

Μικροηλεκτρονική Κατασκευή Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων

1η Εργαστηριακή Άσκηση: Οξείδωση

Γιώργος Βασιλείου

ΑΜ: 03116062

ΣΗΜΜΥ

Ακ. Έτος 2019 - 2020

1 Σκοπός

Σκοπός αυτής της άσκησης είναι η μελέτη του φαινομένου της οξείδωσης του πυριτίου με χρήση δύο μεθόδων - υγρής και ξηρής οξείδωσης. Στην αρχή θα εξετασθεί θεωρητικά το *Deal - Grove* μοντέλο της οξείδωσης, ενώ στην συνέχεια ακολουθούν δύο προσομοιώσεις οξείδωσης πυριτίου στο περιβάλλον *Silvaco*.

Στην πρώτη εκ των δύο προσομοιώσεων, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των διαφορετικών τεχνικών, για δυο θερμοκρασίες του αντιδραστήριου, και στην συνέχεια θα γίνει χάραξη οξειδίου πύλης MOSFET με συνδυασμό υγρής και ξηρής οξείδωσης.

2 Θεωρητικές Ερωτήσεις

Η θερμική οξείδωση του πυριτίου είναι μια χημική διαδικασία, κατά την οποία οξυγόνο από τον περιβάλλον χώρο αντιδρά με τον μονοκρύσταλλο του πυριτίου, προς τον σχηματισμό διοξειδίου του πυριτίου SiO_2 . Θερμική οξείδωση του υποστρώματος παρατηρείται και σε θερμοκρασία δωματίου, που έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό οξειδίου πάχους $\sim 1nm$. Η αντίδραση δεν προχωρά περισσότερο αφού στα μόρια οξυγόνου σε θερμοκρασία δωματίου δεν υπάρχει αρκετή ενέργεια ώστε να γίνει διάχυσή τους πέρα από το βάθος αυτό.

Για αυτόν τον λόγο, οι τεχνικές θερμικής οξείδωσης που θα εξετασθούν στη συνέχεια λαμβάνουν χώρο σε θερμοκρασία αντιδραστήριου $900 - 1200^\circ C$

Άσκηση 1

Το βάθος της οξείδωσης του πυριτίου, συναρτήσει του χρόνου, σύμφωνα με το μοντέλο *Deal - Grove* [2] έχει μορφή

$$x(t)^2 + Ax(t) = B(t + \tau) \quad (1)$$

Επιλύουμε το παραπάνω πολυώνυμο ως προς $x(t)$, διατηρώντας την θετική λύση - υποθέτοντας ότι $\Delta = A^2 + 4B(t + \tau) \geq 0$, προκύπτει η ακριβής λύση ως προς το βάθος οξείδωσης

$$x(t) = \frac{A}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{4B(t + \tau)}{A^2}} - 1 \right] \quad (2)$$

που προφανώς αποτελεί την θετική των δύο λύσεων, αφού $\sqrt{1 + \frac{4B(t + \tau)}{A^2}} \geq 1$
 $\forall A, B \geq 0$.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ακριβής αυτή λύση μπορεί να προσεγγιστεί γραμμικά, για μικρούς χρόνους οξείδωσης, από την εξίσωση

$$x(t) \approx \frac{A}{B}(t + \tau), \quad t \text{ μικρό} \quad (3)$$

ή, για μεγάλους χρόνους αντίδρασης [1], από την παραβολική σχέση.

$$x(t) \approx \sqrt{Bt}, \text{ για } t \gg \tau \text{ και } t \gg \frac{A^2}{4B} \quad (4)$$

Άσκησης 2 και 3

Οι δύο κύριες τεχνικές θερμικής οξείδωσης του πυριτίου είναι η ξηρή οξείδωση, στην οποία το υπόστρωμα πυριτίου τοποθετείται σε περιβάλλον αέριου οξυγόνου και η υγρή οξείδωση, στην οποία το πυρίτιο τοποθετείται σε υδατινό περιβάλλον [5]. Χαρακτηριστικά, οι αντιδράσεις ξηρής και υγρής οξείδωσης είναι:



Από τις δύο, η υγρή οξείδωση είναι έως και πέντε φορές ταχύτερη της ξηρής (ρυθμός υγρής οξείδωσης $\sim 600nm/h$, ξηρής $\sim 150nm/h$ [1],[3]). Για αυτό, η πρώτη τεχνική χρησιμοποιείται για την κατασκευή παχών οξειδίων πεδίου, απομόνωσης και μασκών - κάποιες φορές σε συνδυασμό με την ξηρή οξείδωση ώστε να αυξηθεί η ποιότητα του οξειδίου [4]. Αντιθέτως, για την κατασκευή λεπτών οξειδίων υψηλής ποιότητας - πάχους μικρότερο των $10nm$ (πχ οξείδια πύλης MOSFET) προτιμάμε την βραδύτερη αλλά καλύτερα ελεγχόμενη ξηρή οξείδωση.

Άσκησης 4 και 5

Εκτός από τις προηγούμενες διαφορές στη μορφή της οξείδωσης, υπάρχουν και άλλες παράμετροι που επιρρεάζουν την μορφή και την ποιότητα του οξειδίου που δημιουργείται. Αυτές είναι κατά κύριο λόγο η θερμοκρασία οξείδωσης -όπως έχει προαναφερθεί, η ροή του οξειδωτικού μέσου στο αντιδραστήριο, η πίεση του αντιδραστήριου καθώς και η διάρκεια της αντίδρασης. Επιπλέον, υπάρχει περίπτωση να παρατηρηθούν μεταβολές στο ρυθμό της οξείδωσης ανάλογα με τον προσανατολισμό του μονοκρυστάλλου από τον οποίο έχουν κατασκευαστεί τα wafers.

Αυτές οι παράμετροι μοντελοποιούνται μέσω των σταθερών A , B και τ , οι οποίες δίνονται από το μοντέλο (1) ως εξής.

$$A = \frac{2D}{\kappa} \quad (5)$$

$$B = \frac{2DC_0}{C_1} \quad (6)$$

$$\tau = \frac{(x_0^2 + 2Dx_0/\kappa)C_1}{2DC_0} \quad (7)$$

όπου D ο συντελεστής διάχυσης του οξειδωτικού μέσου, κ σταθερά της επιφάνειας που αναπαριστά επιφανειακά φαινόμενα στο σύνορο, C_0 η επιφανειακή συγκέντρωση μορίων του οξειδωτικού μέσου και C_1 ο αριθμός των μορίων του οξειδωτικού μέσου, ανά μονάδα όγκου [2].

Τέλος, σημειώνεται ότι η παράμετρος τ εξαρτάται και από το μέγεθος x_0 που είναι το βάθος της προυπάρχουσας οξείδωσης στην αρχή της διαδικασίας. Δηλαδή, αποτελεί την προσθετική σταθερά που επαληθεύει τις συνορικές συνθήκες του προβλήματος.

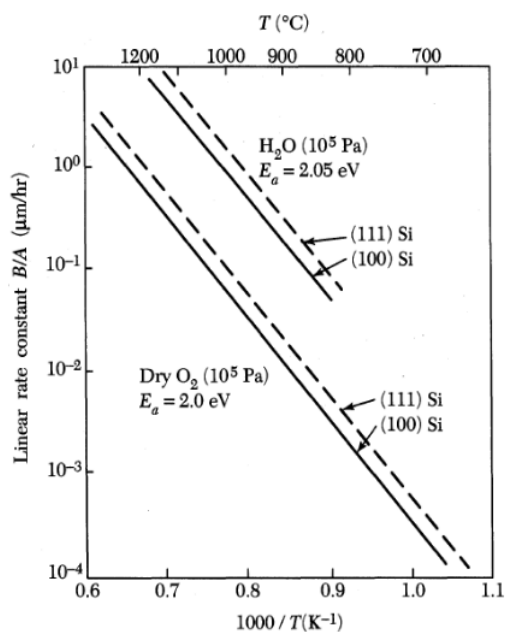
Οι παραπάνω σταθερές του ρυθμού οξείδωσης, για την κρυσταλλική διεύθυνση $\langle 100 \rangle$ προσδιορίζεται πειραματικά από τα επόμενα Σχήματα 1 και 2 για τις συνθήκες θερμοκρασίες οξείδωσης.

Oxidation temperature (°C)	A (μm)	Parabolic rate constant B (μm ² /h)	Linear rate constant B/A (μm/h)	τ (h)
1200	0.05	0.720	14.40	0
1100	0.11	0.510	4.64	0
1000	0.226	0.287	1.27	0
920	0.50	0.203	0.406	0

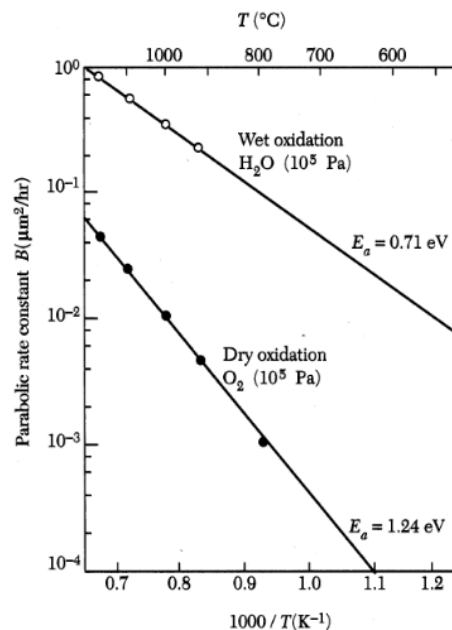
Figure 1: Ρυθμοί Υγρής Οξείδωσης Πυριτίου

Oxidation temperature (°C)	A (μm)	Parabolic rate constant B (μm ² /h)	Linear rate constant B/A (μm/h)	τ (h)
1200	0.040	0.045	1.12	0.027
1100	0.090	0.027	0.30	0.076
1000	0.165	0.0117	0.071	0.37
920	0.235	0.0049	0.0208	1.40
800	0.370	0.0011	0.0030	9.0

Figure 2: Ρυθμοί Ξηρής Οξείδωσης Πυριτίου



(a) Εξάρτηση του Γραμμικού Συντελεστή $\frac{A}{B}$ από την θερμοκρασία



(b) Εξάρτηση του Παραβολικού Συντελεστή B από την θερμοκρασία

Άσκηση 6

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα χρήσης πυριτίου στις τεχνολογίες μικρομετρικής κλίμακας είναι η ευκολία δημιουργίας και χάραξης των οξειδίων του σε οξείδια υψηλής αξιοπιστίας. Για αυτόν τον λόγο το οξείδιο του πυριτίου έχει βρεί ευρεία εφαρμογή σε πληθώρα μικροηλεκτρονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων [5].

Συγκεκριμένα οι μονωτικές ιδιότητες του SiO_2 βρίσκουν εφαρμογή στα Στοιχεία Πεδίου - *Field Oxides* που βοηθούν την δημιουργία αξιόπιστων καναλιών στο υπόστρωμα και αποτρέπουν την δημιουργία παρασιτικών καναλιών κοντά στις επαφές των στοιχείων και την αλληλεπίδραση των πεδίων ξεχωριστών FET. Επιπλέον, το άμορφο SiO_2 είναι απαραίτητο στον σχηματισμό των οξειδίων πύλης αλλά και του πολυκρυσταλλικού πυριτίου - πολυπυρίτιο (*polysilicon*) που χρησιμοποιείται στον σχηματισμό των πυλών και των επαφών πηγών/υποδοχών. Τέλος, μια στρώση προστατευτικού γυαλιού τοποθετείται πάνω από το ολοκληρωμένο κατά την διαδικασία της αδρανικοποίησης (*passivation*) με σκοπό να προστατευτεί από την είσοδο ρύπων κατά την λειτουργία.

3 Προσομοίωση Οξείδωσης

Για τις ασκήσεις προσομοίωσης που ακολουθούν θεωρούμε wafer πυριτίου p-διάχυσης, στην κρυσταλλική διεύθυνση $\langle 100 \rangle$ και ειδική αντίσταση $10\Omega\text{cm}$, στο περιβάλλον *Silvaco*. Επιπλέον, για τον υπολογισμό των θεωρητικά αναμενόμενων βαθών οξείδωσης, θα χρησιμοποιηθεί η παραβολική προσέγγιση της Εξίσωσης (4) αφού οι χρόνοι αντίδρασης 20 και 45 λεπτών το επιτρέπουν.

3.1 Υγρή και Ξηρή Οξείδωση

1. Υγρή Οξείδωση στους 1050°C , 45 λεπτά

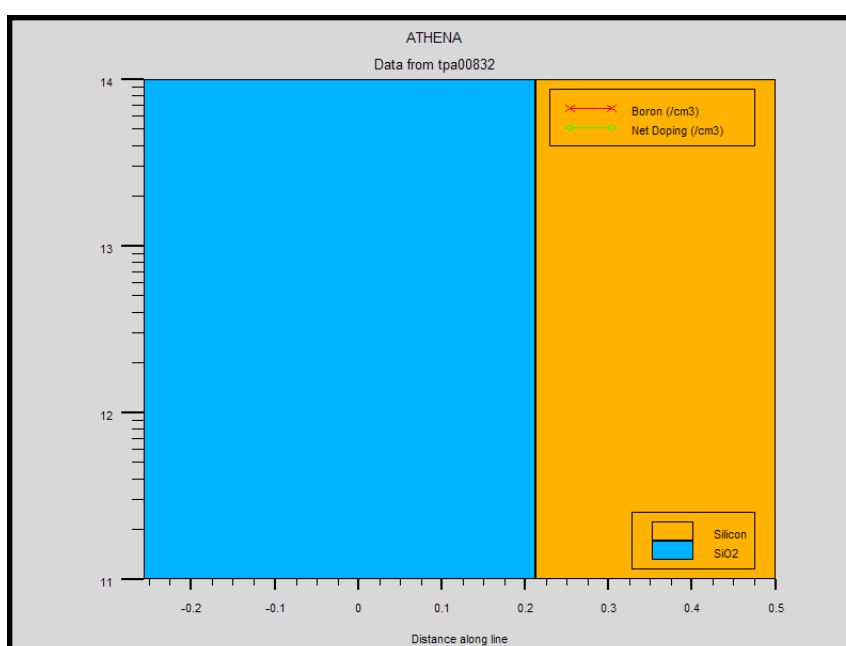


Figure 3: Βάθος Εισχώρησης Οξειδίου στην Υγρή Οξείδωση, 1050°C

Με χρήση του χάρακα του περιβάλλοντος, διαπιστώνουμε βάθος εισχώρησης του SiO_2 στο πυρίτιο στα $0.212\mu\text{m}$ και συνολικό πάχος οξειδίου στα $0.469\mu\text{m}$. Το αναμενόμενο πάχος οξειδίου δίνεται από την εξίσωση 4 με χρήση του B (για 1000°C), $0.287\mu\text{m}^2/\text{h}$ από τον πίνακα ρυθμών της υγρής οξείδωσης (Σχήμα 1) και προκύπτει $\sqrt{0.75 * 0.287} = 0.464\mu\text{m}$.

Παρατηρούμε ότι κατά τον σχηματισμό του SiO_2 δεν υπήρξε μόνο διείσδυση του στο υπόστρωμα αλλά ταυτόχρονα και δημιουργία οξειδίου που εκτείνεται και εκτός υποστρώματος, ως αναμενόμενο.

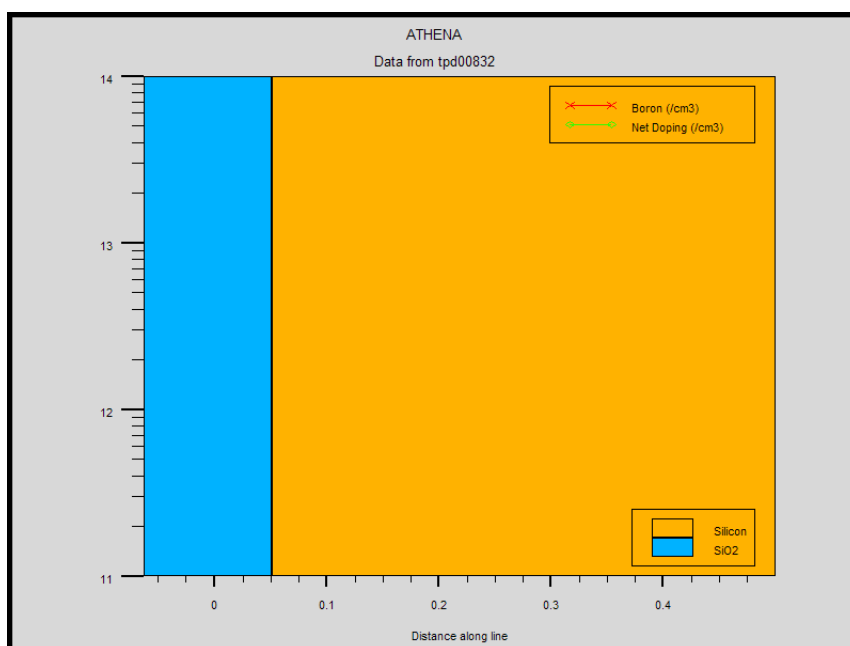


Figure 4: Βάθος Εισχώρησης Οξειδίου στην Υγρή Οξείδωση, 900°C

2. Υγρή Οξείδωση στους 900°C, 45 λεπτά

Σε αυτήν την περίπτωση διαπιστώνουμε βάθος εισχώρησης στο υπόστρωμα $0.05\mu m$ και συνολικό πάχος οξειδίου $0.113\mu m$. Αναμενόμενη τιμή πάχους για το σχηματισμένο οξείδιο δίνεται για $B(920^\circ C)$, $0.203\mu m^2/h$ από τον πίνακα ρυθμών της υγρής οξείδωσης (Σχήμα 1) και προκύπτει $\sqrt{0.75 * 0.203} = 0.387\mu m$.

Παρά την προκύπτουσα απόκλιση από την θεωρητική τιμή, φαίνεται σε σύγκριση με το Σχήμα 3 πώς η μείωση της θερμοκρασίας του αντιδραστηρίου, δεδομένων των υπόλοιπων παραμέτρων, οδήγησε σε μια αντίστοιχη μείωση στο πάχος του οξειδίου. Όπως έχει προαναφερθεί, το μειωμένο αυτό πάχος οφείλεται στην μικρότερη ενέργεια των οξυγονούχων μορίων (στην συγκεκριμένη περίπτωση, αέρια O_2) και άρα στην μειωμένη ικανότητα διάχυσής τους μέσα από το ήδη υπάρχων οξείδιο.

3. Ξηρή Οξείδωση στους 1050°C, 45 λεπτά

Όπως προηγουμένως, μετράμε σε αυτή την προσομοίωση βάθος διείσδυσης $0.03\mu m$ και πάχος σχηματιζόμενου οξειδίου $0.067\mu m$. Η θεωρητική τιμή προκύπτει από τις τιμές του Σχήματος 2.

$$B(1000^\circ) = 0.0117(\mu m^2/h) \Rightarrow x(45min) = \sqrt{0.75 * 0.0117} = 0.093\mu m$$

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά με το Σχήμα 3 γίνεται σαφές πως ο αντίδραση της ξηρής οξείδωσης είναι σημαντικά πιο αργή από την υγρή, σε συνθήκες

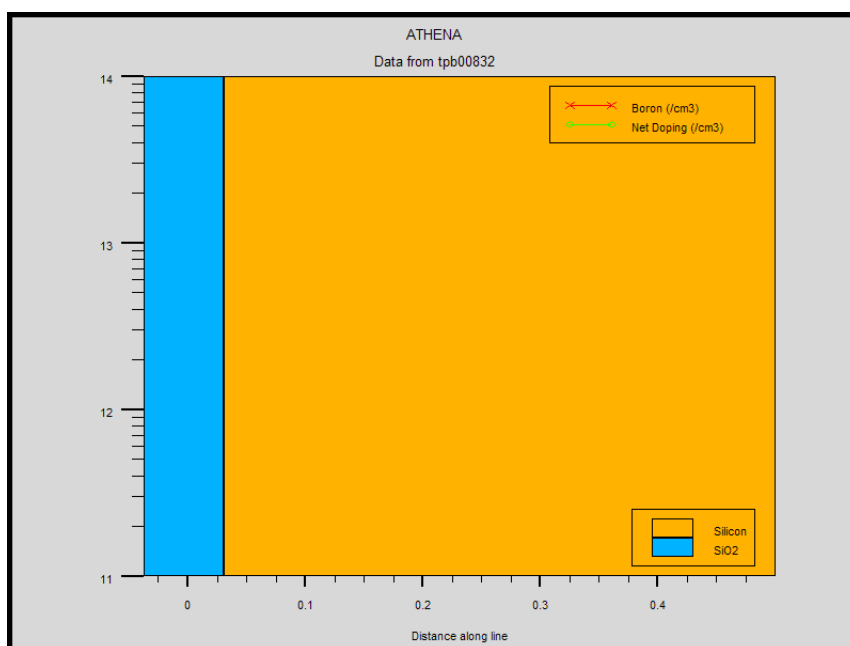


Figure 5: Βάθος Εισχώρησης Οξειδίου στην Ξηρή Οξείδωση, 1050°C

ίδιας θερμοκρασίας.

4. Ξηρή Οξείδωση στους 900°C, 45 λεπτά

Τέλος, στην προσομοίωση ξηρής οξείδωσης στους 900°C, μετράμε την διείσδυση στο υπόστρωμα στα 0.006μm και συνολικό πάχος οξειδίου 0.016μm. Η θεωρητική τιμή όπως προηγουμένως υπολογίζεται από τις τιμές του Σχήματος 2.

$$B(920^\circ) = 0.0049(\mu\text{m}^2/\text{h}) \Rightarrow x(45\text{min}) = \sqrt{0.75 * 0.0049} = 0.06\mu\text{m}$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε σύγκριση με την υγρή οξείδωση σε ίδια θερμοκρασία που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4, η ξηρή οξείδωση πάλι αποδεικνύεται πιο αργή τεχνική. Επιπλέον, το σχηματισμένο οξείδιο είναι μικρότερο και από αυτό του Σχήματος 5 (ξηρή οξείδωση σε θερμοκρασία 1050°C) λόγω φυσικά της μειωμένης θερμοκρασίας.

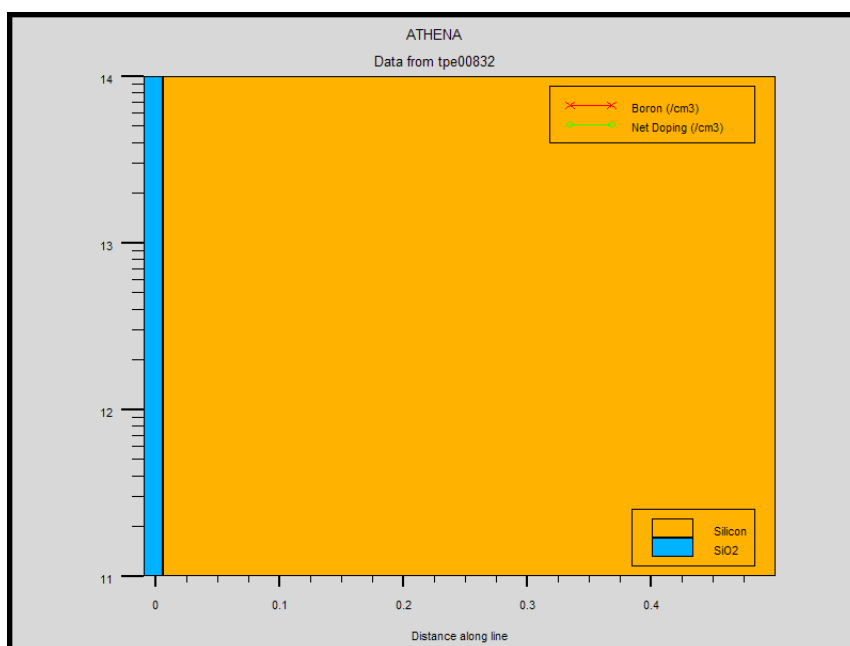


Figure 6: Βάθος Εισχώρησης Οξειδίου στην Ξηρή Οξειδωση, 900°C

Αποτελέσματα Προσομοιώσεων				
Τεχνική	Θερμοκρασία (C)	Βάθος Εισχώρησης (μm)	Πάχος Οξειδίου (μm)	Ποσοστό Οξειδίου μέσα στο Υπόστρωμα
Υγρή Οξειδωση	1050	0.212	0.469	45.2%
	900	0.05	0.113	44.25%
Ξηρή Οξειδωση	1050	0.03	0.067	44.78%
	900	0.006	0.016	37.5%

3.2 Χάραξη Οξειδίου Πύλης

Για τον σχηματισμό μιας πύλης MOSFET είναι απαραίτητος ο σχηματισμός ενός μονωτικού *Οξειδίου Πεδίου (Field Oxide)* γύρω από την περιοχή της πύλης και στην συνέχεια ο σχηματισμός ενός λεπτού οξειδίου, υψηλής πιστότητας για το *Οξείδιο Πύλης (Gate Oxide)*.

Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται συνδυασμός των τεχνικών θερμικής οξείδωσης. Αρχικά γίνεται υγρή οξείδωση του υποστρώματος για την δημιουργία ενός παχύ οξειδίου πεδίου το οποίο στη συνέχεια χαράσσεται στην περιοχή που θα σχηματιστεί η πύλη. Για το σχηματισμό του λεπτού οξειδίου είναι προαφανές από την προηγούμενη θεωρητική και πειραματική ανάλυση ότι θα προτιμηθεί η τεχνική της ξηρής οξείδωσης, σε κατάλληλη θερμοκρασία για το πάχος οξειδίου που επιθυμούμε.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η διαδικασία σχηματισμού οξειδίων πεδίου και πύλης

στο περιβάλλον *Silvaco*. Η ξηρή οξείδωση έχει επιλεγεί στους 1000°C για χρόνο αντίδρασης 20 λεπτά.

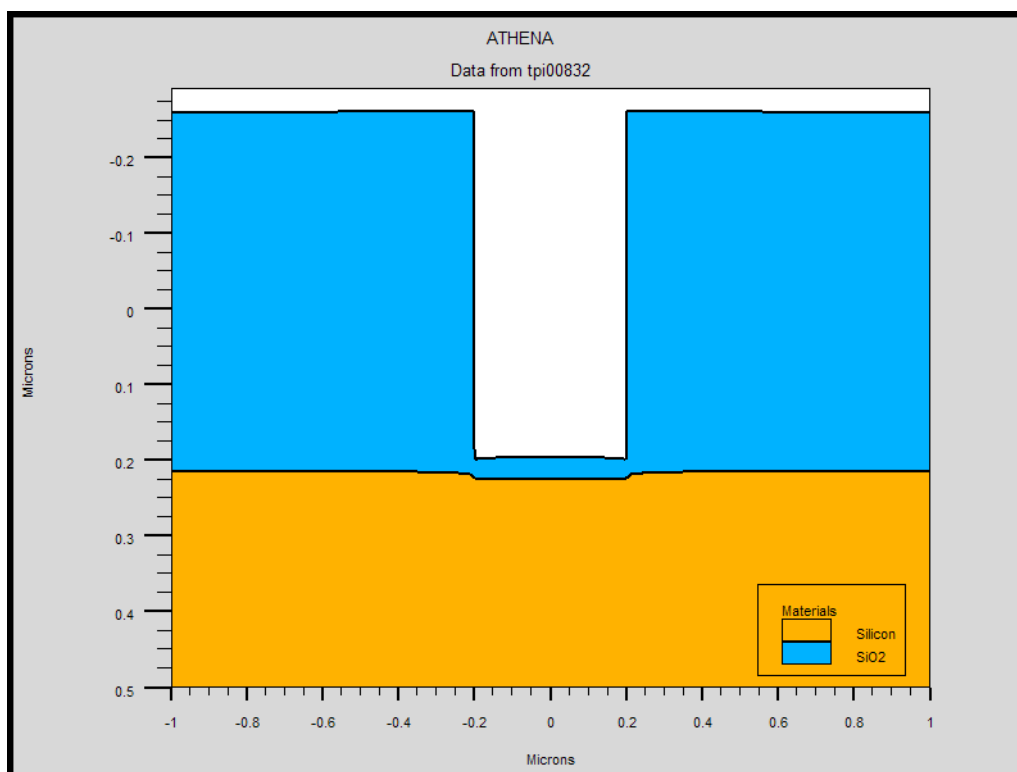


Figure 7: Οξείδιο Πύλης και Οξείδιο Πεδίου με Θερμική Οξείδωση

Από την παραπάνω τεχνική κατασκευής, μετράμε πάχος πύλης $0.027\mu\text{m}$ και συνολικό πάχος οξειδίου $0.473\mu\text{m}$. Αντίθετα, επιλέγοντας θερμοκρασία αντιδραστήριου στους 900°C , μετράμε μια αναμενόμενη μείωση στο πάχος πύλης, στα $0.009\mu\text{m}$ και συνολικό πάχος $0.472\mu\text{m}$.

Είναι φυσικά κατανοητό ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας της ξηρής οξείδωσης θα έχει αμελλητέα επίδραση στο συνολικό πάχος του οξειδίου που κατασκευάζεται - δηλαδή στο πάχος το οξειδίου πεδίου - αλλά αντιθέτως, θα επιρρεάσει σημαντικά το πάχος του οξειδίου πύλης, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τις παραπάνω πειραματικές μετρήσεις.

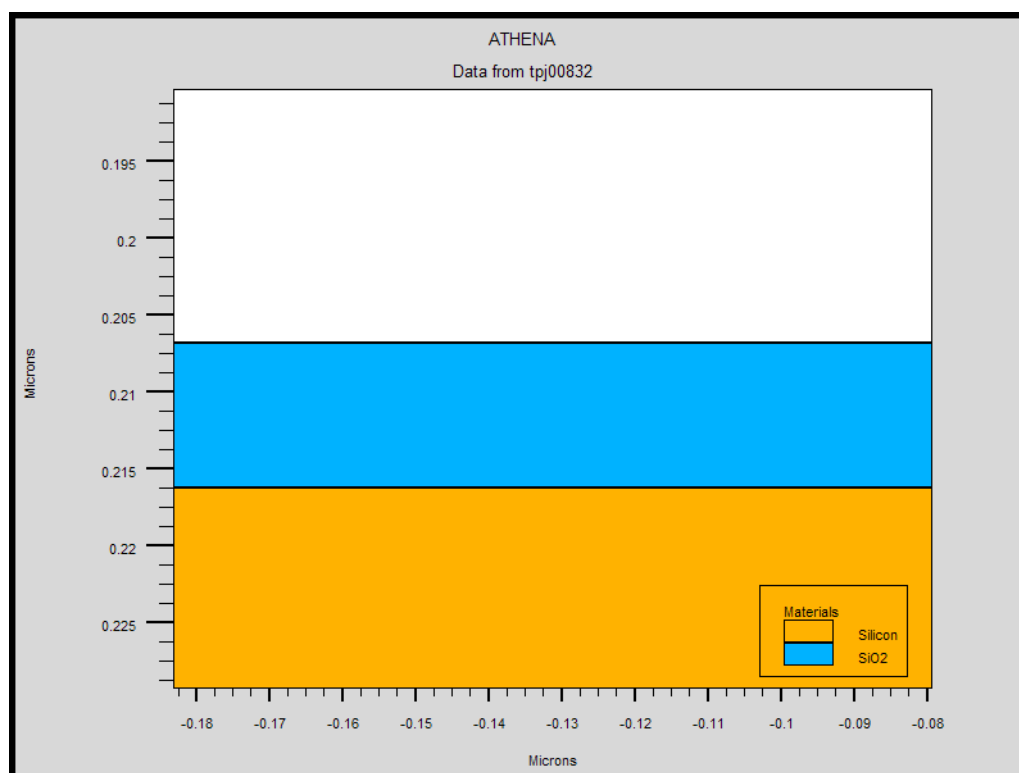


Figure 8: Πάχος Οξειδίου Πύλης με Ξηρή Οξείδωση, 1000°C

References

- [1] A. Grove B. Deal. “General Relationship for the Thermal Oxidation of Silicon”. In: *Journal of Applied Physics* 36.12 (), pp. 3770–3778. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1713945>.
- [2] L. Filipovic. *Topography Simulation of Novel Processing Techniques - Deal-Grove Model*. URL: <http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/filipovic/node31.html>.
- [3] L. Filipovic. *Topography Simulation of Novel Processing Techniques - Kinetics and Growth of Silicon Dioxide*. URL: <http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/filipovic/node29.html>.
- [4] Hurst Gray. “Ανάλυση και Σχεδίαση Αναλογικών Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων, 4η έκδοση”. In: Εκδόσεις Κλειδάριθμος. Chap. 2.2.7. ISBN: 9789604610716.
- [5] D. Harris N. Weste. “Σχεδίαση Ολοκληρωμένων Συστημάτων CMOS VLSI, 4η έκδοση”. In: Εκδόσεις Παπασωτηρίου. Chap. 3.2.4 - 3.2.7. ISBN: 9607182677.