ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΝΑΝΟΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΚΜΩΝ ΛΙΘΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

Β. Κωνσταντούδης [1,2], Γ. Παπαβιέρος[1,2,4], Ε. Γογγολίδης[1,2], Gian Lorusso[3], Vito Rutigliani[3], Frieda Van Roey[3]
[1]Institute of Nanoscience and Nanotechnology, N.C.S.R. Demokritos, Agia Paraskevi, Greece
[2] Nanometrisis p.c., Agia Paraskevi, Greece
[3]IMEC, Kapeldreef 75, B-3001 Leuven, Belgium
[4]Physics Department, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki 4124, Greece
e-mail: v.constantoudis@inn.demokritos.gr

Περίληψη

Στην εργασία αυτή αρχικά περιγράφουμε το πρόβλημα της μετρολογίας της τραχύτητας ακμών γραμμικών νανοδομών (Line Edge Roughness, LER) και αναδεικνύουμε την εξέχουσα σημασία του στη σύγχρονή βιομηχανία ημιαγωγών αλλά και τις προκλήσεις που θέτει σε θέματα ακρίβειας και πληρότητας.
Στη συνέχεια, εστιάζουμε σε δύο προβλήματα που έχουν προκύψει από τις πρόσφατες εξελίξεις στο χώρο της νανοηλεκτρονικής και νανολιθογραφίας. Το πρώτο είναι η επίδραση του θορύβου της μέτρησης στις παραμέτρους χαρακτηρισμού του LER ιδιαίτερα σε αυτές που είναι ευαίσθητες στις υψηλές συχνότητες της τραχύτητας των ακμών. Παρουσιάζεται και διερευνάται υπολογιστική μέθοδος ανάλυσης των ακμών που βασίζεται στον μετασχηματισμό ισχύος του LER για τον υπολογισμό της επίδρασης του θορύβου της μέτρησης και της αφαίρεσης της ώστε να μετρηθεί το LER χωρίς τη συμμετοχή του θορύβου. Το δεύτερο πρόβλημα αφορά τη μέτρηση των συσχετίσεων της τραχύτητας γειτονικών ακμών δεδομένης της εξαιρετικά μεγάλης πυκνότητας των νανοδομών στα τρέχοντα και σχεδιαζόμενα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Και στα δύο προβλήματα, η προτεινόμενη μεθοδολογία θα εφαρμοσθεί στον χαρακτηρισμό πραγματικών λιθογραφικών νανοδομών με χαρακτηριστικές διαστάσεις <30nm. Έμφαση θα δοθεί στις επιπτώσεις που έχει στον ρόλο του θορύβου στη μέτρηση του LER, η μεταφορά του σχήματος από το υμένιο του φωτοπολυμερούς στα υποκείμενα στρώματα.

Λέξεις-Κλειδιά: νανομετρολογία, τραχύτητα, λιθογραφία, ολοκληρωμένα κυκλώματα.

Abstract

In this work, we introduce the metrology of Line Edge Roughness (LER) and highlight its outstanding importance in the modern semiconductor industry along with the main challenges it should cope with in accuracy and completeness issues.
Then we focus on two problems that have arisen from recent developments in nanoelectronics and nanolithography. The first is the effects of measurement noise on LER parameters and especially to those which are sensitive to high frequency LER. We propose and elaborate a method for noise-free LER measurement based on the power spectrum of LER which can be used to separate and then reduce noise effects from LER. The second problem concerns the characterization of the cross correlations between the LER of adjacent edges and lines given the extremely high density of nanostructured lines in the current and future integrated circuits. In both problems, the proposed methodology is applied in the characterization of real lithographic nanostructures with characteristic dimensions <30nm.

Emphasis will be paid on the effect of pattern transfer from the photopolymer film to the underlying layers during the etching proccess.

Keywords: nanometology, roughness, lithography, integrated circuits.

1. Εισαγωγή

Οι λιθογραφικές γραμμές είναι οι πρώτες δομές που σχηματοποιούνται σε υμένια φωτοπολυμερών στην μακριά αλυσίδα των διεργασιών κατασκευής των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Για αυτό το λόγο, ο έλεγχος των διαστάσεών τους στην κλίμακα των νανομέτρων είναι εξαιρετικά κρίσιμος για να εξασφαλισθεί η απρόσκοπτη λειτουργία του κυκλώματος.
Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα σε αυτές τις δομές είναι η πλευρική τραχύτητα των τοιχωμάτων της αφού αλλοιώνει την ομοιομορφία των διαστάσεων των κατασκευαζόμενων δομών και υπονομεύει την αξιόπιστη ηλεκτρική συμπεριφορά τους. Οι δομές αυτές συνήθως απεικονίζονται με ηλεκτρονική μικροσκοπία σε εικόνες κάτοψης στις οποίες η πλευρική τους τραχύτητα φαίνεται ως τραχύτητα της ακμής που ορίζει την περιοχή της γραμμής. Κατά συνέπεια, η μέτρησή της πλευρικής τραχύτητας μπορεί να γίνει με τη μέτρηση της τραχύτητας αυτής της ακμής στις εικόνες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας. Στην ορολογία της επιστήμης και τεχνολογίας των ημιαγωγών, αυτή η τραχύτητα έχει κωδικοποιηθεί ως Τραχύτητα Ακμής Γραμμών (Line Edge Roughness, LER) και θεωρείται ένα από τα πιο σημαντικά εμπόδια στην αξιόπιστη απόδοση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων της επόμενης γενιάς. Ο λόγος είναι ότι προκαλεί μία ποικιλία από επιμέρους προβλήματα όπως τοπική μεταβλητότητα του μήκους των τρανζίστορ, διαρροή ρεύματος εκτός λειτουργίας αλλά και απορρύθμιση του χρονισμού στη λειτουργία του κυκλώματος.
Για να αξιολογηθεί ωστόσο η επιβλαβής επίδραση του LER συγκεκριμένης γραμμικής νανοδομής πρέπει πρώτα να είμαστε σε θέση να μετρήσουμε και χαρακτηρίσουμε ποσοτικά το LER.
Όμως αυτό δεν είναι εύκολο και υπάρχουν τουλάχιστον τρεις λόγοι που καθιστούν τη μετρολογία LER μια δύσκολη και εξαιρετικά απαιτητική εργασία. Δεν αποτελεί έκπληξη ότι αυτοί οι λόγοι ταιριάζουν καλά στους τρεις όρους του ακρωνύμιου LER, δηλαδή Line, Edge και Roughness.
Ξεκινώντας από τον τελευταίο (τραχύτητα), υπογραμμίζουμε ότι το LER είναι στην πραγματικότητα ένα είδος τραχύτητας που σχετίζεται με την τραχύτητα του πλευρικού τοιχώματος των δομών γραμμής. Γνωρίζουμε ότι ακόμη και η μετρολογία της τραχύτητας οριζόντιων επιφανειών ή και των απλών προφίλ δεν είναι εύκολη λόγω της εγγενούς στοχαστικότητας (συνύπαρξη τυχαιότητας με συσχετίσεις και κανονικότητα) και της ανάπτυξής της σε πολλαπλές κλίμακες. Στη βιβλιογραφία μπορεί κανείς να βρει έναν μεγάλο αριθμό εργασιών που προτείνουν μεθόδους για τη μέτρηση και τον χαρακτηρισμό της τραχύτητας της επιφάνειας προσπαθώντας να καταγράψουν τις βασικές παραμέτρους και συναρτήσεις ανάλογα με την κάθε περίπτωση και εφαρμογή [Whitehouse 2002, Leach 2013]. Παρόλο που μια συστηματική αξιολόγηση και κατηγοριοποίηση αυτών των παραμέτρων μπορεί να βρεθεί στο πρόσφατα πρότυπο ISO για την τραχύτητα του προφίλ και της επιφανείας [ISO 1996, ISO 2016], εξακολουθούν να υπάρχουν αρκετές εργασίες σχετικά με τον χαρακτηρισμό τραχύτητας, ιδίως σε νανομετρική κλίμακα, όπου προκύπτουν νέες πτυχές της που απαιτούν νέες προσεγγίσεις. Το LER είναι ένα είδος τραχύτητας που κληρονομεί τα προβλήματα πολυπλοκότητας και των πολλαπλών κλιμάκων ανάπτυξης και απαιτεί προηγμένες μεθόδους για τον πλήρη χαρακτηρισμό του (πλήρης μετρολογία LER).

Ο δεύτερος όρος (άκρη) υπενθυμίζει ότι το LER ουσιαστικά δημιουργείται από την απεικόνιση στην εικόνα της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM). Το LER στην πραγματικότητα δεν υπάρχει ως φυσική οντότητα. Αυτό που υπάρχει είναι οι γραμμές των οποίων τα πλευρικά τοιχώματα (που συχνά δεν είναι καλά καθορισμένα) παρουσιάζουν κάποιο είδος τραχύτητας. Η άκρη που υπονοείται από τον όρο LER δημιουργείται όταν αυτή η 3D δομή απεικονιστεί με SEM σε μια εικόνα κάτοψης. Με άλλα λόγια, το LER είναι ένα αποτέλεσμα της απεικόνισης SEM που προβάλλει μία γραμμική δομή 3D σε ένα 2D σχήμα στην εικόνα κάτοψης του οποίου τα όρια έχουν τη μορφή φωτεινών ακμών. Ωστόσο, η διαδικασία απεικόνισης συνοδεύεται πάντα από θόρυβο που προέρχεται από τους μηχανισμούς απεικόνισης και τα ηλεκτρονικά του μικροσκοπίου που χρησιμοποιούνται στον σχηματισμό της ψηφιοποιημένης εικόνας. Επομένως, το γεγονός ότι μελετούμε ένα είδος τραχύτητας άκρων στο LER εγείρει το ζήτημα των επιπτώσεων του θορύβου στη μέτρησή του και την ανάγκη για μια μετρολογία LER απελευθερωμένη από αυτές τις επιπτώσεις.

Ο πρώτος όρος (γραμμή) μας λέει απλά ότι το LER δεν μπορεί να υπάρχει απομονωμένο. Οι γραμμές έχουν δύο κάθετα πλευρικά τοιχώματα και συνεπώς έχουμε πάντα LER σε ζευγάρια (αριστερά και δεξιά). Αυτό εγείρει το ασυνήθιστο στις μελέτες τραχύτητας θέμα των συσχετισμών μεταξύ της τραχύτητας δύο άκρων. Επίσης, και το πιο σημαντικό, οι γραμμές τοποθετούνται σε δομές γραμμής / διαστήματος και επομένως το LER των πλευρικών τοιχωμάτων είναι διατεταγμένο στο χώρο σε συγκεκριμένες αποστάσεις που ορίζονται από την πλάτος της γραμμής και την περίοδο της δομής. Όταν αυτά τα δύο είναι αρκετά μικρά, η εγγύτητα των γραμμών και των ακμών δημιουργεί το ζήτημα των συσχετίσεων μεταξύ των LER των γειτονικών ακμών που όσο μικραίνουν οι διαστάσεις και πυκνώνουν οι δομές γίνονται όλο και πιο έντονες. Αυτό οδηγεί στο ζήτημα της μέτρησης και του χαρακτηρισμού αυτών των εγκάρσιων ως προς την κατεύθυνση των γραμμών συσχετίσεων που θα συμπληρώσει την μετρολογία του LER.

Από τα παραπάνω τρία θέματα της μετρολογίας LER (πληρότητα, φαινόμενα θορύβου και συσχετίσεις) το ζήτημα της πληρότητας αντιμετώπιστηκε πρώτο και οι σχετικές έρευνες πρότειναν μια πλουσιότερη προσέγγιση χαρακτηρισμού του LER επιπλέον της ευρέως χρησιμοποιούμενης τιμής rms ή sigma της τυπικής απόκλισης των σημείων της ακμής. Αυτή ουσιαστικά περιλαμβάνει το μοντέλο των τριών παραμέτρων που προσθέτει στο rms, το μήκος συσχέτισης και τον εκθέτη τραχύτητας όπως επίσης και τη φασματική πυκνότητα ισχύος τις συναρτήσεις συσχέτισης του LER που ποσοτικοποιούν το συχνοτικό περιεχόμενο και τις συσχετίσεις των σημείων της ακμής αντίστοιχα [Bunday et al. 2003, Constantoudis et al. 2004, Yamaguchi et al. 2003]. Επίσης, σε αυτό μπορούν να προστεθούν οι πρόσφατες μελέτες πολυμορφοκλασματικής ανάλυσης LER ή άλλων που εμπνέονται από την ανάλυση σήματος όπως κρυφά μοντέλα Markov ή προσεγγίσεις δικτύου και μεθόδων μηχανικής μάθησης [Constantoudis et al. 2018]. Το ζήτημα της ακρίβειας και των επιπτώσεων του θορύβου απασχόλησε επίσης τη σχετική ερευνητική κοινότητα και αρκετές μέθοδοι προσπάθησαν να παράσχουν μετρήσεις LER χωρίς θόρυβο [Villarrubia et al. 2005, Constantoudis and Pargon 2013, Hiraiwa and Nishida 2011, Lorusso et al. 2018, Levi et al. 2016]. Πρόσφατα, προτάθηκε μια μέθοδος βασίζεται στη φασματική ανάλυση ισχύος (Power Specral Density, PSD) και τη συνάρτηση συσχέτισης υψους-ύψους (Height-Height Correlation Function, HHCF), όπου το αποτύπωμα του θορύβου μπορεί να διαχωριστεί και να αφαιρεθεί. Το τρίτο ζήτημα των εγκάρσιων συσχετίσεων των τραχυτήτων γειτονικών ακμών ήλθε στο προσκήνιο πρόσφατα κυρίως από εναλλακτικές λιθογραφίες όπως το DSA και το SAQP όπου οι κοντινές γραμμές ταλαντεύονται με παρόμοιο τρόπο αλλά και από τη συνεχιζόμενη αύξηση της πυκνότητας των δομών. Προκειμένου να χαρακτηριστεί η διάδοση των συσχετίσεων μεταξύ άκρων και γραμμών, προτάθηκε η νέα συνάρτηση

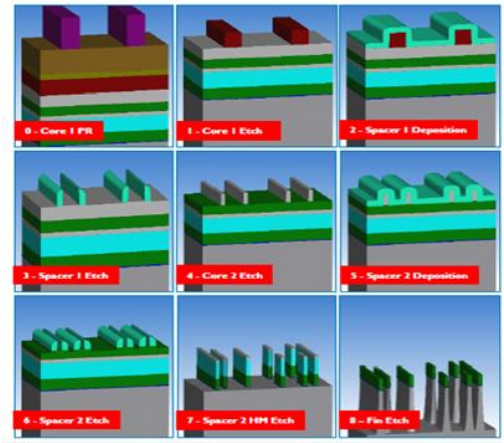
εγκάρσιων συσχετίσεων μεταξύ της τραχύτητας ακμών κοντινών γραμμών πέραν του απλού παράγοντα c που ποσοτικοποιεί την ομοιότητα του LER μεταξύ των αριστερών και δεξιών άκμών [Constantoudis et al. 2017, Ruiz et al. 2017].

Σκοπός του παρούσης εργασίας είναι να επικεντρωθούμε στα δύο τελευταία ζητήματα των επιπτώσεων του θορύβου και των εγκάρσιων συσχετίσεων και να εφαρμόσουμε τις προτεινόμενες καινοτόμες μεθόδους για να διερευνήσουμε τις επιπτώσεις της διεργασίας εγχάραξης στη μεταφορά της δομής στα υποκείμενα στρώματα στο LER στα εννέα βήματα μίας λιθογραφίας Self Aligned Quadruple Patterning (SAQP). Προχωρώντας ένα ακόμη βήμα, θα χρησιμοποιήσουμε αυτά τα αποτελέσματα για να επιστρέψουμε στις μεθόδους μετρολογίας για να κατανοήσουμε αυτά τα βαθύτερα και να δώσουμε κάποιες συμβουλές για πιθανές βελτιώσεις της μεθόδου. Αυτό γίνεται σε ένα πλαίσιο συνέργειας μεταξύ της μετρολογίας και των επιπτώσεων της διεργασίας, όπου το ένα παρακινεί τη βελτίωση του δεύτερου σε έναν κύκλο θετικό ανάδρασης.

Η εργασία μας οργανώνεται ως εξής: η επόμενη ενότητα περιγράφει σύντομα τα πειραματικά δεδομένα ενώ η τρίτη (παράγραφος 3) είναι αφιερωμένη στο ζήτημα των επιπτώσεων του θορύβου και της ακρίβειας LER μαζί με το ρόλο της εγχάραξης και άλλων βημάτων στη συνεισφορά του θορύβου στο LER. Στην τέταρτη παράγραφο, το ενδιαφέρον μας θα μετατοπιστεί στο ζήτημα των εγκάρσιων συσχετίσεων μεταξύ γραμμών και των αποτελεσμάτων της μεταφοράς σχήματος με εγχάραξη σε αυτές. Η εργασία θα συνοψίσει τα βασικά της συμπεράσματα στην τελευταία παράγραφο 5.

2. Πειραματικά δεδομένα

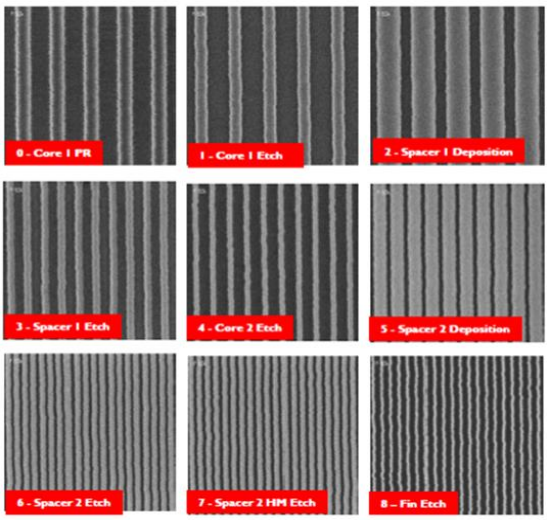
Τα νανοδομές γραμμής / διαστήματος που χρησιμοποιήσαμε σε αυτή την εργασία για να μελετήσουμε τα φαινόμενα θορύβου και εγκάρσιων συσχετίσεων προέρχονται από μια σειρά εννέα σταδίων μιας διαδικασίας λιθογραφίας SAQP [Lorusso et al. 2016]. Μια σχηματική αναπαράσταση των δομών στα διαφορετικά βήματα της διαδικασίας παρουσιάζεται στο σχήμα 1 μαζί με την εξήγησή τους σε σχέση με την αρχική στοίβα.



Σχήμα 1. Σχηματική απεικόνιση των διαδοχικών βημάτων μιας διαδικασίας SAQP α) Λιθογραφική σχηματοποίηση της δομής γραμμών/διαστημάτων, β) Μεταφορά της δομής με εγχάραξη, γ) Απόθεση δεύτερου πολυμερούς, δ) Εγχάραξη και διπλασιασμός της πυκνότητας, ε) , στ) Δεύτερη διαδικασία εναπόθεσης διαχωριστή, ζ) Εγχάραξη διαχωριστή και δεύτερος διπλασιασμός της πυκνότητας, η) Εγχάραξη της σκληρής μάσκας και περαιτέρω μεταφορά της δομής, ί) Εγχάραξη και τελική διαμόρφωση της δομής.

Στο Σχήμα 2, δείχνουμε τυπικές εικόνες κάτοψης SEM αυτών των δομών στα εννέα βήματα σχηματισμού τους σε μία διαδικασία SAQP με τις παρακάτω ρυθμίσεις λήψης εικόνας:

pixel = 0.8nm, συνολική εικόνα 1640 x 1640 nm2 (2048x2048pixels2) και 16 πλαίσια σάρωσης. Στα αποτελέσματα ανάλυσης που παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες, έχουν χρησιμοποιηθεί μέσοι όροι σε πάνω από 25 εικόνες ανά περίπτωση για τη μείωση των στατιστικών διακυμάνσεων και την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.



Σχήμα 2. Τυπικές εικόνες SEM από την κορυφή προς τα κάτω των σχεδίων γραμμής / διαστήματος των σταδίων διαδικασίας SAQP που φαίνονται στο σχήμα 1

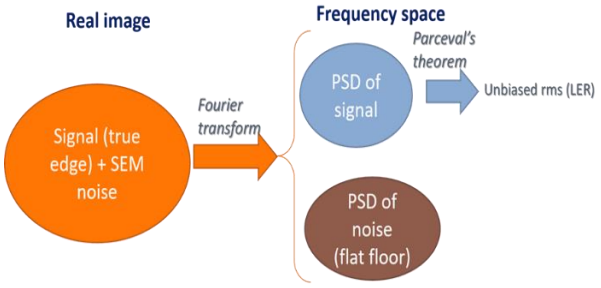
3. Επίδραση του θορύβου των εικόνων Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας στη μέτρηση της Τραχύτητας Ακμής Γραμμών (LER)

3.1. Μεθοδολογία

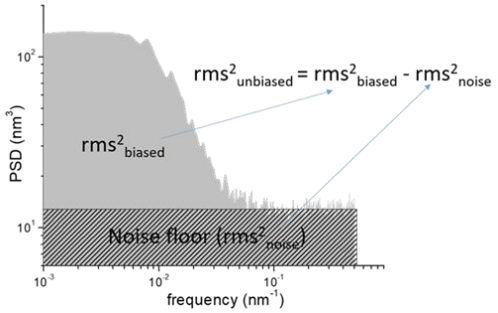
Όταν δεν μπορείτε να εξουδετερώστε κάτι, τότε απλά είναι καλύτερο να συνεργαστείτε μαζί του για να το χειριστείτε. Αυτή είναι η ουσία της μεθόδου που παρουσιάζεται στην παρούσα παράγραφο για μετρήσεις LER χωρίς θόρυβο.
Η καθιερωμένη μετρολογία του LER βασίζεται στην ανάλυση εικόνων SEM και, όπως αναφέραμε στην Εισαγωγή, πάσχει από την επίδραση του θορύβου που επηρεάζει ενισχυτικά κυρίως τις υψηλές συχνότητες του LER και κατά συνέπεια οδηγεί σε υπερεκτίμηση της τιμής του rms που περιλαμβάνει ολόκληρο το φάσμα των συχνοτήτων. Η άμεση αντιμετώπιση αυτής της επίδρασης μπορεί να γίνει με την εφαρμογή φίλτρων στην εικόνα για την εξομάλυνση του θορύβου. Πράγματι, αυτή είναι μία ικανοποιητική προσέγγιση όταν ο στόχος μας είναι να ανιχνεύσουμε τις ακμές χωρίς να ανησυχούμε για τις λεπτομέρειες της τραχύτητας τους. Όταν όμως ο στόχος είναι η μέτρηση της τραχύτητας σε όλες τις συχνότητές της, τότε η εφαρμογή του φιλτραρίσματος της εικόνας μπορεί να είναι προβληματική, καθώς πέρα από το θόρυβο εξαφανίζει και τις υψηλές συχνότητες του LER και οδηγεί σε υποεκτίμηση του LER.
Συνεπώς, η κρίσιμη ερώτηση εδώ είναι πώς μπορούμε να διαχωρίσουμε την επίδραση του θορύβου από τις υψηλές συχνότητες (High Frequencies, HF) του LER (HF-LER). Στον πραγματικό χώρο αυτό φαίνεται να είναι δύσκολο αφού και τα δύο έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά. Αλλά εδώ είναι που η "μαγεία" των μαθηματικών μπορεί να έχει καταλυτικά αποτελέσματα. Ένα από τα βασικά συστατικά της μαθηματικής γλώσσας είναι ότι δημιουργεί νέους χώρους εκτός από τον πραγματικό για να αποκαλύψει και να χειριστεί αφανείς ομοιότητες, διαιφορές, κανονικότητες και συσχετίσεις. Αυτή είναι η περίπτωση της ανάλυσης Fourier στο πρόβλημα του LER που εξετάζουμε εδώ. Η ανάλυση Fourier μετασχηματίζει την τραχύτητα της πραγματικής ακμής στο χώρο συχνοτήτων όπου το

πραγματικό HF-LER και ο θόρυβος έχουν ξεχωριστά ίχνη και μπορούν να διαχωρισθούν (βλ. Σχήμα 3) [Lorusso et al. 2018, Papavieros et al. 2018]. Επιπλέον, υπάρχει μια μετατόπιση του κύριου στόχου της ανάλυσης εικόνας LER: αντί να στοχεύσουμε στην ανίχνευση της πραγματικής ακμής, τώρα ο κύριος στόχος μας είναι να υπολογίσουμε αξιόπιστα τις στατιστικές παραμέτρους του LER όπως το rms και το μήκος συσχέτισης.
Μια εφαρμογή της μεθόδου δίνεται στο Σχήμα 4, όπου δείχνεται το PSD μιας ακμής πριν την αφαίρεση του θορύβου και χωρίς την εφαρμογή φίλτρων. Σε αυτό το ίχνος του θορύβου ανιχνεύεται από το επίπεδο υπόβαθρο τυχαίων διακυμάνσεων στις υψηλές συχνότητες. . Με το θεώρημα του Parseval, το υπόβαθρο αυτό χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η συνεισφορά του θορύβου στο rms (rms^2_{noise}). Η συνεισφορά αυτή στη συνέχεια μπορεί να αφαιρεθεί από το μετρούμενο συνολικό $rms^2_{measured}$ που υπολογίζεται άμεσα από την ακμή με θόρυβο για να πάρουμε το $rms^2_{unbiased}$ που προσεγγίζει το πραγματικό rms. Η βασική παραδοχή της μεθόδου είναι ότι στις υψηλές συχνότητες οι επιπτώσεις του θορύβου κυριαρχούν και μπορούμε με ασφάλεια να αγνοήσουμε τη συμβολή του τμήματος HF του πραγματικού LER.

Μια παρόμοια μέθοδος μπορεί επίσης να υλοποιηθεί με βάση τη HHCF όπου ο επίπεδος θόρυβος κυριαρχεί στις μικρές αποστάσεις και το rms_{noise} μπορεί να υπολογιστεί από το HHCF σε αυτές τις αποστάσεις. Το όφελος της μεθόδου που βασίζεται στο HHCF είναι η δυνατότητα που προσφέρει για την εκτίμηση του μήκους συσχέτισης και του εκθέτη τραχύτητας χωρίς θόρυβο για την ολοκλήρωση μιας μετρολογίας του LER με έλεγχο των επιπτώσεων του θορύβου σε ολόκληρη την τριάδα των βασικών παραμέτρων. Μια πιο λεπτομερής περιγραφή της μεθόδου που βασίζεται σε HHCF μπορεί να βρεθεί στο [Papavieros et al. 2017].



Σχήμα 3. Μια σχηματική αναπαράσταση της βασικής ιδέας της μεθόδου που βασίζεται στο PSD για μέτρηση του LER χωρίς την επίδραση του θορύβου.



Σχήμα 4. Παράδειγμα υλοποίησης της μεθόδου που βασίζεται στο PSD για την αφαίρεση της επίδρασης του θορύβου στη μέτρηση της τιμής rms του LER.

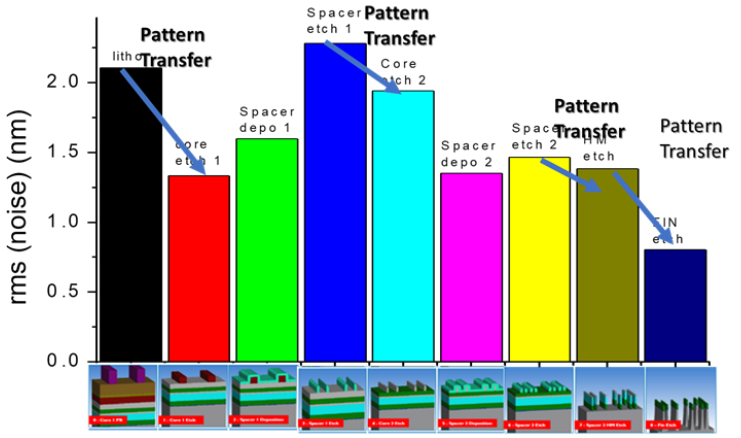
3.2. Αποτελέσματα

Έχουμε εφαρμόσει τη μέθοδο που βασίζεται στο PSD στην ανάλυση LER των εικόνων SEM που λαμβάνονται από τις δομές των εννέα βημάτων του SAQP όπως περιγράφεται στην Παράγραφο 2. Το κύριο ζητούμενο είναι ο υπολογισμός της συμβολής του θορύβου του SEM όπως υπολογίζεται από το ύψος του επίπεδου υποβάθρου στα διαγράμματα PSD σε όλα τα βήματα της λιθογραφικής διεργασίας με έμφαση στα βήματα της εγχάραξης και μεταφοράς σχήματος. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 5 και δείχνουν ότι η συμβολή του θορύβου είναι μειωμένη μετά τα βήματα εγχάραξης και μεταφοράς σχήματος (βλέπε 2ο, 5ο, 8ο, 9ο βήμα). Αρχικά, θα αναμέναμε την ανεξαρτησία της συνεισφοράς του θορύβου SEM από τη δομή που μελετάμε δεδομένου ότι ο θόρυβος SEM καθορίζεταιαπό

τη διαδικασία μέτρησης και τους περιορισμούς που είναι παρόμοιοι σε όλες τις μετρήσεις. Τα αποτελέσματα όμως δείχνουν ότι αυτό δεν συμβαίνει.
Αυτό το εύρημα μπορεί να έχει δύο συμπληρωματικές εξηγήσεις. Η πρώτη προέρχεται από τη βασική υπόθεση ότι στις υψηλές συχνότητες το PSD κυριαρχείται από τον θόρυβο. Αυτό δεν είναι απολύτως αληθές, καθώς σε όλο το φάσμα ισχύει η σχέση

PSD (measured) = PSD (unbiased) + PSD (noise)

Αυτό σημαίνει ότι το επίπεδο υπόβαθρο στις υψηλές συχνότητας είναι το άθροισμα του θορύβου SEM και του HF-LER. Κατά συνέπεια όταν το αφαιρούμε μαζί με τη συνεισφορά του θορύβου αφαιρούμε και το HF-LER. Στα βήματα μεταφοράς σχήματος με εγχάραξη, όπως αναφέραμε παραπάνω, το HF-LER είναι μικρότερο και έτσι ερμηνεύεται η παρατηρούμενη μείωση σε αυτά τα βήματα αν υποθέσουμε ότι η συνεισφορά του θορύβου παραμένει η ίδια σε όλα τα βήματα.
Η δεύτερη εξήγηση βασίζεται στο γεγονός ότι ο θόρυβος SEM μπορεί να σχετίζεται με τα υλικά στοίβας κάτω από τη μετρούμενη δομή. Αφού κάθε βήμα της διαδικασίας SAQP αλλάζει τη στοίβα και τα υποκείμενα στρώματα ο θόρυβος SEM μπορεί να διαφέρει στα διάφορα βήματα λόγω των αλλαγών αυτών [Rutigliani et al. 2018]. Απαιτούνται περισσότερες εργασίες και αναλύσεις για να αξιολογηθεί η σημασία των παραπάνω εξηγήσεων. Σε κάθε περίπτωση η πρώτη εξήγηση υπογραμμίζει ένα κενό της μεθόδου που βασίζεται στο PSD για μέτρηση LER χωρίς την επίδραση του θορύβου: η εξάλειψη του HF-LER που οδηγεί σε ελαφρώς υποτιμημένες τιμές του LER [Papavieros et al. 2017]. Μια διόρθωση αυτού θα μπορούσε να βασιστεί σε μια επέκταση του PSD από τις μεσαίες στις υψηλές συχνότητες για να περιλάβει το χαμένο HF-LER.



Σχήμα 5. Η συμβολή του θορύβου των εικόνων SEM στη μετρούμενη rms τιμή του LER όπως υπολογίστηκε από το επίπεδο υπόβαθρο στο τμήμα υψηλής συχνότητας του PSD.

4. Συσχετίσεις μεταξύ του LER ακμών και μεταφορά σχήματος

4.1. Μεθοδολογία

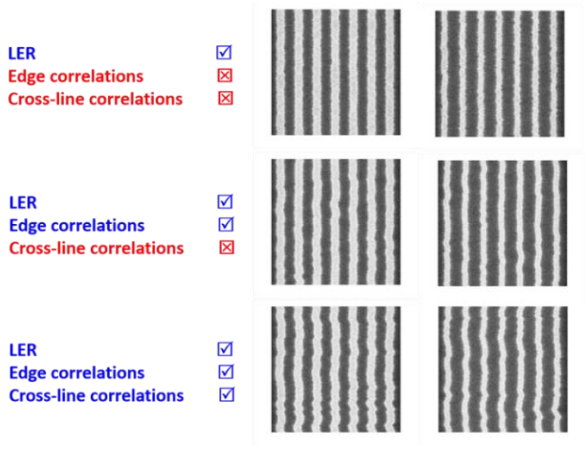
Πρόσφατα, έχει γίνει αντιληπτό ότι οι πυκνές δομές που κατασκευάζονται από τις διάφορες λιθογραφίες εμφανίζουν τραχύτητα ακμών που χαρακτηρίζεται από εγκάρσιες συσχετίσεις κάθετα προς την κατεύθυνση των γραμμών. Η μαθηματική περιγραφή αυτών των συσχετίσεων δεν συμπεριλαμβάνεται στην καθιερωμένη μετρολογία του LER. Ωστόσο, μια συστηματική μεθοδολογία για την ποσοτικοποίηση αυτών των συσχετίσεων και μια διευρυμένη μετρολογία LER έχει δημοσιευτεί πριν από μερικά χρόνια από την ομάδα μας με πρώτη εφαρμογή σε νανοδομές που δημιουργούνται από λιθογραφίες Directed Self Assembly και SAQP [Constantoudis et al. 2017, Lorusso et al. 2016].

Σε αυτή την εργασία, εστιάζουμε στη μέτρηση των εγκάρσιων συσχετίσεων μεταξύ του LER ακμών και γραμμών με τη βοήθεια του παράγοντα c (c) και τη συνάρτηση του παράγοντα c (c-factor function, cff) αντίστοιχα:

$$c = \frac{\sum(e_R - < e_R >)(e_L - < e_L >)}{\sqrt{\sum(e_R - \langle e_R \rangle)^2}\ \sqrt{\sum(e_L - \langle e_L \rangle^2}}$$

$$c_factor_function(r = |i - j|) = \left< \frac{\sum(lc_\iota - < lc_i >)(lc_j - < lc_j >)}{\sqrt{\sum(lc_i - \langle lc_i \rangle)^2 \sum(lc_j - \langle lc_j \rangle)^2}} \right>_{\text{i,j,r=fixed}}$$

Όπου $e_{R,\ L}$ είναι οι συντεταγμένες της δεξιάς και αριστερής ακμής αντίστοιχα και το lc_i αντιπροσωπεύει τη συντεταγμένη x των κέντρων γραμμών.
Προκειμένου να έχουμε μια αίσθηση του φυσικού νοήματος αυτών των μεγεθών, δείχνουμε στο Σχήμα 6, συνθετικές εικόνες SEM με διαφορετικά επίπεδα τραχύτητας σε κάθε σειρά. Οι δύο στήλες έχουν εικόνες με διαφορετικά CD (μεγάλα αριστερά και μικρά στα δεξιά). Στην πρώτη σειρά, οι τραχύτητες άκρων και γραμμών είναι πλήρως ασυσχέτιστες και μπορεί να εφαρμοστεί η καθιερωμένη προσέγγιση στην μετρολογία LER. Οι γραμμικές δομές των εικόνων δεύτερης σειράς παρουσιάζουν εκτός από LER, συσχετισμούς μεταξύ του δεξιού και του αριστερού άκρου κάθε γραμμής. Δεν υπάρχουν όμως συσχετίσεις στις τραχύτητες των γραμμών. Στην τρίτη σειρά, οι δομές έχουν τραχύτητα άκρων (rms (LER)> 0), συσχετίσεις αριστερής / δεξιάς ακμής (c> 0) και επίσης τα κέντρα των γραμμών μεταβάλλονται με συσχετισμένο τρόπο (cff(r>1)> 0). Το μήκος στο οποίο υπάρχουν εγκάρσιες συσχετίσεις μεταξύ των γραμμών χαρακτηρίζεται από το μήκος συσχέτισης του παράγοντα c που υπολογίζεται από τη συνάρτηση cff [Constantoudis et al. 2017].

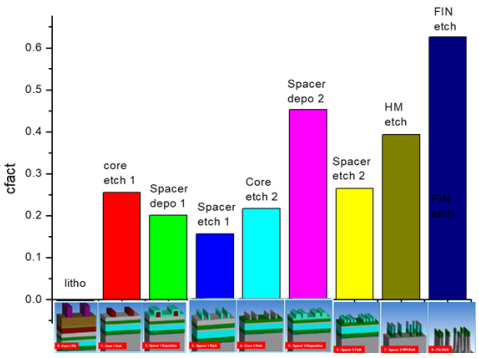


Σχήμα 6. Συνθετικές εικόνες SEM με δομές γραμμής/διαστήματος που παρουσιάζουν αυξανόμενα επίπεδα συσχετίσεων μεταξύ γραμμών. Στην πρώτη σειρά, οι ακμές των γραμμών έχουν LER χωρίς καθόλου συσχετίσεις μεταξύ κοντινών ακμών και γραμμών (c-παράγοντας = 0, cff (r> 1) = 0). Στη δεύτερη σειρά, εκτός από το LER, οι αριστερές και οι δεξιές ακμές κάθε γραμμής εμφανίζουν συσχετίσεις (c> 0), αν και τα κέντρα γραμμής εξακολουθούν να είναι ασυσχέτιστα (cff (r> 1) = 0). Τέλος, η τρίτη σειρά περιέχει δύο εικόνες SEM με LER και εγκάρσιες συσχετίσεις ακμών και γραμμών (c-παράγοντας> 0, cff> 0).

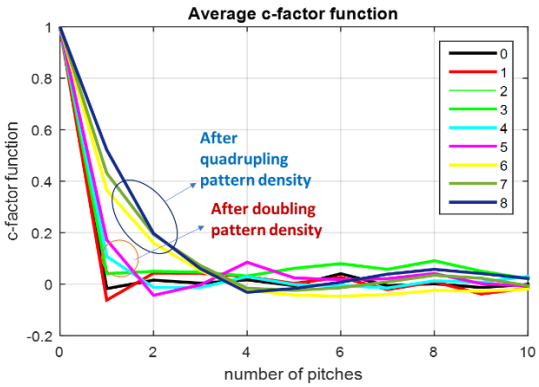
4.2. Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα για τον παράγοντα c που ποσοτικοποιεί τις συσχετίσεις μεταξύ αριστερών και δεξιών ακμών στις γραμμές φαίνονται στο Σχήμα 7. Αυτά δείχνουν ότι α) Οι συσχετίσεις ακμών μεταβάλλονται στα διάφορα βήματα, β) Κατά τον διπλασιασμό και την τετραπλασιασμό της περιόδου της δομής εμφανίζονται παρόμοιες μεταβολές, γ) Αυξημένες συσχετίσεις εμφανίζονται στην τετραπλή πυκνότητα της δομής σε σχέση με εκείνες του διπλής πυκνότητας, δ) Στα τελευταία βήματα (8 και 9) παρατηρείται ισχυρότερη ταλάντωση των κέντρων των γραμμών και ε) Η μεταφορά της δομής με εγχάραξη αυξάνει τον παράγοντα c ενώ η εγχάραξη του διαχωριστή μειώνει τις συσχετίσεις των ακμών.

Τα αποτελέσματα για τη συνάρτηση cff που ποσοτικοποιεί τις εγκάρσιες συσχετίσεις των κέντρων των γραμμών φαίνονται στο Σχήμα 8 συναρτήσει των αποστάσεων των γραμμών. Αυτά δείχνουν ότι α) Διπλασιασμός και τετραπλασιασμός της πυκνότητας της δομής αυξάνει τις συσχετίσεις μεταξύ γραμμών με τον αριθμό των βημάτων, β) Η παρατηρούμενη αύξηση υπολογίζεται σε περιόδους. Όταν οι υπολογισμοί μετασχηματίζονται σε nm οι συσχετίσεις παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες, γ) από το (β) συμπεραίνουμε ότι η συνάρτηση cff είναι ένας καλός δείκτης αύξησης της πυκνότητας των λιθογραφικών δομών.



Σχήμα 7. Ο συντελεστής συσχέτισης (c-συντελεστής (cfact)) της αριστερής και δεξιάς ακμής των γραμμών έναντι των βαθμίδων διεργασιών στη λιθογραφία SAQP που περιγράφεται στην ενότητα 2.



Σχήμα 8. Η συνάρτηση cff(pitches) υπολογισμένη για τα εννέα στάδια της διαδικασίας SAQP που παρουσιάζεται στο σχήμα 1. Παρατηρήστε τις μετατοπίσεις της συνάρτησης σε υψηλότερες τιμές μετά από κάθε διπλασιασμό της πυκνότητας.

5. Σύνοψη

Ο γενικός στόχος της εργασίας αυτής ήταν διπλός. Πρώτα θέλαμε να αναδείξουμε το θέμα της μετρολογίας της τραχύτητας ακμών σε γραμμικές νανοδομές ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ως αντιπροσωπευτικό παράδειγμα προβλήματος νανομετρολογίας με προχωρημένες προκλήσεις λόγω της βαρύνουσας σημασίας του στη σχετική ερευνητική κοινότητα αλλά κυρίως στην βιομηχανία των ημιαγωγών. Δεύτερον, θέλαμε να υπογραμμίσουμε τη σημασία των μαθηματικών και υπολογιστικών μεθόδων στην αντιμετώπιση του ακανθώδους προβλήματος της επίδρασης του θορύβου στις νανομετρήσεις που βασίζονται σε ανάλυση εικόνων μικροσκοπίας.
Ειδικότερα, για να πετύχουμε τον γενικό στόχο εστιάσαμε σε δύο προκλήσεις της μετρολογίας LER α) την ακρίβεια (επιπτώσεις του θορύβου) και β) την πληρότητα (συσχετίσεις μεταξύ γραμμών) και διερευνήσαμε τον αντίκτυπο που έχει η μεταφορά της νανοδομής διαμέσου εγχάραξης με πλάσμα σε αυτές.
Στο θέμα της ακρίβειας, περιγράψαμε τη μέθοδο που βασίζεται στην ανάλυση του φάσματος ισχύος PSD για μέτρηση του LER χωρίς την επίδραση του θορύβου και υπολογίσαμε τη συμβολή του θορύβου στο rms του LER στα εννέα στάδια μιας λιθογραφίας τύπου SAQP. Διαπιστώσαμε ότι μετά τη μεταφορά της δομής η συμβολή του θορύβου στο rms μειώνεται και συζητήσαμε δύο συμπληρωματικές εξηγήσεις αυτού του ευρήματος.
Στο θέμα της πληρότητας, παρουσιάσαμε μια διευρυμένη μετρολογία του LER συμπεριλαμβανομένων των εγκάρσιων συσχετίσεων μεταξύ της τραχύτητας των ακμών και γραμμών με βάση τον παράγοντα c και τη συνάρτηση του παράγοντα c (cff). Με βάση αυτές

προσδιορίσαμε ποσοτικά την εξέλιξη των εγκάρσιων συσχετίσεων κατά τη διάρκεια των βημάτων SAQP και διαπιστώσαμε ότι αυτές ενισχύονται μετά από τον πολλαπλασιασμό της πυκνότητας των δομών. Το κύριο αποτέλεσμα των βημάτων μεταφοράς της δομής είναι η αύξηση των συσχετίσεων των ακμών στις γραμμές που προκαλούν γραμμές με εντονότερες διακυμάνσεις.

Η συνέχεια των παραπάνω ερευνητικών κατευθύνσεων στο μέλλον περιλαμβάνει α) τη διακρίβωση της μεθόδου για μετρολογία του LER χωρίς θόρυβο με συνθετικές εικόνες SEM, β) ΄περαιτέρω βελτίωση της ακρίβειας της μεθόδου με την συμπερίληψη και του HF-LER, γ) επέκταση της μεθόδου στη παράμετρο και τη συνάρτηση του παράγοντα c, και δ) μεταφορά των νέων μεθόδων και μετρικών σε άλλα προβλήματα νανομετρολογίας.

6. Βιβλιογραφία

Bunday, B. D., et al.,"*CD-SEM measurement line-edge roughness test patterns for 193-nm technology*" Proc. SPIE, 5038, 674-688 (2003)

Constantoudis, V. et al., "*Multifractal analysis of line-edge roughness*" Proc. SPIE, 10585, 10585-13 (2018)

Constantoudis, V., et al., "*Line edge roughness and critical dimension variation: Fractal characterization and comparison using model functions*" Journal of Vacuum Science and Technology B: 22 (4), 1974-1983 (2004).

Constantoudis, V., Pargon, E., "*Evaluation of methods for noise-free measurement of LER/LWR using synthesized CD-SEM images*" Proc. SPIE, 8681, 86812L (2013)

Constantoudis, V. et al., "*Challenges in line edge roughness metrology in directed self-assembly lithography: placement errors and cross-line correlations*" J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS, 16, 024001 (2017)

Hiraiwa, A., Nishida, A., "*Statistical-noise effect on power spectrum of long-range-correlated line-edge and line-width roughness*" J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS, 10(3), 033008 (2011)

ISO 13565:1996, *Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties*

ISO 25178:2016, *Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal*

Leach, R., "*Characterization of Areal Surface Texture*", Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, (2013)

Levi, S., Schwarzband, I., Kris, R., Adan, O., Shi, E., Zhang, Y., Zhou, K., "*Edge roughness characterization of advanced patterning processes using power spectral density analysis (PSD)"* Proc. SPIE 9782, 97820I (2016)

Lorusso, G.F., Rutigliani, V., Van Roey, Mack, C.A., "*Unbiased roughness measurements: Subtracting out SEM effects*" Microelectronic Engineering, 190, 33-37 (2018)

Lorusso, G.F., et al., "*Line width roughness accuracy analysis during pattern transfer in self-aligned quadruple patterning process*", Proc, SPIE, 9778, 97780V (2016)

Papavieros et al., "*Allowable SEM noise for unbiased LER measurement*" Proc. SPIE, 10585, 10585-114 (2018)

Ruiz, R., Wan, L., Lopez, R., and Albrecht, T.R., "*Line Roughness in Lamellae-Forming Block Copolymer Films*" Macromolecules, 50, 1037-1046 (2017)

Rutigliani et al., "*Setting up a proper power spectral density (PSD) and autocorrelation analysis for material and process characterization*" Proc. SPIE, 10585, 10585-54 (2018)

Villarrubia, J.S., and Bunday, B.D., "*Unbiased Estimation of Linewidth Roughness*" Proc. SPIE, 5752, 480-489 (2005)

Whitehouse, D., "*Surfaces and their Measurement*", Taylor Hobson Ltd, London (2002)

Yamaguchi A and Komuro O, "*Characterization of Line Edge Roughness in Resist Patterns by Using Fourier Analysis and Auto-Correlation Function*" Jpn. J. Appl. Phys. 42, 3763–3770 (2003)