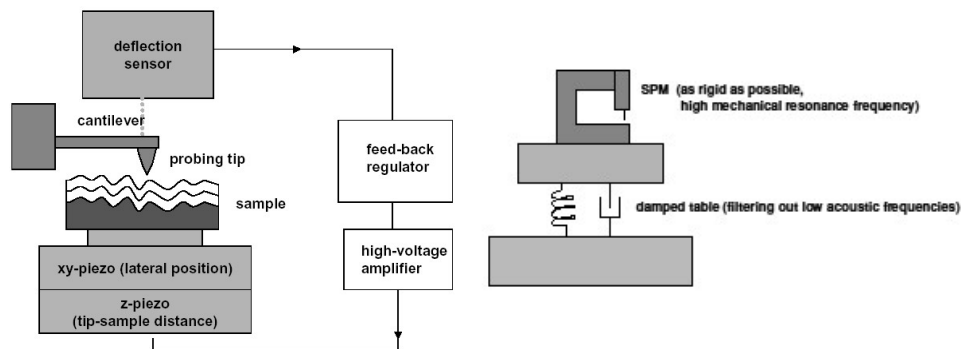


# 1. Μελέτη Επιφανειών και Επιφανειακών Ατελειών

## 1.1. Εισαγωγή

Τα επιτεύγματα της σύγχρονης επιστήμης και τεχνολογίας σχετίζονται άμεσα με την εισαγωγή σε πειραματικό επίπεδο της νέας τεχνικής Σαρωτικής Μικροσκοπίας Ανίχνευσης – Scanning Probe Microscope (SPM), η οποία επιτρέπει την απεικόνιση, τη διάγνωση και την τροποποίηση ενός δείγματος με χωρική ανάλυση σε επίπεδο νανομέτρου. Με την τεχνική SPM μπορούν να πραγματοποιηθούν άμεσα πειράματα με επίπεδο μορίων και ατόμων, όχι μόνο για τη βασική έρευνα, αλλά και για την εφαρμοσμένη νανο-τεχνολογία.



Σχήμα 1.1-1 Σχηματική αναπαράσταση της τεχνικής SPM & του μηχανικού ισοδυναμίου της

Η SPM βασίζεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ μίας ακίδας, η οποία προσεγγίζει το υπό μελέτη δείγμα σε μία απόσταση μικρής κλίμακας  $\lambda$ , όπου  $\lambda$  είναι το χαρακτηριστικό μήκος αλληλεπίδρασης "ακίδας - αντικειμένου". Για να αποκτηθεί η εικόνα της επιφάνειας του υπό μελέτη αντικειμένου και να εξαχθούν χωρικά οι φυσικές και χημικές ιδιότητες, χρησιμοποιούνται συστήματα ακριβείας μηχανικής σάρωσης της ακίδας, όπου ένας βρόχος ανάδρασης σταθεροποιεί τις παραμέτρους της νανο-επαφής μεταξύ της ακίδας και του αντικειμένου κατά τη σάρωση. Η χωρική ανάλυση της SPM καθορίζεται από το συγκεκριμένο μέγεθος της νανο-επαφής μεταξύ της ακίδας και του δείγματος και μπορεί να φτάσει στην ατομική κλίμακα.

Η φύση της αλληλεπίδρασης μεταξύ της ακίδας και του δείγματος μπορεί να παρουσιάζει αρκετές διαφοροποιήσεις. Έτσι έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές

SPM μέτρησης. Η Σαρωτική Μικροσκοπία Σήραγγας (*Scanning Tunnel Microscopy*, STM) ανιχνεύει ένα ρεύμα σήραγγας, που ρέει ανάμεσα στην ακίδα και το δείγμα. Η Σαρωτική Μικροσκοπία Δυνάμεων (*Scanning Force Microscopy*, SFM) ανιχνεύει μια τοπική δύναμη, που αναπτύσσεται μεταξύ της ακίδας και του δείγματος, και οφείλεται σε Van der Waals, ηλεκτροστατικές ή μαγνητικές αλληλεπιδράσεις, τριβή, κλπ. Η λειτουργία της Οπτικής Μικροσκοπίας Σάρωσης Κοντινού Πεδίου (*Scanning Near Field Optical Microscopy*, SNOM) βασίζεται στη χρήση των οπτικών φωτονίων, που υπάρχουν σε ένα μικρής κλίμακας διάκενο (του οποίου η διάμετρος είναι μικρότερη από το μήκος κύματος του φωτός). Υπάρχουν και άλλοι τύποι SPM τεχνικών, όπως Μικροσκοπία Χωρητικότητας (ανίχνευση της τοπικής χωρητικότητας), Μικροσκοπία Ακουστικών Φαινομένων (ανίχνευση ταλαντώσεων ήχου), Ηλεκτροχημική Μικροσκοπία (ανίχνευση ρευμάτων από τοπικές ηλεκτροχημικές αντιδράσεις), κλπ.

Οι SPM τεχνικές επιτρέπουν όχι μόνο την απεικόνιση και τη διάγνωση μικρο- και νανο-αντικειμένων ποικίλης φύσης, αλλά και τον χειρισμό μεμονωμένων νανο-αντικειμένων και τροποποίηση της δομής τους με υψηλή χωρική ανάλυση. Για να επιτευχθεί αυτό, ηλεκτρικά ρεύματα υψηλής πυκνότητας, ισχυρά ηλεκτρικά πεδία και μηχανικές πιέσεις χρησιμοποιούνται, τα οποία μπορούν εύκολα να παραχθούν σε επαφή στη "νανοκλίμακα".

Το πρώτο SPM παρουσιάστηκε από τον Young (Young R. Phys. Today, V.24, P.42. (1971)), με το οποίο ανιχνεύτηκε η αυτόματη εκπομπή ρεύματος κατά τη σάρωση μίας μεταλλικής ακίδας πάνω σε μία επιφάνεια. Η πειραματική προσέγγιση του Young αναπτύχθηκε από τους G. Binnig και G. Rohrer, με αποτέλεσμα την εμφάνιση του SPM με ατομική χωρική ανάλυση. Στους δύο τελευταίους απονεμήθηκε το Βραβείο Νόμπελ Φυσικής το 1986.

## 1.2. Σκοπός

Καθώς το SPM έγινε ένα από τα βασικά εργαλεία της νανο-τεχνολογίας, η οποία, με τη σειρά της είναι μία από τις κινητήριες δυνάμεις της επιστημονικής ανάπτυξης σήμερα, η αναγκαιότητα της ενσωμάτωσης του SPM στην εκπαιδευτική διαδικασία είναι προφανής. Η διάταξη του NanoEducator SPM αναπτύχθηκε για να εξυπηρετήσει ακριβώς αυτό το σκοπό.

Ο NanoEducator SPM επιτρέπει την υλοποίηση διαφόρων τεχνικών μέτρησης που βασίζονται στο φαινόμενο σήραγγας και στη μικροσκοπία ατομικών δυνάμεων ημι-επαφής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη όχι μόνο εκπαιδευτικών, αλλά και επιστημονικών στόχων, που εφαρμόζονται στους τομείς της μικρο- και νανο-δομικής φυσικής και τεχνολογίας, της επιστήμης των υλικών, της κατάλυσης, της φυσικής και χημείας πολυμερών, της τριβολογίας και της κυτταρολογικής εξέτασης.

Σε αυτό το εργαστήριο θα δοθούν οι πρώτες αρχές της σαρωτικής μικροσκοπίας ανίχνευσης, θα παρουσιαστεί αναλυτικά η πειραματική διάταξη και η αρχή λειτουργίας του NanoEducator, με την οποία θα πραγματοποιηθούν πειράματα μελέτης της επιφανειακής τοπογραφίας αντιπροσωπευτικών δειγμάτων (δοκίμια αναφοράς) αλλά και δειγμάτων επιστημονικού και τεχνολογικού ενδιαφέροντος με τις τεχνικές SFM και STM. Πριν τη διεξαγωγή των πειραμάτων σάρωσης θα πραγματοποιηθεί η κατασκευή ή/και η αποκατάσταση των ακίδων μέσω ηλεκτροχημικών διεργασιών, που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή – καταγραφή των πειραματικών δεδομένων.

### 1.3. Απαιτούμενες γνώσεις

Με τη μη καταστρεπτική επιφανειακή τεχνική SPM μπορούμε να εξετάσουμε την επιφάνεια ενός δείγματος με τη βοήθεια μιας αιχμηρής ακίδας, μήκους λίγων μικρομέτρων και διαμέτρου μικρότερης από 10 nm, η οποία είναι τοποθετημένη στο ελεύθερο άκρο ενός βραχίονα ο οποίος έχει μήκος 100 με 200  $\mu\text{m}$ . Στην τεχνική αυτή η ακίδα προσεγγίζει την επιφάνεια μέχρι να την αγγίξει και να αισθανθεί έτσι τη δύναμη από το "σημείο" επαφής. Ανάλογα με τη δύναμη που δέχεται η ακίδα, ο βραχίονας υφίσταται και αντίστοιχη κάμψη.

Στην περίπτωση της SFM η όλη απόκριση-πληροφορία για το υλικό μας προέρχεται από τον ευαίσθητο πιεζο-κρύσταλλο που βρίσκετε στην βάση του οργάνου. Η αναπτυσσόμενη κάθε φορά, διαφορετική τάση (διαφορά δυναμικού) καταγράφεται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Επειδή το μέγεθος της δύναμης αλλά και η φύση της (ελκτική ή απωστική) εξαρτώνται από τη φύση της ακίδας και του σημείου επαφής, η καταγραφή των ρευμάτων μας παρέχει την τοπογραφία της επιφάνειας.

Η STM βασίζεται απολύτως στο κβαντικό φαινόμενο σήραγγας. Αν δύο άτομα, π.χ. υδρογόνου, πλησιάσουν μεταξύ τους, τότε είναι πιθανόν το Α άτομο να βρεθεί σύμφωνα με τις αρχές της κβαντομηχανικής κοντά στο άλλο άτομο Β έστω κι αν αυτό απαγορεύεται ενεργειακά. Δηλαδή να ξεπεράσει το Α το ενεργειακό φράγμα που χωρίζει τα δύο άτομα και να "ανοίξει μια σήραγγα" για να βρεθεί κοντά στο άλλο άτομο.

Μία από τις σημαντικότερες ανακαλύψεις του 20<sup>ου</sup> αιώνα είναι ότι τα σωματίδια συμπεριφέρονται ως κύματα. Έτσι τα σωματίδια (αφού είναι κύματα) μπορούν να διαπεράσουν με το φαινόμενο σήραγγας περιοχές που σύμφωνα με την κλασική θεωρία είναι απαγορευμένες. Ένα απλό παράδειγμα του φαινομένου σήραγγας έχουμε στην περίπτωση δύο μετάλλων που βρίσκονται πολύ κοντά το ένα στο άλλο χωρίς όμως να έρχονται σε επαφή. Μια διαφορά δυναμικού εφαρμόζεται ανάμεσα στα δύο μέταλλα. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του πρώτου μέταλλου δεν έχουν αρκετή ενέργεια για να περάσουν στο δεύτερο. Είναι δηλαδή σαν να είναι "φυλακισμένα" μέσα σ' αυτό γιατί βρίσκονται μέσα σ' ένα πηγάδι δυναμικού παραγόμενο από την έλξη των θετικών πυρήνων. Η κβαντομηχανική όμως

---

Εργαστηριακά Θέματα Φυσικής Στερεάς Κατάστασης

προβλέπει ότι κάποια ηλεκτρόνια μπορούν να διαπεράσουν το ενεργειακό φράγμα.

Όταν η ακίδα, με υψηλό θετικό δυναμικό, βρεθεί πάνω από μια προεξοχή της επιφάνειας του υλικού που εξετάζεται, τότε το ενεργειακό φράγμα που χωρίζει τα ηλεκτρόνια του υλικού από την ακίδα γίνεται κβαντομηχανικά διαβατό και κάνει την εμφάνισή του ένα ασθενές ηλεκτρικό ρεύμα. Αντίθετα, όταν η ακίδα βρίσκεται πάνω από μια εσοχή της επιφάνειας, το ενεργειακό φράγμα γίνεται απαγορευτικά μεγάλο και το ηλεκτρικό ρεύμα μειώνεται δραστικά ή σταματάει τελείως. Έτσι οι διακυμάνσεις αυτού του ρεύματος "ψυχρής εκπομπής" καταγράφουν με εκπληκτική ακρίβεια τις ανωμαλίες της παρατηρούμενης επιφάνειας.

Με πολλαπλές σαρώσεις της επιφάνειας του δείγματος και με εξομοιώσεις που πετυχαίνουμε με τη βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών καταλήγουμε σε απεικονίσεις αγώγιμων επιφανειών σε ατομική κλίμακα. Με πολύ υψηλής ποιότητας ακίδα είναι δυνατό να δούμε όχι πλέον τις κοινές ανωμαλίες μιας επιφάνειας αλλά τις "ανωμαλίες" που προέρχονται από την ίδια την ατομική υφή της. Μπορούμε να δούμε τα άτομα τα ίδια!

### 1.3.1. Η αρχή λειτουργίας του NanoEducator

Η αρχή λειτουργίας του NanoEducator βασίζεται στην εξάρτηση της τιμής της αλληλεπίδρασης μεταξύ της ακίδας (η οποία είναι μία αιχμηρή βελόνα που κατασκευάζεται από βολφράμιο) και της επιφάνειας του δείγματος, ως προς την απόσταση της ακίδας από το υπό μελέτη δείγμα. Η φύση της αλληλεπίδρασης μπορεί να είναι είτε ένα ρεύμα (το ρεύμα σήραγγας) ή μία δύναμη.

Με την ανίχνευση ενός ρεύματος σήραγγας, που ρέει κάτω από μία σταθερά εφαρμοζόμενη τάση μεταξύ της ακίδας και του δείγματος, μόνο αγώγιμα δείγματα μπορούν να μελετηθούν, ενώ με την ανίχνευση της δύναμης που αναπτύσσεται μεταξύ ακίδας-επιφάνειας, μπορούν να μελετηθούν είτε αγώγιμα είτε διηλεκτρικά δείγματα. Όσο πιο έντονη είναι η εξάρτηση του ρεύματος ή της δύναμης από την απόσταση ακίδας-δείγματος, τόσο υψηλότερη είναι η χωρική ανάλυση της SPM, όπου η φύση της εξάρτησης καθορίζεται από τις φυσικοχημικές ιδιότητες της υπό μελέτη επιφάνειας. Η χωρική ανάλυση περιορίζεται από την ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας, καθώς και από το επίπεδο των μηχανικών δονήσεων και τη θερμική μετατόπιση της διάταξης και από το επίπεδο των ηλεκτρικών θορύβων του εξοπλισμού μέτρησης. Η άκρη της ακίδας βολφραμίου μπορεί να οξυνθεί με ηλεκτροχημική διάβρωση (etching) και να έχει ακτίνα καμπυλότητας μικρότερη από 100nm.

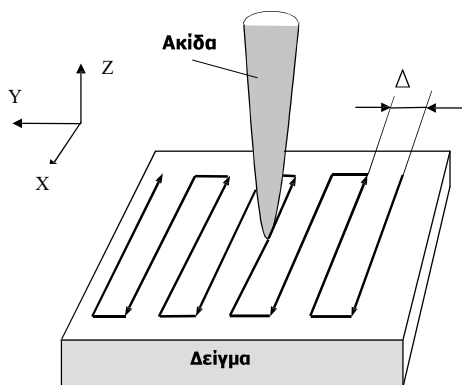
Η τοποθέτηση της ακίδας στο NanoEducator είναι σταθερή, ενώ το δείγμα μπορεί να κινηθεί σε σχέση με την ακίδα σε τρεις χωρικές κατευθύνσεις:

- X, Y - κατά μήκος της επιφάνειας του δείγματος,

- Z - κατακόρυφα (κάθετα προς το X-Y).

Σε μια πειραματική διάταξη, το δείγμα κινείται κατά την X-Y διεύθυνση (Σχήμα 1.3-1), κατά τέτοιο τρόπο ώστε η ακίδα να περνά βαθμιαία πάνω από την καθορισμένη συνολική έκταση δείγματος με ένα βήμα  $\Delta$ . Η διαδικασία αυτή ονομάζεται σάρωση.

Κατά τη σάρωση, η ακίδα μπορεί να περάσει πάνω από περιοχές με διαφορετικές φυσικές ιδιότητες, οι οποίες τροποποιούν τη φύση της αλληλεπίδρασης μεταξύ της ακίδας και του δείγματος και προφανώς την τιμή του εκάστοτε μετρούμενου μεγέθους. Επιπλέον, σε περιπτώσεις "ανωμαλιών" πάνω στην επιφάνεια του δείγματος, η απόσταση  $\Delta Z$  μεταξύ της ακίδας και της επιφάνειας θα αλλάξει κατά τη διάρκεια της σάρωσης, τροποποιώντας ανάλογα την τιμή της τοπικής αλληλεπίδρασης.

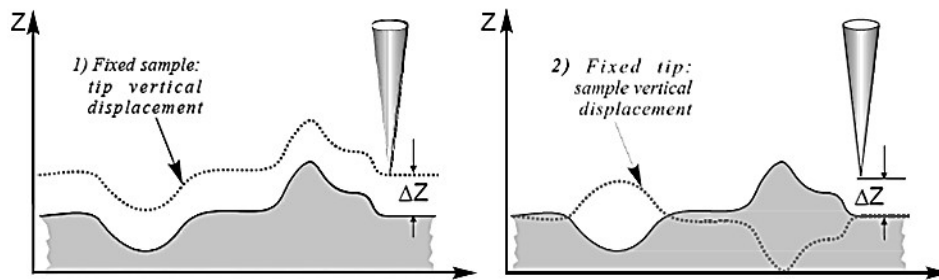


Σχήμα 1.3-1 Η διαδικασία της σάρωσης.

Η τιμή της τοπικής αλληλεπίδρασης κατά τη σάρωση μίας επιφάνειας μπορεί να διατηρηθεί σταθερή με ένα βρόχο ανάδρασης, ο οποίος ρυθμίζει τη μέση τιμή του μετρούμενου σήματος από την αλληλεπίδραση (δύναμη ή ρεύμα) σε ένα σταθερό επίπεδο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μετακίνηση του δείγματος κατακόρυφα χρησιμοποιώντας τον Z άξονα του σαρωτή.

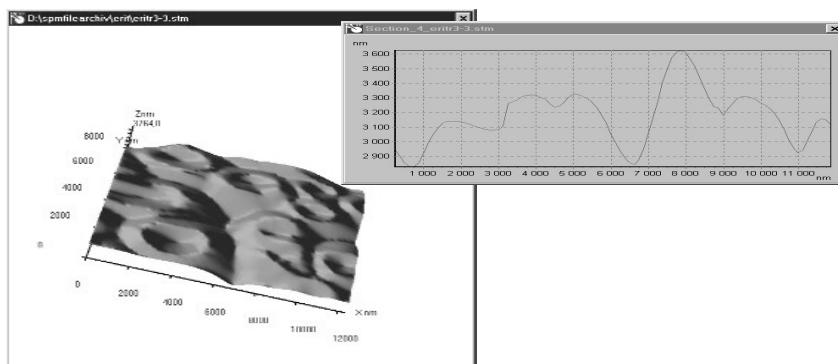
Το Σχήμα 1.3-2 δείχνει το περίγραμμα της κίνησης της ακίδας σε σχέση με το σταθερό δείγμα (καμπύλη 1) και του δείγματος σε σχέση με τη σταθερή ακίδα (καμπύλη 2), με την τιμή της αλληλεπίδρασης μεταξύ ακίδας – δείγματος να διατηρείται σταθερή. Στην περίπτωση 2, εάν η ακίδα είναι πάνω από μία κοιλότητα ή μια περιοχή με ασθενέστερη αλληλεπίδραση, το δείγμα κινείται προς τα άνω και αντιστρόφως. Γενικά, η τιμή της αλληλεπίδρασης μεταξύ της ακίδας και της επιφάνειας του δείγματος εξαρτάται είτε από τις ιδιότητες της επιφάνειας ή από τα τοπικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας, έτσι ώστε η μετατόπιση του δείγματος, που υλοποιείται από το αυτόματο σύστημα παρακολούθησης, να είναι το αποτέλεσμα της ταυτόχρονης επίδρασης των διαφοροποιήσεων της επιφανειακής τοπογραφίας και των φυσικοχημικών ιδιοτήτων της επιφάνειας του

δείγματος. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η ερμηνεία των πληροφοριών, που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια της σάρωσης χρήζει ιδιαίτερης προσοχής.



Σχήμα 1.3-2 Σχετική τροχιά της κίνησης της ακίδας και του δείγματος, ενώ το σύστημα ανάδρασης διατηρεί σταθερή την τιμή της τοπικής αλληλεπίδρασης

Ο NanoEducator καταγράφει τη μετακίνηση του δείγματος στη Z-κατεύθυνση καθώς και στις X, Y κατευθύνσεις. Μια εικόνα σχηματίζεται επί της οθόνης του



Σχήμα 1.3-3 Ένα παράδειγμα εικόνας SPM εικόνας της τοπογραφίας ερυθροκυττάρων και μίας τομής στη Z-διεύθυνση

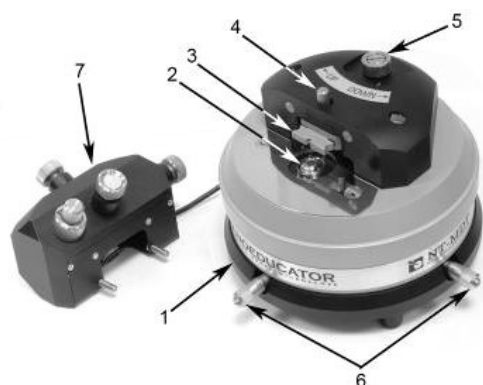
υπολογιστή, σε συγχρονισμό με την κίνηση του δείγματος, όπου η τροποποίηση της τοπικής φωτεινότητας είναι ανάλογη προς τη μετρούμενη κίνηση του δείγματος στη Z-κατεύθυνση κατά τη σάρωση. Αυτή η τεχνική SPM ονομάζεται ως η τεχνική της συνεχούς αλληλεπίδρασης (σταθερή δύναμη ή σταθερό ρεύμα). Ένα ενδεικτικό παράδειγμα του τελικού αποτελέσματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.3-4, η οποία προέκυψε από μελέτη μίας επιφάνειας η οποία έφερε ερυθρά κύτταρα.

## 1.4. Πειραματικές διατάξεις

### 1.4.1. Η Πειραματική Διάταξη του NanoEducator

Εργαστηριακά Θέματα Φυσικής Στερεάς Κατάστασης

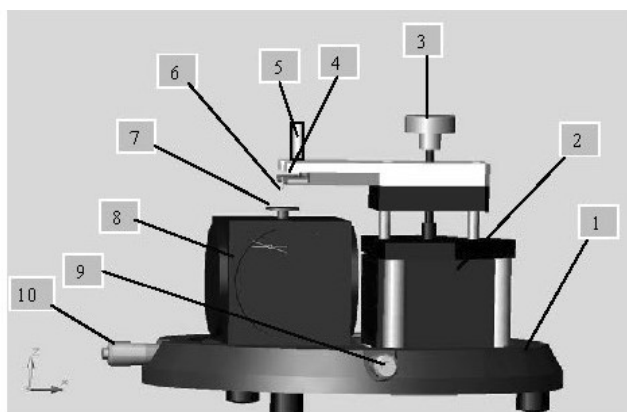
Το βασικό μέρος της πειραματικής διάταξης, που είναι η κεφαλή μέτρησης εικονίζεται στο Σχήμα 1.4-1, όπου επίσης σημειώνονται και τα χαρακτηριστικά τμήματα του οργάνου.



Σχήμα 1.4-1

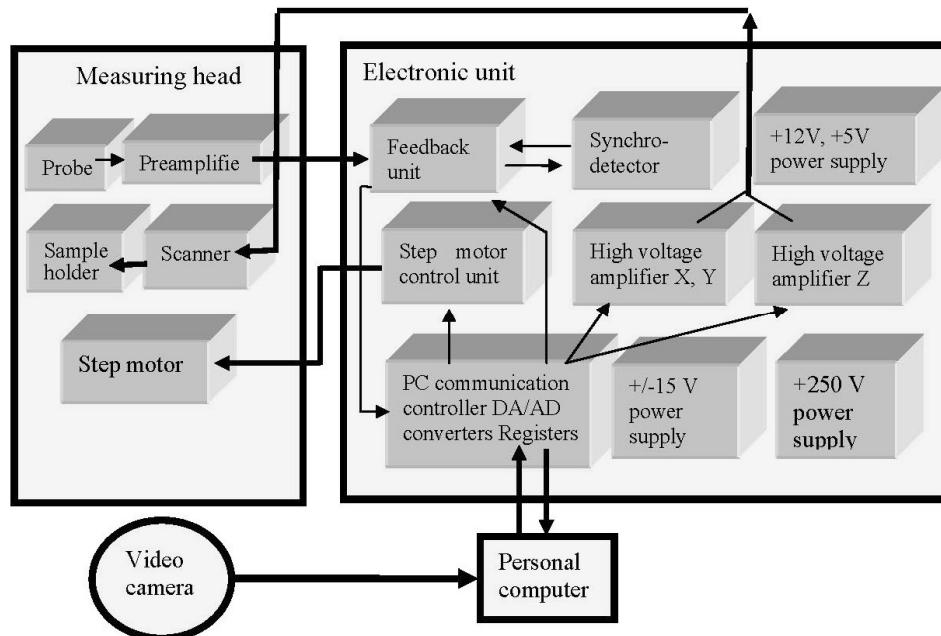
Η κεφαλή μέτρησης του NanoEducator. 1) η βάση, 2) ο δειγματοφορέας, 3) ο ανιχνευτής αλληλεπίδρασης, 4) η βίδα στερέωσης του ανιχνευτή, 5) η χειροκίνητη βίδα προσέγγισης, 6) οι βίδες μετακίνησης του σαρωτή και του δείγματος, 7) προστατευτικό κάλυμμα με ενσωματωμένη βιντεοκάμερα

Η δομή της κεφαλής μέτρησης απεικονίζεται σχηματικά στο Σχήμα 1.4.2. Ο σαρωτής (8) με τον δειγματοφορέα (7) και το μηχανισμό προσέγγισης (step motor) (2) είναι τοποθετημένοι πάνω στη βάση (1). Η προσέγγιση της ακίδας (6), η οποία είναι τοποθετημένη στον ανιχνευτή αλληλεπίδρασης (4), προς το υπό μελέτη δείγμα μπορεί να γίνει χειροκίνητα χρησιμοποιώντας τη βίδα προσέγγισης (3). Ο ανιχνευτής αλληλεπίδρασης στερεώνεται με τη βίδα στερέωσης ανιχνευτή (5). Η προεπιλογή της περιοχής μελέτης πάνω στο δείγμα επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του σαρωτή και τις βίδες μετατόπισης του δείγματος (9, 10).



Σχήμα 1.4-2

Η δομή του NanoEducator SPM: 1) βάση, 2) μηχανισμός προσέγγισης, 3) βίδα χειροκίνητης προσέγγισης, 4) ανιχνευτής αλληλεπίδρασης, 5) βίδα στερέωσης του ανιχνευτή, 6) ακίδα, 7) δειγματοφορέας, 8) σαρωτής, 9), 10) βίδες μετακίνησης του σαρωτή και του δείγματος.



Σχήμα 1.4-3 Το διάγραμμα λειτουργίας της πειραματικής συσκευής του NanoEducator.

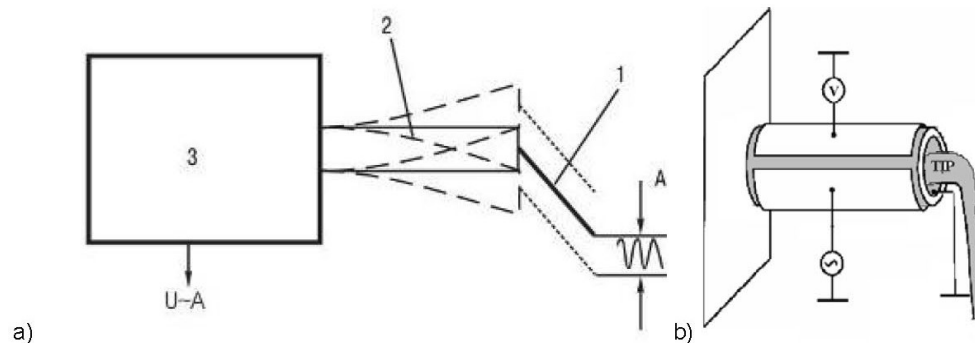
Το Σχήμα 1.4-3 δείχνει το διάγραμμα λειτουργίας της πειραματικής συσκευής. Ο NanoEducator αποτελείται από μια κεφαλή μέτρησης, μία ηλεκτρονική μονάδα, τα καλώδια σύνδεσης και τον έλεγχο του υπολογιστή. Επιπλέον μία βιντεοκάμερα συνδέεται με τον υπολογιστή μέσω θύρας USB. Το σήμα εξόδου από τον ανιχνευτή αλληλεπίδρασης προενισχύεται και τροφοδοτείται στην ηλεκτρονική μονάδα. Τα σήματα ελέγχου από την ηλεκτρονική μονάδα τροφοδοτούνται στην κεφαλή μέτρησης. Ο υπολογιστής ελέγχει την ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου μέσω του ελεγκτή επικοινωνίας (communication controller).

#### 1.4.1.1. Ο ανιχνευτής της δύναμης αλληλεπίδρασης

Ο ανιχνευτής της δύναμης αλληλεπίδρασης αποτελείται από ένα άκρο τύπου-βελόνας (ακίδα) (1) (Σχήμα 1.4-4), και είναι τοποθετημένος πάνω σε ένα κυλινδρικού σχήματος πιεζοηλεκτρικό (2), το οποίο είναι στερεωμένο σε μια σταθερή βάση (3). Οι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι έχουν την ιδιότητα να αναπτύσσουν στα άκρα τους μια διαφορά δυναμικού όταν συμπιέζονται και το αντίστροφο. Να συμπιέζονται ή να εκτείνονται όταν μια διαφορά δυναμικού εφαρμόζεται σ' αυτούς.

Ένα μέρος αυτού του κυλίνδρου χρησιμοποιείται ως πιεζο-δονητής (ενεργοποιητής), και ένα δεύτερο μέρος ως ένας ανιχνευτής μηχανικών ταλαντώσεων (αισθητήρας) (βλέπε Σχήμα 1.4-4 b). Ο πιεζο-δονητής καθοδηγείται από ένα a.c. σήμα τάσης στη συχνότητα συντονισμού του ανιχνευτή.

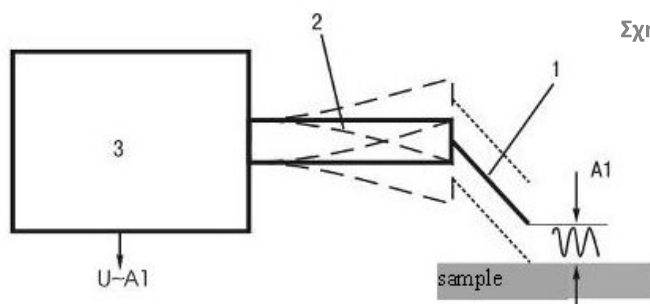




Σχήμα 1.4-4 α) Ο ανιχνευτής της δύναμης αλληλεπίδρασης, β) ο πιεζοηλεκτρικός κύλινδρος.

Το πλάτος ταλάντωσης είναι μέγιστο σε μεγάλες αποστάσεις ακίδας-δείγματος. Μακριά από την επιφάνεια η ακίδα αποκλίνει από τη θέση ισορροπίας της κατά ένα ποσό (της τάξης των  $\mu\text{m}$ ) το οποίο αντιστοιχεί στο πλάτος  $A$  των εξαναγκασμένων μηχανικών ταλαντώσεων που παράγονται κατά το πρώτο μισό του κύκλου ταλάντωσης του πιεζοηλεκτρικού κυλίνδρου (ενεργοποιητής), ενώ στο δεύτερο μισό του κύκλου ταλάντωσης του πιεζοηλεκτρικού κυλίνδρου (αισθητήρας) αναπτύσσεται μία *a.c.* τάση ανάλογη της μετατόπισης της ακίδας, λόγω της τάσης στο πιεζοηλεκτρικό.

Κατά τη διάρκεια της προσέγγισης της ακίδας προς την επιφάνεια του δείγματος, η αλληλεπίδραση ακίδας-δείγματος αρχίζει να αυξάνεται οδηγώντας σε μια μετατόπιση της καμπύλης απόκρισης της συχνότητας σε σχέση με την απόκριση



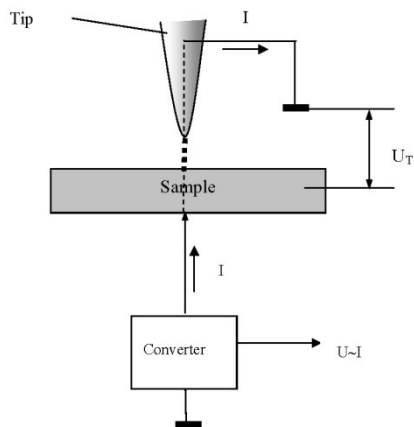
Σχήμα 1.4-5 Η αρχή της ανίχνευσης της δύναμης αλληλεπίδρασης

συχνότητας που μετράται μακριά από την επιφάνεια. Δεδομένου ότι η συχνότητα του σήματος οδήγησης του πιεζο-κυλίνδρου διατηρείται σταθερή κατά τη διάρκεια της προσέγγισης, τα πλάτος ταλάντωσης μειώνεται από την αρχική τιμή  $A$  σε μια νέα τιμή  $A_1$  (Σχήμα 1.4-5).

Η μέτρηση της μεταβολής της δύναμης αλληλεπίδρασης ακίδας-δείγματος λαμβάνεται από την καταγραφή ενός σήματος που είναι ανάλογο με την μεταβολή του πλάτους ταλάντωσης της ακίδας  $\Delta A = A - A_1$ .

#### 1.4.1.2. Ο ανιχνευτής του ρεύματος σήραγγας

Κατά τη χρήση του NanoEducator ως STM η ακίδα του ανιχνευτή της δύναμης αλληλεπίδρασης είναι γειωμένη. Κατά τη μέτρηση του ρεύματος σήραγγας, ο πι-

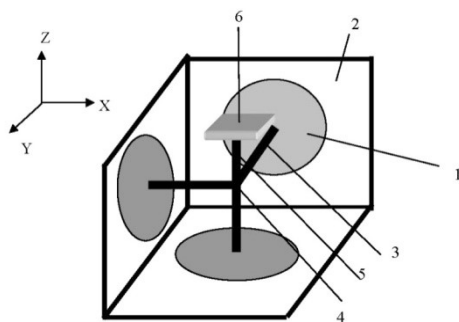


Σχήμα 1.4-6 Η αρχή της ανίχνευσης του ρεύματος σήραγγας

εζοηλεκτρικός κύλινδρος παίζει το ρόλο ενός άκαμπτου παθητικού συστήματος στήριξης της ακίδας. Μια τάση πόλωσης  $U_T$  εφαρμόζεται στο δείγμα ως προς τη γειωμένη ακίδα. Ο μετατροπέας που φαίνεται στο Σχήμα 1.4-6 παράγει την τάση πόλωσης  $U_T$  καθώς και την τάση εξόδου  $U$ , που είναι ανάλογη προς το ρεύμα σήραγγας που ρέει μεταξύ της αγώγιμης ακίδας και του αγώγιμου δείγματος.

#### 1.4.1.3. Ο σαρωτής

Ο σαρωτής είναι μια συσκευή, η οποία κινεί το δείγμα σε τρεις χωρικές κατευθύνσεις: X, Y κίνηση κατά μήκος της επιφάνειας του δείγματος, Z-κίνηση κάθετη προς την επιφάνεια του δείγματος (ο οποίος καθοδηγείται από το σύστημα ανάδρασης) (Σχήμα 1.4-7).



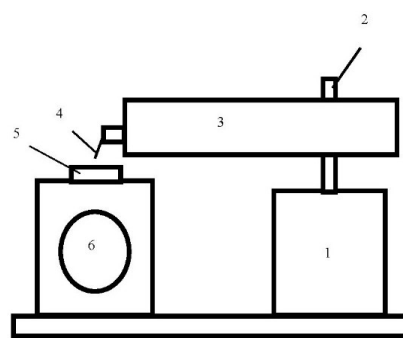
Σχήμα 1.4-7 Σχηματική παράσταση του σαρωτή: (1) πιεζοηλεκτρική πλάκα, (2) το σώμα του σαρωτή, (3) ο βραχίονας, (4) το σημείο συνάντησης, (5) η βάση, (6) ο δειγματοφορέας.

Τρεις πλάκες πιεζοηλεκτρικών βρίσκονται τοποθετημένες στις πλευρές του σαρωτή που έχει σχήμα κύβου (2). Κάθε πιεζοηλεκτρική πλάκα μπορεί να κινήσει ένα βραχίονα (3), που είναι τοποθετημένος πάνω σε αυτήν, σε μία από τις τρεις κάθετες διευθύνσεις - X, Y ή Z, όταν εφαρμοστεί ένα ηλεκτρικό πεδίο (τάση).

Όπως φαίνεται στο σχήμα, οι τρεις βραχίονες συναντώνται σε ένα σημείο (4). Επομένως, μπορεί να θεωρηθεί ότι αυτό το σημείο δύναται να κινηθεί σε τρεις κατευθύνσεις X, Y, Z. Μία βάση (5) στην οποία βρίσκεται ο δειγματοφορέας (6) στερεώνεται σε εκείνο το σημείο. Έτσι, το δείγμα κινείται σε τρεις κατευθύνσεις, οδηγούμενο από τρεις ανεξάρτητες πηγές τάσης. Η μέγιστη XY κίνηση του δείγματος στο NanoEducator είναι περίπου 70  $\mu\text{m}$  και αυτή ορίζει τη μέγιστη περιοχή σάρωσης.

#### 1.4.1.4. Ο μηχανισμός προσέγγισης ακίδας – δείγματος

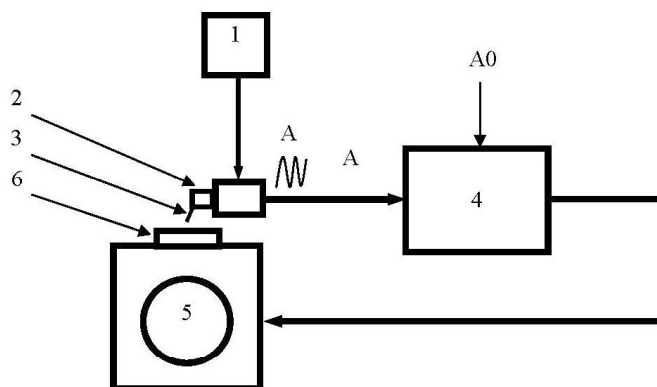
Το εύρος της κίνησης του σαρωτή κατά την Z κατεύθυνση είναι περίπου 10  $\mu\text{m}$ , απόσταση η οποία απαιτείται πρωτίστως προκειμένου να πλησιάσει το δείγμα στην ακίδα. Ο μηχανισμός που προορίζεται για να εξυπηρετήσει το σκοπό αυτό απεικονίζεται σχηματικά στο Σχήμα 1.4-8. Όταν ηλεκτρικοί παλμοί εφαρμόζονται στο βηματικό κινητήρα (*step motor*) (1), αρχίζει την περιστροφή του κοχλία (2) και κινεί τη ράβδο (3) μαζί με την ακίδα (4), πλησιάζοντας την στο δείγμα (5), που είναι τοποθετημένο στο σαρωτή (6) ή ανάλογα απομακρύνοντάς την από αυτό. Το βήμα μετατόπισης είναι περίπου 2  $\mu\text{m}$ .



Σχήμα 1.4-8 Η σχηματική αναπαράσταση του μηχανισμού προσέγγισης.

#### 1.4.1.5. Η λειτουργία ανάδρασης

Το Σχήμα 1.4-9 δείχνει μία σχηματική αναπαράσταση του βρόχου ανάδρασης, που διατηρεί σταθερή τη μέση τιμή της αλληλεπίδρασης ακίδας-δείγματος.



Σχήμα 1.4-9 Σχηματική παράσταση του βρόχου ανάδρασης.