



UNICUSANO

Università degli Studi Niccolò Cusano - Telematica Roma

Insegnamento	Elettronica dello Stato Solido
Livello e corso di studio	Laurea Magistrale in Ingegneria Elettronica (LM-29)
Settore scientifico disciplinare (SSD)	ING-INF/01
Anno di corso	1
Numero totale di crediti	9
Propedeuticità	Non sono previste propedeuticità.
Docente	Daniele Baretin <i>Corso di studi in:</i> Ingegneria <i>Nickname:</i> baretin.daniele <i>Email:</i> daniele.baretin@unicusano.it (da utilizzare solo per comunicazioni interne e amministrative). Orario di ricevimento: Consultare calendario videoconferenze sul sito d'Ateneo: https://www.unicusano.it/calendario-lezioni-in-presenza/calendario-area-ingegneristica
Presentazione	<p>L'insegnamento partendo da quelle che sono le basi delle Meccanica Quantistica e della Fisica dello Stato Solido introduce una teoria rigorosa per lo studio della Fisica dei Semiconduttori, in particolare riguardo il trasporto dei portatori di carica nei semiconduttori stessi, analizzando anche numerose situazioni normalmente presenti in dispositivi reali. Si analizza come dispositivo paradigmatico la classica giunzione p-n, passando poi ad analizzare alcuni fondamentali dispositivi unipolari e fotonici.</p> <p>Nell'insegnamento viene data una equivalente importanza alla parte teorica, che prevede una rigorosa introduzione ai modelli presentati, con una completa trattazione matematica e un ampio spettro di esempi analizzati, e alla parte applicativa, costituita da una vasta raccolta di esercitazioni sugli argomenti studiati.</p> <p>Le E-tivity da svolgere per l'insegnamento sono proposte sotto forma di Case-Study e Test di Autovalutazione, e sono sia necessarie per una comprensione più profonda di alcuni argomenti del corso, sia utili ai fini della determinazione del voto finale.</p> <p>Lo scopo fondamentale dell'insegnamento è quello di far acquisire allo studente un metodo di analisi e di risoluzione di problemi paradigmatici che possa essere successivamente esteso a situazioni realistiche e complesse.</p>
Obiettivi formativi	<p>L'insegnamento prevede come primo argomento un'introduzione alla meccanica quantistica di base, in cui vengono prima analizzati gli esperimenti che portarono alla crisi della fisica classica e alla nascita della meccanica quantistica, e successivamente introdotto il formalismo matematico di base per sviluppare la teoria in modo adeguato.</p> <p>Questo primo argomento è la base della successiva parte del programma, che sviluppa prima i concetti fondamentali della fisica dello stato solido, per poi passare in questo ambito a studiare la natura dello scattering, prima nel caso da due punti, sia nel Caso semiclassico con condizioni di Van Lue e di Bragg, e sia nel Caso quantistico con l'Approssimazione di Born, e successivamente lo Scattering da un reticolo. Viene presentato anche lo scattering anelastico, di nuovo nell'approssimazione semiclassica e secondo la teoria quantistica.</p> <p>Il passo successivo è l'introduzione, sempre nell'ambito della fisica dello stato solido, dell'Approssimazione di Born-Oppenheimer con alcune fondamentali applicazioni allo studio delle catene lineari con uno e due atomi per cella e della Dinamica delle Branche Acustiche e Ottiche. Vengono quindi studiate alcune teorie fondamentali della fisica quantistica applicata allo stato solido, come la teoria dell'Oscillatore armonico quantistico e la Statistica di Bose-Einstein, con applicazione al calcolo del Calore Specifico di Einstein e di Debye.</p> <p>Si passa poi a studiare quella che è una delle parti più rilevanti del insegnamento, ovvero la fisica dei Materiali Semiconduttori con i suoi concetti fondamentali: il Legame di Valenza, le Bande di Energia, la Relazione Energia-Momento, la Densità degli stati, la Concentrazione dei portatori intrinseci e il concetto di Donori ed Accettori.</p> <p>La teoria dei Semiconduttori è la base per spiegare la teoria del trasporto dei portatori di carica, suddivisa nei suoi due aspetti fondamentali: la deriva dei portatori (DRIFT), e la diffusione dei portatori (Diffusion), con tutti i processi collegati a questi due aspetti. Lo sviluppo successivo è l'introduzione ai concetti di Iniezione, Generazione e Ricombinazione dei portatori, che portano alla definizione dell'Equazione di Continuità.</p> <p>Avvedo fissato le basi della teoria generale dei semiconduttori e del trasporto dei portatori di carica viene presentato agli studenti quello che è il dispositivo paradigmatico dell'elettronica dello stato solido: la giunzione p-n, studiandola in dettaglio sia in condizioni di equilibrio termico, sia introducono effetti presenti nei dispositivi reali dovuti alla ricombinazione-generazione, all'alta iniezione, alla temperatura e all'accumulazione delle cariche. Vengono presentati anche alcuni casi limite, come la rottura della giunzione, l'Effetto tunnel e la Moltiplicazione a</p>

	<p>catena.</p> <p>L'ultima parte dell'insegnamento è dedicata allo studio dettagliato della teoria e delle caratteristiche di alcuni dispositivi unipolari e fotonici a semiconduttore, come i contatti metallo-semiconduttore, il diodo MOS ideale e SiO₂-Si, il MOSFET, i LED e le Celle solari.</p>
Risultati di apprendimento attesi	<p>Lo studente al termine dell'insegnamento avrà dimostrato capacità di:</p> <p><i>[Conoscenza e capacità di comprensione]</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ● comprensione della terminologia utilizzata nell'ambito dell'elettronica dello stato solido; ● conoscenza dei principi di funzionamento dei principali dispositivi basati sull'elettronica dello stato solido; ● individuare soluzioni specifiche di un problema di elettronica dello stato solido; ● comprensione delle teorie inerenti la fisica dello stato solido. <p><i>[Applicazione delle conoscenze]</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ● operare una scelta fra i parametri più adatti in un dispositivo basato sull'elettronica dello stato solido; <p><i>[Capacità di trarre conclusioni]</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ● risolvere problemi analitici e numerici inerenti l'elettronica dello stato solido e la fisica dei semiconduttori. <p><i>[Abilità comunicative]</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ● sviluppare di un linguaggio scientifico corretto, rigoroso e comprensibile che permetta di esporre in modo chiaro e competente le conoscenze tecniche acquisite nell'insegnamento. <p><i>[Capacità di apprendere]</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ● applicare le conoscenze acquisite per la risoluzione di problemi originali inerenti l'elettronica dello stato solido.
Prerequisiti	Si richiede una conoscenza approfondita degli argomenti di Fisica Generale I e II e dei fondamenti dell'elettronica.
Contenuti dell'insegnamento	<p>Modulo M01 - Cenni di Meccanica Quantistica elementare, Reticoli periodici, Scattering elastico.</p> <p>[Carico di studio: 35 h - 7 giorni – 1,4 CFU]</p> <p><i>Attività didattiche</i></p> <p>Il modulo prevede l'erogazione di 4 ore di lezioni pre-registrate e 8 esercitazioni correlate ai diversi video.</p> <p>Dato il tempo necessario per il riascolto delle lezioni videoregistrate e le eventuali lezioni erogate in modalità sincrona, sono complessivamente richieste 8 ore di impegno studente per la fruizione delle lezioni e almeno 4 ore per lo svolgimento degli esercizi.</p> <p><i>Risultati di Apprendimento</i></p> <p>Alla fine del modulo lo studente sarà in grado di:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● conoscere le scoperte e gli esperimenti che portarono alla crisi della fisica classica e alla nascita della fisica quantistica; ● utilizzare il formalismo matematico di base della meccanica quantistica; ● comprende i concetti fondamentali della fisica dello stato solido, in particolare rispetto alla proprietà del reticolo cristallino; ● conoscere la teoria dello Scattering elastico nel caso semiclassico e nel caso quantistico. <p><i>Obiettivi di Apprendimento</i></p> <p>In questo modulo sono inizialmente illustrati i passaggi che portarono dalla fisica classica alla fisica quantistica, come la scoperta della Radiazione di corpo nero, dell'Effetto Fotoelettrico, dell'Interferenza ottica e relativo dualismo onda-particella. Vengono inoltre fornite le basi matematiche per sviluppare le nozioni acquisite di meccanica quantistica, come il formalismo nella notazione di Dirac, lo spazio degli stati possibili e la Delta di Kronecker e di Dirac. Si sviluppano poi i concetti fondamentali della fisica dello stato solido, come le simmetrie di traslazione e rotazione, la Cella primitiva, il reticolo reciproco e la zona di Brillouin, la Cella unitaria primitiva e la Serie di Fourier per funzioni periodiche. Si passa poi a studiare la natura dello scattering: lo Scattering da due punti nel Caso semiclassico con condizioni di Van Lue e di Bragg, e nel caso quantistico con l'Approssimazione di Born. Si studia infine lo Scattering da un reticolo, considerando il Fattore di struttura geometrico o reticolare, di struttura atomico e di struttura della cella unitaria.</p> <p>Modulo M02 - Scattering anelastico, Teoria delle vibrazioni armoniche del reticolo, Proprietà termodinamiche dei Fononi.</p> <p>[Carico di studio: 35 h - 7 giorni - 1,4 CFU]</p> <p><i>Attività didattiche</i></p> <p>Il modulo prevede l'erogazione di 4 ore di lezioni pre-registrate e 8 esercitazioni correlati ai diversi video.</p> <p>Dato il tempo necessario per il riascolto delle lezioni videoregistrate e le eventuali lezioni erogate in modalità sincrona, sono complessivamente richieste 8 ore di impegno studente per la fruizione delle lezioni e almeno 4 ore</p>

per lo svolgimento degli esercizi.

Risultati di Apprendimento

Alla fine del modulo lo studente sarà in grado di:

- conoscere alcune teorie fondamentali della fisica dello stato solido, come l'analisi semiclassica e la teoria quantistica dello scattering;
- applicare l'approssimazione di Born-Oppenheimer ad una diversa gamma di problemi fondamentali della fisica dello stato solido;
- riconoscere ed applicare alcuni modelli paradigmatici della meccanica quantistica nell'ambito della fisica dello stato solido, come l'oscillatore armonico quantistico e la statistica di Bose-Einstein.

Obiettivi di Apprendimento

In questo modulo viene introdotta l'Analisi semiclassica e la Teoria quantistica dello scattering anelastico e il Fattore di Debye-Weller. Viene spiegata rigorosamente l'Approssimazione di Born-Oppenheimer relativamente alla fisica dello stato solido, illustrandone alcune fondamentali applicazioni, come lo studio dei Modi Acustici e Ottici, delle Catene lineari con uno e due atomi per cella e della Dinamica delle Branche Acustiche e Ottiche. Viene studiata la teoria dell'Oscillatore armonico quantistico e della Statistica di Bose-Einstein, con la sua applicazione al calcolo del Calore Specifico di Einstein e di Debye.

Modulo M03 - Semiconduttori. Bande di Energia e Concentrazione di Portatori. Trasporto dei portatori di carica.

[Carico di studio: 60 h - 12 giorni - 2,2 CFU]

Attività didattiche

Il modulo prevede l'erogazione di 7 ore di lezioni pre-registrate e 10 esercitazioni correlate ai diversi video. Dato il tempo necessario per il riascolto delle lezioni videoregistrate e le eventuali lezioni erogate in modalità sincrona, sono complessivamente richieste 5 ore di impegno studente per la fruizione delle lezioni e almeno 5 ore per lo svolgimento degli esercizi.

Risultati di Apprendimento

Alla fine del modulo lo studente sarà in grado di:

- conoscere le proprietà fondamentali dei semiconduttori;
- utilizzare la teoria del trasporto dei portatori di carica nei diversi casi che si presentano nella fisica dei dispositivi a semiconduttori;
- applicare l'equazione di continuità tenendo conto di tutti i possibili processi fisici;
- riconoscere quelli che sono i casi limite nella teoria del trasporto dei semiconduttori.

Obiettivi di Apprendimento

In questo modulo viene introdotta la fisica dei Materiali Semiconduttori, spiegandone quelli che sono i suoi concetti fondamentali: il Legame di Valenza, le Bande di Energia, la Relazione Energia-Momento, la Densità degli stati, la Concentrazione dei portatori intrinseci e il concetto di Donori ed Accettori. Viene poi spiegata la teoria del trasporto dei portatori di carica: la Deriva dei portatori (DRIFT) con i concetti relativi di Mobilità e Resistività e effetto Hall, e la Diffusione dei portatori (Diffusion), con i processi di diffusione, la Relazione di Einstein e le Equazioni della densità di corrente. Infine vengono analizzati i processi di Iniezione dei portatori, di Generazione e Ricombinazione e l'Equazione di Continuità, gli Effetti da campo elettrico intenso e il Processo a catena (avalanche).

Modulo M04 - Giunzione p-n.

[Carico di studio: 60 h - 12 giorni - 2,2 CFU]

Attività didattiche

Il modulo prevede l'erogazione di 7 ore di lezioni pre-registrate e 12 esercitazioni correlati ai diversi video.

Dato il tempo necessario per il riascolto delle lezioni videoregistrate e le eventuali lezioni erogate in modalità sincrona, sono complessivamente richieste 14 ore di impegno studente per la fruizione delle lezioni e almeno 6 ore per lo svolgimento degli esercizi.

Risultati di Apprendimento

Alla fine del modulo lo studente sarà in grado di:

- conoscere tutte le caratteristiche fisiche generali della giunzione p-n in condizioni di equilibrio;
- distinguere le proprietà di casi particolari della giunzione p-n, come la giunzione di tipo abrupt e di tipo lineare;
- abbandonare l'ipotesi di giunzione ideale introducendo nell'analisi della giunzione p-n tutti gli effetti che si trovano nei dispositivi reali, legati quindi alla temperatura, all'alta iniezione dei portatori, agli effetti di ricombinazione-generazione, al comportamento transiente fino a saper riconoscere i casi limite, come la rottura della giunzione stessa, l'effetto tunnel e la moltiplicazione a catena.

Obiettivi di Apprendimento

In questo modulo viene presentato agli studenti il dispositivo fondamentale dell'elettronica dello stato solido: la

giunzione p-n. Si studiano in dettaglio le sue condizioni di equilibrio termico, la sua Depletion region, i casi di giunzione abrupt e giunzione lineare, la capacità di depletion e la sua relazione Corrente-Voltaggio. Partendo poi da quelle che sono le Caratteristiche ideali di una giunzione p-n, si introducono vari effetti presenti nei dispositivi reali: effetti dovuti alla ricombinazione-generazione e all'alta iniezione, effetti di Temperatura, accumulazione delle cariche e comportamento transiente e accumulazione dei portatori minoritari, Capacità di diffusion. Si studiano infine casi limite, come la rottura della giunzione, l'Effetto tunnel e la Moltiplicazione a catena.

Modulo M05 - Dispositivi unipolari e fotonici.

[Carico di studio: 20 h - 4 giorni - 0,8 CFU]

Attività didattiche

Il modulo prevede l'erogazione di 2 ore di lezioni pre-registrate e 7 esercitazioni correlate ai diversi video.

Dato il tempo necessario per il riascolto delle lezioni videoregistrate e le eventuali lezioni erogate in modalità sincrona, sono complessivamente richieste 4 ore di impegno studente per la fruizione delle lezioni e almeno 3 ore per lo svolgimento degli esercizi.

Risultati di Apprendimento

Alla fine del modulo lo studente sarà in grado di:

- analizzare e riconoscere le caratteristiche dei dispositivi a contatto metallo-semiconduttore;
- conoscere le caratteristiche fisiche e tecniche del diodo MOS, sia nel caso ideale che in quello reale, e del dispositivo MOSFET;
- conoscere i fondamenti della fisica che stanno alla base delle proprietà optoelettroniche dei principali dispositivi fotonici, come i LED e le celle solari.

Obiettivi di Apprendimento

Contatti metallo-semiconduttore. Bande di Energia. Caratteristiche corrente-voltaggio. Contatto Ohmico. Il diodo MOS ideale e SiO₂-Si. MOSFET: caratteristiche di base. Regioni lineari e di saturazione. Circuito equivalente. La regione sotto soglia. Tipi di MOSFET. Il MOSFET: voltaggio di soglia e scaling. Voltaggio di soglia. Scaling del dispositivo. Transizioni radiative ed assorbimento ottico. LED e LED visibili. Celle solari. Radiazione solare. Celle solari a giunzione p – n. Efficienza di conversione. Celle solari ad eterogiunzioni e ad interfaccia. Concentrazione ottica.

Modulo E01 – E-tivity

[Carico di studio: 25 h - 5 giorni - 1 CFU]

Attività didattiche

Il modulo non prevede l'erogazione di ore di lezione. L'apprendimento è perseguito solo mediante lo studio autonomo necessario per le attività proposte dal docente.

Risultati di Apprendimento

Alla fine del modulo lo studente sarà in grado di:

- valutare in modo autonomo il suo livello di preparazione rispetto ai diversi argomenti in cui è ripartito il corso;
- valutare la metodologia più adatta per la risoluzione di un problema originale;
- utilizzare nella maniera più adatta il materiale teorico e le esercitazioni a disposizione;
- sviluppare in maniera adeguata le attività proposte dal docente, utilizzando un linguaggio scientificamente corretto, una limpida chiarezza espositiva ed una completezza di risultati sia analitici che numerici.

Obiettivi di Apprendimento

In questo modulo lo studente è impegnato sia in un'attività di autovalutazione della preparazione (test di autovalutazione, presenti in piattaforma) sia nella risoluzione di Case-Study originali di complessità non banale proposti allo studente sotto forma di E-tivity (Electronic-Activity) accompagnate da una scheda descrittiva e pubblicate sia in piattaforma nei materiali didattici sia nella Classe Virtuale relativa al Corso e presente in piattaforma stessa.

La scheda descrittiva riporta sia le attività da svolgere da parte dello studente sia le modalità di valutazione da parte del docente ai fini del computo del voto finale d'esame. Le E-tivity hanno una finalità di apprendimento oltre che di valutazione. In questo senso i Risultati di Apprendimento dichiarati nel modulo non sono raggiunti mediante la fruizione di lezioni, ma esclusivamente mediante lo studio autonomo e la risoluzione dei casi proposti, che possono riguardare tutto lo spettro di argomenti svolti nel corso.

N.B. Le E-tivity non sono da considerarsi Esoneri.

Organizzazione dell'insegnamento

Attività Didattiche e Attività di Apprendimento

L'insegnamento consiste di attività didattiche e di attività di apprendimento. Le attività didattiche comprendono lezioni pre-registrate e/o lezioni sincrone in web conference. Le attività di apprendimento comprendono sia lo studio autonomo delle dispense e delle esercitazioni fornite dal docente sia lo studio autonomo necessario per lo svolgimento dei test di autovalutazione e delle E-tivity. Le esercitazioni contenute nei moduli sono necessarie per verificare velocemente la comprensione dell'argomento in studio. Il loro svolgimento può essere inviato al docente

	<p>tramite messaggistica in piattaforma per richiedere chiarimenti riguardo gli argomenti di cui non si è compreso pienamente il procedimento risolutivo o dubbi che sorgono nella preparazione. Le E-tivity devono essere richieste al docente previo messaggio in piattaforma e svolte in maniera autonoma ed inviate con soluzione chiara e completa al docente sempre come tramite messaggio privato in piattaforma.</p> <p>Calendario di studio</p> <p>L'insegnamento è organizzato in modo da poter essere svolto in due mesi circa, prevedendo un impegno settimanale di almeno 25 ore. Tuttavia, se non si riesce a seguire la tempistica indicata, è probabile che due mesi non siano sufficienti a consentire una preparazione adeguata. L'insegnamento è organizzato secondo una modalità autonoma, idonea anche per studenti lavoratori. Si consiglia di pianificare L'Esame di Profitto a non meno di due mesi dall'inizio dello studio.</p> <p>Classe Virtuale</p> <p>L'Insegnamento è dotato di una classe virtuale. Le comunicazioni con il docente relativamente agli argomenti del corso devono avvenire nel forum di classe virtuale.</p> <p>Carico di Studio</p> <p>Il Carico di Studio totale dell'Insegnamento è di 225 ore suddivise in circa:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 58 ore necessarie per visualizzare lo studio del materiale videoregistrato; • 167 ore dedicate allo studio autonomo.
Materiali di studio	<p>Materiali didattici a cura del docente.</p> <p>Il materiale didattico presente in piattaforma è suddiviso in diverse sezioni comprendenti dispense, esercitazioni, video-lezioni ed e-tivity, che fanno riferimento ai contenuti dei moduli indicati nella presente scheda. Le dispense sono strutturate in modo da riportare una sintesi degli argomenti trattati, che vengono poi sviluppati nelle video lezioni. Per tale motivo, è necessario visionare le video-lezioni per una preparazione completa, prendendo appunti sulle dispense fornite, per poter capire a fondo gli argomenti illustrati e allo stesso tempo applicare le conoscenze teoriche allo svolgimento delle esercitazioni, fondamentali per il superamento dell'esame finale.</p> <p>Sono anche disponibili testi di appelli d'esame precedenti, utili per prendere confidenza con la tipologia d'esame scritto.</p> <p>Materiali didattici consigliati.</p> <p>Per la professione si consiglia di inserire nella propria libreria i seguenti testi:</p> <ul style="list-style-type: none"> • M. Testa, Fondamenti di meccanica quantistica, Ed. Nuova Cultura. • Neil W. Ashcroft N. David Mermin, Solid State Physics, HRW International Editions. • Charles Kittel, Introduction to Solid State Physics, John Wiley and Sons, 2005. • S.M. Sze, Semiconductor devices, physics and technology, Wiley 1985.
Modalità di verifica dell'apprendimento	<p>Voto finale</p> <p>La verifica del raggiungimento dei Risultati di Apprendimento è svolta mediante la valutazione delle E-tivity e dell'Esame di Profitto. Il voto finale è la somma delle votazioni ottenute dalle E-tivity e dell'Esame di Profitto. L'esame si supera con un minimo di 18 punti (18/30).</p> <p><i>Valutazione E-tivity</i></p> <p>Le E-tivity non sono obbligatorie ma concorrono alla valutazione finale dell'esame. L'E-tivity valuta tutti i Risultati di Apprendimento elencati per l'Insegnamento, ed in particolare quelli relativi alla Capacità di apprendere.</p> <p><i>Valutazione Esame di Profitto</i></p> <p>L'esame fuori sede o in sede (Roma) consiste nello svolgimento di una prova scritta composta da esercizi inerenti il programma svolto. Il tempo a disposizione per la prova è di 90 minuti e lo svolgimento deve rigorosamente attenersi ai quesiti proposti. L'esame di profitto è valutato al massimo 30 punti (30/30 con eventuale assegnazione della lode). Chiarezza espositiva, sia dal punto di vista grafico che di metodologia, nonché la presenza di commenti che giustifichino i passaggi svolti e rendano più chiara la lettura, saranno ritenuti elementi utili per la valutazione della prova. Durante la prova è consentito l'uso delle Dispense di Teoria a cura del docente e della calcolatrice scientifica (anche programmabile). È naturalmente proibito l'uso di supporti informatici: computer, tablet, cellulare o smartphone, o qualunque strumento che consenta la connessione su rete internet.</p>