k_{dr}-k_2)}}{k_{dr} - k_2} \right) e^{-(k_{dr}-k_2)t} - \frac{bk_2}{k_{dr} - k_2} + \ln(I_2)$$

Αυτό είναι το μοντέλο με το οποίο προσπαθήσαμε να προσεγγίσουμε το μηχανισμό εκρόφησης των droplets ώστε να υπολογίσουμε το ρυθμό εκρόφησης τους και να εξάγουμε το activation energy. Μετά από μελέτη της μονοτονίας της παραπάνω συνάρτησης βρίσκουμε ότι είναι αύξουσα με τα κοίλα προς τα κάτω. Το τελευταίο ισχύει με την προϋπόθεση ότι  $\frac{dn}{dt} < 0$  και  $k_{dr} > k_2$  και τα δύο λογικές απαιτήσεις για το φαινόμενο που παρατηρούμε.

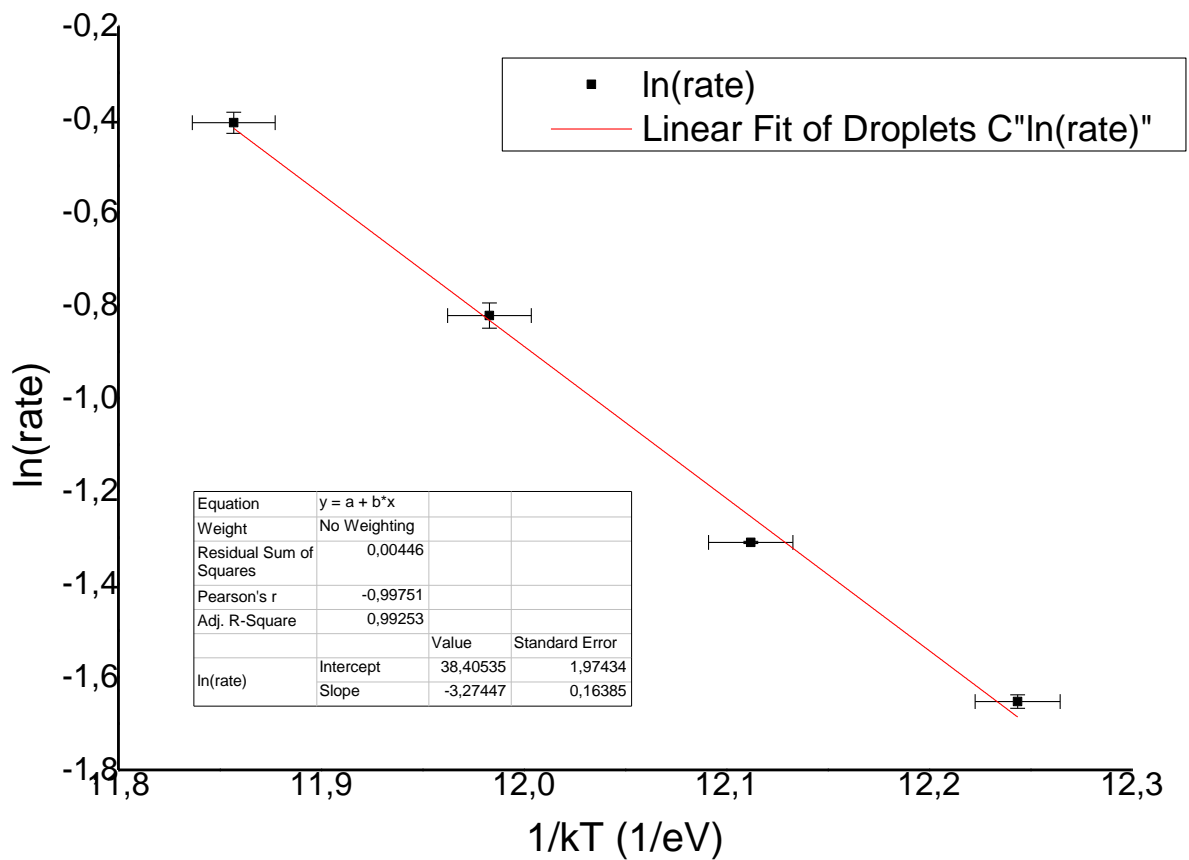
Μπορέσαμε έτσι να προσεγγίσουμε σε τέσσερα από τα έξι σύνολα μετρήσεων (στα άλλα δύο υπήρξε ασυμφωνία στην καμπυλότητα) το τμήμα της καμπύλης που περιγράφει την εκρόφηση droplet και bilayer με την παραπάνω συνάρτηση στο Origin. Δόθηκε σταθερή τιμή σε κάθε περίπτωση στο  $k_2$  το οποίο υπολογίσαμε όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι τιμές που πήραμε φαίνονται παρακάτω (μέσες τιμές των τιμών που προέκυψαν από κάθε γράφημα για τις τέσσερις θερμοκρασίες υποστρώματος)

| Θερμοκρασία (°C) | Desorption Rate (ML/s) | Σφάλμα (ML/s) |
|------------------|------------------------|---------------|
| 675              | 0,1915                 | 0,0028        |
| 690              | 0,2697                 | 0,0006        |
| 705              | 0,4393                 | 0,0119        |
| 720              | 0,6652                 | 0,0152        |

Οι ρυθμοί εκρόφησης προκύπτουν μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους για το bilayer, έστω και σας πρώτος έλεγχος αξιοπιστίας του μοντέλου που εφαρμόσαμε.

Παίρνοντας τον φυσικό λογάριθμο του κάθε ρυθμού και (μετά τη διόρθωση βάσει των στοιχείων του πυρομέτρου) μετατρέποντας την κάθε θερμοκρασία σε ενέργεια μπορούμε να πάρουμε τα παρακάτω στοιχεία και να κατασκευάσουμε το σχετικό διάγραμμα Arrhenius

| $T_{actual}$ (°C) | $1/kT$ (1/eV) | $\Delta(1/kT)$ (1/eV) | $\ln(rate)$ | $\Delta\ln(rate)$ |
|-------------------|---------------|-----------------------|-------------|-------------------|
| 674,65            | 12,2437       | 0,0209                | -1,6529     | 0,0146            |
| 684,95            | 12,1120       | 0,0208                | -1,3106     | 0,0023            |
| 695,26            | 11,9831       | 0,0206                | -0,8225     | 0,0272            |
| 705,57            | 11,8569       | 0,0205                | -0,4077     | 0,0228            |



Από το παραπάνω διάγραμμα και προσεγγίζοντας τα σημεία με ευθεία ελαχίστων τετραγώνων, προκύπτει από την κλίση το activation energy για εκρόφιση Ga από droplets:

$$E = 3,27\text{eV} \pm 0,16\text{eV}$$

## 4. Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Όσον αφορά την μετρητική διάταξη που κατασκευάστηκε σε αυτή την εργασία, πρόκειται, όπως φάνηκε και από την ανάλυση της, για μια συσκευή μεγάλης ακρίβειας, ικανή να επιτελέσει τον σκοπό για τον οποίο κατασκευάστηκε. Όπως αποδείχτηκε κατά τις πειραματικές μετρήσεις, η διάταξη της φωτοδιόδου έχει αρκετά καλή διακριτική ικανότητα και κέρδος ώστε να αναδειξεί όλα τα ενδιαφέροντα σημεία κατά την επιταξιακή ανάπτυξη που δεν μπορούν να διακριθούν στην οθόνη του RHEED δια γυμνού οφθαλμού. Επίσης η απόφαση να συμπεριληφθεί βαθυπερατό φίλτρο στη διάταξη δικαιώθηκε όταν πάρθηκαν οι πρώτες μας μετρήσεις. (για σύγκριση υπάρχει στο παράρτημα σχετικό γράφημα). Συνολικά πρόκειται για μια ευαίσθητη συσκευή η οποία μένει στον εξοπλισμό του εργαστηρίου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μελλοντικά για μετρήσεις στο RHEED που υπερβαίνουν τα όρια αυτής της εργασίας. Για παράδειγμα θα είχε ενδιαφέρον να εξεταστεί η χρήση της για *in situ* καταγραφή της κατασκευαζόμενης δομής σε πραγματικές συνθήκες επιταξίας, όπου το δείγμα θα περιστρέφεται. Επίσης μια πρόταση που μπορεί να βελτιώσει την ευκολία χρήσης της συσκευής είναι η σύνδεση της φωτοδιόδου με την οθόνη μέσω οπτικής ίνας, παρακάμπτοντας έτσι την ανάγκη για μια βαριά βάση που θα φέρει τη φωτοδίοδο (στο περίβλημά της) και διευκολύνοντας την αλλαγή του σημείου της οθόνης πάνω στο οποίο εστιάζει η διάταξη.

Εστιάζοντας τώρα στα δεδομένα που πήραμε, αυτά δείχνουν να επαληθεύουν τις βιβλιογραφικές πηγές τις οποίες συμβουλευτήκαμε. Συγκεκριμένα παρατηρούμε, όπως προβλέπει το μοντέλο των J. E. Northrup et al. [1] δημιουργία bilayer και έπειτα νησίδων που συγκεντρώνουν μάζα γαλλίου και διαμορφώνονται σε σταγονίδια (όταν το επιτρέπουν οι συνθήκες), ενώ συμφωνούν οι παρατηρήσεις μας και στην συνολική ποσότητα γαλλίου που περιέχεται στο bilayer, ίση με περίπου 2,3-2,4ML γαλλίου. Σχετικά με τους υπολογισμούς των ενεργειών ενεργοποίησης, τα αποτελέσματα στα οποία καταλήξαμε είναι  $E = 2,76\text{eV} \pm 0,19\text{eV}$  για την εκρόφηση από το άνω στρώμα του bilayer, σε πολύ καλή συμφωνία με αποτελέσματα που δημοσιεύθηκαν από τους B. Heying et al. [3] οι οποίοι κατέληξαν στην τιμή 2,832eV μετά από ανάλυση πειραμάτων επιταξίας GaN, από τους S. Choi et al. [4] που με *in situ* φασματοσκοπική ελλειψομετρία κατέληξαν στην τιμή  $2,81\text{eV} \pm 0,12\text{eV}$  και από τους G. Bruno et al. [5] οι οποίοι με την ίδια τεχνική ελλειψομετρίας κατέληξαν στην τιμή  $2,85\text{eV} \pm 0,02\text{eV}$ .

Όσον αφορά την εκρόφηση από τα droplets υπολογίζουμε  $E = 3,27\text{eV} \pm 0,16\text{eV}$ . Παίρνοντας δεδομένα για την τάση ατμών γαλλίου από bulk γάλλιο [14] και κάνοντας το διάγραμμα Arrhenius βρίσκουμε ενέργεια ενεργοποίησης ίση με  $E = 2,9017\text{eV} \pm 0,0054\text{eV}$  (υπάρχει σύντομη παρουσίαση στο παράρτημα). Το αποτέλεσμα λοιπόν είναι ανέλπιστα καλό δεδομένου του σχετικά απλού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε, αφού το σφάλμα των μετρήσεών μας συμπεριλαμβάνει τη βιβλιογραφική τιμή, την οποία υπερεκτιμήσαμε μόνο κατά 12,8%.

## 5. Βιβλιογραφία

- 1) J. E. Northrup, J. Neugebauer, R. M. Feenstra, A. R. Smith, “Structure of GaN(0001): The laterally contracted Ga bilayer model”, *Physical Review B* Vol. 61, Iss. 15 — 15 April 2000
- 2) O. Brandt, Yue Jun Sun, L. Däweritz K.H. Ploog, “Ga adsorption and desorption kinetics on M-plane GaN”, *Physical Review B* Vol. 69, Iss. 16 — 15 April 2004
- 3) B. Heying, R. Averbeck, L.F. Chen, E. Haus, H. Riechert, J.S. Speck, “Control of GaN surface morphologies using plasma-assisted molecular beam epitaxy”, *Journal of Applied Physics* 88, July 2000
- 4) S. Choi, T. Kim, H. O. Everitt, A. Brown, M. Losurdo, G. Bruno, A. Moto, “Kinetics of gallium adlayer adsorption/desorption on polar and nonpolar GaN surfaces”, *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena* 25, May 2007
- 5) G. Bruno, M. Losurdo, T. Kim, A. Brown, “Adsorption and desorption kinetics of Ga on GaN(0001): Application of Wolkenstein theory”, *Physical Review B* Vol. 82, Iss. 7 — 15 August 2010
- 6) G. Mula, C. Adelman, S. Moehl, J. Oullier, B. Daudin, “Surfactant effect of gallium during molecular-beam epitaxy of GaN on AlN (0001)”, *Physical Review B* Vol. 64, Iss. 19 — 15 November 2001
- 7) S. Valdueza-Felip, E. Bellet-Amalric, A. Núñez-Cascajero, Y. Wang, M.-P. Chauvat, P. Ruterana, et al., “High In-content InGaN layers synthesized by plasma-assisted molecular-beam epitaxy: Growth conditions, strain relaxation, and In incorporation kinetics”, *Journal of Applied Physics* 116, December 2014
- 8) A. Georgakilas, Ng Hock Min, P. Komninou (2006) "Plasma-assisted molecular beam epitaxy of III–V nitrides" excerpted from "Nitride Semiconductors: Handbook on Materials and Devices", Wiley-VCH (pp.107-191)
- 9) Texas Instruments (Burr-Brown) Application Bulletin SBOA-035 “Photodiode monitoring with op-amps”
- 10) Texas Instruments (Burr-Brown) Application Bulletin SBOA-061 “Designing photodiode amplifier circuits with OPA128”
- 11) X. Χαλκιάς, Γ. Παπανάνος (1987) “Σχεδίαση αναλογικών φίλτρων”, Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία



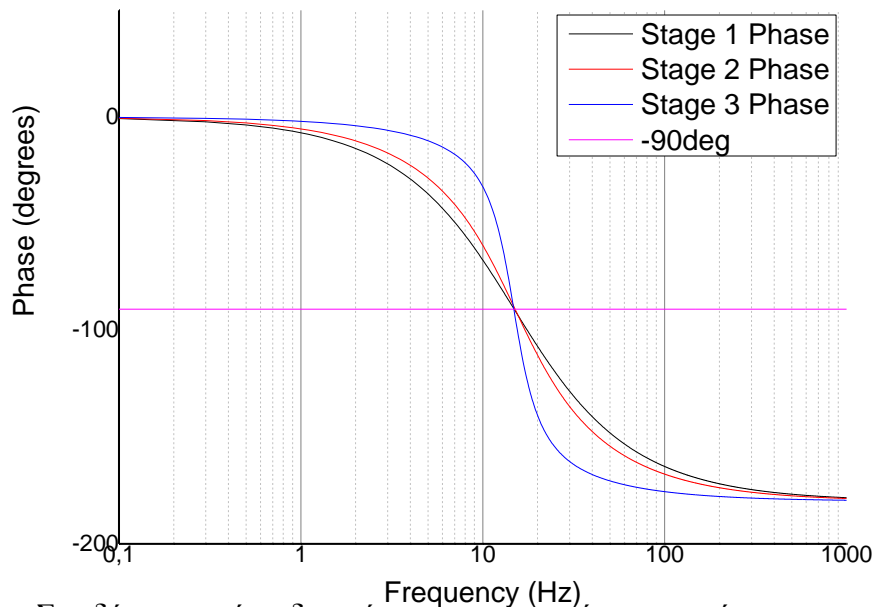
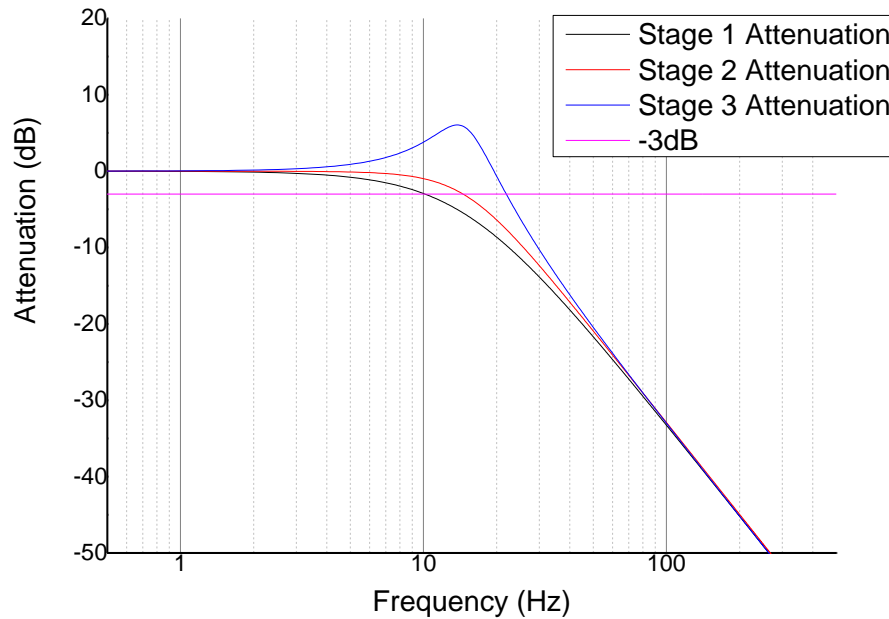
- 12) P. Horowitz, W. Hill (1989) "The art of electronics" (2<sup>nd</sup> edition), Cambridge University Press (pp.263-283)
- 13) T. Kugelstadt, "Active filter design techniques" excerpted from "Op-amps for everyone", Texas Instruments, Literature number SLOD006A
- 14) "The characterization of High Temperature Vapors", ed. J. Margrave, John Wiley & Sons, New York, 1967



# Παράρτημα

Εδώ έχουν προστεθεί κάποια διαγράμματα και επεξηγήσεις που κρίθηκε σκόπιμο να συμπεριληφθούν στην εργασία για πληρότητα της παρουσίασης.

**Διαγράμματα απόκρισης πλάτους και φάσης για τις τρεις βαθμίδες του φίλτρου ξεχωριστά**



Στα δύο παραπάνω διαγράμματα, που προέκυψαν από την προσομοίωση φαίνεται κάτι που αναφέρθηκε και στην ανάλυση του φίλτρου, ότι η πρώτη βαθμίδα είναι τύπου Bessel, η δεύτερη τύπου Butterworth και η τρίτη τύπου Chebyshev. Στο πρώτο διάγραμμα φαίνεται και η λίγο διαφορετική συχνότητα αποκοπής της κάθε βαθμίδας.

### Εύρεση σφάλματος στο σημείο τομής δύο ευθειών

Οι υπολογισμοί που ακολουθούν δίνουν το σφάλμα στη  $x$  συνιστώσα του σημείου τομής δύο ευθειών. Χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των σφαλμάτων στους χρόνους εκρόφησης του bilayer και των droplets κατά την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων. Οι χρόνοι υπολογίστηκαν σαν διαφορές δύο χρονικών σημείων τα οποία προέκυψαν από προσέγγιση των καμπυλών των μετρήσεων με ευθείες κοντά στα σημεία αλλαγής της κλίσης.

Έχω δύο ευθείες, έστω  $y_1=ax+b$  και  $y_2=cx+d$

Η  $x$  συνιστώσα του σημείου τομής τους δίνεται από το

$$ax + b = cx + d \implies x = \frac{d - b}{a - c}$$

και το σφάλμα της υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial d}\right)^2 \Delta d^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial b}\right)^2 \Delta b^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial a}\right)^2 \Delta a^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial c}\right)^2 \Delta c^2}$$

Όπου:

$$\frac{\partial x}{\partial d} = \frac{\partial}{\partial d} \left( \frac{d}{a-c} - \frac{b}{a-c} \right) = \frac{1}{a-c}$$

$$\frac{\partial x}{\partial b} = \frac{\partial}{\partial b} \left( \frac{d}{a-c} - \frac{b}{a-c} \right) = -\frac{1}{a-c}$$

$$\frac{\partial x}{\partial a} = \frac{\partial}{\partial a} [(d-b)(a-c)^{-1}] = (d-b) \frac{\partial (a-c)^{-1}}{\partial a} = -\frac{(d-b)}{(a-c)^2}$$

$$\frac{\partial x}{\partial c} = \frac{\partial}{\partial c} [(d-b)(a-c)^{-1}] = (d-b) \frac{\partial (a-c)^{-1}}{\partial c} = \frac{(d-b)}{(a-c)^2}$$

Άρα:

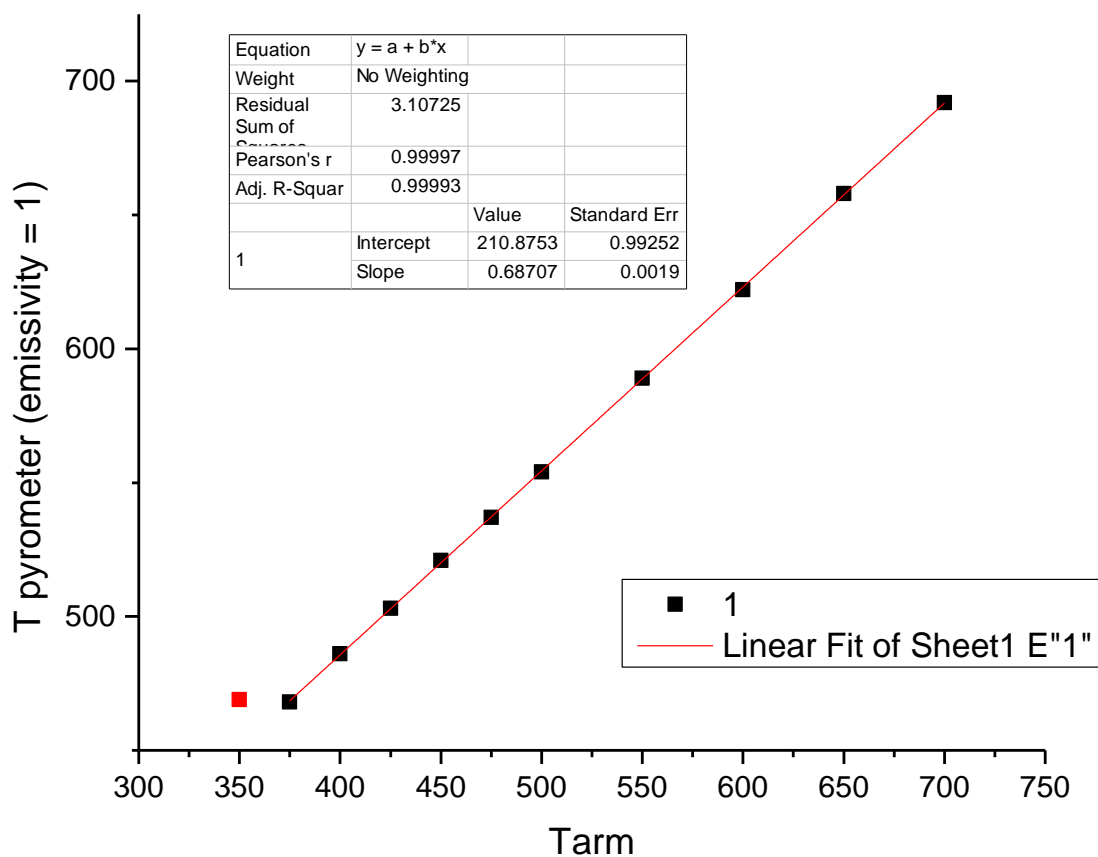
$$\left(\frac{\partial x}{\partial d}\right)^2 = \left(\frac{\partial x}{\partial b}\right)^2 = \frac{1}{(a-c)^2}$$

$$\left(\frac{\partial x}{\partial a}\right)^2 = \left(\frac{\partial x}{\partial c}\right)^2 = \frac{(d-b)^2}{(a-c)^4}$$

Άρα τελικά:

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{1}{(a-c)^2}\right) (\Delta d^2 + \Delta b^2) + \left(\frac{(d-b)^2}{(a-c)^4}\right) (\Delta a^2 + \Delta c^2)}$$

## Μετρήσεις πυρομέτρου και συσχετισμός της ρυθμισμένης θερμοκρασίας με την πραγματική θερμοκρασία του υποστρώματος

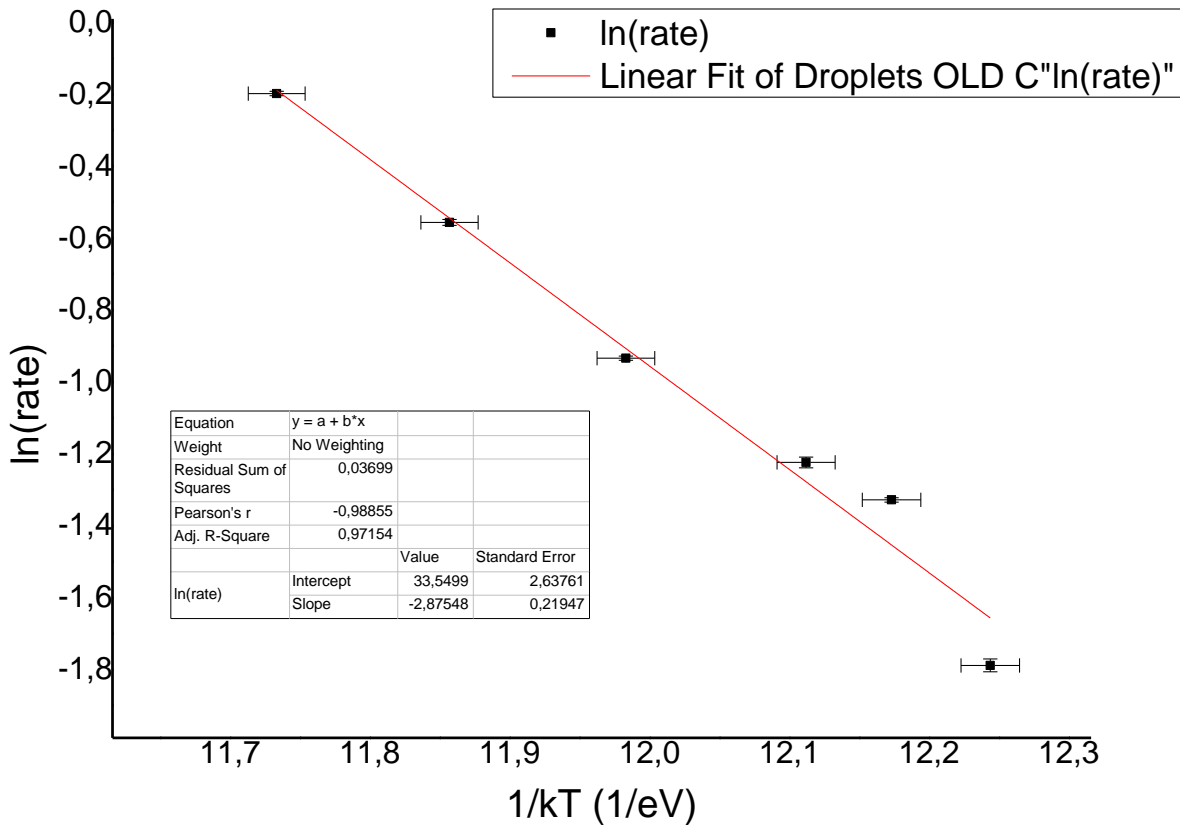


Από τις μετρήσεις που πήραμε με πυρόμετρο καταλήξαμε ότι η πραγματική θερμοκρασία του υποστρώματος έχει την παρακάτω σχέση με τη θερμοκρασία του substrate holder.

$$T_{\text{actual}} = 0.687 \cdot T_{\text{arm}} + 210.9$$

Αυτή η εξίσωση μας έδωσε τη δυνατότητα να διορθώσουμε για τις διαφορές που προκύπτουν λόγω της απόστασης του αισθητήρα θερμοκρασίας από το υπόστρωμα και να εξάγουμε ρεαλιστικά διαγράμματα Arrhenius. Η διαφορά στην πραγματική θερμοκρασία σε σχέση με αυτή που ρυθμίζουμε προέρχεται από το γεγονός ότι ο αισθητήρας θερμοκρασίας δεν βρίσκεται σε επαφή με το υπόστρωμα, καθώς αυτό είναι απαραίτητο να μπορεί να περιστραφεί

**Γράφημα Arrhenius και activation energy για την εκρόφιση Ga από τα droplets σύμφωνα με το πρώτο απλοϊκότερο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε**

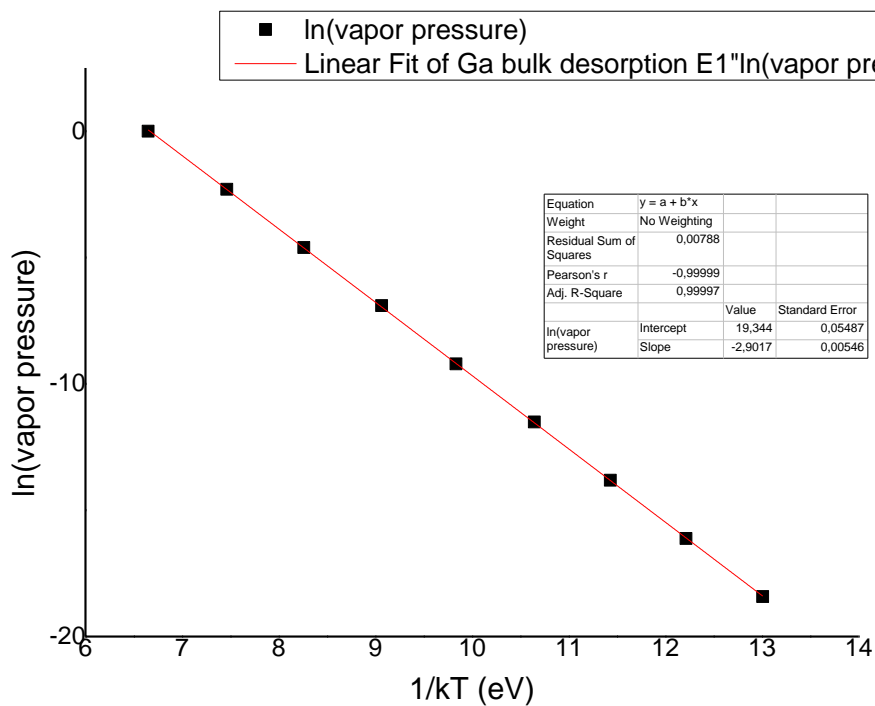


$$E = 2,88\text{eV} \pm 0,22\text{eV}$$

Αυτή η ανάλυση έδωσε τιμή για το activation energy εκρόφισης από τα Droplets πολύ κοντά σε αυτή που υπολογίστηκε για το bilayer. Θεωρώντας ότι εκρόφιση συμβαίνει μόνο από τα droplets μέχρι αυτά να εξαφανιστούν παίρνουμε ένα αποτέλεσμα που αντιπροσωπεύει και τις δύο δομές ενώ λανθασμένα το αποδίδουμε μόνο στη μία.

## Γράφημα Arrhenius και activation energy για την εκρόφιση Ga από bulk Ga από βιβλιογραφικές τιμές.

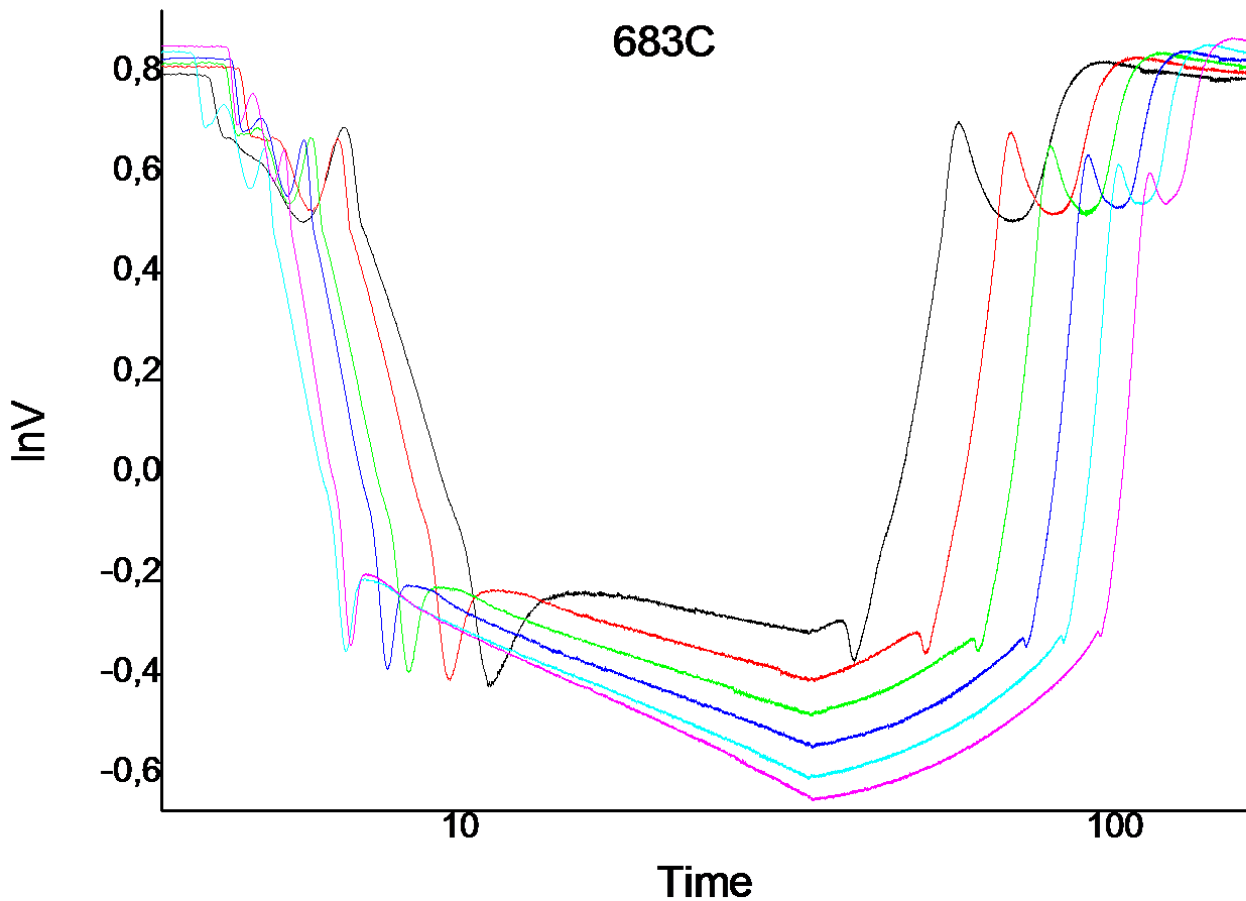
Αυτά τα δεδομένα χρειάστηκαν για να γίνει ένας τελικός έλεγχος και σύγκριση των αποτελεσμάτων στα activation energy που υπολογίσαμε. Αφορούν εκρόφιση γαλλίου από bulk γάλλιο και τα πήραμε υπό μορφή τάσης ατμών [14]. Παίρνοντας τον φυσικό λογάριθμο, μετατρέποντας τις αντίστοιχες θερμοκρασίες σε ενέργεια (eV) και κάνοντας το σχετικό γράφημα Arrhenius έχουμε τη θεωρητική πρόβλεψη για το activation energy.



Το activation energy προκύπτει ίσο με  $2,9017\text{eV} \pm 0,0054\text{eV}$ .

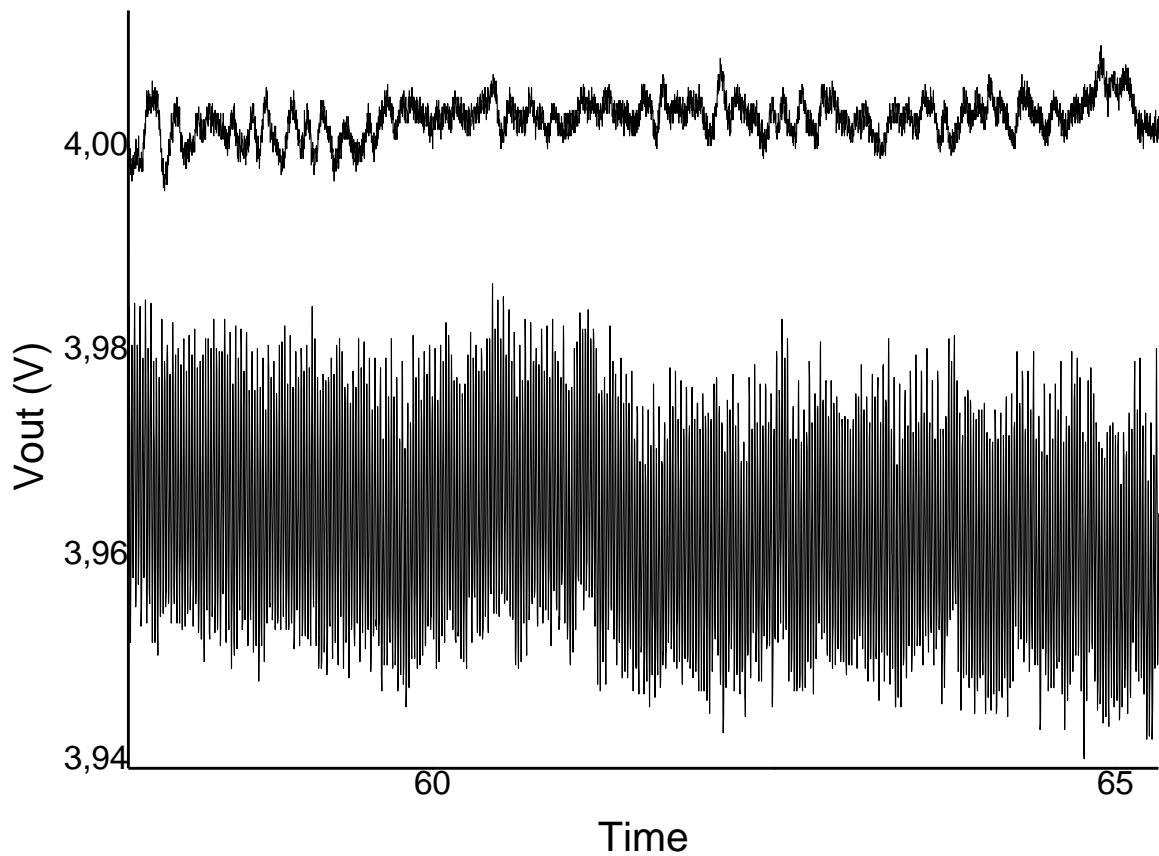
**Όλες οι καμπύλες που προέκυψαν για θερμοκρασία 683°C.**

Φαίνεται η αύξηση του χρόνου δημιουργίας και εκρόφησης των droplets καθώς αυξάνεται η εισερχόμενη ροή Ga. (με μαύρο χρώμα απεικονίζεται η μικρότερη ροή και με μωβ η μεγαλύτερη) Φαίνεται αφ' ενός από τη φωτεινότητα η δημιουργία του bilayer, καθώς η φωτεινότητα σταματάει περίπου στο ίδιο ύψος πριν ξεκινήσει η δημιουργία των droplets. Αφ' ετέρου φαίνεται η συσσώρευση ολοένα και μεγαλύτερης ποσότητας Ga στα droplets για τις μεγαλύτερες ροές Ga, κάτι που φαίνεται από την όλο και μικρότερη τιμή στην οποία φτάνει η φωτεινότητα. (λόγω της δημιουργίας ανομοιόμορφης επιφάνειας από την αύξηση του μεγέθους των droplets).





Σύγκριση τυχαίων μετρήσεων φωτεινότητας (πάνω σε RHEED spot χωρίς δείγμα) με χρήση του φίλτρου και χωρίς αυτό.



Εδώ φαίνεται μια καταγραφή τυχαίου σήματος από την οθόνη του RHEED κατά τις πρώτες ημέρες δοκιμών της συσκευής. Είναι προφανής η χρησιμότητα του φίλτρου.