

**PIETRO SCATTURIN, GIACOMO TORZO*,
GIORGIO DELFITTO*, BARBARA PECORI°**

*Dipartimento di Psicologia dello Sviluppo e della
Socializzazione, Università di Padova CNR,*

**INFM e Dipartimento di Fisica, Università di
Padova.*

° Dipartimento di Fisica, Università di Bologna

Il macroscopio: una versione didattica del microscopio a scansione di forza

(Pervenuto il 10.4.99, approvato il 20.10.99)

ABSTRACT

We describe an home-made device simulating, at macroscopic level, the behavior of a scanning force microscope, that we suggest to use for didactic purposes aimed at clarify genesis and meaning of the electronic images, frequently found in textbooks.

Introduzione

A tutti è certamente capitato di infilare una mano in tasca e trovandovi qualche moneta cercare, come per gioco, di identificarne il valore. Forse non tutti però si sono soffermati a riflettere sui complessi e raffinati meccanismi coinvolti nella raccolta e nella interpretazione delle informazioni ottenute tramite i nostri polpastrelli.

Il nostro mondo è pieno di immagini. Alcuni tipi di immagine, come quella di una moneta da cento lire, fanno parte di un patrimonio culturale che si costruisce a partire dalla nascita in modi che sono sostanzialmente gli stessi dall'uomo primitivo a quello dei giorni d'oggi, e che come tali ci appaiono del tutto "naturali", tanto che la non conoscenza dei meccanismi attraverso i quali tali immagini si formano e si conservano nella nostra mente non provoca alcuna perplessità.

Le moderne tecnologie di indagine della struttura della materia a livello microscopico (ad esempio in fisica o in biologia) forniscono invece all'uomo di oggi immagini di natura diversa, che si riferiscono a "oggetti" assolutamente fuori dal campo delle nostre percezioni (virus, atomi...) e il cui processo di costruzione appare del tutto misterioso al lettore comune. La mancanza di informazioni su tali processi di costruzione è causa spesso di interpretazioni "errate" da parte dei profani¹, che spontaneamente ricostruiscono dalle immagini e attribuiscono agli oggetti rappresentati caratteristiche che hanno senso solo a livello macroscopico².

Queste considerazioni ci hanno portato a cercare di costruire uno strumento che permettesse anche a studenti con poche conoscenze fisiche di

base di comprendere i processi fondamentali attraverso i quali si ricostruiscono immagini a partire dai segnali elettrici raccolti da un sensore³.

L'idea di fondo è quella di realizzare uno strumento che operi a livello macroscopico con tecniche analoghe a quelle usate nell'indagine a livello microscopico.

Potrebbe sembrare inutile produrre con questa tecnica l'immagine di un oggetto che già si vede bene ad occhio nudo; dal punto di vista didattico, invece, è proprio la possibilità che si offre allo studente di confrontare l'immagine "naturale" con quella ricostruita, e di poter seguire il processo di ricostruzione passo passo che ci sembra possa aiutare lo studente a comprendere la natura diversa delle due immagini.

Cosa sono le immagini digitali?

Le immagini elettroniche digitali possono essere di diversi tipi, ma molto spesso sono "bit-mapped", cioè costituite da una matrice di punti di colore diverso (o di diversa tonalità di grigio), che può essere stampata o mostrata sullo schermo di un computer. Ogni punto ("pixel" in linguaggio elettronico) è un valore numerico nella matrice memorizzata.

Le immagini *topografiche* sono immagini di tipo speciale, che rappresentano la superficie di un oggetto in modo *quantitativo*, in quanto il colore di ciascun punto "misura" la distanza z di quel punto da un piano geometrico parallelo alla superficie "media" dell'oggetto ($z = z_0$).

Per esempio in una *grayscale LUT* ovvero calibrazione a scala di grigi (LUT = Look-Up-Table) è la corrispondenza tra colore e valore numerico nel-

la matrice) la luminosità può definire la distanza dal piano di riferimento, cosicchè la tonalità più scura corrisponde a regioni “basse” e la tonalità più chiara a regioni “alte”.

Per chiarire la specificità della rappresentazione topografica vale la pena di ricordare che le immagini prodotte da microscopi elettronici non sono immagini *topografiche*: SEM o TEM⁴, pur fornendo informazioni sulla natura del campione in prossimità alla superficie, non ne danno una riproduzione topografica fedele. Un caso assai più noto di immagine “apparentemente fedele” ma certamente non topografica è quello delle immagini che si ottengono strofinando una matita su un foglio sottile di carta appoggiato sul campione (ad esempio una moneta).

Tipicamente la matrice topografica $I = z(x, y)$ mappa una regione quadrata della superficie, ove ogni pixel rappresenta il valor medio dell'altezza z in un quadratino di lato L , dalla cui dimensione dipende la risoluzione dell'immagine. La superficie viene infatti campionata in un reticolo quadrato di punti equispaziati con passo L nelle direzioni x e y sul piano di riferimento.

Una matrice di $N \times N$ pixel di area L^2 quindi copre un'area $(NL)^2$.

Se consideriamo solo la j -esima riga della matrice otteniamo una sezione verticale dell'immagine topografica; e se grafichiamo questi N valori $z(x_i, y_j)$ verso la loro posizione relativa $x_i = iL$, congiungendo i punti adiacenti con segmenti rettilinei, otteniamo un profilo lungo x (*x-line profile*). Raggruppando nello stesso grafico tutti gli N profili lungo x (ciascuno spostato in alto di una stessa quantità δz) otteniamo una rappresentazione 3D della superficie che è detta “*wire-frame*”. (Normalmente le immagini *wire-frame* contengono sia i profili x che i profili y).

L'angolo di vista azimutale di questa immagine 3D è determinato dalla scelta del valore δz , mentre una rotazione polare dell'angolo di vista può essere ottenuta applicando uno spostamento δx a ciascun profilo x in successione.

In figura 1 sono mostrate tre immagini topografiche ottenute con un microscopio SFM commerciale (Park Scientific Instruments). Si tratta di matrici quadrate di 256×256 punti in cui le sfumature di grigio più chiare corrispondono a valori di z maggiori.

La prima immagine mostra un particolare difetto reticolare, detto “dislocazione a vite”, in un monocristallo di Carburo di Silicio: una terrazza larga pochi micrometri che si avvita a spirale.

Nella seconda immagine sono evidenti i gradini costituiti da un singolo passo reticolare in un monocristallo di Arseniuro di Gallio tagliato lungo il piano 001, con sovrapposte nanostrutture di Arseniuro di Indio (i puntini bianchi).

Nella terza immagine, rielaborata filtrando il rumore dall'immagine originalmente acquisita, risultano evidenti i siti atomici e la struttura esagonale del reticolo della mica, che si sfalda naturalmente esponendo piani reticolari di grandi dimensioni.

Principio di funzionamento del macroscopio

Lo strumento descritto in questo articolo, e che abbiamo battezzato “macroscopio”⁵, deriva direttamente dalla tecnologia dei profilometri a stilo.

Diversamente però dai normali profilometri, che lavorano in una sola dimensione e forniscono cioè il profilo del campione in esame lungo una *linea*, questo strumento esegue la scansione di una *superficie*, con una operazione di spostamento del sensore lungo una serie di linee parallele, analoga a quella utilizzata per acquisire immagini a matrici di punti.

Con una interfaccia a 2 canali e un software di acquisizione comune in ambiente didattico⁶, abbiamo costruito dapprima un semplice profilometro, usando come sensore di *spostamento verticale* (asse z) una punta saldata all'estremità di una leva di cui si misurava la flessione mediante una coppia di *estensimetri*, e come sensore di *spostamento*

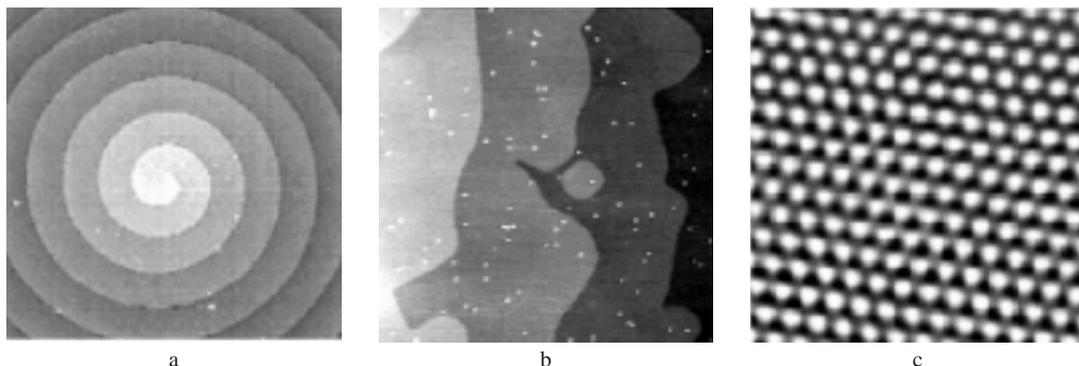


Fig. 1 - Immagini SFM a: SiC ($15 \times 15 \mu\text{m}$), b: GaAs ($3 \times 3 \mu\text{m}$), c: Mica ($60 \times 60 \text{ \AA}$)

orizzontale un micrometro con la manopola collegata ad un *potenziometro*. L'interfaccia quindi era in grado di registrare due serie di valori (vettori) corrispondenti rispettivamente al segnale $V_z = V(\Delta z)$ prodotto dallo spostamento verticale della punta che segue il profilo del campione e al segnale $V_x = V(x)$ prodotto dal potenziometro che registra lo spostamento lungo l'asse x .

Sullo schermo di un calcolatore è quindi possibile tracciare il grafico $V_z = f(V_x)$ che riproduce il profilo del campione lungo una *linea* parallela all'asse x . Una successione di scansioni lungo x (ciascuna compiuta ad un diverso valore di y) contiene informazioni sulla *superficie* del campione, ma se esse venissero riportate tutte insieme nel grafico $V_z = f(V_x, y)$ l'insieme dei profili risulterebbe illeggibile.

Abbiamo perciò adottato un "trucco" per rappresentare graficamente i due vettori, in modo da creare una immagine "pseudo tridimensionale" della superficie del campione.

Questo trucco consiste nel posizionare il campione (figura 2), in modo che la sua superficie sia inclinata rispetto al piano sul quale viene eseguita la scansione (ad esempio noi abbiamo scelto una inclinazione di $\alpha = 5$ gradi, rispetto al piano di scansione orizzontale)⁷.

In questo modo ogni volta che si esegue uno spostamento Δy lungo y si produce un aumento fisso, pari a $\Delta V_z = V(\Delta y \tan \alpha)$, del segnale che misurerebbe l'altezza $z(x, y)$ del campione se esso giacesse nel piano orizzontale x, y .

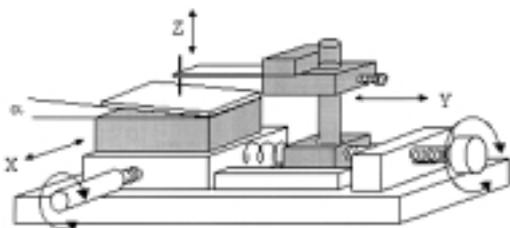


Fig. 2: - Insieme meccanico con assi coordinati.

L'immagine che si ottiene sullo schermo del PC, ove si riportano in ordinata i valori V_z e in ascissa i valori corrispondenti V_x , è una riproduzione prospettica della topografia superficiale "tridimensionale" del campione, visto dall'angolo α .

La parte meccanica dell'apparato consta essenzialmente di tre parti: il sostegno della leva (testa di misura), il porta-campioni e la puleggia per il collegamento del potenziometro.

La testa di misura è formata da una base rettangolare in ottone che porta un'asta su cui può scorrere verticalmente un morsetto costituito da due blocchetti che stringono la lamina di acciaio. Il

morsetto ha un foro passante che gli permette lo scorrimento sull'asta (per portare la punta a contatto con il campione) e il suo bloccaggio tramite una vite.

Il porta campioni è una piastra di metallo ancorata su una slitta dotata di micrometro⁸: poiché il piano di montaggio va inclinato rispetto al piano orizzontale, tra la slitta e la piastra sono interposte su un lato due rondelle di opportuno spessore.

La trasmissione del movimento del microposizionatore al potenziometro è assicurata da un elastico che avvolge la testa del micrometro e una puleggia solidale all'asse del potenziometro.

L'assemblaggio fin qui descritto permette il movimento lungo l'asse x della piastra, mentre il movimento nella direzione y della testa di misura è reso possibile da una vite che preme sulla base di ottone cui è avvitato il microposizionatore e che corre in una cava ricavata nella piastra. Il ritorno in y è assicurato da una molla di contrasto interposta tra la base di ottone e il bordo del microposizionatore.

Con questa configurazione (che mostriamo nella fotografia di figura 3) è possibile effettuare la scansione d'area del campione: ad ogni passata in x si alterna l'avanzamento di una quantità prefis-

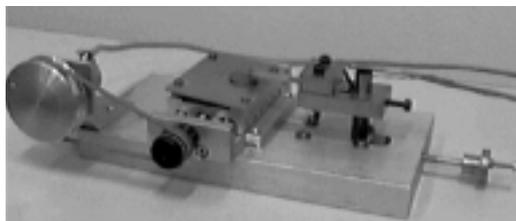


Fig. 3 - Apparato meccanico.

sata della vite lungo l'asse y .

Alcune immagini

Per dare subito un'idea di ciò che si può ottenere con questo strumento presentiamo alcune immagini di monete (la massima dimensione di scansione è definita dalla corsa utile delle due viti X e Y , nel nostro caso circa 20 mm), ottenute usando una frequenza di campionamento di circa 4 punti al secondo.

La frequenza di campionamento influisce solo sul tempo impiegato a compiere una misura: più alta è più velocemente si può compiere la scansione. Quella da noi usata consente di acquisire comodamente 4 righe al minuto con una definizione di circa 100 punti per riga, così che in 10 minuti si ottiene una immagine con una quarantina di righe.

Una fotografia dei campioni utilizzati è riportata in figura 4.

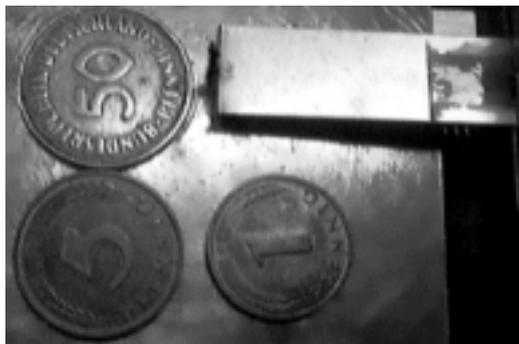


Fig. 4 - I campioni usati.

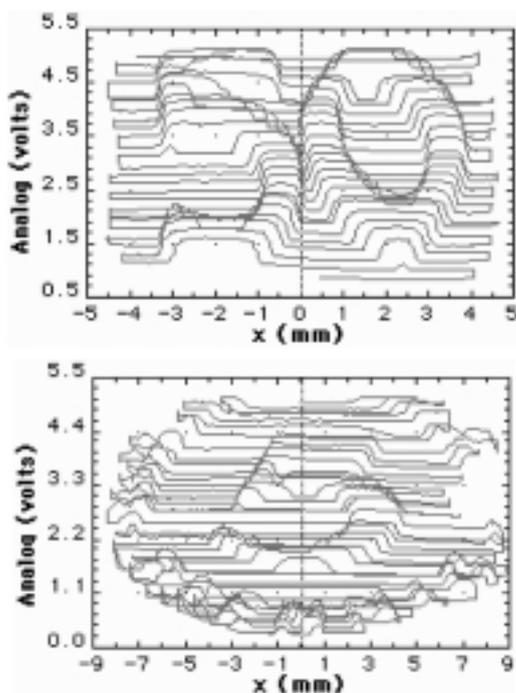


Fig. 5 - profili di monete da 50 e 5 Pfennig.

La figura 5 mostra due immagini ottenute per monete da 50 e 5 Pfennig, scelte per il loro piccolo diametro e la semplicità del disegno. Qui si è usato come sonda un ago da lana, che, avendo una punta abbastanza arrotondata (raggio di curvatura apicale $R = 0.28$ mm, figura 6), riduce la probabilità di inceppamenti e flessioni laterali della leva in corrispondenza di rilievi a spigolo vivo. Questo problema è dovuto al fatto che nel nostro dispositivo non esiste una retroazione che consenta di lavorare a forza costante come avviene normalmente nei microscopi SFM, ove in corrispondenza delle asperità del campione il supporto viene opportunamente spostato verticalmente così da mantenere costante la flessione della leva.

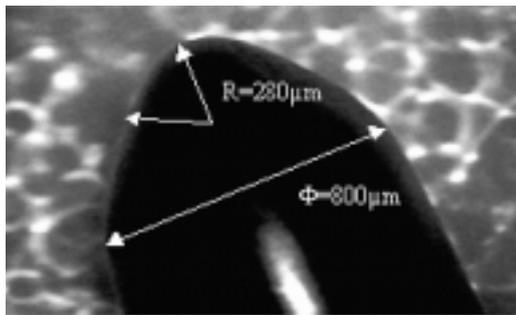


Fig. 6 - La punta dell'ago fotografata con microscopio ottico.

Ovviamente la risoluzione laterale che si ottiene è tanto minore quanto maggiore è il raggio di curvatura della sonda. Per mettere in evidenza questo effetto (che nel linguaggio dei microscopisti è detto "tip convolution") si è registrata una coppia di immagini (figura 7) del medesimo campione (una moneta da 1 Pfennig) prima usando come sonda un ago da cucito la cui punta è mostrata nella fotografia di figura 8 e poi una sfera (presa da un cuscinetto a sfere) con diametro 3mm.

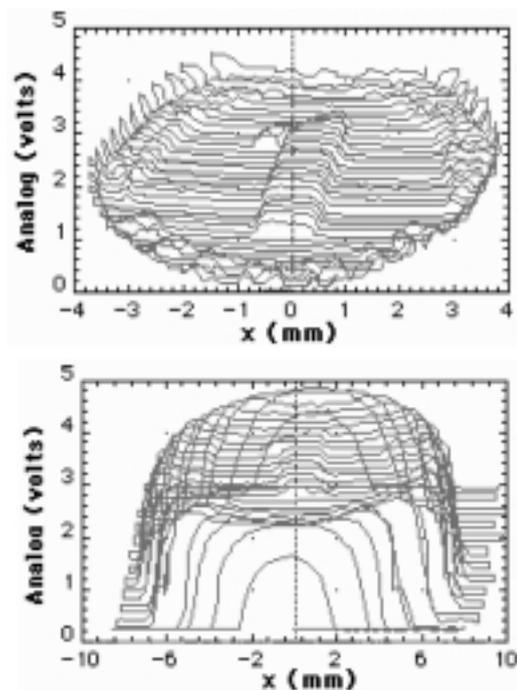


Fig. 7 - profili di moneta da 1 Pfennig ottenuti con sonde di raggio di curvatura diverso

Le immagini di figura 7 mostrano come, usando un raggio di curvatura maggiore dello spessore del campione risulta possibile evidenziarne i bordi (la punta riesce a superare scalini di altezza appena inferiori a R), ma si perde in risoluzione laterale (i

contorni del disegno risultano smussati e i rilievi ingranditi rispetto all'originale). Se si usa invece una punta di raggio inferiore si ottiene una risoluzione migliore, ma l'interazione con il campione già diventa importante: alla fine della scansione il campione risulta leggermente graffiato.

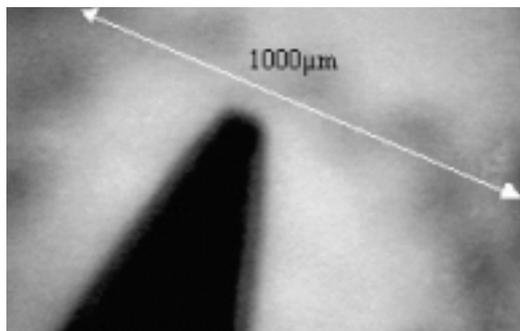


Fig. 8 - Punta di un ago da cucito con $R \approx 80 \mu\text{m}$.

Per stimare le prestazioni che questo apparato può offrire si devono analizzare i suoi diversi componenti. Qui di seguito prenderemo in esame prima il sensore che misura gli spostamenti verticali della punta (in Appendice 1 è descritta in dettaglio l'elettronica necessaria a rivelare il segnale da esso prodotto), poi il sensore di spostamento orizzontale della punta che esplora il campione.

Come funziona il sensore a leva

Si è già detto che la punta è saldata all'estremità di una leva flessibile la cui deflessione è misurata da una coppia di estensimetri.



Fig. 9 - Tipica configurazione della pista di un estensimetro a film.

L'estensimetro (in inglese *strain gauge*) è costituito da una resistenza a film sottile inglobata in una striscia di materiale plastico isolante che va incollata alla superficie dell'oggetto di cui si vuol misurare la deformazione. La geometria della pista del film resistivo conferisce all'estensimetro proprietà vettoriali, per cui la sensibilità è massima per deformazioni lungo una direzione, e minima per deformazioni lungo la direzione ortogonale. Quando il film, soggetto a trazione, si allunga la sua resistenza cresce e quando, compresso, si accorcia la sua resistenza cala. La variazione di resi-

stenza ΔR è proporzionale alla variazione di lunghezza ΔL secondo il *fattore di gauge* $G = \Delta R/R \Delta L$. Se si incollano due estensimetri uguali ad una lamina metallica, come illustrato in figura 10, e li si connette elettricamente con altre due resistenze fisse R in una configurazione a ponte di Wheatstone, si ottiene un dispositivo adatto a trasformare la flessione della lamina in un segnale elettrico riproducibile.

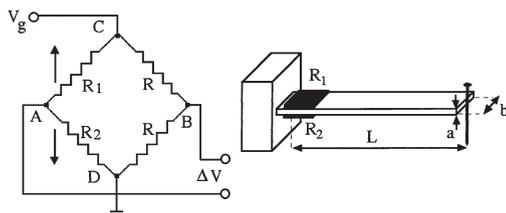


Fig. 10 - Ponte di Wheatstone e schema del sensore di forza.

Una punta saldata all'estremo libero della lamina costituisce la sonda di posizione⁹: essa, portata in contatto con la superficie da esplorare, segue il profilo della superficie facendo flettere la lamina in corrispondenza di punti in cui la coordinata $z(x,y)$ si discosta dal piano di scansione x,y .

Quando l'estremo della lamina a cui è saldata la punta si sposta verticalmente della quantità Δz , la lamina si flette, provocando l'allungamento relativo $+\epsilon$ di uno dei due estensimetri e l'accorciamento relativo $-\epsilon$ dell'altro. Il valore di Δz può essere espresso¹⁰ come $\Delta z = \epsilon(2L^2/3a)$, ove a è lo spessore della lamina e L la distanza tra la punta e l'incastro della lamina nel supporto.

Dato che il fattore di gauge¹¹ $G = (\Delta R/R)/\epsilon$ vale circa 2, la variazione relativa di resistenza di ogni estensimetro in corrispondenza di una deformazione ϵ risulta $\Delta R/R = G\epsilon = \Delta z(3a/L^2)$. Tale variazione è in generale piccola, ad esempio se $L = 30 \text{ mm}$ e $a = 0.3 \text{ mm}$ si ottiene $(\Delta R/R)/\Delta z \approx 10^{-3}/\text{mm}$, confrontabile con quella dovuta al coefficiente di temperatura $\beta = dR/R dT$ di una normale resistenza metallica (che è dell'ordine di $10^{-4}/^\circ\text{C}$) per variazioni della temperatura ambiente di qualche grado.

Il motivo per cui conviene montare due estensimetri a ponte invece che uno¹² (che basterebbe da solo in linea di principio a rivelare la flessione della lamina) è duplice: da un lato otteniamo che, essendo la loro deriva termica la stessa, rendiamo il sistema insensibile alle variazioni di temperatura, dall'altro guadagniamo un fattore 2 in sensibilità.

La tensione V_A prelevata al punto comune tra i due estensimetri è infatti funzione della tensione V_g di alimentazione del ponte e del valore delle

due resistenze $R_1 = (R - \Delta R)$ e $R_2 = (R + \Delta R)$: $V_A = V_g(R + \Delta R)/2R = V_g/2 + V_g\Delta R/2R$. Dato che la tensione all'altro estremo del ponte è $V_B = V_g/2$, la variazione della tensione differenza all'uscita del ponte è $\Delta V = V_A - V_B = V_g\Delta R/2R = V_g\varepsilon$.

Per uno spostamento verticale della punta di un decimo di millimetro, e con V_g dell'ordine del volt, si otterrà un segnale dell'ordine del mV, che va opportunamente amplificato ($G \approx 1000$) prima di essere fornito all'ingresso della interfaccia.

Per leggere la posizione della punta lungo l'asse x si è utilizzato il segnale V_x prodotto da un potenziometro a 10 giri (Helipot da 10k Ω) polarizzato a 5 V e collegato mediante un elastico alla manopola che muove la slitta portacampione. La risoluzione tipica degli Helipot è dell'ordine di 10^{-4} , e introduce una incertezza inferiore a quella dovuta al convertitore AD a 10 o 12 bit: ad esempio con una slitta che si sposti di 2 mm per ogni giro della vite micrometrica la risoluzione di lettura della tensione di 5mV darebbe una "risoluzione teorica" di 20 μ m, migliore di quella imposta dal raggio di curvatura delle più sottili punte usabili.

Come interpretare le immagini ottenute con il macroscopio

Le immagini mostrate nelle figure 5 e 7 riportano l'asse x calibrato in mm. Come si è fatta la calibrazione? Basta misurare la variazione ΔV_x corrispondente a uno spostamento Δx noto per ottenere il fattore di conversione $k_x = \Delta x/\Delta V_x$ (mm/V).

Per calibrare l'asse y si procede in modo analogo: si misura la variazione ΔV_z del segnale di sbilanciamento del ponte (prodotta da uno spostamento noto Δy lungo y su una zona piatta della superficie del campione): il fattore di conversione è $k_y = \Delta y/\Delta V_z$ (mm/V). Quando l'oggetto esaminato abbia un centro di simmetria nel piano, ad esempio un cerchio o un quadrato, la scala y può essere dedotta direttamente per confronto con la scala x . La risoluzione in y è limitata, oltre che dal valore di R , dal numero di passi in y che si eseguono (nel nostro caso abbiamo acquisito un massimo di 4 righe per mm).

Lo stesso numero k_y moltiplicato per la tangente dell'angolo di inclinazione ($\tan\alpha \approx 0.1$) fornisce ovviamente la calibrazione dell'asse z : $k_z = k_y \tan\alpha$ (mm/V).

Confronto con i microscopi SFM commerciali

La prima differenza (ovvia) tra il macroscopio e i microscopi SFM è il diverso ordine di grandezza sia nella risoluzione che nella massima superficie esplorabile.

La risoluzione laterale negli SFM è molto maggiore (≈ 100 nm) non solo perché si utilizzano punte molto sottili, ma anche perché il controllo degli

spostamenti x, y è estremamente più accurato grazie al fatto che si usa uno scanner piezoelettrico invece che un sistema meccanico a slitta. Anche la risoluzione in verticale è molto maggiore (è possibile in SFM ottenere una precisione migliore di 0.1nm, dato che in verticale non gioca la limitazione imposta dal raggio di curvatura della punta).

La perdita di risoluzione (circa 3 ordini di grandezza) è compensata da un risparmio di più di 2 ordini di grandezza nel costo (≈ 0.5 milioni contro ≈ 100 milioni).

La seconda differenza sta nel modo di registrare le immagini, che negli SFM sono costituite normalmente da matrici quadrate di valori contenenti le coordinate $z_i(x_i, y_i)$, mentre il nostro strumento produce una sequenza di vettori $z_i(x_i)$, ciascuno dei quali contiene all'incirca gli stessi valori x_i e i corrispondenti valori z_i sono incrementati ogni volta di una quantità corrispondente all'innalzamento della punta provocato dal suo spostamento lungo y . Ciò consente un ulteriore risparmio nel costo dell'hardware: si può usare anche un sistema molto economico come CBL + calcolatrice grafica Texas.

La terza differenza, già accennata in precedenza, consiste nel fatto che qui si rivela la topografia misurando il segnale prodotto dalla *flessione* della lamina anziché un segnale di spostamento verticale che mantiene costante la flessione della lamina. Questa tecnica (detta acquisizione ad *altezza costante* in contrapposizione alla più comune acquisizione a *forza costante*) viene raramente usata in SFM, ove quasi sempre si sfrutta il fatto che si dispone di un sistema servo-assistito per variare la distanza tra lamina e campione (scanner piezoelettrico comandato da computer).

La mancanza, nel macroscopio, di un servomeccanismo per controllare la distanza leva-campione pone dei limiti al valore massimo dell'altezza H di scalini sulla superficie del campione che possono essere rivelati con una punta di dato raggio di curvatura R : tipicamente dev'essere $H < R$. Di conseguenza l'immagine registrata viene deformata in proporzione al rapporto tra altezza H e base B del rilievo presente nel campione. L'immagine risultante del rilievo ha *bordi arrotondati* con raggio di curvatura R e base *allargata* (pari a $B + 2R$). Quindi, per ottenere la massima fedeltà nell'immagine, conviene usare una punta con R minimo ma ancora maggiore di H .

Il macroscopio nell'insegnamento della fisica

L'analisi delle immagini ottenute con il macroscopio, delle operazioni necessarie per ricavarle, della tecnologia che permette di ricostruirle e della conoscenza fisica che sta alla base di tutto il processo fornisce molti spunti di lavoro e di riflessione che possono essere utilizzati nell'insegnamento.

Ne riportiamo di seguito alcuni, ben consapevoli che solo una sperimentazione diretta con gli studenti potrà mettere in luce le effettive potenzialità (e le inevitabili difficoltà) insite nell'uso di tale strumento nell'insegnamento.

Innanzitutto il macroscopio costituisce un esempio del processo di trasduzione che è alla base di qualsiasi rappresentazione della realtà. In particolare offre agli studenti un contesto concreto nel quale decodificare il processo di modellizzazione insito nella costruzione di tale rappresentazione. Il profilo dell'oggetto, che è ciò che si vuole rappresentare, viene modellizzato in termini di posizione della punta in un sistema di coordinate x , y , z ; queste coordinate vengono a loro volta messe in corrispondenza con la deformazione di una leva mediante la forza che si esercita fra il campione e la punta; tale deformazione viene fatta corrispondere ad una variazione di un segnale elettrico che può essere "letta" da un dispositivo elettronico e tradotta in una immagine bidimensionale dal software contenuto nell'interfaccia e nel calcolatore.

Schematicamente possiamo così rappresentare le principali operazioni di trasduzione che vengono effettuate:

Profilo dell'oggetto (1) → Posizione della punta (2) → Forza applicata alla leva (3) → Flessione della leva (4) → Deformazione dell'estensimetro (5) → Variazione di resistenza (6) → Variazione del segnale elettrico (7) → Elaborazione del segnale nel computer (8) → Immagine visibile del profilo (9)

Per capire la logica di questo processo non è necessario conoscere i dettagli della tecnologia che lo rende possibile, mentre è importante poter isolare i diversi passaggi e valutarne l'influenza sul prodotto finale.

La meccanica del macroscopio, essendo direttamente controllabile "a vista" dall'operatore, consente di seguire nei particolari i passaggi dell'operazione di misura fino al punto 4, mentre il confronto dell'immagine sullo schermo con il profilo della moneta visibile ad occhio nudo permette di controllare che il processo "invisibile" di trasduzione tramite segnale elettrico sia veramente efficace e attendibile.

Dall'analisi del processo di formazione dell'immagine emerge poi chiaramente il ruolo della interazione fra osservatore e osservato che è caratteristica di qualsiasi processo di misura. Mediante il confronto fra le diverse immagini che si ottengono utilizzando punte diverse (che realizzano un diverso accoppiamento fra il profilo e la deformazione della leva), si possono realmente "vedere" i limiti di precisione dell'informazione ricavabile dall'interazione con l'oggetto studiato.

Questa analisi permette inoltre di sottolineare le differenze fra ciò che si può conoscere di una mo-

neta utilizzando il macroscopio (il suo profilo nei limiti della sensibilità dello strumento) e ciò che si può conoscere guardando la moneta, cioè sfruttando il segnale luminoso che proviene da essa e che viene tradotto in immagine tridimensionale colorata attraverso una complicata catena di trasduzione che termina nel nostro cervello.

Le difficoltà tecniche che è necessario affrontare per poter ottenere con il macroscopio un'immagine leggibile e soprattutto i modi nei quali è possibile superarle, possono essere sfruttati dall'insegnante per illustrare un repertorio interessante di "trucchi del mestiere" del fisico. Alcuni di questi (come l'utilizzazione della inclinazione del campione per ottenere una immagine pseudo-tridimensionale) sono facilmente comprensibili; di altri, che non sono tecnicamente alla portata di qualsiasi studente, (la connessione a "ponte" dei due estensimetri per aumentare la sensibilità e la stabilità o la relazione tra flessione della leva e deformazione degli estensimetri), non è però difficile far cogliere la logica di funzionamento.

Questi aspetti più tecnici dello strumento forniscono inoltre una occasione per riflettere sul rapporto fra fisica e tecnologia, non in astratto bensì evidenziando nel concreto di un esperimento l'applicazione delle conoscenze teoriche alla risoluzione di problemi tecnici.

Non bisogna infine sottovalutare le potenzialità didattiche legate al fatto che il macroscopio costituisce a tutti gli effetti una versione ingigantita di uno degli strumenti attuali più potenti per l'indagine nella fisica delle superfici. Un confronto con le caratteristiche di un microscopio a forza atomica e con le immagini che con esso si ottengono può fornire agli studenti le competenze necessarie per riconoscere ed apprezzare i risultati e i problemi della ricerca di punta in questo settore.

Appendice 1: Descrizione del sistema di amplificazione del segnale V_x

Il ponte è polarizzato a tensione costante V_f tramite il buffer IC1: un ramo è formato da due resistenze fisse da 10Ω separate da un potenziometro da 500Ω per il bilanciamento e l'altro dai due estensimetri (120Ω). Il punto comune ai due estensimetri è mantenuto a massa virtuale dall'operazionale IC2 che agisce da invertente nel secondo ramo del ponte. Il ponte è quindi polarizzato da due segnali di segno opposto: V_f e $V_o = -(R_2/R_1) V_f$, ove $R_2 = R + G\epsilon$ e $R_1 = R - G\epsilon$ sono i valori ohmici dei due estensimetri, e $G\epsilon = \Delta R/R$ la loro variazione relativa di resistenza.

Il segnale di sbilanciamento, prelevato al cursore del potenziometro vale $V_x = (1/2)(V_f + V_o) \approx 2\epsilon V_f$ è amplificato da IC3 e poi da IC4. Gli operazionali vanno selezionati per bassa deriva e piccolo offset (OP177).

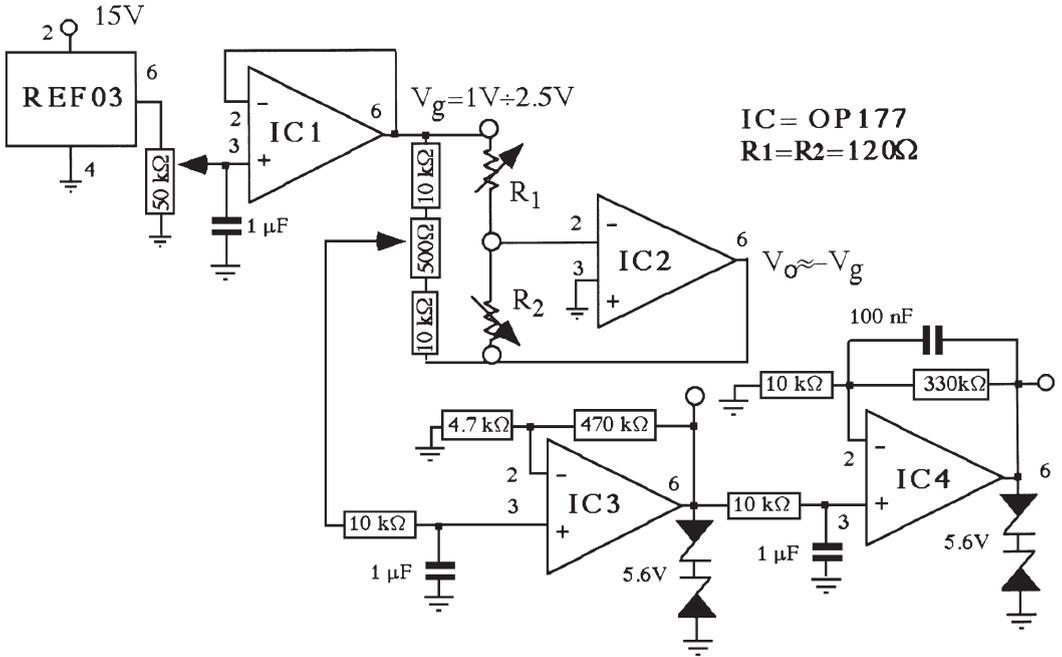


Figura 11: Schema del circuito a ponte e catena di amplificazione.

Appendice 2: Calcolo della deformazione e prodotta dalla flessione della lamina.

La deformazione di un solido elastico può essere descritta dalla relazione $\epsilon = 1/E \cdot (F/S)$ che lega l'allungamento $\epsilon = \Delta L/L$ alla forza applicata F , alla sezione S e al modulo di Young E (che per l'acciaio vale $22 \cdot 10^6 \text{ N/cm}^2$).

Vogliamo trovare la relazione che lega lo spostamento Δz (freccia) dell'estremo libero della lamina alla deformazione ϵ .

La lamina va pensata come una sovrapposizione di fibre: quelle che stanno dalla parte convessa della lamina si allungano, e quelle dalla parte concava si accorciano rispetto alla fibra mediana. La lunghezza di una porzione d'arco dx di estremi P e Q della fibra mediana si può esprimere come prodotto del raggio ρ di curvatura per l'angolo $d\alpha$ che la sottende: $dx = \rho \alpha$.

Detta allora y la distanza di una fibra generica dalla mediana, l'allungamento relativo è pari a $\epsilon = \pm y/\rho$, cui corrisponde una forza $dF = E dS(y/\rho)$, con $dS = b dy$ sezione ortogonale della fibra. Quindi la flessione della lamina produce il momento torcente

$$\Gamma = \int y dF = \int y^2 (E/\rho) dS = (E/\rho) j$$

dove

$$j = \int y^2 dS = \int_0^{a/2} y^2 b dy = a^3/12$$

Poiché le tangenti agli estremi P e Q formano tra loro un angolo α , l'infinitesimo di freccia corrispondente è pari a $dz = x dx/\rho$, ove x sta ad indicare la distanza dell'estremo P dal punto di applicazione della forza F (posizione dell'ago). Esplicitando ρ , si ottiene $dz = (F/Ej)x dx$

Se si trascura il peso della lamina, la condizione di equilibrio tra momento applicato Fx e momento resistente G fornisce

$$dz = (F/Ej) x^2 dx.$$

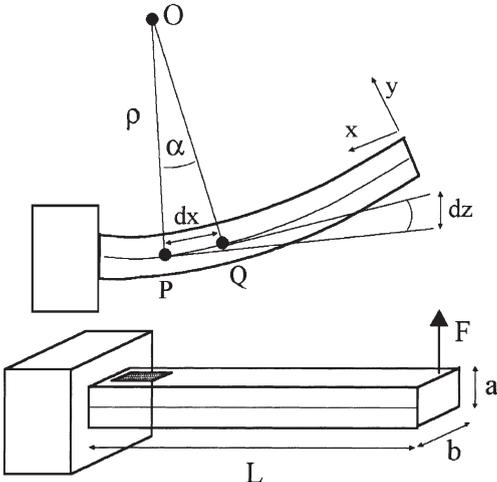


Figura 12: Schema della flessione della lamina.

La freccia totale si ottiene per integrazione su tutta la lunghezza della lamina, quindi la relazione tra forza applicata e freccia è:

$$\Delta z = (F/Ej) L^3/3 = (F/E)(4L^3/ba^3).$$

L'allungamento relativo ϵ alla superficie della lamina varia lungo x (distanza dal punto di applicazione della forza), crescendo al crescere della curvatura $1/r$. Esso è massimo in prossimità di $x \approx L$, ove sono incollati gli estensimetri. Ivi si ha $\epsilon = \pm(a/2)/\rho = \pm b1(a/2)(\Gamma/Ej)$, e il momento torcente vale $\Gamma = FL$. Dalla relazione $\Delta z = (F/Ej)L^3/3$ si ricava $(FL/Ej) = \Delta z/(3L^2)$ e si ottiene infine la relazione che lega la freccia Δz all'allungamento misurato dall'estensimetro $\epsilon = \pm(a/2)(FL/Ej) = \Delta z(3a/2L^2)$.

Un modo per ottenere una sensibilità ($\sigma = \epsilon/\Delta z$) maggiore potrebbe essere l'aumentare lo spessore a della lamina metallica e ridurre la lunghezza L , ma questo aumenterebbe, insieme al valore di ϵ , anche la forza che la punta applica al campione $F = \epsilon E a^2 b / 6L = E \Delta z b a^3 / 4 L^3$.

Con $a = 0.3\text{mm}$, $b = 10\text{mm}$, $L = 30\text{mm}$, la forza applicata dalla punta sulla superficie del campione con la deflessione di 1 mm risulta $0.25\text{ N} \approx 25$ grammi, già sufficiente a incidere leggermente un metallo se si usa un ago acuminato.

Una semplice verifica delle equazioni qui presentate si può fare (per controllare le caratteristiche del sistema meccanico impiegato, e in particolare se non si conosce il modulo di Young E del materiale usato per la lamina) semplicemente poggiando una massa nota alla estremità della lamina e misurando la freccia risultante (spostamento Δz).

Note

¹ A. ALBANESE & M. VICENTINI: "Why do we believe that an atom is colourless? Reflections about the teaching of the particle model" *Science & Education* 6, 251-261 (1997).

² Va detto qui che questa indebita estrapolazione di proprietà dal macroscopico al microscopico è spesso indotta nel lettore dell'immagine dal fatto che è frequente l'uso di colori e ombre artificiali da parte di chi tali immagini presenta.

³ Il sistema sensore + interfaccia + computer è il modo normale di costruzione di immagini microscopiche nella moderna tecnologia.

⁴ Una succinta spiegazione del metodo di produzione di immagini in microscopia SPM, SEM, TEM, è fornita ad esempio in G. TORZO: "SFM: Microscopia a scansione di forza", *La Fisica nella Scuola* XXX, 113-125 (1997).

⁵ In realtà questo nome per il nostro strumento è stato suggerito dal prof. Cesare Ascoli, uno dei pionieri italiani nel campo della microscopia a scansione di forza, in un colloquio con uno degli autori durante la seconda Scuola della Società Italiana di Microscopia Elettronica, Firenze (10/12/98).

⁶ Abbiamo usato l'interfaccia ULI e il software "Data-Logger" della ditta Vernier, ma ugualmente bene si può utilizzare una interfaccia 500 Pasco e il software Scientific Workshop, o l'interfaccia CBL e le calcolatrici grafiche Texas.

⁷ L'angolo di inclinazione deve essere abbastanza grande da consentire di separare le righe in y , ma non troppo grande per consentire un sufficiente spostamento in y senza flettere eccessivamente la lamina.

⁸ Come slitta micrometrica abbiamo usato una Domino50 della ditta Schluderbacker (255.000 lire) distribuita da: *Sistemi e componenti per l'automazione industriale*, fax: 051-807312, Budrio, Bo.

⁹ Questa è sostanzialmente la configurazione usata normalmente nei microscopi a scansione di forza commerciali, nei quali tuttavia raramente il sensore di spostamento è un estensimetro: nella maggior parte dei casi si usa un sistema a leva ottica (cfr. ref. 5).

¹⁰ Questa relazione è ricavata in Appendice 2

¹¹ Noi abbiamo usato estensimetri HBM mod.LY41 (distribuiti da R.G.F., v. Teodosio 7, 20131 Milano)

¹² Un ponte che utilizzi un solo estensimetro fornirebbe all'uscita un segnale $\Delta V = V_g(\beta \Delta T + \epsilon)/2$.