



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

DIPARTIMENTO	Ingegneria
ANNO ACCADEMICO OFFERTA	2023/2024
ANNO ACCADEMICO EROGAZIONE	2023/2024
CORSO DILAUREA MAGISTRALE	ELECTRONICS ENGINEERING
INSEGNAMENTO	OPTOELECTRONIC DEVICES
TIPO DI ATTIVITA'	C
AMBITO	20925-Attività formative affini o integrative
CODICE INSEGNAMENTO	20512
SETTORI SCIENTIFICO-DISCIPLINARI	ING-INF/01
DOCENTE RESPONSABILE	MOSCA MAURO          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	1
PERIODO DELLE LEZIONI	1° semestre
MODALITA' DI FREQUENZA	Facoltativa
TIPO DI VALUTAZIONE	Voto in trentesimi
ORARIO DI RICEVIMENTO DEGLI STUDENTI	<b>MOSCA MAURO</b> Lunedì    18:00    19:00 <b>IMPORTANTE!</b> Il docente riceve sempre alla fine della lezione e per appuntamento. Giorno e orario sono stati inseriti in modo fittizio perche richiesti dal sistema!

DOCENTE: Prof. MAURO MOSCA

<b>PREREQUISITI</b>	Fisica, Elettronica, Dispositivi elettronici
<b>RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI</b>	<p>Conoscenza e capacita' di comprensione Il corso si propone di fornire allo studente alcuni concetti avanzati nell'ambito dei dispositivi optoelettronici (sorgenti e rivelatori). Per ogni dispositivo verranno forniti i principi teorici basilari, le metodologie di caratterizzazione e le applicazioni. Particolare enfasi sara' data ai dispositivi commerciali e alle applicazioni di tali dispositivi. Agli studenti sara' inoltre richiesto di svolgere alcune esercitazioni sperimentali presso il laboratorio didattico di fotonica. Al termine del corso gli studenti avranno acquisito una conoscenza globale delle sorgenti e dei rivelatori optoelettronici moderni e ne comprenderanno i principi di funzionamento e le loro applicazioni.</p> <p>Capacita' di applicare conoscenza e comprensione Grazie ad un approccio dinamico orientato verso le applicazioni, ci si aspetta che lo studente sia in grado di sapere applicare al mondo reale quanto appreso in aula. Le esercitazioni di laboratorio forniranno un supporto fondamentale a tal scopo, poiche' permetteranno agli studenti stessi di applicare ai dispositivi reali le nozioni apprese durante le ore di lezione frontale.</p> <p>Autonomia di giudizio Il corso ha lo scopo non solo di arricchire le conoscenze dei dispositivi optoelettronici moderni, ma anche di far acquisire i metodi con i quali si affronta la loro caratterizzazione. Gli studenti saranno pertanto in grado di interpretare e giustificare il comportamento dei vari dispositivi. Avranno inoltre acquisito una metodologia propria di analisi dei dispositivi e delle metodologie di caratterizzazione e di misura, in modo da risolvere un problema nel modo piu' efficace possibile; attraverso tali metodologie essi saranno in grado di scegliere i componenti piu' adatti per l'applicazione richiesta.</p> <p>Abilita' comunicative Gli studenti acquisiranno la capacita' di comunicare ed esprimere problematiche inerenti i dispositivi optoelettronici e le loro applicazioni. In particolare saranno in grado di sostenere un dibattito o un colloquio sulle piu' moderne e innovative sorgenti fotoniche (coerenti e non coerenti) e sui fotorivelatori di ultima generazione.</p> <p>Capacita' d'apprendimento Agli studenti verranno indicati i mezzi per completare ed affinare le nozioni acquisite durante il corso universitario. In particolare, essi saranno in grado di affrontare in autonomia diverse problematiche relative alla comprensione fisica e alla caratterizzazione dei dispositivi optoelettronici moderni, oltre che alla scelta dell'applicazione piu' opportuna. Questa padronanza consentira' loro di accedere senza sforzo sia ad ambiti professionali di alto livello tecnico nel settore, sia a corsi di dottorato dell'area elettronica e fotonica.</p>
<b>VALUTAZIONE DELL'APPRENDIMENTO</b>	<p>Prova orale La prova orale consiste in un colloquio, volto ad accertare il possesso delle competenze e delle conoscenze disciplinari previste dal corso. In generale, il colloquio verte sulla discussione di tre argomenti: - un articolo redatto dallo studente e inviato per mail al docente almeno due giorni prima dell'esame (massimo punteggio: 10); - una presentazione orale PowerPoint, a scelta tra due possibili (slide fornite dal docente su un argomento del corso) (massimo punteggio: 15); - un questionario a risposte multiple su argomenti vari trattati durante il corso (massimo punteggio: 7).</p> <p>Il soggetto su cui verte l'articolo, scelto dallo studente e comunicato al docente prima dell'inizio della stesura, deve riguardare un aspetto della materia non trattato durante il corso (fisica, ingegnerizzazione, applicazioni e/o caratterizzazione); cio' allo scopo di stimolare la curiosita' scientifica dello studente, di testare la sua autonomia nell'analisi dei documenti e di valutare le sue capacita' di scelta e quelle elaborative. Il colloquio nel suo complesso, inoltre, tende a verificare a) le conoscenze acquisite, b) le capacita' elaborative, c) il possesso di un'adeguata capacita' espositiva.</p> <p>I criteri di valutazione sono i seguenti :</p> <p>ECCELLENTE (30-30 e lode): Eccellente conoscenza degli argomenti ed eccellenti capacita' elaborative, ottima proprieta' di linguaggio. Lo studente e' in grado di applicare le conoscenze per risolvere i problemi proposti. L'articolo e' originale ed e' scritto in forma buona e corretta. La discussione dell'articolo evidenzia la piena comprensione del soggetto trattato.</p> <p>OTTIMO (28-29) : Ottima padronanza degli argomenti e ottime capacita' elaborative, piena proprieta' di linguaggio. Lo studente e' in grado di applicare le conoscenze per risolvere i problemi proposti. L'articolo e' originale ed e' scritto in modo discreto. La discussione dell'articolo evidenzia la buona comprensione del soggetto trattato</p> <p>MOLTO BUONO (26-27): Buona padronanza degli argomenti e buone capacita'</p>

	<p>elaborative, discreta proprietà di linguaggio. Lo studente è in grado di applicare le conoscenze per risolvere i problemi proposti, sebbene non sempre in completa autonomia. L'articolo è originale ed è scritto in modo soddisfacente. La discussione dell'articolo evidenzia la buona comprensione del soggetto trattato.</p> <p>BUONO (24-25): Buona padronanza degli argomenti e soddisfacenti capacità elaborative, soddisfacente proprietà di linguaggio con limitata capacità di applicare autonomamente le conoscenze alla soluzione dei problemi proposti. L'articolo è abbastanza originale ed è scritto in modo soddisfacente. La discussione dell'articolo evidenzia qualche incertezza nella comprensione del soggetto trattato.</p> <p>SODDISFACENTE (21-23): Non ha piena padronanza degli argomenti della materia ma ne possiede le conoscenze, soddisfacente proprietà linguaggio con scarsa capacità di applicare autonomamente le conoscenze acquisite. Il soggetto dell'articolo non è originale ed è scritto in modo sufficiente. La discussione evidenzia parecchie lacune nella comprensione del soggetto trattato.</p> <p>SUFFICIENTE (18-20): Minima conoscenza di base degli argomenti della materia e del linguaggio tecnico. Scarsissima o nulla capacità di applicare autonomamente le conoscenze acquisite. Il soggetto dell'articolo non è originale ed è scritto in modo appena sufficiente. La discussione evidenzia parecchie lacune nella comprensione del soggetto trattato.</p> <p>INSUFFICIENTE: Non possiede una conoscenza accettabile dei contenuti degli argomenti trattati nell'insegnamento e/o non ha studiato alcuni argomenti della materia.</p>
<b>OBIETTIVI FORMATIVI</b>	Conoscenza dei principi fisici di funzionamento dei moderni dispositivi optoelettronici, delle loro applicazioni, delle metodologie di caratterizzazione e misura.
<b>ORGANIZZAZIONE DELLA DIDATTICA</b>	Lezioni frontali, laboratorio
<b>TESTI CONSIGLIATI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Teaching material (notes and slides) provided by the lecturer</li> <li>- R. Karlicek • C.-C. Sun, G. Zissis, R. Ma (Eds.): Handbook of Advanced Lighting Technology (Springer International Publishing, Switzerland, 2017) ISBN: 978-3-319-00177-7 - available free of charge on the UNIPA network of libraries</li> <li>- T. Erdem • H. Volkan Demir: Color Science and Photometry for Lighting with LEDs and Semiconductor Nanocrystals (Springer Nature, Singapore, 2019) ISBN: 978-981-13-5886-9 - available free of charge on the UNIPA network of libraries</li> <li>- J. Li, G. Q. Zhang (Eds.): Light-Emitting Diodes - Materials, Processes, Devices and Applications (Springer Nature, Switzerland, 2019) ISBN: 978-3-319-99211-2 - available free of charge on the UNIPA network of libraries</li> <li>- F. Träger (Ed.): Springer Handbook of Lasers and Optics (Springer Science +Business Media, LLC New York, 2007) ISBN: 978-3-642-19409-2 - available free of charge on the UNIPA network of libraries</li> <li>- J. Singh: Semiconductor Optoelectronics: Physics and technology, Mc-Graw-Hill, Inc. (1995) ISBN: 978-0071135771</li> <li>- S. M. Sze, M. K. Lee: Semiconductor Devices. Physics and Technology (3rd edition), John Wiley &amp; Sons, Inc. (2012) ISBN: 978-0-470-53794-7</li> <li>- C. W. Wilmsen, H. Temkin, L. A. Coldren: Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers: Design, Fabrication, Characterization, and Applications, Cambridge University Press (2001) ISBN: 0521006295 9780521006293</li> <li>- E. F. Schubert: Light-Emitting Diodes, Cambridge University Press (2006) ISBN: 9780521865388</li> <li>- D. Sands: Diode lasers, IoP Publishing (2005) ISBN: 9780750307260</li> <li>- S. D. Gunapala, D. R. Rhiger, C. Jagadish: Advances in Infrared Photodetectors (Semiconductors and Semimetals, Vol. 84), Elsevier (2011) ISBN: 9780123813374</li> <li>- M. Henini, M. Razeghi: Optoelectronic devices: III Nitrides, Elsevier (2005) ISBN: 9780080444260</li> <li>- A. Buckley: Organic Light-Emitting Diodes (OLEDs): Materials, devices and applications, Woodhead Publishing (2013) ISBN: 9780857098948</li> </ul>

### PROGRAMMA

ORE	Lezioni
1	INTRODUZIONE AL CORSO
1	LUCE - LA SUA NATURA E LE SUE PROPRIETÀ: Spettro elettromagnetico. Velocità della luce e indice di rifrazione. Dispersione. Energia dei fotoni. Coerenza temporale e spaziale. Reticoli di diffrazione. Monocromatori. Attività ottica. Effetto elettro-ottico. Modulatore ottici
3	FOTORIVELATORI: Rivelatori termoelettrici. Bolometri. Rivelatori piroelettrici. Fotomoltiplicatori. Fotorivelatori a semiconduttore: parametri, fotoconduttori e relativi circuiti, rivelatori fotovoltaici e relativi circuiti. Rivelatori a multi-quantum well. Rivelatori a giunzione: fotodiodi p-n e p-i-n, fototransistor. Fotodiodi a valanga. Dispositivi ad accoppiamento di carica (CCD).

## PROGRAMMA

ORE	Lezioni
3	<p><b>DIODI ELETTROLUMINESCENTI (LED):</b> Elettroluminescenza. Ricombinazione radiativa. Ricombinazione tramite eccitoni. Ricombinazione non radiativa. Larghezza di linea di emissione. Fabbricazione di LED. Estrazione della luce. Pattern di radiazione. Proprietà elettriche. Circuito di pilotaggio di LED. Efficienze.</p> <p><b>STRUTTURE AVANZATE PER LED AD ALTA EFFICIENZA:</b> Motivi che ostacolano la fabbricazione di LED ad alta efficienza e relative soluzioni. Doppia eterostruttura. Quantum-wells. Eterostruttura a confinamento separato: SCH standard e GRINSCH. Perdita di cariche. Electron-blocking layer. Cono di emissione luminosa: efficienze di estrazione. Ottimizzazione delle geometrie. Strato finestra spesso e substrato trasparente. Ulteriori tecniche per aumentare l'efficienza: geometrie TIP, specchi riflettenti (lift-off epitassiale), superfici rugose (etching GaN, natural lithography), microriflettori sepolti, strutture rastremate (tecnica del photoresist reflow)</p>
3	<p><b>LASER:</b> Emissione e assorbimento di radiazioni. Emissione stimolata. Relazioni di Einstein. Laser a tre e a quattro livelli. Guadagno e feedback ottico. Modi longitudinali e spostamento Doppler. Modi trasversali. Q-switch. Laser ad argon. Laser Nd:YAG. Diodo laser a semiconduttore.</p>
2	<p><b>ETEROSTRUTTURE ED EPITASSIA:</b> Struttura cristallina dei semiconduttori. Indici di Miller. Celle di tipo diamante, zinco-blenda e wurtzite. Tecniche di crescita epitassiale: Chemical-Vapor Deposition (CVD), Metal-Organic CVD (MOCVD), Molecular-Beam Epitaxy (MBE). Leghe di semiconduttori. Diagrammi a bande di eterostrutture: regola di Anderson. Ingegnerizzazione della struttura a bande dei semiconduttori: eterogiunzioni e pozzi quantistici. Difetti dei semiconduttori. Strutture con disadattamento reticolare. Strutture stressate e dislocazioni. Buffer layer e substrati virtuali.</p>
3	<p><b>MATERIALI PER DISPOSITIVI OPTOELETTRONICI:</b></p> <p>Elementi e leghe utilizzati in optoelettronica. Materiali a gap indiretta e transizioni relative. Le leghe GaAsP, GaP, GaAsP:N, and GaP:N. I sistemi AlGaAs/GaAs. I sistemi AlGaInP/GaAs. Il carburo di silicio (SiC). I sistemi GaN, AlGaIn, InGaIn, AlGaInN: problematiche, dislocazioni, metodi per ridurre le dislocazioni, crescita ELOG. Polarizzazione spontanea e piezoelettrica nei nitruuri. Regioni attive sottili e spesse nei nitruuri: Quantum Confined Stark Effect (QCSE). Contatti ohmici ed effetti di polarizzazione nei nitruuri. Drogaggio p del GaN. Effetti di ricombinazione nelle dislocazioni. Teorie accreditate per spiegare l'elevata efficienza dei nitruuri. Il "green-gap".</p>
3	<p><b>LA RIVELAZIONE UV E I RIVELATORI "SOLAR BLIND":</b></p> <p>La rivelazione ultravioletta. Classificazione dei rivelatori UV. Parametri dei fotorivelatori UV. NEP e detectivity. Materiali per la rivelazione UV. Fotodiodi al Si per l'UV ("UV-enhanced"): a strato d'inversione, altri tipi. Fotorivelatori in SiC. Fotorivelatori in GaN e AlGaIn: fotoconduttori, fotodiodi, Schottky e MSM. Guadagno, responsivity e rumore nei fotoconduttori e nei fotovoltaici basati su nitruuri. Window layer nei fotoconduttori e nei MSM. Applicazioni in biofotonica (erythema-weighted detector). Applicazione come rivelatore di fiamma "solar blind". Componenti commerciali</p>
3	<p><b>LA RIVELAZIONE IR E I RIVELATORI QWIP (QUANTUM-WELL INFRARED PHOTODETECTORS):</b></p> <p>Cenni storici. Generalità sulla rivelazione IR. Sviluppo dei sistemi di rivelazione IR. BLIP (background-limited infrared photodetection). FPA (focal-plane arrays): di prima generazione, di seconda generazione, ibridi. Fotodiodi in HgCdTe. Assorbimento intersubbanda e principio fisico dei QWIP. Classificazione dei QWIP: n-doped bound-to-bound, n-doped bound-to-continuum, n-doped bound-to-quasibound, n-doped broadbound, n-doped bound-to-bound miniband, n-doped bound-to-continuum miniband, n-doped bound-to-miniband, n-doped step bound-to-miniband. Dark current nei QWIP. Risposta spettrale dei QWIP. Accoppiamento della luce nei QWIP: random reflector, reticolo 2D. Visione dual-band: regime MWIR e LWIR. Applicazioni: visione notturna, rivelazione di rugosità superficiale, rivelazione di campi minati. Componenti commerciali</p>
5	<p><b>LED BIANCHI (CON NOZIONI DI RADIOMETRIA, FOTOMETRIA E COLORIMETRIA):</b> La visione umana. Grandezze radiometriche e fotometriche: intensità radiante e luminosa, flusso radiante e luminoso, irradianza e illuminanza, radianza e luminanza. Curva di sensibilità dell'occhio umano. Efficacia ed efficienza luminosa. Funzioni color-matching. Valori di tristimolo. Coordinate cromatiche. Diagramma di cromaticità (CIE - 1931). Ellissi di MacAdam. Diagramma di cromaticità uniforme (CIE - 1976). Coordinate cromatiche uniformi. Lunghezza d'onda dominante e purezza di colore. LED nel diagramma di cromaticità. Colore e cromaticità. Radiazione di corpo nero di Planck. Luogo geometrico di Planck nel diagramma di cromaticità. Temperatura di colore e temperatura di colore correlata. Sintesi additiva. Color gamut. Resa del colore. Indice di resa cromatica (Color Rendering Index – CRI). Generazione di luce bianca con LED: sorgenti dicromatiche, tricromatiche e tetracromatiche, discrete e monolitiche. Color mixing di due LED. Efficacia luminosa di LED dicromatici e tricromatici. Dipendenza dalla temperatura (per LED tricromatici). Generazione di luce bianca tramite frequency-down conversion: fosfori. Efficienza dei fosfori. Materiali utilizzati per la down-conversion: fosfori, coloranti organici (dyes), semiconduttori. LED PRS (photon recycling semiconductors). Fosfori basati su granati drogati con terre rare. Il Ce:YAG: spettro di emissione, gamut nel diagramma di cromaticità. LED bianchi per conversione di fosfori e basati su Ce:YAG: di prima generazione, ad alto CRI. Uniformità di colore. Distribuzione spaziale dei fosfori. Confronto tra le efficienze luminose di vari tipi di LED bianchi. Componenti commerciali</p>

## PROGRAMMA

ORE	Lezioni
5	<p>LED ORGANICI (OLED):                      Richiami di chimica organica. Polimeri conduttori. Orbitali leganti ed antileganti. Orbitali molecolari sigma e pi-greco. Delocalizzazione degli elettroni. Polimeri coniugati. Bande di energia nei composti organici: HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) e LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital). Materiali amorfi: densita' degli stati e mobilita'. Materiali per gli OLED: a basso peso molecolare (monomeri e oligomeri) e polimeri. Transizione vetrosa. Tecniche di deposizione di film organici: OMBE, Evaporazione termica, spinning, dipping, stampa a getto d'inchiostro. Purificazione del materiale: gradient sublimation. Materiali emissivi: l'Alq3. Livelli energetici dell'Alq3. Struttura fisica di un OLED: lo strato emissivo (EML) e gli strati trasportatori di elettroni (ETL) e di lacune (HTL). Iniezione e trasporto negli OLED: posizione dei livelli energetici. Polarizzazione degli OLED: iniezione e ricombinazione. Modello TCL (trapped charge-limited). Il processo di emissione tramite eccitoni. Rilassamento di Franck-Condon. Processi di ricombinazione. Stati di singoletto e di tripletto. Drogaggio dello strato emissivo. Tempo di vita e image burning. Display a OLED: Passive-Matrix OLED (PMOLED), Active-Matrix OLED (AMOLED), OLED flessibili, Transparent OLED (TOLED).</p>
4	<p>LASER A CAVITA' VERTICALE (VCSEL):                      Edge-emitting e surface-emitting laser. Struttura di una cavita' VCSEL. Specchi dielettrici. Condizione di soglia. Distribuzione di campo longitudinale dentro la cavita. Guadagno e corrente di soglia in funzione della riflettivita' (casi: GaAs e GaN). DBR (Distributed Bragg Reflectors): lunghezza efficace della cavita, effetti delle perdite per assorbimento, effetto delle interfacce graduali, resistenza degli specchi, specchi graduali. Efficienza differenziale. Wall-plug efficiency. Confinamento laterale. Ossidazione laterale dell'AlGaAs. Ossidazione laterale dei nitruuri. Passi di fabbricazione di un VCSEL con ossidazione laterale. Applicazioni dei VCSEL.</p>
ORE	Laboratori
3	ESPERIMENTI CON LA LUCE
3	CARATTERIZZAZIONE DI UN FOTORIVELATORE
3	REALIZZAZIONE DI UN LAYOUT DI MASCHERA FOTOLITOGRAFICA PER LED
3	FABBRICAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DI LED BIANCHI PER DYE DOWN-CONVERSION