

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ**

*ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΕΣΜΗΣ ΙΟΝΤΩΝ ΑΡΓΟΥ ΣΤΗΝ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ  
ΣΤΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ  
GaN, GaAs, SiC*

**Μεταπτυχιακή Εργασία**

*ΜΑΝΟΥΣΣΕΛΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ*

*ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2001*

Ευχαριστίες και σχόλια:

Η μεταπτυχιακή αυτή εργασία έγινε με αρωγή την υποτροφία του Ιδρύματος Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ) το οποίο και ευχαριστώ.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους:

Κωσταντινίδη Γιώργο για την επίβλεψη της εργασίας.

Σφεντουράκη Μιχάλη τεχνικό της ομάδας μικροηλεκτρονικής για την τεχνική στήριξη της εργασίας κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Το μεταπτυχιακό φοιτητή Κωστόπουλο Θανάση όπως και την Τσαγκαράκη Κατερίνα για τις μετρήσεις στο AFM. Την Καγιαμπάκη Μαρία για τις μετρήσεις των επαφών Schottky.

Τέλος τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής.

## Περιεχόμενα

ΣΕΛ.

Περιεχόμενα	
Γενική Εισαγωγή	1
<b><u>Κεφάλαιο 1 Θεωρία ιοντικής χάραξης</u></b>	3
1.1 Εισαγωγή	4
1.2 Υπολογισμός του Sputtering yield	6
1.3 Εφαρμογές του Ion Gun σε διαδικασίες processing	20
1.4 Προβλήματα που προέρχονται από τη χάραξη ιοντικής δέσμης	21
1.5 Βιβλιογραφικές αναφορές κεφαλαίου	24
<b><u>Κεφάλαιο 2 Πειραματική διάταξη</u></b>	25
2.1 Εισαγωγή	26
2.2 Συσκευή ιοντικής δέσμης	26
2.3 Περιγραφή της συσκευής και λειτουργία της	30
2.3 Βιβλιογραφικές αναφορές κεφαλαίου	35
<b><u>Κεφάλαιο 3 Πειραματικά αποτελέσματα</u></b>	36
3.1 Εισαγωγή	37
3.2 Συνοπτικός πίνακας εκθέσεων	37
3.3 Μορφολογική μελέτη σε δείγματα III-V Ημιαγωγών	39
3.3.1 GaN	39
3.3.2 SiC	43
3.3.3 SiC και GaN	44
3.3.4 GaAs	45
3.4 Μέτρηση ρυθμών χάραξης	47
3.4.1 GaN	47
3.4.1.1 Modeling ιοντικής χάραξης	54
3.4.2 GaAs	56
3.4.3 SiC	59
3.4.4 Συγκριτικά αποτελέσματα χάραξης σε GaN και GaAs	60
3.5 Μελέτη ηλεκτρικών παραμέτρων μετά από έκθεση σε ιοντική δέσμη Ar	61
3.5.1 Μετρήσεις ειδικής αντίστασης ωμικών επαφών σε $n^+$ GaAs	61
3.5.2 Μελέτη της επίδρασης ιοντικής δέσμης Ar στη συμπεριφορά επαφής μετάλλου ημιαγωγού ( GaAs) σε επαφές Schottky GaAs	69
3.5.3 Κατασκευή HEMT GaN με βύθιση ωμικών επαφών	76
3.6 Βιβλιογραφικές αναφορές κεφαλαίου	78
<b><u>4. Συμπεράσματα</u></b>	79
<b><u>5. Παράρτημα ; Οδηγίες Χειρισμού συσκευής</u></b>	81

## Γενική εισαγωγή:

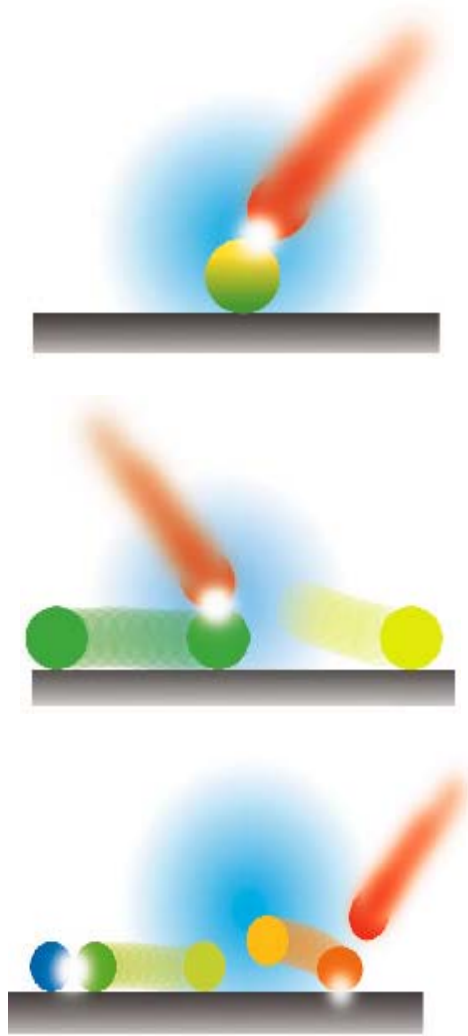
Η εργασία αυτή πραγματεύεται την δυνατότητα επεξεργασίας ημιαγωγικών επιφανειών με συσκευή εκτόξευσης ιόντων, ( ion gun ). Κύριο θέμα της εργασίας είναι η επίδραση της τεχνικής αυτής στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ωμικών και ανορθωτικών επαφών σε ημιαγωγούς III-arsenides. Επίσης μελετήθηκε η επίδραση της τεχνικής στη μορφολογία της επιφάνειας των σύνθετων ημιαγωγών SiC και GaN. Κατ'αρχήν καθορίστηκαν οι αρχικές συνθήκες λειτουργίας της συσκευής Ion Tech 3cm FC που είναι τοποθετημένη στο θάλαμο κενού του εξαχνωτή BJD 1800 με χρήση Αργού (Ar). Στη συνέχεια διαμορφώθηκαν και βελτιστοποιήθηκαν «συνταγές» με στόχο την ενσωμάτωσή τους στην παραγωγική διαδικασία της ομάδας της Μικροηλεκτρονικής.

Τα επιμέρους κεφάλαια της εργασίας αναφέρονται σε:

1. Το πρώτο στην θεωρία της ιοντικής χάραξης, όπως αυτή έχει καταγραφεί στη βιβλιογραφία. Επίσης στους παράγοντες που επηρεάζουν την επεξεργασία των επιφανειών και στα προβλήματα που προκύπτουν κατά τη διάρκειά της. Τέλος με τα δεδομένα που έχουμε από τη βιβλιογραφία γίνεται μια προσομοίωση για τη χάραξη Mesa σε GaN.
2. Στο δεύτερο παραθέτουμε μια απλή περιγραφή της πειραματικής διάταξης, τα μέρη από τα οποία αποτελείται με μερικές γενικές αναφορές στη λειτουργία της. Επίσης το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στην περιγραφή του κάθε μέρους της συσκευής με λεπτομέρειες στην λειτουργία τους. Τέλος έχουμε μια αναφορά στις χρήσεις του ion gun σε σχέση με την κατεργασία ημιαγωγών in situ.
3. Στο τρίτο αρχικά παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα σε σχέση :
  - α) με τις μορφολογικές μεταβολές και για τις τρεις κατηγορίες ημιαγωγών (GaAs, GaN, SiC).
  - β) Τους ρυθμούς χάραξης σε GaAs και GaN . Στη συνέχεια παρατίθενται και αναλύονται τα πειραματικά αποτελέσματα από τη μελέτη της επίδρασης της τεχνικής αυτής στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ωμικών και ανορθωτικών επαφών σε ημιαγωγούς III-arsenides.
4. Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζεται η σύνοψη των αποτελεσμάτων και τα συμπεράσματα.

5. Τέλος στο παράρτημα υπάρχουν συμπληρωματικά οι οδηγίες χρήσης της συσκευής του Ion gun οι οποίες γράφτηκαν με τη βοήθεια του Manual της εταιρείας και βελτιώθηκαν κατά τα δοκιμαστικά πειράματα.

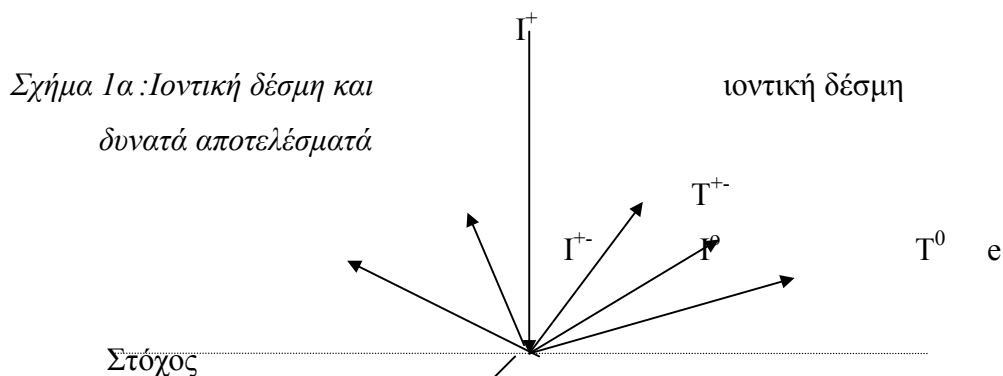
# Κεφάλαιο 1



Θεωρία ιοντικής χάραξης

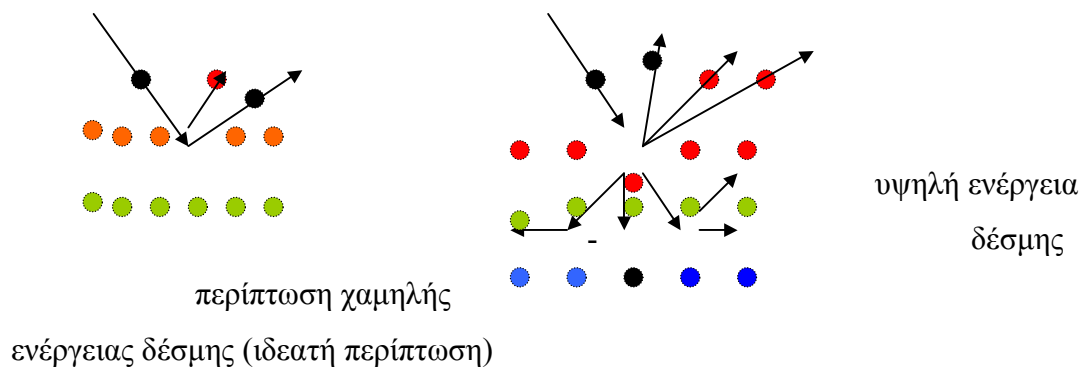
## 1.1 Εισαγωγή

Μια δέσμη ιόντων μεγέθους μερικών ατομικών μονάδων και ενέργειας μερικών εκατοντάδων eV μπορεί να εξάγει άτομα από την επιφάνεια ενός στερεού σώματος. Η τεχνική αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατεργασία ημιαγωγικών επιφανειών στη μικροηλεκτρονική. Η θεωρητική μελέτη για την αλληλεπίδραση της ιοντικής δέσμης με τα άτομα της επιφανείας του στόχου μπορεί να αναγνωρίσει τις κρίσιμες παραμέτρους που οδηγούν στα βέλτιστα πειραματικά αποτελέσματα. Όταν ένα ιόν συγκρουστεί με τη επιφάνεια ενός στερεού σώματος, η αλληλεπίδραση είναι αρκετά περίπλοκη και υπάρχουν περισσότερα του ενός αποτελέσματα. Εξω από τον κρύσταλλο, μπορεί να υπάρχουν ουδέτερα και φορτισμένα σωματίδια από τη δέσμη αλλά και ουδέτερα και φορτισμένα σωματίδια από το στόχο καθώς και ηλεκτρόνια. Μέσα στον κρύσταλλο λαμβάνουν χώρα διαδοχικές σκεδάσεις, που δημιουργούν μικροσκοπικές παγίδες μέσα στον κρύσταλλο (damage centers). Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο αν η ενέργεια της δέσμης είναι μεγάλη.

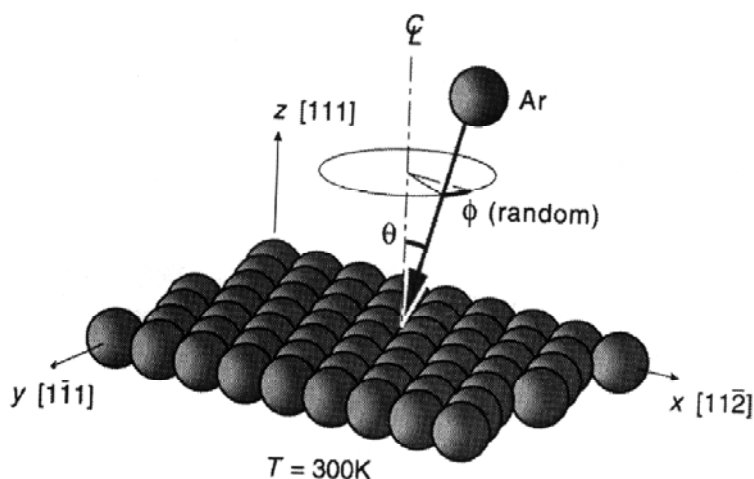


Σχήμα 1β: Ιοντική δέσμη

και άτομα του στόχου



Σχήμα 1γ: Ιοντική δέσμη και γωνίες πρόσπτωσης  $\theta$  και ακτινική  $\phi$



Ο ρυθμός χάραξης είναι τόσο μεγαλύτερος όσο μεγαλύτερη ενέργεια έχουν τα ιόντα της δέσμης, και επίσης όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητά της. Στην ιδεατή περίπτωση ελαστικής σκεδάσης ενός ιόντος μικρής ενέργειας, με ένα άτομο της επιφάνειας του στόχου, η ορμή μεταφέρεται από το ιόν στο άτομο και εξάγεται του κρυστάλλου όπως φαίνεται στο σχήμα 1α.

Από τη θεωρία των ελαστικών σκεδάσεων το ποσό της ενέργειας που μεταφέρεται είναι :

$$T=4M_1M_2/(M_1+M_2)^2E$$

όπου  $M_1$  και  $M_2$  είναι οι μάζες του ιόντος και του ατόμου της επιφάνειας αντίστοιχα ενώ  $E$  είναι η ενέργεια του ιόντος.

Για μεγάλη όμως ενέργεια δέσμης, το ιόν μεταφέρει μεγάλη ορμή στο άτομο του κρυστάλλου, με αποτέλεσμα δευτερογενείς σκεδάσεις με διπλανά άτομα, που οδηγούν αφενός στην εξαγωγή ιονισμένων ή ουδετέρων ατόμων του κρυστάλλου και αφετέρου στην εμφύτευση του ίδιου του ιόντος μέσα στον κρύσταλλο. Η πιο σημαντική παράμετρος στη χάραξη με ιοντική δέσμη επιφανειών, είναι ο αριθμός των ατόμων που εξέρχονται του κρυστάλλου ανα ιόν που χτυπάει το στόχο (Sputtering yield)  $S$ . Το sputtering yield εξαρτάται από το υλικό που χαράζεται, από το είδος των σωματιδίων που αποτελούν την ιοντική δέσμη, την ενέργεια τους, από τη γωνία πρόσπτωσης με το στόχο και τέλος από την πίεση του θαλάμου.

## 1.2 Υπολογισμός του Sputtering yield<sup>i-ii</sup>

Κατά την πρόσκρουση του ιόντος με τα επιφανειακά άτομα του στόχου, αυτά αναπηδούν προς τον κρύσταλλο με ενέργεια  $E_2$ .



Η πυκνότητα ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα όγκου αυτών έστω ότι είναι  $q(E_2)dE_2$ . Τα επιφανειακά αυτά άτομα συγκρούονται με άλλα άτομα του κρυστάλλου μεταφέροντας σ'αυτά με τη σειρά τους ενέργεια και η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέσα στον κρύσταλλο μειώνοντας το αρχικό ποσό ενέργειας. Υποθέτοντας ότι  $v(E_2, E')$  είναι ο αριθμός των ατόμων που η ενέργεια τους μειώθηκε από  $E_2$  σε  $E'$  τότε ο ολικός αριθμός των ατόμων που η ενέργειά τους μειώθηκε κατά αυτό το ποσό σε χρόνο 1sec είναι:

$$\int_{E'}^{\infty} q(E_2)v(E_2, E')dE_2$$

Ο μέσος ρυθμός μείωσης της ενέργειας ατόμου με ενέργεια  $E'$  είναι  $dE'/dt = v'(dE'/dx)$  όπου  $v'$  η ταχύτητα του ατόμου και  $dE'/dx$  ο ρυθμός μείωσης της ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής. Σε χρόνο  $dt$  το άτομο ενέργειας  $E'$  θα χάσει ποσό  $dE'$

$$dt = dE' / v' (dE'/dx)$$

Αν  $\rho(E', r)dE'd\Omega'$  είναι η ενεργειακή πυκνότητα των ατόμων από  $E'$  έως  $E'+dE'$  που κινούνται κατά σφαιρική γωνία  $d\Omega'$  στην διεύθυνση  $r$  τότε

$$\rho(E', r)dE'd\Omega' = (1/4\pi) \int_{E'}^{\infty} q(E_2)v(E_2, E')dE_2 dt d\Omega'$$

Η ροή  $\Phi(E', r')dE'd\Omega'$  που διασχίζει την επιφάνεια και σχηματίζει γωνία  $\theta$  με την ακτινική διεύθυνση δίδεται από τη σχέση:

$$\Phi(E', r')dE'd\Omega' = v'\rho(E', r)\cos\theta dE'd\Omega'$$

και ολοκληρώνοντας σε όλες τις ενέργειες και σε γωνία  $d\Omega'$ :

$$\Phi(E', r')dE'd\Omega' = (1/4\pi) \int_{E'}^{\infty} q(E_2)v(E_2, E') \cos\theta dE_2 dE' / (dE'/dx) d\Omega'$$

Θεωρώντας άπειρο στερεό σώμα και κόβοντας το στο μισό υπολογίζουμε τη ροή του sputtering έξω από τον κρύσταλλο, επίσης λαμβάνοντας υπόψη στους υπολογισμούς την επιφανειακή ενέργεια που συγκρατεί τα άτομα στην επιφάνεια θεωρώντας ότι  $E' \gg E_b$ . Αν υποθεθεί ότι  $v(E_2, E') = \eta E_2/E'$  (με  $\eta$  μια σταθερά της τάξεως της μονάδας). Αν επίσης θεωρηθεί ότι για χαμηλές ή μεσαίες ενέργειες σκέδασης η διάμετρος σκέδασης είναι  $D$  τότε η μείωση της ενέργειας θα λαμβάνει χώρα σε

απόσταση μερικά D ώστε :  $dE'/dx=E'/D$ . Κατά συνέπεια το παραπάνω ολοκλήρωμα γίνεται:

$$\Phi(E', r')dE'd\Omega' = (\eta D / 4\pi E'^2) \int_{E'}^{\infty} q(E_2) E_2 \cos \theta dE_2 dE' d\Omega'$$

Το ολοκλήρωμα αυτό, για όλο το ημισφαίριο μπροστά από τον κρύσταλλο και για όλες τις τιμές της ενέργειας  $E'$  από 0 έως  $\Lambda E_1$ . Όπου  $\Lambda$  ο παράγοντας  $4M_1M_2/(M_1+M_2)^2$  με  $E_1$  την ενέργεια του ιόντος που προσπίπτει πάνω στον κρύσταλλο.

Έξω από τον κρύσταλλο η ενέργεια γίνεται  $E$  με  $E'=E+E_b$  και από το νόμο ανάκλασης του Snell :

$$\Phi(E', \phi')d\Omega dE = \frac{\eta D \cos \phi}{4\pi(1 + E_b / E^3) E^2} \int_{E+E_b}^{\infty} E_2 q(E_2) dE_2 d\Omega dE$$

Αν θεωρηθεί η αλληλεπίδραση  $M_1$  και  $M_2$  δυναμικού :

$$V(r)=2E_r/e(Z_1Z_2)^{5/6}(a_0/r)^2$$

Όπου  $a_0$  είναι η ακτίνα του Bohr , όπου  $E_R$  η ενέργεια του Rydberg. Τότε η πυκνότητα γίνεται:

$$q(E_2)= \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{αν } E_2 > \Lambda E_1 \\ \frac{\pi^2 \alpha^2 n E_a \Lambda^{1/2} \phi_1}{8 E_1^{1/2} E_2^{3/2}} & \text{αν } E_2 < \Lambda E_1 \end{array} \right\}$$

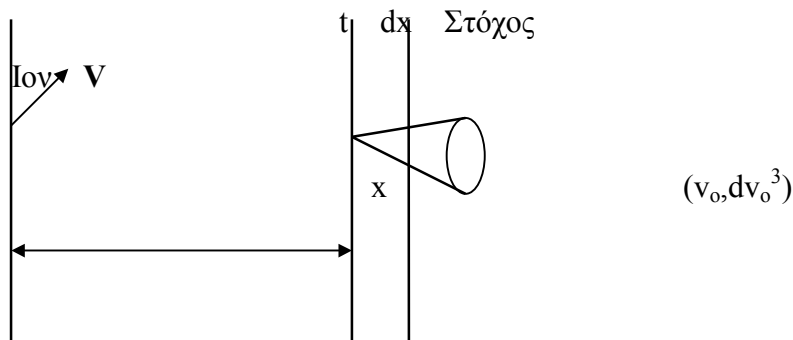
όπου  $\phi_1$  είναι η ροή των ιόντων ανά επιφάνεια ,  $n$  είναι η ατομική πυκνότητα, και  $\alpha=a_0(Z_1Z_2)^{-1/6}$   $E_a=2E_r(Z_1Z_2)^{-7/6}(M_1+M_2)/eM_2$  και η τελική τιμή του ολοκληρώματος θα είναι:

$$S = \frac{\pi^2 \alpha_o^2 n^{2/3} E_R}{8e} \frac{M_1 (Z_1 Z_2)^{5/6}}{E_b (M_1 + M_2)} \cos \theta^{-1}$$

Το αποτέλεσμα αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί προβλέπει εξάρτηση του sputtering yield από την προσπίπτουσα γωνία των ιόντων  $S \sim 1/\cos \theta$  , αλλά και εξάρτηση τόσο από την ατομική μάζα του ιόντος όσο και από την ατομική μάζα του στόχου. Τέλος προβλέπει εξάρτηση του  $S$  από την ενέργεια του ιόντος που προσπίπτει πάνω στον στόχο. Τα αποτελέσματα αυτά είναι επαλληθηεύτηκαν από πειραματικές μελέτες.

Μια παρόμοια θεωρητική μελέτη<sup>2</sup> μελετάει το S (sputtering yield) σε άμορφα στερεά. Σε αυτήν, ξεκινώντας από τη συνάρτηση μεταφοράς του Boltzman και λύνοντας την κάτω από τις συνθήκες που προαναφέρθηκαν εξάγονται αποτελέσματα συγκρίσιμα με αντίστοιχα πειραματικά . Η γεωμετρία της σκέδασης ατόμου που ξεκινάει από το επίπεδο  $x=0$  τη χρονική στιγμή  $t=0$  με διάνυσμα ταχύτητας  $\mathbf{v}$  είναι η παρακάτω:

$$x=0, t=0$$



Εαν  $G(x, \mathbf{v}_o, \mathbf{v}, t) d^3 v_o dx$  είναι ο μέσος αριθμός των ατόμων που κινούνται σε χρόνο  $t$  από ένα επίπεδο  $x$  στο  $x+dx$  με ταχύτητες από  $v_o$  έως  $v_o+dv_o$  και θεωρώντας το ολοκλήρωμα της συνάρτησης μεταφοράς :

$$F(x, \mathbf{v}_o, \mathbf{v}) = \int_0^{\infty} G(x, \mathbf{v}_o, \mathbf{v}) dt$$

όπου  $F(x, \mathbf{v}_o, \mathbf{v}) |_{v_o} d^3 v_o$  είναι ο ολικός αριθμός των ατόμων, τότε το Sputtering yield ορίζεται ως :

$$H(x, \mathbf{v}) = \int_0^{\infty} F(x, \mathbf{v}_o, \mathbf{v}) / v_{0x} / d^3 v_o$$

Όταν η πηγή βρίσκεται στο  $x=0$  και η επιφάνεια στόχος σε απόσταση  $x$ .

Συνυπολογίζοντας θέση, ενέργεια και προσκείμενη κατεύθυνση ως προς τον  $x$  άξονα τότε το Sputtering yield:

$S(E, \eta) = H(x=0, E, \eta)$  για back Sputtering

$S(E, \eta) = H(x=d, E, \eta)$  για Sputtering μέσω του επιπέδου στο  $x=d$

Δύο ακόμα συνθήκες χρειάζονται για να επιλυθεί: α) Η προσέγγιση ισχυρού δυναμικού για ελαστική σκέδαση και β) το δυναμικό της επιφάνειας το οποίο

συγκρατεί τα άτομα (δυναμικό συνοχής), που πρέπει να συνυπολογιστεί γιατί αλλάζει το ενεργειακό φάσμα του S. Το δυναμικό αυτό επιλέγεται σφαιρικό ώστε η ενέργεια που απαιτείται για να φύγει ένα άτομο από την επιφάνεια (ενέργεια συνοχής) να είναι ανεξάρτητη κατεύθυνσης. Τότε το αποτέλεσμα του ολοκληρώματος είναι:

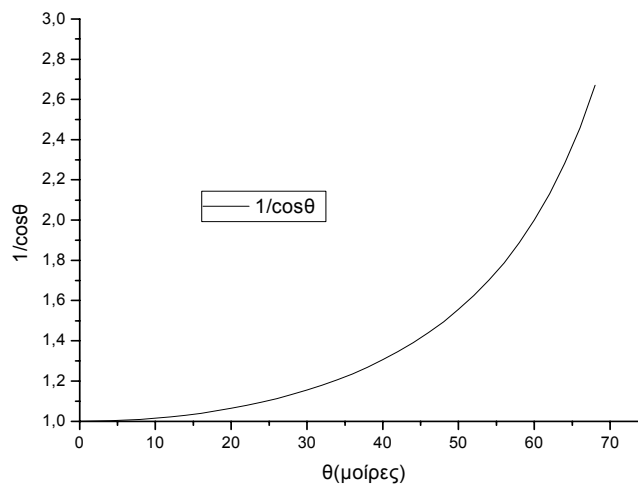
$$H(x,E,\eta)=3F(x,E,\eta)/4\pi^2NC_0E_b$$

Με N την πυκνότητα των ατόμων του στόχου, F(x,E,η) την ενέργεια που αποτίθεται σε πάχος dx στη θέση x, από ένα ιόν ενέργειας E. C<sub>0</sub> την σταθερά από την διάμετρο σκέδασης, E<sub>b</sub> την ενέργεια συνοχής του στόχου, και η ο παράγοντας κατευθυνσης. Με ένα ολοκλήρωμα πάνω στα x η ενέργεια εναπόθεσης στον στόχο είναι:

$$\int_{-\infty}^{\infty} F(x,E,\eta)dx=v(E)$$

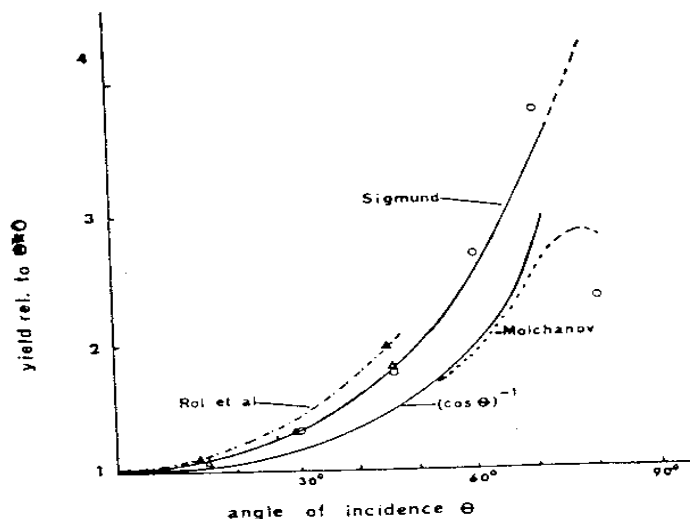
Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με αντίστοιχα πειραματικά για γωνίες πρόσπτωσης μέχρι και 70<sup>0</sup> όπως φαίνεται στα σχήματα 2-3 <sup>iii</sup>.

Σχήμα 2: S(θ)/K(θ) σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης στον στόχο



Σχήμα 3: S(θ)/K(θ) σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης στον στόχο

Σύγκριση θεωρητικής με πειραματικές καμπύλη

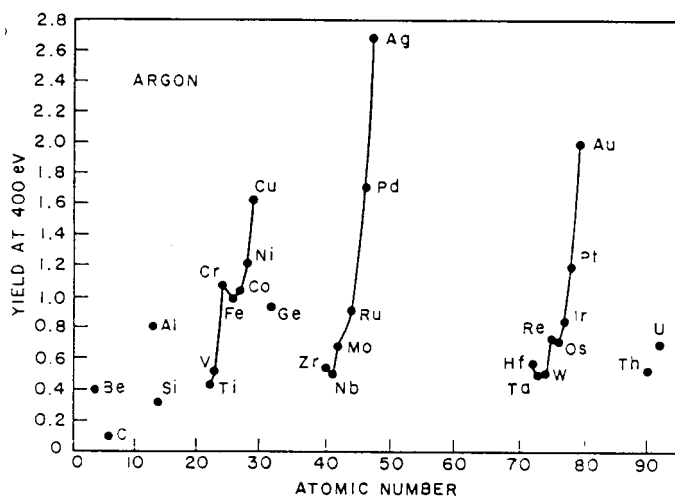


Εκτός από την παραπάνω συμφωνία του πειράματος με τη θεωρία για την εξάρτηση του sputtering yield ( $S$ ) από τη γωνία πρόσκρουσης της ιοντικής δέσμης με την επιφάνεια η θεωρία προβλέπει ακόμα για το  $S$  εξάρτηση από :

1. Το είδος του στόχου.

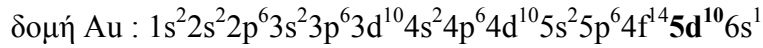
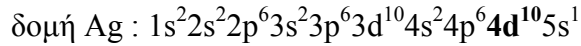
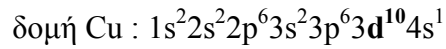
Αν ο στόχος είναι του ίδιου στοιχείου με την ιοντική δέσμη τότε η περίπτωση ονομάζεται self sputtering και η θεωρητική της επίλυση με την εξίσωση μεταφοράς Boltzman είναι λίγο διαφορετική. Αν ο στόχος είναι διαφορετικού στοιχείου τότε η εξάρτηση προέρχεται από τον ατομικό αριθμό του στοιχείου του στόχου όπως φαίνεται στο σχήμα 4 για δέσμη  $Ar^+ 400eV$ :

Σχήμα 4<sup>iv</sup>: Εξάρτηση του  $S$  από τον ατομικό αριθμό του στόχου



Παρατηρείται μια περιοδικότητα στο sputtering yield που χωρίζεται σε τρεις ομάδες, με μέγιστα στο χαλκό στον άργυρο και στο χρυσό. Αντίθετα ο άνθρακας και το πυρίτιο βρίσκονται πολύ χαμηλά και κατά συνέπεια η εικόνα αυτή προσφέρει μια ερμηνεία για το γιατί το SiC δεν χαράζεται εύκολα με ιοντική δέσμη. Η ερμηνεία της

περιοδικότητας αυτής έχει να κάνει με την δομή του κρυσταλλικού πλέγματος, για παράδειγμα και τα τρία πρώτα είναι fcc. Επιπρόσθετα τα τρία αυτά μέταλλα έχουν συμπληρώσει την 3d,4d,5d υποστοιβάδα με ηλεκτρόνια :



Από το σχήμα 2 παρατηρούμε ότι για τον άνθρακα το sputtering yield είναι το μικρότερο από όλα τα στοιχεία ( $S=0,1$  άτομα/ίόν) ενώ για τον άργυρο που είναι και το υψηλότερο ( $S=2,7$  1άτομα/ίόν) είναι 27 φορές μεγαλύτερο. Αν ο στόχος είναι κράμα δύο στοιχείων π.χ. Ni και Fe τότε επειδή το Ni χαράζεται γρηγορότερα από τον Fe τότε αρχικά, τα εξαγόμενα άτομα από το στόχο θα είναι πλουσιότερα σε Ni και ο στόχος πλουσιότερος σε Fe, κατόπιν όμως θα επέλθει ισορροπία στο ρυθμό χάραξης σαν να είναι ένα ομοιογενές σώμα.

## 2. Το είδος του στοιχείου βλήματος

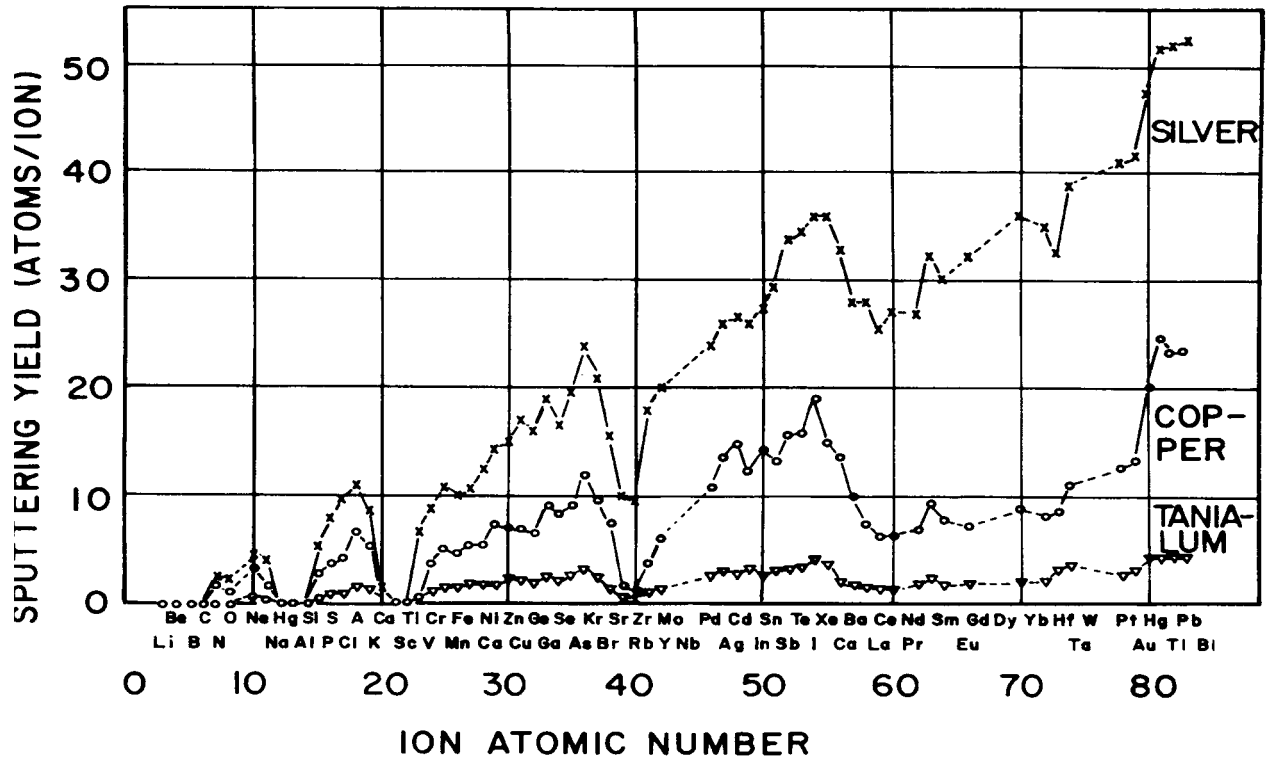
Από το σχήμα 5 βλέπουμε της εξάρτηση του sputtering yield από το είδος του ιόντος σε σχέση πάντα με το στόχο, για τα υλικά όπως ταντάλιο, χαλκός και άργυρος. Παρατηρείται ότι για τα ευγενή αέρια Ne, Ar, Kr, Xe έχουμε μέγιστα. Αυτό οφείλεται στη συμπλήρωση των φλοιών που σημαίνει ότι αυτά τα άτομα προσεγγίζουν καλύτερα το μοντέλο των ελαστικών σφαιρών που σκεδάζονται από τα άτομα του στόχου.

Τέλος αν βλήμα και στόχος είναι το ίδιο στοιχείο έχουμε την περίπτωση self sputtering όπου η μεταφορά ενέργειας είναι πλήρης:

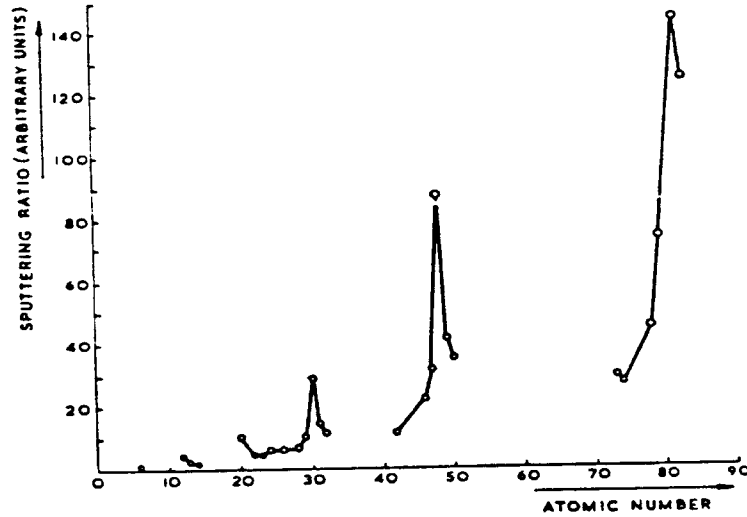
$$\text{με } M_1=M_2=M \text{ τότε : } T=4M_1M_2E/(M_1+M_2)^2=4EM^2/4M^2=E$$

και όπου παρατηρείται από το σχήμα 5 πάλι μια περιοδικότητα όπως και στην περίπτωση του σχήματος 4 με τα μέγιστα στους ίδιους ατομικούς αριθμούς:

*Σχήμα 5<sup>v</sup>: S σε συνάρτηση με τον ατομικό αριθμό του βλήματος για Cu, Ta, Ag*



Σχήμα 6<sup>vi</sup>: S σαν συνάρτηση του ατομικού αριθμού για Self Sputtering περίπτωση

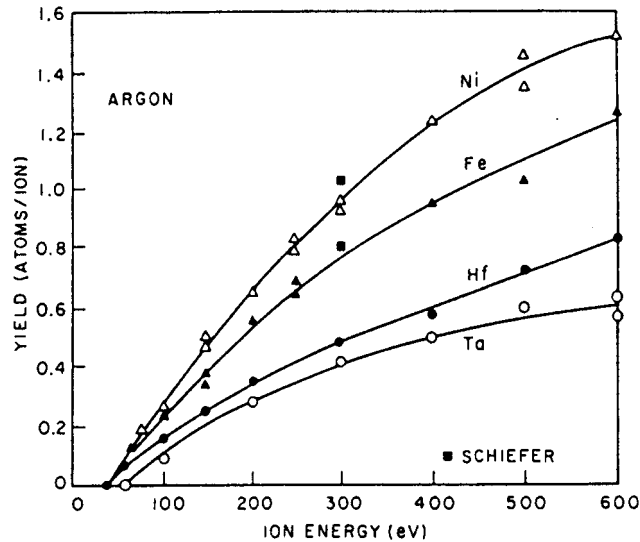


### 3. Την ενέργεια του βλήματος

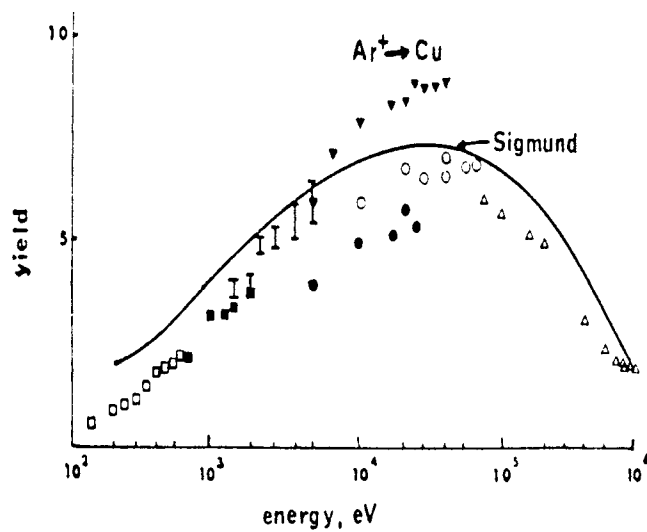
Ανάλογα το είδος του στόχου, άτομα εξέρχονται από τον κρύσταλλο σε σχέση με την ενέργεια του ιόντος βλήματος. Εξαγωγή παρατηρείται όταν η ενέργεια του ιόντος είναι από μερικά eV (Zn,Sb) μέχρι και MeV ανάλογα με το υλικό του στόχου. Στο σχήμα 6 παρατηρούμε τη συνάρτηση του Sputtering yield ανάλογα με την ενέργεια του ιόντος για διάφορους στόχους. Το μοντέλο των ελαστικών σφαιρών για sputtering ισχύει για χαμηλές ενέργειες ιοντικής δέσμης. Για ενέργειες πάνω από μερικά keV

έχουμε σκέδαση Rutherford. Στο σχήμα 8 απεικονίζεται η καμπύλη του S σε συνάρτηση της ενέργειας του ιόντος  $Ar^+$  για στόχο Cu.

Σχήμα 7<sup>vii</sup>: S σε σχέση με την ενέργεια της δέσμης



Σχήμα 8<sup>viii</sup>: S σε σχέση με την ενέργεια της δέσμης για μεγάλη ενέργεια για Cu

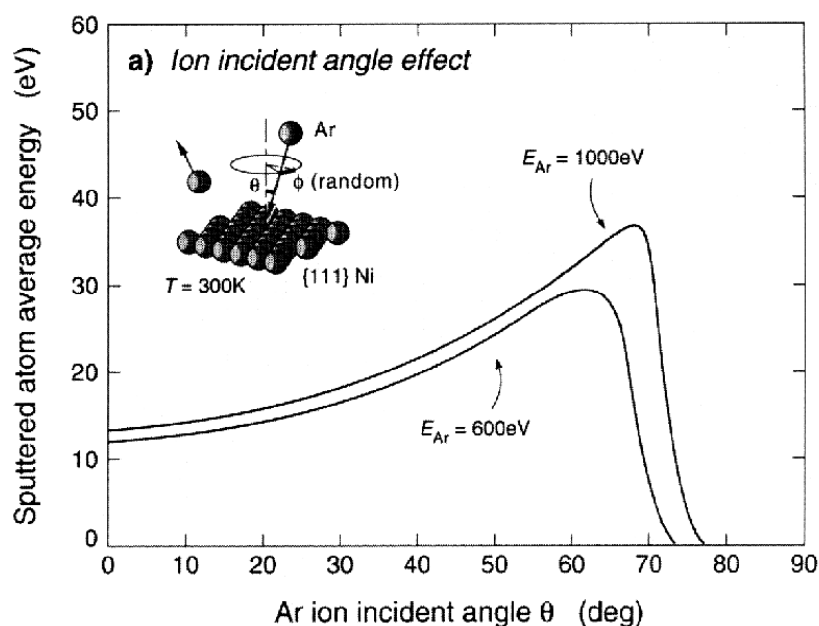


Στο σχήμα 3 όπως προαναφέρθηκε παρουσιάζεται η συνάρτηση του sputtering yield κανονικοποιημένη  $S(\theta)/S(0)$  σε σχέση με την γωνία προσπτώσης του ιόντος βλήματος.

Η ενέργεια με την οποία τα άτομα φεύγουν από το πλέγμα εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης των ιόντων και αυτό απεικονίζεται στο σχήμα 9.



Σχήμα 9: Ενέργεια των ατόμων σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης

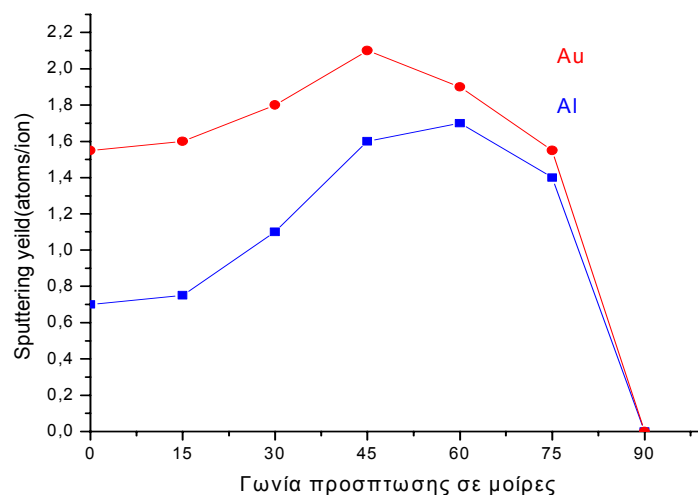


Από την ενέργεια με την οποία φεύγουν τα άτομα του πλέγματος εξαρτάται το  $S$ .

Συνδιάζοντας την παραπάνω καμπύλη με την καμπύλη του σχήματος 3 θα έχουμε την τελική εξάρτηση του  $S$  από τη γωνία πρόσπτωσης.

Παρατηρείται ότι για κάποια γωνία έχουμε μέγιστο και απ'εκεί και πέρα μείωση του  $S$ . Αυτό οφείλεται στο ότι το υπό γωνία ιόν ταξιδεύει περισσότερο κοντά στην επιφάνεια και αυτό προκαλεί περισσότερα άτομα να διαφύγουν από την επιφάνεια. Πάνω από την κρίσιμη γωνία η ιοντική ανάκλαση στη επιφάνεια μειώνεται, μειώνοντας την εξαγωγή ατόμων άρα και το sputtering yield. Η κρίσιμη γωνία αυξάνει με την αύξηση της ενέργειας του ιόντος και μειώνεται σε συνάρτηση του ατομικού αριθμού.

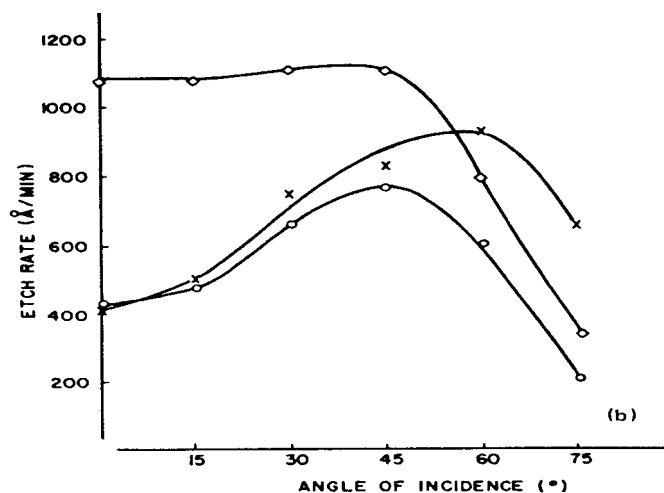
Σχήμα 10<sup>ix</sup>:  $S$  σαν συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης μη κανονικοποιημένη



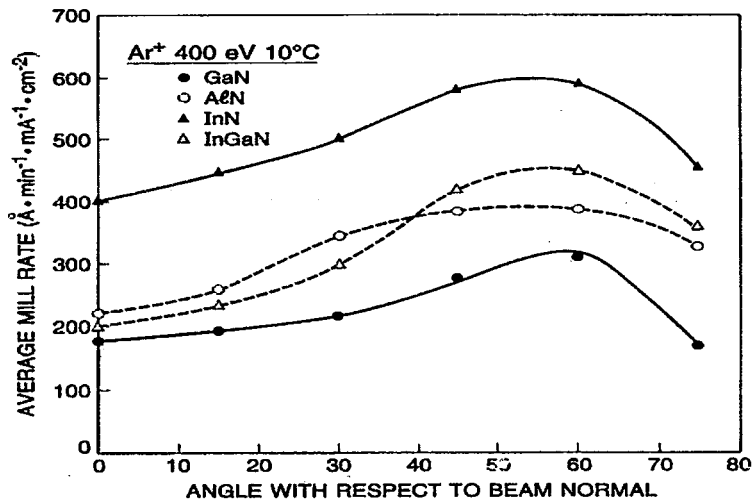
Η σχέση του ρυθμού χάραξης που μετράται σε  $\text{\AA}/\text{min}$  και του sputtering yield είναι σχέση αναλογίας

Το σχήμα 11 περιγράφει αυτή τη σχέση. Στο σχήμα 12 φαίνονται οι ίδιου τύπου καμπύλες επίσης για νιτρίδια και στο σχήμα 13 η σχέση ρυθμού χάραξης με την ενέργεια της δέσμης για διάφορα νιτρίδια

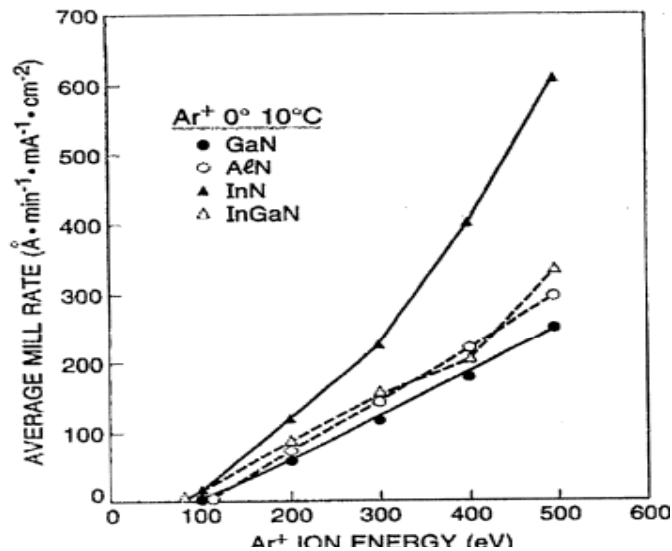
Σχήμα 11<sup>x</sup>: Ρυθμός χάραξης σε συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης



Σχήμα 12<sup>xi</sup>: Ρυθμός χάραξης σε συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης για νιτρίδια



Σχήμα 13<sup>xii</sup>: Ρυθμός χάραξης σε συνάρτηση της ενέργειας δέσμης για νιτρίδια

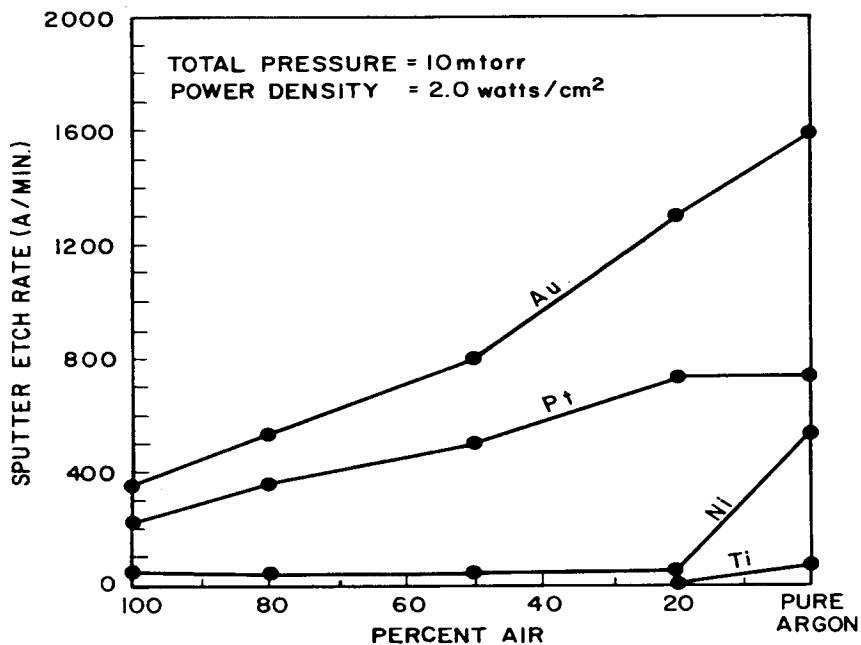


Είναι φανερό ότι το sputtering yield εξαρτάται από την ενέργεια συνοχής της επιφάνειας του στόχου, συνεπώς η αύξησή της οδηγεί σε μείωση του sputtering yield και του ρυθμού χάραξης και αντίστροφα. Για συγκεκριμένες λοιπόν επιφάνειες, η

πρόσθεση κάποιου αερίου στο πλάσμα μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει το ρυθμό χάραξης. Για παράδειγμα το οξυγόνο πάνω στα μέταλλα ή το πυρίτιο σχηματίζει οξείδια και μειώνει το ρυθμό χάραξης, ενώ αντίθετα το φθόριο ή το χλώριο σχηματίζουν πτητικές ενώσεις με την επιφάνεια χαλαρώνοντας την ενέργεια συνοχής των επιφανειακών ατόμων και αυξάνοντας έτσι το ρυθμό χάραξης. Για την περίπτωση του οξυγόνου έχουμε απεικόνιση στο σχήμα 14.

Στον πίνακα I αναφέρονται τυπικοί ρυθμοί χάραξης ( $\text{\AA}/\text{min}$ ) κάποιων υλικών σε σχέση με την πυκνότητα ισχύος της δέσμης και στον πίνακα II αντίστοιχα ρυθμοί χάραξης σε σχέση με την ενέργεια της ιοντικής δέσμης.

Σχήμα 14<sup>xiii</sup>: Ρυθμός χάραξης για την περίπτωση πρόσμιξης οξυγόνου



Πίνακας I<sup>iv</sup>: Ρυθμοί χάραξης σε σχέση με την πυκνότητα ισχύος δέσμης

Μέταλλα	Ρυθμός (Å/min)	Πυκνότητα ισχύος (W/cm)
Αλουμίνιο	120-160	1,6
Χρυσός	200-900	1,6
Χαλκός	200-350	1,6
Νικέλιο	500	2
Τιτάνιο	50	2
Βολφράμιο	70	1,6
Πλατινα	900	2
<b>Διηλεκτρικά</b>		
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	60	1,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20-50	1,6
SiO <sub>2</sub>	120	1,6
<b>Resist</b>		
AZ340	70-300	1,6

Πίνακας I<sup>v</sup>: Ρυθμοί χάραξης σε σχέση με την ενέργεια δέσμης

Μέταλλα	Ρυθμός (Å/min)	Ενέργεια δέσμης (eV)
Αλουμίνιο	300-700	500
Χρυσός	1050-1500	500
Βολφράμιο	180	500
Ταντάλιο	150-330	500
Τιτάνιο	200	500
Μολυβδαίνιο	230	500
Χαλκός	450	500
Χρόμιο	200-400	1000
Ζιρκόνιο	320	1000

Άργυρος	2000	1000
Μαγνήσιο	270	1000
Βανάδιο	220	1000
Νιόβιο	300	1000
Σίδηρος	320	1000
<b>Διηλεκτρικά</b>		
SiO <sub>2</sub>	280-420	500
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	83	500
<b>Ημιαγωγοί</b>		
Si	215-500	500
GaAs	650	500
<b>Resist</b>		
AZ1350	200-400	500
Riston 14	250	500
KTFR	390	1000

### 1.3 Εφαρμογές του Ion Gun σε διαδικασίες Processing

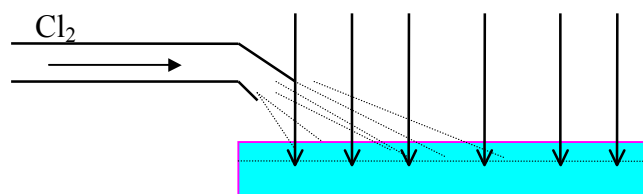
#### ΔΚαθαρισμός:

Η κατεξοχήν εφαρμογή της τεχνικής είναι η απομάκρυνση των φυσικών επιφανειακών οξειδίων (native oxides) πριν την εναπόθεση ωμικών επαφών. Για τη διαδικασία αυτή απαιτούνται συνήθως μερικές εκατοντάδες eV ( 400<ενέργεια δέσμης <1000eV ) . Για βέλτιστα αποτελέσματα πρέπει να ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις : α) Χαμηλή πίεση θαλάμου για την αποφυγή επανασύνδεσης στην επιφάνεια που έχει καθαριστεί. β) Η μικρότερη δυνατή συγκέντρωση ενεργών αερίων όπως οξυγόνο και υδρατμοί για την αποφυγή επαναοξείδωσης μετά τη χάραξη.

Σε περίπτωση που απαιτείται μεγάλη ενέργεια δέσμης, η διαδικασία μπορεί να προκαλέσει ζημιές στην υπό καθαρισμό επιφάνεια. Εάν οι ζημιές αυτές είναι ανεπιθύμητες, τότε υπάρχουν δύο τρόποι αποφυγής :

α) Επίδραση ενεργού αερίου με μεγάλη ικανότητα συλλογής των οξειδίων πάνω από το υπόστρωμα (Ion Beam Assisted Etching) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

Σχήμα 15<sup>vi</sup> :Επίδραση ενεργού αερίου για συλλογή οξειδίων



β) Η ισχυρή δέσμη ιοντικής χάραξης να ακολουθείται από ένα μικρό χημικό etch 10Å-20Å.

## II) Χάραξη

Η συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση υλικού όπως στην περίπτωση των recessed ωμικών επαφών σε HEMT νιτριδίων.

#### 1.4 Προβλήματα που προέρχονται από τη χάραξη ιοντικής δέσμης

Στην ενότητα τρία αναφέρεται ότι η βασική εφαρμογή της τεχνικής αυτής είναι η απομάκρυνση επιφανειακών φυσικών οξειδίων. Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχουν ιδιαίτερα προβλήματα αρκεί η ενέργεια της δέσμης να είναι μεγαλύτερη από το κατώφλι έναυσης της χάραξης των οξειδίων.

Στην περίπτωση όμως που η τεχνική χρησιμοποιείται για χημική χάραξη υλικού, τότε προκύπτουν κάποια προβλήματα τα σημαντικότερα των οποίων είναι :

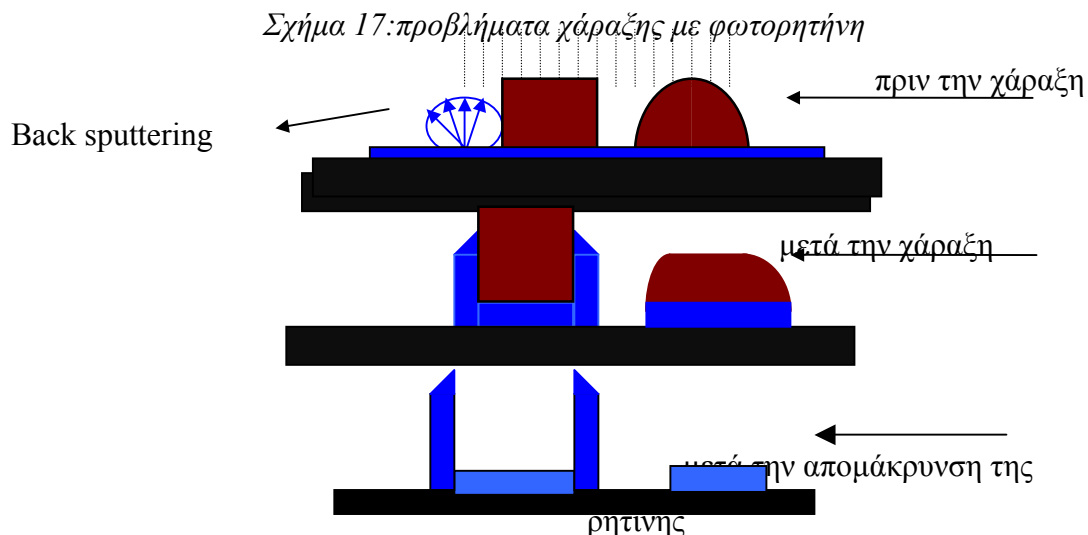
α)Επανατοποθέτηση χαραγμένου υλικού (Redeposition)<sup>xvii</sup>

β)Ανομοιομορφίας του ρυθμού χάραξης λόγω τοπογραφίας-(Trenching)

##### α) Redeposition

Στη μικροηλεκτρονική, ο συνήθης τρόπος κατασκευής διατάξεων και κυκλωμάτων γίνεται με τη βοήθεια φωτοενεργών ουσιών που ονομάζονται φωτορητίνες. Η φωτορητίνη μετά από μια διεργασία που ονομάζεται λιθογραφία παραμένει πάνω στην επιφάνεια σε ορισμένα σημεία. Στην περίπτωση της ιοντικής χάραξης, η φωτορητίνη λειτουργεί σαν «μάσκα», δηλαδή στις περιοχές που υπάρχει δε χαράζεται το υλικό.

Στις περιπτώσεις λοιπόν που υπάρχει φωτορητίνη, το υλικό που προέρχεται από την επιφάνεια επανακάθεται πάνω στη φωτορητίνη. Μετά την απομάκρυνσή της, το υλικό αυτό παραμένει στην επιφάνεια, πράγμα ανεπιθύμητο. Το παρακάτω σχήμα είναι χαρακτηριστικό για το φαινόμενο.



Στη βιβλιογραφία υπάρχουν κάποιες προτεινόμενες λύσεις για το φαινόμενο. Η περισσότερο συνηθισμένη είναι η στρογγυλοποίηση της ρητίνης από τα πλάγια ώστε ο ρυθμός χάραξης της δέσμης υπο γωνία στην πλάγια επιφάνεια να αυξηθεί

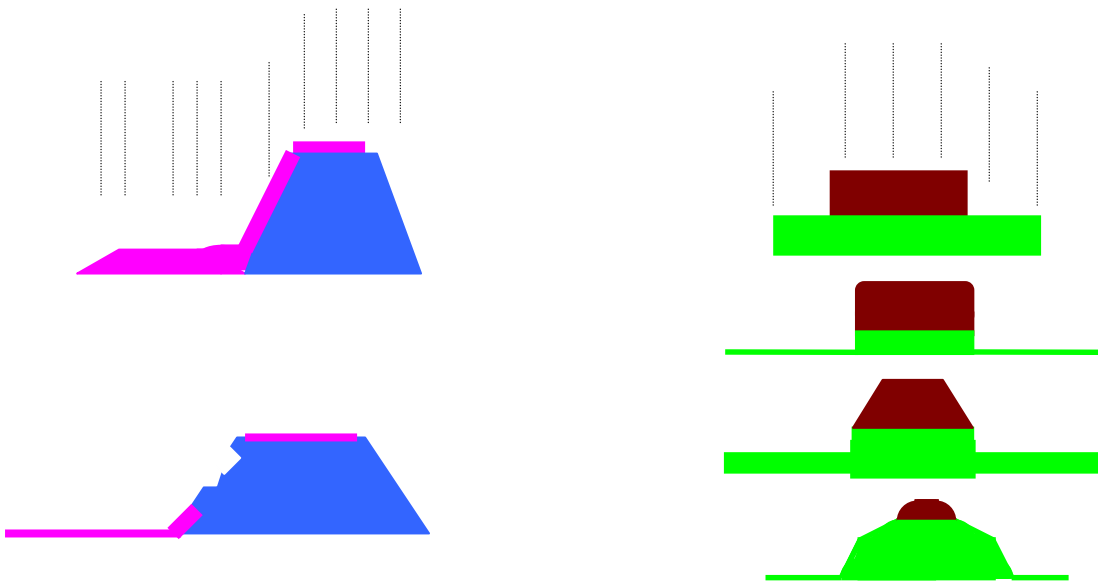


κατά το ποσό της επανατοποθέτησης. Αυτό έχει σαν κόστος το τελικό μήκος να είναι λίγο μικρότερο από εκείνο της μάσκας. Άλλη τεχνική είναι το να τοποθετηθεί μια πολύ λεπτή μάσκα πάνω από το υλικό με μικρό ρυθμό χάραξης, από υλικά όπως Ti ή Cr. Επιπρόσθετα μπορεί να εισαχθεί O<sub>2</sub> στο θάλαμο με μικρή πίεση 5\*10<sup>-5</sup> Torr ώστε να μειωθεί ο ρυθμός χάραξης κατά 6 με 8 φορές επειδή όπως προαναφέρθηκε με το Οξυγόνο μέσα στο θάλαμο σχηματίζονται επιφανειακά οξείδια που έχουν μικρότερο ρυθμό χάραξης. Η τεχνική αυτή δεν είναι εφαρμόσιμη με φωτορητίνη γιατί το οξυγόνο επιταχύνει το ρυθμό χάραξής της και πολύ γρήγορα την καταστρέφει.

#### β) Ανομοιομορφία στην τοπογραφία<sup>xviii-xix</sup>

Ο ρυθμός χάραξης εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης της δέσμης. Κάθε σκαλοπάτι υποστρώματος και για γωνίες κλίσεις αυτού από 0<sup>0</sup> έως 70<sup>0</sup> μοίρες έχει διαφορετικούς ρυθμούς χάραξης τόσο για τη μετωπική ως προς τη δέσμη επιφάνεια, όσο και για την πλάγια, όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.

Σχήμα 18<sup>xx-xxi</sup> : Προβλήματα ιοντικής χάραξης

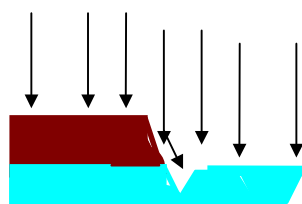


Συνήθως το πρόβλημα αυτό επιλύεται με χρησιμοποίηση λεπτότερης φωτορητίνης. Επίσης για σκαλοπάτι πάνω από 70<sup>0</sup> το redeposition καλύπτει τον επιπλέον ρυθμό χάραξης των πλευρών του σκαλοπατιού.

### γ) Trenches

Επίσης λόγω ανομοιομορφίας στην τοπογραφία έχουμε τοπικά φαινόμενα μεγαλύτερης χάραξης λόγω ανάκλασης της ιοντικής δέσμης (trenches) , σχηματίζοντας έτσι ένα «πηγάδι» στη βάση του σκαλοπατιού όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

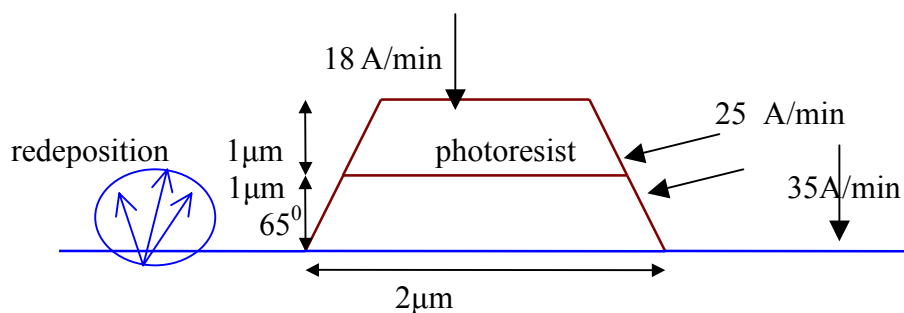
Σχήμα 19<sup>xxii</sup>



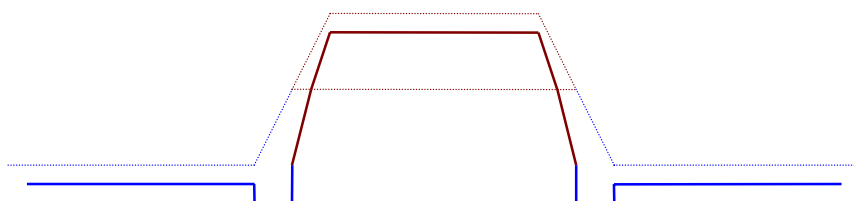
Το φαινόμενο αυτό για γωνία  $20^\circ$  ιοντικής δέσμης εξαφανίζεται εντελώς<sup>xxiii</sup>.

Στο τρίτο κεφάλαιο με τη βοήθεια βιβλιογραφίας γίνεται ένα υπολογιστικό μοντέλο για την εύρεση τρισδιάστατου προφίλ ιοντικής χάραξης με το ion gun σύμφωνα με τους ρυθμούς χάραξης από τα αποτελέσματα των πειραμάτων σε  $\text{\AA}/\text{min}$  σε GaN λαμβάνοντας υπόψη φαινόμενα όπως redeposition, και trenches .

Σχήμα 20: ρυθμοί χάραξης σε κάθε επιφάνεια

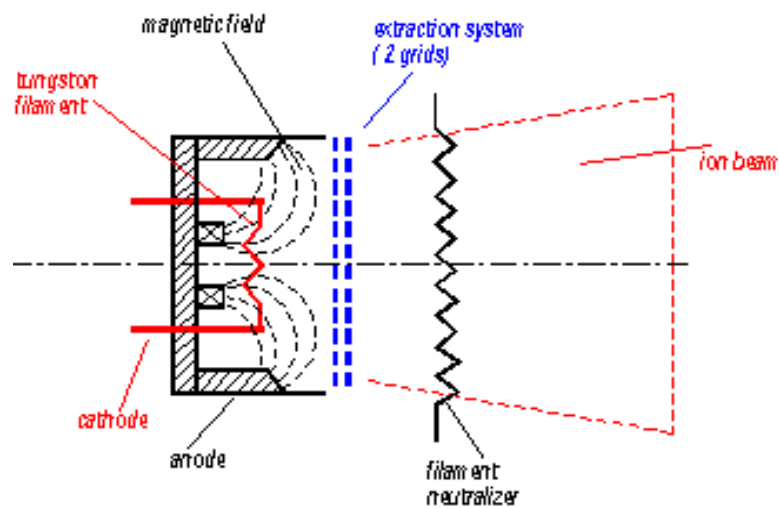


Μετά από κάποια min χάραξης αναμένεται η παρακάτω εικόνα:





## Κεφάλαιο 2



### Πειραματική διάταξη

#### 2.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό που έχει σαν θέμα την πειραματική διάταξη της συσκευής του ion gun, χωρίζεται σε δύο επιμέρους ενότητες.

Στην πρώτη παρουσιάζεται μια απλή περιγραφή της πειραματικής διάταξης, τα μέρη από τα οποία αποτελείται και μερικές γενικές αναφορές στη λειτουργία της.

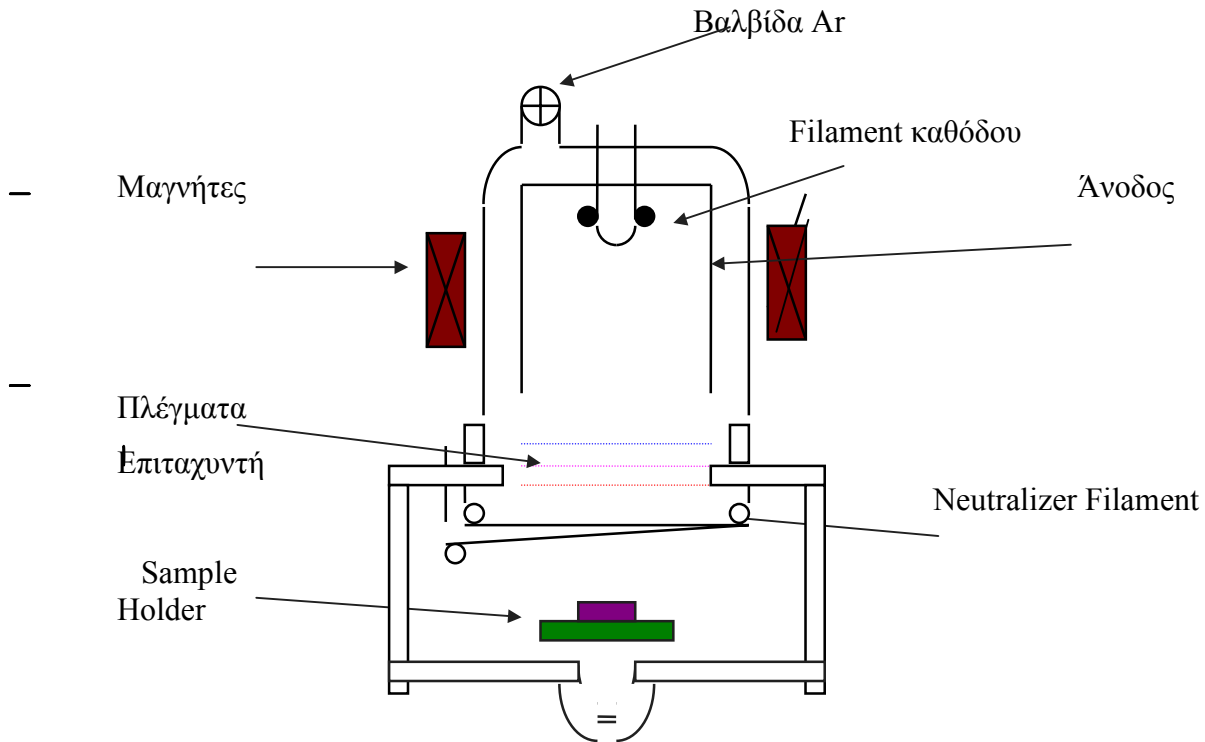
Η δεύτερη ενότητα περιγράφει τα μέρη της συσκευής με περισσότερες

λεπτομέρειες για τη λειτουργία τους. Η συσκευή αυτή είναι τοποθετημένη μέσα στο θάλαμο του εξαχνωτή δέσμης ηλεκτρονίων BJD 1800.

## 2.2 Συσκευή ιοντικής δέσμης<sup>xxiv-xxv-xxvi</sup>

Η συσκευή ιοντικής δέσμης του εργαστηρίου είναι μια εξέλιξη της συσκευής που σχεδίασε ο Kaufman<sup>xxvii</sup>. Εν συντομία αυτή η συσκευή αποτελείται από τρία κυρίως μέρη τα οποία απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα<sup>xxviii</sup>.

Σχήμα 1: Συσκευή του Kaufman



Τα τρία αυτά κύρια μέρη είναι η πηγή του πλάσματος, στην οποία γεννιούνται τα ιόντα, τα πλέγματα εξόδου τα οποία εξάγουν τα ιόντα από το πλάσμα και τα επιταχύνουν προς το στόχο και ο χώρος μεταξύ πλεγμάτων και δείγματος, όπου βρίσκεται ο ουδετεροποιητής της δέσμης.

Στην πηγή του πλάσματος, τα θερμαινόμενα νήματα της καθόδου είναι πηγή θερμικών ηλεκτρονίων τα οποία επιταχύνονται από τη διαφορά δυναμικού με την άνοδο. Η δε κατανομή ταχυτήτων τους είναι τύπου Maxwell<sup>xxix</sup>:

$$N(v) = 4\pi N_{ολ} (m/2\pi kT)^{3/2} v^2 \exp(-mv^2/2kT)$$

Για θερμοκρασία 5-10eV<sup>xxx</sup>:

$$T = 10\text{eV}/k = 10\text{ eV} / 8,6 \cdot 10^{-5} \text{ eVK}^{-1} = 1,16 \cdot 10^5 \text{K}$$

Το ρεύμα θερμοϊονικής εκπομπής δίνεται από τον τύπο των Richardson-Dushman<sup>xxxii</sup>:

$$j = AT^2 \exp(-E_w/kT)$$

Με  $A = 4\pi m_e k^2 q/h^3 = 1,2 \cdot 10^6 \text{ Am}^{-2} \text{ K}^{-2}$  ενώ τυπική τιμή αυτού του ρεύματος θερμοϊονικών ηλεκτρονίων είναι  $1 \text{ A/cm}^2$ .

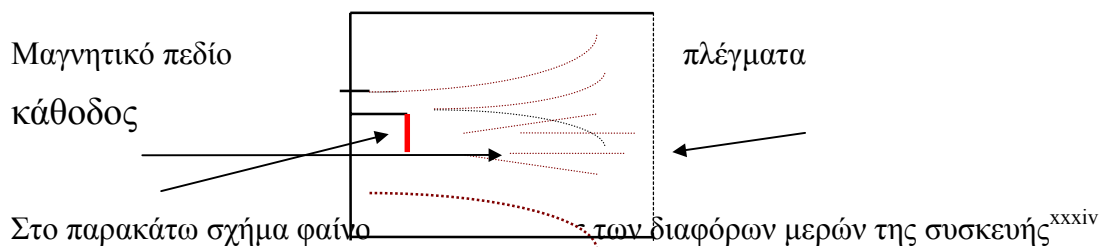
Κατά την πορεία τους αυτή, αλληλεπιδρούν με τα άτομα του αργού που βρίσκονται μέσα στο θάλαμο με αποτέλεσμα τη δημιουργία των ιόντων του αργού σύμφωνα με την αντίδραση:



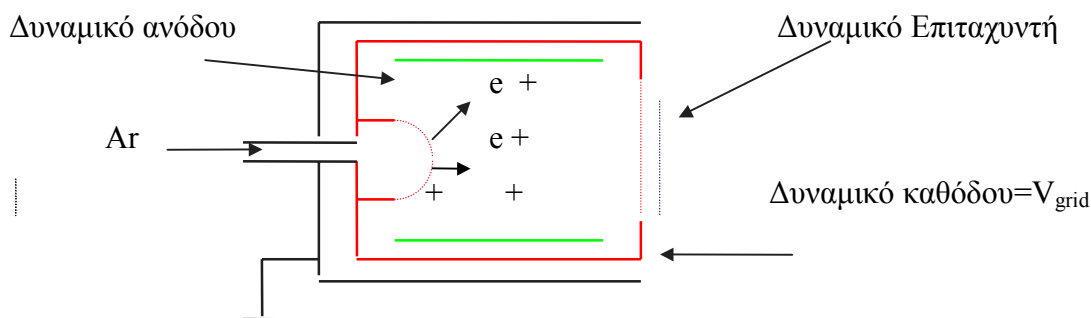
Για να συσταθεί το πλάσμα η πίεση πρέπει να διατηρηθεί στην τάξη των  $10^{-4}$  Torr μέσα στο θάλαμο. Από τα ιόντα  $\text{Ar}^+$  που παράγονται το μεγαλύτερο μέρος επανασυνδέεται στα τοιχώματα του θαλάμου, όμως ένα 10-30% φτάνει στο χώρο επιτάχυνσης και ξεφεύγοντας από το θάλαμο συνιστά την ιοντική δέσμη<sup>xxxiii</sup>.

Είναι επίσης επιβεβλημένο για την παραγωγή ιόντων αργού να εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο ανάμεσα σε κάθοδο και άνοδο με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια να εκτελούν σπειροειδή κίνηση αυξάνοντας έτσι την διαδρομή τους μέσα στο θάλαμο. Η αύξηση αυτή της διαδρομής έχει σα συνέπεια περισσότερες συγκρούσεις με τα άτομα του αργού και κατ' επέκταση περισσότερα ιόντα αργού. Το μαγνητικό πεδίο αυτό μπορεί να παραχθεί είτε από ζεύγη μαγνητικών πόλων είτε από πηνία. Το παρακάτω σχήμα δείχνει τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου μέσα στο θάλαμο.

Σχήμα<sup>xxxiii</sup> 2: Μαγνητικό πεδίο μέσα στη συσκευή



Σχήμα 3: Ηλεκτρικές πολώσεις της συσκευής

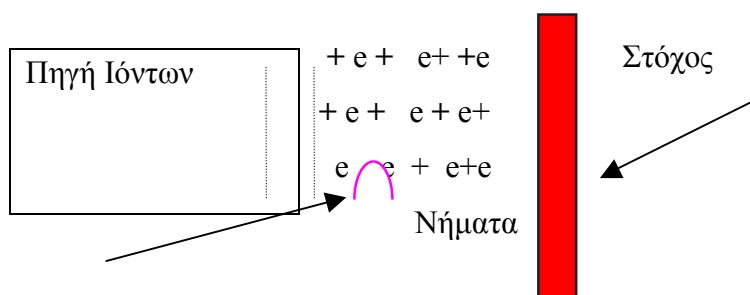


Τα πλέγματα εξόδου (extraction grids) αποτελούνται από δύο ή τρία ευθυγραμμισμένα επίπεδα που βρίσκονται στην έξοδο του θαλάμου. Σημαντικό ρόλο παίζουν οι πολώσεις των πλεγμάτων αυτών. Το τελευταίο, στην έξοδο, βρίσκεται στο δυναμικό της γης σε σχέση με την άνοδο. Το μεσαίο βρίσκεται σε δυναμικό αρνητικό σε σχέση με τη γη και εμποδίζει τα ηλεκτρόνια να φύγουν από το πλάσμα ενώ ταυτόχρονα είναι εκείνο που δίδει τη δυνατότητα στη δέσμη των ιόντων να επιταχυνθούν έξω από το πλάσμα. Το τρίτο πλέγμα βρίσκεται σε δυναμικό ίσο με αυτό της ανόδου και έτσι βελτιώνεται η απόδοση της πηγής.

Τα πλέγματα είναι κατασκευασμένα από υλικά που έχουν μικρό sputtering yield και κατά συνέπεια μικρή φθορά από στην έκθεση με ιόντα. Άνθρακας και Μολυβδένιο είναι συνήθως τα υλικά αυτά.

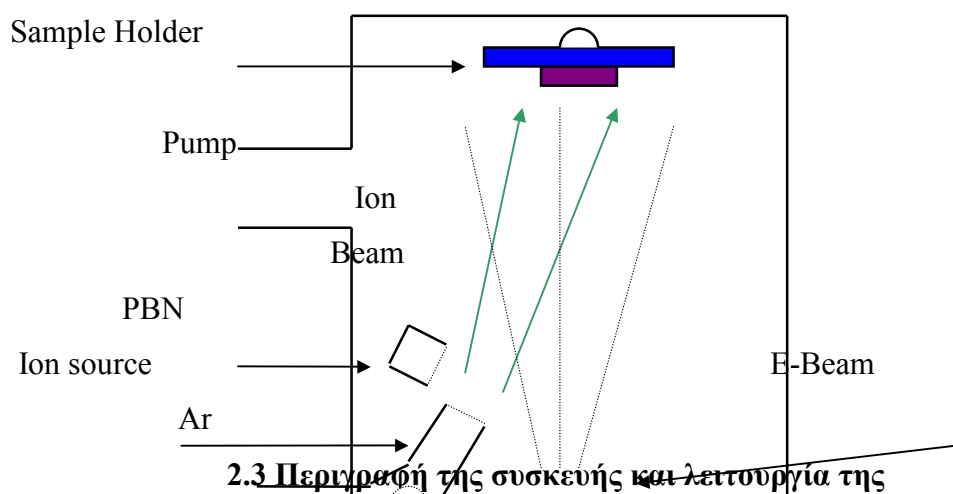
Κατά την έξοδο από το τελευταίο πλέγμα τα ιόντα περνούν από το χώρο όπου βρίσκονται τα νήματα του ουδετεροποιητή (Neutralizer). Από τα νήματα αυτά προέρχονται ηλεκτρόνια τα οποία παγιδεύονται μέσα στην ιοντική δέσμη του αργού από ηλεκτροστατικές δυνάμεις. Το αρνητικό φορτίο των ηλεκτρονίων εξισορροπεί το θετικό των ιόντων, και έτσι κάθε φράγμα δυναμικού που θα σχηματιζόταν από την εναπόθεση μονάχα θετικών φορτίων πάνω στο στόχο εξουδετερώνεται. Το παρακάτω σχήμα δείχνει ακριβώς αυτή τη διαδικασία.

Σχήμα 4: Λειτουργία του Ουδετεροποιητή



Η τάση που εφαρμόζεται στις συσκευές του Kaufman εκτείνεται από 100 έως 2000V και η διάμετρος μέχρι και 20cm. Η πυκνότητα ρεύματος δέσμης είναι μερικά mA/cm<sup>2</sup>. Το μειονέκτημα αυτής της συσκευής είναι το πάνω όριο της τιμής της δέσμης. Ταυτόχρονα όμως η συσκευή αυτή παρέχει δυνατότητες πολλαπλής και αυτόματης ρύθμισης για πολλές μεταβλητές, όπως είναι η γωνία μεταξύ δέσμης και στόχου, η ενέργεια της δέσμης, η πυκνότητα ρεύματος, η τάση στα ηλεκτρόδια καθόδου καθώς επίσης και το υπόβαθρο καθαρότητας του θαλάμου σε O<sub>2</sub> που παίζει ρόλο στο ρυθμό χάραξης. Η ακριβής διάταξη της πειραματικής συσκευής μέσα στο Temescal φαίνεται στο παρακάτω σχήμα<sup>xxxv</sup>:

Σχήμα 5: Τοποθέτηση του Ion gun μέσα στο θάλαμο BJD 1800



### 2.3 Περιγραφή της συσκευής και λειτουργία της

Η πειραματική συσκευή που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα είναι τύπου Kaufman 3cm διαμέτρου δέσμης. Τα μέρη αυτής της συσκευής είναι:

#### A) Ο θάλαμος

Μέσα στον οποίο βρίσκονται σε μορφή πλάσματος ίσος περίπου αριθμός ιόντων αργού και ηλεκτρόνια σε υπόβαθρο ατόμων αργού. Διπλά ιονισμένα άτομα αργού  $Ar^{++}$  βρίσκονται σε ποσότητα 1% σε 40Volt διαφορά δυναμικού ανόδου καθόδου. Η ποσότητα αυτή μπορεί να γίνει μικρότερη χαμηλώνοντας την πίεση και την τάση<sup>xxxvi</sup>. Επειδή η μάζα των ηλεκτρονίων είναι πολύ μικρή αυτά διαχέονται εύκολα προς τα θετικά ηλεκτρόδια της ανόδου και το πλάσμα έχει λίγο ψηλότερο θετικό δυναμικό από εκείνο της ανόδου περίπου κατά 5Volt. Το ρεύμα ιοντικής δέσμης είναι ανάλογο με την παραγωγή ιόντων στο θάλαμο αλλά και την πυκνότητα πλάσματος. Η διαφορά δυναμικού του θαλάμου (discharge voltage) είναι αυτή μεταξύ των ηλεκτροδίων καθόδου και ανόδου. Για αέριο αργό οι τυπικές τιμές της διαφοράς αυτής είναι 35-55 volt με βέλτιστη τα 38V για να παραταθεί ο χρόνος ζωής των



νημάτων της καθόδου. Η δε άνοδος που βρίσκεται μέσα στο θάλαμο μπορεί να βρεθεί μέχρι και 1000 Volt σε σχέση με τη γη και το στόχο.

Υπάρχουν δύο κύριοι μηχανισμοί στο πλάσμα του θαλάμου που επιταχύνουν τα ιόντα του Αργού μέσα στο μαγνητικό πεδίο<sup>xxxvii</sup>. Ο πρώτος οφείλεται στο ότι οι αγωγιμότητες κατά μήκος του πεδίου και κάθετα σ' αυτό είναι άνισες  $\sigma_{//} \gg \sigma_{\perp}$ . Μάλιστα<sup>xxxviii</sup>  $\sigma_{//} / \sigma_{\perp} = (\omega / \nu)^2 = 256$ ,

όπου  $\omega = qB/m$  ή κυκλική ταχύτητα στο μαγνητικό πεδίο και  $\nu$  η συχνότητα σκέδασης των ηλεκτρονίων. Ο δεύτερος στο ότι στην άνοδο έχουμε θετικότερο φορτίο από ότι στην κάθοδο.

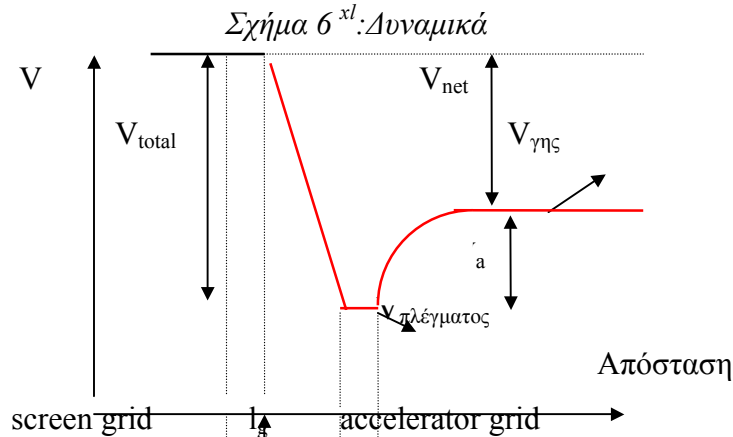
### **Β) Η κάθοδος**

Αποτελείται από σπειροειδή νήματα με 0,25mm διαμέτρο από κράμα βολφραμίου. Το ρεύμα θέρμανσης των νημάτων (Cathode current) είναι περίπου 3-4A. Η κάθοδος βρίσκεται σε δυναμικό 30-70 Volt μικρότερο από την άνοδο. Για τη βέλτιστη λειτουργία η ενδεδειγμένη διαφορά δυναμικού είναι όπως αναφέρθηκε παραπάνω, 38 Volt και προσφέρει χρόνο ζωής νημάτων 80 ώρες για ρεύμα δέσμης 75mA. Με χαμηλή επίσης πίεση στο θάλαμο μπορεί να επέλθει μείωση στο χρόνο ζωής των νημάτων και αυτό γιατί το ρεύμα θερμιοτικής εκπομπής των ηλεκτρονίων γίνεται μεγαλύτερο από τη ροή του αερίου. Αυτή η περίπτωση γίνεται αντιληπτή όταν για αλλαγή στο ρεύμα καθόδου η αντίστοιχη αλλαγή στο ρεύμα δέσμης είναι μικρή. Επίσης σημαντικό ρόλο στο χρόνο ζωής των νημάτων παίζει η ύπαρξη ή όχι μέσα στο θάλαμο άλλου αερίου όπως το οξυγόνο. Στην περίπτωση αυτή έχουμε μερική οξείδωση και γρήγορη καταστροφή τους. Για λειτουργία του θαλάμου μόνο με οξυγόνο τα νήματα έχουν χρόνο ζωής μόνο μιας ώρας. Για τη βελτίωση του χρόνου ζωής των νημάτων έχει βρεθεί ότι νήματα από ιρίδιο θωρακισμένα από θόριο συνδιάζουν το μικρό έργο εξόδου του θορίου με την αντοχή στη θέρμανση του ιριδίου και αυξάνουν το χρόνο ζωής των νημάτων. Επίσης αν η άνοδος θωρακιστεί με το αγωγίμο μεταλλικό οξείδιο του ιριδίου τότε γίνεται κατάλληλη να λειτουργήσει και με καθαρό οξυγόνο<sup>xxxix</sup>. Το μαγνητικό πεδίο που συστρέφει τα ηλεκτρόνια προέρχεται από πολλαπλούς κυλινδρικούς πόλους γύρω από το θάλαμο επιτρέποντας στα ηλεκτρόνια να έχουν πρόσβαση σε όλο το θάλαμο και έτσι η δέσμη που βγαίνει από τον επιταχυντή να είναι ομοιόμορφη.

### **Γ) Επιταχυντής**

Στη συσκευή του εργαστηρίου τα πλέγματα εξόδου είναι δύο αντί τρία της κλασσικής συσκευής του Kaufman. Το πρώτο πλέγμα βρίσκεται στο δυναμικό της

καθόδου που είναι 30V με 70V μικρότερο από το δυναμικό της ανόδου όπως προαναφέρθηκε. Το πλέγμα επιτάχυνσης μπορεί να πάρει τιμές μέχρι και 1000Volt σε σχέση με την γή. Κατά συνέπεια δύο διαφορές δυναμικού συνυπάρχουν της δέσμης ιόντων: (Ενέργεια δέσμης σε eV ίση αριθμητικά)  $V_{\text{ανόδου}} - V_{\text{γης}} = V_{\text{net}}$  και του επιταχυντή:  $V_a = V_{\text{πλέγματος}} - V_{\text{γης}}$ . Σαν αποτέλεσμα τα ιόντα που εγκαταλείπουν το θάλαμο έχουν επιταχυνθεί σε δυναμικό  $V_{\text{total}} = V_{\text{ανόδου}} - V_{\text{πλέγματος}}$  και έτσι έχουμε ένα ισχυρό ρεύμα ιόντων. Σχηματικά αυτό φαίνεται ως εξής:



Επίσης με το αρνητικό δυναμικό του πλέγματος τα ηλεκτρόνια από τον Neutralizer συναντούν φράγμα δυναμικού για να περάσουν μέσα στο θάλαμο. Για το λόγω αυτό το πηλίκιο  $R = V_{\text{net}} / V_{\text{total}}$  πρέπει να είναι λίγο μικρότερο από τη μονάδα. Το κάτω όριο του λόγου αυτού εξαρτάται από την επιθυμητή σκέδαση της δέσμης.<sup>xli</sup>

Λύνοντας της εξίσωση Poisson για παράλληλους δίσκους μια προσέγγιση της πυκνότητας ρεύματος<sup>xlii</sup> από το νόμο του Child είναι:

$$j = (4\epsilon_0/9)(q/m)^{1/2} V^{3/2} / l_g^2$$

Όπου  $q/m$  είναι ο λόγος φορτίου ιόντος προς μάζα  $V$  η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο δίσκων και  $l_g$  η μεταξύ τους απόσταση. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα  $V = V_{\text{total}}$  και  $l_g$  η απόσταση μεταξύ των grid.

Για την εύρεση τάξης μεγέθους της πυκνότητας ρεύματος ισχύει:

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1} \quad q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad m_{Ar} = 1,661 \cdot 39,9 \cdot 10^{-27} \text{ Kgr}$$

$$\text{ενδεικτικές τιμές τάσεων } V = V_{\text{δέσμης}} + V_{\text{πλέγμα}} = 500\text{V} + 400\text{V} = 900\text{V} \quad l_g = 0,2\text{cm}$$

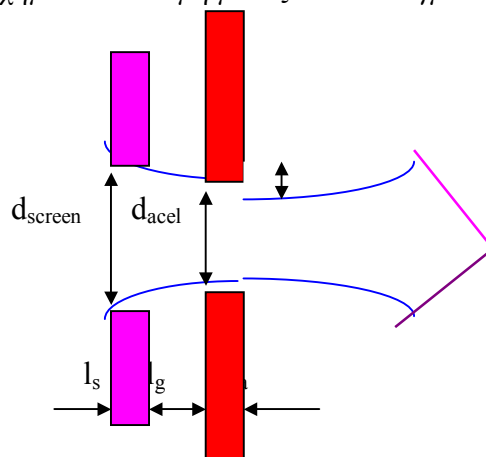
$$j = 4,1 \text{ mA/cm}^2$$

Αν τώρα πολλαπλασιαστεί με την επιφάνεια των πλεγμάτων της δέσμης που είναι διαμέτρου 3cm  $A = \pi 3^2 / 4 = 7\text{cm}^2$  το ρεύμα στον επιταχυντή είναι περίπου  $I = A * J = 29\text{mA}$ .

Έτσι αν η ενέργεια της δέσμης ανέβει στα 1000eV τότε η πυκνότητα δέσμης ανέρχεται πάνω από 10mA/cm.<sup>2</sup>

Το παρακάτω σχήμα δείχνει την ιοντική δέσμη που εξέρχεται από το σύστημα των δύο πλεγμάτων:

Σχήμα<sup>xliii</sup> 7: Δέσμη μεταξύ των Πλεγμάτων του Επιταχυντή



Οι οπές των δύο πλεγμάτων πρέπει να έχουν ίσες περίπου διαστάσεις. Για να μην επιβραδύνεται η δέσμη οι οπές του επιταχυντή είναι το 80% αυτών του screen, περίπου 1,6 mm . Το μέγεθος των οπών, ειδικά του επιταχυντή δέν πρέπει να είναι διαμέτρου πολύ κάτω από 2mm γιατί η πυκνότητα ρεύματος μειώνεται δραστικά. Από την εξίσωση του Child παρατηρείται ότι για μικρές τιμές της ολικής τάσης μπορεί να αυξηθεί η πυκνότητα της δέσμης μικρένοντας την απόσταση των δύο πλεγμάτων. Κάτω όριο σε αυτή την απόσταση είναι το μισό της διαμέτρου των οπών του screen grid :  $l_g = d_s/2 = 1\text{mm}$ . Ο λόγος  $l_g/d_s$  παίζει ρόλο και στο άνοιγμα της δέσμης. Για πηλίκιο τάσεων  $R = V_{net}/V_{total} = 0,7$  η γωνία απόκλισης είναι  $\alpha = 13^\circ$  όταν  $l_g/d_s = 0,5$  ενώ αν ο λόγος γίνει 1 τότε η απόκλιση γίνεται  $10^\circ$ . Με την απομάκρυνση των πλεγμάτων εμποδίζονται τα ηλεκτρόνια να εισέλθουν μέσα στο θάλαμο και το R να πάρει τιμές πολύ κοντά στη μονάδα.

Το μέγιστο πεδίο για σπινθήρα είναι περίπου 2000V/mm<sup>xliv</sup>.

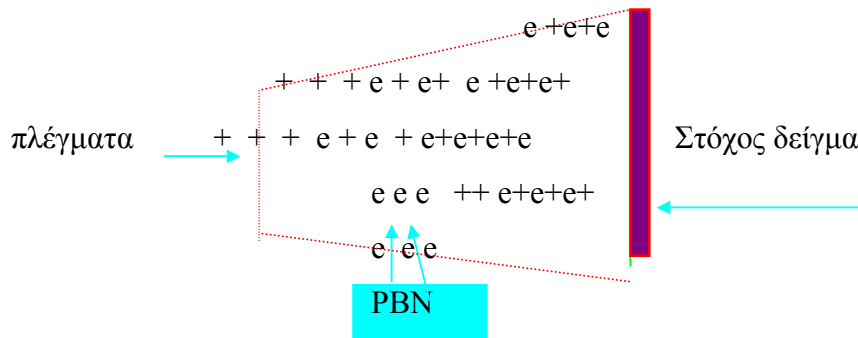
Τα πλέγματα της συσκευής είναι κατασκευασμένα από πυρολιθικό γραφίτη παρέχοντας έτσι μια σταθερή συμπεριφορά στις υψηλές θερμοκρασίες από τη δέσμη.

#### Δ) Neutralizer (ουδετεροποιητής)

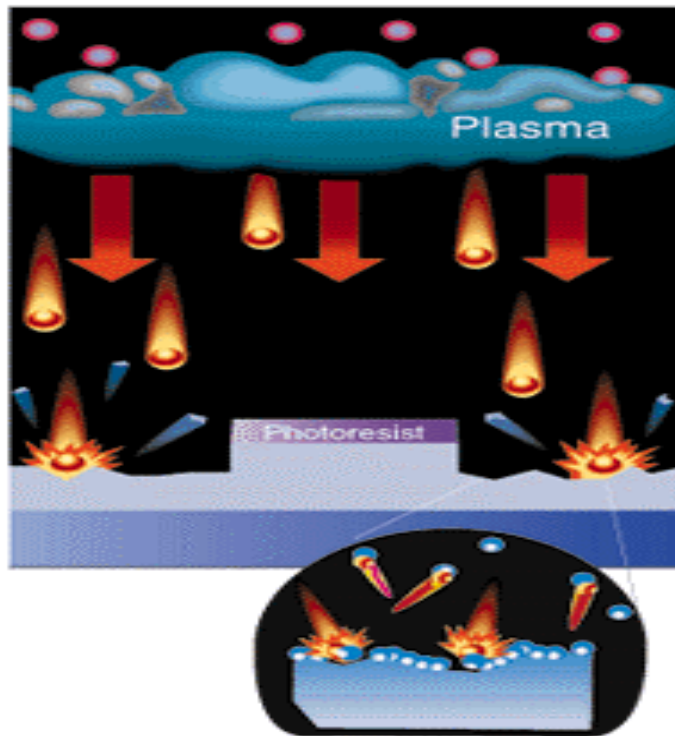
Το τελευταίο στάδιο πριν τα ιόντα χτυπήσουν το στόχο είναι ο ουδετεροποιητής. Η διαδικασία της εξουδετέρωσης του φορτίου χώρου της ιοντικής δέσμης δεν είναι η επανασύνδεση ιόντων αργού και ηλεκτρονίων αλλά η συμπόρευση τους ώστε συνολικά το φορτίο χώρου να εξουδετερωθεί από ίσα και αντίθετα φορτία. Αν εποπτικά φανταστούμε ένα κύλινδρο μέσα στον οποίο

βρίσκονται τα θετικά ιόντα κατευθυνόμενα προς το στόχο μέσα στον οποίο εγχέονται ηλεκτρόνια με την ίδια περίπου ταχύτητα από τον ουδετεροποιητή τότε η δέσμη συνολικά θα έχει μετά από αυτόν ουδετεροποιηθεί.

Σχήμα 8<sup>xlv</sup>: Ουδετεροποιητής και φορτίο χώρου



Σχήμα 9: Εικόνα της δέσμης του πλάσματος



Δύο λόγοι

κάνουν

απαραίτητο τον ουδετεροποιητή. Ο πρώτος έχει να κάνει με το ότι με την σχηματιζόμενη ουδέτερη δέσμη αποφεύγεται ο σχηματισμός φράγματος δυναμικού λόγω φορτίου πάνω στην επιφάνεια. Κατά συνέπεια η ιοντική δέσμη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κατεργασία κάθε υλικού, είτε είναι ημιαγωγός, είτε αγωγός ή μονωτής. Χωρίς τη διαδικασία αυτή η δέσμη θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε κατεργασία μόνο αγωγών. Ο δεύτερος είναι ότι με την ουδετεροποίηση του θετικού

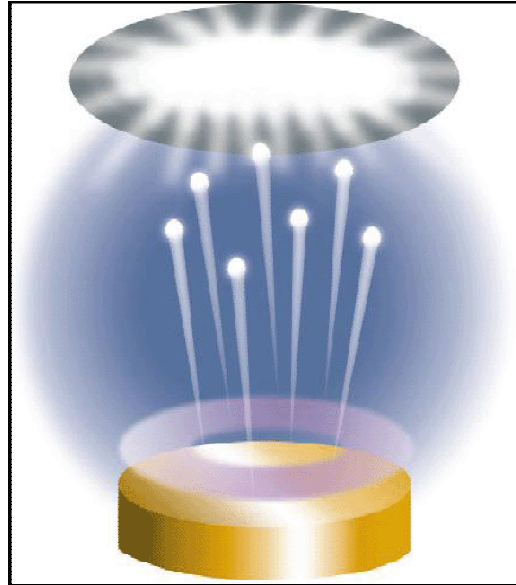
φορτίου της δέσμης αποφεύγεται η αλληλεπίδραση μεταξύ των ιόντων και κατά συνέπεια η διάχυση τους ή η οπισθοσκέδαση τους.

Σημαντικό ρόλο παίζει το ρεύμα των ηλεκτρονίων που προέρχονται από τον ουδετεροποιητή. Το ρεύμα αυτό πρέπει να είναι ίσο ή λίγο μεγαλύτερο της ιοντικής δέσμης. Αν αυτό δεν συμβεί τότε θα σχηματιστεί θετικό περίσσειμα φορτίου στη δέσμη και φραγμός δυναμικού στην επιφάνεια του στόχου. Η διαδικασία αυτή της συσσώρευσης θετικού φορτίου θα συνεχίζεται και τα ιόντα θα απωθούνται πίσω. Ο δε φραγμός δυναμικού πάνω στην επιφάνεια είναι της τάξεως της τάσης της δέσμης, μερικές εκατοντάδες volt, που επιπρόσθετα μπορεί να προκαλέσει καταστοφή και της επιφάνειας του δείγματος. Αν το ρεύμα των ηλεκτρονίων είναι μεγαλύτερο κατά πολύ από το ρεύμα των ιόντων τότε αντίστοιχα θα σχηματιστεί αρνητικό φράγμα δυναμικού ικανό να απωθήσει τα ηλεκτρόνια. Επειδή η ενέργεια των ηλεκτρονίων που προκύπτει από την θερμιονική εκπομπή είναι μικρή (η κατανομή Maxwell της είναι γύρω από μία πολύ μικρή θερμική ενέργεια μερικών eV) το ποσό του φραγμού είναι μερικά Volt.

Η ενδεικνύμενη τιμή των δύο δεσμών ρευμάτων είναι  $I_{\text{emission}}=1,25I_{\text{ion}}$

Η συσκευή του ουδετεροποιητή στο εργαστήριο είναι τύπου «πλάσματος τόξου», PBN. Αποτελείται από ένα μικρό μεταλλικό κύλινδρο (Body) μέσα στον οποίο βρίσκονται τα νήματα. Τα νήματα είναι ίδιου τύπου με αυτά της καθόδου, δηλαδή 0,25mm διαμέτρου από βολφράμιο, με χρόνο ζωής 20-50 ώρες ανάλογα με τη ροή του αερίου και το ρεύμα θέρμανσης. Τα νήματα αυτά θερμαίνονται με ρεύμα 2,5-5 A με την προϋπόθεση ότι αέριο Ar έχει εισχωρήσει μέσα στο PBN. Επειδή ο θάλαμος του ουδετεροποιητή (Body) βρίσκεται υπό τάση 11-18Volt και επειδή τα νήματα βρίσκονται σε αρνητικό δυναμικό σε σχέση με τη γή, λαμβάνει χώρα εδώ ο ιονισμός μερικών ατόμων του αργού σχηματίζοντας ένα πλάσμα στην έξοδο του PBN. Αυτό το πλάσμα αποτελεί την αγωγή με την ιοντική δέσμη. Τέλος ο PBN τοποθετείται 5-10cm από τον άξονα της δέσμης και 1,3cm από την έξοδο της.

## Κεφάλαιο 3



### Πειραματικά αποτελέσματα

#### 3.1 Εισαγωγή

Οι στόχοι των πειραμάτων ήταν οι εξής:

1. Παραμετρική μελέτη σε σχέση με την πίεση του θαλάμου, το ρεύμα δέσμης, την τάση δέσμης, την τάση του επιταχυντή, το ρεύμα των νημάτων καθόδου και ουδετεροποιητή με στόχο τον καθορισμό των αρχικών συνθηκών λειτουργίας της συσκευής στο «περιβάλλον» του θαλάμου κενού του εξαχνωτή BJD 1800.
2. Η μελέτη της επίπτωσης της χάραξης στην μορφολογία των ημιαγωγών GaN, SiC, GaAs. Η μελέτη αυτή έγινε με Μικροσκοπία ατομικών δυνάμεων (AFM).
3. Ο καθορισμός συνθηκών για συγκεκριμένες χαράξεις (υλικό, ρυθμό χάραξης)
4. Η μελέτη της επίπτωσης της τεχνικής στην αντίσταση των ωμικών επαφών σε  $n^+$  GaAs, και η σύγκριση της με την αντίστοιχη υγρή χάραξη.
5. Η μελέτη της επίδρασης της ιοντικής δέσμης σε  $n^+$  GaAs υπόστρωμα επαφών Schottky.
6. Η μελέτη του ρυθμού χάραξης του GaN για συγκεκριμένη εφαρμογή στην κατασκευή HEMT.

### 3.2 Συνοπτικός πίνακας δοκιμών

Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται συνοπτικά οι συνθήκες που εκτελέστηκαν :

Με μπλέ το GaN---κίτρινο το SiC--- Κόκκινο το GaAs.

Κάθοδος	Θάλαμος		Δέσμη		Επιταχυντής		Ουδετεροποιητής PBN			Πίεση	Χρόνος
I σε A	I σε A	Τάση σε V	I σε mA	Τάση σε V	I σε mA	Τάση σε V	Heater σε A	Body σε V	Emmission σε mA	Torr $10^{-4}$	min
3,25	0,12	38	60	400	2	250	2	14	70	2,2	15
3,37	0,06	38	22	450	1	250	4,07	11	30	1,2	16
3,38	0,06	38	29	450	1	250	3,72	11	35	1,3	12
3,28	0,06	38	30	400	1	250	3,6	10	35	2,5	12
3,34	0,06	38	36	450	1	250	3,55	12	45	2,3	15
3,34	0,06	38	36	450	1	250	3,55	12	45	2,3	12
3,45	0,05	38	86	670	4	600	3,65	11	100	2,4	11
3,33	0,05	38	43	450	2	600	3,35	10	53	2,2	15
3,33	0,05	38	43	450	2	600	3,35	10	53	2,2	12
3,34	0,15	38	110	500	5	450	3,10	11	133	3,3	12
3,61	0,37	38	27	500	2	400	2,82	11	34	2	10
3,60	0,37	38	27	500	2	400	2,87	11	34	2	10
3,55	0,37	38	27	500	2	400	2,89	10	34	2	10
3,70	0,38	38	27	500	2	400	2,89	10	34	1,9	5
3,55	0,45	38	58	500	3	400	2,89	10	75	2	5
3,70	0,5	38	38	500	3	400	2,89	10	52	1,9	15
3,45	0,39	38	27	500	2	400	2,45	11	34	2,2	10
3,44	0,36	38	27	500	2	400	2,39	10	34	1,8	15

3,62	0,36	38	27	500	2	400	2,58	10	34	2	5
3,72	0,38	38	27	500	2	400	2,48	10	34	1,8	4
4	0,45	38	27	500	2	400	3,75	11	34	2,1	27
4,7	0,94	38	50	700	2	500	3,2	10	64	2,9	20
3,84	0,5	49	40	500	3	1000	3,2	11	42	1	9
<b>Κάθοδος</b>	<b>Θάλαμος</b>		<b>Δέσμη</b>		<b>Επιταχυντής</b>		<b>Ουδετεροποιητής PBN</b>			<b>Πίεση</b>	<b>Χρόνος</b>
<b>I σε A</b>	<b>I σε A</b>	<b>Τάση σε V</b>	<b>I σε mA</b>	<b>Τάση σε V</b>	<b>I σε mA</b>	<b>Τάση σε V</b>	<b>Heater σε A</b>	<b>Body σε V</b>	<b>Emmision σε mA</b>	<b>Torr 10<sup>-4</sup></b>	<b>min</b>
2,5	0,06	38	39	400	2	600	3,63	10	50	2,1	15
3,33	0,05	38	43	450	2	600	3,35	10	53	3,3	12
3,34	0,23	38	95	500	5	500	3,5	11	125	3,3	15
3,34	0,15	38	110	500	5	450	3,1	11	133	3,3	12
3,62	0,36	38	28	500	2	400	3,88	11	35	1,9	7
3,7	0,36	38	28	500	2	400	3,64	11	35	2	7
3,67	0,38	38	27	500	2	400	3,77	10	34	1,9	15
3,6	0,37	38	27	500	2	400	3,08	10	34	1,9	30
<b>Κάθοδος</b>	<b>Θάλαμος</b>		<b>Δέσμη</b>		<b>Επιταχυντής</b>		<b>Ουδετεροποιητής PBN</b>			<b>Πίεση</b>	<b>Χρόνος</b>
<b>I σε A</b>	<b>I σε A</b>	<b>Τάση σε V</b>	<b>I σε mA</b>	<b>Τάση σε V</b>	<b>I σε mA</b>	<b>Τάση σε V</b>	<b>Heater σε A</b>	<b>Body σε V</b>	<b>Emmision σε mA</b>	<b>Torr 10<sup>-4</sup></b>	<b>min</b>
3,41	0,05	38	24	430	1	250	3,82	17	30	1,3	12
3,41	0,05	38	32	450	2	400	3,65	11	40	1,7	12
2,5	0,06	38	39	400	2	600	3,63	10	50	2,1	15
3,33	0,05	38	43	450	2	600	3,35	10	53	3,3	12
3,6	0,05	38	55	500	4	450	2,05	11	65	2,5	11
3,44	0,05	38	23	500	1	400	4,49	11	39	1,7	2
3,45	0,05	38	25	500	1	400	4,09	10	39	1,9	4
3,34	0,05	38	27	500	1	400	3,85	11	39	1,8	6
3,24	0,05	38	26	500	1	400	3,85	12	39	1,8	8
3,64	0,33	38	25	500	2	400	3,89	12	32	1,8	10
3,64	0,36	38	27	500	2	400	3,33	11	34	1,9	15
3,59	0,36	38	27	500	2	400	3,23	10	34	1,9	2
3,47	0,36	38	27	500	2	400	3,05	11	34	2	6
3,55	0,36	38	27	500	2	400	3,06	12	34	2	10
3,42	0,36	38	27	500	2	400	2,76	10	34	2	15
4,7	0,94	38	50	700	2	400	3,2	10	64	2,9	20
4,75	0,74	38	37	500	3	400	2,95	13	44	1	20
4,44	0,95	38	52	750	4	400	3,05	10	67	2,3	20
4,42	0,94	38	50	700	4	400	3,1	10	63	1,8	20

### 3.3 Μελέτη μεταβολών της μορφολογίας σε δείγματα σύνθετων Ημιαγωγών.

Οι παρακάτω δοκιμές έγιναν με σκοπό το άθροισμα των τάσεων δέσμης και επιταχυντή να είναι μεγαλύτερες από 500V και μικρότερη από 1500V. Τα όρια για



την ενέργεια καθαρισμού από τη βιβλιογραφία είναι 500eV-1000eV και ο σκοπός είναι να δοκιμαστούν συνθήκες γύρω από τα 1000eV ώστε να χρησιμοποιηθεί αργότερα αυτό το όριο για ιοντική χάραξη.

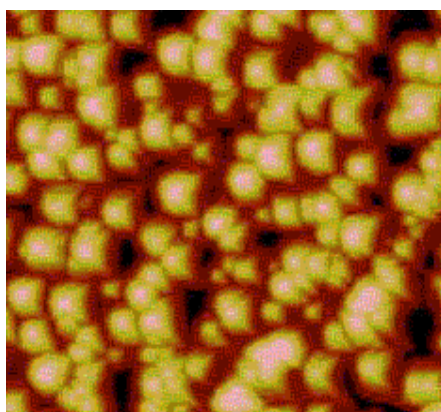
### 3.3.1 GaN :

**ΓΜΒΕ 95α :** Το δείγμα χωρίζεται σε δύο περιοχές εκ των οποίων η μία ετίθεται στην συνθήκη :

I καθόδου	I δέσμης	V δέσμης	V επιταχυντή	V body	I emission	Πίεση Torr	Χρόνος
3.38A	29mA	450V	250V	11V	35mA	$1,3 \cdot 10^{-4}$	12min

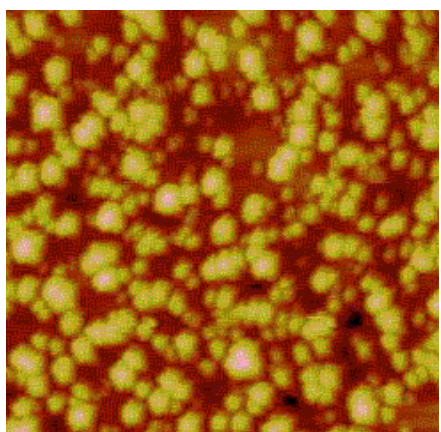
Πυκνότητα δέσμης: **4,105mA/cm<sup>2</sup>**.

Η τραχύτητα από περιοχή σε περιοχή αλλάζει από **84,488nm** σε **86,242nm** που βρίσκεται μέσα στα όρια του σφάλματος.



**Rms 84,488 nm**

*95α πριν την έκθεση*



**Rms 86,242 nm**

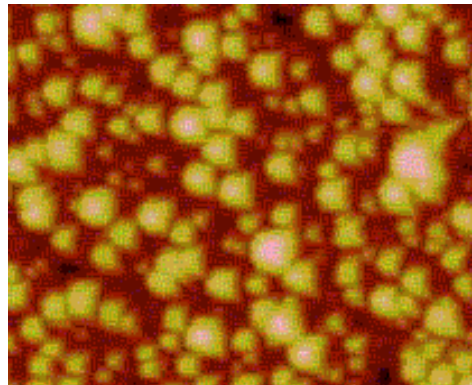
*95α μετά την έκθεση*

**ΓΜΒΕ 95β :** Το δείγμα είχε χωριστεί σε δύο περιοχές η συνθήκη έκθεσης ήταν:

I <sub>καθόδου</sub>	I <sub>δέσμης</sub>	V <sub>δέσμης</sub>	V <sub>επιταχυντή</sub>	V <sub>body</sub>	I <sub>emission</sub>	Πίεση Torr	Χρόνος
3.34A	36mA	450V	250V	12V	45mA	2,3 10 <sup>-4</sup>	12min

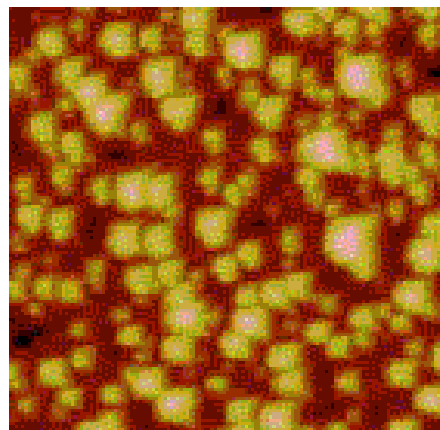
Πυκνότητα δέσμης: **5,1mA/cm<sup>2</sup>**.

Και τα αποτελέσματα είναι αλλαγή στην τραχύτητα κατά **0,100 nm**. Η αλλαγή αυτή είναι μέσα στα όρια του σφάλματος.



Rms 60,513nm

*ΓΜΒΕ 95β πριν την έκθεση*



Rms 60,613nm

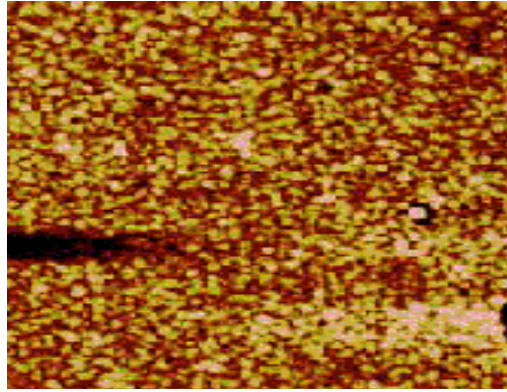
*ΓΜΒΕ 95β μετά την έκθεση*

**ΓΜΒΕ 57 Ga N/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** Το δείγμα είχε χωριστεί σε δύο περιοχές. Εκ των οποίων η μία εκτέθηκε στη δέσμη. Οι συνθήκες που δοκιμάστικαν ήταν:

I <sub>καθόδου</sub>	I <sub>δέσμης</sub>	V <sub>δέσμης</sub>	V <sub>επιταχυντή</sub>	V <sub>body</sub>	I <sub>emission</sub>	Πίεση Torr	Χρόνος
3.33A	43mA	450V	600V	10V	53mA	2,2 10 <sup>-4</sup>	12min

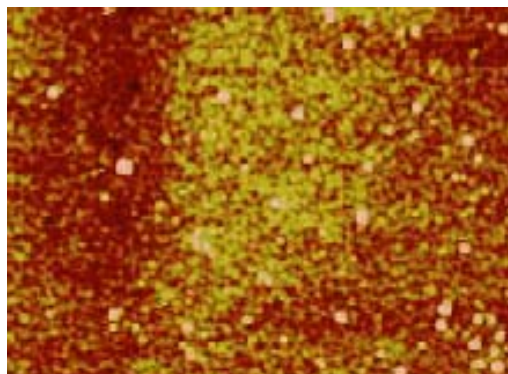
Πυκνότητα δέσμης: **6,086mA/cm<sup>2</sup>**.

Μελέτη με AFM έδειξε ότι η τραχύτητα αλλάζει κατά **0,78nm** που βρίσκεται μέσα στα όρια του σφάλματος.



**Rms 8,424**

*57 πριν την έκθεση*



**Rms 9,214**

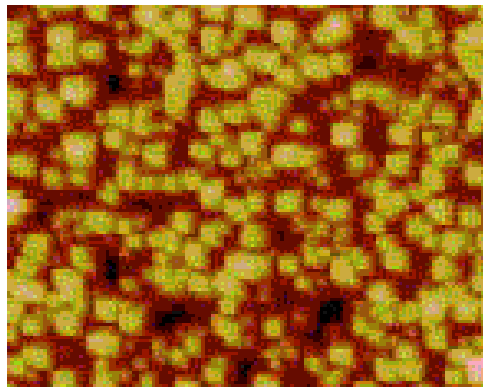
*57 μετά την έκθεση*

**ΓΜΒΕ 96:** Το δείγμα αυτό χωρίστηκε σε δύο περιοχές και εκτελέστηκε η διαδικασία που έχει ισχυρό ρεύμα δέσμης:

I <sub>καθόδου</sub>	I <sub>δέσμης</sub>	V <sub>δέσμης</sub>	V <sub>επιταχυντή</sub>	V <sub>body</sub>	I <sub>emission</sub>	Πίεση Torr	Χρόνος
3.45A	86mA	670V	600V	11V	100mA	$2,4 \cdot 10^{-4}$	12min

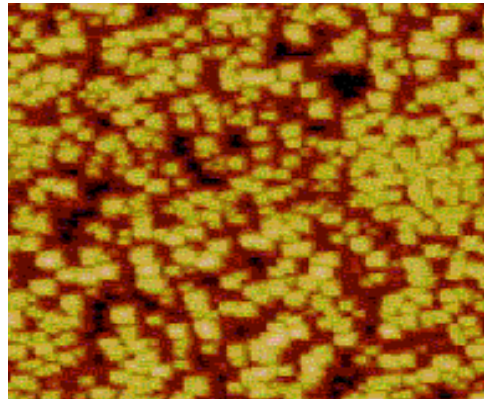
Πυκνότητα δέσμης: **12,17 mA/cm<sup>2</sup>**.

Και η αλλαγή στη τραχύτητα είναι **1,867nm**. Μη ουσιαστική αλλαγή.



**Rms 41,290**

96 Πριν την έκθεση



Rms 43,067

96 Μετά την έκθεση

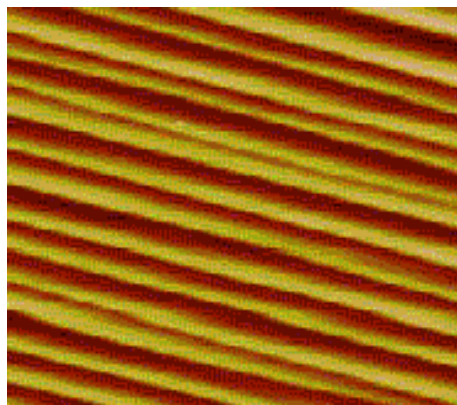
Οι μέχρι τώρα συνθήκες που δοκιμάστικαν με προοδευτική αύξηση της πυκνότητας δέσμης και υπό σταθερό χρόνο δείχνουν αλλαγές στην τραχύτητα της επιφάνειας του GaN που βρίσκονται μέσα στα όρια του σφάλματος.

### 3.3.2 SiC :

Το δείγμα χωρίστηκε σε δύο περιοχές και η συνθήκη ήταν ίδια με εκείνη που χρησιμοποιήσαμε στο 57 GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> :

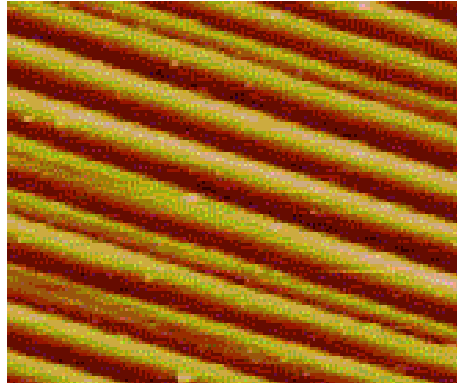
I <sub>καθόδου</sub>	I <sub>δέσμης</sub>	V <sub>δέσμης</sub>	V <sub>επιταχυντή</sub>	V <sub>body</sub>	I <sub>emission</sub>	Πίεση Torr	Χρόνος
3.33A	43mA	450V	600V	10V	53mA	2,2 10 <sup>-4</sup>	12min

Η αλλαγή στην τραχύτητα είναι **0,533nm**. Μέσα στα όρια του σφάλματος  
Πυκνότητα δέσμης: **6.09 mA/cm<sup>2</sup>**.



Rms 3,968nm

SiC πριν την έκθεση



**Rms 4,501nm**

*SiC μετά την έκθεση*

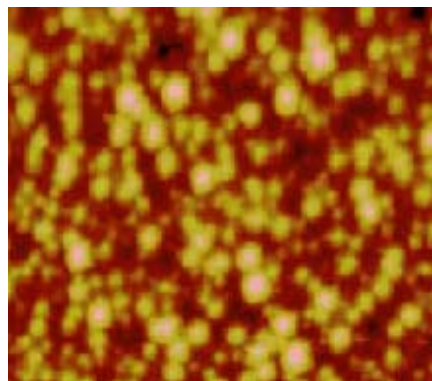
### 3.3.3 SiC and GaN :

Στη συνέχεια έγινε συγκριτική μελέτη για GaN (ΓΜΒΕ 96) και SiC με έκθεση σε μεγάλη πυκνότητα δέσμης με την συνθήκη:

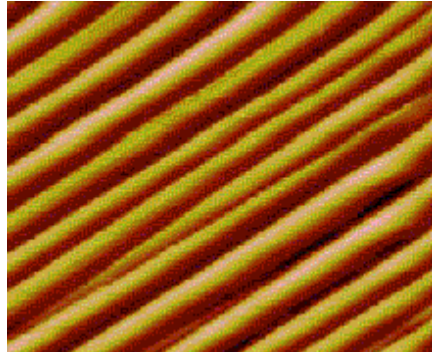
I καθόδου	I δέσμης	V δέσμης	V επιταχυντή	V body	I emission	Πίεση Torr	Χρόνος
3.34A	110mA	500V	450V	11V	133mA	$3,3 \cdot 10^{-4}$	12min

Πυκνότητα δέσμης: **15,57 mA/cm<sup>2</sup>**.

Τα παραπάνω δείγματα παρουσιάζουν αλλαγή στην τραχύτητα για μεν το GaN σημαντική  $60,61-47,07=13,54$  nm ενώ για το SiC  $5,165-4,497=0,668$ nm όχι ουσιαστικά παρατηρούμενη αλλαγή.

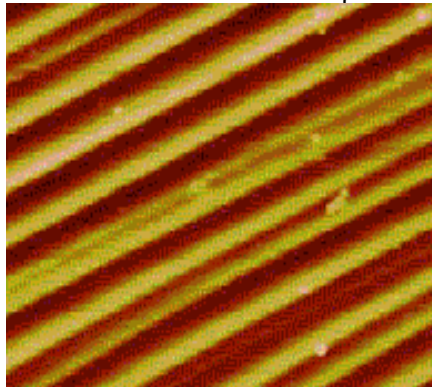


**Rms 47.707nm**



**Rms 5,165nm**

*SiC Μετά την έκθεση*



**Rms 4,497nm**

*SiC Πρίν την έκθεση*

Συμπερασματικά το SiC δεν παρουσιάζει ουσιαστική αλλαγή στην τραχύτητα ακόμα και για πολύ μεγάλη πυκνότητα ρεύματος δέσμης. Για το GaN οι συνθήκες για να παρατηρηθεί σημαντική αλλαγή στην τραχύτητα είναι μεγάλο ρεύμα δέσμης ή πυκνότητα δέσμης

### 3.3.3 GaAs

Τα παρακάτω δείγματα είναι αυτά του GaAs MBE 157 όπου σε συνθήκες χαμηλής πυκνότητας ρεύματος δέσμης δεν παρουσιάζουν αλλαγή στην τραχύτητα τους.

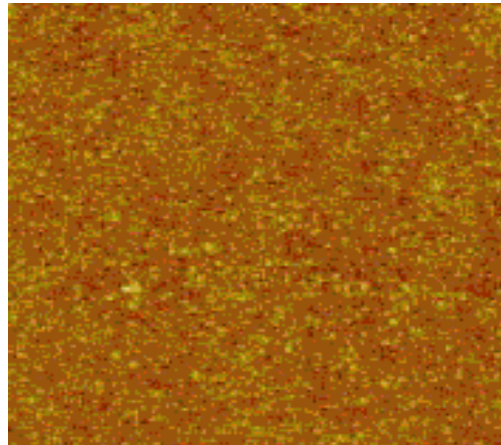
Για το GaAs η πυκνότητα δέσμης ήταν: **3,82 mA/cm<sup>2</sup>**.

Οι συνθήκες έκθεσης ήταν:

<b>I</b> καθόδου	<b>I</b> δέσμης	<b>V</b> δέσμης	<b>V</b> επιταχυντή	<b>V</b> body	<b>I</b> emission	<b>Πίεση Torr</b>	<b>Χρόνος</b>
------------------	-----------------	-----------------	---------------------	---------------	-------------------	-------------------	---------------

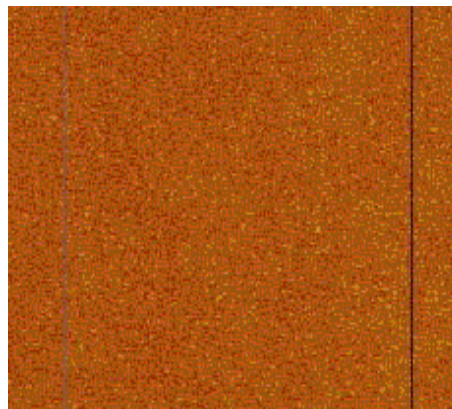
3,59	27	500	400	10	34	1,9	2
3,47	27	500	400	11	34	2	6
3,55	27	500	400	12	34	2	10
3,54	27	500	400	12	34	2	15

**2min**



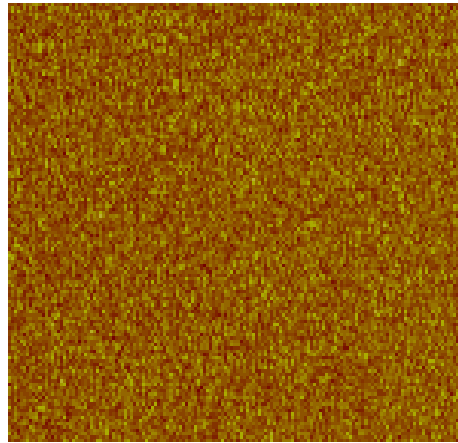
**Rms 0,898 nm**

**6min**



**Rms 1,580 nm**

**15min**



Rms 2,628 nm

### 3.4 Μελέτη των ρυθμών χάραξης

#### 3.4.1 GaN

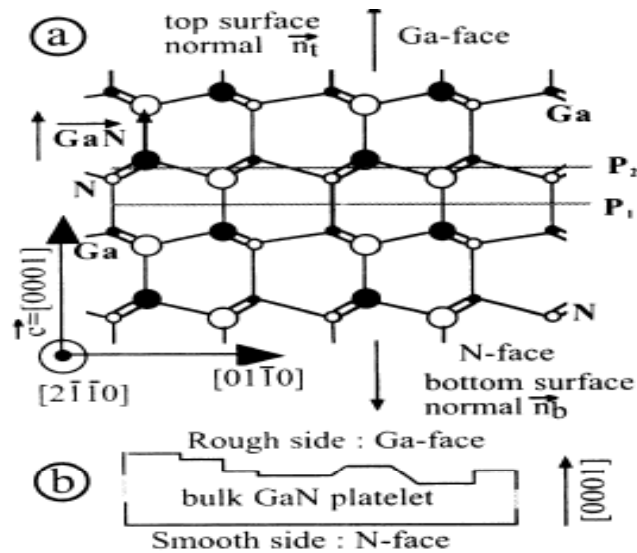
Η τεχνική ion gun έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την τεχνολογία κατασκευής τρανζίστορ από νιτρίδια. Ειδικότερα για τις τρέχουσες ανάγκες της ομάδας μικροηλεκτρονικής μελετήθηκαν δύο θέματα :

A) Ρυθμός χάραξη Ga και N face GaN σε σχέση με το χρόνο έκθεσης

Ο χαρακτηρισμός G face και N face αναφέρεται στην κατευθυντικότητα του πλέγματος. Την κατευθυντικότητα του πλέγματος την ορίζει το διάνυσμα  $\mathbf{c}$  [0001], σε σχέση με το διάνυσμα αναφοράς  $\mathbf{n}$  που είναι παράλληλο με την επιφάνεια του δείγματος. Κατά συνέπεια η επιφάνεια του GaN έχει κατευθυντικότητα Ga ή N όταν το διάνυσμα από το Ga στο N είναι παράλληλο [0001] ή ανιπαράλληλο [000-1] με το  $\mathbf{c}$  (Σχήμα 1). Αυτό έχει σα αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση του ρυθμού χάραξης για τις δύο περιπτώσεις της κατευθυντικότητας της επιφάνειας του κρυστάλλου.

Σχήμα 1: Κατευθυντικότητας<sup>1</sup> κρυσταλλικού πλέγματος





Για τη μέτρηση ρυθμού χάραξης από το ion gun χρησιμοποιήθηκαν τα δείγματα GaN ΓΜΒΕ 81 (N face) και 82 (Ga face), περιοχές των οποίων υποβλήθηκαν ταυτόχρονα για διάφορους χρόνους έκθεσης ( 5-10-15-27λεπτά). Εκτελούμε για το σκοπό αυτό συνθήκη με σταθερό ρεύμα δέσμης 27mA και τάση δέσμης **500V** ώστε να έχουμε σταθερή πυκνότητα δέσμης:  $27/(\pi d^2/4)=3,82\text{mA/cm}^2$ .

Οι συνθήκες έκθεσης ήταν:

Κάθοδος	Θάλαμος		Δέσμη		Επιταχυντής		Ουδετεροποιητής PBN			Πίεση Torr $10^{-4}$	Χρόνος min
	I σε A	Τάση σε V	I σε mA	Τάση σε V	I σε mA	Τάση σε V	Heater σε A	Body σε V	Emmision σε mA		
3,70	0,38	38	27	500	2	400	2,89	10	34	1,9	5
3,45	0,39	38	27	500	2	400	2,45	11	34	2,2	10
3,44	0,36	38	27	500	2	400	2,39	10	34	1,8	15
4	0,45	38	27	500	2	400	3,75	11	34	2,1	27

Τα αποτελέσματα που παίρνουμε συνοπτικά είναι:

Χρόνος	81		82	
	15(min)	557 Å βάθος χάραξης	37.133 Å/min Ρυθμός χάραξης	530 Å βάθος χάραξης
27(min)	1750 Å βάθος χάραξης	64,8 Å/min Ρυθμός χάραξης	1000 Å βάθος χάραξης	37.133 Å/min Ρυθμός χάραξης

Παρατηρούμε ότι το δείγμα 81 που είναι N face μέχρι και τα 15 λεπτά έχει περίπου τον ίδιο ρυθμό χάραξης με το Ga face με μικρή διαφορά. Σε παραπάνω όμως έκθεση η μικρή αυτή διαφορά γίνεται πολύ μεγαλύτερη και το φαινόμενο δείχνει να

είναι συσσωρευτικό. Το αποτέλεσμα αυτό είναι σε συμφωνία με άλλες μεθόδους etching όπου δείγματα N face είναι περισσότερο «χαράξιμα» από εκείνα με Ga face<sup>2</sup>.

Β) Ρυθμός χάραξης GaN G-face σε σχέση με το ρεύμα δέσμης

Στη συνέχεια το δείγμα 82 G-face εκτέθηκε με σταθερό χρόνο και με μεγαλύτερο ρεύμα δέσμης.

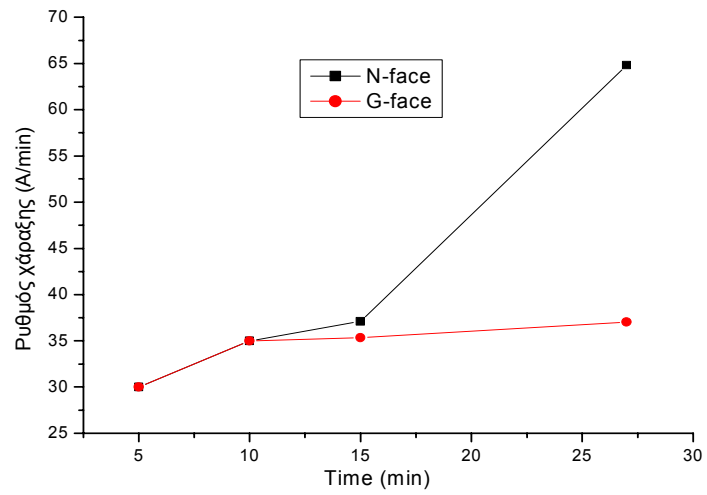
Οι συνθήκες έκθεσης ήταν:

Κάθοδος I σε A	Θάλαμος		Δέσμη		Επιταχυντής		Ουδετεροποιητής PBN			Πίεση Torr 10 <sup>-4</sup>	Χρόνος min
	I σε A	Τάση σε V	I σε mA	Τάση σε V	I σε mA	Τάση σε V	Heater σε A	Body σε V	Emmision σε mA		
4	0,45	38	27	500	2	400	3,75	11	34	2,1	20
4,75	0,74	38	37	500	3	400	2,95	13	44	1	20
4,7	0,94	38	50	500	4	400	3,2	10	64	2,9	20

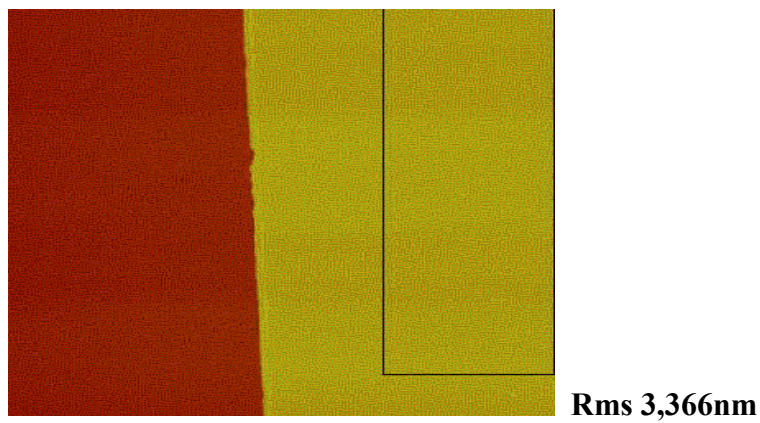
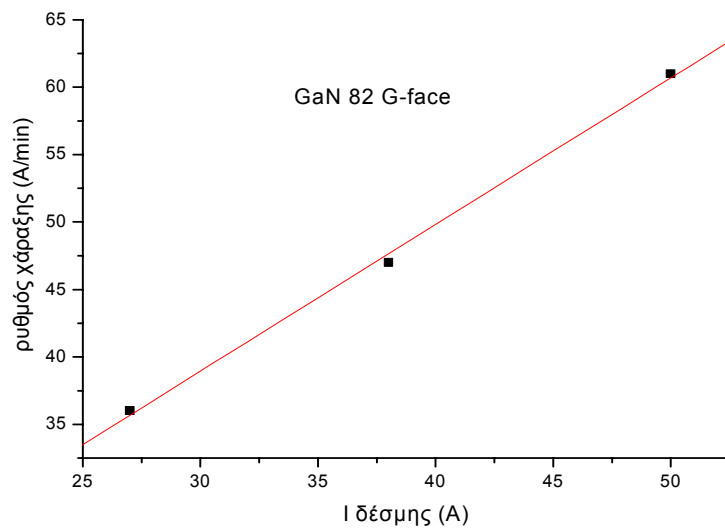
Τα αποτελέσματα από αυτή την συγκετρωτικά είναι:

I δεσμης A	Ρυθμός χάραξης σε Å/min
27	36
38	47
50	61

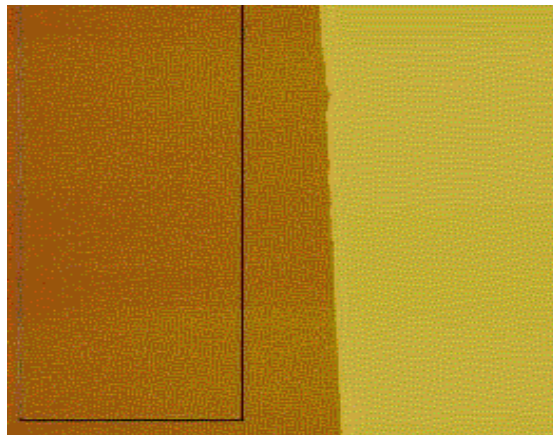
Σχήμα 2: Ρυθμοί χάραξης του GaN σε σχέση με το χρόνο



Σχήμα 3 : Ρυθμοί χάραξης του GaN σε σχέση με την ένταση δέσμης

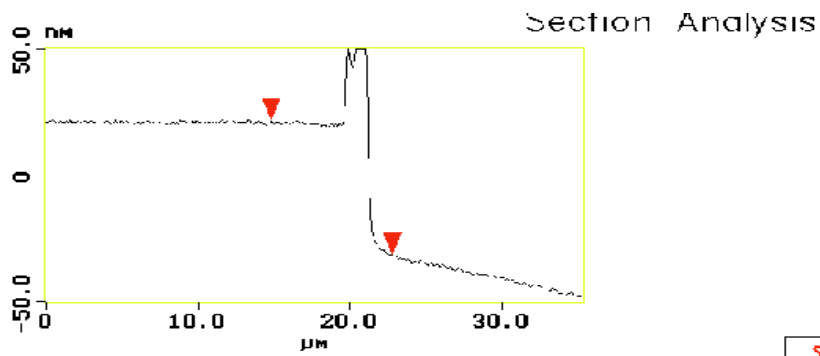


82 μη εκτεθειμένη περιοχή

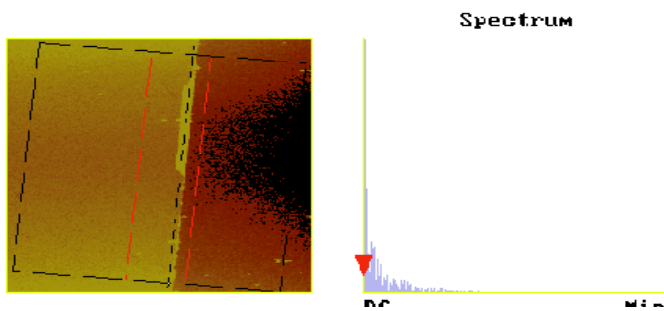


Rms 4,423nm

82 Εκτεθειμένη περιοχή

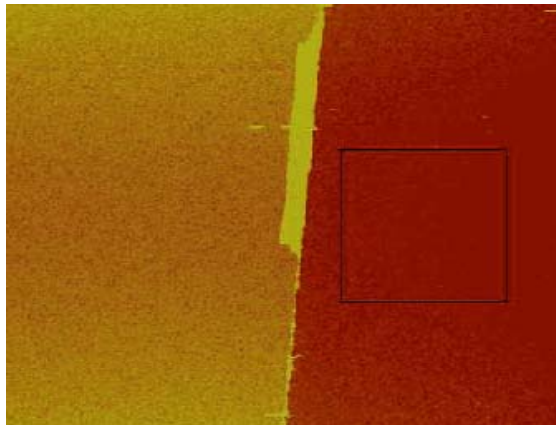


L	7.969 μm
RMS	26.672 nm
Ic	DC
Ra(Ic)	17.529 nm
Rmax	103.63 nm
Rz	103.63 nm
Rz Cnt	2



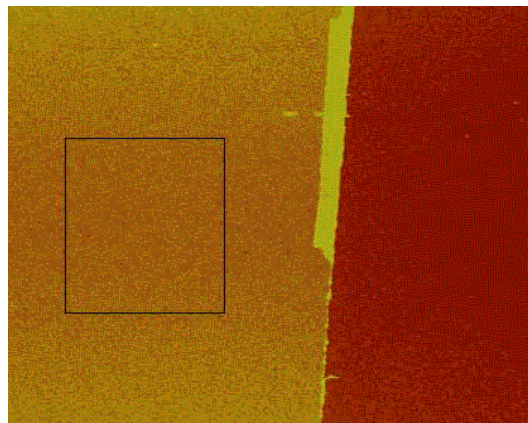
Surface distance	7.984 μm
Horiz distance(L)	7.969 μm
Vert distance	53.043 nm
Angle	0.381 deg
Surface distance	
Horiz distance	
Vert distance	
Angle	
Surface distance	
Horiz distance	
Vert distance	
Angle	
Spectral period	DC
Spectral freq	0 Hz

82 μέτρηση βάθους χάραξης με ο AFM



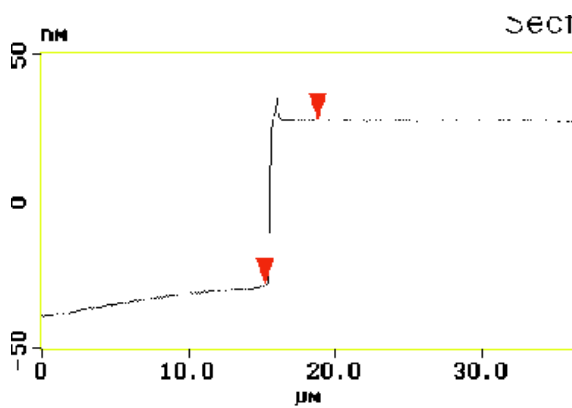
Rms 7,809 nm

81 Εκτεθειμένη περιοχή



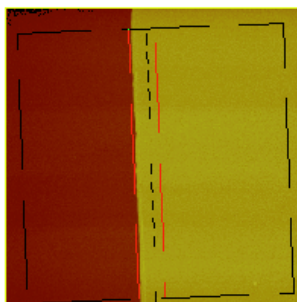
Rms 6,849nm

81 μη εκτεθειμένη περιοχή

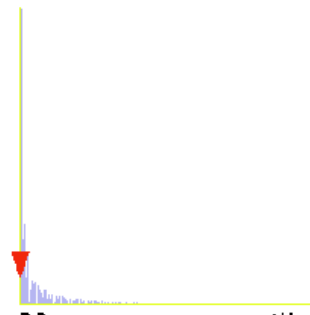


Section Analysis

L	3.594 μm
RMS	15.665 nm
Ic	DC
Ra(Ic)	8.953 nm
Rmax	58.037 nm
Rz	58.037 nm
Rz Cnt	2



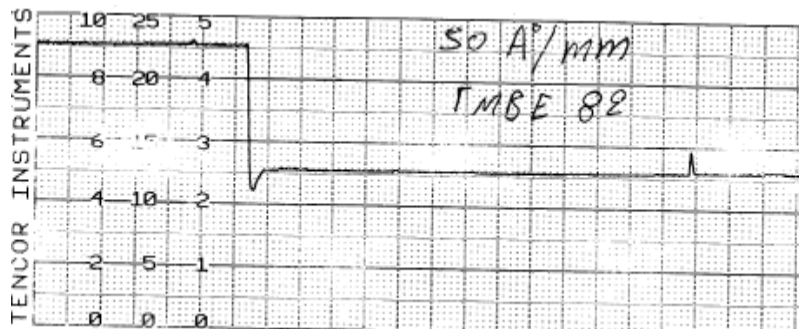
Spectrum



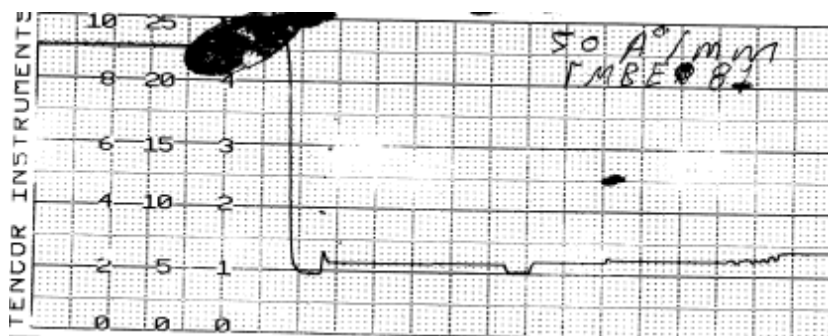
Surface distance	3.601 μm
Horiz distance(L)	3.594 μm
Vert distance	55.784 nm
Angle	0.889 deg
Surface distance	
Horiz distance	
Vert distance	
Angle	
Spectral period	DC
Spectral freq	0 Hz

81 μέτρηση βάθους χάραξης με το AFM

### Μέτρηση Προφίλομετρίας Εργαστηρίου



27 min 82 Ga Face

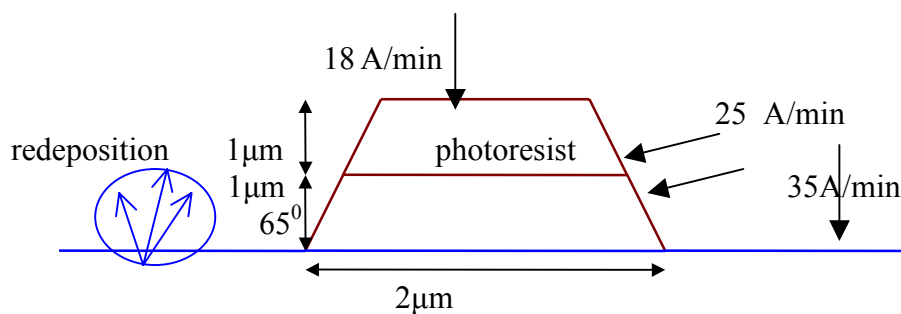


27 min 81 N face

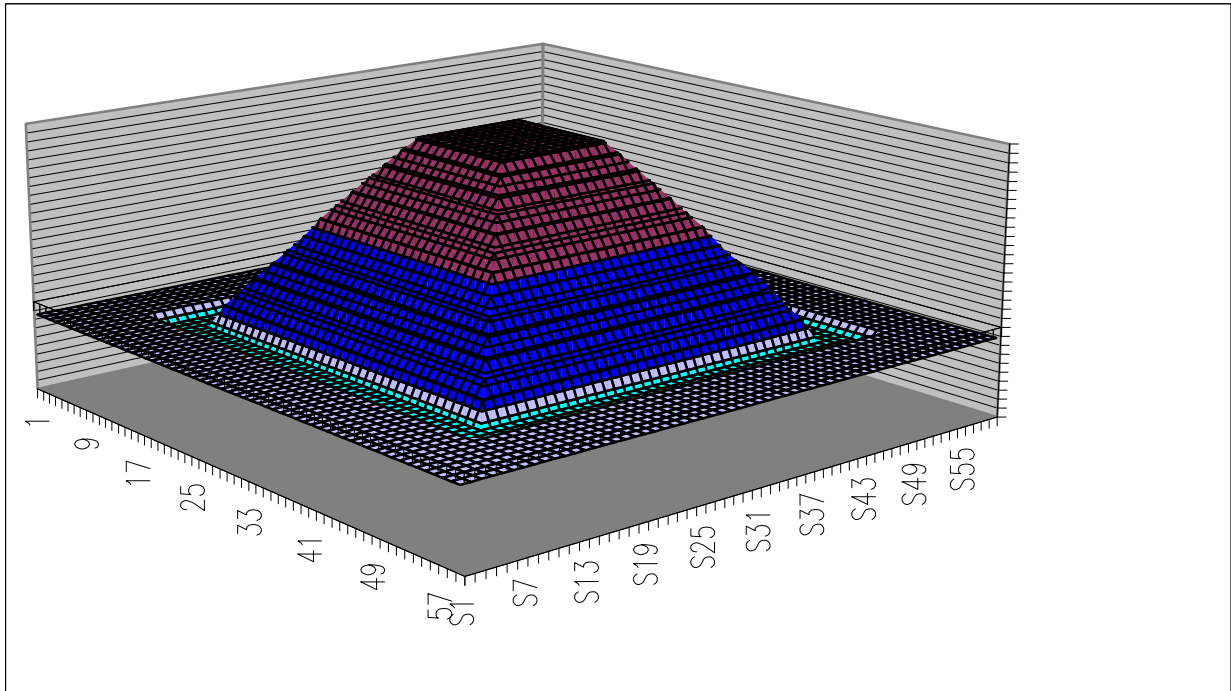
#### 3.4.1.1 Modeling ιοντικής χάραξης<sup>3</sup>

Σύμφωνα με τους ρυθμούς χάραξης από τα αποτελέσματα των πειραμάτων σε Å/min κατασκευάστηκε ένα θεωρητικό μοντέλο για την έκθεση σε ion gun λαμβάνοντας υπόψη φαινόμενα όπως redeposition, και trenches, σε συνάρτηση με τη γωνία κλίσης του σκαλοπατιού που εδώ θεωρήθηκε  $65^{\circ}$  μοίρες. Το σκαλοπάτι από φωτορητίνη έχει ύψος  $2\mu\text{m}$ . Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία ο πλευρικός ρυθμός χάραξης είναι αυξημένος κατά περίπου 40% και για την φωτορητίνη και για το GaN.

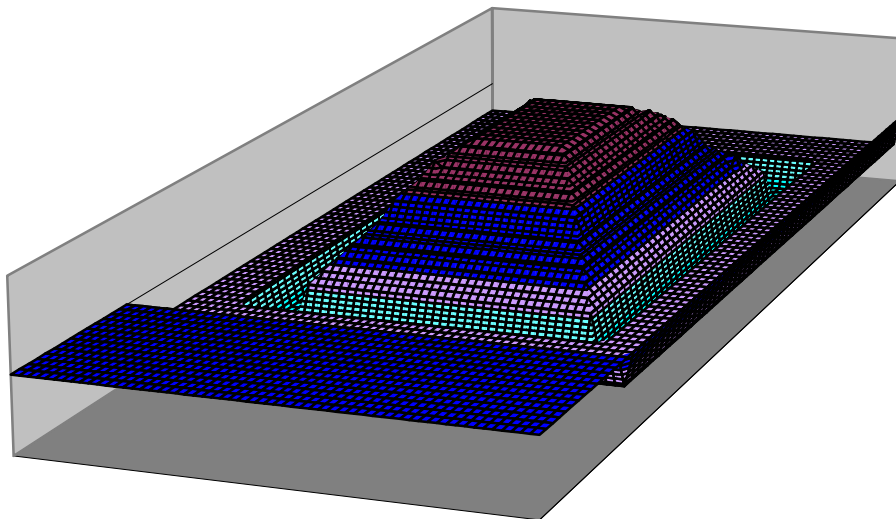
Σχήμα 4 : ρυθμοί χάραξης σε κάθε επιφάνεια



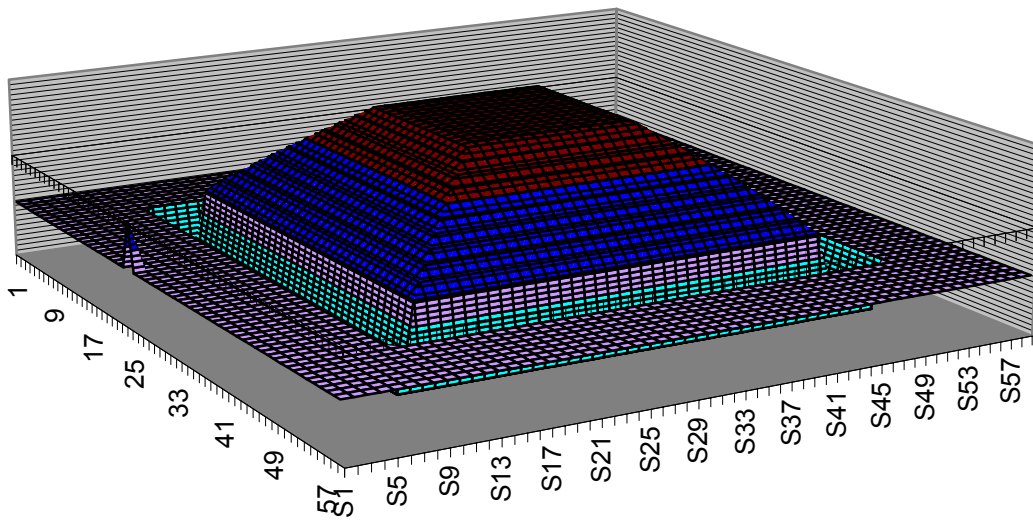
Σε τρεις διάστάσεις η τοπογραφία υπολογισμένη με EXCEL έχει ως εξής :



2min βάθος trenches :  $11\text{\AA}$



10min : βάθος trenches :  $70\text{\AA}$



27min : βάθος trenches : 189Å

Τα ανίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα σε πειράματα χάραξης GaN όπου παρατηρούνται trenches σε χάραξη GaN γύρω στα 150Å σε 27min έκθεση που είναι η προβλεπόμενη τάξη μεγέθους από το μοντέλο αυτό. Η μικρή απόκλιση οφείλεται στο ότι στο υπολογιστικό μοντέλο θεωρήσαμε την κλίση της ρυτίνας λίγο μικρότερη από ότι στην πραγματικότητα είναι.

### 3.4.2 GaAs

Δείγμα ημιαγωγού GaAs χωρίστηκε σε πέντε περιοχές. Η δομή του δείγματος είναι:

1,5μm n GaAs
1,0μm n <sup>+</sup> GaAs
GaAs substrate

Η πρώτη από αυτές τις περιοχές δεν εκτέθηκε καθόλου σε ιοντική δέσμη Ar<sup>+</sup>, οι υπόλοιπες τέσσερις εκτέθηκαν σε χρόνους 2,6,10,15 λεπτών. Η έκθεση που έγινε ήταν όμοια όχι μόνο σε χρόνο έκθεσης αλλά και σε πυκνότητα δέσμης. Οι συνθήκες ήταν:



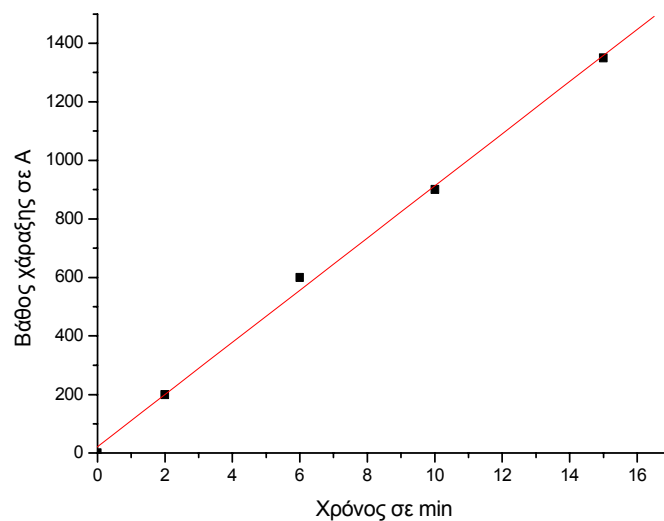
I καθόδου	I δέσμης	V δέσμης	V επιταχυντή	V body	I emission	Πίεση Torr	Χρόνος
4,3	27	500	400	15	34	$1,4 \cdot 10^{-4}$	2 min
4,3	27	500	400	13	34	$1,4 \cdot 10^{-4}$	6min
4,05	27	500	400	12	34	$1,4 \cdot 10^{-4}$	10min
4,01	27	500	400	12	34	$1,3 \cdot 10^{-4}$	15min

Σε σχέση με την αλλαγή στην τραχύτητα της επιφάνειας δεν παρατηρούμε σημαντική αλλαγή κατά τη μέτρηση του δείγματος που εκτέθηκε σε 2min και εκείνου στα 15 min. Αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με τα συμπεράσματα των πειραμάτων που έγιναν για την μέτρηση της τραχύτητας. Τα αποτελέσματα για την επίδραση της ιοντικής δέσμης πάνω στην επιφάνεια του GaAs σε σχέση με τη χάραξη παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

<b>Χρονοι min</b>	2	6	10	15
<b>Υψος χάραξης Å</b>	200	600	900	1350
<b>Ρυθμός Å /min</b>	100	100	90	90

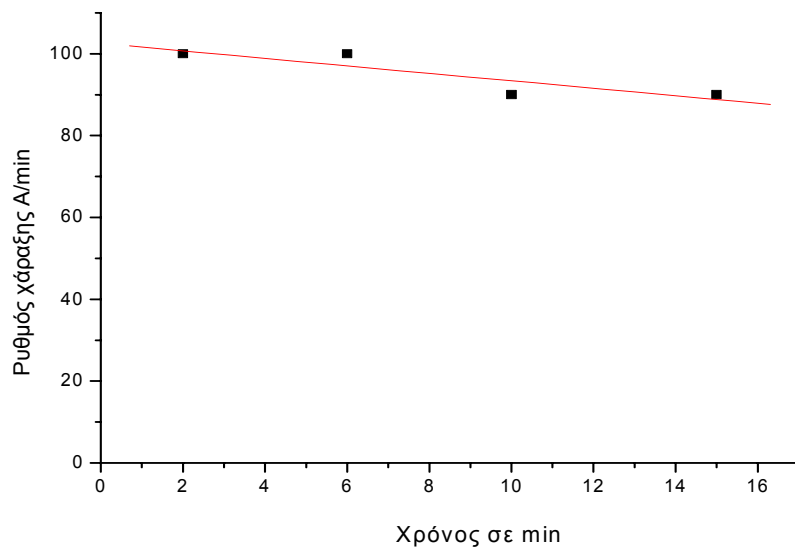
Το βάθος χάραξης σε συνάρτηση του χρόνου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:

Σχήμα 5: Βάθος χάραξης σε συνάρτηση του χρόνου



Οι δε ρυθμοί χάραξης που είναι σταθεροί σαν συνάρτηση του χρόνου παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:

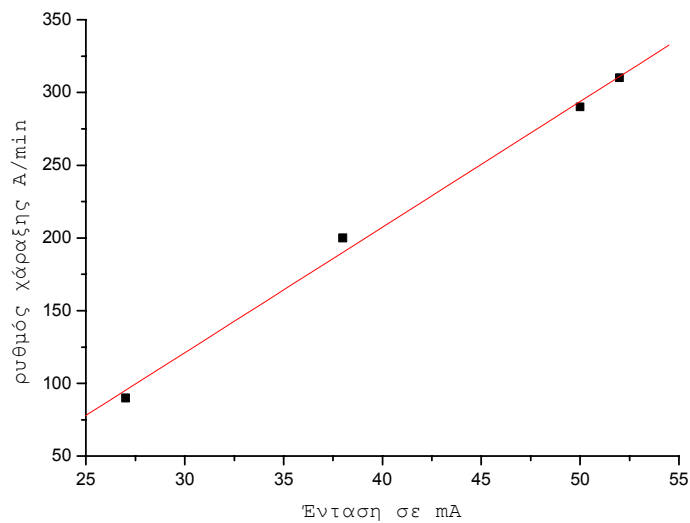
Σχήμα 6 :Ρυθμοί χάραξης σα συνάρτηση του χρόνου



Ταυτόχρονα έγιναν μετρήσεις με το ίδιο δείγμα για σταθερό χρόνο έκθεσης 20min και μεταβολή στην ένταση του ρεύματος δέσμης για τιμές 27mA, 37mA, 50mA και 52mA. Από τα πειράματα αυτά οι ρυθμοί χάραξης σα συνάρτηση της έντασης ήταν:

Ένταση σε mA	Ρυθμός σε A/min
27	90
38	200
50	290
52	310

Σχήμα 7: Ρυθμοί χάραξης σα συνάρτηση της έντασης της δέσμης GaAs



Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν τη σταθερότητα των ρυθμών χάραξης του GaAs σε σχέση με το χρόνο χάραξης ενώ ταυτόχρονα τη γραμμική σχέση του ρυθμού χάραξης από την ένταση του ρεύματος δέσμης όταν ο χρόνος έκθεσης μένει σταθερός.

### 3.4.3 SiC

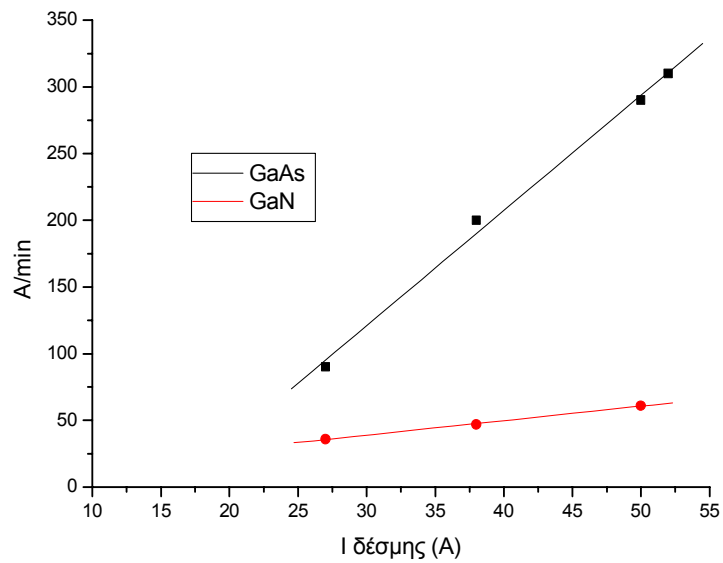
Σε δείγματα SiC δεν έγιναν πειράματα χάραξης αφού το υλικό αυτό σε ιοντική δέσμη δεν είναι εύκολα χαράξιμο και υπάρχουν χημικοί τρόποι επεξεργασίας αυτού πολύ περισσότερο αποδοτικοί.

### 3.4.4 Συγκριτικά αποτελέσματα χάραξης σε GaAs και GaN(G-face)

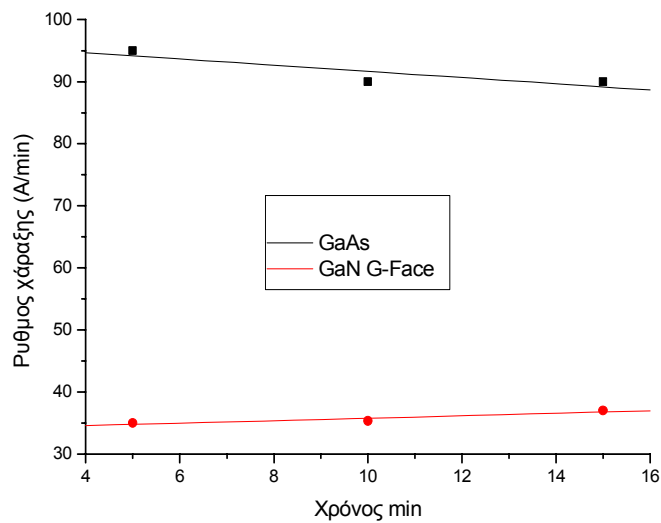
Συνοπτικά η εξάρτηση του ρυθμού χάραξης για το GaAs και το GaN σε σχέση με την ένταση

δέσμης είναι:

Σχήμα 8: Ρυθμοί χάραξης σε συνάρτηση της έντασης της δέσμης GaAs και GaN



Σχήμα 9: Ρυθμοί χάραξης σε συνάρτηση του χρόνου έκθεσης για GaAs και GaN



### 3.5 Μελέτη ηλεκτρικών παραμέτρων μετά από έκθεση σε ιοντική δέσμη Ar

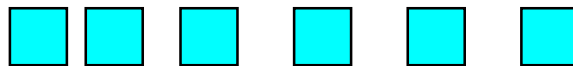
#### 3.5.1 Μετρήσεις ειδικής αντίστασης ωμικών επαφών σε $n^+$ GaAs<sup>4-5</sup>

##### 3.5.1.1 Είσαγωγή:

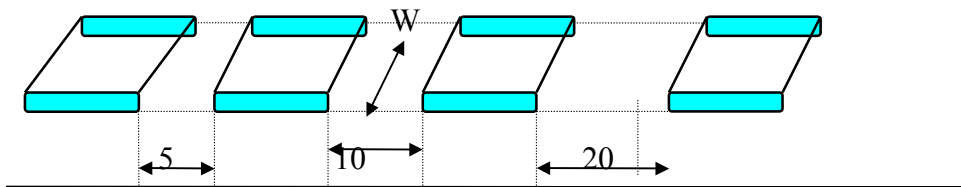
Ο σκοπός των μετρήσεων αυτών είναι η εύρεση των ειδικών αντιστάσεων για τους διάφορους χρόνους έκθεσης και η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Ένας από τους πιο διαδεδομένους τρόπους ποσοτικής αξιολόγησης της επίδοσης ωμικών επαφών σε ημιαγωγούς είναι η μέτρηση της ειδικής αντίστασης επαφής  $\rho_c$  ( $\Omega \text{ cm}^2$ ). Οι μετρήσεις αυτές γίνονται με το μοντέλλο Transmission Line Model (TLM). Οι διατάξεις των ωμικών επαφών για τη μέτρηση αυτή αντιστοιχούν στα παρακάτω σχήματα:

Σχήμα 10: Διάταξη αντιστάσεων

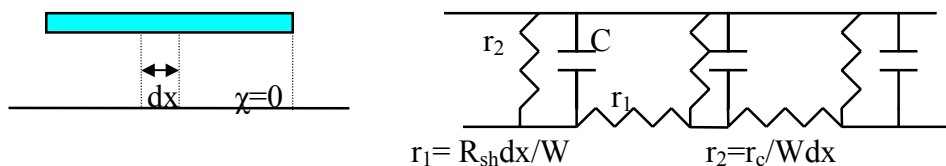


Σχήμα 11: Διάταξη αντιστάσεων



Το μοντέλο TLM (transmission line model) θεωρεί την αντίσταση σαν γραμμή μεταφοράς με παραμέτρους αντίσταση και αγωγιμότητα:

Σχήμα 12: TLM model



$R=R_{sh} / W$  ,  $G=W(1/r_c + iC\omega)$  όπου  $R_{sh}$  είναι η αντίσταση φύλλου κάτω από την ωμική επαφή. Από τις εξισώσεις γραμμών μεταφοράς προκύπτει ότι:

$$V(x)=V_1 \cosh(\gamma x)-I_1 Z \sinh(\gamma x) \quad I(x)=I_1 \cosh(\gamma x)-V_1 Z \sinh(\gamma x)$$

$$\text{Με } Z = \sqrt{\frac{R}{G}} = \frac{1}{W} \sqrt{\frac{R_{SH} r_c}{(1+i\omega C r_c)}} \quad \text{και} \quad \gamma = \sqrt{RG} = \sqrt{\frac{R_{SH} (1+i\omega C r_c)}{r_c}}$$

και κατά συνέπεια για  $\omega=0$   $Z=R_c=(R_{sh} r_c)^{1/2}/W$  και  $\gamma=1/L_t=(R_{sh} / r_c)^{1/2}$ .

Για γραμμή μεταφοράς πεπερασμένη μήκους π.χ d :

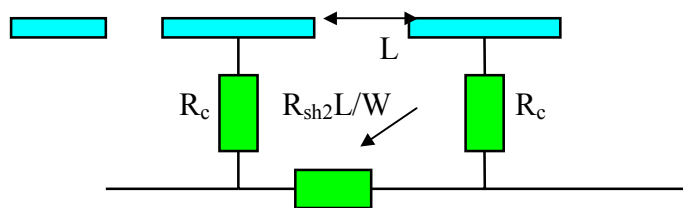
$$R_c = Z \coth(d/L_t) = \frac{\sqrt{R_{sh} r_c}}{W} \coth\left(\frac{d}{L_t}\right)$$

Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης διατάξεως ωμικών επαφών όπως στο σχήμα 10 και 11 έχω:

Υπάρχουν δύο αντιστάσεις φύλλου, διαφορετικές μεταξύ τους, η  $R_{sh2}$  στην περιοχή από επαφή σε επαφή και η  $R_{sh1}$  κάτω ακριβώς από την επαφή.

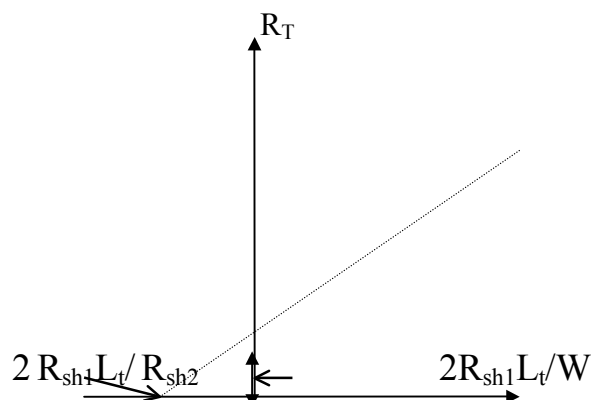
Η αντίσταση λοιπόν από επαφή σε επαφή θα είναι δύο αντιστάσεις επαφής συν την αντίσταση μεσοδιαστήματος:

Σχήμα 13 : Αντιστάσεις



$$R_T = 2R_C + R_{sh} \frac{L}{W} = 2R_{sh1} \frac{L_t}{W} \coth\left(\frac{d}{L_t}\right) + R_{sh2} \frac{L}{W}$$

Όμως αν  $d \gg 2L_t$   $\coth(d/L_t) = 1$  άρα  $R_T = \frac{2R_{sh1}L_t}{W} + \frac{R_{sh2}}{W}L$ . Για πρακτικούς λόγους επίσης θεωρούμε τις δύο αντιστάσεις φύλλου ίσες. Η εξίσωση αυτή έχει την ακόλουθη γραφική παράσταση:



Για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης χρειάζεται να υπολογιστεί το  $L_t$  αφού  $\rho = R_{sh2} L_t^2$ . Για να γίνει αυτός ο υπολογισμός πρέπει να υπολογιστεί η αντίσταση τέλους  $R_E$  που ορίζεται από τις εξισώσεις γραμμής μεταφοράς ως:

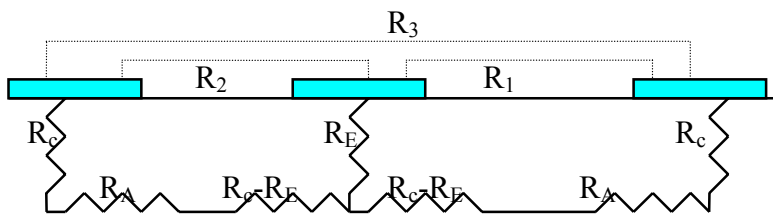
$$R_E = V(d)/I(0) \text{ και } I(d)=0 \text{ που δίνουν } R_E = R_c / \cosh(d/L_t) = \rho / L_t W \sinh(d/L_t).$$

### 3.5.1.2 Μετρήσεις :

Πειραματικά από το παρακάτω σχήμα φαίνεται η εξαγωγή της  $R_E = (R_1 + R_2 - R_3)/2$ .

Από την σχέση αυτή για το  $R_E$  και το  $L_t$  υπολογίζεται η ειδική αντίσταση  $\rho$ . Η μέθοδος αυτή στη βιβλιογραφία εξάγει ειδική αντίσταση για το GaAs τάξεως  $10^{-6} - 10^{-7} \Omega/\text{cm}^2$  που επαληθεύεται από τις μετρήσεις μας. Επίσης κάνουμε μετρήσεις όχι μόνο για δύο διαφορετικά διαστήματα μεταξύ επαφών αλλά για περισσότερα για περισσότερη ακρίβεια. Τα διαστήματα μεταξύ των επαφών είναι: 5-10-20-30-40-50  $\mu\text{m}$ . Το δε πλάτος 200  $\mu\text{m}$ .

Σχήμα 14: Υπολογισμός  $R_E$



Για την αποφυγή δε συστηματικού λάθους μετράμε αρχικά την αντίσταση (διορθωτική) μιάς επαφής με τον εαυτό της και την αφαιρούμε από όλες τις μετρήσεις μεταξύ επαφών.

Η δομή του δείγματος είναι:

700 Å  $n^+$  GaAs

1800 Å n GaAs

500 Å GaAs

13000 Å GaAs

GaAs substrate

Process:

Φωτολιθογραφία Mesa

Etching 5000 Å

Φωτολιθογραφία ωμικών

Εναπόθεση Μετάλλων

Θερμική ανόπτιση

Οι μετρήσεις για τις TLM GaAs στα δείγματα 155 και 157 για τις περιοχές έκθεσης διαφορετικού χρόνου είναι:

### 155

0 min έκθεση	Μετρήσεις	2 min έκθεση	Μετρήσεις	6 min έκθεση	Μετρήσεις
Απόσταση $\mu\text{m}$	$\Omega\text{m}$	Απόσταση $\mu\text{m}$	$\Omega\text{m}$	Απόσταση $\mu\text{m}$	$\Omega\text{m}$
5	4,28	5	2,857	5	1,667
10	6,93	10	6,429	10	3,889
20	14,36	20	11,427	20	8,333
30	24,85	30	17,143	30	12,779
40	39,84	40	19,286	40	17,779
50	45,2	50	25,714	50	22,779
<i>Ειδική <math>\rho</math></i>	$4.4 \pm 0,08 \cdot 10^{-6}$	<i>Ειδική <math>\rho</math></i>	$1,7 \pm 0,4 \cdot 10^{-6}$	<i>Ειδική <math>\rho</math></i>	$0,33 \pm 0,09 \cdot 10^{-6}$
<i>R φύλλου</i>	$106 \pm 24$	<i>R φύλλου</i>	$97 \pm 24$	<i>R φύλλου</i>	$93 \pm 21$
<i>Διορθωτική</i>	6,3	<i>Διορθωτική</i>	5,000	<i>Διορθωτική</i>	6,555
<i>Rc</i>	1,25	<i>Rc</i>	0.64	<i>Rc</i>	0.28
10 min έκθεση	Μετρήσεις	15min έκθεση	Μετρήσεις		
Απόσταση $\mu\text{m}$	$\Omega\text{m}$	Απόσταση $\mu\text{m}$	$\Omega\text{m}$		
5	3,333	5	0.611		
10	5,000	10	3.229		
20	11,667	20	8.750		
30	12,500	30	14.845		
40	16,667	40	19.778		
50	26,333	50	24.656		
<i>Ειδική <math>\rho</math></i>	$0,81 \pm 0,18 \cdot 10^{-6}$	<i>Ειδική <math>\rho</math></i>	$3.7 \pm 0.7 \cdot 10^{-6}$		
<i>R φύλλου</i>	$93 \pm 25$	<i>R φύλλου</i>	$100 \pm 22$		
<i>Διορθωτική</i>	6,27	<i>Διορθωτική</i>	6,54		
<i>Rc</i>	0.43	<i>Rc</i>	0,98		

### 157

0 min έκθεση	Μετρήσεις	2 min έκθεση	Μετρήσεις	6 min έκθεση	Μετρήσεις
Απόσταση $\mu\text{m}$	$\Omega\text{m}$	Απόσταση $\mu\text{m}$	$\Omega\text{m}$	Απόσταση $\mu\text{m}$	$\Omega\text{m}$
5	4,23	5	4,087	5	3,274
10	7,01	10	7,103	10	5,459
20	14,43	20	12,765	20	11,397
30	24,87	30	17,814	30	25,459
40	39,79	40	22,441	40	22,022
50	43,2	50	28,245	50	27,334
<i>Ειδική <math>\rho</math></i>	$4.4 \pm 0,08 \cdot 10^{-6}$	<i>Ειδική <math>\rho</math></i>	$2,9 \pm 0,7 \cdot 10^{-6}$	<i>Ειδική <math>\rho</math></i>	$0,55 \pm 0,13 \cdot 10^{-6}$
<i>R φύλλου</i>	$106 \pm 24$	<i>R φύλλου</i>	$106 \pm 25$	<i>R φύλλου</i>	$113 \pm 32$



<i>Διορθωτική</i>	6,7	<i>Διορθωτική</i>	6,485	<i>Διορθωτική</i>	6,35
<i>R<sub>c</sub></i>	1,3	<i>R<sub>c</sub></i>	0.9	<i>R<sub>c</sub></i>	0.38
<b>10 min έκθεση</b>	<b>Μετρήσεις</b>	<b>15 min έκθεση</b>	<b>Μετρήσεις</b>		
<b>Απόσταση μm</b>	<b>Ohm</b>	<b>Απόσταση μm</b>	<b>Ohm</b>		
5	3,714	5	5,000		
10	6,114	10	7,143		
20	10,714	20	12,857		
30	16,584	30	17,143		
40	21,583	40	23,571		
50	27,381	50	27,857		
<i>Ειδική ρ</i>	$1,4 \pm 0,4 \cdot 10^{-6}$	<i>Ειδική ρ</i>	$4,8 \pm 1,210^{-6}$		
<i>R φύλλου</i>	105±24	<i>R φύλλου</i>	103±25		
<i>Διορθωτική</i>	6,750	<i>Διορθωτική</i>	6,285		
<i>R<sub>c</sub></i>	0.44	<i>R<sub>c</sub></i>	1,12		

Πραγματοποιήθηκε και συγκριτική μελέτη της τιμής της  $R_c$  για περίπου το ίδιο βάθος χάραξης με τη διαφορά ότι αυτή έγινε με υγρή χημική μέθοδο. Το βάθος χάραξης ήταν 1500Å.

Για το δείγμα 157 έχουμε πάρει μετρήσεις για δύο περιοχές πριν την υγρή χημική χάραξη και μετά με σκοπό να συγκριθούν τα αποτελέσματα με την ιοντική χάραξη. Το Χημικό ήταν το  $(2H_2O_2:1NH_4OH:1H_2O):70H_2O$ .

Οι μετρήσεις είναι οι παρακάτω:

<b>Πριν τη χημική χάραξη</b>	<b>Μετρήσεις</b>	<b>Μετά τη χημική χάραξη</b>	<b>Μετρήσεις</b>
<b>Απόσταση μm</b>	<b>Ohm</b>	<b>Απόσταση μm</b>	<b>Ohm</b>
5	4,28	5	6
10	6,93	10	22,183
20	14,36	20	44,683
30	24,85	30	69,774
40	39,84	40	92,82
Ειδική ρ	$4.4 \pm 0,08 \cdot 10^{-6}$	Ειδική ρ	$5,4 \pm 0,5 \cdot 10^{-6}$
R φύλλου	107±24	R φύλλου	150±19
Διορθωτική	6,7	Διορθωτική	22,4

Από τις παραπάνω μετρήσεις παρατηρούμε ότι για το 157 δείγμα η τιμή της ειδικής αντίστασης με 15 λεπτά χάραξη με το ion gun είναι πολύ κοντά με την υγρή χάραξη των 1500Å βάθους χάραξης. Το οποίο είναι το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Αποτελέσματα:

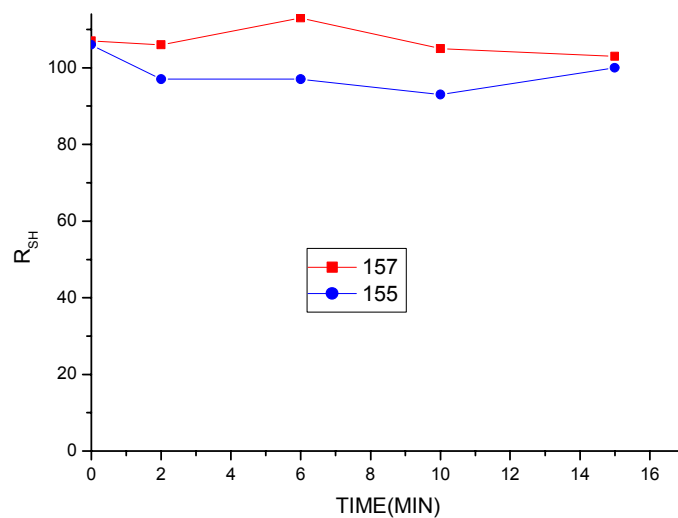
157

155

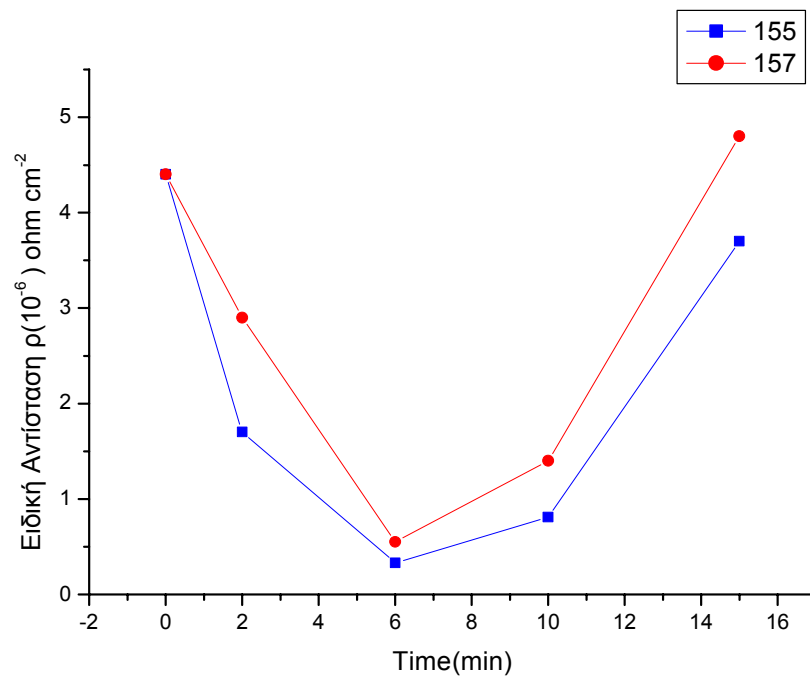
time min	R <sub>sh</sub> (ohm)	$\rho(\text{ohm cm}^2) 10^{-6}$	R <sub>c</sub> (ohm)
0	107	4,4	1,3
2	106	2.9	0,9
6	113	1.4	0,44
10	105	0.55	0,38
15	103	4.8	1.12

time min	R <sub>sh</sub> (ohm)	$\rho(\text{ohm cm}^2) 10^{-6}$	R <sub>c</sub> (ohm)
0	106	4,4	1,25
2	97	1.7	0,64
6	93	0,81	0,43
10	93	0,33	0,28
15	100	3,7	0,98

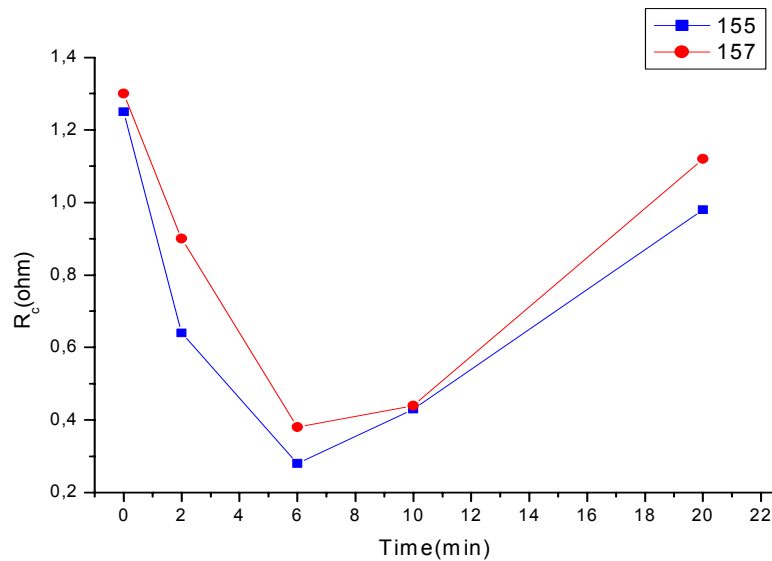
Σχήμα 15: Αντίσταση φύλλου σε συνάρτηση του χρόνου έκθεσης και για τα δύο δείγματα



Σχήμα 16 : Ειδική αντίσταση σε συνάρτηση με το χρόνο έκθεσης και για τα δύο δείγματα



Σχήμα 17: Αντίσταση επαφής σε συνάρτηση του χρόνου έκθεσης και για τα δύο δείγματα



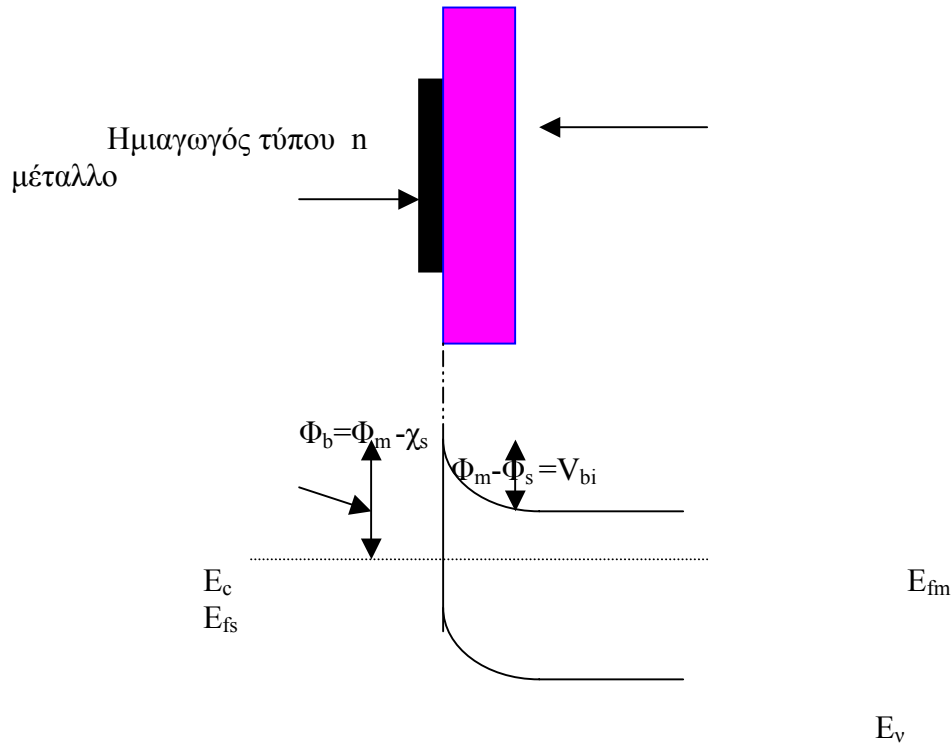
Παρατηρώντας τις πιο πάνω καμπύλες βλέπουμε και για τα δύο δείγματα μια σταθερότητα στις αντιστάσεις φύλου για όλους τους χρόνους έκθεσης που σημαίνει ότι με τη χαμηλή πυκνότητα δέσμης που πραγματοποιή τα πειράματα,  $3,82 \text{ mA/cm}^2$  δεν δημιουργούνται ατέλειες μέσα στο υπόστρωμα. Για το 157 και το 155 η ειδική αντίσταση μειώνεται αρχικά αρκετά γρήγορα, μέχρι τα 6 min και μετά τα 6min αυξάνεται. Επίσης για την  $R_c$  παρατηρούμε επίσης μείωση σε σχέση με το χρόνο έκθεσης και για τα δύο δείγματα μέχρι τα 6min. Η πτώση της αντίστασης επαφής οφείλεται στο γεγονός ότι τρώγεται το επιφανειακό οξείδιο ρίχνοντας έτσι το φράγμα δυναμικού της επαφής μεταξύ του μετάλλου και του ημιαγωγού<sup>6</sup>

Ταυτόχρονα η δέσμη ιόντων χτυπώντας το GaAs δημιουργεί πολλά κενά Ga επιφανειακά με αποτέλεσμα να έχουμε διάχυση του μετάλλου προς το GaAs για την κατάληψη αυτών του κενών, με αποτέλεσμα την αύξηση του doping επιφανειακά. Η πτώση της ειδικής αντίστασης οφείλεται στο γεγονός της αύξησης του doping στο επιφανειακό στρώμα μεταξύ μετάλλου και ημιαγωγού<sup>7</sup>. Τέλος για την αύξηση των τιμών ειδικής αντίστασης και  $R_c$  μετά τα 6min έκθεση οφείλεται στο ότι έχει φτάσει βαθειά μέσα στο  $n^+$  στρώμα.

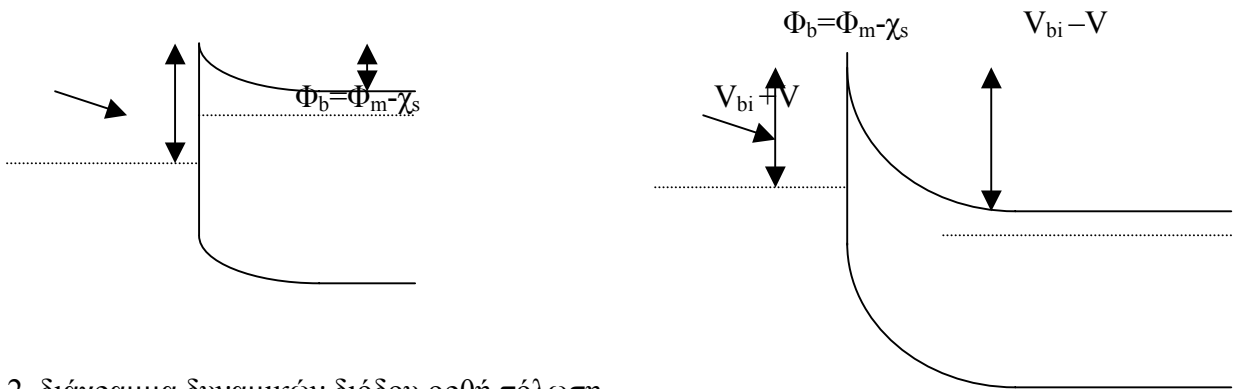
### 3.5.2 Μελέτη της επίδρασης ιοντικής δέσμης Ar στη συμπεριφορά επαφής μετάλλου ημιαγωγού (GaAs)<sup>8</sup>

#### 3.5.2.1 Εισαγωγή

Οι επαφές μετάλλου ημιαγωγού (δίοδοι Schottky) αποτελούν ημιαγωγικές διατάξεις για μη γραμμική συμπεριφορά με πολύ ταχύτερη απόκριση από εκείνη των απλών pn επαφών. Η διάταξη αυτής της επαφής αποτελείται από ημιαγωγό τύπου n ή p σε επαφή με μέταλλο.



1. διαγραμμα δυναμικών δίοδου σε ισορροπία



2. διάγραμμα δυναμικών δίοδου ορθή πόλωση

3. διαγραμμα δυναμικών δίοδου σε ανάστροφη πόλωση

Το ρεύμα θερμοϊονικής εκπομπής της δίοδου δίνεται από τη σχέση:

$$I = I_s \left( \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right)$$

$$\text{Με μέγιστο το : } I_s = A \left( \frac{m^* e k_B^2}{2\pi^2 \hbar^3} \right) T^2 \exp\left(-\left\{ \frac{e\phi_b}{k_B T} \right\}\right)$$

$$\text{Με } R^* = \frac{m^* e k_B^2}{2\pi^2 \hbar^3} \text{ τη σταθερά Richardson με τιμή } 8A \text{cm}^{-2} \text{K}^{-2} \text{ για το GaAs.}$$

Δείγμα ημιαγωγού GaAs χωρίστηκε σε πέντε περιοχές. Η δομή του δείγματος ήταν:

Η δομή του δείγματος είναι:

1,5μm n GaAs
1,0μm n <sup>+</sup> GaAs
GaAs substrate

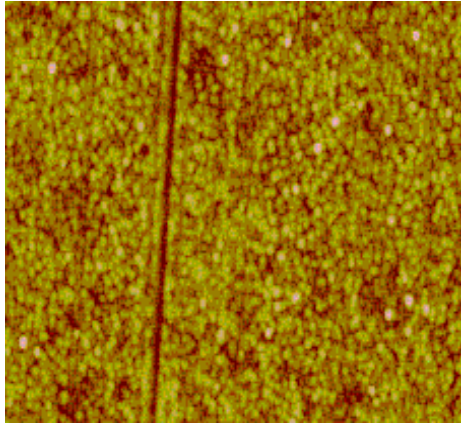
Η ωμική επαφή εδράζεται στο n<sup>+</sup> στρώμα ενώ το μέταλλο της Schottky στο n στρώμα.

Η πρώτη από αυτές τις επαφές δεν εκτέθηκε καθόλου σε ιοντική δέσμη Ar<sup>+</sup>, οι υπόλοιπες τέσσερις εκτέθηκαν σε χρόνους 2,6,10,15 λεπτών όπως είχε γίνει και με τα δείγματα των ωμικών επαφών. Η έκθεση που έγινε ήταν παραπλήσια όχι μόνο σε χρόνο έκθεσης αλλά και σε πυκνότητα δέσμης.

I καθόδου	I δέσμης	V δέσμης	V επιταχυντή	V body	I emission	Πίεση Torr	Χρόνος
4,3	27	500	400	15	34	1,4 10 <sup>-4</sup>	2 min
4,3	27	500	400	13	34	1,4 10 <sup>-4</sup>	6min
4,05	27	500	400	12	34	1,4 10 <sup>-4</sup>	10min
4,01	27	500	400	12	34	1,3 10 <sup>-4</sup>	15min

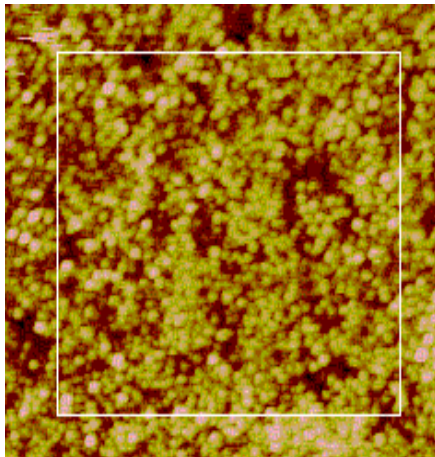
Σε σχέση με την αλλαγή στην τραχύτητα της επιφάνειας δεν παρατηρούμε σημαντική αλλαγή κατά τη μέτρηση του δείγματος που εκτέθηκε σε 2min και εκείνου στα 15 min. Αυτό βρίσκεται σε συνέπεια με τα συμπεράσματα των

πειραμάτων που έγιναν τόσο στις ωμικές επαφές όσο και για την μέτρηση της τραχύτητας.



Τραχύτητα :  $R_{MS}$  4,030nm

*15 min έκθεση*

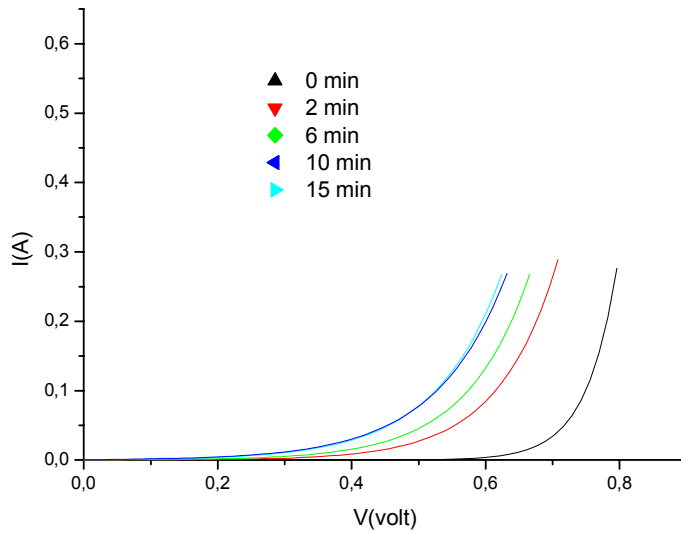


Τραχύτητα :  $R_{MS}$  2,211 nm

*2min έκθεση*

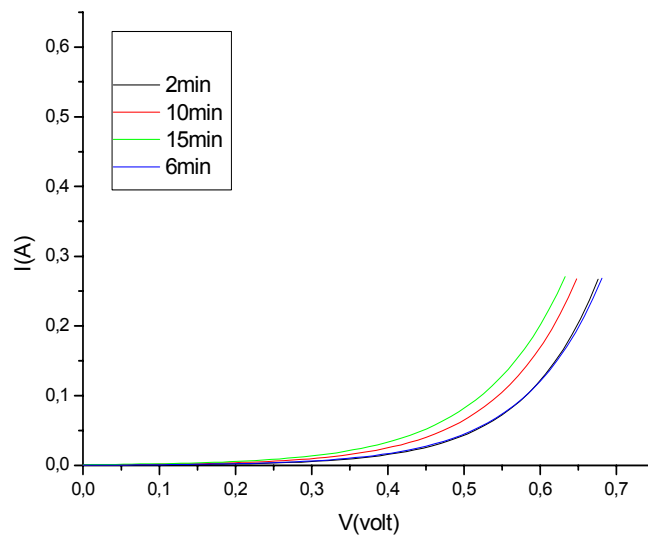
Απο τις μετρήσεις για τις χαρακτηριστικές I-V των διόδων παίρνουμε τις παρακάτω καμπύλες:

Σχήμα 18: Χαρακτηριστικές I-V διόδου σε ορθή πόλωση



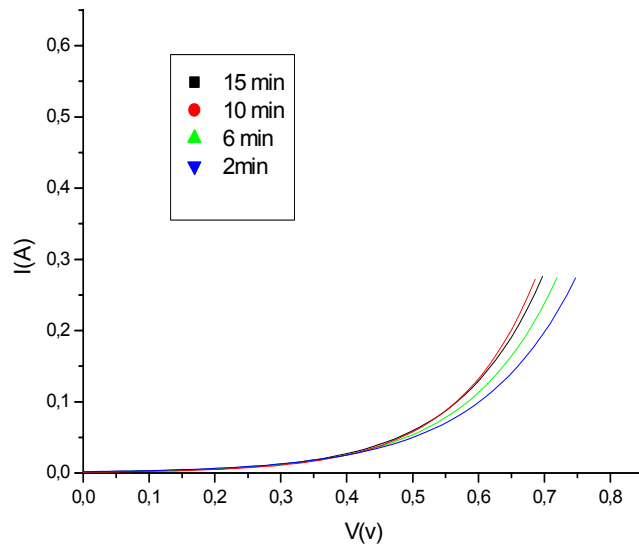
Για τη βελτίωση των επαφών μετάλλου ημιαγωγού γίνονται διαδοχικές θερμικές ανοπτίσεις των  $100^{\circ}$ - $150^{\circ}$  και  $200^{\circ}$ .

Σχήμα 19: Χαρακτηριστικές I-V διόδου σε ορθή πόλωση μετά από θερμική ανόπτση στους  $100^{\circ}\text{C}$

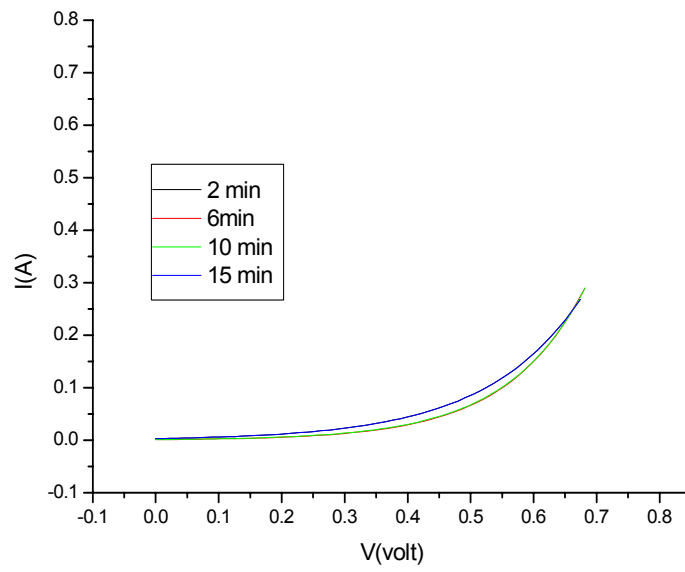


Σχήμα 20: Χαρακτηριστικές I-V διόδου σε ορθή πόλωση μετά από θερμική ανόπτση  $150^{\circ}\text{C}$

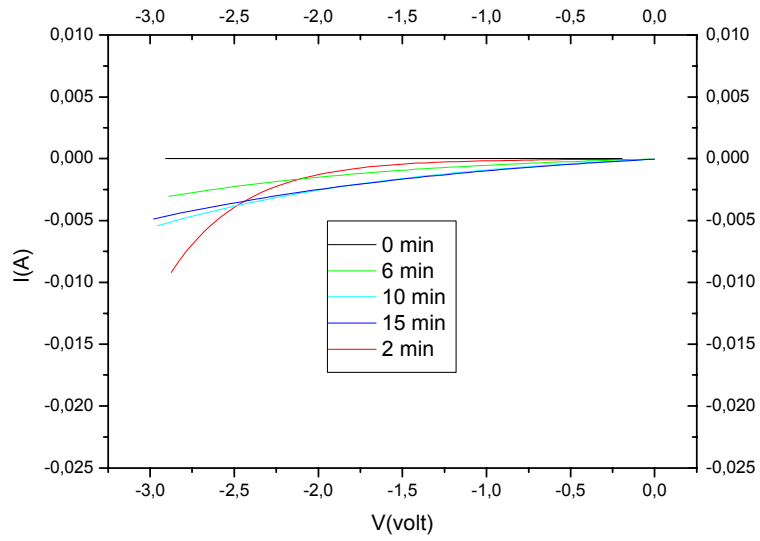




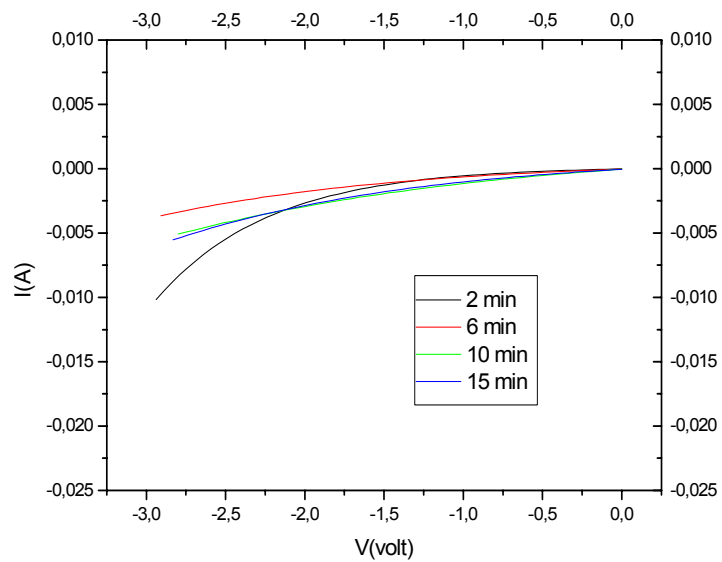
Σχήμα 21: Χαρακτηριστικές I-V διόδου σε ορθή πόλωση μετά από θερμική ανόπτιση 200°C



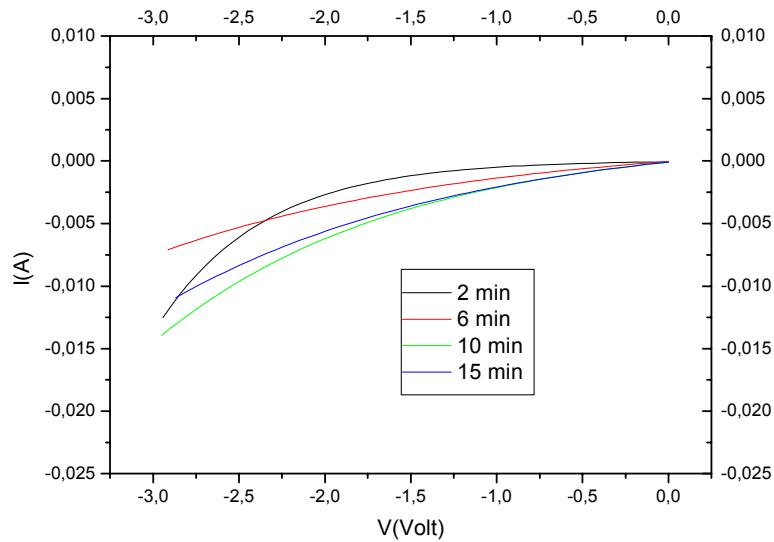
Σχήμα 22: Χαρακτηριστικές I-V διόδου σε ανάστροφη πόλωση



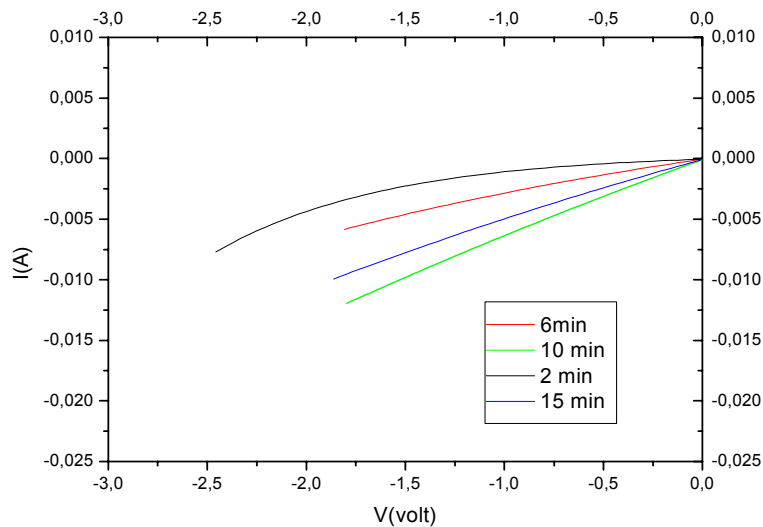
Σχήμα 23: Χαρακτηριστικές I-V διόδου σε ανάστροφη πόλωση μετά από θερμική ανόπτιση στους  $100^{\circ}\text{C}$



Σχήμα 24 : Χαρακτηριστικές I-V διόδου σε ανάστροφη πόλωση μετά από θερμική ανόπτιση στους  $150^{\circ}\text{C}$



Σχήμα 25 : Χαρακτηριστικές I-V διόδου σε ανάστροφη πόλωση μετά από θερμική ανόπτιση στους 200<sup>0</sup>C

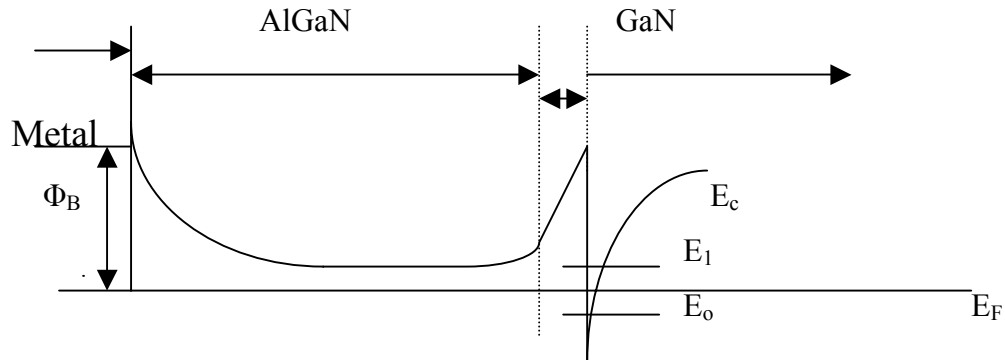


*Από τις παραπάνω καμπύλες παρατηρούμε ότι με την έκθεση σε ιοντική δέσμη οι επαφές μετάλλου ημιαγωγού αποκλίνουν από την ανορθωτική τους συμπεριφορά..*

### 3.5.3 Κατασκευή HEMT νιτριδίων και βύθιση (recess) ωμικών επαφών<sup>9</sup>.

#### Εισαγωγή 3.5.3.1

Τη διαφορά ενεργειακού χάσματος μεταξύ GaN και AlGaN τη χρησιμοποιούμε για την κατασκευή HEMT νιτριδίων. Το ενεργειακό διάγραμμα αυτού θα είναι:

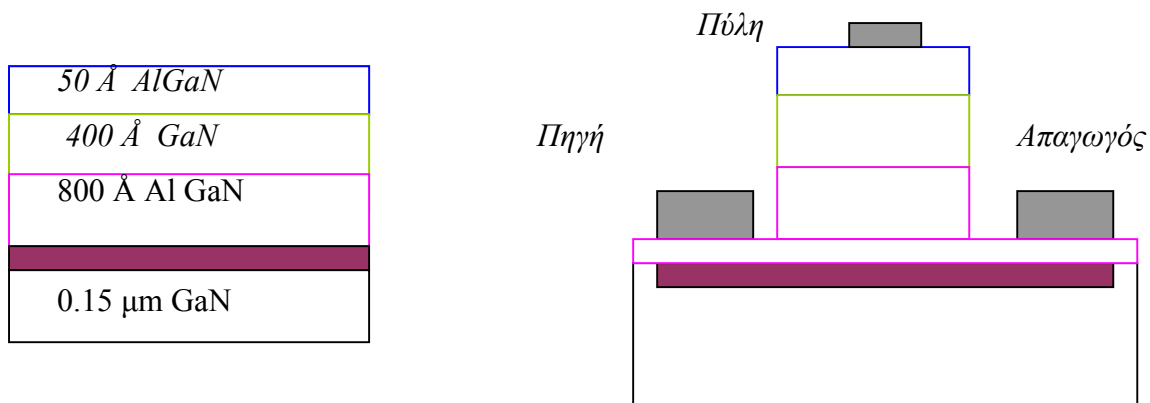


### Πειραματικό μέρος 3.5.3.2

Η μελέτη του ρυθμού χάραξης νιτριδίων χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή τρανζίστορ HEMT νιτριδίων με διπλή ετεροδομή (Σχήμα 26). Η συγκεκριμένη δομή απαιτεί τη βύθιση των περιοχών των ωμικών επαφών ώστε να επιτευχθεί:

- I) Καλύτερο έλεγχο του δυδιάστατου αερίου ηλεκτρονίων
- II) Μικρότερη σειριακή αντίσταση

Σχήμα 26 : Εφαρμογή ιον gun αφαίρεση υλικού



50 Å AlGaN
400 Å GaN
800 Å Al GaN
0.15 μm GaN

Η έκθεση έγινε με την συνθήκη :

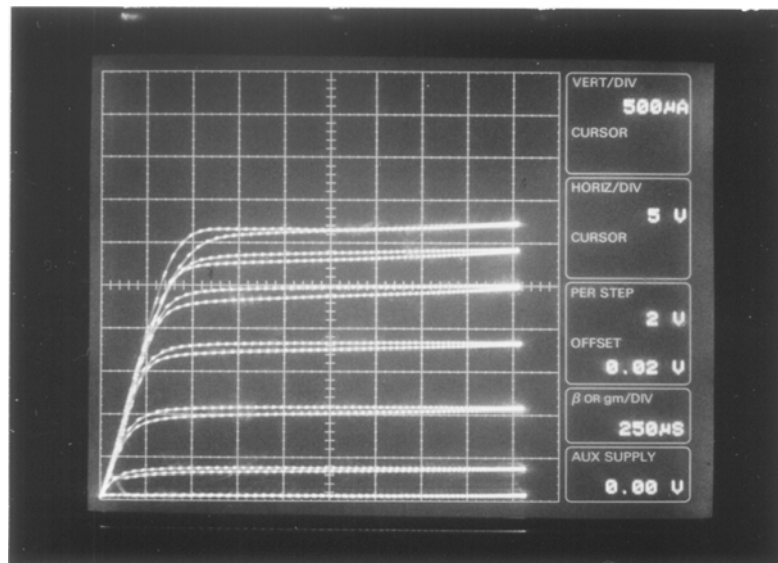
I καθόδου	I δέσμης	V δέσμης	V επιταχυντή	V body	I emission	Πίεση Torr	Χρόνος
3,84 A	40mA	500V	1000V	11V	42mA	1 10 <sup>-4</sup>	9 min

**Χάραξη έγινε σε βάθος 850Å.**

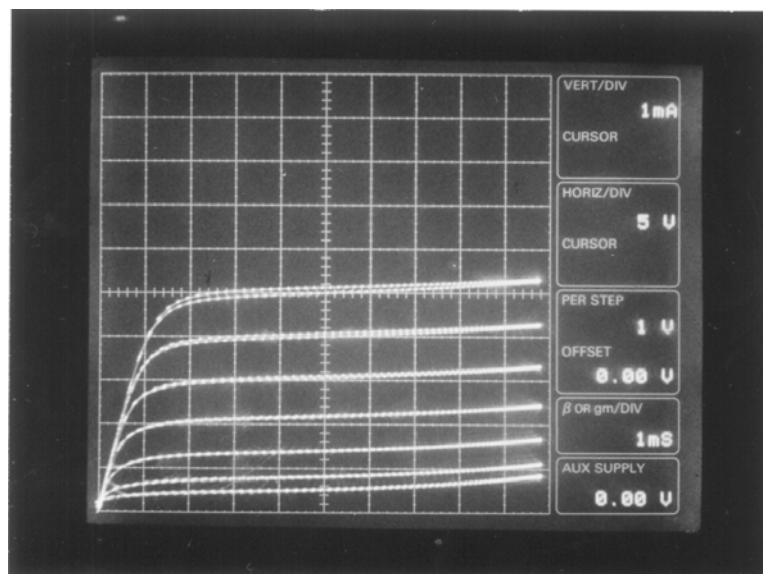
Η δομή του HEMT ήταν τυπου διπλής ετεροδομής: SDHEMT

5nm Al<sub>0,2</sub>Ga<sub>0,8</sub>N/40nm GaN/40nm (#144), 80nm (#145) Al<sub>0,2</sub>Ga<sub>0,8</sub>N/0.15μm GaN

και οι μετρήσεις πριν και μετά:



1)  $I_{DSS} = 12.8 \text{ mA/mm}$

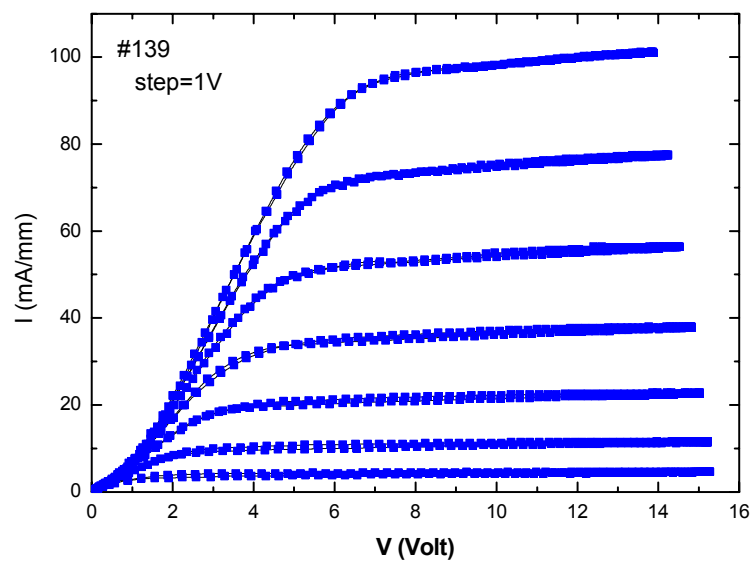


2)  $I_{DSS} = 20 \text{ mA/mm}$

Συγκρίνοντας τις I-V χαρακτηριστικές τις HFET τρανζίστορ διπλής ετεροδομής με εγχαραγμένες και επιφανειακές ωμικές επαφές παρατηρούμε αύξηση της σειριακής αντίστασης και μικρότερο ρεύμα κόρου  $I_{DSS}$  για παρόμοιες DHFET δομές.

Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν την ανάγκη για περαιτέρω μελέτη της βελτιστοποίησης των γεωμετρικών κατασκευάσιων διαδικασιών στα HFET τρανζίστορς. Πιστεύουμε ότι η εγχάραξη των ωμικών επαφών είναι απολύτως απαραίτητο βήμα μείωσης των σειριακών αντιστάσεων πηγής και απαγωγού και πρέπει να αντιμετωπιστεί πιο ολοκληρωμένα η κατασκευή και η βελτιστοποίηση τους. Πιθανοί λόγοι αύξησης της σειριακής αντίστασης που έχει σα συνέπεια την μείωση του ρεύματος κόρου IDSS στις HDFET δομές αποτελεί η επιφανειακή μόλυνση του στρώματος όπου γίνεται η εναπόθεση του μετάλλου της ωμικής επαφής καθώς επίσης η ηλεκτρική απογύμνωση του καναλιού που ως συνέπεια έχει τη μείωση της πυκνότητας του 2DEG και κατα συνέπεια εμποδίζει την μείωση της σειριακής αντιστάσεως.

Η παρακάτω I V δείχνει μια χαρακτηριστική καμπύλη που η βελτίωση της τεχνικής θα έχει σα στόχο.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η ενσωμάτωση και η βελτιστοποίηση της τεχνικής του ion gun για τις ανάγκες του του εργαστηρίου της μικροηλεκτρονικής. Καθορίστηκαν οι αρχικές συνθήκες λειτουργίας της συσκευής στο περιβάλλον του θαλάμου κενού BJD 1800. Έγιναν δοκιμές διακρίβωσης της συσκευής Ion gun και δοκιμάστηκαν τα όρια της. Συγκεκριμένα έγιναν δοκιμές με μεγάλο ρεύμα δέσμης, με μεγάλη τάση δέσμης και επιταχυντή, μικρό και μεγάλο χρόνο έκθεσης κλπ. Ταυτόχρονα έγιναν εκθέσεις πάνω σε δείγματα ημιαγωγών GaN, SiC, GaAs. Τα δείγματα μετρήθηκαν στο AFM και προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

**Πρώτο**, ότι σε σχετικά μικρές πυκνότητες δέσμης (μέχρι  $10\text{mA/cm}^2$ ) και για μικρή σχετικά τιμή τάσης στο πλέγμα του επιταχυντή η τραχύτητα των επιφανειών δεν αλλάζει σχεδόν καθόλου για κανένα από τα παραπάνω υποστρώματα.

Το **δεύτερο** συμπέρασμα είναι ότι για μεγάλες πυκνότητες δέσμης (πάνω από  $10\text{mA/cm}^2$ ) και μικρή σχετικά τιμή τάσης στο πλέγμα του επιταχυντή τόσο στο GaAs όσο και στο GaN παρατηρείται σημαντική αύξηση της τραχύτητας, ενώ το για το SiC η διαφορά παραμένει αμελητέα.

Το **τρίτο** συμπέρασμα είναι ότι η χάραξη N-face ημιαγωγού GaN, έχει ρυθμό μεγαλύτερο από το ρυθμό χάραξης του Ga-face. Βέβαια το φαινόμενο είναι συσσωρευτικό, για εφαρμογές όπου απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος χάραξης, η διαφορά αυτή οδηγεί σε σημαντική διαφορά στο βάθος χάραξης.

Το **τέταρτο** συμπέρασμα είναι ότι οι ρυθμοί χάραξης σε συνάρτηση με το χρόνο είναι σταθεροί και για το GaN και για το GaAs. Οι ρυθμοί χάραξης σε συνάρτηση με την πυκνότητα δέσμης έχουν σχέση γραμμικής αναλογίας. Η κλίση αυτής της γραμμικής σχέσης για το GaAs είναι μεγαλύτερη από αυτή του GaN.

Το **πέμπτο** συμπέρασμα εξάγεται από το γεγονός ότι τα πειράματα σε δομή FET GaAs (μετρήσεις TLM) έδειξαν την ικανότητα της τεχνικής να απομακρύνει το επιφανειακό φυσικό οξείδιο και να οδηγεί σε βελτίωση της ωμικής επαφής.

Το **έκτο** συμπέρασμα από τις μετρήσεις TLM είναι ότι εφ' όσον οι ωμικές επαφές εδράζονται σε στρώμα  $n^+$  GaAs η έκθεση στο ion gun βελτιώνει την ειδική αντίσταση επαφής για μικρούς χρόνους έκθεσης. Αυτό οφείλεται στην αύξηση του επιφανειακού n doping.

Το **έβδομο** συμπέρασμα εξάγεται από τις τις δοκιμές στις επαφές Schottky. Έκθεση σε ιοντική δέσμη του στρώματος  $n^+$  GaAs δείνει αμελητέα αλλαγή στην τραχύτητα των επιφανειών. Επιβεβαιώνονται έτσι τα συμπεράσματα των παραπάνω και επιπλέον διαπιστώνεται ότι η έκθεση στην ιοντική δέσμη της επιφάνειας του ημιαγωγού αλλάζει τη συμπεριφορά της επαφής μετάλλου ημιαγωγού από ανορθωτική σε ωμική.

Το **όγδο** συμπέρασμα προέρχεται από την εφαρμογή της τεχνικής σε διάταξη HEMT νιτριδίων όπου είναι δυνατή η βύθιση των ωμικών επαφών με χάραξη ιοντικής δέσμης για καλύτερο έλεγχο του δυσδιάστατου αερίου ηλεκτρονίων.

Συνοψίζοντας το αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί ήδη «εργαλείο» στην παραγωγική διαδικασία της ομάδας μικροηλεκτρονικής.



## Οδηγίες χειρισμού της συσκευής

Η συσκευή δέσμης του εργαστηρίου είναι της εταιρείας Ion Tech, τύπου FC 3cm διαμέτρου και η συσκευή παροχής ισχύος τύπου MPS-3000. Η όλη εγκατάσταση συμπεριλαμβάνει ουδετεροποιητή τύπου γέφυρας πλάσματος PBN.

### Παράμετροι panel MPS-3000 PBN

Διακόπτες του panel:

1. Power
2. Source
3. Beam
4. Keylock
5. Mode
6. Memory
7. Module
8. Function
9. Adjust.

Display:

- 10.Cathode fillament current
- 11.Discharge current
- 12.Discharge voltage
- 13.Beam current
- 14.Beam voltage
- 15.Accelarator current
- 16.Accelarator voltage
- 24.PBN emmission/filament
- 25.PBN body voltage.

### Παραμετροι των display:

Cathode fillament current: Τιμή του ρεύματος για τη θέρμανση των νημάτων στη κάθοδο.

Discharge current: Η τιμή του ρεύματος ηλεκτρονίων που συλλέγεται από την πηγή ιόντων.

Discharge voltage: Η τιμή της θετικής τάσης σε σχέση με την κάθοδο, που εφαρμόζεται στην άνοδο.

Beam current: Η τιμή του ρεύματος ιόντων που βγαίνει από την πηγή.

Beam voltage: Η τιμή της τάσης, θετική σε σχέση με τη γή, που εφαρμόζεται στην πηγή ιόντων. Σε eV η ενέργεια της δέσμης.

Accelarator current: Δείχνει την τιμή του ρεύματος που συλλέγεται από τον επιταχυντή στο πλέγμα εξόδου.

Accelarator voltage: Δείχνει την τιμή της τάσης, αρνητικής σε σχέση με τη γη, που εφαρμόζεται στο πλέγμα εξόδου.

Neutralizer emission current: Δείχνει την τιμή του ρεύματος ηλεκτρονίων του neutralizer μέσα στην ιοντική δέσμη.

Neutralizer filament current: Δείχνει την τιμή του ρεύματος για τη θέρμανση των νημάτων του neutralizer.

PBN body voltage: Δείχνει τη διαφορά δυναμικού μεταξύ σώματος PBN και νήματος PBN.

- Η πηγή είναι 3cm και τα νήματα 0,010 ίντσες 25mm.

- Πίεση  $5 \cdot 10^{-4}$  Torr και πίο κάτω, αέριο Ar 4 sccm.
- 38V βέλτιστη τιμή στο discharge voltage για το χρόνο ζωής των νημάτων.(Υπό 75mA/1000eV δέσμη σε αργό παροχής 4sccm, έχουν περίπου 80 ώρες για τα 38V ενώ μόλις 12 ώρες για 55V.)Το discharge voltage έχει να κάνει με το spot και την εστίαση της δέσμης.
- Επίσης η ισχύς του discharge όχι συνεχόμενη λειτουργία πάνω από 110W γιατί υπάρχει πρόβλημα υπερθέρμανσης.Μπορούμε να μειώσουμε το ρεύμα αυξάνοντας την παροχή του αερίου.

### Λειτουργία MANUAL

Αρχικά ελέγγω :

α)Η πίεση να είναι στην τιμή  $3 \cdot 10^{-4}$  ή και λιγότερη

β)Κατάλληλη τιμή για την παροχή του αερίου μέσα στην πηγή αλλά και στον PBN(plasma brige neutralizer) 2-4 sccm

#### Εκκίνηση:

1.Power(1) θέση on (allarm 1 sec)

After 6 sec (self test)(click)

#### Επιλογή manual τρόπου:

2.Keylock (4) θέση mode enable

3.Mode (5)θέση manual

#### Επιλογή μνήμης:

4.Memory(6) επιλογή μνήμης.

#### Επιλογή Discharge voltage:

5.Module(7) στο Discharge

function(8)στο voltage

adjust(9)τιμή=38V

display (12) η τιμή

#### Επιλογή Discharge current Limit:

6. Module(7) στο Discharge

function(8)στο limit

adjust(9)τιμή=1A

display (11) η τιμή

#### Επιλογή:cathode filamentcurrent

7.Module(7) στο cathode

function(8)στο current

adjust(9)τιμή=3,5A

display (10) η τιμή

#### Επιλογή cathode filament current Limit:

8. Module(7) στο Discharge

function(8)στο limit

adjust(9)τιμή=6,5A για τα 3cm

display (10) η τιμή

Επιλογή:PBN emission current

Επιλογή PBN filament current Limit:

9.Module(7) στο PBN

10. Module(7) στο PBN

function(8)στο current

function(8)στο limit

adjust(9)τιμή=1,25\*beam current

adjust(9)τιμή=6,5A για τα 3cm

display (24) η τιμή

display (24) η τιμή

11.Source(2)

πατώντας το source παρατηρώ:

α)το ρεύμα νημάτων καθόδου από 0,0 στην τιμή που απαιτείται

β)PBN ρεύμα νημάτων έως το body voltage(25) πέσει στα 12 με 10V ενώ το ρεύμα δεν θα ανέβει πάνω από το όριο.

γ)όταν το ρεύμα καθόδου είναι μεγαλύτερο από 0,75A η τάση του discharge θα αυξηθεί στα 150V.

δ)κατά την εκκίνηση της πηγής το discharge ρεύμα θα αυξηθεί ενώ η discharge τάση θα ελαττωθεί στην απαιτούμενη τιμή.

ε)Εάν είναι αναγκαίο αύξησε το ρεύμα καθόδου έως να σταθεροποιηθεί η τάση discharge να σταθεροποιηθεί ή έως το απαιτούμενο ρεύμα καθόδου να φτάσει στο όριο.

στ)Αν το discharge δεν έχει λειτουργήσει πριν φτάσει το απαιτούμενο όριο ρεύματος μείωσε το ρεύμα καθόδου έως τη επιλεγόμενη τιμή.

Αν δεν λειτουργήσει και πάλι ή discharge τάση είναι ασταθής (μεταξύ 150V και απαιτούμενης τιμής 38V) τότε αιτία θα είναι μη επαρκές ρεύμα καθόδου είτε μη επαρκής παροχή αερίου.

ζ)Αύξησε την παροχή αερίου κατά 1 sccm και επανέλαβε το ε)

η)Αν είναι αναγκαίο επανέλαβε τα ε), στ), ζ) μέχρι 10 sccm και πίεση  $510^{-4}$  Torr

θ)Αν και πάλι δεν λειτουργήσει κοιτάμε το manual.

Επιλογή:Beam voltage:

Επιλογή A/B ratio:

12.Module(7) στο beam

13. Module(7) στο Accel

function(8)στο voltage

function(8)στο a/b ratio

adjust(9)τιμή=1000V

adjust(9)τιμή=10%

display (14) η τιμή

display (16) η τιμή

Επιλογή:Acceleration voltage:

14.Module(7) στο Accel

function(8)στο voltage

adjust(9)τιμή=250V

display (16) η τιμή

#### **15. Εκκίνηση της ιοντικής δέσμης:**

Διακόπτης Beam(3) on

Κάποια τιμή στο ρεύμα δέσμης θα εμφανιστεί στο display(13)beam current.

και κάποια τιμή από το acceleration ρεύμα στο display(15).Το ενεργό ρεύμα εξαρτάται και από άλλους παράγοντες όπως από το μέγεθος της πηγής,τα νήματα καθόδου,την παροχή αερίου και τις τάσεις δέσμης και επιταχυντή.

Για την ρύθμιση του κατάλληλου ρεύματος δέσμης γίνεται με τρεις ρυθμίσεις και όχι απευθείας σε λειτουργία manual :

α)ρύθμιση της τάσης δέσμης βήμα 12

β)ρύθμιση της discharge τάσης βήμα 5

γ) ρύθμιση του ρεύματος καθόδου βήμα 7

Προσοχή 1.Το ρεύμα στα νήματα καθόδου όχι πάνω από 6,5A

2.όχι πίεση πάνω από  $5 \cdot 10^{-4}$ torr

3.Αν πρέπει να αυξήσουμε το ρεύμα για να μην υπερβούμε το όριο τότε εναλλακτικά αυξάνουμε τη παροχή αερίου ή την τάση discharge.Αρχικά την τάση και έπειτα την παροχή.

Ρύθμιση για το ελάχιστο ρεύμα accelerator:

**16.**Ρυθμίζουμε την τάση accelerator βήμα 14 για να μειώσουμε το ρεύμα.

Θα πρέπει το ρεύμα accelerator να μην είναι περισσότερο από το 10% του ρεύματος δέσμης τότε πιθανά κακοευθυγραμμισμένο το πλέγμα ή πίεση μεγαλύτερη από  $3 \cdot 10^{-4}$  torr.Με την παροχή φέρνουμε στο 10% το ρεύμα του acceleration.

Εάν ο λόγος ρευμάτων acceleration/beam είναι πάνω από το A/B τότε alarm και μήνυμα E-25 στο display accelerator current(15).

Εαν η τιμή του μεγαλύτερη τότε προκαλεί ζημιά στο πλέγμα.

Ρύθμιση για το neutralaizer emmission current

**17.**Ρυθμίζουμε το pbn emmission current στο  $100\mu 3$  125% του ρεύματος δέσμης.

Αν γίνουν τα παραπάνω βήματα τότε ολοκληρώνεται η διαδικασία.

Οι ρυθμίσεις αποθηκεύονται αυτόματα και μπορούν να ανακληθούν με το Rcl (6) εμφανιζόμενα στο display οι παράμετροι μετά από 4s.

Λειτουργία LOCK

Αν θέλουμε λειτουργία σταθερή για μεγάλη περίοδο χωρίς σταθερή λειτουργική προσοχή λειτουργούμε στο lock.

Ένας μικροεπεξεργαστής παρακολουθεί και ελέγχει μερικές παραμέτρους. Ο λόγος A/B Acceleration/beam ρεύμα ελέγχεται αν ξεπεράσει το όριο του προγράμματος alarm και E25 στο display του acceleration ρεύματος.

Επίσης για τον PBN ελέγχεται το ρεύμα δέσμης και διατηρείται σταθερό αλλάζοντας το ρεύμα στα νήματα καθόδου. Επίσης ο λόγος ρευμάτων emmision/beam διατηρείται στα 125%.

Στη λειτουργία Lock ρυθμίζονται τα :beam ρεύμα, beam τάση, acceleration τάση, A/B λόγος. Όχι αλλαγές σε κάθοδο discharge, neutralaizer.

Βήματα λειτουργίας:

1. Power

2. Lockal mode(5)

3. Memory(6)

4. Βεβαιώσου ότι ο θάλαμος είναι σε σωστή πίεση και σωστή παροχή αερίου.

5. Source(2)

Τι ακολουθεί:

a) Το ρεύμα νημάτων θα ramp στην απαιτούμενη τιμή. Ένα παλιό νήμα δεν απαιτεί τόσο ρεύμα όσο ένα καινούριο.

b) Για το PBM ρεύμα νημάτων θα ανέβει έως το body voltage γίνει 20-25V.

Τότε το Emmision ρεύμα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το beam.

6. Περίμενε μέχρι το η τάση θαλάμου και το ρεύμα να σταθεροποιηθούν.

7. BEAM(7)

περιμένο: Δεσμης τάση και ρεύμα καθώς και acceleration τάση να φτάσουν στις απαιτούμενες τιμές.

Αν αλλάζοντας από manual σε lock η τιμή στην οθόνη του ρεύματος δέσμης γίνεται η νέα δέσμη στόχου σε local.

---

## Βιβλιογραφικές αναφορές

- <sup>i</sup> MacDonald.Advan.Physics 80 1970
- <sup>ii</sup> Sigmund Phys.Rev.184,1969
- <sup>iii</sup> E.G.Spenser,P.H.Schmidt J.Vac.Sci.Techn.vol.8 1971 also  
MacDonald.Advan.Physics 80 1970
- <sup>iv</sup> C.M.Melliari-Smith, J.Vac.Sci.Techn.vol.3 1976
- <sup>v</sup> C.M.Melliari-Smith, J.Vac.Sci.Techn.vol.3 1976 also E.G.Spenser,P.H.Schmidt  
J.Vac.Sci.Techn.vol.8 1971
- <sup>vi</sup> E.G.Spenser,P.H.Schmidt J.Vac.Sci.Techn.vol.8 1971
- <sup>vii</sup> C.M.Melliari-Smith, J.Vac.Sci.Techn.vol.3 1976
- <sup>viii</sup> C.M.Melliari-Smith, J.Vac.Sci.Techn.vol.3 1976 also E.G.Spenser,P.H.Schmidt  
J.Vac.Sci.Techn.vol.8 1971
- <sup>ix</sup> C.M.Melliari-Smith, J.Vac.Sci.Techn.vol.3 1976
- <sup>x</sup> C.M.Melliari-Smith, J.Vac.Sci.Techn.vol.3 1976
- <sup>xi</sup> Pearton,Abernathy,Ren,Lothian J.Appl.Phys.76 1994
- <sup>xii</sup> Pearton,Abernathy,Ren,Lothian J.Appl.Phys.76 1994
- <sup>xiii</sup> E.G.Spenser,P.H.Schmidt J.Vac.Sci.Techn.vol.8 1971
- <sup>xiv</sup> C.M.Melliari-Smith, J.Vac.Sci.Techn.vol.3 1976
- <sup>xv</sup> C.M.Melliari-Smith, J.Vac.Sci.Techn.vol.3 1976
- <sup>xvi</sup> Lincoln,Geis,Mathorely,Chu. J.Vac.Sci.Techn.vol.20 1982
- <sup>xvii</sup> Gloersen J.Vac.Sci.Technol vol 12,1975 και R.E.Lee, J.Vac.Sci.Technol vol  
16,1979
- <sup>xviii</sup> T.C.Tisone,D.Gruzan J.Vac.Sci.Technol,vol 12 1975
- <sup>xix</sup> R.E.Lee, J.Vac.Sci.Technol vol 16,1979, also  
H.Dimigen,L.Luthe,Philips tech, Reviw 35,1975
- <sup>xx</sup> T.C.Tisone,D.Gruzan J.Vac.Sci.Technol,vol 12 1975
- <sup>xxi</sup> Gloersen J.Vac.Sci.Technol vol 12,1975
- <sup>xxii</sup> R.E.Lee, J.Vac.Sci.Technol vol 16,1979
- <sup>xxiii</sup> D.W.Younger,C.M.Haynes,J.Vac.Sci.Technol vol 21,1982
- <sup>xxiv</sup> C.M. Melliari-Smith J.Vac.Sci.Techn.vol.13 1976
- <sup>xxv</sup> E.G.Spenser and P.H.Schmidt J.Vac.Sci.Techn.vol.8 1971
- <sup>xxvi</sup> H.Dimigen and H.Luthje ,Philips tech.Rev.,1975,vol 7/8
- <sup>xxvii</sup> H.R.Kaufman,Adv.Electron.Electron Phys.36,265(1974)
- <sup>xxviii</sup> Per G.Gloersen J.Vac.Sci.Techn.vol.12 1975
- <sup>xxix</sup> Halliday Resnick Physics
- <sup>xxx</sup> Ion Tech instruction manual for 3cm source
- <sup>xxxi</sup> Μαθήματα ηλεκτρονικής Καρούμπαλου-Φιλοκύπρου
- <sup>xxxii</sup> H.R.Kaufman J.Vac.Sci.Techn.vol.15 1978
- <sup>xxxiii</sup> H.R.Kaufman J.Vac.Sci.Techn.vol.15 1978
- <sup>xxxiv</sup> Ion Tech instruction manual for 3cm source
- <sup>xxxv</sup> H.R.Kaufman,J.J.Cuomo,J.M.E.Harper J.Vac.Sci.Techn.vol.21 1982 part II
- <sup>xxxvi</sup> H.R.Kaufman,J.J.Cuomo,J.M.E.Harper J.Vac.Sci.Techn.vol.21 1982 partI
- <sup>xxxvii</sup> H.R.Kaufman,R.S.Robinson,R.I.Selton J.Vac.Sci.Techn.vol.5 1989
- <sup>xxxviii</sup> H.R.Kaufman J.Vac.Sci.Techn.vol.8 1990
- <sup>xxxix</sup> Guarnieri,Ramanathan,Cuomo,Yee. J.Vac.Sci.Techn.vol.6 1988
- <sup>xl</sup> H.R.Kaufman J.Vac.Sci.Techn.vol.15 1978

- 
- xli H.R.Kaufman,J.J.Cuomo,J.M.E.Harper J.Vac.Sci.Techn.vol.21 1982
- xlii H.R.Kaufman J.Vac.Sci.Techn.vol.15 1978
- xliii H.R.Kaufman,J.J.Cuomo,J.M.E.Harper J.Vac.Sci.Techn.vol.21 1982 part I
- xliv H.R.Kaufman,J.J.Cuomo,J.M.E.Harper J.Vac.Sci.Techn.vol.21 1982 partI
- xl<sup>v</sup> PBN instruction manual
- <sup>1</sup> J.L.Rouviere,J.L.Weyher,M.Seelmann-Eggebert,S.Porowski J.Appl.Phys.Letters 73 1998
- <sup>2</sup> Seelmann,Weyher,Oblon J.Appl.Phys.Lett 71 1997
- <sup>3</sup> R.E.Lee, J.Vac.Sci.Technol vol 16,1979  
also D.W.Younger,C.M.Haynes,J.Vac.Sci.Technol vol 21,1982 also  
T.C.Tisone,D.Gruzan,J.Vac.Sci.Technol,vol12,1975
- <sup>4-5</sup> G.K.Reevs,H.B.Harrison Electron device letters vol edl-No-5 1992  
also Modern GaAs Proccecing Methods Ralph. Williams
- <sup>6</sup> M.O.Adoelfotoh,M.A.Borek J.Appl.Phys.Letters 75 1999  
also Ishikawa,Yamasaki,Murakami J.Appl.Phys.Letters 81 1997
- <sup>7</sup> M.O.Adoelfotoh,M.A.Borek J.Appl.Phys.Letters 75 1999
- <sup>8</sup> Οπτοηλεκτρονική Jasprit Singh
- <sup>9</sup> Hadis Morkoc ,University of Illinois Urbana