UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI MILANO-BICOCCA

SYLLABUS DEL CORSO

Fabrication and Characterization of Nano and Quantum Materials

2526-1-F1703Q009

Obiettivi

Il corso mira a raggiungere i seguenti risultati:

1. Conoscenza e capacità di comprensione: introdurre i principi fisici fondamentali e le caratteristiche uniche alla base di nano materiali quantistici; i principali metodi di crescita utilizzati per sintetizzarli; nonché, le principali tecniche sperimentali utilizzate per indagare il loro comportamento quantistico.
2. Conoscenza e capacità di comprensione applicate: Il corso tratterà i più importanti metodi sperimentali di deposizione e caratterizzazione utilizzati per fabbricare e comprendere questi materiali complessi fino a livello subatomico. Il corso mostrerà come e perché questi materiali hanno un grande potenziale per la realizzazione nel prossimo futuro di nuove opportunità tecnologiche.
3. Autonomia di giudizio: Gli studenti saranno in grado di valutare le tecniche di fabbricazione e caratterizzazione più adatte e i parametri da ottimizzare per lo studio di nanomateriali e materiali quantistici.
4. Abilità comunicative: Gli studenti acquisiranno una terminologia specialistica sulle tematiche trattate nel corso.
5. Capacità di apprendere: Gli studenti saranno in grado di seguire corsi più avanzati, seminari, e consultare in autonomia libri sulle tematiche trattate nel corso.

Contenuti sintetici

- Introduzione: materiali quantistici per la moderna tecnologia quantistica.
- Principi fisici dei materiali quantistici allo stato solido.
- Studio dettagliato di due classi di materiali quantistici: solidi di van der Waals e isolanti topologici.
- Teoria della nucleaione e della crescita dei cristalli, epitassia ed eteroepitassia.
- Metodi di fabbricazione avanzati per un controllo preciso di composizione, strain, e morfologia.
- Tecniche sperimentali avanzate per l'analisi dello stato quantistico dei materiali.

Programma esteso

- Introduzione: Utilizzo di materiali quantistici per le moderne tecnologie quantistiche. Panoramica dei prerequisiti del corso, contenuti delle lezioni, libri di testo/letteratura e metodi di valutazione.
- Simmetrie allo stato solido: gruppi puntuali, gruppi spaziali, gruppi magnetici, rappresentazioni irriducibili e struttura a bande.
- Ulteriori simmetrie allo stato solido: teorema di Noether ed esempi, simmetria di inversione temporale, accoppiamento Spin-Orbita
- Bassa dimensionalità (confinamento quantistico in 2D, 1D e 0D).
- Topologia e stati topologicamente protetti: Teoria delle bande topologiche, Stato Hall quantistico, invariante TKNN, Stati di edge chirali, fase di Berry, numero di Chern.
- Isolanti topologici 2D e 3D: modello di Haldane, modello di Kane-Mele, invariante Z2, quantum well HgTe/CdTe, antimoniuro di bismuto, seleniuro di bismuto.
- Materiali 2D e grafene (struttura a bande, pseudospin, massa efficace, e densità di stati)
- Solidi di van der Waals: proprietà elettroniche e strutturali di strati singoli, multistrati ed eterostrutture.
- Introduzione alla sintesi dei cristalli. Equilibrio di fase cristallo-ambiente.
- Teoria della nucleazione: formazione omogenea ed eterogenea di nuclei 2D e 3D. Velocità di nucleazione.
- Teoria della crescita dei cristalli: crescita normale delle facce ruvide; crescita dello strato delle facce piane (velocità di avanzamento di uno step); crescita strato per strato e multistrato.
- Epitassia, eteroepitassia, deformazione e rilassamento.
- Aspetti pratici e tecnici dell'epitassia da fasci molecolari (MBE).
- Utilizzo della MBE per la crescita di materiali quantistici selezionati.
- Chemical Vapour Deposition (CVD): concetti di base, aspetti pratici ed esempi di crescita di materiali quantistici.
- Deposizione per Sputtering, Pulsed Laser Deposition (PLD) e Atomic Layer Deposition (ALD).
- Spettroscopie fotoelettroniche: introduzione ai raggi X (generazione e rilevamento), transizioni nucleo-buco e classificazione, aspetti pratici e teorici, rilevanza per le indagini sulla fisica dello stato solido.
- Spettroscopia fotoelettronica ultravioletta (UPS) e spettroscopia di emissione fotoelettronica ad angolo risolto (ARPES): concetti di base, aspetti teorici, aspetti pratici ed esempi di indagine di materiali quantistici.
- Spettroscopie di assorbimento dei raggi X (NEFAFX ed EXAFS) e spettroscopia di perdita di energia degli elettroni (EELS): concetti di base, aspetti teorici, aspetti pratici ed esempi di studio di materiali quantistici.
- Tecniche risonanti: spettroscopie fotoelettroniche risonanti (ResPES e Res-ARPES) e diffusione anelastica di raggi X risonanti (RIXS): concetti di base, aspetti teorici, aspetti pratici ed esempi di studio di materiali quantistici.
- Tecniche ottiche ed elettroniche ultraveloci per lo studio dinamico dei materiali: concetti di base, aspetti teorici, aspetti pratici ed esempi di studio di materiali quantistici.

Prerequisiti

Concetti di base della meccanica quantistica e della fisica dello stato solido.

Modalità didattica

Lezioni frontali ed esercitazioni con l'utilizzo di diapositive e/o lavagna.
In particolare ci saranno:
a) 12 lezioni da 2 ore in presenza, Didattica Erogativa.
c) 15 attività di esercitazione da 2 ore in presenza, Didattica Erogativa.

Materiale didattico

Libri di Testo

1. Tinkham M. (2004), Group Theory and Quantum Mechanics. Dover Publications Inc.
2. El-Batanouny, M. (2020). Advanced Quantum Condensed Matter Physics: One-Body, Many-Body, and Topological Perspectives. Cambridge University Press.
3. B. Andrei Bernevig, Taylor L. Hughes (2013). Topological Insulators and Topological Superconductors, Princeton University Press.
4. Jia-Ming Liu and I-Tan Lin (2018). Graphene Photonics. Cambridge University Press.
5. Avouris, P., Heinz, T., & Low, T. (Eds.). (2017). 2D Materials: Properties and Devices. Cambridge University Press.
6. Ivan V Markov (2003), Crystal Growth for Beginners: Fundamentals of Nucleation, Crystal Growth and Epitaxy, 2nd Edition, World Scientific.
7. Hans Lüth (2014). Solid Surfaces, Interfaces and Thin Films. Graduate Texts in Physics.
8. Barabási, A., & Stanley, H. (1995). Fractal Concepts in Surface Growth. Cambridge University Press.

Articoli Scientifici

Different topics of the course are also well presented in scientific articles, such as:

1. Feliciano Giustino et al (2020) The 2021 quantum materials roadmap. J. Phys. Mater. 3 042006.
2. B. Keimer & J. E. Moore (2017) The physics of quantum materials. Nature Physics 13, 1045–1055.
3. Hasan MZ, Kane CL (2010) Colloquium: Topological insulators. Reviews of Modern Physics, 82(4):3045–3067.
4. N. T. Ziani, L. Vannucci, M. Sassetti (2018) Topological insulators: a beautiful revolution. Il Nuovo Saggiatore, 34, 13.
5. N. Kumar, S. N. Guin, K. Manna, C. Shekhar, and C. Felser (2021), Topological Quantum Materials from the Viewpoint of Chemistry, Chem. Rev. 2021, 121, 2780?2815.
6. Novoselov KS, Mishchenko A, Carvalho A, Neto AHC (2016) 2D materials and van der Waals heterostructures. Science, 353, aac9439.
7. Jonathan A. Sobota, Yu He, and Zhi-Xun Shen (2021). Angle-resolved photoemission studies of quantum materials. Rev. Mod. Phys. 93, 025006.
8. Fink, J., Schierle, E., Weschke, E. & Geck, J. (2013) Resonant elastic soft x-ray scattering. Reports on Progress in Physics 76, 056502.
9. Ament, L. J. P., van Veenendaal, M., Devereaux, T. P., Hill, J. P. & van den Brink, J. (2011) Resonant inelastic x-ray scattering studies of elementary excitations. Rev. Mod. Phys. 83, 705–767.
10. Y. Zhu and H. Dürr (2015). The future of electron microscopy. Physics Today 68(4), 32.
11. C. Colliex (2019). Chapter Three - Electron energy loss spectroscopy in the electron microscope. Advances in Imaging and Electron Physics 211, 187-304.
12. Caruso, F., & Novko, D. (2022). Ultrafast dynamics of electrons and phonons: from the two-temperature model to the time-dependent Boltzmann equation. Advances in Physics: X, 7(1).
13. J. Orenstein (2012), Ultrafast spectroscopy of quantum materials, Physics Today 65, 9, 44.
14. J Lloyd-Hughes et al (2021) The 2021 ultrafast spectroscopic probes of condensed matter roadmap. J. Phys.: Condens. Matter 33 353001.

Periodo di erogazione dell'insegnamento

Secondo semestre.

Modalità di verifica del profitto e valutazione

a) Esame finale. Le conoscenze degli studenti verranno valutate attraverso una prova orale incentrata sugli argomenti trattati durante il corso. L'esame si svolgerà alla fine del corso e non sono previste prove in itinere durante lo svolgimento del corso.

b) Competenze valutate. Nella prova finale vengono valutate le seguenti competenze: 1. Conoscenza dei concetti fondamentali della fisica dei nano materiali quantistici, con particolare focus su materiali 2D e isolanti topologici; 2. Conoscenza dei concetti fondamentali riguardo i metodi e le tecniche di crescita dei nano materiali quantistici; 3. Capacità di progettare strategie di fabbricazione per materiali specifici e di identificare le piu' appropriate tecniche di misura da utilizzare per caratterizzare le loro proprietà quantistiche.

c) Criteri di valutazione. Durante la prova orale valuteremo i seguenti parametri: i) percentuale di domande a cui è stata data risposta corretta; ii) per ciascuna risposta, percentuale dei dettagli sperimentali e teorici forniti dallo studente rispetto a quelli esposti, discussi e applicati durante il corso; iii) per ciascun argomento proposto in sede d'esame, percentuale di commenti sugli aspetti applicativi rispetto a quelli discussi e inseriti nei contenuti del programma.

Orario di ricevimento

Dal lunedì al venerdì in qualsiasi orario di lavoro (è opportuno concordare appuntamento con il docente tramite email).

Sustainable Development Goals

ISTRUZIONE DI QUALITÁ | IMPRESE, INNOVAZIONE E INFRASTRUTTURE