

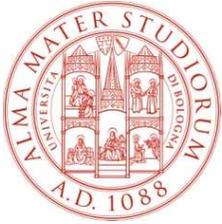
# MICROELETTRONICA M — 2019–2020

La presentazione è disponibile in forma elettronica sotto la voce *Teaching Activity* del sito *web*

<http://www.micro.deis.unibo.it/~rudan/site/>

- Chi sono i destinatari del corso?
- Chi deve frequentare cosa?
- Orario.
- Scopi del corso.
- Cosa si deve già sapere per seguire il corso?
- Il corso è professionalmente utile?
- Modalità d'esame.
- Iscrizione agli appelli.
- Materiale didattico.
- Programma.
- Ricevimento Studenti.
- Tesi di Laurea/Attività preparatoria alla tesi.

✓ IEEE.



## CHI SONO I DESTINATARI DEL CORSO?

- ❑ Studenti dell'ordinamento ex DM 270/2004 iscritti al primo (quarto) anno del CL magistrale in Ingegneria elettronica, che devono acquisire 6 crediti sotto la denominazione *Microelettronica M.*
- ❑ Studenti dell'ordinamento ex DM 509/1999 (Laurea triennale in Ingegneria elettronica) che desiderano ripetere la frequenza di 3 crediti di *Microelettronica L-A.*
- ❑ Studenti dell'ordinamento ex DM 509/1999 (Laurea specialistica in Ingegneria elettronica) che desiderano ripetere la frequenza di 6 crediti di *Microelettronica LS.*
- ❑ Studenti di ordinamenti precedenti al 509 che desiderano ripetere la frequenza di *Microelettronica.*
- ❑ Studenti diversi dai precedenti che seguono il corso come insegnamento a scelta.



# CHI DEVE FREQUENTARE COSA?



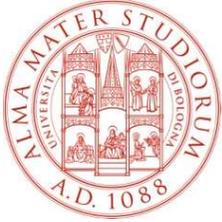
- ❑ Studenti dell'ordinamento ex DM 270 o di ordinamenti precedenti all'ex 509: tutte le ore settimanali assegnate a **Microelettronica M**: **Lunedì 12–14 aula 3-6, Venerdì 11-14 aula 5-5** nel periodo 19.02–05.06.2020. Queste informazioni sono anche visibili negli orari visibili nel sito *web* **del Corso di Laurea**.
- ❑ Studenti dell'ordinamento ex DM 509 (Laurea triennale in Ingegneria elettronica): la prima parte del corso, relativa ai processi di fabbricazione.
- ❑ Studenti dell'ordinamento ex DM 509 (Laurea specialistica in Ingegneria elettronica): la seconda parte del corso.
- ❑ **Alcuni argomenti di Microelettronica M sono stati svolti in forma di esercitazione in coordinamento col corso 90389 - Analisi Matematica, Metodi Numerici e Elaborazione statistica dei Segnali M C.I., svolto al primo ciclo.**

# SCOPI DEL CORSO



- ❑ Illustrare i processi di fabbricazione dei circuiti integrati.
- ❑ Illustrare i principi fisici su cui si basa il funzionamento dei dispositivi a semiconduttore, nonché i metodi di misura di parametri notevoli.
- ❑ Descrivere la struttura e le caratteristiche elettriche dei principali dispositivi elettronici, sia di quelli attuali che di quelli innovativi.
- ❑ Delineare i metodi e le prospettive della progettazione dei circuiti integrati.
- ❑ Estendere i concetti tipici coinvolti nella descrizione dei dispositivi a stato solido in modo da comprendere anche il funzionamento di nanostrutture importanti in altri settori applicativi.
- ❑ Il corso può essere considerato come una base culturale a sé stante oppure, coordinato con quelli di *Physics of Semiconductor Devices and Memories*, *Elettronica dei sistemi digitali*, *Advanced Solid-State Sensors*, come parte propedeutica di un gruppo di materie che sviluppino in modo completo i concetti essenziali per la formazione di un Ingegnere elettronico.

# COSA SI DEVE GIÀ SAPERE?



- ❑ Nozioni di matematica, fisica, elettrotecnica acquisite da corsi precedenti.
- ❑ Nozioni elementari sui dispositivi elettronici.
- ❑ Nel corso saranno utilizzati ulteriori concetti matematici, fisici e chimici, che verranno spiegati man mano che si presenta la necessità. L'uso di tali concetti è necessario e stabilisce l'unità culturale del corso.
- ❑ Perché gli Studenti devono seguire i corsi di circuiti *prima* di apprendere come sono fatti i dispositivi, e non *dopo*? L'ordine è irrilevante, perché una descrizione sistemistica dei circuiti deve prescindere dalla realizzazione tecnologica di questi ultimi, che evolve continuamente.



## MODALITÀ D'ESAME

- ❑ Gli Studenti dell'ordinamento ex DM 270 (Laurea magistrale) iscritti nel 2019–2020, o di ordinamenti precedenti al 509, sostengono una prova orale sui contenuti di *Microelettronica M*.
- ❑ Gli Studenti dell'ordinamento ex DM 270 (Laurea magistrale) iscritti nel 2009–2010, sostengono una prova orale sui contenuti di *Microelettronica M* svolti nel 2009–2010.
- ❑ Gli Studenti dell'ordinamento ex DM 509 (Laurea triennale) sostengono una prova orale sui contenuti di *Microelettronica L-A* dell'AA in cui sono stati iscritti al corso, ovvero sui contenuti di *Microelettronica M* relativi ai processi di fabbricazione.
- ❑ Gli Studenti dell'ordinamento ex DM 509 (Laurea specialistica) sostengono una prova orale sui contenuti di *Microelettronica LS* dell'AA in cui sono stati iscritti al corso, ovvero sui contenuti di *Microelettronica M* con esclusione della parte relativa ai processi di fabbricazione.

# ISCRIZIONE AGLI APPELLI D'ESAME — I



- ❑ Per sostenere le prove d'esame gli Studenti devono iscriversi nelle liste che di volta in volta saranno rese disponibili sul sito di Alma Esami:

<https://almaesami.unibo.it/almaesami/welcome.htm>

**Non sono ammesse altre modalità d'iscrizione**

**Gli Studenti non in grado di iscriversi (perché, ad es., in corso di trasferimento) devono segnalare tempestivamente il problema per evitare sgradevoli rifiuti al momento dell'appello**

- ❑ Se le prove si svolgono in un'aula, questa viene indicata di volta in volta nel sito *web*. Gli Studenti si recano direttamente nell'aula all'ora indicata.
- ❑ In alternativa all'indicazione di un'aula può essere data l'indicazione **DEI** (Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione "Guglielmo Marconi"). In quest'ultimo caso gli Studenti si trovano all'ora indicata nell'atrio del secondo piano dell'edificio Aule Nuove, dove si trova la porta di accesso al DEI.

## ISCRIZIONE AGLI APPELLI D'ESAME — II



- ❑ Una volta completato l'appello, a ciascuno Studente saranno indicati il luogo e l'ora in cui si dovrà presentare per sostenere l'esame. **Gli Studenti che lo desiderano possono scambiarsi fra loro il turno dell'esame, dandone simultaneamente comunicazione alla Commissione.**
- ❑ La verbalizzazione dell'esame può svolgersi in occasione degli appelli **di qualunque insegnamento il cui titolare sia M.R.**, con il vincolo indicato qui di seguito:
  - Nel caso di Studenti in corso **non si possono verbalizzare esami durante i cicli di lezione** (il vincolo non si applica a Studenti dell'ultimo anno o fuori corso).
- ❑ Gli Studenti sono pregati di non richiedere verbalizzazioni al di fuori degli appelli.
- ❑ La verbalizzazione deve essere svolta alla presenza dello Studente interessato: **non è consentito delegare un altro Studente.**

# MATERIALE DIDATTICO — I

## □ Microelettronica L-A e Microelettronica M

- 1-1. D. A. Neamen, *Semiconductor Physics and Devices*, IRWIN, 1992.
- 1-2. G. Soncini, *Tecnologie microelettroniche*, Boringhieri, 1986.
- 1-3. W. Maly, *Atlas of IC Technologies: an Introduction to VLSI Processes*, The Benjamin-Cummings Publishing Co., 1987.
- 1-4. M. Rudan, *Tavole di Microelettronica*, Pitagora, 3<sup>a</sup> Ed., 2001.
- 1-5. M. Rudan, *Physics of Semiconductor Devices*, Springer, 1<sup>a</sup> edizione 2015, 2<sup>a</sup> edizione 2018 (l'errata corrige di questo libro è pubblicata nel sito Docente).
- 1-6. S. M. Sze, *Semiconductor Devices — Physics and Technology*, Wiley, 1985.
- 1-7. E. De Castro, *Fondamenti di Elettronica — Fisica elettronica ed elementi di teoria dei dispositivi*, UTET, 1975.
- 1-8. E. De Castro, *Teoria dei dispositivi a semiconduttore*, Pàtron, 1983.
- 1-9. G. Bacarani, *Dispositivi MOS*, Pàtron, 1982.

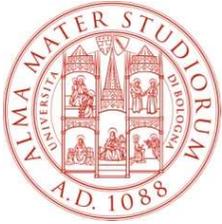
**La registrazione audio delle lezioni, a partire dall'AA 2016-2017, sono disponibili in <http://www.micro.deis.unibo.it/~rudan/site/>**





## MATERIALE DIDATTICO — II

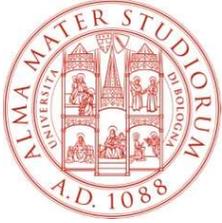
- ❑ I testi elencati devono intendersi come testi di consultazione.
- ❑ Il riferimento 1.4 *Tavole di Microelettronica* è la raccolta dei lucidi finora usati nei corsi di Microelettronica ed Elettronica dello stato solido per i Corsi di Laurea in Ingegneria elettronica, Ingegneria delle Telecomunicazioni e Ingegneria informatica, e nei corsi di Elettronica applicata per i Corsi di Laurea in Ingegneria gestionale, Ingegneria meccanica e Ingegneria nucleare. Esso deve essere inteso come un ausilio didattico che contiene i disegni, gli schemi e i calcoli, non come il “sostituto” delle lezioni.
- ❑ Il riferimento 1.5 *Physics of Semiconductor Devices* contiene la maggior parte del materiale di 1.4, riorganizzato e arricchito di spiegazioni e commenti.
- ❑ Nel corso delle lezioni possono essere usati altri lucidi non contenuti nella raccolta. Quelli che non sono coperti da *copyright* sono messi a disposizione degli Studenti tramite il sito *web*.
- ❑ È comunque raccomandata la consultazione di testi scritti in inglese.



# ATTENZIONE !!!!

- ❑ I numeri di pagina della versione pubblicata di *Tavole di Microelettronica* sono diversi da quelli usati in classe. Nella versione usata in classe, sono state aggiunte molte pagine in più rispetto a quella pubblicata. Di conseguenza,

**PRENDENDO APPUNTI CONVIENE RIFERIRSI AL TITOLO E AL CONTENUTO DI OGNI PAGINA, NON AL SUO NUMERO....**



# PROGRAMMA — I

- ❑ Processi tecnologici in silicio.
  - Produzione del silicio per applicazioni elettroniche.
  - Tecnologia planare: ossidazione termica, diffusione termica, impianto ionico, epitassia, litografia, metallizzazione.
  - Esempi di processi bipolari e MOS.
  - Descrizione di un impianto di produzione di circuiti integrati.
  
- ❑ Cenni di Meccanica quantistica.
  
- ❑ Dispositivi a semiconduttore.
  - Richiami sulla fisica dei dispositivi a semiconduttore.
  - Equazioni dei dispositivi a semiconduttore.
  - Modelli per i coefficienti delle equazioni.

# PROGRAMMA — II



- ❑ Dispositivi a semiconduttore.
  - Struttura dei dispositivi elementari.
  - Funzionamento nel caso statico.
  - Regime dinamico nel caso dei piccoli segnali e nel caso transitorio.
  
- ❑ Regole di scala.
- ❑ Tecniche di misura di parametri fisici notevoli dei semiconduttori.
- ❑ Celle solari.
- ❑ Il corso è integrato da seminari su dispositivi avanzati, sensori e metodologie di progetto.

# RICEVIMENTO STUDENTI



- L'orario ufficiale di ricevimento è:
  - Giovedì 11:30–13:30
  - Venerdì 11:30–13:30
  
- Si consiglia tuttavia di chiedere anticipatamente un appuntamento al termine della lezione, oppure telefonando al numero di ufficio 051-209-3016 (93016 dai citofoni interni della Facoltà), oppure inviando un messaggio di posta elettronica all'indirizzo

***massimo.rudan@unibo.it***

- Nel caso in cui per questo corso si rendesse disponibile un *tutor*, l'orario di ricevimento sarebbe al pomeriggio nel Laboratorio di Microelettronica di **ARCES** situato nell'edificio principale della Facoltà (**scalone principale** ⇒ **terzo piano** ⇒ **corridoio** ⇒ **terza porta a sinistra** ⇒ **citofono**). Sarà data informazione tempestiva sul numero di telefono e sull'indirizzo di posta elettronica del *tutor*.



# TESI DI LAUREA (I)

- ❑ Possibili argomenti per Tesi di Laurea/Attività preparatoria alla Tesi di laurea nel settore dei dispositivi:
  - Modelli fisici avanzati del trasporto basati sulla soluzione diretta dell'equazione di Boltzmann.
  - Computazione quantica.
  - Metodi numerici per la soluzione del modello del trasporto.
  - Nanotubi di silicio o di carbonio.
  - Naso elettronico (progettazione e misura di sensori integrati per sostanze volatili).
  - Memorie a cambiamento di fase (calcogenuri).
  - Tesi in collaborazione con Aziende.
  
- ❑ Parte di questi argomenti saranno oggetto di seminari durante il corso.



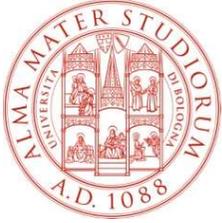
## TESI DI LAUREA (II)

- ❑ Gli argomenti per Tesi di Laurea/Attività preparatoria alla tesi esposti qui, più altri seguiti da Colleghi, sono svolti presso il

***Centro di Ricerca sui Sistemi Elettronici per l'Ingegneria  
dell'Informazione e delle Telecomunicazioni***

***“Ercole De Castro” (ARCES)***

- ❑ I Docenti di Elettronica della Sede di Bologna che fanno parte di ARCES sono: G. Baccarani, E. Franchi, E. Gnani, A. Gnudi, R. Guerrieri, G. Masetti, S. Reggiani, R. Rovatti, M. Rudan, N. Speciale.
- ❑ ARCES è un Centro di Ricerca dell'Università di Bologna, non un'Azienda.



# IEEE

- ❑ La sigla IEEE significa *Institute of Electrical and Electronic Engineers*. Si pronuncia “I triple E”.
- ❑ IEEE è un Istituto internazionale ripartito in un grande numero di Società specialistiche: *Dispositivi elettronici, Circuiti elettronici, Elettronica quantistica, Antenne, Telecomunicazioni, Calcolatori, Elettronica di potenza, ecc.*
- ❑ L’associazione a IEEE consente l’iscrizione a una o più Società.
- ❑ Nelle Sedi universitarie in cui IEEE è presente esiste anche lo *Student Branch*. Le quote associative per gli Studenti sono più basse di quelle dei Soci normali. *Il Counselor della SB di Bologna è la Prof. Rebecca Montanari del DISI.*

**Le informazioni fornite su IEEE non hanno nessuna relazione con la didattica istituzionale. Servono solo a indicare la possibilità, per gli Studenti interessati ad associarsi a IEEE, di ottenere l’associazione a condizioni più favorevoli.**



## ATTENZIONE N. 2:

- ❑ I concetti illustrati in questo corso vanno compresi e “ben digeriti”; la descrizione qualitativa è solo il punto di partenza: deve essere seguita da un’esauriente analisi quantitativa (usando cioè la matematica adatta allo scopo).
- ❑ In altri termini, la matematica non è l’oggetto del corso, è lo strumento necessario alla descrizione dei concetti; è come l’abilità di legger la musica per interpretare una sonata.
- ❑ In conclusione: non si deve considerare l’esame come il momento di scriver formule una dopo l’altra con uno strenuo sforzo di memoria. Questo atteggiamento porta invariabilmente al disastro... chi pensa di avere problemi, chieda subito!!



## ATTENZIONE N. 3:

- Un commento abbastanza tipico che si rileva nei questionari è **«non si fa in tempo a copiare i conti dai lucidi»**.
- Il punto è che tutto il materiale è disponibile: allora, se i conti sono già sui lucidi, che senso ha ricopiarli a lezione?
- A parte questo, il massimo livello di conti è qualche equazione differenziale del primo ordine, il resto è integrali facili e algebra. Non c'è nulla che non sia già stato visto in qualche corso di base.



## ATTENZIONE N. 4:

- ❑ Le registrazioni audio delle lezioni sono disponibili sul sito *web*.
- ❑ Ciò è fatto per fornire un ulteriore ausilio agli studenti, non per incoraggiarli a non venire a lezione....
- ❑ È FORTEMENTE SUGGERITO DI ASSISTERE AGLI ESAMI.