

ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΝΑΝΟΕΠΑΦΩΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑΣ

B. Κωνσταντούδης¹, V.-K. Murugesan-Kurppuswamy^{1,2} και Ε. Γογγολίδης¹

¹Ινστιτούτο Μικροηλεκτρονικής, ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, 15310 Αγία Παρασκευή, Ελλάδα
²Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα

Περίληψη

Σκοπός της εργασίας είναι να προτείνει μία μεθοδολογία μέτρησης της τραχύτητας των πλευρικών τοιχωμάτων των νανοεπαφών στα τρανζίστορ ολοκληρωμένων κυκλωμάτων με ανάλυση εικόνων κάτοψης από μικροσκόπιο ηλεκτρονικής σάρωσης. Έμφαση δίνεται στον χαρακτηρισμό της κατανομής της τραχύτητας στις διάφορες συχνότητες (Fourier analysis) και στη μελέτη των γωνιακών συσχετίσεων (correlation analysis) ενώ περιγράφεται το μοντέλο των τριών παραμέτρων (τυπική απόκλιση, μήκος συσχέτισης και φράκταλ διάσταση) για τον χαρακτηρισμό της. Επιπλέον διερευνάται η επίδραση των διαφόρων παραγόντων που εμπλέκονται στη μέτρηση στην αβεβαιότητα των μετρούμενων τιμών των παραμέτρων.

Λέξεις-Κλειδιά: Μετρολογία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, οπές επαφής, τραχύτητα, ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης, μήκος συσχέτισης, φράκταλ διάσταση

Abstract

The aim of this study is to propose a methodology for the measurement and characterization of the sidewall roughness of contact holes in integrated circuits through the analysis of top-down images of Scanning Electron Microscopy. Emphasis is given on the spatial and frequency aspects of contact hole roughness through the study of correlation functions and Fourier transforms respectively as well as on the three parameter model (standard deviation, correlation length and fractal dimension) used in roughness characterization. Furthermore, we investigate the effects of factors involved in the measurement process on the precision of the measured parameters.

Keywords: Metrology of integrated circuits, contact holes, roughness, scanning electron microscopy, correlation length, fractal dimension

1. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται έντονη δραστηριότητα στο χώρο της νανοτεχνολογίας λόγω του προφανούς οφέλους σε ενέργεια, πυκνότητα διατάξεων, ταχύτητα λειτουργίας και ποσότητα χρησιμοποιούμενου υλικού. Η κυρίαρχη τεχνολογία που χρησιμοποιεί δομές σε κλίμακα νανομέτρου είναι η κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (ΟΚ) αφού τα τρανζίστορς αλλά και οι υπόλοιπες δομές που ήδη περιλαμβάνονται σε αυτά έχουν διαστάσεις <50nm. Με δεδομένο ότι η λειτουργία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων καθορίζεται από τις διαστάσεις των διατάξεων και δομών τους, κάθε απόκλιση από αυτές είναι κρίσιμη. Κατά συνέπεια η μετρολογία αυτών των αποκλίσεων είναι εξαιρετικού ενδιαφέροντος στην τεχνολογία ΟΚ και αποτελεί τη θεματική περιοχή που κινείται αυτή η εργασία.

Πιο συγκεκριμένα, η εργασία εστιάζει στις αποκλίσεις από τις σχεδιαζόμενες (ονομαστικές) διαστασεις οπών που παίζουν τον ρόλο των αγωγίμων επαφών μεταξύ των διαφόρων επιπέδων λειτουργίας ενός ΟΚ. Το ιδανικό σχήμα των οπών είναι κυλινδρικό

και οι αποκλίσεις μπορεί να έχουν τη μορφή είτε της τραχύτητας της πλευρικής επιφάνειας σε κάθε μία επαφή είτε της στατιστική μεταβολή της διαμέτρου τους σε πολλές οπές. Η τραχύτητα των οπών επαφής έχει ελκύσει πρόσφατα το ερευνητικό ενδιαφέρον αφού δείχθηκε ότι μπορεί είτε να έχει σημαντική επόδραση στην αντίσταση πηγής-αποδέκτη σε ένα τραζίστορ και στο ρεύμα κορεσμού είτε να προκαλεί μείωση της απόστασης επαφής και πύλης σε ένα τρανζίστορ και κατά συνέπεια χρονοεξαρτώμενες διηλεκτρικές εκκενώσεις (Ben et al. 2010, Momonoi et al. 2010, Haberbas et al. 2004)]. Πέρα από τα ολοκληρωμένα κυκλώματα, η πλευρική τραχύτητα νανοεπαφών επηρεάζει επίσης τη λειτουργία των επίπεδων φωτονικών κρυστάλλων (Strasser et al. 2007).

Η παρουσία της τραχύτητας εγείρει συνήθως τρία ζητήματα: Το πρώτο είναι η διερεύνηση των αιτιών και μηχανισμών που την προκαλούν στις διεργασίες κατασκευής και στα χρησιμοποιούμενα υλικά. Το δεύτερο είναι ο μετρολογικός χαρακτηρισμός της είτε με μικροσκοπία είτε με σκεδασιμετρία και το τρίτο έχει να κάνει με τις επιπτώσεις που έχει στη λειτουργία των σχετικών διατάξεων. Σε αυτή την εργασία εστιάζουμε στο δεύτερο ζήτημα και προτείνουμε μία μεθοδολογία μέτρησης και χαρακτηρισμού της τραχύτητας των οπών επαφής όπως και των στατιστικών μεταβολών των διαστάσεών τους με ανάλυση εικόνων κάτοψης ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης. Στον χαρακτηρισμό δίνουμε έμφαση στο φάσμα συχνοτήτων και στις γωνιακές συσχετίσεις της τραχύτητας και συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα για την τραχύτητα γραμμών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πυλών σε ένα τρανζίστορ. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας εικόνες μικροσκοπίου πραγματικών νανοδομών μελετούμε την τοπική και ολική αβεβαιότητα στη μέτρηση της διάστασης των οπών όπως επίσης και την επίδραση της μεγέθυνσης της εικόνας και των παραμέτρων φίλτρου για την μείωση του θορύβου των εικόνων.

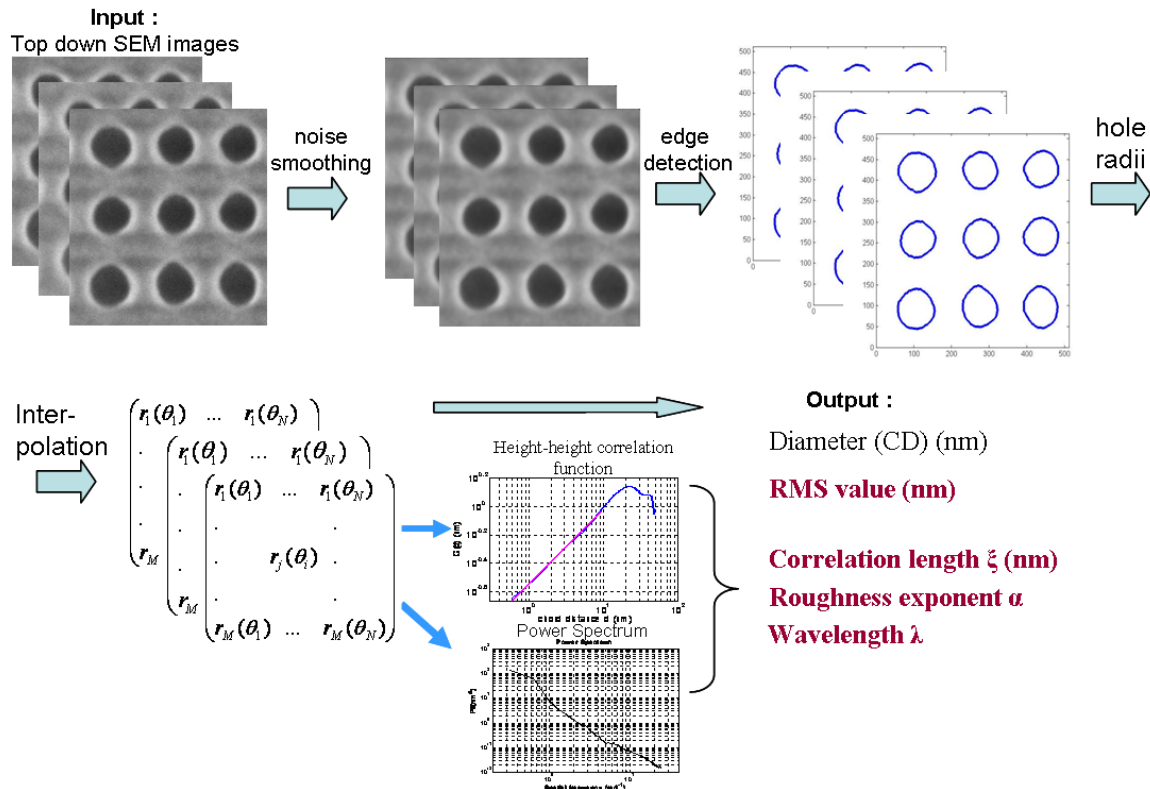
Η εργασία δομείται ως ακολούθως: Στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζουμε τα βασικά βήματα της μεθοδολογίας όπως επίσης και την τυπική συμπεριφορά των φασμάτων ισχύος και της συνάρτησης συσχέτισης διαφοράς υψών. Στην τρίτη παράγραφο, χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία που παρουσιάστηκε προηγουμένως υπολογίζουμε την επίπτωση της κλίμακας στον υπολογισμό της αβεβαιότητας στις μετρούμενες παραμέτρους, ενώ στην τέταρτη παράγραφο εστιάζουμε το ενδιαφέρον μας στην επίδραση των παραμέτρων εξομάλυνσης της εικόνας που πέρνουμε από το μικροσκόπιο. Στην τελευταία εργασία συνοψίζουμε τα βασικά αποτελέσματα της εργασίας μας.

2. Μεθοδολογία μέτρησης τραχύτητας οπών επαφής από εικόνες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης

Η πλευρική τραχύτητα δομών σε νανο και μικροκλίμακα συνήθως παρατηρείται και χαρακτηρίζεται με την ανάλυση εικόνων κάτοψης από ηλεκτρονικά μικροσκόπια σάρωσης. Στην περίπτωση γραμμικών δομών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πυλών σε ένα τρανζίστορ, τα πλευρικά τοιχώματα εμφανίζεται στις εικόνες κάτοψης ως φωτεινές ακμές και η πλευρική τραχύτητα προβάλλεται ως τραχύτητα αυτών των ακμών (απόκλιση από την ευθεία) και για αυτό τον λόγο ονομάζεται τραχύτητα ακμών των γραμμών (Line Edge Roughness, LER). Στην περίπτωση των οπών επαφής, για τους ίδιους λόγους η τραχύτητα (απόκλιση από τον κύκλο) ονομάζεται τραχύτητα ακμών των επαφών (Contact Edge Roughness, CER).

Στη μετρολογία της LER, πέρα από την ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί τεχνικές σκεδασιμετρίας και μέτρησης με τριδιάστατα μικροσκόπια ατομικής δύναμης. Για την CER ωστόσο, η σκεδασιμετρία δεν έχει ακόμη εφαρμοσθεί ενώ τριδιάστατη ατομική μικροσκοπία έχει εφαρμοσθεί μόνο σε μία εργασία για οπές σε φωτονικούς κρυστάλλους (Strasser et al. 2007). Στην εργασία αυτή η CER μετρείται και

χαρακτηρίζεται χρησιμοποιώντας ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (Murugesan-Kuppuswamy et al. 2011, Lee et al. 2005, Vandeweyer et al. 2003)



Σχήμα 1. Διάγραμμα ροής της μεθόδου για χαρακτηρισμό της CER με τα διαδοχικά βήματα ξεκινώντας από μία (ή περισσότερες) εικόνα κάτοψης SEM και καταλήγοντας σε μία σειρά από παραμέτρους και συναρτήσεις που χαρακτηρίζουν την CER. Η μεθοδολογία αυτή έχει υλοποιηθεί στον κώδικα “CERDEMO” που αναπτύχθηκε στο Ινστιτούτο Μικροηλεκτρονικής, ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος.

Τα βήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας παρουσιάζονται σχηματικά στο σχ. 1. Πρώτα, εικόνες κάτοψης ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) λαμβάνονται από διάφορες θέσεις στο δισκίο με τις δομές. Οι εικόνες αυτές μπορεί να περιέχουν μία ή περισσότερες οπές επαφής ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μεγέθυνση στη λήψη τους και την πυκνότητα κατασκευής τους στο δισκίο. Ακολούθως ο θόρυβος της εικόνας απομακρύνεται (ή καλύτερα μειώνεται) εφαρμόζοντας κατάλληλα φίλτρα εξομάλυνσης στη ψηφιακή αναπαράσταση της. Οι ακμές (εσωτερικές) των οπών επαφής εντοπίζονται με τη μέθοδο Otsu (Otsu 1979, Sezgin and Sankur 2003) και οι καρτεσιανές συντεταγμένες των σημείων τους για κάθε μία οπή (εικονοστοιχείων της ψηφιακής εικόνας) προσδιορίζονται και καταγράφονται. Στη συνέχεια, ο κύκλος με την καλύτερη προσαρμογή στα σημεία αυτά ορίζεται ως η ιδανική ακμή της οπής και βρίσκουμε το κέντρο του και την ακτίνα του. Με βάση αυτές μετατρέπουμε τις καρτεσιανές σε πολικές συντεταγμένες σε όλες της επαφές και όλες τις εικόνες. Για την n-th εικόνα, οι ακτίνες των επαφών της μπορούν να αποθηκευθούν σε έναν δισδιάστατο πίνακα A(n) του οποίου η i-th γραμμή περιέχει τις ακτίνες της i-th επαφής, δηλ. το στοιχείο $A_{ij}(n)$ είναι η j-th ακτίνα της i-th επαφής της n-th εικόνας. Το τελικό βήμα της μεθοδολογίας είναι ο υπολογισμός των παραμέτρων και συναρτήσεων χαρακτηρισμού της CER από τα στοιχεία των πινάκων A. Δεδομένου του τυχαίου χαρακτήρα της τραχύτητας είναι απαραίτητη η καλή στατιστική στον υπολογισμό των παραμέτρων, δηλ. ο όσο το δυνατόν μεγαλύτερος αριθμός εικόνων και επαφών που πρέπει να αναλυθούν. Οι σχετικές παράμετροι περιλαμβάνουν την τυπική απόκλιση των σημείων των ακμών επαφής από τον ιδανικό

κύκλο, το μήκος συσχέτισης τους ξ , τον εκθέτη τραχύτητας α (ή ισοδύναμα τη διάσταση φράκταλ d_f), το μήκος κύματος λ αν υπάρχει ενώ οι συναρτήσεις το φάσμα ισχύος (Power Spectrum, PS) (τετράγωνο του πλάτους του μετασχηματισμού Fourier) και τη συνάρτηση συσχέτισης ύψους-ύψους (Height-Height Correlation Function, HHCF).

Όλες αυτές οι παράμετροι υπολογίζονται ως μέσες τιμές πάνω σε όσο το δυνατόν περισσότερες εικόνες και επαφές δεδομένου του τυχαίου χαρακτήρα της τραχύτητας.

3. Φάσμα ισχύος και συνάρτηση συσχέτισεων της CER

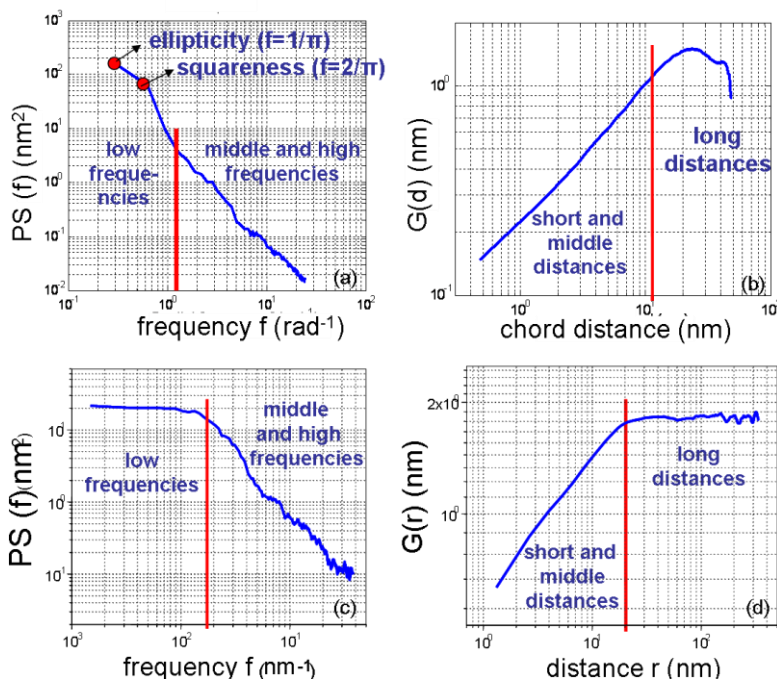
Ο υπολογισμός της συνάρτησης συσχέτισης ύψους-ύψους HHCF και του φάσματος ισχύος PS της CER εγείρει δύο θέματα.

Το πρώτο θέμα ξεκινά από το γεγονός ότι οι ακτίνες των σημείων σε κάθε μία ακμή που προσδιορίζονται με τη μέθοδο της προηγούμενης παραγράφου δεν είναι γωνιακά ομοιόμορφα κατανομημένες ενώ ο υπολογισμός τόσο των PS και HHCF προϋποθέτει την ομοιόμορφη κατανομή (βλ. εξ. 1 παρακάτω). Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, εφαρμόζουμε τεχνικές interpolation και υπολογίζουμε ακτίνες σε ισαπέχουσες γωνίες σε κάθε μία ακμή επαφής (Deeming 1975, Edelson and Krolik 1988).

Το δεύτερο δημιουργείται από τον κυκλικό χαρακτήρα της γωνίας και επηρεάζει κυρίως τον ορισμό της HHCF αλλά και της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης και ιδιαίτερα όταν η τελευταία χρησιμοποιείται στη μοντελοποίηση της CER. Ένας τρόπος για να λυθεί το πρόβλημα αυτό είναι να χρησιμοποιηθεί ως όρισμα της HHCF η χορδή του κύκλου (η απόσταση μεταξύ δύο σημείων της ακμής) αντί της μεταξύ τους γωνίας (Soubeyrand et al. 2008). Κατά συνέπεια, η HHCF ορίζεται ως:

$$G(d_j) = \sqrt{\frac{1}{N-j} \sum_{i=1}^{N-j} (r(\theta_i) - r(\theta_{i+j}))^2} \quad (1)$$

όπου $d_j = 2R \sin(|\theta_i - \theta_{i+j}|/2)$ είναι η χορδή μεταξύ των σημείων i και $i+j$ της ακμής.



Σχήμα 2. Φάσμα ισχύος (PS) (α) και συνάρτηση συσχέτισης ύψους-ύψους (HHCF) (β) της CER των οπών επαφής των εικόνων που αναλύσαμε. Για λόγους σύγκρισης, παρουσιάζουμε τα PS και HHCF (c και d αντίστοιχα) της LER από γραμμές λιθογραφημένες στα 193nm.

Έχουμε εφαρμόσει την παραπάνω μεθοδολογία στον χαρακτηρισμό οπών επαφής που έχουν κατασκευασθεί με λιθογραφία 193nm σε φωτοευαίσθητο πολυμερές με ονομαστική διάμετρο CD=50nm. Αναλύσαμε 25 εικόνες κάτοψης από SEM με κάθε μία να περιέχει 9 οπές επαφής. Το SEM που χρησιμοποιήθηκε ήταν Hitach CG4000 CD-SEM και η λήψη έγινε στα εργαστήρια της IMEC στο Βέλγιο. Ο θόρυβος εικόνας εξομαλύνθηκε εφαρμόζοντας φίλτρο μέσης τιμής (median filter) με παράθυρο 4nm. Στο σχ.2 φαίνονται οι μέσοι όροι των PS (a) και HHCF (b). Για σύγκριση, παρουσιάζουμε επίσης και τυπικά παραδείγματα PS (c) και HHCF (d) εικόνων με LER. Αν και στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες, το φάσμα ισχύος μειώνεται με νόμο δύναμης και στις δύο περιπτώσεις, μία εμφανής διαφορά παρατηρείται στις χαμηλές συχνότητες. Αντί για τον κορεσμό του PS του LER, το CER PS συνεχίζει να αυξάνεται καθώς η συχνότητα μειώνεται δείχνοντας την καθοριστική συμμετοχή των διακυμάνσεων χαμηλής συχνότητας στην CER. Πιο συγκεκριμένα, το σημείο με τη μικρότερη συχνότητα στο PS αντιστοιχεί σε ελλειπτικές αποκλίσεις από την κυκλικότητα ενώ το αμέσως επόμενο σε τετραγωνικές. Αυτό σημαίνει ότι πολλές από τις οπές επαφής που έχουν αναλυθεί έχουν σχήμα έντονα επηρεασμένο από ελλειπτικές ή τετραγωνικές παραμορφώσεις του κύκλου.

Στην HHCF, η επίδραση αυτών των παραμορφώσεων εκδηλώνεται με τη μείωση και τις ταλαντώσεις στις χορδές με μεγάλο μήκος. Έτσι αντί για τον κορεσμό που παρατηρείται στην HHCF του LER (βλ. σχ. 2c) στις CER HHCF έχουμε πτώση της τιμής τους και εμφάνιση ταλαντώσεων (βλ. σχ. 2d).

4. Αβεβαιότητα στη μέτρηση της CER: Συμβολή τοπικών και ολικών συσχετίσεων

Στον υπολογισμό της CER των επαφών ενός δισκίου, οι εικόνες κάτοψης SEM που χρησιμοποιούνται λαμβάνονται συνήθως από διάφορες θέσεις στο δισκίο. Επίσης κάθε μία εικόνα μπορεί να περιέχει πολλές επαφές. Επομένως μπορούμε να ορίσουμε δύο κλίμακες αβεβαιότητας στον υπολογισμό των παραμέτρων CER. Η πρώτη είναι αυτή της εικόνας και ποσοτικοποιείται με την τυπική απόκλιση των παραμέτρων CER των οπών που περιέχονται σε μια εικόνα (τοπική αβεβαιότητα ή αβεβαιότητα κλίμακας εικόνας) ενώ η δεύτερη αναφέρεται στην κλίμακα του δισκίου και χαρακτηρίζεται από την τυπική απόκλιση των μέσων τιμών των παραμέτρων CER που υπολογίζονται σε κάθε μία εικόνα (ολική αβεβαιότητα ή αβεβαιότητα κλίμακας δισκίου).

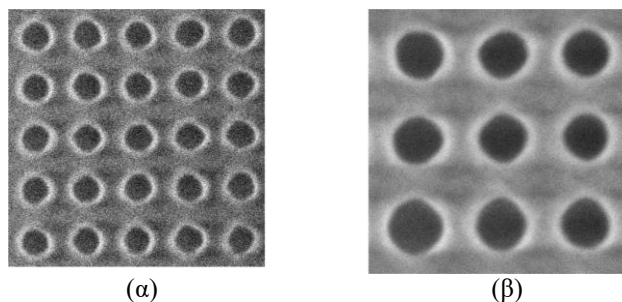
Μπορούμε να υπολογίσουμε τη συμβολή και των δύο αυτών κλιμάκων στην αβεβαιότητα των παραμέτρων CER χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα από την ανάλυση των 25 εικόνων που περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο. Στον Πίνακα 1 δείχνονται τόσο οι τοπικές όσο και οι ολικές αβεβαιότητες της διαμέτρου των οπών CD, της τυπικής απόκλισης σ_{CER} και του μήκους συσχέτισης ξ . Φαίνεται ότι η τοπική αβεβαιότητα είναι ισχυρότερη της ολικής για όλες τις παραμέτρους. Στο ίδιο συμπέρασμα έχουν καταλήξει και αναλύσεις με εικόνες διαφορετικών μεγεθύνσεων και φίλτρα διαφορετικών παραθύρων.

Πίνακας 1. Εκτίμηση των διαφόρων πηγών αβεβαιότητας των διαστατικών (CD) και CER παραμέτρων

Uncertainty	CD (nm)	σ_{CER} (nm)	ξ (nm)
Local (image-scale) variations	2.05	0.26	1.74
Global (wafer-scale) variations	1.02	0.12	0.74
Image magnification effects (S=8nm)	1.52	0.24	1.56
Noise smoothing effects	0.87	0.08	0.64

5. Επίδραση της μεγέθυνσης των εικόνων και του φίλτρου εξομάλυνσης του θορύβου τους στις παραμέτρους CER

Η λήψη εικόνων κάτοψης ηλεκτρονικής μικροσκοπίας απαιτεί τη ρύθμιση πολλών παραμέτρων του SEM. Μία από τις σημαντικότερες είναι το εμβαδόν της περιοχής που γίνεται η μέτρηση το οποίο εξαρτάται κυρίως από τη μεγέθυνση που χρησιμοποιείται. Επιπλέον, όπως τονίστηκε στην περιγραφή της μεθοδολογίας στην παράγραφο 2, μετά τη λήψη της εικόνας και πριν την ανάλυσή της εφαρμόζεται κατάλληλο φίλτρο για την εξομάλυνση του θορύβου ώστε να είναι δυνατή η ανίχνευση και εντοπισμός των ακμών των επαφών. Σε αυτή την παράγραφο θα μελετήσουμε την επίδραση τόσο της μεγέθυνσης όσο και της παραμέτρου εξομάλυνσης του θορύβου στις παραμέτρους CER και στο φάσμα ισχύος της. Για τον σκοπό αυτό, αναλύσαμε δύο σύνολα με 25 εικόνες SEM το καθένα που ελήφθησαν από το ίδιο δισκίο και τις ίδιες θέσεις αλλά με διαφορετική μεγέθυνση. Οι οπές επαφές έχουν σχηματισθεί με λιθογραφία 193nm σε ένα κατάλληλο φωτοπολυμερές και η ονομαστική διάμετρός τους είναι $CD=50nm$. Στο πρώτο σύνολο (βλ. εικόνα 3α), κάθε εικόνα περιέχει 25 οπές και το συνολικό εμβαδόν της είναι $450X450nm^2$. Το δεύτερο σύνολο έχει εικόνες με μεγαλύτερη μεγέθυνση και περιέχει 9 επαφές. Το εμβαδόν κάθε εικόνας είναι $270X270nm^2$. Όλες οι εικόνες έχουν $512X512$ εικονοστοιχεία και κατά συνέπεια η πλευρά του εικονοστοιχείου στη χαμηλή μεγέθυνση είναι $0.89nm$ ενώ στην υψηλή $0.53nm$. Όλες οι εικόνες έχουν αναλυθεί εφαρμόζοντας φίλτρο εξομάλυνσης θορύβου με παράθυρο μεταβλητής διάστασης S . Τα αποτελέσματα για τον εκθέτη τραχύτητας δεν παρουσιάζονται επειδή η αύξηση της HHCF με νόμο δύναμης στα μικρά μήκη χορδών παραβιάζεται για πολλές τιμές της παραμέτρου S .

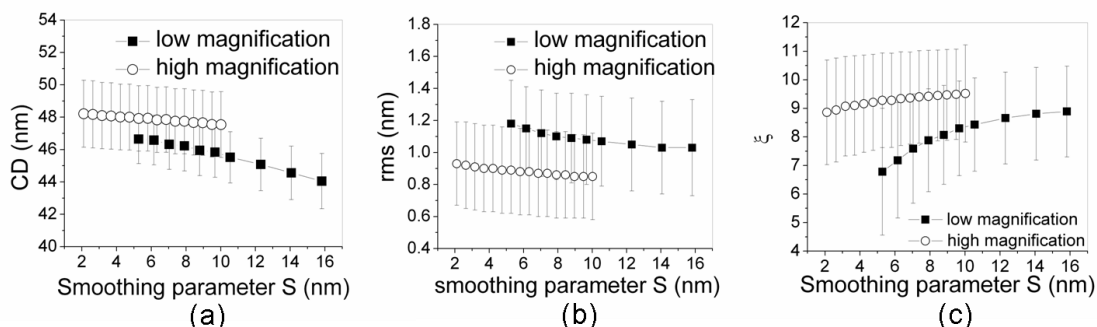


Σχήμα 3. Παραδείγματα εικόνων κάτοψης από SEM με μικρή (α) και μεγάλη μεγέθυνση (β)

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 4. Τα διαστήματα αβεβαιότητας που δείχνονται αντιστοιχούν στις τοπικές τυπικές αποκλίσεις των τιμών των παραμέτρων σε κάθε μια εικόνα. Το πρώτο εύρημα είναι ότι εικόνες με μεγάλη μεγέθυνση έχουν υψηλότερο CD και μήκος συσχέτισης και μικρότερο rms για όλες τις τιμές της παραμέτρου S . Για καλύτερη κατανόηση αυτού του ευρήματος, υπολογίζουμε το φάσμα ισχύος της CER και για τις δύο μεγεθύνσεις όταν $S=8nm$ (βλ. σχ.5). Αναμενόμενα, οι εικόνες με μεγάλη μεγέθυνση έχουν μεγαλύτερο PS στις υψηλές συχνότητες. Ωστόσο, σε ένα ευρύ φάσμα μεσαίων συχνοτήτων η σειρά αντιστρέφεται και το PS των εικόνων με μικρότερη μεγέθυνση γίνεται μεγαλύτερο. Αυτή η αντιστροφή εξηγεί την μεγαλύτερη τιμή της τυπικής απόκλισης σ_{CER} στις εικόνες μικρής μεγέθυνσης. Η διαφορά στο μήκος συσχέτισης μπορεί να συσχετίζεται με τη δεύτερη τομή των PS στις χαμηλές συχνότητες που έχει ως συνέπεια το PS της μεγάλης μεγέθυνσης να γίνεται πάλι μεγαλύτερο που σημαίνει ότι ελλειπτικές και τετραγωνικές αποκλίσεις από την τέλεια κυκλικότητα είναι πιο έντονες στη μεγάλη μεγέθυνση.

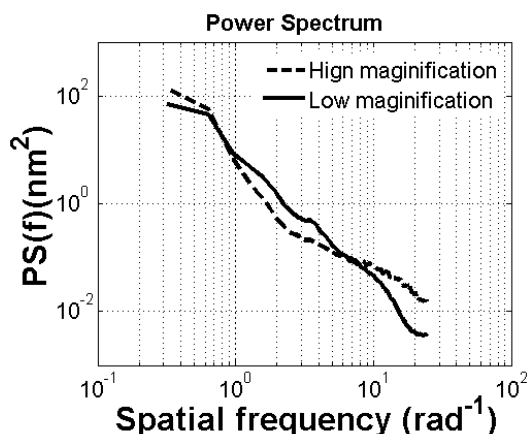
Το σχήμα 4 δείχνει επίσης την επίδραση της παραμέτρου εξομάλυνσης θορύβου S . Και για τις δύο μεγεθύνσεις τα αποτελέσματα δείχνουν ότι εκτεταμένη εξομάλυνση του θορύβου οδηγεί σε μείωση του CD και του σ_{CER} αλλά αύξηση του ξ . Επιπλέον οι εικόνες

μεγάλης μεγέθυνσης φαίνεται να είναι λιγότερο ευαίσθητες στην εξομάλυνση του θορύβου και άρα και στην παρουσία του.



Σχήμα 4. Εξάρτηση της διαμέτρου των οπών επαφής (CD) και των παραμέτρων CER rms και ξ από την παράμετρο εξομάλυνσης θορύβου S για τις δύο διαφορετικές μεγεθύνσεις.

Τέλος, συγκρίνουμε την επίδραση της μεγέθυνσης και του θορύβου στην τοπική αβεβαιότητα των υπολογισμένων παραμέτρων. Η σύγκριση φαίνεται στις δύο τελευταίες γραμμές του Πίνακα 1, με την τρίτη να περιέχει τις διαφορές των παραμέτρων μεταξύ των δύο μεγεθύνσεων για $S=8\text{nm}$ και η τέταρτη τις διαφορές της μικρότερης από τη μεγαλύτερη τιμή σε όλο το φάσμα του S . Για τις εικόνες που αναλύσαμε σε αυτή την εργασία, φαίνεται ότι οι τοπικές μεταβολές έχουν οριακά μεγαλύτερη συμβολή στην αβεβαιότητα των CER παραμέτρων από τη μεγέθυνση ενώ η επίδραση του θορύβου είναι καθαρά μικρότερη.



Σχήμα 5. Φάσμα ισχύος (PS) για τις εικόνες μικρής και μεγάλης μεγέθυνσης

6. Συμπεράσματα

Σε αυτή την εργασία παρουσιάσαμε μία μεθοδολογία για το χαρακτηρισμό της τραχύτητας οπών επαφής που βασίζεται στην ανάλυση εικόνων κάτοψης ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης και στη συνέχεια συζητήσαμε θέματα σχετικά με τον υπολογισμό του φάσματος ισχύος και της συνάρτησης συσχέτισης αυτής της τραχύτητας. Επίσης εφαρμόσαμε τη μεθοδολογία σε εικόνες πραγματικών δομών σε νανοκλίμακα και υπολογίσαμε τις επιπτώσεις της μεγέθυνσης της εικόνας και της εξομάλυνσης του θορύβου στη διάμετρο και τις παραμέτρους τραχύτητας όπως και αυτές των τοπικών (σε κλίμακα εικόνας) και ολικών (σε κλίμακα δισκίου) μεταβολών και αβεβαιοτήτων. Βρέθηκε ότι οι τοπικές μεταβολές είναι η σημαντικότερη πηγή αβεβαιότητας στον υπολογισμό των παραμέτρων με δεύτερη την μεγέθυνση και τελευταία την παρουσία του θορύβου.

References

- Y. Ben, Y. Ma, H.J. Levinson, J. Kye, D.Z. Pan, Proc. SPIE 7641 (2010) 76410D-1.
- T.J. Deeming, *Astrophys. Space Sci.* 36 (1975) 137–158.
- R.A. Edelson, J.H. Krolik, *Astrophysical. J.* 333 (1988) 646.
- A. Habermas, O. Lu, D. Chase-Colin, M. Har-Zvi, Aviram and O. Sagi, Proc. of SPIE Vol. 5375, (2004) 337–345.
- T.Y. Lee, D. Ihm, H. Cheon Kang, J.B. Lee, B.H. Lee, S.B. Chin, D.H. Cho, Proc. SPIE 5752 (2005) 516–526.
- Y. Momonoi, T. Osabe, A. Yamaguchi, E. McLellen Martin, H. Koyanagi, M.E. Colburn, K. Torii, Proc. SPIE 7638 (2010) 76380Q-1.
- V.-K. Murugesan-Kuppuswamy, V. Constantoudis, E. Gogolides, *Microelectron. Eng.* 88 (2011) 2492–2495.
- N. Otsu, *IEEE Trans. Sys. Man. Cyber* 9 (1979) 62–66.
- P. Strasser, F. Robin, C.F. Carlstrom, R. Wuest, R. Kappeler, H. Jackel, *Nanotechnology* 18 (2007) 405703.
- M. Sezgin, B. Sankur, *J. Electron. Imaging* 13 (2003) 146–165.
- S. Soubeyrand, J. Enjalbert, I. Sache, *Theor. Popul. Biol.* 73 (2008) 92–103.
- T. Vandeweyer, M. Maenhoudt, J-F. de Marneffe and P. Dirksen, in: Proc. Interface 2003.