

IMPLEMENTATION OF MODERN RESEARCH TECHNIQUES OF MECHANICAL PROPERTIES OF SILICON AND ITS RESULTS APPLICATION IN ELECTRONICS

Lector univ., Andrian PRISACARU

*Academia de Studii Economice a Moldovei,
Republica Moldova, Chișinău, Bănulescu Bodoni, 61,
tel. (+373) 22 41 28, www.ase.md*

Abstract

Although a lot of new materials for micro- and optoelectronics have been elaborated within the last years, silicon remains the principal component of most semiconductor devices and has many industrial uses. Along with electrical and optical properties, mechanical behavior of Si, especially under local loading, obtained a special interest due to its peculiarity for structural phase transformation in nano- or micro-volumes of deformed material.

Implementation of modern research techniques of mechanical properties of silicon was investigated in this work.

Key words: *nanoindentation, mechanical properties, Silicon, hardness.*

JEL CLASSIFICATION: L63, L94

Introducere. Utilizarea Si ca material de bază pentru cele mai multe dispozitive electronice se datorează faptului că este un material necostisitor deoarece este al doilea element ca răspândire pe pământ, dar și că în ultimii ani au fost găsite aplicații noi în sisteme micro-electro-mecanice (MEMS) pentru crearea unor mecanisme miniaturale așa ca accelerometre, senzori de presiune și altele. Datorită faptului că fiabilitatea sistemelor micro-electro-mecanice este în legătură directă cu tipul acțiunii mecanice și condițiile mediului, dar și din cauza dimensiunilor reduse a acestora durata de viață a MEMS corespunde cu etapa de inițiere a unei fisuri deoarece odată apărută fisura pe aceste sisteme propagarea ei este foarte rapidă și devine cauza principală a ieșirii din funcțiune a sistemelor MEMS. Aceste aspecte menționate, dar și faptul că funcționalitatea sistemelor MEMS depinde de lucrul mecanic pe care îl efectuează sunt foarte importante pentru dezvoltarea industriei și din aceste considerente reprezintă un mare interes cercetarea proprietăților mecanice ale Si.

1. APLICAREA TEHNICII DE NANOINDENTARE DINAMICĂ

Analiza proprietăților mecanice ne indică modul de comportare a diferitor materiale care sunt supuse la acțiunea unor forțe exterioare. Cea mai utilizată metodă pentru analiza proprietăților mecanice ale materialelor este metoda de indentare la micro- și nano-scară datorită universalității sale, iar odată cu dezvoltarea tehnologiilor moderne metoda de indentare a devenit și mai populară.

Nanoindentarea constă în înregistrarea simultană a deplasării indentorului în funcție de creșterea (încărcarea) și descreșterea (descărcarea) a sarcinii mecanice (forței) aplicate la indentor și timpului, care permite de a studia cinetica de deformare a materialului în studiu și de a determina așa parametri mecanici cum sunt, duritatea, modulul Young, rigiditatea, limita de curgere, energia deformației plastice și elastice, etc. [1]. Indentorul ce se utilizează la nanoindentare poate avea diferite forme geometrice așa ca: sferică, conică și piramidală, cel mai des fiind utilizat cel cu piramidă triedrică de diamant Berkovici, deoarece el permite obținerea unui vârf mai ascuțit.

Duritatea și modulul Young se calculează conform metodei lui Oliver-Pharr [2], care este prezentată succint mai jos. Duritatea se calculează conform formulei:

$$H = P_{max}/A, \quad (1)$$

unde P_{max} este sarcina maximala la indentorul Berkovici, A – aria proiecției a amprenteii.

La nanoindentare aria proiecției a amprenteii se calculează din adâncimea amprenteii:

$$A = 24.56(h_c)^2, \quad (2)$$

unde h_c este adâncimea de contact, care este determinată din relația:

$$h = h_c + h_s + h_f + h_{td}, \quad (3)$$

unde h este adâncimea totală de deplasare a indenterului, h_s este încovoierea elastică pe perimetrul amprenteii și se determină din relația (4), h_f este maleabilitatea ramei, pe care este fixat indenterul și h_{td} – driftul termic din contul diferenței de temperatură a indenterului și probei. h_f și h_{td} se determină din testările și calculele respective.

$$h_s = \varepsilon P_{max}/S, \quad (4)$$

unde $\varepsilon = 0.72$ este o constantă obținută din relația Sneddon, iar S este rigiditatea de contact $S = dP/dh$, care se determină din porțiunea de descărcare a curbei de nanoindentare (Fig.1).

Pentru a micșora influența driftului termic aparatul de NI este încorporat într-un box izolat termic, iar testările încep după o ora de stabilizare și egalare a temperaturii dintre indenter și probă. La descărcarea a 90% din sarcina maximală indenterul se lasă în material pe o perioadă de 30s, în timpul căreia se măsoara deplasarea indenterului din contul driftului termic.

Luând în considerație, ca orice indenter nu poate fi obținut ideal ascuțit la vârf și are întotdeauna o rotundire (indenterul utilizat în lucrarea data are o rotundire $R \approx 200\text{nm}$), care poate da o eroare semnificativă la adâncimi mici, se face corecția ariei proiecției conform formulei:

$$A = 24.56(h_c)^2 + C_1(h_c)^1 + \dots + C_8(h_c)^{1/128}, \quad (5)$$

unde $C1 - C8$ sunt coeficienți de corecție, determinați experimental.

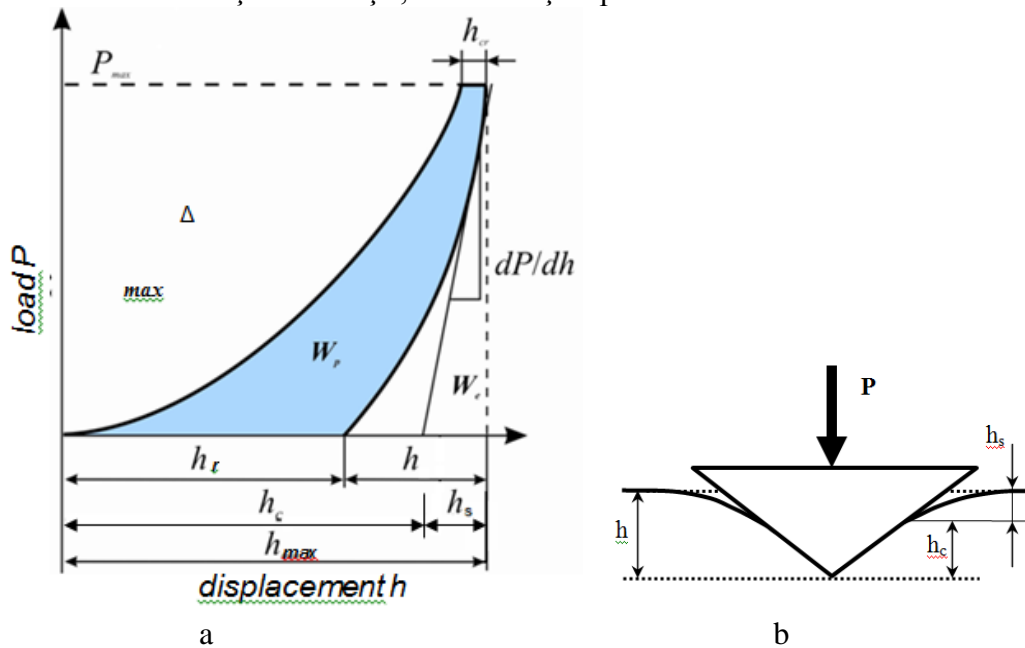


Figura 1. (a) Curba tipică de nanoindentare, care prezintă dependența deplasării indenterului h de sarcina aplicată P ; (b) schema penetrării indenterului în material.

Modulul Young (E) se calculează conform formulei (6) :

$$\frac{1}{E_r} = \frac{(1-\nu^2)}{E} + \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i}, \quad (6)$$

Aici E_r este modulul redus de elasticitate, E și ν - modulul de elasticitate și coeficientul Poisson ai probei.

2. MICROSCOPIA DE FORȚĂ ATOMICĂ (AFM)

Pentru a obține informații referitoare la aspectul morfologic a suprafeței Si în urma nanoindentării este necesar să se continue cercetarea la Microscopul de Forță Atomică (AFM), care permite obținerea imaginilor 3D a materialului studiat.

Un mare avantaj al folosirii AFM-ului este că poate fi folosit pentru cercetări în aer, vid și lichide la diferite temperaturi ceea ce reprezintă un aspect deosebit de important pentru dezvoltarea nanotehnologiei.

Microscopul de forță atomică (AFM) a fost inventat în anul 1986 și se bazează pe măsurarea forțelor de interacțiune dintre sonda și suprafața probei. În linii generale microscopul AFM este format din: detector, oglindă, sursă laser, cantilever și dispozitiv de scanare (Fig.2). Componenta cea mai importantă a AFM-ului este cantileverul, care este confecționat cel mai des din Si și nitrură de Si la capătul căruia este atașat un vârf foarte ascuțit (Fig.2). Acest vârf interacționează cu atomii de suprafață a probei, cel mai des forțele de interacțiune ce apar în urma măsurărilor la AFM sunt forțe de tip Van der Waals [3]. Aceste forțe reprezintă forțele de atracție sau de respingere de putere relativ mică dintre molecule.

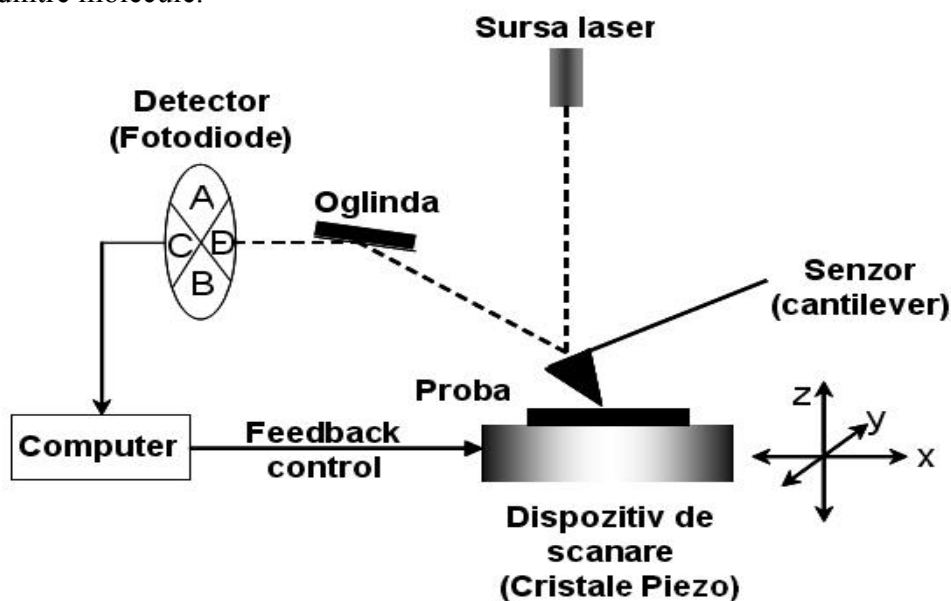


Figura 2. Schema generală a microscopului de forță atomică [4]

Informația obținută de la cantilever privind relieful suprafeței este trimisă mai departe prin intermediul fascicului laser ce se reflectă de pe cantilever pe detector format din fotodiode. O altă componentă importantă a microscopului AFM este dispozitivul de scanare, funcția căruia este de a mișca proba în direcțiile X, Y, Z cu o rezoluție atomică.

2. SPECTROSCOPIA RAMAN

Spectroscopia Raman este o altă metodă modernă de cercetare a zonelor indentate pe Si ce are la bază înregistrarea împrăștierii Raman, devenind în ultimii ani un important instrument de analiză și cercetare. Aplicabilitatea spectroscopiei Raman are loc pe o varietate largă de domenii cum ar fi: laboratoare criminalistice, produse farmaceutice, filme subțiri, polimeri, semiconductori etc.

Spectroscopia Raman este o tehnică non-invazivă, non-distructivă a materialelor analizate, ce se bazează pe efectul Raman. În spectroscopie Raman, proba este iluminată cu un fascicul laser monocromatic care interacționează cu moleculele de probă, ca rezultat având loc absorbția și împrăștierea fotonilor. Lumina împrăștiată având o frecvență diferită de cea a luminii incidente (împrăștiere inelastică) este utilizată pentru a construi spectrul Raman. După ce proba a fost iluminată, unii dintre fotonii dispersați pierd energie iar alții o câștigă. Diferența între energia fotonului înainte și după dispersie este legată de energia de vibrație a moleculei. Fenomenul de schimbare a energiei fotonului este denumit efect Raman după numele savantului care a descoperit această tehnică și a scris prima lucrare. Spectrele vibraționale obținute ce caracterizează probele investigate, sunt bazate pe două tipuri fundamentale de radiații: radiații Stokes care apar ca rezultat

al pierderii de energie de către foton și radiații anti Stokes, radiații datorate acumulării de energie de către foton (Fig.3).

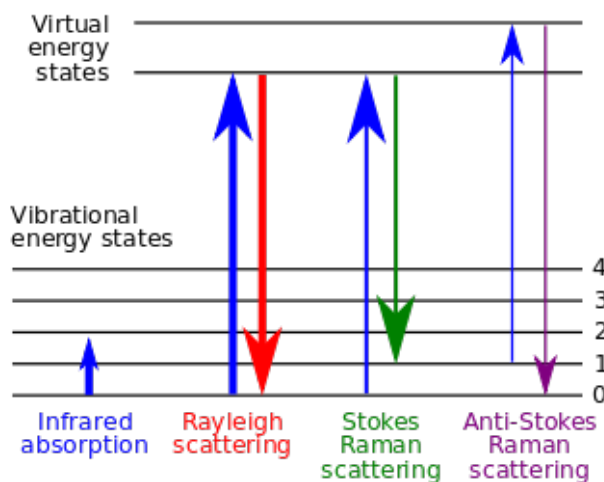


Figura 3. Benzile energetice pentru radiațiile Stokes și anti-Stokes

Graficul intensității radiației Raman în funcție de diferența frecvenței radiației incidente și radiației rezultante se reprezintă pe așa numitul spectru Raman. Diferența acestor frecvențe este cunoscută sub denumirea de deplasare Raman.

CONCLUZII

Dezvoltarea domeniilor electronicii, comunicațiilor și tehnologiei informației au impus continuarea cercetării proprietăților materialelor care stau la baza construcției celor mai multe componente electronice. Continuarea acestor cercetări este necesară deoarece odată cu trecerea la scară nanometrică apar efecte necunoscute ce pot influența proprietățile electrice, optice și nu în ultimul rând proprietățile mecanice ale materialului.

Determinarea modificărilor proprietăților mecanice ale Siliciului la nivel de nanoscară este posibilă datorită implementării tehnicilor moderne de cercetare cum ar fi: tehnica de nanoindentare dinamică; spectroscopia Raman și Microscopia de forță atomică (AFM). Rezultatele obținute permit majorarea duratei de viață, îmbunătățirea parametrilor electrice și optici, dar și reducerea dimensiunilor componentelor electronice.

BIBLIOGRAFIE

1. Shikimaka, O.; Prisacaru, A.; Burlacu, A. Effect of Long-Term Holding Under Contact Loading on the Specific Features of Phase Changes in Silicon. *Mater Sci.* 2015, 51(3), pp. 405-411.
2. Oliver, W.C., Pharr, G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // *Journal of Materials Research*, 1992, 7 (6), pp. 1564-1580.
3. Y. E. Strausser și M. G. Heaton, "Scanning Probe Microscopy Technology and Recent Innovations," *Amer. Lab.*, vol. 4, 1991., pp.254-260.
4. J. G. Franz, "Advances in atomic force microscopy," *Reviews of Modern Physics*, vol.75, 2003, pp. 949.