



**DIPARTIMENTO DI  
FISICA E. Fermi**

Largo Pontecorvo, 3  
I-56127 Pisa, Italy

**Francesco Fuso**

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

Pisa, 20/12/2009

## **Corso di Laurea Specialistica in Scienza dei Materiali**

### **Fisica delle nanotecnologie**

**(3 cfu, FIS/03)**

### **Programma finale del corso a.a. 2009/2010**

**Introduzione, generalità e alcuni richiami:** definizioni, motivazioni e concetti fondamentali; l'ambito della micro- e nanoelettronica: richiami sugli aspetti di base dell'elettronica convenzionale: trasporto diffusivo e comportamento dei film sottili; semiconduttori inorganici e loro drogaggio; giunzioni con semiconduttori, transistor bipolare; tecnologie "planari" e principi di funzionamento del MOS-FET; il futuro della "legge di Moore" ed alcuni problemi connessi con la miniaturizzazione.

**Tecnologie per la fabbricazione di film sottili:** crescita epitassiale ed eteroepitassiale ed aspetti microstrutturali; alcuni limiti di miniaturizzazione; principali metodi fisici e chimici per la deposizione di film sottili: MBE, MO-MBE, cenni su sputtering, PLAD, PE-CVD, LPE, deposizione da fase liquida e sol-gel.

**Tecnologie per l'osservazione e la definizione per via ottica di nanostrutture:** approcci top-down convenzionali: litografia ottica, cenni di tecnologia del resist e dell'etching, lift-off; richiami sulla diffrazione ottica, risoluzione spaziale e limite di Abbe; microscopia ottica convenzionale, microscopia confocale; strategie per l'aumento della risoluzione spaziale nella litografia ottica: off-axis illumination, cenni su etching anisotropo, side-wall patterning e litografia a multi fotone, maschere a contrasto di fase; manipolazione laser di atomi neutri e litografia atomica come esempio di tecnica bottoms-up: forza dipolare e cenni di raffreddamento laser; tecniche emergenti di nanoimprinting per materiali soft.

**Tecnologie per l'osservazione e la definizione di nanostrutture mediante fasci di cariche:** microscopia elettronica SEM e TEM: funzionamento e principali meccanismi di contrasto in trasmissione e in riflessione, campo chiaro e campo scuro, microanalisi; litografia elettronica e con fasci ionici: tecniche EBL a scansione, SCALPEL e FIB; vantaggi e limiti connessi con la litografia a fascio di cariche.

**Tecnologie per l'analisi e la manipolazione di nanoparticelle mediante microscopia a scansione di sonda:** generalità sulla SPM: modi di operazione, artefatti, risoluzione spaziale; richiami sull'effetto tunnel e principali modelli interpretativi dell'STM (modello giunzione MIM o di Simmons, modello di Bardeen/Tersoff-Hamann, densità degli stati superficiali), risoluzione spaziale verticale e laterale; interpretazione delle curve I-V ed I-Z (spettroscopia); interazione meccanica tra atomi e superfici: cenni al modello di Hertz, all'adesione superficiale, alle forze di Van der Waals; funzionamento dell'AFM/SFFM; modalità di operazione in contatto, non-contatto, contatto intermittente e contrasto di fase per la misura della viscoelasticità superficiale; esempi di altre microscopie a scansione di forza verticale e laterale; campo ottico prossimo: interpretazione in termini di ottica di Fourier, relazione con il principio di indeterminazione, modello di Bethe-Bouwkamp; microscopia a campo prossimo ottico (SNOM) e sue applicazioni principali; esempi di nanomanipolazione e nanolitografia mediante SPM: cenni di nanomanipolazione verticale e laterale, litografia STM, esempi di nanoscrittura per intrappolamento di carica in ossidi, nanoindentazione e nanoscratching; nanoscrittura ottica su materiali fotoattivi.

**Proprietà ottiche in sistemi e dispositivi a bassa dimensionalità:** densità degli stati e dimensionalità dei sistemi; proprietà ottiche di sistemi confinati a base di semiconduttori (MQW e quantum dots): eccitoni; richiami sui laser ad



UNIVERSITÀ DI PISA

DIPARTIMENTO DI  
FISICA E. Fermi

Largo Pontecorvo, 3  
I-56127 Pisa, Italy

Francesco Fuso

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

Pisa, 20/12/2009

eterogiunzione e sulla loro tecnologia; aspetti fondamentali di alcuni laser “nanotecnologici” (a quantum dot, a cavità verticale); laser a cascata quantica; fotoluminescenza da quantum dots e nanocristalli; richiami sui plasmoni di superficie: confinamento e propagazione di energia, applicazioni; risonanze plasmoniche localizzate in nanoparticelle metalliche: proprietà in campo prossimo, scattering di Mie, esempi di applicazioni; esempi di nanofotonica (guide d’onda plasmoniche); argomento facoltativo: cristalli a band-gap fotonico.

**Proprietà di trasporto elettronico in sistemi e dispositivi a bassa dimensionalità;** modulation doping e sistemi 2DEG all’interfaccia tra semiconduttori; effetto Hall quantistico: livelli di Landau, quanto di resistenza di von Klitzing; trasporto balistico in sistemi 2DEG: guide d’onda elettroniche e quantum wires: livelli di Landauer, cenni sui modi trasversi e sulla propagazione balistica in guida; cenni su effetto tunnel da barriera doppia e diodi ad effetto tunnel risonante; fenomeni di singolo elettrone ed effetti di Coulomb-blockade e Coulomb staircase in sistemi 0DEG; applicazioni a singolo elettrone.

**Nanostrutture isolate e materiali nanocompositi (argomento facoltativo non trattato a lezione):** nanostrutture di carbonio: cenni su fullereni e nanotubi; fabbricazione, morfologia, struttura, proprietà elettroniche e cenni sulle proprietà meccaniche di nanotubi di carbonio; esempi di dispositivi innovativi a base di nanotubi (CNT-FETs).

**Esempi di sistemi nanotecnologici di natura organica (argomento facoltativo non trattato a lezione):** generalità ed introduzione su alcune tematiche nanotecnologiche basate sull’impiego di sistemi molecolari e macromolecolari; fabbricazione di film sottili di natura organica: monostrati autoassemblati (SAM) e loro impiego; fondamenti della conduzione in polimeri coniugati e ruolo del drogaggio; trasferimento di carica in molecole singole ed esempi di nanoelettronica intramolecolare (cavi, switches, diodi,...); alcune prospettive sulla fabbricazione e l’impiego di sistemi ibridi bio-molecolari: cenni sulla realizzazione di templates basati su DNA; dispositivi emettitori a base organica: architettura degli OLED multistrato, materiali e principali problematiche.]

**Modalità di svolgimento dell’esame finale:** l’esame si svolge normalmente sotto forma di una breve presentazione/seminario su un argomento di interesse per il corso da decidere in accordo con il docente.

**Testi di riferimento:** materiale didattico è disponibile sul sito del docente (<http://www.df.unipi.it/~fuso/dida>). Un elenco parziale dei testi di riferimento utilizzati comprende:

- P.Y. Yu, M. Cardona, *Fundamentals of semiconductors: physics and materials properties*, Springer Verlag (1999).
- F. Bassani, U.M. Grassano, *Fisica dello Stato Solido*, Bollati Boringhieri (2000).
- R. Waser (ed.), *Nanoelectronics and information technology*, Wiley-VCH (2003).
- B. Bushan (ed.), *Springer Handbook of nano-technology*, Springer (2004).
- P.N. Prasad, *Nanophotonics*, Wiley-Interscience (2004).
- M. Ohring, *The materials science of thin films*, Academic (1997).
- G. Timp. *Nanotechnology*, Spinger-Verlag (1999).
- M.J. Madou, *Fundamentals of microfabrication*, CRC Press (1997).
- R. Wiesendanger, *Scanning Probe Microscopy: analytical methods (Nanoscience and Technology)*, Springer-Verlag (1998).
- C.P. Poole Jr and F. Owens, *Introduction to nanotechnology*, Wiley (2003).
- J.M. Tour, *Molecular Electronics*, World Scientific (2003).
- J.Y. Ying (ed.), *Nanostructured materials*, Academic Press (2001).
- D. Brandon and W.D. Kaplan, *Micrsostructural characterization of materials*, Wiley (1999).