

# ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΝΑΝΟΔΟΜΩΝ ΣΥΝΔΥΑΖΟΝΤΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΤΟΜΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑΣ

**B. Κωνσταντούδης, Κ. Έλληνας, Γ. Μπουλούσης και Ε. Γογγολίδης**

**<sup>1</sup>Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας, ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος,  
15310 Αγία Παρασκευή, Ελλάδα  
e-mail: vconst@imel.demokritos.gr**

## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία διερευνούμε τις δυνατότητες της υβριδικής/ολιστικής προσέγγισης στη μέτρηση της νανοτραχύτητας επιφανειών υμενίων διαφόρων υλικών, συνδυάζοντας με συνεργατικό τρόπο δεδομένα από μετρήσεις με μικροσκόπιο ατομικής δύναμης (AFM) και με μικροσκόπιο σάρωσης ηλεκτρονικής δέσμης (SEM). Πιο συγκεκριμένα, η υβριδική/ολιστική μετρολογία υλοποιείται με τη λήψη: α) της κατανομής των υψών της επιφάνειας από τις μετρήσεις του AFM με δεδομένη την ακρίβεια του στη μέτρηση του ύψους των σημείων της επιφάνειας και β) της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης και του φάσματος ισχύος της επιφανειακής μορφολογίας από τις εικόνες κάτοψης του SEM λόγω της ικανοποιητικής ανάλυσης των εικόνων του. Ακολούθως, με κατάλληλο αλγόριθμο μοντελοποίησης και ανακατασκευής επιφανειών και με δεδομένα εισόδου τις παραπάνω συναρτήσεις, παράγονται συνθετικές επιφάνειες που προσομοιώνουν την πραγματική επιφάνεια. Οι επιφάνειες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό υβριδικών παραμέτρων τραχύτητας, όπως η πραγματική επιφάνεια, η καμπύλη δείκτη επαφής και γενικότερα οι στατιστικές παράμετροι των παραγώγων και καμπυλοτήτων της επιφάνειας. Αυτές οι παράμετροι είναι κρίσιμες σε εφαρμογές που η τραχύτητα των επιφανειών χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της διαβροχής τους από υγρά, της εναπόθεσης βιολογικού υλικού (πρωτεΐνες, κύτταρα) και της τριβής της με άλλες επιφάνειες. Σε αυτή την εργασία, ως παράδειγμα η μέθοδος εφαρμόζεται στον υπολογισμό του λόγου της πραγματικής προς την ονομαστική επιφάνεια ενός δείγματος κυκλικής ολεφίνης μετά από επεξεργασία της σε πλάσμα οξυγόνου.

**Λέξεις-Κλειδιά:** *Νανομετρολογία, ολιστική μετρολογία, υβριδική μετρολογία, τραχύτητα, ηλεκτρονική μικροσκοπία, ατομική μικροσκοπία*

## Abstract

In this work, we apply the hybrid/holistic approach to the characterization of the nanoroughness of film surfaces, combining in a synergetic manner the measurement data from Atomic Force and Scanning Electron Microscopes (AFM and SEM respectively). In particular, the hybrid approach is implemented by obtaining the height distribution function from AFM topographies (given the high accuracy in AFM height measurements) and the autocorrelation function or Fourier transform of the surface morphology from SEM images (given the high spatial resolution in SEM images). These functions are then used as input to an algorithm to generate random surfaces having similar roughness metrics to the real surface. These output surfaces may be finally employed to measure hybrid roughness parameters, such as the active surface area and the statistical parameters of the distributions of surface derivatives and curvatures. The latter parameters may be critical in many

applications where rough surfaces are used to control wetting behaviour, bioadhesion or tribological properties. As an example, we apply the hybrid approach to the estimation of the ratio of the real to the nominal surface of a sample of cyclic olefin etched in oxygen plasma.

Keywords: *Nanometrology, holistic/hybrid metrology, roughness, scanning electron microscopy, atomic force microscopy*

## 1. Εισαγωγή

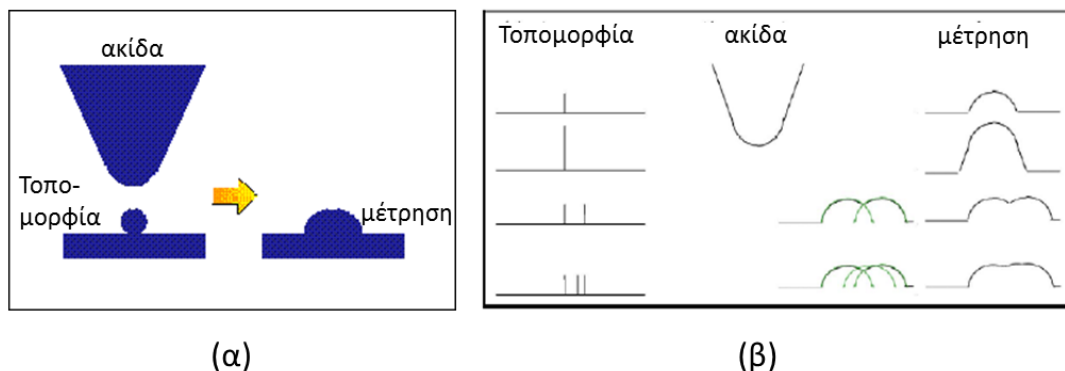
Ο παλαιότερος τρόπος για να δούμε σε μεγέθυνση τη μορφολογία της επιφάνειας ενός αντικειμένου είναι η χρήση του οπτικού μικροσκοπίου. Ωστόσο, η διακριτική ικανότητα του συνήθως περιορίζεται στα 200nm [τελευταία έχει κατορθωθεί η μείωση της διακριτικής ικανότητας στα 100nm, E.G. van Putten et al. (2011)] οπότε δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει τις ανάγκες μέτρησης και χαρακτηρισμού της μορφολογίας νανοδομών σε κλίμακα <100nm. Η μετρολογία τέτοιων νανοδομών (που αποτελεί μέρος της νανομετρολογίας) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες και κρισιμότερες προκλήσεις της νανοτεχνολογίας σήμερα, αφού παίζει αποφασιστικό ρόλο στην αξιολόγηση των υλικών και διεργασιών που χρησιμοποιούνται αλλά και στην εκτίμηση της απόδοσης των νανοδιατάξεων και συστημάτων που κατασκευάζονται. Για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης, την τελευταία τριαντακονταετία έχει αναπτυχθεί η μικροσκοπία σάρωσης με ακίδα (Scanning Probe Microscopy, SPM) στα οποία η προς μέτρηση επιφάνεια σαρώνεται με ακίδα διαμέτρου κάποιων νανομέτρων και σε κάθε θέση του πλέγματος σάρωσης καταγράφεται η τιμή του ύψους της επιφάνειας. Το πρώτο μικροσκόπιο αυτής της κατηγορίας που χρησιμοποιήθηκε ήταν το μικροσκόπιο σάρωσης σήραγγας (Scanning Tunneling Microscope, STM), ενώ σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα ακολούθησε το Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης (Atomic Force Microscope, AFM) το οποίο ξεπέρασε τον περιορισμό της μέτρησης επιφανειών αγωγίμων υλικών που είχε το STM και μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε επιφάνεια. Έκτοτε έχει παρατηρηθεί μία πραγματική έκρηξη στο χώρο αυτής της μικροσκοπίας και η ιδέα της μικροσκοπίας με ακίδα έχει εφαρμοστεί όχι μόνο στη μέτρηση της τοπογραφίας μιάς επιφάνειας αλλά και άλλων ιδιοτήτων της όπως της ελαστικότητας, αγωγιμότητας, μαγνήτισης, πυκνότητας κλπ. Τα μικροσκόπια αυτά θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως φυσιολογική επέκταση στις δύο διαστάσεις και στη νανοκλίμακα του προφίλομετρου που χρησιμοποιούνταν από παλιά στη βιομηχανία αλλά και σε ερευνητικά εργαστήρια για τη μέτρηση της τοπογραφίας προφίλ (περιγράμματος) επιφανειών στην μικροκλίμακα.

Το μεγάλο πλεονέκτημα των SPM και ειδικότερα του AFM (στο οποίο θα περιοριστούμε σε αυτή την εργασία) είναι η δυνατότητα ποσοτικής μέτρησης του ύψους της επιφάνειας σε κάθε σημείο του πλέγματος που πραγματοποιείται η μέτρηση. Με άλλα λόγια, το μικροσκόπιο δεν δίνει απλώς μία εικόνα της επιφάνειας όπως το οπτικό μικροσκόπιο ή τα μικροσκόπια με ηλεκτρονική δέσμη (βλ. παρακάτω), αλλά παρέχει τη συνάρτηση ύψους (τοπομορφία) της επιφάνειας  $z(x_i, y_j)$  (με πολύ μεγάλη ακρίβεια στον προσδιορισμό του ύψους), όπου  $x_i$  και  $y_j$  είναι οι συντεταγμένες του πλεγματοειδούς σημείου που πραγματοποιείται η μέτρηση.

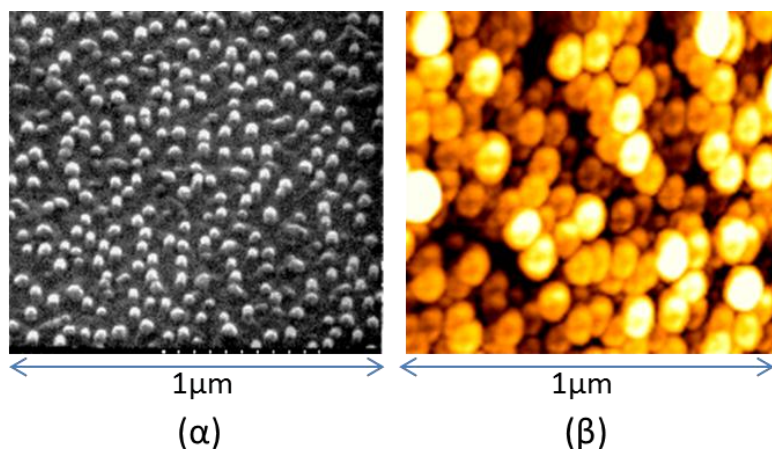
Ωστόσο, η ακρίβεια και αξιοπιστία της μέτρησης της τοπομορφίας επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες που σχετίζονται με περιορισμούς του μικροσκοπίου. Ο πρώτος είναι ότι η μέτρηση παραγματοποιείται σε τετραγωνικό πλέγμα σημείων που μπορεί να φτάσει μέχρι 1024x1024 σημεία αν και συνήθως περιορίζεται στα 256x256 ή 512x512. Αυτό σημαίνει ότι αν πρέπει να μετρηθεί μία μεγάλη επιφάνεια αυτό γίνεται σε βάρος της ανάλυσης της μέτρησης και της συμπερίληψης σε αυτή των λεπτομερειών (υψίσυχνων

διακυμάνσεων) της τοπομορφίας. Ο δεύτερος και πιο σημαντικός περιορισμός, προέρχεται από το μέγεθος της ακίδας που βρίσκεται στην άκρη του βραχίονα και που έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια για να πραγματοποιήσει τη μέτρηση. Όπως φαίνεται στο σχ. 1α, το αποτέλεσμα της μέτρησης της διάστασης μίας προεξοχής στην τοπομορφία μίας επιφάνειας επηρεάζεται σημαντικότερα από την ακτίνα της άκρης της ακίδας ιδιαίτερα στη νανοκλίμακα. Υποθέτοντας σφαιρικό σχήμα τόσο για την ακίδα όσο και για την προεξοχή εύκολα μπορεί να δειχθεί ότι το εύρος της μετρούμενης προεξοχής στην επιφάνεια εκτιμάται:

$$w_{meas} = 2\sqrt{w_{tip}w_{sample}} \quad (1)$$



Σχήμα 1. Επίδραση του μεγέθους της ακίδας του AFM στη μέτρηση μίας επιφανειακής απομονωμένης προεξοχής με σχήμα νανοσωματιδίου (α) και μίας ομάδας γειτνιαζόντων νανοαντικειμένων (β).



Σχήμα 2. Εικόνες νανοδομών In που σχηματίζονται σε επιφάνειες InP μετά από ιονοβολή όπως φαίνονται από (SEM) (α) και από AFM (β). Η σύγκρισή τους δείχνει καθαρά την επίδραση του μεγέθους της ακίδας στη μετρούμενη διάμετρο και τη διάκριση των νανοδομών (Seah et al. 2000]

με  $w_{tip}$  και  $w_{sample}$  το εύρος (η διάμετρος) της άκρης της ακίδας και της προεξοχής της πραγματικής επιφάνειας αντίστοιχα. Για  $w_{tip}=w_{sample}$  το μετρούμενο εύρος θα είναι διπλάσιο του πραγματικού. Πέρα από την επίδραση στη μέτρηση της κάθε προεξοχής χωριστά, το εύρος της ακίδας επηρεάζει επίσης και την ανάλυση της μέτρησης αφού δύο ή περισσότερα αντικείμενα που βρίσκονται μέσα στην περιοχή της επίδρασης του μεγέθους ακίδας απεικονίζονται στην εικόνα AFM ως μία ενιαία δομή (βλ. σχ. 1β). Στο σχ. 2 φαίνεται δείγμα δομών In σε επιφάνεια InP μετρημένο με SEM (α) και AFM (β)

χρησιμοποιώντας την ίδια μεγέθυνση. Είναι ευκρινής η αύξηση του εύρους των δομών και η πύκνωσή τους στην εικόνα AFM λόγω του μεγέθους της ακίδας.

Ένα επιπλέον πρόβλημα στη λήψη εικόνων AFM ανακύπτει όταν η ακίδα συναντάει στη κατεύθυνση σάρωσής μεγάλες υψομετρικές διαφορές. Σε αυτή την περίπτωση, η μέτρηση αποσυντονίζεται και η ακίδα εκτελεί αναξιόπιστες μετρήσεις. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται συνήθως φαινόμενο αιώρησης της ακίδας (flying tip effect) και για τη θεραπεία του προτείνεται η μείωση της ταχύτητας σάρωσης ή της δύναμης αναφοράς συχνά όμως χωρίς ουσιαστικό αποτέλεσμα.

Μία άλλη μικροσκοπία που έχει αναπτυχθεί στη λογική της σάρωσης της επιφάνειας είναι η μικροσκοπία σάρωσης με ηλεκτρονική δέσμη (Scanning Electron Microscopy, SEM) στην οποία αντί για την ακίδα η επιφάνεια σαρώνεται από μία στενή δέσμη ηλεκτρονίων και το καταγραφόμενο σήμα καθορίζεται από τα εκπεμπόμενα από την επιφάνεια δευτερογενή ηλεκτρόνια. Η ανάλυση του SEM είναι εξαιρετικά υψηλή (της τάξης του 1nm) με αποτέλεσμα να παρέχει αξιόπιστη και λεπτομερή απεικόνιση της χωρικής διάταξης των εικονιζομένων δομών. Από την άλλη πλευρά όμως, όπως και το οπτικό μικροσκόπιο, δεν μπορεί να δώσει το ύψος των σημείων της μετρούμενης δομής εκτός να εφαρμοσθούν σχετικά πολύπλοκες τεχνικές φωτογραμμετρίας κατάλληλα προσαρμοσμένες στη μικροσκοπία.

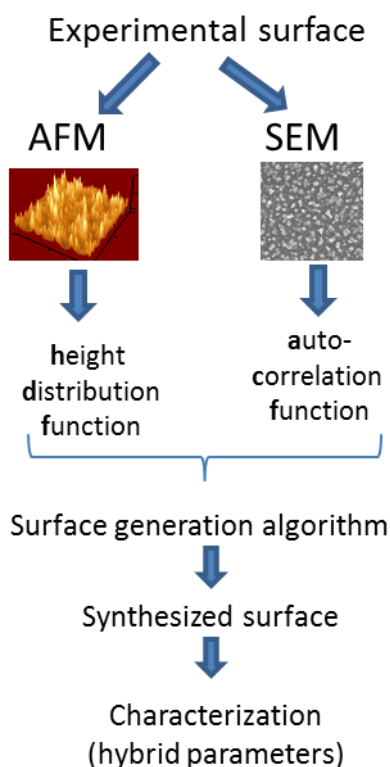
Κατά συνέπεια και οι δύο τεχνικές μικροσκοπίας (AFM και SEM) παρουσιάζουν μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα στη μέτρηση της νανοτοπομορφίας επιφανειών. Η κατάσταση αυτή είναι αρκετά συνήθη στη διαστατική νανομετρολογία, και τα τελευταία χρόνια για την αντιμετώπισή της έχει προταθεί η ιδέα της ολιστικής ή υβριδικής μετρολογίας. Σύμφωνα με αυτήν, τα αποτελέσματα δύο ή περισσότερων μεθόδων μέτρησης συνδυάζονται με τρόπο συνεργατικό ώστε να χρησιμοποιηθούν τα πλεονεκτήματα της κάθε μεθόδου ελαχιστοποιώντας τις επιπτώσεις των μειονεκτημάτων τους. Εώς τώρα, η ιδέα αυτή έχει βρει πρόσφορο έδαφος υλοποίησης στη μέτρηση των διαστάσεων γραμμικών και κυλινδρικών νανοδομών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων στο εξαιρετικά απαιτητικό από πλευράς ακρίβειας μετρήσεων χώρο της νανοηλεκτρονικής [Foucher 2011, Void et al. 2011].

Στην παρούσα εργασία διερευνούμε τις δυνατότητες της υβριδικής/ολιστικής προσέγγισης στη μέτρηση της νανοτραχύτητας επιφανειών πολυμερικών υλικών, συνδυάζοντας δεδομένα από μετρήσεις υψών με AFM με μετρήσεις της χωρικής διάταξης των επιφανειακών νανοδομών από SEM. Πιο συγκεκριμένα, από τις μετρήσεις του AFM λαμβάνουμε τη συνάρτηση κατανομής υψών και από το SEM τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης ή/και το φάσμα ισχύος της επιφανειακής μορφολογίας.

Μία ενδιαφέρουσα διαφοροποίηση από τις μέχρι τώρα εφαρμογές της υβριδικής προσέγγισης είναι ότι από όσο ξέρουμε για πρώτη φορά δοκιμάζεται στη μέτρηση ενός στοχαστικού φαινομένου όπως η τραχύτητα μιάς επιφάνειας. Για να γίνει αυτό, η υβριδική προσέγγιση συνοδεύεται από μοντελοποίηση και αλγορίθμους ανακατασκευής επιφανειών με ελεγχόμενα στατιστικά χαρακτηριστικά. Λεπτομερής παρουσίαση της μεθόδου θα γίνει στην επόμενη παράγραφο 2, ενώ στην επόμενη θα αναφερθούν οι συνθήκες παραγωγής των πειραματικών επιφανειών που θα εξετασθούν (κυκλικές ολεφίνες) και των μετρήσεών τους. Στη συνέχεια (παράγραφος 4), τα πρώτα αποτελέσματα της προτεινόμενης υβριδικής μεθόδου από εφαρμογή της στις πολυμερικές επιφάνειες θα παρουσιασθούν, ενώ η εργασία μας θα κλείσει με τα συμπεράσματα και τις προοπτικές στην τελευταία παράγραφο.

## 2. Περιγραφή της υβριδικής μεθόδου χαρακτηρισμού στοχαστικών νανοτοπομορφιών

Το σχεδιάγραμμα ροής της προτεινόμενης υβριδικής μεθοδολογίας χαρακτηρισμού της τραχύτητας επιφανειών παρουσιάζεται στο σχ. 3. Πρώτα, λαμβάνονται μετρήσεις της μορφολογίας της πειραματικής επιφάνειας με AFM και εικόνες κάτοψης με SEM. Από τις εικόνες AFM λαμβάνεται η συνάρτηση κατανομής υψών των σημείων της επιφάνειας και από τις εικόνες του SEM υπολογίζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης των εντάσεων των εικονοστοιχείων. Ο προσδιορισμός των βέλτιστων παραμέτρων μέτρησης για τη λήψη των πιο κατάλληλων εικόνων από τα μικροσκόπια είναι υπό μελέτη, αν και βασιζόμενοι στα πρώτα αποτελέσματα θεωρούμε ότι η μέθοδος είναι αρκετά ανθεκτική σε αυτές.



Σχήμα 3. Σχηματικό διάγραμμα ροής της υβριδικής μεθόδου σύνθεσης μετρήσεων AFM και SEM διαμέσου της συνάρτησης κατανομής υψών και της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης αντίστοιχα. Οι δύο συναρτήσεις εισάγονται ως δεδομένα εισόδου σε αλγόριθμο ανακατασκευής επιφανειών και οι εξαγόμενες επιφάνειες που προσομοιώνουν την αρχική πειραματική χρησιμοποιούνται για το χαρακτηρισμό της τραχύτητας της.

Μετά τον υπολογισμό της κατανομής των υψών και της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης, ακολουθεί η παραγωγή τυχαίων επιφανειών που να χαρακτηρίζονται από αυτές τις συναρτήσεις. Είναι γνωστό, ότι η πρώτη (κατανομή των υψών) περιγράφει με τον πιο πλήρη τρόπο την καλούμενη καθύψος ή κάθετη τραχύτητα (amplitude or vertical roughness) της επιφάνειας που αφορά την ανάπτυξή της κατά την κάθετη στο μέσο επίπεδο της κατεύθυνση, ενώ η δεύτερη (συνάρτηση αυτοσυσχέτισης) χαρακτηρίζει την κατά μήκος ή χωρική τραχύτητα (horizontal or spatial roughness) που ισοδυναμεί με τη διάταξη στο χώρο των σημείων της επιφάνειας. Η χωρική τραχύτητα μπορεί επίσης να περιγραφεί με άλλες συναρτήσεις συσχέτισης (όπως η συνάρτηση συσχέτισης διαφοράς

υψών) ή αν μετασχηματισθεί στο χώρο των χωρικών συχνοτήτων με το αντίστοιχο φάσμα ισχύος όπως αυτό προκύπτει από τον διδιάστατο μετασχηματισμό Fourier της επιφάνειας. Η παραγωγή επιφανειών με δεδομένες την κατανομή και τη συνάρτησης αυτοσυσχέτισης των υψών των σημείων επιφάνειας αρχικά αντιμετωπίστηκε με τη βοήθεια μοντέλων κινούμενου μέσου όρου (Moving Average, MO) ή αυτοπροσαρμογής με κινούμενο μέσο όρο (Auto-Regressive Moving Average, ARMA). Σε αυτά, αρχικά δημιουργούνταν μία επιφάνεια με τυχαία ύψη που να χαρακτηρίζονται από την επιθυμητή κατανομή υψών (συνήθως γκαουσιανή). Στη συνέχεια, οι συσχετίσεις μεταξύ των σημείων της επιφάνειας επιβάλλονταν διαμέσου των προαναφερόμενων μοντέλων των οποίων οι παράμετροι προσδιορίζονταν ώστε να προσδωθεί στην επιφάνεια η προκαθορισμένη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (γκαουσιανή ή εκθετική συνήθως). Σύντομα διαπιστώθηκε ότι μία παραλλαγή της μεθόδου με τη χρήση του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier είναι πίο αποτελεσματική και γρήγορη [Mack, 2011, Hu et al. 2011]. Τα βήματα αυτής της μεθόδου (που θα χρησιμοποιηθεί παρακάτω) για την παραγωγή μιάς επιφάνειας με NxN σημεία είναι:

α) Με τεχνικές Monte Carlo (μέθοδος αποδοχής-απόρριψης) παράγονται τυχαίοι αριθμοί που διατάσσονται σε επιφάνεια NxN με κατανομή αυτή που προέκυψε από τις μετρήσεις AFM.

β) Υπολογίζεται ο μετασχηματισμός Fourier της τυχαίας επιφάνειας που δημιουργήθηκε στο α).

γ) Υπολογίζεται ο μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης που προέκυψε από την ανάλυση των εικόνων SEM.

δ) Πολλαπλασιάζουμε τα πλάτη δύο παραπάνω μετασχηματισμών Fourier.

ε) Υπολογίζουμε τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier του γινομένου του δ) και με κατάλληλη κανονικοποίηση προκύπτει η ζητούμενη συνθετική επιφάνεια που προσομοιώνει την αρχική πειραματική.

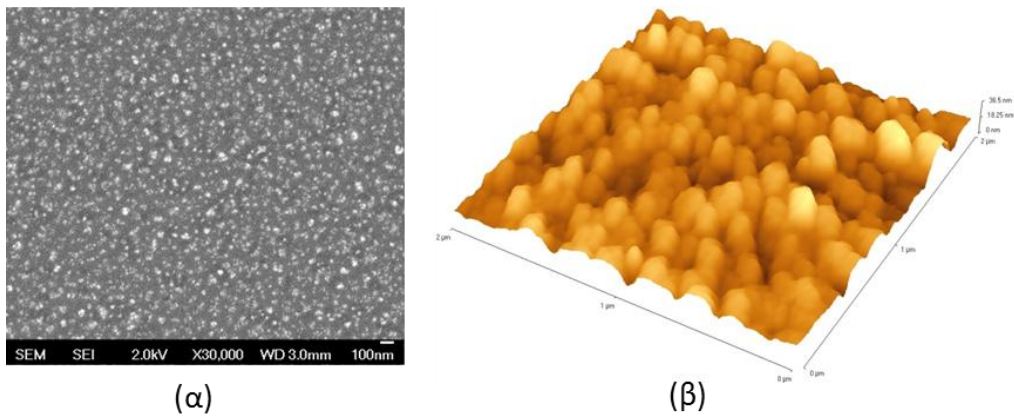
Η παραγόμενη επιφάνεια, χωρίς περιορισμούς ανάλυσης και έκτασης, χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των παραμέτρων τραχύτητας. Το κυρίως ζητούμενο είναι ο υπολογισμός των υβριδικών παραμέτρων τραχύτητας (πραγματική επιφάνεια, μέση τετραγωνική κλίση, καμπύλη δείκτη επαφής κλπ.) αφού αυτές οι καθύψος και κατα μήκος παράμετροι μπορούν να υπολογιστούν από τη συνάρτηση κατανομής του AFM και τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης των εικόνων SEM.

### 3. Εφαρμογή της μεθόδου - Πειραματικά δεδομένα και μετρήσεις

Η πειραματική επιφάνεια στην οποία χάρη παραδείγματος θα εφαρμοσθεί η μέθοδος που περιγράφηκε παραπάνω έχει προκύψει από εγχάραξη διάρκειας ενός λεπτού πολυμερικού υμενίου κυκλικής ολεφίνης σε πλάσμα οξυγόνου.

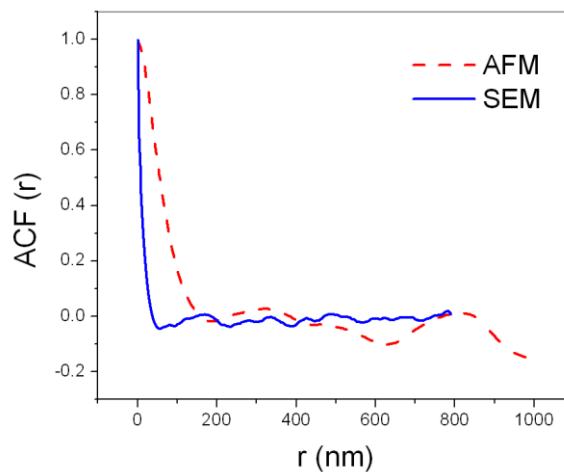
Η μέτρηση της μορφολογίας της επιφάνειας έγινε με SEM (JEOL JSM -7401f FESEM) και με AFM (Veeco CP-II). Η μέτρηση με SEM έγινε με δέσμη ηλεκτρονίων ενέργειας 2keV ενώ η μεγέθυνση της ληφθείσας εικόνας ήταν x30000 και η διάσταση του εικονοστοιχείου 3.125nm. Η μέτρηση με AFM πραγματοποιήθηκε σε τετραγωνικό πλέγμα 256x256 σημείων με συνολικό μήκος πλευράς 2μm ενώ η ταχύτητα σάρωσης ήταν 2μm/sec. Το εύρος της άκρης της ακίδας εκτιμάται ~20nm.

Στο σχ. 4 δείχνονται οι εικόνες SEM και AFM της επιφανειακής τοπομορφίας που ελήφθησαν με τις παραπάνω συνθήκες και οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στην εφαρμογή της υβριδικής μεθόδου που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο.



Σχήμα 4. Η επιφάνεια του υμενίου της κυκλικής ολεφίνης μετά από την ξηρή εγχάραξη σε πλάσμα οξυγόνου όπως φαίνεται σε εικόνα κάτωης SEM (α) και στη μέτρηση με AFM (β) σε παρόμοια κλίμακα.

Ποιοτική σύγκριση των δύο εικόνων δείχνει τη διεύρυνση των προεξοχών της επιφάνειας στην μέτρηση του AFM λόγω της επίδρασης του μεγέθους της ακίδας. Αυτή εκδηλώνεται ποσοτικά στη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης ACF της επιφάνειας AFM που διαφέρει σημαντικά από την αντίστοιχη της εικόνας SEM όπως φαίνεται στο σχ.5.



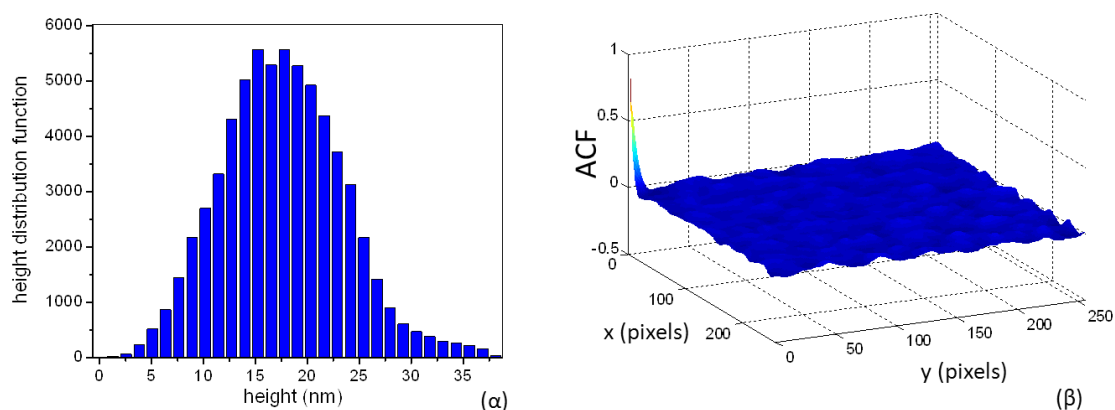
Σχήμα 5. Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης ACF(r) της πολυμερικής επιφάνειας υπολογισμένη από την εικόνα SEM (συνεχής γραμμή) και την εικόνα AFM (διακεκομμένη γραμμή). Φαίνεται καθαρά οι αυξημένες συσχετίσεις στην επιφάνεια του AFM που επάγει το μέγεθος της ακίδας.

#### 4. Εφαρμογή της μεθόδου - Αποτελέσματα

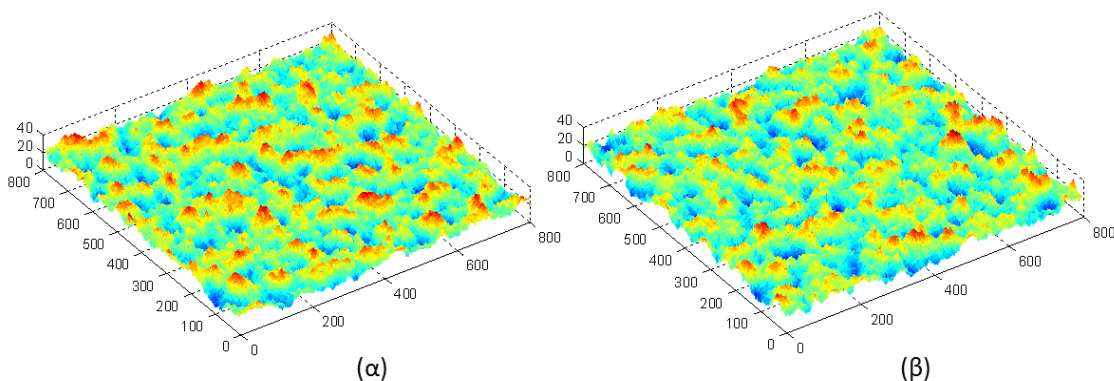
Το πρώτο βήμα της υβριδικής μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2, μετά τη λήψη των εικόνων από τα μικροσκόπια είναι ο υπολογισμός της κατανομής υψών από την επιφάνεια AFM και της διδιάστατης συνάρτησης αυτοσυσχέτισης από την εικόνα SEM. Για τη συγκεκριμένη πειραματική επιφάνεια (βλ. σχ.4), οι συναρτήσεις κατανομής υψών και αυτοσυσχέτισης φαίνονται στο σχ.6.

Με δεδομένα εισόδου αυτές τις συναρτήσεις, ο αλγόριθμος παραγωγής επιφανειών με χρήση τεχνικών Monte Carlo και του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier δίνει επιφάνειες που δύο παραδείγματά της παρουσιάζονται στο σχ. 7. Οι συνθετικές αυτές επιφάνειες προσομοιώνουν την αρχική πειραματική τοπομορφία αφού χαρακτηρίζονται

από χωρική διάταξη των προεξοχών της παρόμοιας αυτής της εικόνας SEM (βλ. σχ. 4α) και κατανομή υψών παρόμοια με τη μέτρηση AFM (βλ. σχ.4β).



Σχήμα 6. Συνάρτηση κατανομής των υψών της επιφάνειας από τη μέτρηση AFM (α) και η διδιάστατη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης ACF(r) όπως υπολογίστηκε από την εικόνα SEM (β)



Σχήμα 7. Δύο παραδείγματα επιφανειών που έχουν παραχθεί από την υβριδική μέθοδο με δεδομένα εισόδου τη συνάρτηση κατανομής υψών και τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σχ. 6.

Κατά συνέπεια, οι επιφάνειες αυτές και όσες παράγονται με παρόμοια δεδομένα εισόδου και παραμέτρους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση κυρίως των υβριδικών παραμέτρων τραχύτητας που εξαρτώνται τόσο από την καθύψος όσο και από την καταμήκος ανάπτυξη της επιφάνειας. Για παράδειγμα υπολογίστηκε ο λόγος του εμβαδού της πραγματικής επιφάνειας προς την ονομαστική και βρέθηκε  $1.34 \pm 0.3$ . Ο υπολογισμός του σφάλματος προήλθε από την πολλαπλή εφαρμογή της μεθόδου και τον υπολογισμό του λόγου σε πολλές επιφάνειες.

## 5. Σύνοψη

Στην εργασία αυτή προτείνεται μία υβριδική μέθοδος χαρακτηρισμού της τραχύτητας νανοδομημένων επιφανειών η οποία συνθέτει δεδομένα από AFM και SEM εκμεταλλευόμενη την ακρίβεια στις μετρήσεις υψών του AFM και την ανάλυση της χωρικής διάταξης των δομών στις εικόνες SEM. Η σύνθεση γίνεται με τη βοήθεια αλγόριθμου μοντελοποίησης και παραγωγής επιφανειών με δεδομένα εισόδου τη



συνάρτηση κατανομής των υψών της επιφάνειας όπως λαμβάνεται από AFM και τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης που υπολογίζεται από τις εικόνες του SEM. Οι παραγόμενες επιφάνειες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση διαφόρων παραμέτρων με έμφαση στις υβριδικές παραμέτρους που δεν μπορούν να υπολογισθούν μόνο από μετρήσεις ύψους ή χωρικής διάταξης.

Επίσης, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου σε πολυμερική επιφάνεια νανοδομημένη με ξηρή εγχάραξη πλάσματος οξυγόνου και δίνεται ο υπολογισμός του λόγου της πραγματικής προς την ονομαστική επιφάνεια που αποτελεί κρίσιμη υβριδική παράμετρο για τον καθορισμό των ιδιοτήτων διαβροχής της επιφάνειας.

Τα επόμενα βήματα περιλαμβάνουν περισσότερες εφαρμογές της μεθόδου, επικύρωση της ακρίβειας της με τη βοήθεια σύγκρισης με ακριβή δεδομένα μέτρησης και λεπτομερή αξιολόγηση των υποθέσεων και παραδοχών της.

Τέλος, αξίζει να διευκρινιστεί ότι η μέθοδος δεν περιορίζεται στη νανοκλίμακα και στη σύνθεση των συγκεκριμένων τεχνικών μικροσκοπίας. Θα μπορούσε, για παράδειγμα, να εφαρμοσθεί κατάλληλα προσαρμοσμένη σε δεδομένα προφιλόμετρου και οπτικού μικροσκοπίου για τον καθορισμό της μικροτραχύτητας επιφανειών.

## 6. Βιβλιογραφία

Foucher, J., ‘*Hybrid CD Metrology Concept compatible with high volume manufacturing*’ in Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXV, Proc. SPIE., 7971, 2011

Hu Y.Z. and Tonder K., ‘*Simulation of 3-D Random Rough Surface By 2-D Digital Filter And Fourier Analysis*’, Int. J. Mach. Tools Manufact., 32, pp. 83-90, 1992.

Mack C.A., ‘*Generating random rough edges, surfaces, and volumes*’, Applied Optics , 52, p.p. 1472-1481, 2013

Seah M.P., Spencer S.J., Cumpson P.J. and Johnstone J.E., Surface and interface Analysis, **29**, p. 782, 2000

Vaid, A. et al. ‘*A holistic metrology approach: hybrid metrology utilizing scatterometry, CD-AFM, and CDSEM*,’ in Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXV, Proc. SPIE vol. 7971, 2011

van Putten E.G., Akbulut D., Bertolotti J., Vos W.L., Lagendijk A., and Mosk A.P., ‘*Scattering Lens Resolves Sub-100 nm Structures with Visible Light*’, Phys. Rev. Lett. 106, 2011