



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

DIPARTIMENTO	Ingegneria
ANNO ACCADEMICO OFFERTA	2023/2024
ANNO ACCADEMICO EROGAZIONE	2024/2025
CORSO DILAUREA MAGISTRALE	ELECTRONICS ENGINEERING
INSEGNAMENTO	NANOELECTRONICS
TIPO DI ATTIVITA'	C
AMBITO	20925-Attività formative affini o integrative
CODICE INSEGNAMENTO	20519
SETTORI SCIENTIFICO-DISCIPLINARI	ING-INF/01
DOCENTE RESPONSABILE	MACALUSO ROBERTO Professore Associato Univ. di PALERMO
ALTRI DOCENTI	
CFU	6
NUMERO DI ORE RISERVATE ALLO STUDIO PERSONALE	102
NUMERO DI ORE RISERVATE ALLA DIDATTICA ASSISTITA	48
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 seguire il corso con profitto, lo studente deve possedere ampie conoscenze dei dispositivi MOSFET.
RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI	<p>Conoscenza e capacita' di comprensione. Lo studente al termine del corso avra' piena conoscenza dei piu' avanzati design e materiali per la realizzazione di dispositivi MOSFET ultrascalati. In particolare, lo studente sara' in grado di comprendere, partendo dai limiti fisici e tecnologici della tecnologia CMOS, attualmente dominante il mercato dei circuiti elettronici integrati, quali tecnologie e materiali alternativi potranno essere utilizzati per ottenere dispositivi sempre piu' compatti, veloci e a bassa dissipazione di potenza.</p> <p>Capacita' di applicare conoscenza e comprensione. Lo studente sara' 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.</p> <p>Autonomia di giudizio. Nel corso viene data particolare enfasi nello stimolare la capacita' di giudizio autonomo dello studente nel valutare strategie tecnologiche, convenienze economiche, qualita' ed efficienza associate ai processi di fabbricazione e ai dispositivi studiati. Lo studente acquisira' competenze tali da essere in grado di confrontare sia da un punto di vista tecnico-scientifico sia da un punto di vista economico, materiali, tecnologie e dispositivi diversi per la nanoelettronica, correlandoli alle particolari applicazioni considerate di volta in volta. Questa capacita' di confronto, unita alla conoscenza della fisica che sta alla base dei dispositivi studiati, gli consentira' di potersi cimentare nella progettazione di nuovi nanodispositivi.</p> <p>Abilita' comunicative. Lo studente acquisira' la capacita' di comunicare efficacemente in modo scritto ed orale su argomenti e problematiche inerenti l'oggetto del corso anche in un contesto internazionale: particolare attenzione e' infatti rivolta alla terminologia in lingua inglese. Sara' in grado di sostenere conversazioni su tematiche riguardanti la scelta dei materiali nanostrutturati e dei nanodispositivi per scopi specifici, di evidenziare problemi relativi ai limiti del loro funzionamento e di offrire soluzioni.</p> <p>Capacita' d'apprendimento. Lo studente apprendera' le interazioni tra la fisica dei nanodispositivi ed il loro impiego nelle applicazioni piu' comuni e questo gli consentira' di competere in un settore in continua crescita e oggigiorno estremamente strategico per tutte le economie avanzate, il quale abbraccia un vasto campo di applicazioni. Lo studente potra' quindi lavorare nella progettazione e nella fabbricazione di prodotti ad elevato contenuto scientifico ed innovativo in tutti i settori industriali e della ricerca applicata basati sulle nanotecnologie.</p>
VALUTAZIONE DELL'APPRENDIMENTO	<p>La valutazione si basera' su una prova orale, la quale spaziera' sui principali argomenti del corso con un minimo di 3 domande, le quali possono a loro volta svilupparsi in ulteriori sottodomande, dipendentemente dalla preparazione mostrata dallo studente. Lo scopo della prova orale e' quello di accertare che lo studente abbia piena padronanza di tutti gli argomenti trattati durante il corso. Le domande tenderanno a verificare che lo studente possieda adeguate capacita' espositive, riesca a correlare i vari contenuti del corso in modo autonomo, comprenda le applicazioni o le implicazioni dei vari contenuti trattati nell'ambito della disciplina, abbia acquisito adeguata proprieta' di linguaggio, soprattutto con riferimento alla terminologia inglese.</p> <p>La valutazione avviene in trentesimi.</p> <p>La soglia della sufficienza sara' raggiunta quando lo studente mostrera' conoscenza e comprensione degli argomenti almeno nelle linee generali e competenze applicative minime in ordine alla risoluzione di casi concreti. Lo studente dovra' ugualmente possedere capacita' espositive e argomentative tali da consentire la trasmissione delle sue conoscenze all'esaminatore. Al di sotto di tale soglia, l'esame risultera' insufficiente. Quanto piu', invece, l'esaminando con le sue capacita' argomentative ed espositive riuscirà a interagire con l'esaminatore, e quanto piu' le sue conoscenze e capacita' applicative saranno dettagliate, tanto piu' la valutazione sara' positiva. Piu' in dettaglio, la valutazione dell'esame sara' fatta secondo il seguente schema: 30-30 e lode: Valutazione eccellente/ottima. Ottima conoscenza degli argomenti, ottima capacita' analitica anche in nuovi contesti; ottima proprieta' di linguaggio e di apprendimento; ottima capacita' di collegare fra loro i vari argomenti trattati durante il corso. 27-29: Valutazione molto buona. Buona padronanza degli argomenti, piena proprieta' di linguaggio; lo studente e' in grado di applicare le conoscenze per risolvere i problemi proposti e di spaziare comodamente tra un argomento e</p>

	<p>l'altro.</p> <p>24-26: Valutazione buona. Conoscenza di base dei principali argomenti, discreta proprietà di linguaggio con limitata capacità di applicare autonomamente le conoscenze alla soluzione dei problemi proposti e di collegare i vari argomenti trattati durante il corso.</p> <p>21-23: Soddisfacente. Parziale padronanza degli argomenti del corso, soddisfacente proprietà linguaggio, scarsa capacità di applicare autonomamente le conoscenze acquisite.</p> <p>18-20: Sufficiente. Minima conoscenza degli argomenti del corso e del linguaggio tecnico, scarsissima o nulla capacità di applicare autonomamente le conoscenze acquisite.</p> <p>Insufficiente: non possiede una conoscenza accettabile dei contenuti degli argomenti trattati nell'insegnamento.</p>
OBIETTIVI FORMATIVI	<p>Il corso fornisce, assieme allo stato dell'arte della tecnologia CMOS attualmente dominante il mercato dei circuiti integrati, e alle problematiche relative allo scaling dei dispositivi attualmente in commercio, conoscenze specifiche sulle proprietà e sulla tecnologia di nuovi materiali quali grafene e nanotubi di carbonio, i quali costituiscono per l'industria dei semiconduttori una possibile prospettiva futura per realizzare circuiti integrati sempre più densi, veloci e a bassissima dissipazione di potenza. Il corso dedica inoltre ampio spazio alle più avanzate tecniche di fabbricazione e caratterizzazione di nanostrutture e nanodispositivi ed include esercitazioni numeriche e visite in laboratori di ateneo. Queste ultime hanno lo scopo di mettere in luce gli aspetti più squisitamente pratici nella utilizzazione di alcune delle tecniche di caratterizzazione (per es. microscopia elettronica a scansione o a trasmissione e microscopia a forza atomica) studiate durante il corso.</p>
ORGANIZZAZIONE DELLA DIDATTICA	<p>Lezioni frontali, esercitazioni in aula, visite in laboratori specializzati, seminari.</p>
TESTI CONSIGLIATI	<p>Testi di riferimento/Reference texts:</p> <ul style="list-style-type: none"> • R. S. Muller, T. I. Kamins: "Device electronics for integrated circuits", Wiley, 2003. ISBN: 978-0-471-59398-0. Testo reperibile gratuitamente in formato elettronico presso il Sistema Bibliotecario di Ateneo / e-book available through UniPa Discovery Service. • Zheng Cui: "Nanofabrication - Principles, Capabilities and Limits", 2° Edition, Springer, 2017. ISBN 978-3-319-39359-9. Testo reperibile gratuitamente in formato elettronico presso il Sistema Bibliotecario di Ateneo / 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. Testo non reperibile gratuitamente in formato elettronico presso il Sistema Bibliotecario di Ateneo / e-book not available through UniPa Discovery Service. • Note e dispense del docente reperibili attraverso il portale studenti dagli studenti iscritti al corso /Material (projected slides) provided by the professor and available through the student portal by students enrolled in the course. <p>Testi consigliati per approfondimento/Recommended texts for further study:</p> <ul style="list-style-type: none"> • V. Mitin, V. Kochelap, M. Stroschio: Introduction to Nanoelectronics – Cambridge University Press, 2008. ISBN 978-1-107-40376-5. Testo reperibile gratuitamente in formato elettronico presso il Sistema Bibliotecario di Ateneo / 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. Testo reperibile gratuitamente in formato elettronico presso il Sistema Bibliotecario di Ateneo / e-book available through UniPa Discovery Service.

PROGRAMMA

ORE	Lezioni
4	Introduzione alla Nanoelettronica: verso le dimensioni nanometriche. Proprietà dei materiali nanostrutturati e applicazioni per la sensoristica.
2	La legge di Moore. La international roadmap for Devices and Systems (IRDS): 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.
3	Ossido di gate: perdite dovute alle correnti di tunneling, gate depletion, dielettrici ad alto k e gate metallici. Gate induced drain leakage (GIDL).
3	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.
1	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.
6	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.

PROGRAMMA

ORE	Lezioni
2	Scaling delle interconnessioni: interconnessioni con sistema Cu/low-k dielectrics. Processo a singolo e doppio damascene
5	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.
10	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).
3	Nuovi materiali per la nanoelettronica e loro proprietà: grafene, nanotubi di carbonio (CNT). Possibili applicazioni in nanoelettronica e fotonica, tecniche di crescita.
1	Dispositivi basati su nanotubi di carbonio: back-gated and top-gated CNT-FETs: confronto con MOSFET basati su silicio, sensori di gas basati sui CNT.
ORE	Esercitazioni
2	Esercizi sui MOSFET a canale corto.