

Προσομοίωση φαινομένου επιφανειακής φόρτισης κατά την εγχάραξη διηλεκτρικών μικροδομών

Γεώργιος Μέμος και Γεώργιος Κόκκορης

Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης & Νανοτεχνολογίας, ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος,
Αγία Παρασκευή 15310

Η τεχνολογία πλάσματος εφαρμόζεται ευρύτατα στον τομέα των διεργασιών κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και μικρομηχανικών συστημάτων. Το πλάσμα δημιουργείται σε ειδικούς αντιδραστήρες με εφαρμογή υψηλής τάσης σε αέριο υπό συνθήκες χαμηλής πίεσης. Από το προκύπτον ηλεκτρικά ουδέτερο μίγμα (ηλεκτρόνια, ιόντα και ουδέτερα σωματίδια), τα ηλεκτρόνια λόγω της μικρής μάζας τους αποκτούν μεγάλη ταχύτητα σε σχέση με τα ιόντα και φτάνουν ταχύτερα στις επιφάνειες του αντιδραστήρα. Από τη διαφορά συγκεντρώσεων ηλεκτρονίων - θετικών ιόντων στη γειτονιά των τοιχωμάτων αναπτύσσεται ηλεκτρικό πεδίο με κατεύθυνση προς τα τοιχώματα, το οποίο μειώνει την απώλεια των ηλεκτρονίων και επιταχύνει τα θετικά ιόντα με αποτέλεσμα η ροή των ιόντων να είναι σχεδόν κάθετη προς τα τοιχώματα.

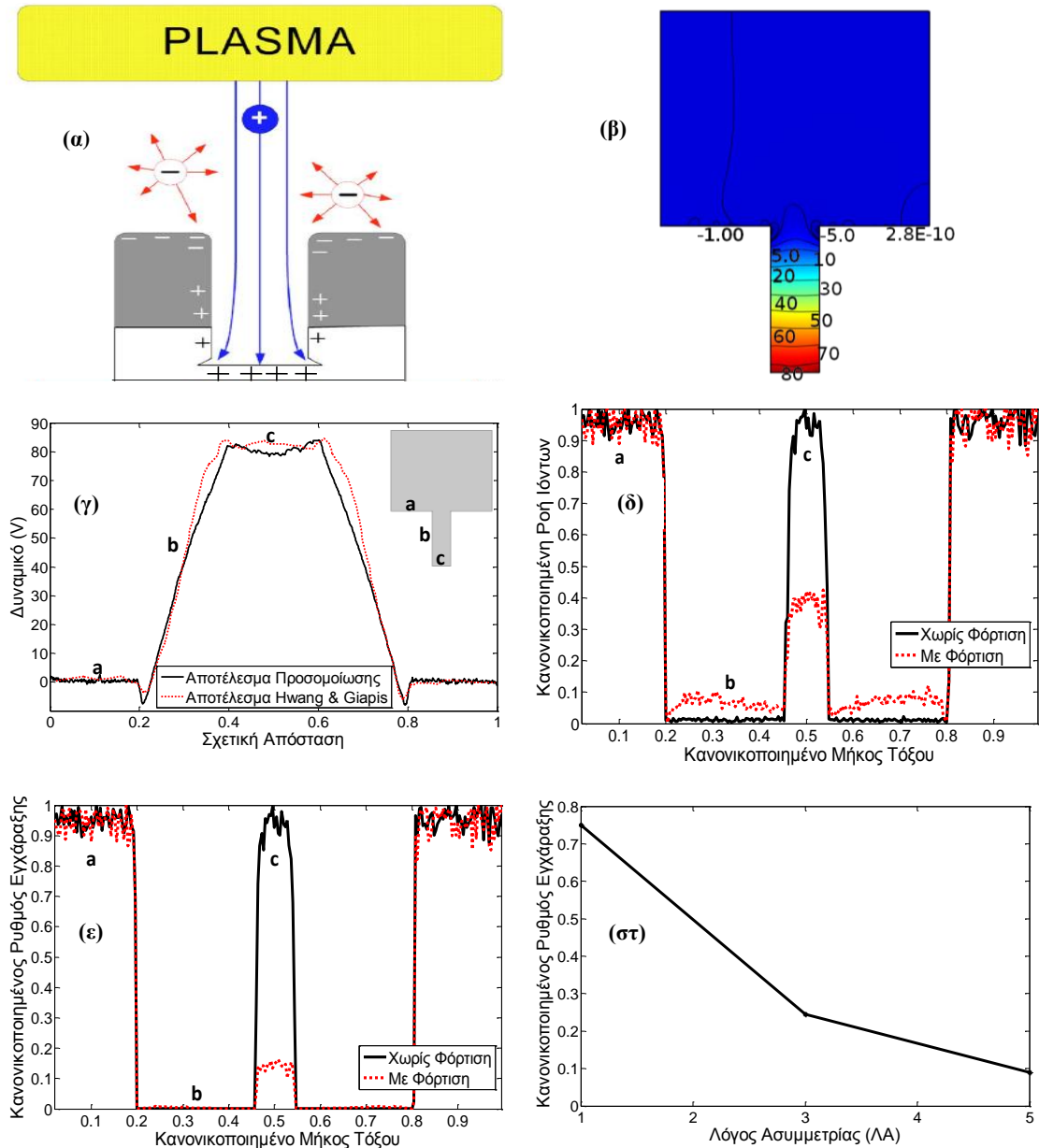
Κατά την εγχάραξη με πλάσμα μικροδομής, π.χ. αυλακιού, από διηλεκτρικό υλικό, η σκίαση της ισοτροπικής ροής των ηλεκτρονίων μειώνει σημαντικά το πλήθος αυτών που φτάνουν στον πυθμένα του αυλακιού. Ταυτόχρονα, λόγω της ανισοτροπίας της ροής τους, τα θετικά ιόντα συσσωρεύονται στον πυθμένα του αυλακιού. Η συσσώρευση θετικού φορτίου στον πυθμένα συνεχίζεται μέχρι το θετικό δυναμικό να μπορεί να απωθεί τον απαιτούμενο αριθμό ιόντων ώστε οι ροές των ηλεκτρονίων και των ιόντων να είναι ίσες. Λόγω της ηλεκτροστατικής απόθησης, τα ιόντα προσπίπτουν στα πλάγια τοιχώματα του αυλακιού (Σχήμα 1α) ή επιστρέφουν στον κύριο όγκο του πλάσματος. Το φαινόμενο αυτό, γνωστό ως φαινόμενο φόρτισης κατά την εγχάραξη μικροδομών μπορεί να οδηγήσει σε αποκλίσεις από το συνήθως επιθυμητό ορθογωνικό προφίλ [1], σε παύση της εγχάραξης ή ακόμα και σε κατάρρευση του διηλεκτρικού.

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται μοντέλο προσομοίωσης του φαινομένου επιφανειακής φόρτισης κατά την εγχάραξη δισδιάστατων (2d) μικροδομών με πλάσμα. Το μοντέλο αποτελείται από 3 υπο-μοντέλα. Στο πρώτο υπο-μοντέλο υπολογίζονται οι τροχιές των ιόντων και των ηλεκτρονίων με την επίλυση των εξισώσεων κίνησης του Νεύτωνα. Στο δεύτερο υπο-μοντέλο υπολογίζεται η επιφανειακή πυκνότητα φορτίου στη μικροδομή. Το τρίτο υπο-μοντέλο περιλαμβάνει τον υπολογισμό του ηλεκτρικού δυναμικού στο εσωτερικό του αυλακιού με την επίλυση της εξίσωσης Poisson. Το δυναμικό αυτό είναι αποτέλεσμα του συσσωρευμένου φορτίου στην επιφάνεια του αυλακιού. Το ηλεκτρικό δυναμικό όχι μόνο επηρεάζεται από το επιφανειακό φορτίο αλλά ταυτόχρονα το επηρεάζει: Η ηλεκτρική δύναμη που απορρέει από το προκύπτον ηλεκτρικό πεδίο επηρεάζει τις τροχιές των φορτισμένων σωματιδίων στο πρώτο υπο-μοντέλο. Η διαδοχική επίλυση των τριών υπο-μοντέλων πραγματοποιείται επανειλημμένα έως ότου επιτευχθεί μόνιμη κατάσταση δηλαδή εξίσωση ροών ιόντων και ηλεκτρονίων στον πυθμένα του αυλακιού. Για την επίλυση της εξίσωσης Poisson χρησιμοποιείται ο εμπορικός κώδικας Comsol και για την επίλυση των εξισώσεων του Νεύτωνα χρησιμοποιείται ο εμπορικός κώδικας Matlab.

Στο Σχήμα 1β φαίνεται το δυναμικό λόγω φόρτισης της επιφάνειας διηλεκτρικού αυλακιού με πλάτος 0.5μm και βάθος 1.5μm. Οι ροές των ιόντων (Ar^+) και των ηλεκτρονίων καθώς και οι κατανομές ενέργειας και κατευθύνσεων προέρχονται από την εργασία των Hwang και Giapis [2]. Στο Σχήμα 1γ φαίνεται το δυναμικό φόρτισης κατά μήκος του προφίλ

του αυλακιού σε σύγκριση με το αποτέλεσμα των Hwang & Giapis. Στα Σχήματα 1δ και 1ε φαίνονται η ροή των ιόντων και ο ρυθμός εγχάραξης κατά μήκος του προφίλ με και χωρίς το φαινόμενο της επιφανειακής φόρτισης. Στο Σχήμα 1στ φαίνεται η μεταβολή του ρυθμού εγχάραξης στο κέντρο του πυθμένα του αυλακιού για διαφορετικούς λόγους ασυμμετρίας (βάθος/πλάτος) του αυλακιού.

Μελετάται η επίδραση διαφόρων παραμέτρων στο φαινόμενο φόρτισης όπως η κατανομή ενέργειας των ιόντων και η ενέργεια των ηλεκτρονίων. Τέλος, εξετάζεται η επίδραση της επιφανειακής φόρτισης στο σχηματισμό και εξέλιξη της τραχύτητας κατά την εγχάραξη διηλεκτρικών/πολυμερικών υμενίων με πλάσμα.



Σχήμα 1. α) Σχηματική παράσταση του φαινομένου φόρτισης. β) Ισοϋψείς του δυναμικού για διηλεκτρικό αυλάκι. γ) Δυναμικό φόρτισης κατά μήκος του προφίλ του αυλακιού σε σύγκριση με το αποτέλεσμα των Hwang & Giapis. δ) Ροή ιόντων κατά μήκος του προφίλ με και χωρίς φόρτιση. ε) Ρυθμός εγχάραξης κατά μήκος του προφίλ με και χωρίς φόρτιση. στ) Ο ρυθμός εγχάραξης στο κέντρο του πυθμένα του αυλακιού συναρτήσει του ΛΑ.

[1] M. Wang and M. J. Kushner, *J. Appl. Phys.* **107**, 023309 (2010).
 [2] G. S. Hwang and K. P. Giapis, *Appl. Phys. Lett.* **71**, 458 (1997).