



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

DIPARTIMENTO	Ingegneria
ANNO ACCADEMICO OFFERTA	2022/2023
ANNO ACCADEMICO EROGAZIONE	2023/2024
CORSO DILAUREA MAGISTRALE	ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING (FULLY ONLINE)
INSEGNAMENTO	NANOELECTRONICS
TIPO DI ATTIVITA'	D
AMBITO	20582-A scelta dello studente
CODICE INSEGNAMENTO	20519
SETTORI SCIENTIFICO-DISCIPLINARI	ING-INF/01
DOCENTE RESPONSABILE	MACALUSO ROBERTO Professore Associato Univ. di PALERMO
ALTRI DOCENTI	
CFU	9
NUMERO DI ORE RISERVATE ALLO STUDIO PERSONALE	162
NUMERO DI ORE RISERVATE ALLA DIDATTICA ASSISTITA	63
PROPEDEUTICITA'	
MUTUAZIONI	
ANNO DI CORSO	2
PERIODO DELLE LEZIONI	1° semestre
MODALITA' DI FREQUENZA	Facoltativa
TIPO DI VALUTAZIONE	Voto in trentesimi
ORARIO DI RICEVIMENTO DEGLI STUDENTI	MACALUSO ROBERTO Martedì 13:00 15:00 DEIM

DOCENTE: Prof. ROBERTO MACALUSO

PREREQUISITI	Per poter frequentare in modo proficuo il corso, lo studente deve possedere un'ampia conoscenza sia della Fisica Moderna che dei Dispositivi Elettronici (principalmente MOSFET).
RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI	Conoscenza e comprensione Al termine del corso, lo studente avrà piena conoscenza della progettazione e dei materiali più avanzati per la realizzazione di dispositivi MOSFET in scala ridotta. In particolare, lo studente sarà in grado di comprendere, a partire dai limiti fisici e tecnologici della tecnologia CMOS, che attualmente domina il mercato dei circuiti elettronici integrati, quali tecnologie e materiali alternativi verranno utilizzati per ottenere dispositivi sempre più densi, veloci e a basso consumo energetico. Per raggiungere questo obiettivo, il corso prevede: lezioni videoregistrate, discussioni guidate dal docente di casi di studio; esercizi e progetti; revisione di articoli scientifici su temi di ricerca emergenti. Capacità di applicare conoscenza e comprensione. Lo studente sarà in grado di applicare le conoscenze acquisite per lo studio e la progettazione di dispositivi MOSFET a canale corto, e per la crescita e la caratterizzazione di nuovi materiali nanostrutturati e nuovi dispositivi Nanoelettronici. Per raggiungere questo obiettivo, il corso prevede lezioni frontali con soluzioni progettuali esemplari, oltre a compiti individuali assegnati agli studenti durante il corso. Capacità di giudizio. Durante il corso, particolare enfasi viene data a stimolare la capacità di giudizio indipendente dello studente nel valutare le strategie tecnologiche, i vantaggi economici, la qualità e l'efficienza associati ai processi e ai dispositivi di fabbricazione studiati. Lo studente acquisirà competenze tali da potersi confrontare sia dal punto di vista tecnico e scientifico che da quello da un punto di vista economico, diversi materiali, tecnologie e dispositivi per la micro e nanoelettronica, correlandoli alle particolari applicazioni di volta in volta considerate. Questa capacità di confronto, unitamente alla conoscenza della fisica di base che sta alla base dei dispositivi studiati, gli consentirà di essere in grado di occuparsi della progettazione di nuovi nanodispositivi. Per raggiungere questo obiettivo, il corso offre lezioni video con esempi di soluzioni progettuali di sistema, nonché esercizi con un livello di complessità crescente e discussioni di casi di studio con il tutor. Abilità comunicative Lo studente acquisirà la capacità di comunicare efficacemente su argomenti e problematiche inerenti l'oggetto del corso anche in un contesto internazionale: in particolare, verrà prestata particolare attenzione alla terminologia tecnica inglese. Lo studente, inoltre, sarà in grado di tenere conversazioni su questioni riguardanti la scelta di materiali nanostrutturati e nanodispositivi per scopi specifici, evidenziare problemi legati ai limiti del loro funzionamento e offrire soluzioni. Per raggiungere questo obiettivo, lo studente può fare affidamento sulle video lezioni e sulle interazioni con il tutor. Capacità di apprendimento Lo studente imparerà le interazioni tra la fisica dei nanodispositivi e il loro utilizzo nelle applicazioni più comuni. Questo gli permetterà di essere competitivo in un settore in continua crescita e oggi estremamente strategico per tutte le economie avanzate, che abbraccia un'ampia gamma di applicazioni. Lo studente può quindi lavorare nella progettazione e realizzazione di prodotti innovativi e di alto contenuto scientifico in tutti i settori industriali e ricerca applicata basata sulle nanotecnologie. Per raggiungere questo obiettivo, il corso prevede: lezioni video che illustrano specifici nanodispositivi e nanostrutture; letture e questionari su articoli di ricerca tratti dalle letterature scientifiche; dibattiti tecnici sul forum di classe su temi emergenti tra gli studenti.
VALUTAZIONE DELL'APPRENDIMENTO	ORGANIZZAZIONE ESAMI L'esame si basa su una prova scritta e sulla valutazione dei compiti assegnati allo studente. Il voto della prova scritta è compreso nella fascia 0-25, mentre il voto dei compiti assegnati nella fascia 0-5. Il voto finale è dato dalla somma della prova scritta e della valutazione dei compiti assegnati durante il corso. Il voto minimo per superare la prova è 18/30. DESCRIZIONE DELLE PROVE La prova scritta sarà basata su tre domande aperte che spazieranno sugli argomenti principali del corso, più altre tre domande a risposta multipla. Scopo della prova scritta è verificare che lo studente abbia piena padronanza di tutti gli argomenti trattati durante il corso. Le domande tenderanno a verificare

	che lo studente possieda adeguate capacità di presentazione, sappia correlare da solo i vari contenuti del corso, comprenda le applicazioni o le implicazioni dei vari contenuti trattati dal corso, abbia acquisito adeguata padronanza della lingua tecnica, con particolare riferimento alla terminologia tecnica inglese. La prova scritta dura 2 ore. Il compito a casa si basa sulla soluzione di esercizi e/o questionari proposti al termine di ogni modulo didattico, nonché sull'elaborazione autonoma di un argomento avanzato/di ricerca (tipicamente su dispositivi e tecnologie nanoelettroniche emergenti) selezionato dallo studente, che è organizzato in una presentazione power point. Il compito a casa permette di valutare: - La capacità di leggere e comprendere la letteratura di ricerca e gli standard tecnologici relativi agli argomenti del corso; - La capacità di reinterpretazione dei concetti e connessioni interdisciplinari, mostrando prove per intraprendere autonomamente ulteriori studi o attività professionali. RISULTATI DI APPRENDIMENTO Al fine di fornire la valutazione complessiva, verranno stimati i risultati raggiunti nei seguenti obiettivi del corso. Conoscenza e comprensione: Valutazione della conoscenza, comprensione e integrazione di principi, concetti, metodi e tecniche della disciplina. Conoscenza applicata: valutazione delle capacità nell'applicazione delle conoscenze teoriche e tecniche per affrontare e risolvere problemi; valutazione del livello di autonomia e originalità delle soluzioni proposte. Autonomia di giudizio: valutazione delle capacità logiche, analitiche e critiche per raggiungere giudizi e decisioni appropriati, sulla base delle informazioni e dei dati disponibili. Abilità comunicative e capacità di apprendimento: Valutazione della capacità di comunicare conoscenze, analisi e conclusioni, con un buon livello di chiarezza, scioltezza e corretto uso della lingua. VOTO 30-30 e lode: Eccellente. Piena conoscenza e comprensione di concetti e metodi della disciplina, ottime capacità analitiche anche nella risoluzione di problemi originali; ottime capacità comunicative e di apprendimento. 27-29: Molto buono. Ottima conoscenza e comprensione dei concetti e dei metodi della disciplina; ottime capacità di comunicazione; ottima capacità di applicazione di concetti e metodi. 24-26: Buono. Buona conoscenza dei principali concetti e metodi della disciplina; discrete capacità di comunicazione; autonomia limitata nell'applicazione di concetti e metodi per la risoluzione di problemi originali. 21-23: Soddisfacente. Conoscenza parziale dei principali concetti e metodi della disciplina; capacità comunicative soddisfacenti; scarsa autonomia di giudizio. 18-20: Accettabile: Conoscenza minima dei concetti e dei metodi della disciplina; capacità comunicative minime; autonomia di giudizio molto scarsa o nulla. Inaccettabile: conoscenza e comprensione insufficienti dei concetti e dei metodi della disciplina.
OBIETTIVI FORMATIVI	Il corso fornisce, insieme allo stato dell'arte della tecnologia CMOS, attualmente dominante nel mercato dei circuiti integrati, e alle problematiche relative allo scaling di questi dispositivi, conoscenze specifiche sulle proprietà e sulla tecnologia di nuovi materiali come il grafene, i nanotubi di carbonio, come potenziali elementi costitutivi per la realizzazione di una nuova generazione di circuiti integrati ad alta densità, alta velocità e basso consumo energetico. Il corso tratterà anche tecniche avanzate di fabbricazione e caratterizzazione di nanodispositivi e nanostrutture, e comprende sia esercitazioni teoriche che sessioni di laboratorio virtuale. Queste ultime mirano ad evidenziare gli aspetti pratici delle tecnologie di micro e nanofabbricazione e l'uso di alcune delle tecniche di caratterizzazione (es. microscopia elettronica a scansione e microscopia a forza atomica) studiate durante il corso.
ORGANIZZAZIONE DELLA DIDATTICA	Il corso è organizzato in 6 moduli, ciascuno comprendente un set di video lezioni (preregistrate) e un set di e-tivity: Più in dettaglio, l'elenco dei moduli è il seguente: 1) Introduzione alla Nanoelettronica: verso le dimensioni nanometriche (4 ore di videolezioni); 2) Scaling di dispositivi MOSFET ed effetti di canale corto (6 ore di video lezioni); 3) Dispositivi MOSFET avanzati (4,5 ore di videolezioni); 4) Tecnologia di fabbricazione di Micro e Nanodispositivi (6 ore di video lezioni); 5) Caratterizzazione dei nanomateriali (6 ore di videolezioni); 6) Nuovi materiali per la Nanoelettronica e applicazioni (5 ore di video lezioni). Per ogni modulo vengono proposti una serie di esercizi, questionari ed esperienze di laboratorio virtuale come attività di apprendimento aggiuntive, pensate anche per facilitare l'autovalutazione dei risultati di apprendimento. Ci si

	aspetta che ogni studente dedichi circa 32 ore a queste attività. Circa la metà delle attività proposte sarà svolta in autonomia dagli studenti, mentre l'altra metà sarà supervisionata o guidata dal tutor del corso. Più nel dettaglio, le attività interattive previste per ciascun modulo sono le seguenti: 1) Laboratorio virtuale sull'interazione luce-nanomateriali (2 ore con tutor) e questionari (3 ore); 2) Esercitazioni sugli effetti di canale corto (2 ore con tutor e 2 ore senza tutor) e questionario (1 ora); 3) Esercitazioni su MOSFET avanzati (1 ora con tutor e 2 ore senza tutor) e questionari (2 ore); 4) Laboratorio virtuale su Micro e Nano fabbricazione di dispositivi elettronici (2 ore con tutor) e questionari (3 ore); 5) Laboratorio virtuale sulla caratterizzazione dei nanomateriali (2 ore con tutor) e questionari (3 ore); 6) Laboratorio virtuale di sintesi di nanotubi di carbonio (CNT) mediante deposizione chimica da fase vapore (CVD) (2 ore con tutor) e questionari (3 ore). Le attività saranno organizzate sulla piattaforma di apprendimento on-line, sfruttando anche forum di discussione e incontri interattivi per l'organizzazione delle attività laboratoriali. Il monte ore complessivo per le singole attività di studio è stimato in ulteriori 130 ore più 32 ore per la seconda riproduzione delle videolezioni.
TESTI CONSIGLIATI	Reference texts: • R. S. Muller, T. I. Kamins: "Device electronics for integrated circuits", Wiley, 2003. ISBN: 978-0-471-59398-0. e-book available through UniPa Discovery Service. • Zheng Cui: "Nanofabrication - Principles, Capabilities and Limits", 2° Edition, Springer, 2017. ISBN 978-3-319-39359-9. e-book available through UniPa Discovery Service. • Y. Leng: Materials characterization: introduction to microscopic and spectroscopic methods – Wiley, 2009. ISBN: 978-3-527-33463-6. e-book not available through UniPa Discovery Service. • Material (projected slides, research papers) provided by the tutor and available through the student portal by students enrolled in the course. Recommended texts for further study: • V. Mitin, V. Kochelap, M. Stroscio: Introduction to Nanoelectronics – Cambridge University Press, 2008. ISBN 978-1-107-40376-5. e-book available through UniPa Discovery Service. • H.-S. P. Wong, D. Akinwande: Carbon Nanotube and graphene device physics – Cambridge University Press, 2011. ISBN 978-0-521-51905-2. e-book available through UniPa Discovery Service.

PROGRAMMA

ORE	Lezioni
2	Introduzione alla Nanoelettronica: verso le dimensioni nanometriche.
2	La legge di Moore. La international roadmap for semiconductors (ITRS): ultimi trend tecnologici. More Moore e more than Moore.
2	Scaling dei dispositivi MOSFET e sue problematiche: scaling a campo costante, a tensione costante, a tensione quasi costante, scaling empirico.
4	Effetti di canale corto: V_t roll-off, corrente di sottosoglia, punch-through, perdite nel gate, degradazione della mobilità, saturazione della velocità, variazione della corrente di drain. Effetti dovuti ai portatori caldi.
2	Ossido di gate: perdite dovute alle correnti di tunneling, gate depletion, dielettrici ad alto k e gate metallici. Gate induced drain leakage (GIDL).
1	Affidabilità dei MOSFET a canale corto: degradazione dovuta ai portatori caldi negli n-MOS e nei p-MOS, ionizzazione da impatto, degradazione dell'ossido di gate e breakdown, elettromigrazione, junction spiking.
2	Tecniche per controllare gli effetti di canale corto: tecnologia light-doped drain, shallow junctions, silicide source/drain contacts, raised source/drain, halo implants, retrograde channel profiles.
4	MOSFET non convenzionali: MOSFET ultra sottili, tecnologia silicon-on-insulator (SOI), MOSFET a doppio gate, FinFET di tipo bulk e SOI. Accenni alla tecnologia strained-silicon. Nanowire-FET.
2	Scaling delle interconnessioni: interconnessioni con sistema Cu/low-k dielectrics. Processo a singolo e doppio damascene
6	Tecniche di fabbricazione di micro e nano dispositivi: litografia ottica e suoi limiti, deep-UV lithography, immersion lithography, extreme-UV lithography, litografia a fascio elettronico. Litografia soft e nanoimprint lithography (NIL). Nodo tecnologico a 7 nm.
1	Strumenti e tecniche di caratterizzazione di nanostrutture e nanomateriali: microscopio elettronico a scansione (SEM) e a trasmissione (TEM), microscopio a scansione per effetto tunnel (STM), microscopio a forza atomica (AFM).
2	Tecniche di crescita del grafene e dei CNT
2	Module 6: Carbon nanotubes-based devices: back-gated and top-gated CNT-FETs: comparison with Si-MOSFETs. CNTs based gas sensors.

ORE	Esercitazioni
5	Laboratorio virtuale sui nanomateriali e questionari.
5	Esercizi sui MOSFET a canale corto e questionari.
5	Esercizi su MOSFET avanzati e questionari.
5	Laboratorio virtuale su Micro e Nano fabbricazione e questionari.
5	Laboratorio virtuale sulla caratterizzazione di nanomateriali e questionari.
5	Laboratorio virtuale sulla sintesi di nanotubi di carbonio e questionari.