

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΝΑΝΟ – ΚΛΙΜΑΚΑ

B. ΚΩΝΣΤΑΝΤΟΥΔΗΣ, Γ. Π. ΠΑΤΣΗΣ, Ε. ΓΟΓΓΟΛΙΔΗΣ

**ΙΝΣΤ. ΜΙΚΡΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ, ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ, ΑΓΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ,
15310.**

e-mail: gpatsis@imel.demokritos.gr

Περίληψη

Η τεχνολογία κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων έχει εισέλθει τα τελευταία χρόνια στην περιοχή των νανοδιαστάσεων. Η μετρολογία μήκους και κυρίως της τραχύτητας των δομών που κατασκευάζονται στις διαστάσεις αυτές είναι απολύτως απαραίτητη για τον έλεγχο της ικανότητας λειτουργίας των κατασκευαζόμενων δομών. Παρουσιάζονται τρόποι ποσοτικοποίησης και προσομοίωσης της πλευρικής τραχύτητας σε νανοδομές.

Εισαγωγή

Η μέτρηση μιας ποσότητας με ακρίβεια πολλές φορές χρειάζεται την πλήρη μελέτη και κατανόηση ενός συνόλου άλλων διαδικασιών μέτρησης και επεξεργασίας. Πιθανόν επίσης να χρειάζεται την αλληλεπίδραση διαφόρων περιοχών της επιστημονικής διαδικασίας. Η μετρολογία είναι η επιστήμη της μέτρησης ή διατυπωμένο διαφορετικά ένα σύστημα μέτρων. Σύμφωνα με τα λόγια του William Thomson (Λόρδος Kelvin) «όταν μπορούμε να μετρήσουμε κάτι για το οποίο μιλάμε, τότε κάτι γνωρίζουμε για αυτό. Ωστόσο, αν δε μπορούμε να το μετρήσουμε, η γνώση μας είναι θολή. Ιδιαίτερα η νανομετρολογία, δηλ. η μετρήσεις σε νανο-δομές, είναι απαραίτητη για τον έλεγχο της κατασκευής και της παραγωγής των νανο-δομών.

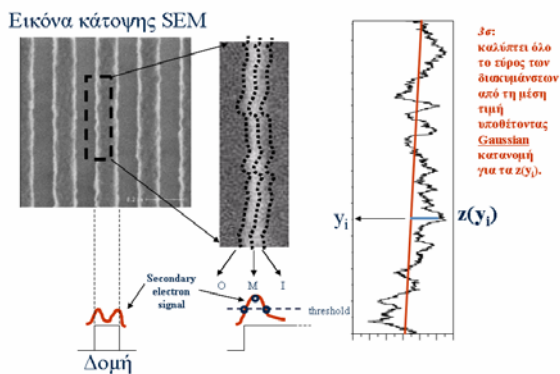
Κάθε φυσική ιδιότητα έχει κάποια κρίσιμη διάσταση με την οποία σχετίζεται. Οι κρίσιμες διαστάσεις είναι στην περιοχή των νανομέτρων. Η νανο-τεχνολογία δηλαδή «βρίσκεται» σε έναν διαφορετικό κόσμο. Σε αυτόν, οι ιδιότητες των υλικών μπορεί να αλλάζουν δραματικά τα χαρακτηριστικά τους. Η νανο-μετρολογία χρησιμοποιεί εργαλεία και τεχνικές που καθιστούν δυνατή τη μέτρηση των διατάξεων ή τις απαραίτητες αντοχές τους ώστε να είναι δυνατό να λειτουργούν όπως προβλέπεται θεωρητικά, σε ατομικό επίπεδο. Μερικές από αυτές τις τεχνικές μπορεί να προκύψουν από στάνταρ τεχνικές με προσέγγιση του τύπου από-πάνω-προς-τα-κάτω (top-down). Τελικά, αν συνεχιστεί η τάση για σμίκρυνση, θα χρειαστεί να μετρήσουμε τη διάταξη άτομο προς άτομο.

Ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να απασχολεί το χώρο της νανο-τεχνολογίας το πρόβλημα της πλευρικής τραχύτητας (ΠΤ) των δομών, λόγω του αυστηρού ελέγχου των διαστάσεων που απαιτείται στην κλίμακα αυτή. Στο Σχ. 1 παρουσιάζεται μια εικόνα κάτοψης γραμμών/διαστημάτων φωτοπολυμερούς πάνω σε υπόστρωμα πυριτίου, που έχει παρθεί από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (ΗΜΣ). Συγκεκριμένα φαίνεται μια μεγέθυνση της πλευράς της γραμμής, και ο τρόπος με το οποίο ορίζεται η ΠΤ ή διαφορετικά η 3σ τιμή της. Στο Σχ.2 παρουσιάζεται ποιοτικά η δομή ενός MOS τρανζίστορ και η αντίστοιχη μάσκα φωτοπολυμερούς που θα χρησιμοποιηθεί γενικά για την κατασκευή των περιοχών τύπου n. Η ΠΤ των γραμμών του φωτοπολυμερούς θα μεταφερθεί τελικά στο τρανζίστορ και με τη σειρά της θα επηρεάσει τα ηλεκτρικά του χαρακτηριστικά. Γίνεται κατανοητό ότι όσο οι διαστάσεις (π.χ. το μήκος πύλης L) του τρανζίστορ μειώνονται, η ΠΤ θα αποτελεί ολοένα και μεγαλύτερο πρόβλημα. Συνεπώς είναι απαραίτητη η δυνατότητα μέτρησής της και η συσχέτισή της με τα υλικά και τις διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

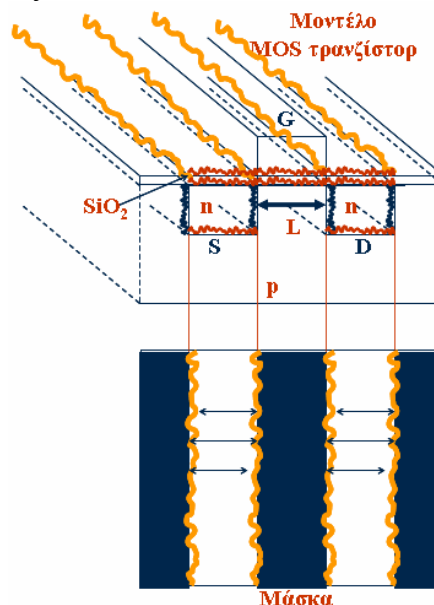
Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να ορίσει και να περιγράψει την ΠΤ που προκύπτει κατά τη διαδικασία της λιθογραφίας, η οποία εφαρμόζεται στην κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Το κύριο τμήμα της εργασίας θα παρουσιάσει τους τρόπους ποσοτικοποίησης της ΠΤ και συνοπτικά ένα παράδειγμα προσομοίωσης της διαδικασία γένεσης ΠΤ σε γραμμές φωτοπολυμερούς.

ΟΡΙΣΜΟΣ – ΠΟΣΟΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΕΥΡΙΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ

$$3\sigma = 3 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N z^2(y_i)}{N}}$$



Σχ. 1. Ποσοτικοποίηση της ΠΤ μέσω ανάλυσης εικόνας κάτοψης από ΗΜΣ.



Σχ. 2. Απλοποιημένο μοντέλο τρανζίστορ MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) και η αντίστοιχη μάσκα. Έχουν σχεδιαστεί οι «ταχύτητες» τόσο στη μάσκα όσο και στην τελική διάταξη. Φαίνεται ότι η διακυμάνσεις στο μήκος πύλης L οι οποίες θα επιδράσουν στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της διάταξης, είναι αποτέλεσμα της λιθογραφίας.

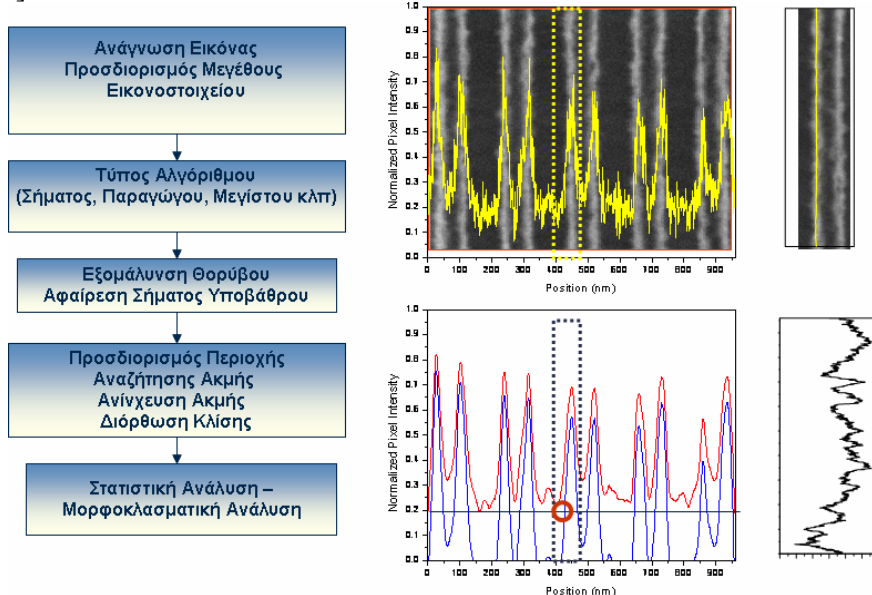
Ποσοτικές Μετρήσεις της Πλευρικής Τραχύτητας

Στατιστικές μετρήσεις της ΠΤ είναι δυνατό να γίνουν με τη χρήση ειδικών μετρολογικών ΗΜΣ. Λόγω του μεγάλου κόστους των μηχανημάτων αυτών και του μεγάλου όγκου δεδομένων (δηλ. φωτογραφιών κάτοψης) που πρέπει να αναλυθούν για να ποσοτικοποιηθεί η ΠΤ με στατιστική ασφάλεια, η χρήση τους (δηλ. σε μετρήσεις λειτουργίας (on-line)) δεν ενδείκνυται. Για το λόγο αυτό η ομάδα μας ανέπτυξε έναν αλγόριθμο ανάλυσης τέτοιων εικόνων ο οποίος μπορεί να γίνει σε έναν προσωπικό υπολογιστή off-line. Ο αλγόριθμος αυτός απεικονίζεται ποιοτικά στο Σχ. 3. Αρχικά η εικόνα κάτοψης από το ΗΜΣ αναλύεται για να υπολογιστούν οι φωτεινότητες των εικονοστοιχείων (pixels) και να προσδιοριστούν οι πλευρές των δομών. Στη συνέχεια γίνεται ψηφιοποίησή της και σε αυτή τη μορφή της η πλευρές (γραμμές) υπόκεινται σε διάφορα είδη στατιστική επεξεργασίας που θα περιγραφούν στη συνέχεια.

Το πρόβλημα του χαρακτηρισμού της τραχύτητας τυχαίων γραμμών (δηλ. γραμμών που δεν περιγράφονται αναλυτικά από γνωστές συναρτήσεις ή σειρές) παρότι φαίνεται απλό, στην πραγματικότητα είναι αρκετά πολύπλοκο. Στην βιβλιογραφία της τελευταίας τριαντακονταετίας μπορεί κανείς να βρει πολλές μεθόδους που προσπαθούν να το επιλύσουν, όμως κάθε μία από αυτές τονίζει ή και περιορίζεται στην περιγραφή συγκεκριμένων πλευρών της τραχύτητας. Σήμερα αποτελεί σχεδόν κοινή πεποίθηση ότι ο ποσοτικός χαρακτηρισμός της τραχύτητας εξαρτάται από το είδος της γραμμής ή της επιφάνειας που μελετάμε [1]. Έτσι για παράδειγμα σε μία γραμμή με έντονη την

παρουσία περιοδικότητας, το μήκος κύματός της αποτελεί βασική παράμετρο χαρακτηρισμού της.

Επίσης, για μια πρώτη προσέγγιση στο πρόβλημα του χαρακτηρισμού της τραχύτητας φαίνεται να είναι χρήσιμη η διάκριση μεταξύ της «κάθετης» και της «οριζόντιας» τραχύτητας. Η πρώτη αναφέρεται στο εύρος των διακυμάνσεων της γραμμής σε κατεύθυνση κάθετη σε σχέση με την μέση τιμή της (ή μία γραμμική προσαρμογή της), ενώ η δεύτερη στην μορφολογία των διακυμάνσεων κατά μήκος της γραμμής [1].



Σχ. 3. Ποιοτική περιγραφή αλγορίθμου επεξεργασίας εικόνων ΗΜΣ για την ποσοτικοποίηση της ΠΤ.

Ο χαρακτηρισμός της «κάθετης» τραχύτητας μπορεί να γίνει με την συνάρτηση κατανομής των σημείων της γραμμής και από τις πρώτες ροπές αυτής της κατανομής. Η πιο σημαντική από αυτές είναι η δεύτερη ροπή που δίνει την τυπική απόκλιση σ των σημείων της γραμμής από την μέση τιμή τους και μπορεί να υπολογισθεί από την σχέση

$$\sigma = \sqrt{\frac{I}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \langle y_i \rangle)^2} \quad (1)$$

όπου y_i είναι η απόσταση του i σημείου της γραμμής από μία ευθεία αναφοράς, N ο συνολικός αριθμός των σημείων στα οποία είναι γνωστή η γραμμή και $\langle \dots \rangle$ η μέση τιμή τους. Η τρίτη και η τέταρτη ροπή της κατανομής δίνουν αντίστοιχα την ασυμμετρία και την κύρτωση της κατανομής.

Ωστόσο το πρόβλημα του χαρακτηρισμού της τραχύτητας έγκειται κυρίως στον χαρακτηρισμό της «οριζόντιας» τραχύτητας μίας τυχαίας γραμμής. Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιάσουμε τρεις μεθόδους για τον χαρακτηρισμό αυτό και θα εξετάσουμε συγκριτικά κάποιες τις παραμέτρους τραχύτητας που προτείνουν. Το κοινό πλεονέκτημα και των τριών μεθόδων είναι ότι συνδέουν τον χαρακτηρισμό της τραχύτητας με το είδος της γραμμής που διερευνάται [2].

Η πρώτη μέθοδος εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι η «οριζόντια» ανάπτυξη της τραχύτητας καθορίζεται από τις συσχετίσεις μεταξύ των διαφόρων σημείων της γραμμής και άρα ο χαρακτηρισμός της μπορεί να γίνει διαμέσου της κατάλληλης συνάρτησης συσχέτισης. Αυτή είναι η συνάρτηση συσχέτισης των υψών της γραμμής $G(r)$ η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$G(md) = \left[\frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} (y_{i+m} - y_i)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

όπου $d=|x_{i+1}-x_i|$ η απόσταση των τετμημένων x_i, x_{i+1} δύο γειτονικών σημείων της γραμμής.

Μπορεί εύκολα να δειχτεί ότι [1]

$$G^2(r) = 2\sigma^2 [1-R(r)] \quad (3)$$

με $R(r)$ τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης των σημείων της γραμμής:

$$R(r = md) = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^{N-m} (y_{i+m} - \langle y_i \rangle)(y_i - \langle y_i \rangle). \quad (4)$$

Στην περίπτωση που η συνάρτηση $G(r)$ παρουσιάσει εξάρτηση νόμου δύναμης από το r τότε η γραμμή που μελετούμε είναι αυτό-αφινική που σημαίνει ότι παραμένει αναλλοίωτη κάτω από μετασχηματισμούς κλίμακας με διαφορετικό συντελεστή κλιμάκωσης στις δύο κατευθύνσεις (οριζόντια και κάθετη) της γραμμής.

Η αυτό-αφινικότητα αποτελεί μία γενίκευση της αυτό-ομοιότητας (συμμετρία μετά από ισότροπη αλλαγή κλίμακας) και συνδέεται με την μορφοκλασματικότητα (fractality) όταν αυτή αναφέρεται σε γραμμές ή επιφάνειες.

Τις περισσότερες φορές στις πραγματικές αυτό-αφινικές γραμμές η συνάρτηση συσχέτισης ύψους-ύψους έχει τη μορφή

$$G(r) \approx r^\alpha \quad (0 < \alpha < 1), \quad \text{for } r < \xi \quad (5)$$

$$G(r) \approx \sqrt{2} \sigma, \quad \text{for } r \gg \xi$$

δηλαδή ο νόμος δύναμης περιορίζεται σε αποστάσεις $r < \xi$ όπου ξ είναι το μήκος συσχέτισης της γραμμής που χαρακτηρίζει την απόσταση πέρα από την οποία οι συσχετίσεις μεταξύ των σημείων της γραμμής εξασθενούν και τείνουν στο μηδέν και η γραμμή μοιάζει σχεδόν ευθεία (βλ. Σχ.4α). Το μήκος συσχέτισης ξ συνήθως υπολογίζεται ως η απόσταση στην οποία η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης μειώνεται στο $1/e$ της αρχικής τιμής της, δηλαδή

$$R(\xi) = 1/e \Rightarrow G(\xi) = \sqrt{2(1 - \frac{1}{e})} \sigma = 1.125 \sigma \quad (6)$$

Για πολύ μεγάλα $r \gg \xi$, μπορεί να δειχτεί ότι η συνάρτηση $G(r)$ παίρνει την τιμή $\sqrt{2}\sigma$.

Ο εκθέτης α του νόμου δύναμης συνήθως αποκαλείται εκθέτης τραχύτητας και μπορεί να αποδειχθεί ότι συνδέεται με την μορφοκλασματική (fractal) διάσταση d διαμέσου της σχέσης $d=2-\alpha$ [3]. Μεγάλες τιμές του α σημαίνουν ότι η σχετική συμβολή των υψίσυχνων διακυμάνσεων στην τραχύτητα της γραμμής είναι μικρή ενώ μικρές τιμές αντίθετα δείχνουν την έντονη παρουσία των υψίσυχνων διακυμάνσεων στην γραμμή. Ένας από τους λόγους που προτιμάτε η συνάρτηση συσχέτισης υψών $G(r)$ έναντι της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης $R(r)$ είναι ότι συνδέεται άμεσα με την μορφοκλασματική διάσταση της γραμμής.

Στην περίπτωση που η μορφολογία της γραμμής χαρακτηρίζεται από μία περιοδική συνιστώσα, η συνάρτηση $G(r)$ εμφανίζει συστηματικές ταλαντώσεις για μεγάλα r και ο εκθέτης τραχύτητας α παίρνει τιμές κοντά στο 1. Το μήκος κύματος της περιοδικής συνιστώσας μπορεί να υπολογιστεί από το πρώτο ελάχιστο της $G(r)$ ή από την απόσταση των πρώτων γειτονικών ελαχίστων.

Η δεύτερη μέθοδος για τον χαρακτηρισμό της οριζόντιας τραχύτητας βασίζεται στον υπολογισμό του διακριτού μετασχηματισμού Fourier $F(k)$ της γραμμής

$$F(k_j) = \sum_{m=1}^N y_m e^{2\pi i j m / N} \quad (7)$$

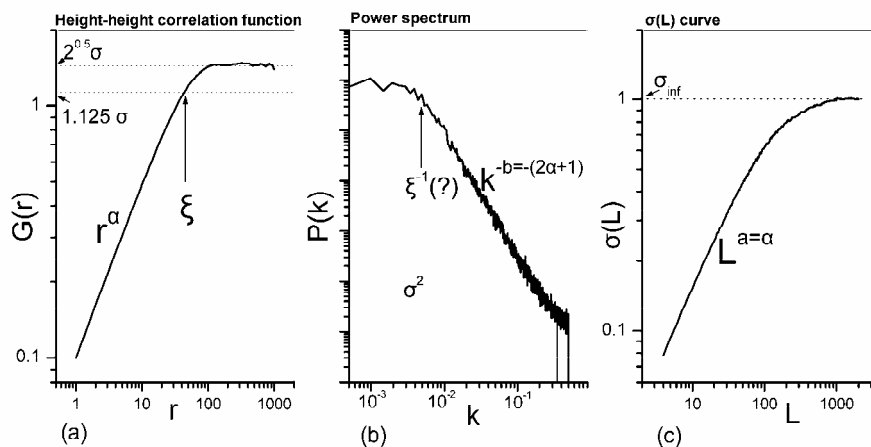
ή του φάσματος ισχύος $P(k)$ που δίνεται από τη σχέση

$$P(k_j) = \frac{I}{N^2} |F(k_j)|^2 \quad (8)$$

Η αυτό-αφινικότητα μιας γραμμής εκδηλώνεται στο φάσμα ισχύος με την παρουσία ενός νόμου δύναμης στην συμπεριφορά του ($P(k) \approx k^{-b}$) για $k > k_c$. Αποδεικνύεται ότι στο όριο των συνεχών γραμμών με άπειρο μήκος $b=2^\alpha+1$, δηλ. ο εκθέτης τραχύτητας μπορεί να υπολογιστεί από τον νόμο δύναμης του φάσματος ισχύος. Το μήκος συσχέτισης από την άλλη πλευρά, συνήθως συνδέεται με το αντίστροφο της συχνότητας k_c από την οποία ξεκινάει ο νόμος της δύναμης (το «γόνατο» της καμπύλης). Η τυπική απόκλιση σ μπορεί να προκύψει από το φάσμα ισχύος από το θεώρημα του Parseval:

$$\sigma^2 = \sum_{j=1}^N P(k_j) \quad (9)$$

Στο Σχ. 4β δείχνεται το φάσμα ισχύος μίας αυτό-αφινικής γραμμής.



Σχ. 4. Η συνάρτηση συσχέτισης υψών $G(r)$ (1α), το φάσμα ισχύος (1β) και η καμπύλη $\sigma(L)$ μίας τυπικής αυτό-αφινικής γραμμής. Να σημειωθεί η συσχέτιση των μορφών αυτών των καμπυλών με τια παραμέτρους τραχύτητας (σ, α, ξ).

Παραπάνω αναφέραμε ότι η τυπική απόκλιση σ αποτελεί μία βασική παράμετρο χαρακτηρισμού της κάθετης τραχύτητας. Ωστόσο, πρέπει να τονισθεί ότι το σ εξαρτάται από το μήκος της γραμμής $L=Nd$ που χρησιμοποιείται για την μέτρησή του. Αυτή η εξαρτηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον χαρακτηρισμό της «οριζόντιας» τραχύτητας και ουσιαστικά αποτελεί τον τρίτο τρόπο χαρακτηρισμού της. Εύκολα μπορεί να δείχτει ότι σε αυτό-αφινικές γραμμές και για $r < L_s$ είναι $\sigma(L) \sim L^\alpha$, όπου α ο εκθέτης τραχύτητας της γραμμής και L_s το σ -μήκος συσχέτισης που μπορεί να οριστεί ως $\sigma(L_s) = 0.9\sigma(L=\infty)$. Μία τυπική συμπεριφορά της καμπύλης $\sigma(L)$ για αυτοαφινικές γραμμές δείχνεται στο Σχ.4γ [2].

Παρατηρούμε ότι σε αυτό-αφινικές γραμμές, η τραχύτητα μιας γραμμής, όπως αυτή περιγράφεται από τις τρεις παραπάνω μεθόδους, μπορεί να ποσοτικοποιηθεί διαμέσου των τριών παραμέτρων (σ, α, ξ ή L_s). Ωστόσο, με δεδομένο τον περιορισμένο αριθμό των σημείων στα οποία είναι γνωστή η γραμμή, οι τιμές που δίνουν οι προαναφερθείσες μέθοδοι για αυτές τις παραμέτρους μπορεί να διαφέρουν σημαντικά. Για την τυπική απόκλιση σ , αυτό δεν συνιστά ιδιαίτερο πρόβλημα αφού ο υπολογισμός της μπορεί να γίνει ανεξάρτητα από την σχέση (1) αρκεί να εξασφαλισθεί ότι το μήκος της γραμμής $L \gg L_s$. Για τον εκθέτη τραχύτητας το ερώτημα αυτό έχει διερευνηθεί εκτενώς χρησιμοποιώντας τόσο πειραματικές γραμμές όσο κυρίως γραμμές που προκύπτουν από αλγορίθμους παραγωγής αυτό-αφινικών γραμμών προκαθορισμένου εκθέτη τραχύτητας (ή μορφοκλασματικής διάστασης) [4-6].

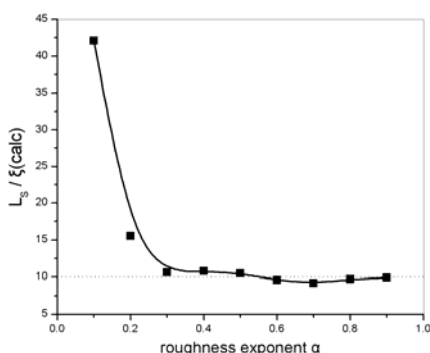
Στην παράγραφο αυτή θα εξετάσουμε τις σχέσεις μεταξύ των μηκών συσχέτισης (L_S και ξ) που δίνουν οι παραπάνω μέθοδοι καλύπτοντας έτσι ένα κενό στη βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, θα μελετήσουμε τη σχέση μεταξύ του ξ και L_S για πειραματικές και αλγοριθμικές γραμμές, ενώ θα αναφέρουμε τους κινδύνους που ελλοχεύουν στον προσδιορισμό του ξ από το φάσμα ισχύος.

Οι αλγοριθμικές γραμμές προκύπτουν από την εφαρμογή αλγορίθμου που βασίζεται σε κατάλληλη εφαρμογή του θεωρήματος Wiener-Kinship και οποίος δίνει γραμμές με προκαθορισμένη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης που πρέπει να περιέχει και τις τρεις παραμέτρους τραχύτητας. Έχει δείχτει ότι η πιο κατάλληλη επιλογή για αυτή είναι η συνάρτηση

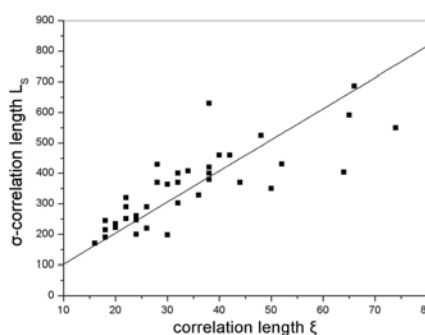
$$R(r) = \sigma^2 e^{-(r/\xi)^{2\alpha}} \quad (10)$$

Λεπτομέρειες για τα διάφορα βήματα της μεθόδου δίνονται στις [1, 7].

Για τη σύγκριση των ξ και L_C έχουν παραχθεί από τον αλγόριθμο γραμμές αποτελούμενες από 1024 σημεία και άρα με $L_{total}=1024$ (όλα τα μήκη και οι αποστάσεις μετριοούνται σε μονάδες του d). Επίσης, επιλέγουμε τιμές εισόδου για την $R(r)$ $\sigma=1$ και $\xi=50$, ενώ ο εκθέτης τραχύτητας παίρνει τιμές από 0.1 έως 0.9 με βήμα 0.1. Για κάθε μία επιλογή της τριάδας (σ, α, ξ) παράγονται από τον αλγόριθμο παραπάνω από 100 αυτό-αφινικές γραμμές για κάθε μια από την οποία υπολογίζεται η $G(r)$ και η $\sigma(L)$. Από αυτές υπολογίζεται το ξ και το L_S και συγκρίνονται οι μέσοι όροι τους. Το Σχ. 5 δείχνει το λόγο L_S/ξ για όλο το φάσμα των τιμών του α . Όπως είναι φανερό για $\alpha > 0.2$ ο λόγος αυτός τείνει στο 10, γεγονός που σημαίνει ότι για αυτό-αφινικές γραμμές το σ -μήκος συσχέτισης της καμπύλης $\sigma(L)$ συνδέεται με το μήκος συσχέτισης των συναρτήσεων συσχέτισης $G(r)$ και $R(r)$ ως $L_S \approx 10\xi$.



Σχ. 5. Ο λόγος του σ -μήκους συσχέτισης L_S με το μήκος συσχέτισης ξ σε όλο το φάσμα των τιμών του εκθέτη τραχύτητας α για αλγοριθμικές αυτοαφινικές γραμμές.



Σχ. 6. σ -μήκος συσχέτισης L_S και ξ για πειραματικές γραμμές που αντιστοιχούν στις ακμές νανοδομών πολυμερών μετά από λιθογραφική διεργασία. Η ευθεία γραμμή είναι η $L_S=10\xi$.

Ισχύει ωστόσο το ίδιο αποτέλεσμα και σε πειραματικές γραμμές; Διερευνήσαμε το ερώτημα αυτό σε γραμμές που περιγράφουν τη μορφολογία ακμών από δομές πολυμερών που χρησιμοποιούνται στη λιθογραφία και που έχουν διαστάσεις της τάξης των 100nm. Η τραχύτητα των ακμών αυτών γίνεται σημαντική όσο μειώνονται οι διαστάσεις των δομών στις οποίες αναφέρονται αφού επηρεάζουν τις ιδιότητές και τη συμπεριφορά τους. Οι γραμμές που περιγράφουν τις ακμές αυτές εξάγονται από την ανάλυση εικόνων κάτοψης του μικροσκοπίου ηλεκτρονικής σάρωσης δομών που έχουν παραχθεί με διαφορετικές συνθήκες λιθογράφησης και χρησιμοποιώντας διαφορετικά πολυμερή [8,9].

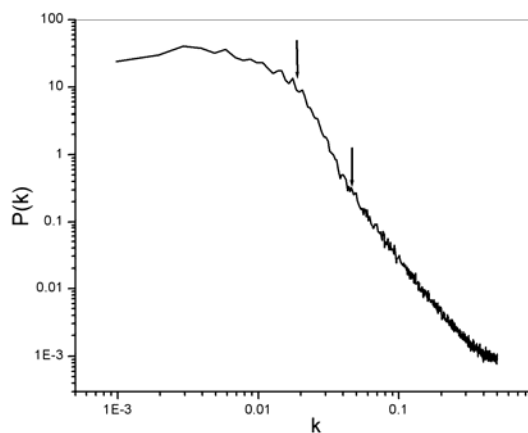
Τα αποτελέσματα από τη σύγκριση φαίνονται στο Σχ.6 όπου φαίνεται ότι η σχέση $L_S \approx 10\xi$ που είχε προκύψει από τις αλγοριθμικές γραμμές ισχύει και στις πειραματικές γραμμές με την αναμενόμενη φυσικά πειραματική απόκλιση [7].

Θα κλείσουμε την παράγραφο αυτή με αναφορά στα πιθανά προβλήματα που αντιμετωπίζει η συσχέτιση του ξ με το αντίστροφο της συχνότητας του «γόνατου» του φάσματος ισχύος της γραμμής. Τα προβλήματα αυτά συνδέονται με το γεγονός ότι το φάσμα ισχύος ακόμα και ενός πεπερασμένου ευθύγραμμου τμήματος (δηλ. γραμμής χωρίς καθόλου τραχύτητα) μήκους L έχει τη μορφή

$$F(k) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\sin(kL)}{k} \quad (11)$$

και επομένως εμφανίζει μείωση νόμου δύναμης και «γόνατο» καθώς αυξάνεται η συχνότητα έστω και αν δεν υπάρχει καθόλου τραχύτητα. Η συμπεριφορά αυτή σε μερικές περιπτώσεις αναμιγνύεται με την μείωση του φάσματος ισχύος λόγω αυτοαφινικής τραχύτητας με αποτέλεσμα να είναι δύσκολο στην τελική μορφή να διακριθεί η συμβολή της τραχύτητας από αυτή της σχέσης (11).

Ένα παράδειγμα που αναδεικνύει το πρόβλημα αυτό φαίνεται στο Σχ.7. όπου δείχνεται ο μέσος όρος των φασμάτων ισχύος πολλών αλγοριθμικών αυτοαφινικών γραμμών με $\alpha=0.9$ και $\xi=20$. Το προφανές «γόνατο» της καμπύλης (αριστερό βέλος) εμφανίζεται στη συχνότητα 0.02, η οποία αντιστοιχεί σε μήκος κύματος ≈ 50 αρκετά μεγαλύτερο από το πραγματικό (20). Αυτό συμβαίνει γιατί το γόνατο που θεωρήσαμε ουσιαστικά προέρχεται από την σχέση (11). Το πραγματικό μήκος συσχέτισης αντιστοιχεί στο δεξιό βέλος, από το οποίο μία προσεκτική παρατήρηση δείχνει ότι ξεκινά και η συμπεριφορά του νόμου δύναμης της τραχύτητας.

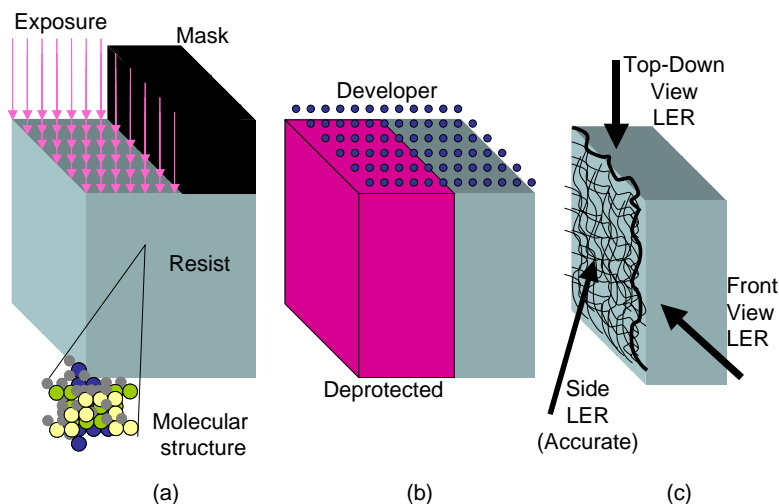


Σχ. 7. Το φάσμα ισχύος $P(k)$ μίας τυπικής αυτοαφινικής γραμμής με $\alpha=0.9$ και $\xi=20$ (πάντοτε $\sigma=1$). Τα δύο βέλη αντιστοιχούν σε $\xi=50$ (αριστερό βέλος) και $\xi=20$ (δεξιό βέλος).

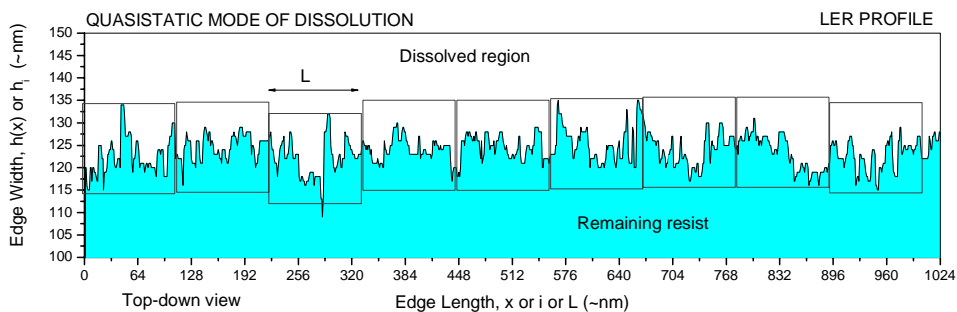
Η Προσομοίωση ως Μέσο Νάνο-Μετρολογίας

Η ομάδα μας έχει εφαρμόσει τη θεωρία διάλυσης πολυμερών μέσω του κρίσιμου ιονισμού σε έναν αλγόριθμο για την προσομοίωση της διάλυσης. Στην παρούσα εργασία ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιείται στη δι-διάστατη (2D) εκδοχή του για να προβλέψει το προφίλ της γραμμής του φωτοπολυμερούς κατά τη διάλυση του καθώς και την ΠΤ [10-14]. Η διαδικασία της προσομοίωσης ποιοτικά περιγράφεται στο Σχ. 8.

Ο αλγόριθμος μπορεί να προσομοιώσει τη διαδικασία αφαίρεσης υλικού και να παρουσιάσει τα αποτελέσματα με τρόπο που να μοιάζει με την απεικόνιση κάτοψης που δίνει το ΗΜΣ. Μια τέτοια περίπτωση φαίνεται στο Σχ. 9. Συγκεκριμένα απεικονίζεται μια περιοχή φωτοπολυμερούς που παραμένει (remaining resist), καθώς και μια που έχει διαλυθεί (Dissolved region). Η τραχύτητα δημιουργείται στη διεπιφάνεια των δύο.



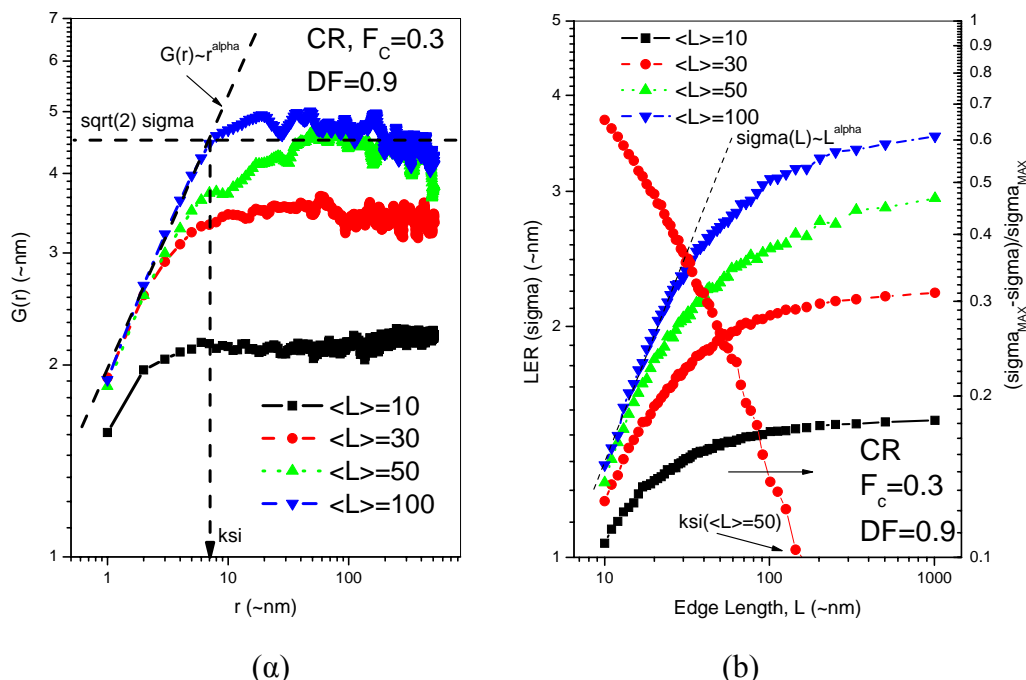
Σχ. 8. Ποιοτική παρουσίαση της διαδικασίας προσομοίωσης της διάλυσης/εμφάνισης του φωτοπολυμερούς. (α) Αρχική δομή, (β) έκθεση, αποπροστασία υλικού, (γ) μετρήσεις. Στο σχήμα ο όρος LER (Line Edge Roughness) αντιστοιχεί στην ΠΤ.



Σχ. 9. Παράδειγμα πλευράς φωτοπολυμερούς μετά την προσομοίωσης της διαδικασίας της εμφάνισης.

Υπολογίζοντας την τραχύτητα σε κλίμακες μήκους L , προκύπτει η εξάρτηση της (δηλ. του σ) από το L , όπως φαίνεται στο Σχ. 10b, για διάφορους βαθμούς πολυμερισμού, συμβατικού τύπου φωτοπολυμερές και για $F_c=0.3$, $DF=0.9$. Το F_c είναι το κρίσιμο ποσοστό ιονισμού, δηλαδή το πλήθος των ιονισμένων μονομερών προς το σύνολο των μονομερών μιας αλυσίδας φωτοπολυμερούς που είναι ικανό για να οδηγήσει την αλυσίδα σε διάλυση. Το DF είναι το συνολικό κλάσμα αποπροστατευμένων (δηλαδή ικανών προς ιονισμό) μονομερών στο πλέγμα.. Στο Σχ. 10a παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες καμπύλες $G(r)$ όπως προσδιορίζονται με εφαρμογή της σχέσης (2) στο προφίλ τραχύτητας που δίνει η προσομοίωση. Πολύ περισσότερες λεπτομέρειες και στοιχεία υπάρχουν στις [10-14]. Πάντως είναι σαφές ότι η ΠΤ μειώνεται με τη χρήση φωτοπολυμερών μικρότερου μοριακού βάρους.

Άρα είναι δυνατό να εκτιμήσουμε την επίπτωση που θα έχουν τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των φωτοπολυμερών (π.χ. κατανομή μήκους πολυμερισμού, αρχιτεκτονική αλυσίδων κτλ) σε μακροσκοπικά μεγέθη, όπως η ΠΤ και έτσι η προσομοίωση να δείξει προς την κατεύθυνση ελάττωσης της ΠΤ που είναι το τεχνολογικά επιθυμητό αποτέλεσμα για την περιοχή της κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.



Σχ. 10. (a) Προσομοίωση της $G(r)$ για διάφορους βαθμούς πολυμερισμού και συμβατικού τύπου φωτοπολυμερές. $F_c=0.3$, $DF=0.9$. (b) Οι αντίστοιχες $\sigma(L)$ καμπύλες. Ο εκθέτης τραχύτητας που προκύπτει από το γραμμικό τμήμα των δύο γραφημάτων είναι το ίδιο. Το μήκος συσχέτισης ξ από την $G(r)$ μέσω της σχέσης (4). Από την $\sigma(L)$ καμπύλη προσδιορίζεται μέσω της σχέσης $\sigma(L=\xi)=0.9\sigma(L_{max})$. Η τιμή του ξ που προκύπτει έτσι είναι 6 με 10 φορές μεγαλύτερη από την τιμή που δίνει η ανάλυση της $G(r)$.

Συμπεράσματα

Η τραχύτητα των υλικών στην νανο-κλίμακα είναι ιδιαίτερης σημασίας για τη σωστή λειτουργία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Παρουσιάστηκαν οι φυσικές αρχές ενός λογισμικού που ποσοτικοποιεί την πλευρικής τραχύτητα μέσω ανάλυσης φωτογραφιών κάτοψης των νανο-δομών καθώς και αποτελέσματα προσομοίωσης της διαδικασίας δημιουργίας αντίστοιχων δομών. Με τον τρόπο αυτό θα αποκτηθεί καλή επίγνωση των αιτιών που δημιουργούν και προάγουν την τραχύτητα έτσι ώστε να καταστεί δυνατό να ελεγχθεί και να ελαττωθεί.

Αναφορές

- [1] B.Y. Zhao, G.-C. Wang, and T.-M. Lu, *Characterization of Amorphous and Crystalline Rough Surface: Principles and Applications Experimental Methods in the Physical Sciences*, **37**, (Academic Press, New York 2001), vol. 37.
- [2] V. Constantoudis, G.P. Patsis, L.H.A. Leunissen and E. Gogolides, *J. Vac. Sci. Technol. B* **22**, 1974 (2004)
- [3] A.-L. Barabasi and H.E. Stanley, *Fractal Concepts in Surface Growth*, (Cambridge University Press, Cambridge, England, 1995).
- [4] J.Schmittbuhl, J.-P. Vilotte and S. Roux, *Phys. Rev. E*, **51**, 131 (1995)
- [5] A.R. Mehrabi, H. Rassamdana and M. Sahimi, *Phys. Rev. E*, **56**, 712 (1997)
- [6] J.G. Moreira, J. Kamphorst, L.Silva, and S.O. Kamphorst, *J. Phys. A*, **27**, 8079 (1994)
- [7] V. Constantoudis, E. Gogolides, J. Roberts and J.K. Stowers, *Proc. of SPIE* **5375** (2005).
- [8] G. P. Patsis, V. Constantoudis, A. Tserepi, and E. Gogolides, *J. Vac. Sci. Technol. B* **21**(3), 1008 (2003).

- [9] V. Constantoudis, G. P. Patsis, A. Tserepi, and E. Gogolides, *J.Vac.Sci.Technol. B* **21**(3), 1019 (2003).
- [10]. G. P. Patsis, *Polymer*, **46**(7), p. 2404 (2005).
- [11]. G. P. Patsis, *Mathematics and Computers in Simulation*, **68**(2), 145 (2005).
- [12]. L. H. A.Leunissen, et al., *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XIX..* San Jose, CA, USA: SPIE (2005).
- [13]. G. P. Patsis, V. Constantoudis, and E. Gogolides, *Microelectronic Engineering*, **75**(3), 297 (2004).
- [14]. G. P. Patsis, and E. Gogolides, *J. Vac. Sci. & Technol. B* **23**(4), 1371 (2005).