

# Μικροηλεκτρονική Κατασκευή Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων

3η Εργαστηριακή Άσκηση: Κατασκευή Διάταξης  
MOSFET

Γιώργος Βασιλείου  
ΑΜ: 03116062

ΣΗΜΜΥ  
Ακ. Έτος 2019 - 2020

## Εμφύτευση Ιόντων

Σκοπός της άσκησης είναι η μελέτη της τεχνικής ιοντικής εμφύτευσης (*ion implantation*) για την προσθήκη νοθευτών Βορίου σε n-τύπου υπόστρωμα Si συγκέντρωσης  $N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}$ . Το πείραμα θα διεξαχθεί για διάφορες τιμές συγκέντρωσης της πηγής καθώς και για διαφορετικές τιμές ενέργειας πρόσκρουσης, ώστε να μελετηθεί το προφίλ της διάχυσης και ο σχηματισμός p-n ένωσης.

Η προσομοίωση γίνεται στο περιβάλλον *SILVACO* για (1) ενέργεια πρόσκρουσης  $80 \text{keV}$  και (2)  $100 \text{keV}$  και για επιφανειακές συγκεντρώσεις πηγής B (i)  $2 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$  και (ii)  $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ .

## Θεωρητικό Μοντέλο

Κατά την ιοντική εμφύτευσή, τα ιόντα που βρίσκονται σε αέρια φάση επιταχύνονται χάρη σε μαγνητικό πεδίο και προσκρούουν με υψηλή ενέργεια στο wafer Si. Τα ιόντα αυτά συνεχίζουν την πορεία τους προς το εσωτερικό του υποστρώματος με σταδιακά μειούμενη ενέργεια λόγω των σκεδάσεων με τα ηλεκτρόνια και τα άτομα του υποστρώματος.

Οι διαδοχικές συγκρούσεις με άτομα του κρυσταλλικού πλέγματος προκαλούν την αλλαγή της τροχιάς του εμφυτευμένου ιόντος (Σχήμα 1) καθώς και την απώλεια ενέργειας. Τυχόν αστοχίες που δημιουργούνται στον μονοκρύσταλλο λόγω υψηλής μεταφοράς ενέργειας ( $\sim 30 \text{eV}$ ) διορθώνονται σε επόμενη φάση με θερμική ανόπτηση.

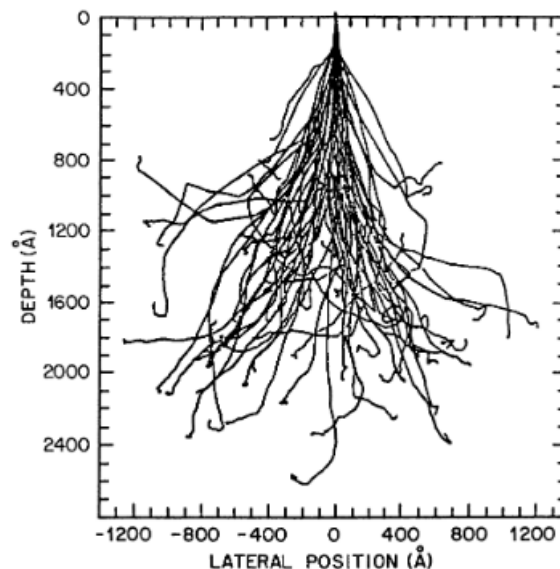


Figure 1: Τροχιές Ιόντων σε Εμφύτευση B 50keV σε Si.

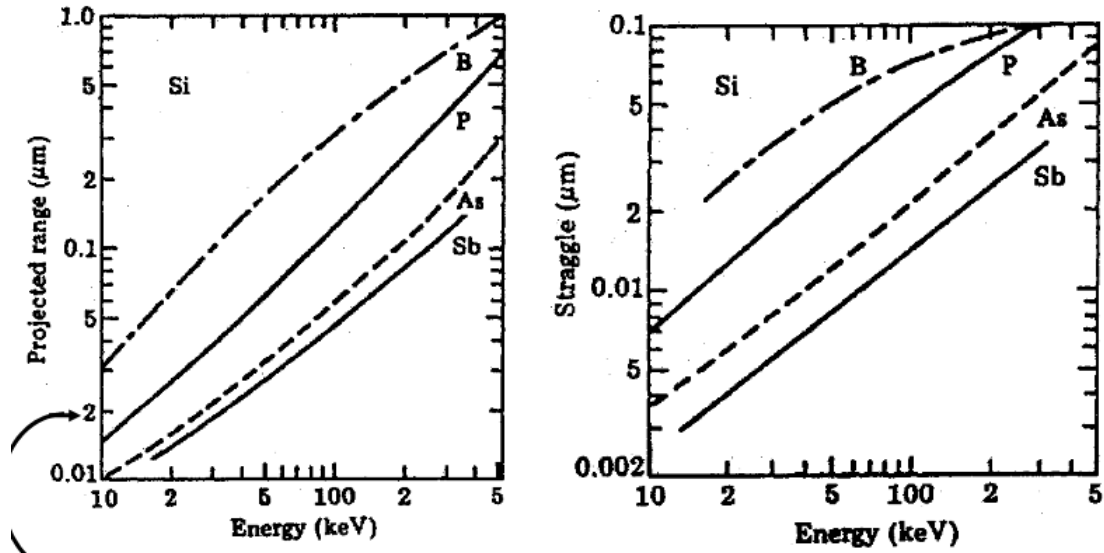
Θεωρώντας την προβολή  $R_p$  της εμβέλειας (range, R) των ιόντων από το σημείο εισόδου, η συγκέντρωση των εμφυτευθέντων ιόντων συναρτήσει της απόστασης δίνεται από κατανομή Gauss,  $n(x) \sim \mathcal{N}(R_p, \sigma_p^2)$ .

$$n(x) = n(R_p) \exp\left(-\frac{(x - R_p)^2}{2\sigma_p^2}\right) \quad (1)$$

Αν συνολικός αριθμός εμφυτευμένων ιόντων (dose,  $\Phi$ ) τότε από την ολοκλήρωση της παραπάνω κατανομής (1) προκύπτει έκφραση για το μέγιστο  $n(R_p)$ .

$$n(R_p) = \frac{\Phi}{\sigma_p \sqrt{2\pi}} \approx \frac{0.4\Phi}{\sigma_p} \quad (2)$$

Οι σταθερές  $R_p$  και  $\sigma_p$  μοντελοποιούνται για διάφορες ενέργειες πρόσκρουσης ιοντων στο πυρίτιο.



Οι χαρακτηριστικές τιμές προβαλλόμενης εμβέλειας και προβαλλόμενης απόκλισης για τις ενέργειες ιόντων που μας ενδιαφέρουν είναι [1]

1. 80 keV :  $R_p = 0.238\mu m$ ,  $\sigma_p = 0.0605\mu m$ ,
2. 100 keV :  $R_p = 0.2887\mu m$ ,  $\sigma_p = 0.0669\mu m$ .

## Προσομοιώσεις Εμφυτεύσεων

Παραθέτουμε τα προφίλ συγκεντρώσεων των τεσσάρων πειραμάτων όπως περιγράφονται στα (1.i, 1.ii) και (2.i, 2.ii).

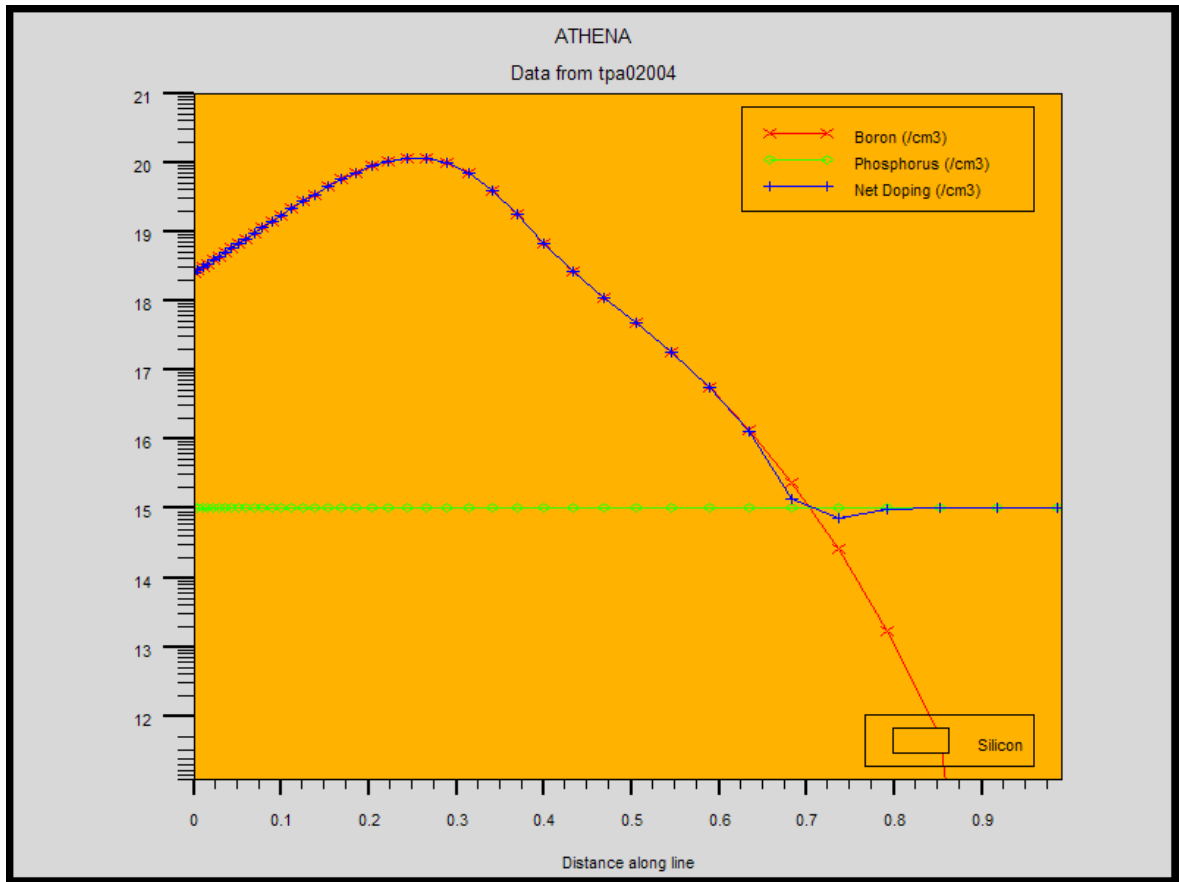


Figure 2: Εμφύτευση Ενέργειας 80keV,  $2E15$  ιόντων B.

### 1.i) Εμφύτευση Ενέργειας 80keV, $2E15$ ιόντων B

Από το προφίλ διάχυσης βρίσκουμε την μέγιστη συγκέντρωση B

στην θέση  $x_{1,i} = 0.263\mu m$ , ίση με  $n_{1,i}(x_{1,i}) = 10^{20.1} cm^{-3}$ .

Από αυτό βρίσκουμε την θεωρητική θέση σχηματισμού επαφής p-n

$$\begin{aligned} x_{1,i} &= R_p + \sigma_p \sqrt{2 \ln\left(\frac{n(R_p)}{N_D}\right)} \\ &= 0.6022\mu m. \end{aligned}$$

Η πειραματική μέτρηση του βάθους σχηματισμού της διόδου δίνει  $x_{1,i} = 0.725\mu m$ .

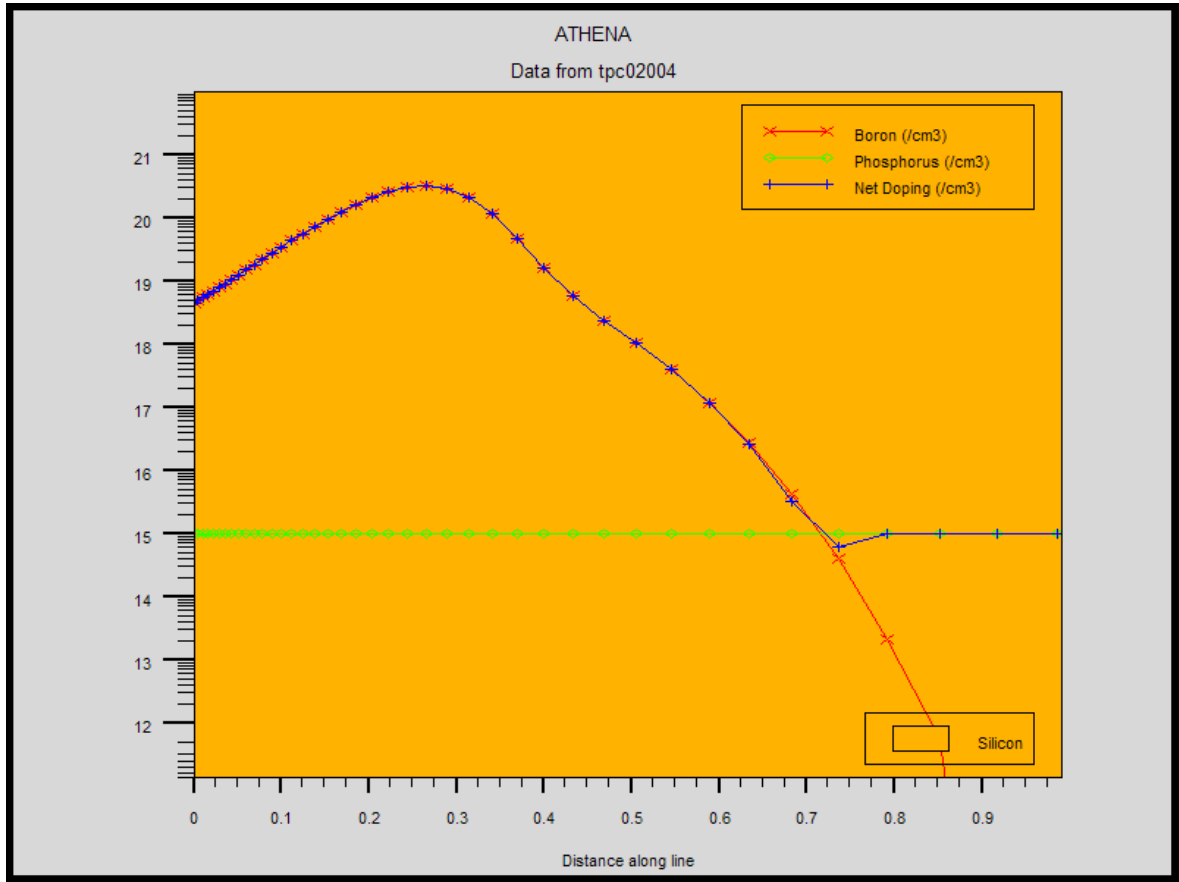


Figure 3: Εμφύτευση Ενέργειας 80keV, 5E15 ιόντων B.

### 1.ii) Εμφύτευση Ενέργειας 80keV, 5E15 ιόντων B

Από την δεύτερη αυτή εμφύτευση βρίσκουμε την μέγιστη συγκέντρωση B

στην θέση  $x_{1,ii} = 0.266\mu m$ , ίση με  $n_{1,ii}(x_{1,ii}) = 10^{20.5} cm^{-3}$ .

Έτσι, το αναμενόμενο βάθος της επαφής είναι

$$\begin{aligned} x_{1,ii} &= R_p + \sigma_p \sqrt{2 \ln\left(\frac{n(R_p)}{N_D}\right)} \\ &= 0.6183\mu m. \end{aligned}$$

Η πειραματική μέτρηση του βάθους σχηματισμού της διόδου δίνει  $x_{1,ii} = 0.725\mu m$ .

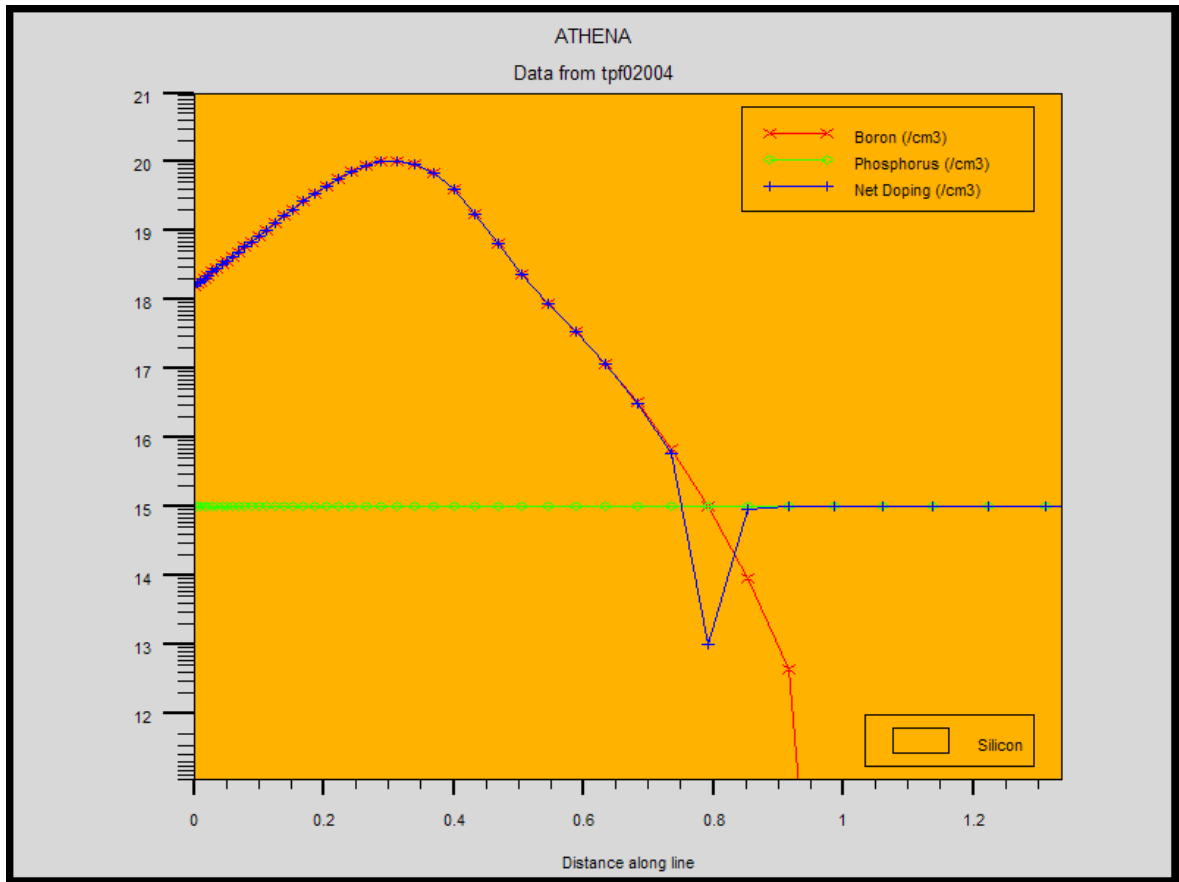


Figure 4: Εμφύτευση Ενέργειας 100keV, 2E15 ιόντων B.

## 2.i) Εμφύτευση Ενέργειας 100keV, 2E15 ιόντων B

Κατά την εμφύτευση αυτή βρίσκουμε μέγιστη συγκέντρωση B

$$\text{στην θέση } x_{2,i} = 0.311\mu m, \text{ ίση με } n_{2,i}(x_{2,i}) = 10^{20.45} cm^{-3}.$$

Το αναμενόμενο λοιπόν βάθος της p-n επαφής προκύπτει

$$\begin{aligned} x_{2,i} &= R_p + \sigma_p \sqrt{2 \ln\left(\frac{n(R_p)}{N_D}\right)} \\ &= 0.662\mu m. \end{aligned}$$

Ταυτόχρονα, η πειραματική μέτρηση του βάθους σχηματισμού της διόδου δίνει  $x_{2,i} = 0.79\mu m$ .

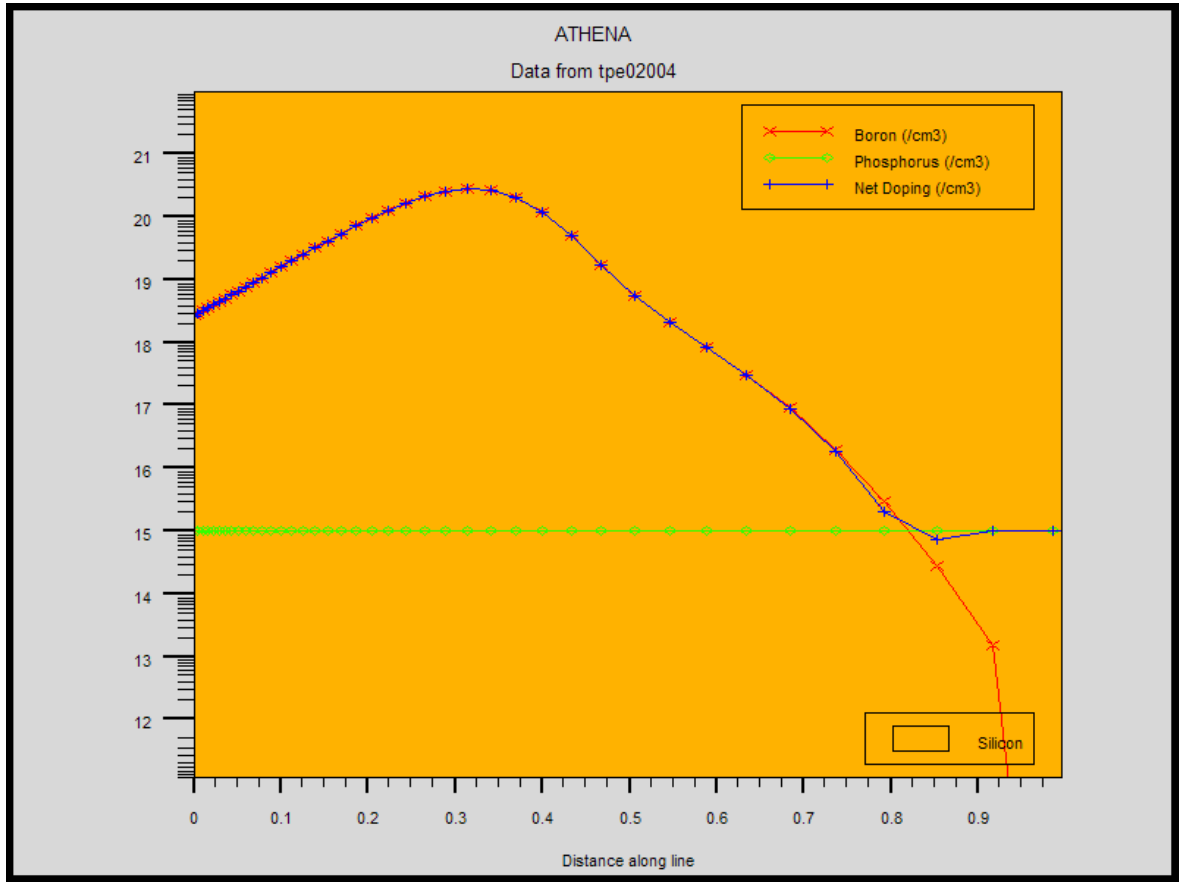


Figure 5: Εμφύτευση Ενέργειας 100keV, 5E15 ιόντων B.

## 2.ii) Εμφύτευση Ενέργειας 100keV, 5E15 ιόντων B

Στην τελευταία μέτρηση έχουμε μέγιστη συγκέντρωση B

στην θέση  $x_{2,ii} = 0.314\mu m$ , ίση με  $n_{2,ii}(x_{2,ii}) = 10^{20.46} cm^{-3}$ .

Το αναμενόμενο λοιπόν βάθος της p-n επαφής προκύπτει

$$\begin{aligned} x_{2,ii} &= R_p + \sigma_p \sqrt{2 \ln\left(\frac{n(R_p)}{N_D}\right)} \\ &= 0.665\mu m. \end{aligned}$$

ενώ η πειραματική μέτρηση του βάθους  $x_j$  δίνει  $x_{2,ii} = 0.851\mu m$ .

## Κατασκευή Διάταξης MOSFET

Σε αυτήν την άσκηση παρουσιάζονται τα βήματα κατασκευής pMOS σε n-τύπου υπόστρωμα Si συγκέντρωσης  $N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}$  και μήκους  $2\mu\text{m}$ . Για την κατασκευή της μάσκας των p διαχύσεων, γίνεται αρχικά υγρή οξείδωση για 40min στους  $900^\circ\text{C}$ . Το οξείδιο χαράσσεται στις περιοχές πηγής και υποδοχής, οπότε το ενοπομείναν οξείδιο έχει μήκος  $0.6\mu\text{m}$  και πάχος  $0.103\mu\text{m}$ .

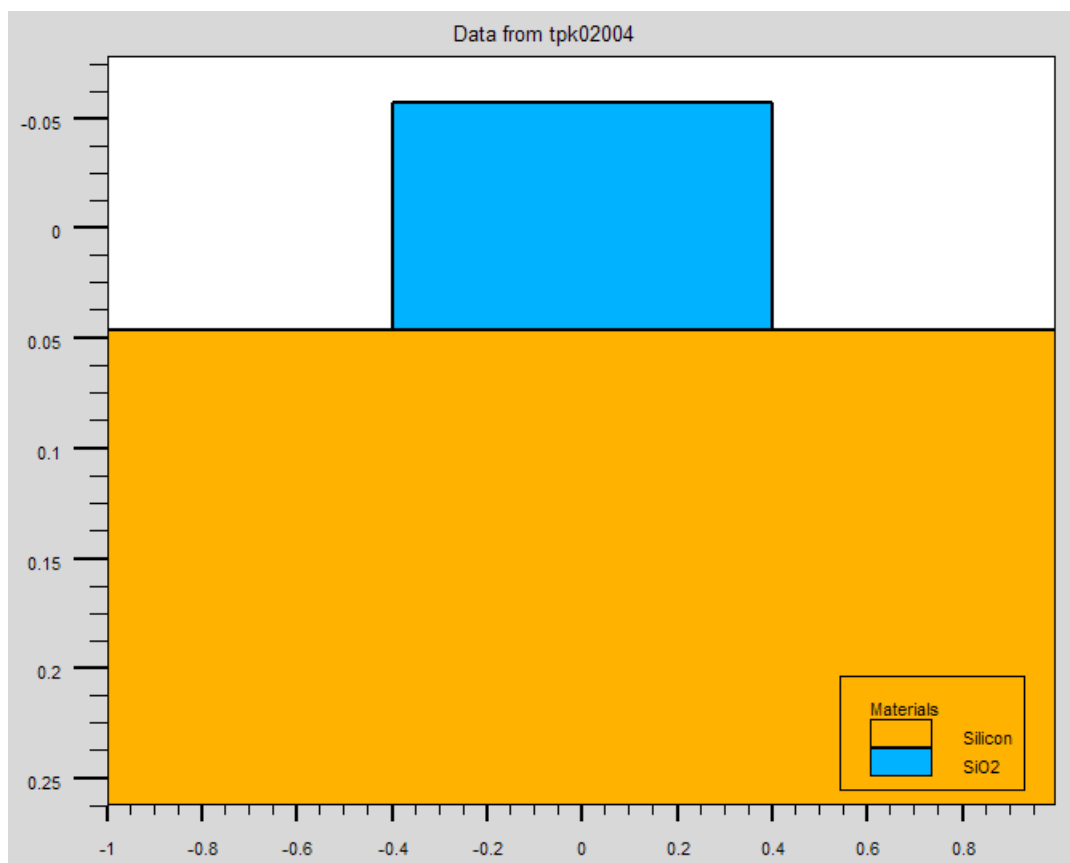


Figure 6: Σχηματισμός Οξειδίου Μάσκας για την Εναπόθεση B.

Στην συνέχεια γίνεται θερμική διάχυση B συγκέντρωσης  $10^{18} \text{cm}^{-3}$  για την δημιουργία των p περιοχών που θα αποτελέσουν τα source και drain. Η διάχυση γίνεται για 1h στους  $950^\circ\text{C}$  και έχει ως αποτέλεσμα η δημιουργηθείσα επαφή p-n με το υπόστρωμα να είναι σε βάθος  $0.181\mu\text{m}$ .

Παρατηρούμε ότι η περιοχή της p διάχυσης εκτείνεται και κάτω από το οξείδιο της μάσκας, για μήκος που υπολογίζεται στα  $0.0843\mu\text{m}$ .



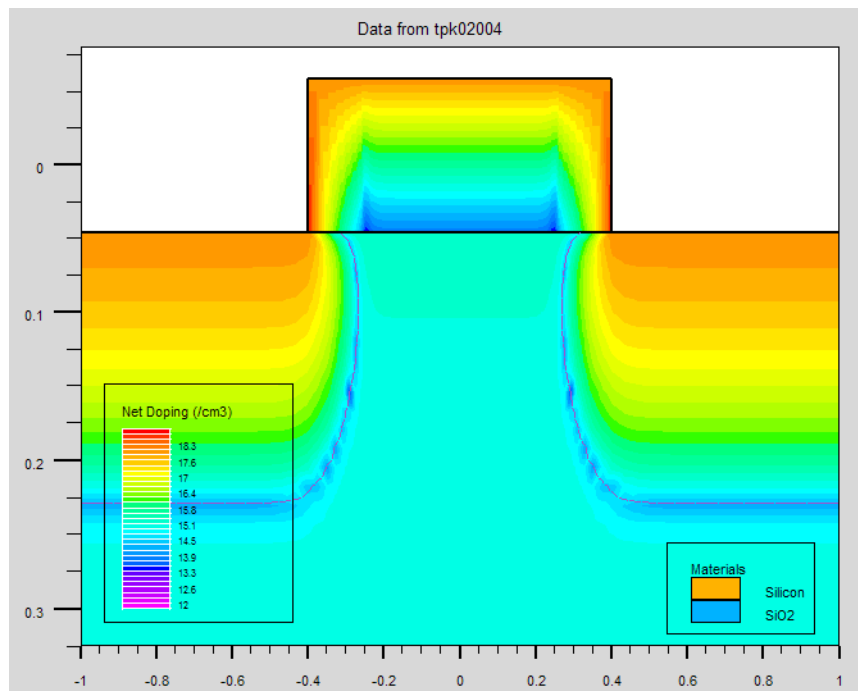


Figure 7: Εναπόθεση B και Σχηματισμός p-n Επαφών με το Υπόστρωμα.

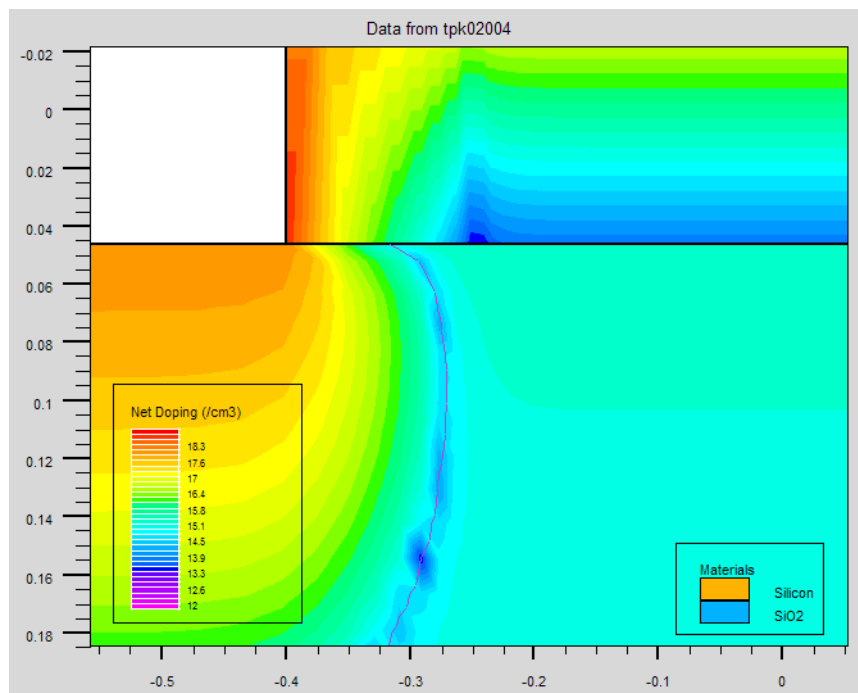


Figure 8: Εναπόθεση B και Σχηματισμός p-n Επαφών κάτω από την Μάσκα.

Στο επόμενο βήμα αφαιρείται το υπάρχον οξείδιο μάσκας και σχηματίζεται το οξειδίου της πύλης MOS. Για να σχηματιστεί αυτό, αρχικά γίνεται υγρή οξείδωση του wafer, όπως κατά την δημιουργία μάσκας, και στη συνέχεια χάραξη της περιοχής της πύλης.

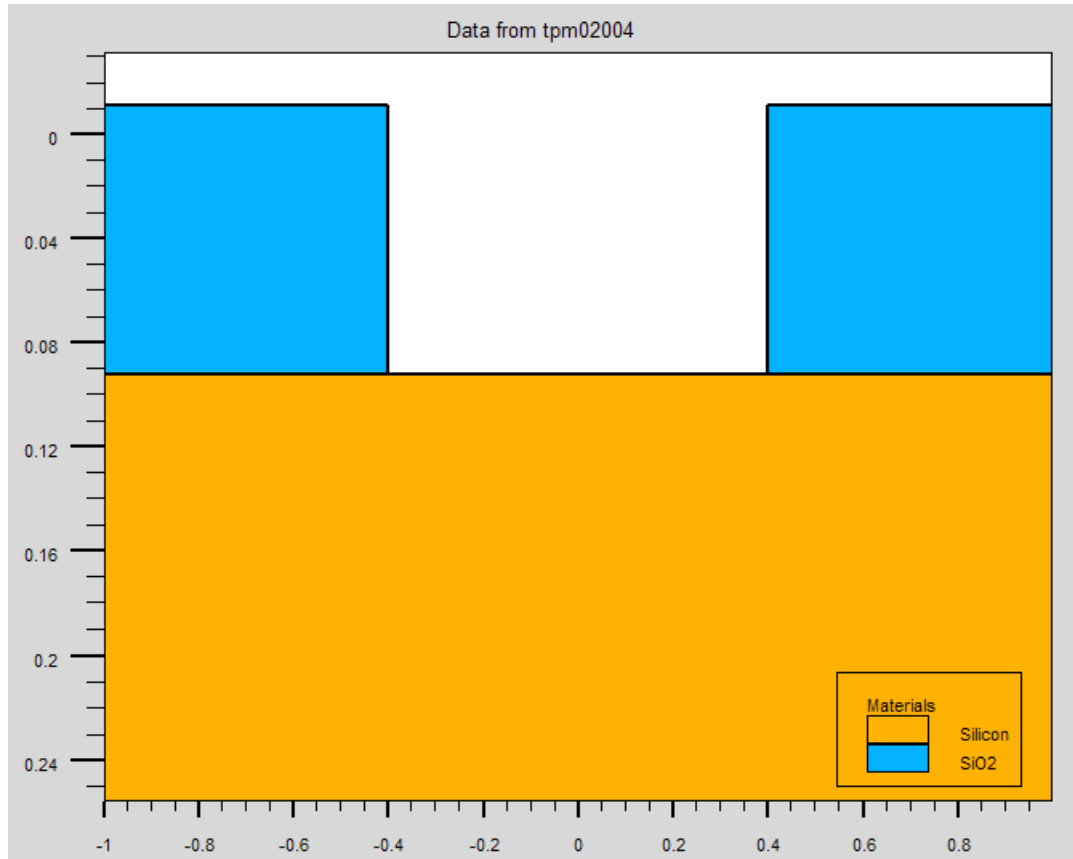


Figure 9: Μάσκα για Δημιουργία Οξειδίου Πύλης.

Ακολουθεί ξηρή οξείδωση στους 900°C. Η τεχνική της ξηρής οξείδωσης είναι πιο αργή αλλά και πιο ελεγχόμενη από την υγρή οξείδωση και για αυτό χρησιμοποιείται στην παραγωγή οξειδίων πυλών υψηλότερης ποιότητας. Η διάρκεια της αντίδρασης εξαρτάται από την χωρητικότητα  $C_{ox}$ , και άρα το πάχος  $x_{ox}$  που απαιτείται.

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{x_{ox}}$$

Για χωρητικότητα  $C_{ox} = 2fF \cdot (\mu m)^{-2}$  προκύπτει  $x_{ox} = 17.25nm$  το οποίο επιτυγχάνεται με οξείδωση 53min.

Στην συνέχεια, εναποτίθεται Al πάχους  $0.01\mu m$  το οποίο θα αποτελέσει την πύλη του MOS. Με την αφαίρεση της μάσκας, η κατασκευή πύλης, συνολικού μήκους  $0.776\mu m$  ολοκληρώνεται.

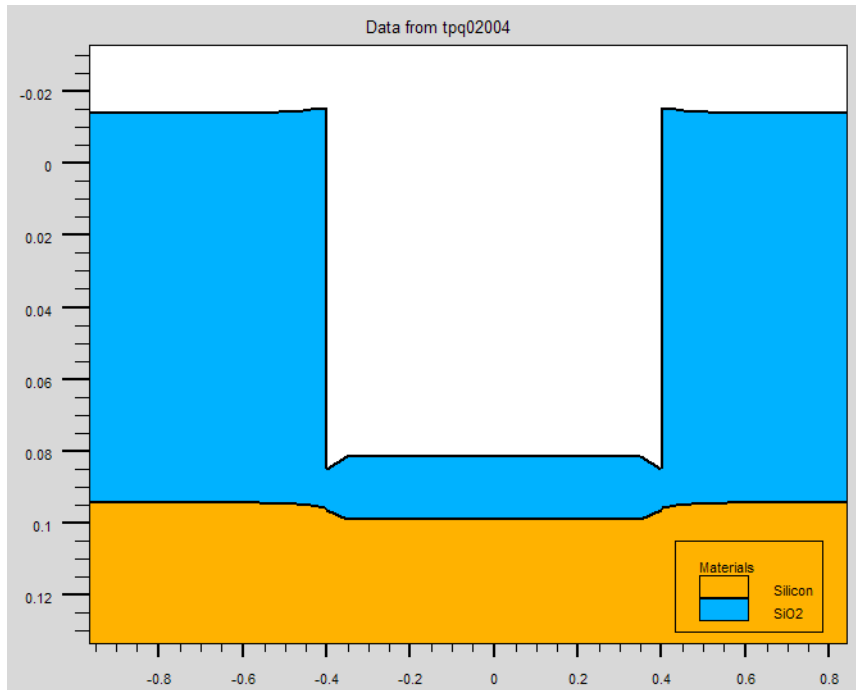


Figure 10: Σχηματισμός του Οξειδίου Πύλης.

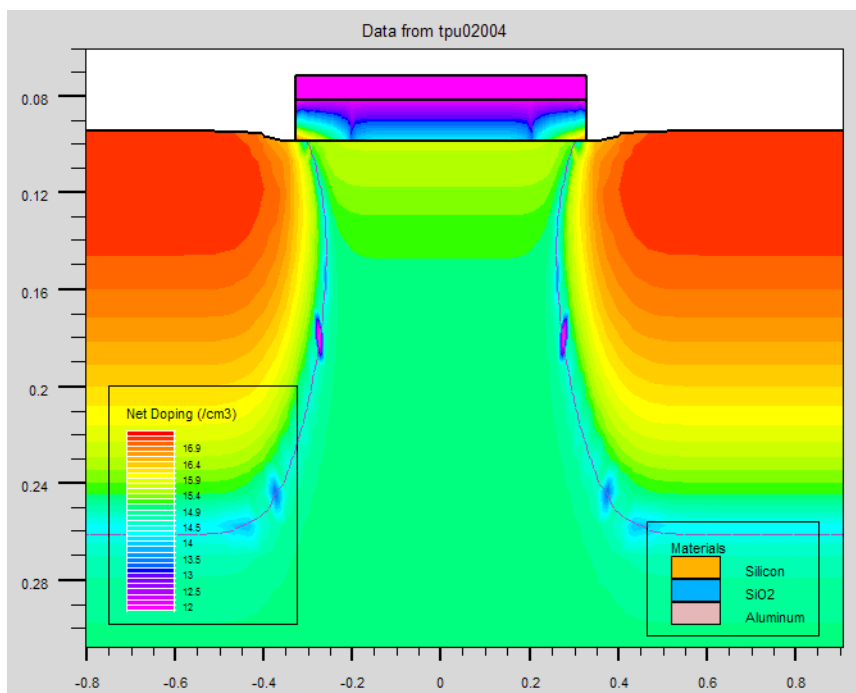


Figure 11: Σχηματισμός Πύλης MOS.

Τελευταίο βήμα για την κατασκευή είναι η εναπόθεση Al προς τον σχηματισμό των επαφών υποδοχής και πηγής, πάχους  $0.01\mu m$ .

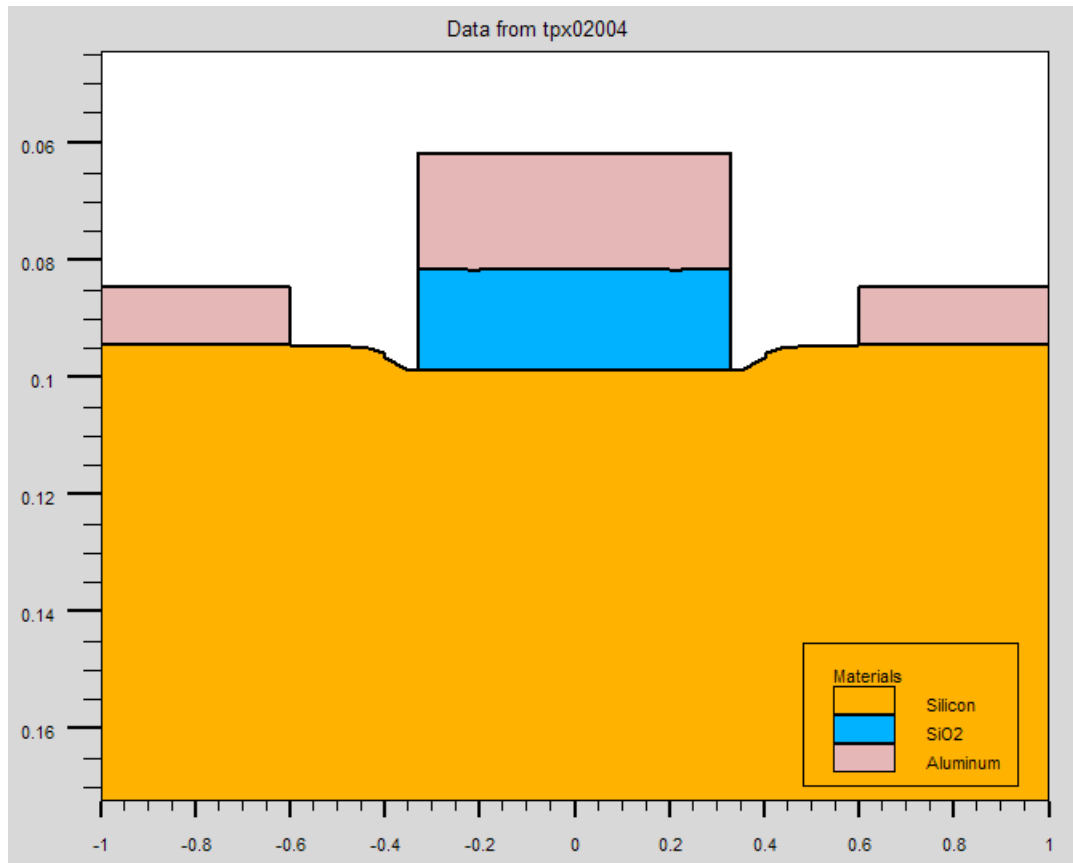


Figure 12: Διατομή Ολοκληρωμένου pMOS.

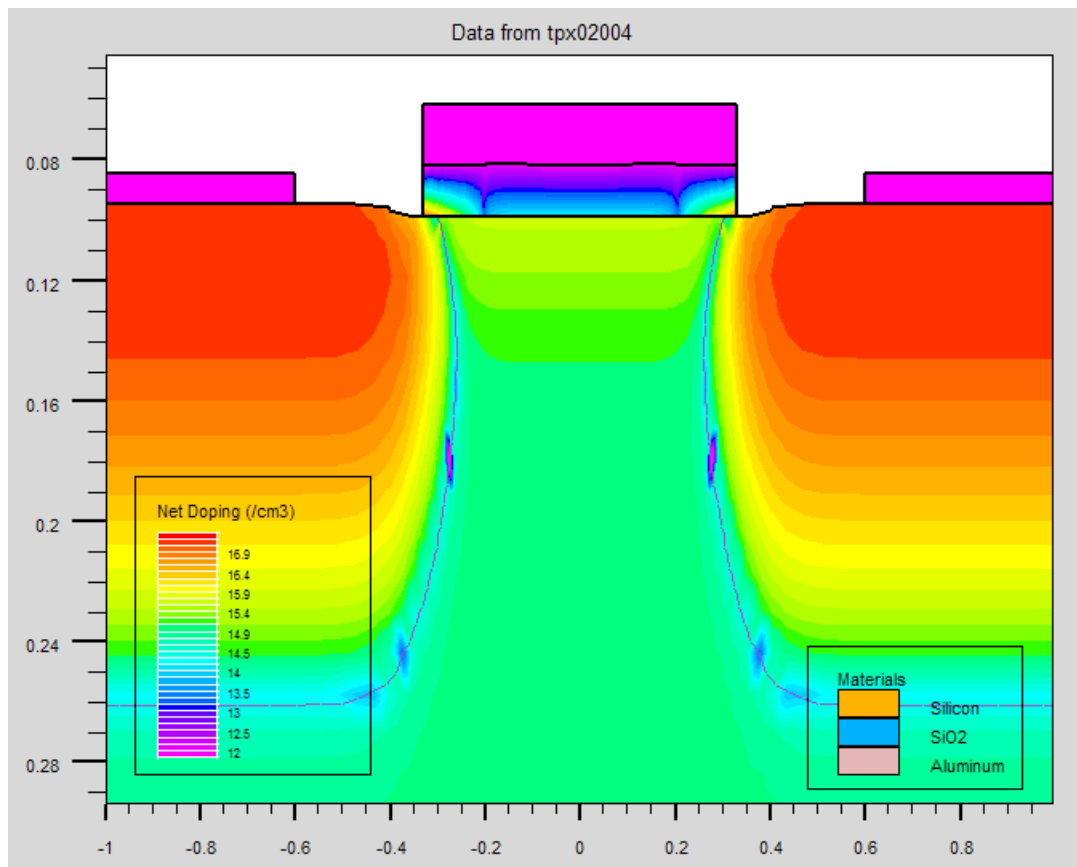


Figure 13: Διατομή Ολοκληρωμένου pMOS.

## References

- [1] *Ion Implantation: Projected Range & Straggle Calculator*. URL: <https://cleanroom.byu.edu/rangestruggle>.