



Giacomo Torzo,
Paolo Peranzoni
Università di Padova

Laboratorio di Microscopia a Scansione attuato via Internet: una esperienza nel Progetto Lauree Scientifiche a Padova

(Pervenuto il 19.1.2012, approvato l'11.5.2012)

ABSTRACT

Using an educational SPM driven by a PC that supports a VNC-server and a motorized webcam we set up an internet controlled RemoteLab SPM. Trained highschool students supervised by their teachers selected the sample to be analyzed, controlled the PC that drove the SPM and performed the measurements and the image analyses in remote mode.

Introduzione

La tecnica SPM (*Scanning Probe Microscopy*) può essere considerata un argomento essenziale nei corsi di nanotecnologie, tuttavia il costo elevato dei normali strumenti SPM (persino dei modelli prodotti per uso didattico) rende difficile l'introduzione di questa tecnica sperimentale in molti ambiti. In particolare è impensabile proporre ad una scuola di acquistare uno di tali strumenti per usarlo in un proprio laboratorio. Una possibile soluzione a tale difficoltà è mettere a disposizione di molte scuole un unico strumento, attraverso l'uso in "modalità remota".

Noi abbiamo provato a sperimentare questo metodo nell'ambito del Progetto Lauree Scientifiche (PLS) finanziato nel triennio 2007-2010 presso l'Università di Padova.

A tal fine è stato acquistato con i fondi PLS per il settore Struttura della Materia un particolare strumento (NanoEducator SPM) che consente analisi STM (*Scanning Tunneling Microscopy*), AFM (*Atomic Force Microscopy*) e Micro-litografia ad un costo molto contenuto (soprattutto con costi quasi trascurabili di manutenzione e consumo).

Per utilizzare tale strumento in modalità remota serve solo collegare ad Internet il PC che controlla l'apparato attraverso una linea ADSL veloce ed installare un sistema VNC Client Server (*Virtual Network Computing*) su tale PC. Una webcam (meglio se motorizzata e manovrabile via computer) ed un collegamento Skype completano l'apparato.

Qualsiasi sistema VNC Client/Server va bene allo scopo; in particolare se ne possono scaricare diverse versioni gratuite (free-software o shareware); noi abbiamo usato *TightVNC*, disponibile per WindowsOS e Java (www.tightvnc.com/download.html) e *TeamViewer*, disponibile per WindowsOS, MacOSX, Linux, Mobile (<http://www.teamviewer.com/it/download/index.aspx>).

Ovviamente il computer remoto (nell'aula della scuola) dovrà avviare la parte Client, mentre quello locale (PC-host, direttamente collegato al NanoEducator SPM) dovrà avviare la parte Server della stessa versione di VNC.



Figura 1. NanoEducator SPM.

Allestimento della sessione "RemoteLab"

Durante la sessione di RemoteLab, gli studenti utilizzano un comune navigatore web (Explorer, Safari, Firefox,...) sul PC che nella loro scuola è connesso via ADSL ad Internet.

Quando essi si connettono, avviando il Client VNC (e fornendo l'indirizzo IP del Server VNC nonché la necessaria password) al PC-host, essi ne assumono il completo controllo (tastiera, monitor, mouse) e possono dialogare, attraverso una sessione Skype (aperta sia sul PC-remoto che sul PC-host), con il personale tecnico che li assisterà nell'esperimento.

L'operatore locale potrà in ogni momento interrompere il controllo remoto per ragioni di sicurezza. Gli studenti possono scegliere il campione da analizzare (che il personale tecnico monterà nell'apparato remoto) ed eseguire su di esso le misure desiderate. Se la webcam utilizzata è del tipo brandeggiabile, essi potranno liberamente esplorare il laboratorio remoto, zoomare su dettagli dell'apparato e vedere in faccia l'assistente tecnico.

Cenni sul funzionamento di NanoEducator SPM

La tecnica SPM (Microscopia con Sonda a Scansione) permette di registrare o/e modificare la morfologia superficiale di un campione con risoluzione spaziale elevatissima (nanometrica). Il principio di funzionamento è sostanzialmente basato sul controllo (attuato mediante uno scanner piezoelettrico) della posizione relativa di una sonda sottilissima che esplora la superficie del campione, e sulla misura accurata dell'interazione tra la sonda e il campione. Tale interazione può essere una corrente elettrica (tra campione e sonda conduttivi) e allora la tecnica è definita STM (Microscopia a effetto tunnel) o una qualche forza tra gli atomi della sonda e quelli del campione, e allora la tecnica è definita AFM (Microscopia a forza atomica).

Nel NanoEducator SPM la sonda è un sensore di forza costituito da una punta di tungsteno montata in un tubo piezoelettrico.

Quando si lavora in modalità STM su campioni conduttivi, la sottile punta di tungsteno costituisce uno dei due elettrodi per l'effetto tunnel;^[1] l'altro elettrodo è lo stesso campione.

Quando si opera in modalità LITO, la punta di tungsteno è forzata ad affondare nel campione mediante spostamenti verticali dello scanner dettati dalla mappa (immagine in formato BPM o JPG) del disegno che si vuole incidere (la profondità di penetrazione è corrispondente alla scala di grigio pertinente ad ogni punto della mappa BMP/JPG).

Quando si lavora in modalità AFM, il tubo piezoelettrico che porta il filo di tungsteno viene posto in vibrazione alla propria frequenza di risonanza quando

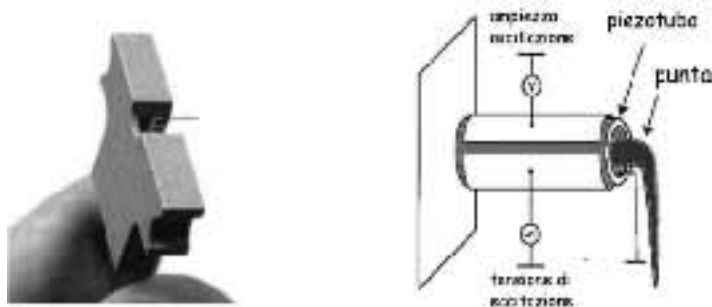


Figura 2. La sonda (sensore di forza): fotografia a sinistra, schematizzazione a destra.

la punta è a grande distanza dalla superficie del campione, poi si inizia ad avvicinare la punta vibrante al campione, monitorando l'ampiezza di vibrazione.

Dato che l'ampiezza di vibrazione dipende dal gradiente delle forze agenti sulla punta, l'approssimarsi alla superficie (ove gli atomi della punta iniziano a sentire l'interazione van der Waals con gli atomi del campione) viene segnalato come una modulazione di tale ampiezza: questa modulazione viene usata per misurare l'interazione (o anche la distanza punta-campione).

In fig. 2 si vede che il tubo piezoelettrico è dotato di tre elettrodi: quello interno, in contatto con il filo di tungsteno serve per misurare la corrente di *tunneling* (in modalità STM), e anche come elettrodo (in modalità AFM) di riferimento per le tensioni di eccitazione (fornite all'elettrodo semicilindrico inferiore) e per il segnale di ampiezza (prelevato all'elettrodo semicilindrico superiore).

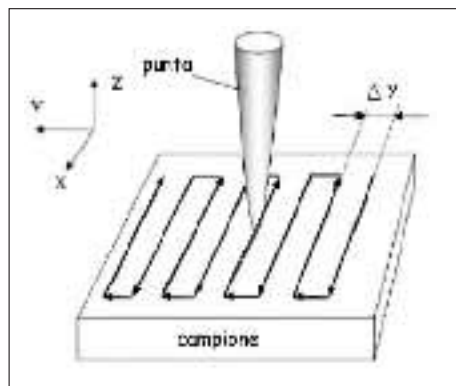


Figura 3. Scansione "raster": ottenuta spostando il campione lungo x (direzione di scansione veloce) e lungo y (direzione di scansione lenta).

Come si costruisce una immagine SPM

L'esplorazione del campione avviene normalmente mediante una scansione linea-per-linea (detta *raster scanning*), come schematizzato in figura 3.

Durante la scansione la sonda esplora regioni del campione con morfologia e proprietà fisiche variabili, e ciò modula l'interazione sonda-campione.

Normalmente l'apparato include un sistema di retroazione che mantiene costante il valore dell'interazione attraverso la modulazione della variabile z (la distanza tra sonda e campione), come illustrato nella figura 4, in cui la sonda è ferma mentre si muove il campione mediante lo scanner piezoelettrico. In tal caso, se si assume che l'interazione sia solo funzione della distanza Δz , si registra la mappa degli spostamenti $z = f(x, y)$ per ogni valore delle coordinate x, y : questa matrice di valori (mostrata sullo schermo del PC) produce l'immagine topografica.

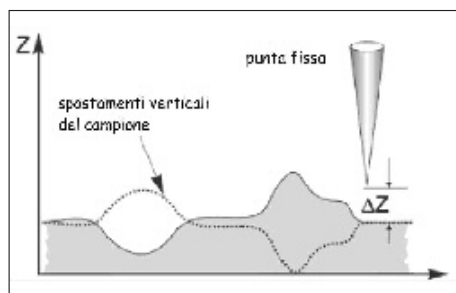


Figura 4. Profilo di linea ottenuto registrando gli spostamenti verticali (z) del campione per ogni posizione (x) lungo la linea di scansione.

Struttura dello strumento utilizzato

Il NanoEducator SPM è costituito da una testa per AFM/STM/LITO (fig. 5) guidata da un controller connesso ad un PC tramite collegamento seriale USB. Lo scanner è costituito da



Figura 5. La testa di misura di NanoEducator: 1 - base, 2 - portacampione, 3 - sonda, 4 - vite di blocco della sonda, 5 - vite per spostamenti verticali, 6 - tavolo xy, 7 - videocamera.

tre dischi piezoelettrici interconnessi in configurazione a tripode (fig. 6).

L'apparato per affilare la punta

Per ottenere una punta molto affilata si usa un attacco elettrochimico mediante un dispositivo (fig. 7) che permette erosione a geometria conica del filo di tungsteno mediante immersione in un bagno di soda caustica a forma di goccia lenticolare trattenuta da un anellino di nichel: tra l'anello di nichel e il filo viene applicata una tensione alternata di pochi volt.

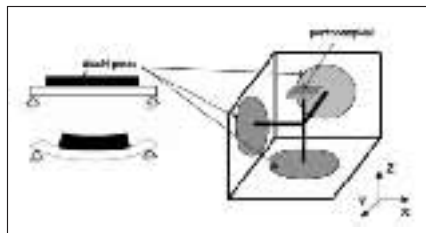


Figura 6. Lo scanner NanoEducator è ricavato da tre dischi piezo che si flettono come mostrato.

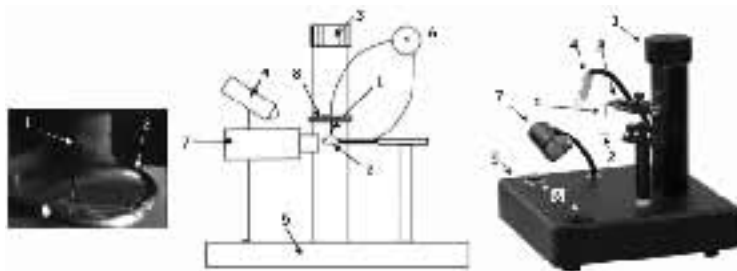


Figura 7. Dispositivo per affilare le punte. A sinistra: filo immerso nella goccia di NaOH; al centro: schema del dispositivo; a destra: fotografia del dispositivo. 1 - spezzone di filo di tungsteno, 2 - anello, 3 - vite per il movimento verticale, 4 - luce a LED, 5 - base, 6 - sorgente di tensione elettrica variabile, 7 - microscopio, 8 - supporto filo.

Le prime prove di SPM RemoteLab

Nel corso del 2007 abbiamo effettuato diverse sessioni con classi di scuola secondaria situate nella regione Veneto, mentre l'SPM si trovava nel nostro laboratorio al Dipartimento di Fisica dell'Università di Padova.

Gli insegnanti guidavano i loro studenti nelle aule, dopo essere stati brevemente addestrati nel nostro laboratorio. Avevano ricevuto in anticipo un breve manuale e altro materiale introduttivo che spiegava gli elementi essenziali della tecnica.

Ogni sessione Internet è durata circa due ore. Questo tempo è stato sufficiente per eseguire i passi essenziali per un'acquisizione di immagini (avvicinamento, scansione, appiattimento, vista 3D, linee-sezione) e per una semplice micro-litografia.

Considerazioni sulla valenza didattica di SPM RemoteLab

L'attività ha suscitato un grande interesse tra gli studenti coinvolti, che sono stati in grado, con l'aiuto dei loro insegnanti, di eseguire le operazioni previste.

Oltre allo specifico esperimento di Microscopia a scansione di sonda, durante questa attività i docenti hanno avuto l'opportunità di coinvolgere i propri studenti nell'esplorazione di alcuni argomenti, importanti nella scienza dei materiali, che sono poco studiati nei programmi tradizionali.

Ad esempio, per capire il principio di funzionamento del sensore di forza in una misura SPM senza contatto, gli studenti sono stati introdotti all'effetto piezoelettrico diretto e inverso (il piezo-tubo è messo in oscillazione dalla tensione sinusoidale applicata a due elettrodi e la sua ampiezza di oscillazione è misurata dalla tensione generata dalla deformazione fra gli altri due elettrodi).

Analizzare in dettaglio il comportamento della *curva di risonanza* permette di comprendere come l'interazione punta-campione influenzi l'ampiezza di oscillazione.

La Microscopia a Scansione mediante *effetto tunnel* di per sé stessa richiede almeno qualche informazione qualitativa sul fenomeno quanto-meccanico degli elettroni che passano attraverso la barriera di ossido tra la punta e il campione conduttivo.

Un altro "effetto collaterale" degno di nota consiste nell'aver permesso agli studenti un contatto diretto con le modalità degli esperimenti fisici a livello universitario e, più in generale, a livello della ricerca "vera" (quella, cioè, che non si fa, per svariate e in parte ovvie ragioni, nei laboratori delle scuole).

Anche l'uso della rete Internet in modalità diversa dalla solita navigazione sul web ha costituito per gli studenti (e anche per alcuni insegnanti) un'esperienza nuova ed istruttiva, mostrando che le cosiddette "Nuove Tecnologie", tanto reclamizzate dall'Amministrazione scolastica ma poco supportate nell'utilizzo pratico, possono avere effettivamente un impatto positivo sulla didattica curricolare.

L'insegnante che desiderasse provare con le proprie classi una sessione NanoEducator SPM in modalità remota può contattare gli autori tramite e-mail: torzog@gmail.com, peranzoni@iol.it.

Riferimenti a siti web sull'argomento

<http://www.mobot.org/jwcross/spm/>
<http://www.ntmdt.com/spm-principles>
http://newton.umsl.edu/stei_lab/
<http://www.padova.infm.it/torzo/>

Immagini acquisite dagli studenti durante alcune sessioni di SPM RemoteLab

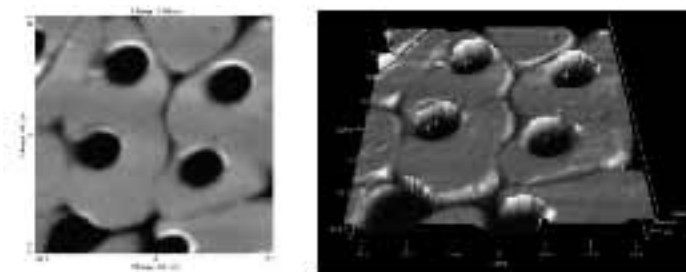


Figura 8. Immagine STM su indio con microindentazioni; a sinistra: vista dall'alto, a destra: vista 3D.

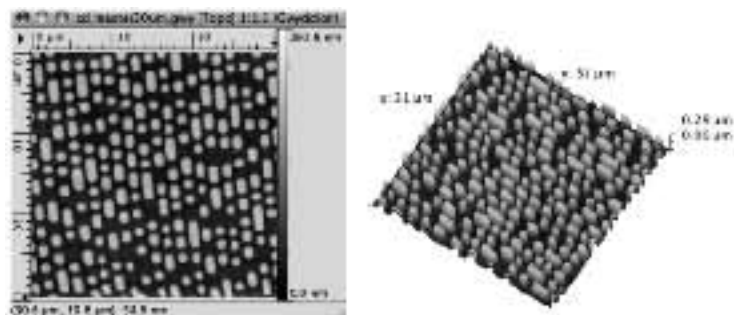


Figura 9. Immagine AFM di un frammento di stampo per CD; a sinistra: vista dall'alto, a destra: vista 3D.

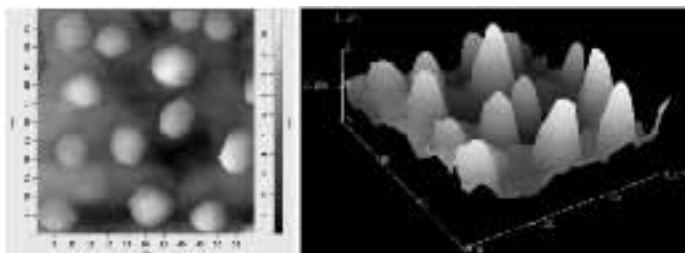


Figura 10. Immagine AFM di *Nelumbo Nucifera* (Loto); a sinistra: vista dall'alto, a destra: vista 3D.

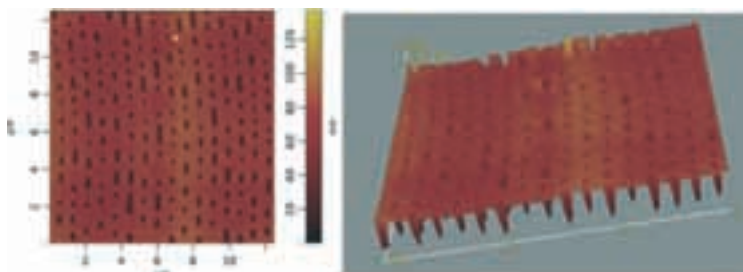


Figura 11. Immagine AFM di un frammento di DVD; a sinistra: vista dall'alto, a destra: vista 3D.

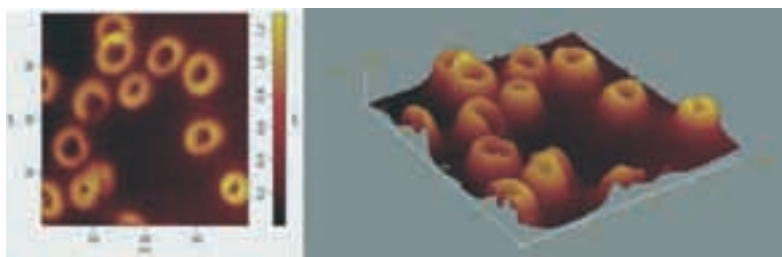


Figura 12. Immagine AFM di eritrociti (globuli rossi). a sinistra: vista dall'alto, a destra: vista 3D.

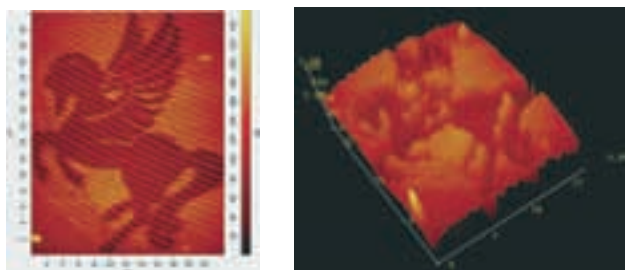


Figura 13. Microlitografia ottenuta sulla superficie di un CD formattato. A sinistra: vista dall'alto, a destra: vista 3D.

Note 1. L'effetto "tunnel" è un effetto quantistico: esso descrive il passaggio di una particella attraverso una barriera di potenziale (ad esempio un sottile strato dielettrico posto tra due conduttori). Considerando particelle cariche (elettroni), con energia totale E_0 , all'interno di una scatola le cui pareti sono un "guscio" a potenziale j , con $E_0 < j$, nell'ambito di un modello classico è impossibile che queste particelle sfuggano dalla scatola: per sfuggire dovrebbero avere un'energia più grande di j . Nel modello quantistico esiste una probabilità finita, per una particella con energia $E_0 < j$, di attraversare la barriera di potenziale: questo attraversamento della barriera si chiama effetto tunnel.