



UNIVERSITÀ DI PISA

DIPARTIMENTO DI  
FISICA Enrico Fermi

Largo Bruno Pontecorvo, 3  
I-56127 Pisa, Italy

Francesco Fuso

Tel. +39 0502214305, 291, 293  
Fax +39 0502214333  
fuso@df.unipi.it  
<http://www.df.unipi.it/~fuso/>

Pisa, 28/10/2010

Scuola di Dottorato Leonardo da Vinci – a.a. 2009/10

*Proprietà meccaniche, elettroniche, ottiche dei materiali alle piccole e piccolissime scale*

### PROGRAMMA DEL CORSO

1. INTRODUZIONE: necessità ed utilità della descrizione dei materiali su scala nanometrica; esempi storici e naturalistici; cenni al mondo emergente delle nanotecnologie; nanostrutture e dimensionalità dei sistemi: definizioni, concetti fondamentali. Descrizione atomistica e media per la materia condensata. Introduzione alle tecniche di microscopia a scansione di sonda per la misura di proprietà fisiche locali.
2. RICHIAMI DI MECCANICA QUANTISTICA: necessità della trattazione quantistica della materia condensata; introduzione agli aspetti e ai principi fondamentali della MQ: dualismo onda/materia, funzioni d'onda, Hamiltoniana, equazione di Schroedinger, autostati e autovalori ed equazione degli autostati. Alcune applicazioni rilevanti: barriera di potenziale, effetto tunnel, buca di potenziale e quantizzazione dei modi; cenni alla struttura dei livelli energetici in atomi isolati.
3. DESCRIZIONE QUANTISTICA DELLA MATERIA CONDENSATA: richiami di struttura della materia: solidi e solidi cristallini, decomposizione delle Hamiltoniane elettroniche e del reticolo. Modello di reticolo di Einstein/Debye: dimero sotto interazione di Lennard-Jones, trimero, sistema a N oscillatori accoppiati. Scomposizione in modi normali di oscillazione e sue proprietà matematiche: interpretazione fisica e fononi come quanti di oscillazione della materia condensata. Calcolo del calore specifico di un solido nel limite delle alte (Dulong-Petit) e basse temperature; relazione tra proprietà termo fisiche e meccaniche dei materiali.
4. ALCUNE PROPRIETÀ MECCANICHE A PICCOLA SCALA: richiami sulle principali proprietà meccaniche dei solidi e sui metodi di misura convenzionali (macroscopici): modulo di Young, stiffness e hardness, coefficiente di Poisson, compressibilità e modulo di shear. Problemi tecnologici e fondamentali nella misura delle proprietà meccaniche su piccola scala: esempi di preparazione e manipolazione di provini, ordini di grandezza delle quantità rilevanti (stress, strain, deformazioni, etc.). Cenni sulla trattazione teorica con modelli a multi-scala: esempio di modellazione della propagazione di una tensione fessurale. Esempi di sistemi a piccola scala con proprietà meccaniche eccezionali: cenni ai nanocompositi, nanotubi di carbonio, metodi di preparazione, proprietà strutturali, elettroniche e meccaniche e loro misura con AFM.
5. MICROSCOPIA A FORZA ATOMICA (AFM) COME STRUMENTO DI INDAGINE MECCANICA: introduzione alle tecniche e tecnologie coinvolte nella microscopia a scansione di sonda: nanoposizionatori e nanosonde, metodi di scansione e di controllo (feedback). Interazione meccanica su scala piccola e piccolissima tra una punta e una superficie: forze di van der Waals e cenni sulla loro origine, carattere repulsivo nel modello di Hertz, cenni su capillarità e adesione. Realizzazione pratica e principi di operazione dell'AFM in modalità di contatto e non-contatto, misura della topografia su campioni hard e soft. Meccanismi di contrasto basati sulla viscoelasticità: energia dissipata e metodi di contrasto di fase. Nanoindentazioni e misura delle



UNIVERSITÀ DI PISA

DIPARTIMENTO DI  
FISICA Enrico Fermi

Largo Bruno Pontecorvo, 3  
I-56127 Pisa, Italy

Francesco Fuso

Tel. +39 0502214305, 291, 293  
Fax +39 0502214333  
fuso@df.unipi.it  
<http://www.df.unipi.it/~fuso/>

Pisa, 28/10/2010

proprietà meccaniche (hardness e stiffness) su scala piccolissima. Forza laterale e misure meccaniche relative: modello di Tomlinson per le caratteristiche tribologiche a scala piccolissima.

6. PROPRIETÀ OTTICHE ED ELETTRONICHE DELLA MATERIA CONDENSATA: richiami sull'approccio ondulatorio allo studio della radiazione elettromagnetica, definizioni e ordini di grandezza. Descrizione semiclassica dell'interazione radiazione/materia: fotoni e transizioni elettroniche nell'atomo e nella materia condensata. Classificazione delle proprietà elettroniche dei materiali: conduttori e semiconduttori/dielettrici. Richiami di elettrostatica: proprietà di trasporto nei conduttori (metallici). Carattere dielettrico e modello quantistico della materia: formazione di bande di energia, band gap, semimetalli e semiconduttori.

7. PROPRIETÀ OTTICHE ALLA PICCOLA E PICCOLISSIMA SCALA: transizioni elettroniche e caratteristiche ottiche nei semiconduttori. Semiconduttori ingegnerizzati: eterostrutture e quantum wells, alcuni metodi di fabbricazione e proprietà ottiche. Impiego delle proprietà ottiche in quantum dots (marcatori) e in optoelettronica: cenni sul funzionamento dei laser a diodo, laser a cascata quantica. Richiami sulle proprietà ottiche dei conduttori: frequenza di plasma, riflessione e assorbimento. Oscillazioni di plasma e plasmoni superficiali: impieghi previsti in nanofotonica. Plasmoni localizzati, scattering di radiazione e colore dei metalli nobili a diverse scale di grandezza.

8. MICROSCOPIA OTTICA A SCALA CONVENZIONALE E A PICCOLA SCALA: richiami di ottica e funzionamento di un microscopio. Fenomeno della diffrazione e sua relazione con la meccanica quantistica (microscopio di Heisenberg): potere risolutivo, criterio di Rayleigh e limite di Abbe. Ingrandimento e apertura numerica: cenni all'ottica in trasformata di Fourier. Diffrazione da piccole aperture e possibilità di impiego come strumento di indagine ottica a scala piccola e piccolissima: microscopia a scansione di campo ottico (SNOM), esempi di implementazione pratica e modalità operative. Esempi misure ottiche a scala piccola e piccolissima.

Le trasparenze delle lezioni sono disponibili sul sito <http://www.df.unipi.it/~fuso/dida>

Testi di riferimento. Il materiale del corso si basa su diversi testi, tra cui:

- Kaibin Fu, *Nanomechanics: an extension of continuum mechanics to the nanoscale*, VDM Verlag (2009).
- A.N. Cleland, *Foundations of nanomechanics*, Springer-Verlag (2002).
- A.V. Zayats and D. Richards, *Nano-optics and near-field optical microscopy*, Artech House (2008).
- L. Novotny and B. Hecht, *Principles of nano-optics*, Cambridge University Press (2006).
- J.Y. Ying (ed.), *Nanostructured materials*, Academic Press (2001).
- B. Bushan (ed.), *Springer Handbook of nano-technology*, Springer (2004).
- G. Timp, *Nanotechnology*, Springer-Verlag (1999).
- C.P. Poole Jr and F. Owens, *Introduction to nanotechnology*, Wiley (2003).
- D. Brandon and W.D. Kaplan, *Microstructural characterization of materials*, Wiley (1999).
- F. Bassani, U.M. Grassano, *Fisica dello Stato Solido*, Bollati Boringhieri (2000).
- R. Waser (ed.), *Nanoelectronics and information technology*, Wiley-VCH (2003).
- P.N. Prasad, *Nanophotonics*, Wiley-Interscience (2004).
- M. Ohring, *The materials science of thin films*, Academic (1997).
- R. Wiesendanger, *Scanning Probe Microscopy: analytical methods (Nanoscience and Technology)*, Springer-Verlag (1998).