



# UNIVERSITÀ DI PISA

---

## PROGETTAZIONE DI SENSORI E MICROSISTEMI

### MASSIMO PIOTTO

Anno accademico	2020/21
CdS	INGEGNERIA ELETTRONICA
Codice	313II
CFU	9

Moduli	Settore/i	Tipo	Ore	Docente/i
PROGETTAZIONE DI SENSORI E MICROSISTEMI	ING-INF/01	LEZIONI	90	GIUSEPPE BARILLARO GIOVANNI PENNELLI MASSIMO PIOTTO

### Obiettivi di apprendimento

#### *Conoscenze*

Gli studenti acquisiranno conoscenze di teoria, modelli e progettazione di sensori e microsistemi (sistemi microelettromeccanici - MEMS). Verranno discussi modelli analitici e numerici (agli elementi finiti) di casi di studio, compresi microsensori inerziali, acustici e chimici. Sarà considerata l'elettronica integrata per il condizionamento del segnale.

#### *Modalità di verifica delle conoscenze*

La verifica delle conoscenze sarà oggetto della valutazione finale composta da una prova scritta e da una prova orale. Nella prova scritta lo studente dovrà dimostrare di saper analizzare il comportamento di sensori e microsistemi. Nel corso della prova orale lo studente dovrà dimostrare la capacità di discutere gli argomenti del corso utilizzando un terminologia corretta.

#### *Capacità*

Al termine del corso:

- Lo studente sarà in grado di progettare microsistemi integrati utilizzando modelli analitici e numerici.
- Lo studente sarà in grado di utilizzare a scopo progettuale il software Comsol-multiphysics.

#### *Modalità di verifica delle capacità*

La verifica avverrà nel corso delle prove di esame e nella discussione del report scritto riguardante il progetto.

#### *Comportamenti*

Lo studente potrà acquisire e/o sviluppare sensibilità alle problematiche relative alla progettazione di sistemi microelettromeccanici e quindi svilupperà competenze tipicamente interdisciplinari comprendenti aspetti elettronici, meccanici, fisici e chimici.

#### *Modalità di verifica dei comportamenti*

La sensibilità nell'analisi delle problematiche relative alla progettazione di sensori e microsistemi verrà verificata durante le sessioni di laboratorio e tramite opportune domande nel corso dell'esame finale.

#### *Prerequisiti (conoscenze iniziali)*

Conoscenze di matematica, chimica e fisica di base. Conoscenze di tecnologie microelettroniche, elettronica e microelettronica.

#### *Corequisiti*

Non sono previsti co-requisiti

#### *Indicazioni metodologiche*

Il corso viene tenuto in italiano utilizzando slides che sono messe a disposizione dello studente tramite il sito e-learning. Le slides sono commentate e integrate con calcoli e precisazioni scritte a mano. Gli studenti possono usufruire del ricevimento e della mail del docente per chiarimenti tematici e organizzativi.



## UNIVERSITÀ DI PISA

---

### Programma (contenuti dell'insegnamento)

- 1 Premessa matematica essenziale
  - 1.1 Prodotti tra vettori
    - 1.1.1 Prodotto scalare
    - 1.1.2 Prodotto vettoriale
  - 1.2 Proprietà di trasformazione di vettori
  - 1.3 Tensori del secondo ordine
    - 1.3.1 Prodotto diadico
    - 1.3.2 Prodotto scalare tra tensori del secondo ordine
- 2 Statica e dinamica di sistemi elastici
  - 2.1 Il continuo
  - 2.2 Corpi elastici deformabili
    - 2.2.1 Spostamento
    - 2.2.2 Spostamento differenziale
    - 2.2.3 Gradiente di spostamento
  - 2.3 Deformazioni
    - 2.3.1 Osservazione sulla deformazione
    - 2.3.2 Semplificazioni
    - 2.3.3 Ancora sulla relazione tra  $S$  ed  $e$
  - 2.4 Notazione Simbolica
  - 2.5 Notazione ridotta ( $S$ )
    - 2.5.1 Operatore  $\sigma$  in forma matriciale
  - 2.6 Forze e tensore di stress
    - 2.6.1 Equazione della dinamica I
    - 2.6.2 Tensore di stress
    - 2.6.3 Interpretazione geometrica del vettore e del tensore di stress
    - 2.6.4 Casi speciali di stress
    - 2.6.5 Tensore di stress di Maxwell
    - 2.6.6 Equazione della dinamica II
  - 2.7 Notazione ridotta ( $T$ )  
Tensore di stress di Maxwell in notazione ridotta
  - 2.8 Legge di Hooke  
Notazione simbolica
    - 2.8.1 Materiale isotropo
    - 2.8.2 Legge di Hooke in presenza di dilatazioni termiche
  - 2.9 Energia di deformazione
  - 2.10 Modelli termodinamici di sensori e microsistemi
    - 2.10.1 Termodinamica dei solidi
    - 2.10.2 Espressioni per  $dW$
- Solido deformabile di volume unitario e costante, sottoposto a campo elettromagnetico
- Sistema aperto rigido
- Sistema elettromeccanico (attuazione elettrica)
- Sistema elettromeccanico (attuazione magnetica)
- 3 Elettromeccanica a parametri concentrati
  - 3.1 Parametri concentrati
  - 3.2 Variabili coniugate in potenza
  - 3.3 Elementi circuitali generalizzati I - reti elettriche
    - 3.3.1 Induttanza generalizzata
    - 3.3.2 Capacità generalizzata
  - 3.4 Elementi circuitali generalizzati II - sistema meccanico
    - 3.4.1 La molla ideale
    - 3.4.2 La massa ideale
    - 3.4.3 Smorzatore ideale
  - 3.5 Circuito equivalente di un sistema meccanico
  - 3.6 Dinamica di un sistema del secondo ordine
  - 3.7 Circuito equivalente di un sistema elettromeccanico
- Rete equivalente
  - 3.7.1 Appendice: Circuiti equivalenti per piccolo segnale
- La matrice di trasmissione
- Esempio: trasformatore ideale
- 4 L'attuatore elettrostatico
  - 4.1 Attuatore a piatti piani
    - 4.1.1 Alimentazione in carica
    - 4.1.2 Alimentazione in tensione
  - 4.2 Comb finger
    - 4.2.1 Alimentazione in tensione
  - 4.3 Linearizzazione della risposta



## UNIVERSITÀ DI PISA

---

### 5 Strutture

5.1 Ipotesi di De Saint Venant e caratteristiche della sollecitazione

5.2 Travi piane ad asse curvilineo

5.3 Caratteristiche di sollecitazione e stato di tensione

5.3.1 Flessione di barre

5.3.2 Sollecitazioni torsionali

5.4 Combinazioni di strutture elastiche

5.5 Attuatore termo-elastico

5.6 Membrane e Piatti

5.7 Dinamica delle strutture

Vibrazioni libere di una barra con due configurazioni di vincoli

Trasformazioni di quantità espresse in forma ridotta

6 Microsistemi Piezoresistivi

6.1 Piezoresistività

6.1.1 Piezoresistività nei materiali cristallini

6.1.2 Trasformazione del sistema di riferimento

6.2 Estensimetri

Espressione approssimata

7 Microsistemi inerziali

7.1 Accelerometri

7.1.1 Accelerometro quasi statico a loop aperto

7.1.2 Accelerometri a loop chiuso

Accelerometro con uscita e retroazione PWM

Funzioni complementari nella catena di azione

7.2 Giroscopi

7.2.1 Giroscopi microelettromeccanici vibranti

Effetti dello spreading in frequenza

7.2.2 Valutazione dell'influenza della accelerazione angolare

8 Acustica Fisica

8.1 Equazioni del campo acustico

8.2 Equazione di Christoffel

8.3 Onde Piane

9 Piezoelettricità

9.1 Equazioni costitutive

9.1.1 Equazione costitutiva di un materiale dielettrico

9.1.2 Equazioni costitutive piezoelettriche

9.1.3 Sistemi di equazioni costitutive piezoelettriche

9.2 Equazione di Christoffel in materiali piezoelettrici

10 Il trasduttore piezoelettrico

10.1 Trasduttore piezoelettrico sottile

10.1.1 Valutazione dei termini di accoppiamento piezoelettrico

10.1.2 Andamento delle variabili indipendenti

Soluzione per la corrente

Soluzione generale per la velocità

10.1.3 Andamento delle variabili dipendenti

Calcolo della tensione alla porta elettrica

Calcolo delle forze sulle facce del trasduttore

10.2 Circuito equivalente di Mason

10.2.1 Il trasduttore piezoelettrico trasmettitore e il filtro piezoelettrico

Caso di backing rigido

10.2.2 Risonatore libero

Filtri piezoelettrici

10.3 La rete elettrica equivalente

10.3.1 Trasmettitore

10.3.2 Ricevitore

10.3.3 La funzione di trasferimento completa

11 Sensori di temperatura e microsistemi termici

11.1 Sensori resistivi di temperatura

11.1.1 Sensori a conduttore metallico

11.1.2 Termistori

11.1.3 Circuiti utilizzanti sensori resistivi

Problema dell'autoriscaldamento in sensori resistivi

11.2 Sensori di temperatura a giunzione p-n

11.3 Effetti termoelettrici

11.3.1 Effetto Peltier

11.3.2 Effetto Seebeck

11.3.3 Effetto Thomson

11.4 Modello microscopico degli effetti termoelettrici

11.5 Termocoppie



## UNIVERSITÀ DI PISA

---

Coefficiente di Seebeck di una termocoppia

Leggi delle termocoppie

11.5.1 Utilizzo delle termocoppie per la misura della temperatura

11.6 Verso il microsistema termico

### Bibliografia e materiale didattico

Manuale "Microsistemi", Pisa University Press, 2017.

Lecture notes, slides e materiali diversi distribuiti tramite il sito del corso (servizio e-learning <https://elearn.ing.unipi.it/>).

### Indicazioni per non frequentanti

Nessuna variazione per la prova scritta e orale. I non frequentanti non potranno svolgere il progetto che prevede l'utilizzo del software Consol Multiphysics disponibile nelle aule informatiche del centro di calcolo e utilizzato nelle esercitazioni.

### Modalità d'esame

**A seguito dell'emergenza epidemiologica, la prova scritta non verrà svolta mentre la prova orale si svolgerà con le seguenti modalità:**

- Lo svolgimento della prova orale avverrà tramite la piattaforma Teams nell'aula virtuale pubblica già creata per l'insegnamento. Il candidato dovrà mantenere il microfono e la telecamera accesi durante tutto lo svolgimento dell'interrogazione; gli altri studenti collegati dovranno invece disattivare i propri microfoni e telecamere. È vietato a chiunque effettuare, con qualsivoglia strumento, l'audio/video registrazione della prova d'esame a distanza.
- La prova sarà composta da tre domande sul programma d'esame. Per coloro che hanno richiesto di svolgere un progetto con il software di simulazione illustrato a lezione, la prova d'esame sarà costituita da due domande più la discussione del progetto. Le domande proposte potranno prevedere lo svolgimento di espressioni algebriche e di calcoli analoghi a quelli presenti nelle prove scritte dei precedenti appelli.

L'esame è composto da una prova scritta e da una prova orale.

La prova scritta consiste nella risoluzione di due esercizi e la durata è di un'ora.

La prova orale consiste in un colloquio tra il candidato e il docente, o anche tra il candidato e altri membri della commissione. La durata media del colloquio è di circa 40 minuti. La prova orale è superata se il candidato risponde correttamente alle domande mostrando la capacità di esprimersi in modo chiaro e di usare la terminologia corretta. La prova orale non è superata se il candidato non risponde correttamente alle domande mostrando ripetutamente l'incapacità di mettere in relazione parti del programma e nozioni che deve usare in modo congiunto per rispondere in modo corretto ad una domanda.

Per gli studenti che hanno scelto di fare il progetto finale, la prova orale inizierà con la discussione del progetto.

### Stage e tirocini

Non sono previste forme di stage, tirocini o collaborazioni con terzi durante lo svolgimento del corso.

### Altri riferimenti web

nessuna

### Note

Nesuna

*Ultimo aggiornamento 25/09/2020 08:54*