

**Roberto Marani**  
**Anna Gina Perri**

Dipartimento di Ingegneria  
 Elettrica e dell'Informazione,  
 Laboratorio di Dispositivi  
 Elettronici, Politecnico di Bari

# Analisi e Progetto di Dispositivi Elettronici ad Eterostruttura

## *Analysis and Design of Heterostructures Electronic Devices*

*Sommario: In questo articolo vengono esaminati i principali dispositivi ad eterostruttura, con particolare attenzione agli attuali HBT SiGe, illustrandone i criteri di progetto attraverso esempi di simulazione numerica.*

*Abstract: In this paper the main heterostructure devices are described, with particular reference to the current SiGe HBT, examining the design criteria through some examples of numerical simulation.*

### 1. Introduzione

L'elettronica per alte frequenze è stata resa popolare negli ultimi anni dall'avvento di applicazioni come, ad esempio, la telefonia cellulare, con frequenze di impiego oltre il GHz.

La spinta crescente verso le alte frequenze ha reso pertanto necessario lo studio e la progettazione di nuovi dispositivi elettronici.

Attualmente (2016) il Silicio continua ad essere il semiconduttore più largamente utilizzato in elettronica ed è considerato un ottimo materiale dal punto di vista tecnologico. Tuttavia non rappresenta il semiconduttore ideale per realizzare dispositivi da impiegare nei circuiti elettronici per alta frequenza. Infatti nel silicio la mobilità dei portatori di carica, sia lacune che elettroni, è relativamente piccola e la massima velocità, denominata velocità di saturazione, che questi portatori possono raggiungere sotto elevati campi elettrici è di circa  $10^7$  cm/sec: in definitiva il silicio è un semiconduttore "lento". Inoltre, essendo a band gap indiretto, presenta un'efficienza quantica bassa, rendendolo non idoneo per la realizzazione di dispositivi ottici attivi, come i diodi laser.

D'altra parte, molti dei semiconduttori composti III - V, quali, ad esempio, l'Arseniuro di Gallio (GaAs) o il Fosforo di Indio (InP), presentano mobilità e velocità di saturazione più elevate e, in virtù del loro band gap diretto, è possibile realizzare dispositivi ottici più efficienti.

La tecnologia III - V è stata inizialmente frenata da problemi pratici associati alla realizzazione di circuiti integrati a basso costo, con elevati livelli di integrazione ed alte rese di produzione: non era possibile, ad esempio, far crescere termicamente ossidi robusti, i wafer erano più

piccoli, con una maggiore densità di difetti, e si rompevano più facilmente.

Grazie al perfezionamento raggiunto nelle tecniche di accrescimento epitassiale questi problemi sono stati superati e quindi si è potuto realizzare dispositivi più veloci ed efficienti.

Un ulteriore aumento delle prestazioni in frequenza dei dispositivi elettronici si è ottenuto attraverso l'avvento delle **eterostrutture** o **eterogiunzioni**.

In questo articolo, dopo una rapida descrizione dei principi fisici relativi alle eterostrutture, analizziamo i principali dispositivi a eterogiunzione, quali HBT, MESFET ed HEMT.

Particolare attenzione viene dedicata agli attuali HBT SiGe, illustrandone i criteri di progetto attraverso esempi di simulazione numerica.

## 2. Eterostrutture

Quando si realizza un contatto tra semiconduttori diversi, aventi cioè diverso valore dell'intervallo di banda proibita, si parla di eterostrutture o eterogiunzioni.

La diversità dell'intervallo di banda proibita comporta, in condizioni di equilibrio termico, la formazione di particolari profili della banda di conduzione e della banda di valenza, che possono essere utilizzati per la fabbricazione di dispositivi elettronici ed optoelettronici dalle prestazioni

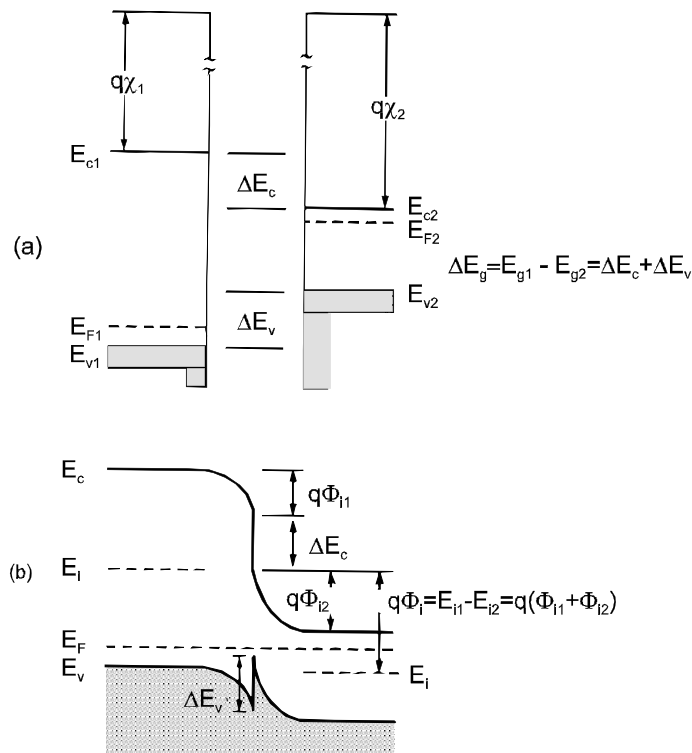


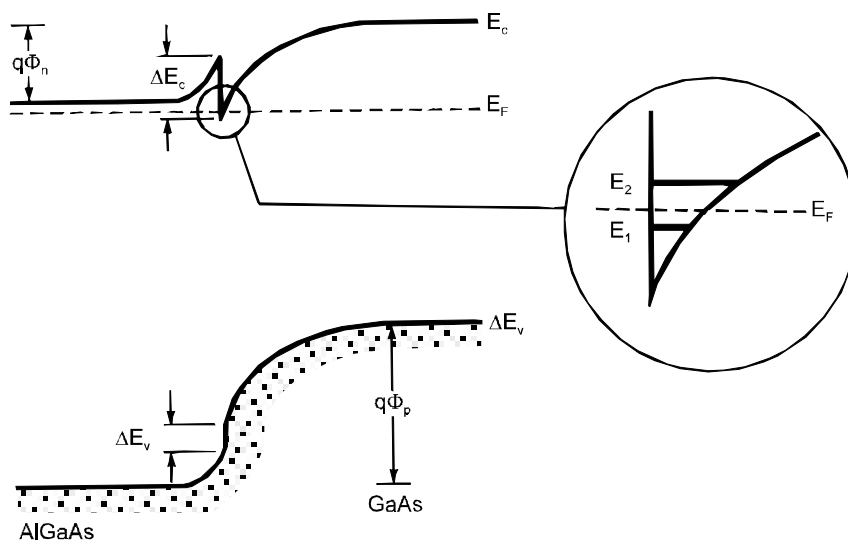
Figura 1. Diagramma a bande di energia in condizioni di equilibrio di una eterogiunzione ideale: (a) prima di realizzare la giunzione; (b) dopo aver realizzato la giunzione

Peraltro l'ipotesi di idealità dell'eterogiunzione consiste nell'aver assunto che all'interfaccia tra i due semiconduttori diversi vi sia un numero trascurabile di trappole e di centri di generazione-ricombinazione. Tale ipotesi, in realtà, è verificata solo per eterogiunzioni costituite da semiconduttori aventi costanti reticolari di valore molto vicino tra di loro. Inoltre, indicando con  $\Delta E_g$  la differenza tra gli intervalli di banda proibita, risulta:

$$\Delta E_v = \Delta E_g - \Delta E_c.$$

Come si evince dalla Fig. 1, la barriera di potenziale che gli elettroni devono superare per trasferirsi dalla regione n alla regione p è differente da quella che devono superare le lacune per muoversi dalla regione p alla regione n attraverso la giunzione. Questa è un'altra importante proprietà delle eterostrutture che consente di realizzare differenti proprietà di iniezione per gli elettroni e per le lacune e viene utilizzata per realizzare transistori bipolari ad eterostruttura, noti con l'acronimo di HBT (Heterojunction Bipolar Transistor).

Un esempio particolarmente importante di eterogiunzione è riportato in Fig. 2, in cui uno strato di  $Al_xGa_{1-x}As$  pesantemente drogato viene accresciuto su uno strato quasi intrinseco di GaAs.



*Figura 2. Diagramma a bande di energia all'equilibrio termico di una eterogiunzione costituita da uno strato di  $Al_xGa_{1-x}As$  pesantemente drogato accresciuto su uno strato intrinseco di GaAs*

Il particolare profilo delle bande di conduzione e di valenza che si determina comporta che gli elettroni diffondano dal semiconduttore  $Al_xGa_{1-x}As$  al GaAs, dove vengono intrappolati in una buca di potenziale, formando un gas bidimensionale di elettroni disponibili per la conduzione. Ne consegue che il livello di Fermi all'interfaccia della eterostruttura è al di sopra del livello energetico della banda di conduzione.

Gli elettroni possono scorrere parallelamente all'interfaccia della eterogiunzione con valori di mobilità che si avvicinano molto a quelli che si hanno nel GaAs intrinseco. Infatti, essendo lo strato di GaAs quasi intrinseco, la mobilità dipende quasi esclusivamente dalla diffusione reticolare. In corrispondenza delle basse temperature, in cui lo scattering con il reticolo è molto basso, si possono raggiungere valori di mobilità particolarmente elevati. Questa importante proprietà delle eterogiunzioni viene utilizzata per fabbricare FET dalle prestazioni eccellenti in frequenza ed a basso rumore, noti come HEMT (High Electron Mobility Transistor).

Se la buca di potenziale, poi, è particolarmente stretta gli elettroni occupano livelli energetici discreti come in un pozzo quantico. Tale caratteristica rende di primaria importanza effetti quantistici come l'effetto tunnel e le frequenze di emissione e/o assorbimento di fotoni nei dispositivi ad eterostruttura, soprattutto in quei dispositivi per applicazioni optoelettroniche, il cui meccanismo fisico di funzionamento risulta talvolta particolarmente complesso.

### 3. Principali dispositivi elettronici ad eterostruttura

Una categoria di transistori bipolari molto promettente e stimolante ai fini della ricerca è la categoria dei transistori bipolari ad eterogiunzione, noti con l'acronimo HBT, inizialmente fabbricati in GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As.

Dopo il successo dei transistori bipolari ad omogiunzione in Si negli anni '60, si sarebbe potuto prevedere un analogo successo per quelli realizzati in GaAs a causa soprattutto dell'elevata mobilità degli elettroni in questo materiale.

Ciò però non è avvenuto per i seguenti motivi:

- la difficoltà tecnologica di diffondere in GaAs atomi droganti e quindi di realizzare giunzioni p-n: per questo si è dovuto attendere lo sviluppo delle tecniche epitassiali;
- il basso valore del tempo di vita medio dei portatori minoritari;
- la difficoltà di diminuire il tempo di transito dei portatori minoritari nella base, che avrebbe implicato una riduzione dello spessore della base con conseguente aumento degli effetti del second'ordine. Inoltre, c'è un limite oltre il quale la lunghezza della regione di base non può essere ridotta, perchè le regioni di svuotamento associate alle due giunzioni base-emettitore e base-collettore verrebbero a contatto rendendo la base praticamente intrinseca con conseguente aumento della resistenza di base e degradazione delle prestazioni in frequenza;
- la difficoltà di ottenere elevate efficienze di emettitore. Infatti, come è noto, l'efficienza di emettitore dipende

sensibilmente dalla corrente di lacune (per un n-p-n), che va dalla base verso l'emettitore. Pertanto, al fine di ottenere elevate prestazioni in termini di guadagno di corrente è necessario, in un BJT ad omogiunzione, drogare fortemente l'emettitore e leggermente la base. Tuttavia un basso drogaggio in base comporta un valore elevato della resistenza di base, fattore che influisce negativamente sulle prestazioni del dispositivo. D'altra parte drogare pesantemente la base comporterebbe sì una riduzione della resistenza di base ma anche una diminuzione della efficienza di emettitore, come si è già detto, ed un aumento delle capacità associate alle giunzioni base-emettitore e base-collettore, con conseguenze negative sulle prestazioni in frequenza del dispositivo.

Per compensare queste opposte specifiche, si è ricorsi alla fabbricazione di **transistori bipolari ad eterostruttura (HBT)**, le cui prestazioni dipendono non solo dal drogaggio, ma anche dal valore dell'intervallo di banda proibita dei semiconduttori, che costituiscono l'eterostruttura.

In particolare l'impiego di eterogiunzioni consente di avere i seguenti tre fondamentali vantaggi:

a) riduzione della iniezione di lacune nell'emettitore, ottenuta realizzando l'emettitore con un semiconduttore avente intervallo di banda proibita maggiore di quello con cui si realizza la base. Difatti, poichè l'iniezione di portatori attraverso una giunzione varia esponenzialmente con l'altezza della barriera di potenziale che devono superare, una differenza, anche piccola, tra le barriere di potenziale di elettroni e di lacune, comporta una notevole differenza nelle rispettive correnti. Con buona approssimazione possiamo ritenere che le suddette correnti stiano tra loro nel seguente rapporto:

$$\frac{I_n}{I_p} \propto \frac{N_D}{N_A} e^{\frac{\Delta E_g}{kT}}$$

Pertanto la dipendenza esponenziale da  $\Delta E_g$  (differenza tra gli intervalli di banda proibita in una eterogiunzione) rende quasi trascurabile la dipendenza del rapporto  $\frac{I_n}{I_p}$  dai livelli di drogaggio.

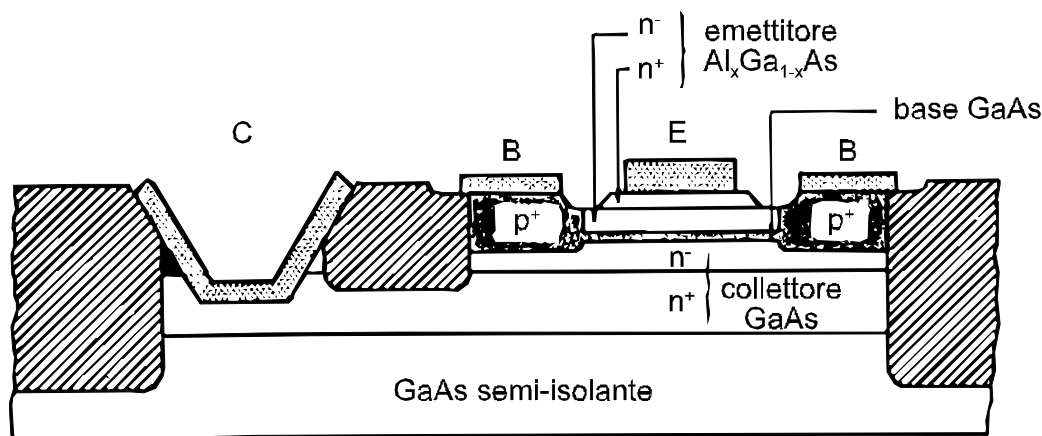
Questo permette di scegliere un elevato drogaggio di base, per ridurre la resistenza di base, e un relativamente basso drogaggio per l'emettitore, per diminuire la capacità della giunzione base-emettitore, ottenendo così elevate prestazioni in frequenza del dispositivo, senza inficiare l'efficienza di emettitore;

b) attraversamento "quasi balistico" della base da parte degli elettroni, ottenuto modulando la composizione ed il drogaggio della base, ossia realizzando la base con una serie di eterogiunzioni. In tal modo si produce un campo elettrico in base che agevola il movimento

di diffusione degli elettroni aumentandone la velocità di attraversamento;

c) riduzione della resistenza di base, ottenuta attraverso un elevato drogaggio o addirittura con una base più drogata dell'emettitore. Ciò non influisce negativamente sull'efficienza di emettitore, come si è già detto al punto a) nè modifica in modo significativo la corrente di ricombinazione di elettroni nella base neutra, se questi attraversano la base con velocità notevole (punto b).

Nella Fig. 3 è riportata la sezione trasversale di un transistor bipolare ad eterostruttura, il cui emettitore è costituito da AlGaAs di tipo n, la base da GaAs di tipo p ed il collettore da GaAs di tipo n. Questi strati di semiconduttore sono tutti accresciuti epitassialmente su un substrato di GaAs intrinseco.



I materiali generalmente usati per fabbricare HBT, oltre l'AlGaAs/GaAs, sono anche l'InGaAs/InP e l'InGaAsP/InP.

Il composto  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  è caratterizzato da una ricombinazione superficiale molto inferiore a quella del GaAs ed una separazione tra le valli  $\Gamma$ -L ed  $\Gamma$ -X molto maggiore del GaAs. La minore ricombinazione superficiale riduce le perdite di elettroni iniettati alla superficie del dispositivo, effetto questo particolarmente importante nei dispositivi a geometria piccola, in cui il rapporto tra perimetro ed area della regione di base è grande.

Inoltre la maggiore separazione tra le valli nel InGaAs garantisce una maggiore permanenza degli elettroni nella valle  $\Gamma$ , in cui presentano minore massa efficace e quindi maggiore mobilità.

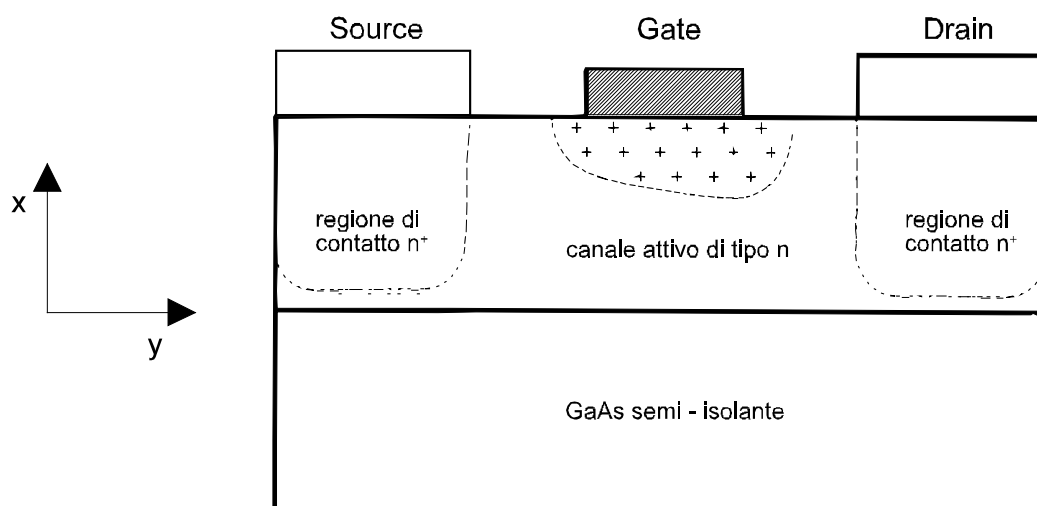
È possibile fabbricare HBT anche utilizzando eterogiunzioni basate sul sistema  $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , in cui la differenza di banda proibita tra il Si (con cui si fabbrica l'emettitore ed il collettore, entrambi di tipo n) ed il  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  (con cui si realizza la base di tipo p) la si ritrova come discontinuità nella banda di valenza. Ne consegue che una piccola aggiunta di atomi di Ge nella base implica una maggiore efficienza nella iniezione degli elettroni rispetto ai BJT ad omogiunzione in Si.

Il MESFET, acronimo di *Metal Semiconductor Field Effect Transistor*, è un transistor ad effetto di campo metallo-semiconduttore, proposto la prima volta nel 1966.

Figura 3. Sezione trasversale di un HBT. Gli strati n+ dell'emettitore e del collettore servono per la realizzazione dei contatti ohmici di tipo tunnel. La metallizzazione di collettore è posta lateralmente. Zona tratteggiata: isolante impiantato; zona punteggiata: metallizzazioni

I MESFET vengono tipicamente impiegati nei circuiti integrati ad alta velocità ed a larga banda, in quanto essi possono essere realizzati con semiconduttori composti III-V, quali l'arseniuro di gallio e il fosforo di indio, nei quali, come abbiamo già detto, sono elevate sia la mobilità degli elettroni che la velocità di saturazione, fattori che permettono di aumentare la frequenza di taglio.

In Fig. 4 è riportata la sezione trasversale di un MESFET



Essenzialmente il MESFET in GaAs consiste di uno strato di arseniuro di gallio drogato n, detto *canale*, che è la zona attiva, accresciuto su un substrato semiisolante in GaAs intrinseco.

Perché il funzionamento sia ad effetto di campo sono necessari i contatti di source e drain, S e D, di tipo ohmico, sul canale ed il contatto di gate, G, che è di tipo Schottky.

I MESFET sono oggi impiegati sia come dispositivi discreti (di potenza o a basso rumore) sia come elementi attivi dei circuiti integrati a microonde (frequenza di taglio di circa 150 GHz).

Dal punto di vista tecnologico i MESFET possono essere realizzati con tecnologia epitassiale, impiantata o mista.

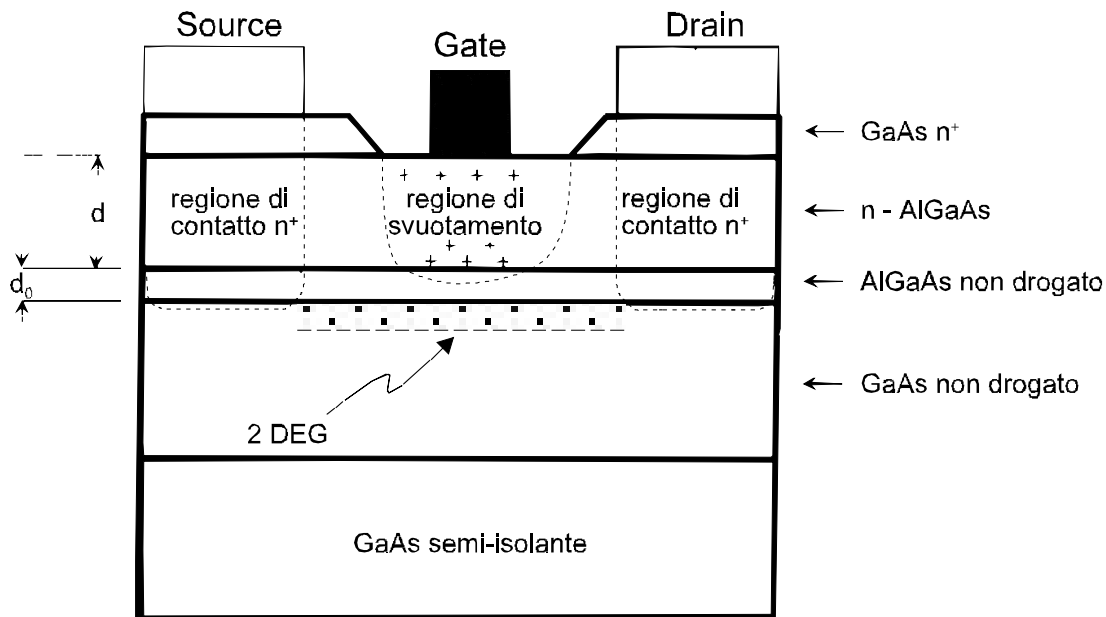
Nell'HEMT gli elettroni si muovono in una buca di potenziale nel GaAs teoricamente intrinseco, acquisendo una mobilità ed una velocità maggiori che nel GaAs drogato in quanto non soggetti a scattering con atomi donori ionizzati. Infatti i portatori di carica sono confinati in una regione quasi bidimensionale (2-DEG) con uno spessore dell'ordine dei 100 Å.

Per le applicazioni nel campo della elettronica a larga banda, la proprietà più interessante è il basso rumore. In corrispondenza di particolari frequenze di funzionamento gli HEMT consentono di ottenere una cifra di rumore minore del guadagno.

In Fig. 5 è rappresentata in modo schematico la struttura dell'HEMT, che risulta notevolmente più complessa di quella del MESFET e quindi comporta costi di realizzazione notevolmente

Figura 4. Sezione trasversale di un MESFET.

superiori. Peraltro l'HEMT fornisce prestazioni globalmente migliori di quelle fornite dal MESFET.



Oltre alla già citata eterogiunzione in AlGaAs/GaAs, molte sono le possibili soluzioni per la realizzazione di HEMT.

Un promettente candidato quale sostituto del già citato  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  si è rivelato il  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ : si parla in particolare di dispositivi elettronici basati sull'eterostruttura  $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}/\text{GaAs}$ , che permette di ottenere contatti di tipo Schottky di elevata qualità grazie ad un alto valore di  $E_g$ , pari a 1.92eV. Peraltro l'assenza di alluminio in siffatte strutture permette di evitare problemi relativi all'ossidazione superficiale. Rispetto all' $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ , inoltre, l' $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$  mostra alle basse temperature una quantità trascurabile di **DX centers**, centri di cattura e rilascio elettronico (di cui si parlerà più avanti) che, causano una modulazione delle tensione di soglia, con conseguente degradazione della transconduttanza. Tuttavia, per basse frequenze di funzionamento, queste particolari eterogiunzioni sono affette da fenomeni di dispersione.

Recentemente sono stati sviluppati HEMT basati su strutture del tipo  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  (con  $x$  compreso tipicamente tra 0.15 e 0.30), in virtù dell'elevata potenzialità di tali materiali nelle applicazioni ad alta potenza, alta frequenza ed elevate temperature. Per questi transistori si è osservata una migliore resa in associazione a substrati in SiC, che esibiscono una maggiore conduttività termica (4.5 W/cmK) rispetto allo zaffiro, ottimizzando, così, le prestazioni del dispositivo dal punto di vista degli effetti termici. Tuttavia gli elevati costi del suddetto materiale ne ostacolano la produzione di massa.

Apportando migliorie alle prestazioni ottenibili da una tipica struttura AlGaAs/GaAs, è stata implementata una nuova eterogiunzione a seguito dell'introduzione di una percentuale di indio,

Figura 5. Struttura schematica dell'HEMT.



realizzando, così, il canale con un composto di In e GaAs (InGaAs). Tale materiale presenta una velocità di saturazione elettronica più elevata rispetto a quella del GaAs ed un salto energetico relativo al confinamento degli elettroni sensibilmente più elevato.

In tali dispositivi, detti **HEMT pseudomorfici (p-HEMT)** si ottengono valori di transconduttanza maggiori e più elevati limiti in frequenza, che possono essere ulteriormente potenziati utilizzando substrati di InP, consentendo in tal modo un migliore adattamento reticolare all'interfaccia di conduzione. Allo stato attuale gli HEMT pseudomorfici realizzati su substrato di InP risultano essere i dispositivi attivi aventi le migliori caratteristiche di basso rumore con elevato guadagno associato e alta frequenza di funzionamento (fino a circa 400 GHz).

Un'ulteriore miglioria alle caratteristiche dei dispositivi in Si, è ottenibile attraverso le **leghe di Si-Ge**, studiate sin dai primi anni '80.

L'impiego del Ge nel Si presenta una serie di conseguenze. Innanzitutto, poiché il Ge possiede una costante reticolare maggiore di quella del Si, il bandgap di energia del Ge risulta più piccolo di quello del Si (0.66eV per il Ge, 1.12eV per il Si) e pertanto la lega SiGe ha un bandgap minore di quello del Si, rendendolo un ottimo candidato per la cosiddetta **ingegneria del bandgap (bandgap engineering)**. La deformazione per compressione associata ai composti in SiGe produce una variazione addizionale del bandgap che ne porta ad un'ulteriore riduzione di circa 75 meV per ogni 10% di Ge introdotto.

Poiché un film di SiGe deve essere molto sottile affinché possa restare stabile e dunque privo di difetti, è certamente un naturale candidato per realizzare la regione di base di un transistor bipolare (che deve essere sottile per il funzionamento ad alta frequenza). Il dispositivo risultante è costituito da una eterogiunzione emettitore-base (n-Si/p-SiGe) e un'eterogiunzione base-collettore (p-SiGe/n-Si).

Il **SiGe HBT** rappresenta il primo transistor basato sul bandgap engineering nel sistema silicio.

Attualmente vi è una forte domanda di HBT SiGe nell'area dei circuiti integrati monolitici a base di silicio per microonde, essenzialmente a causa delle loro superiori prestazioni alle alte frequenze, ed il basso costo rispetto ai prodotti in GaAs o InP.

Inoltre gli HBT SiGe possono essere facilmente integrati con i transistori CMOS in Si per formare la tecnologia monolitica SiGe HBT BiCMOS, che rappresenta certamente il futuro dei SiGe HBT, poiché essa consente l'implementazione di soluzioni system-on-chip su un'ampia base di mercato per applicazioni wireless ad un costo decisamente accettabile.

#### 4. Esempio di progetto con relative simulazioni circuitali

In questo paragrafo, con riferimento al **NPN Silicon Germanium RF Transistor BFP640** (Edition 2015-03-13, published by Infineon Technologies AG 81726, Munich), esaminiamo dapprima il progetto di un amplificatore, ottenuto tramite il noto simulatore circuitale PSPICE.

Abbiamo fatto riferimento alle equazioni di Gummel-Poon, opportunamente adattate all'HBT SiGe BFP640, e il modello implementato è caratterizzato dalle seguenti linee di programma:

```
.model HBT NPN( IS=0.22f VAF=1000 NE=2 VAR=2 NC=1.8
RBM=2.707 CJE=227.6f TF=1.8p ITF=0.4 VJC=0.6 TR=0.2n MJS=0.27
XTI=3 AF=2 BF=450 IKF=0.15 BR=55 IKR=3.8m RB=3.129 RE=0.6 VJE=0.8
XTF=10 PTF=0 MJC=0.5 CJS=93.4f XTB=-1.42 FC=0.8 KF=7.291E-11
NF=1.025 ISE=21f NR=1 ISC=400f IRB=1.522m RC=3.061 MJE=0.3
VTF=1.5 CJC=67.43f XCJC=1 VJS=0.6 EG=1.078 TNOM=298)
```

Nella Fig. 6a) è illustrato lo schema circuitale dell'amplificatore progettato con l'identificazione del punto di polarizzazione (Fig. 6b) e dei valori delle correnti fluenti nei vari rami (Fig. 6c).

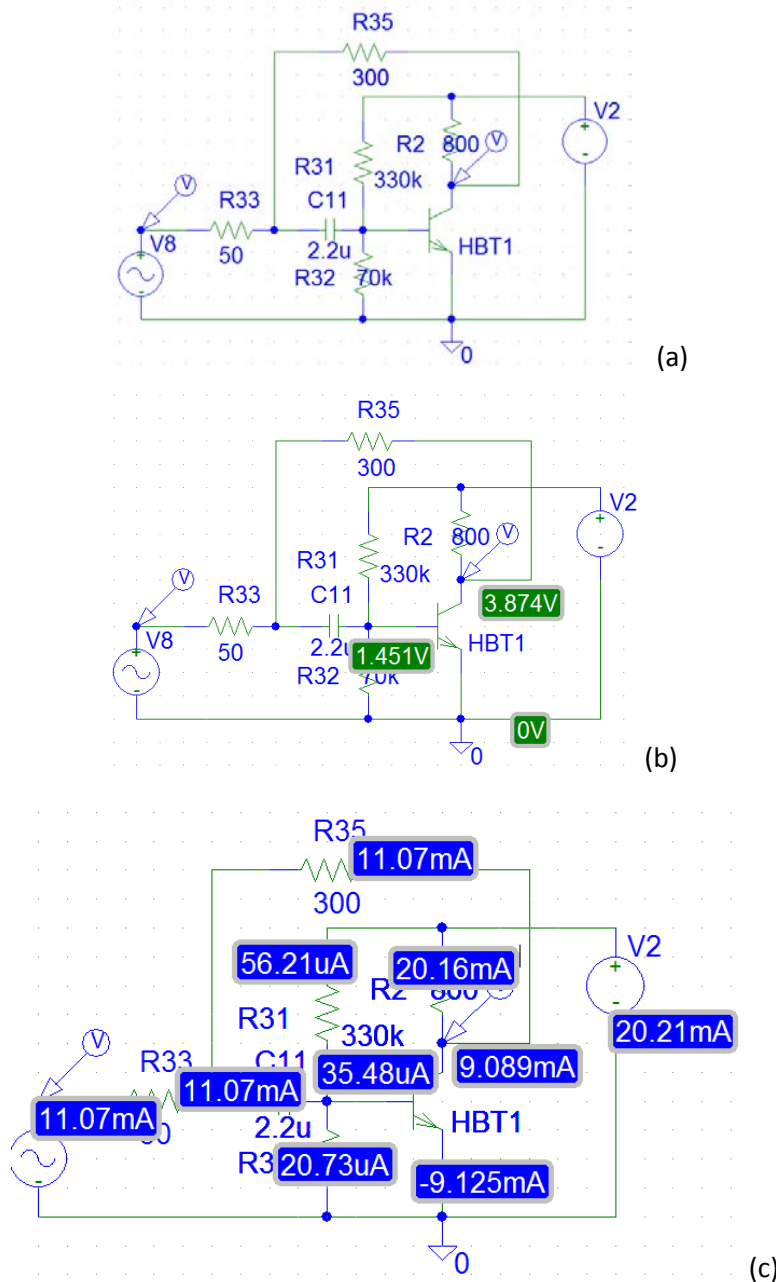
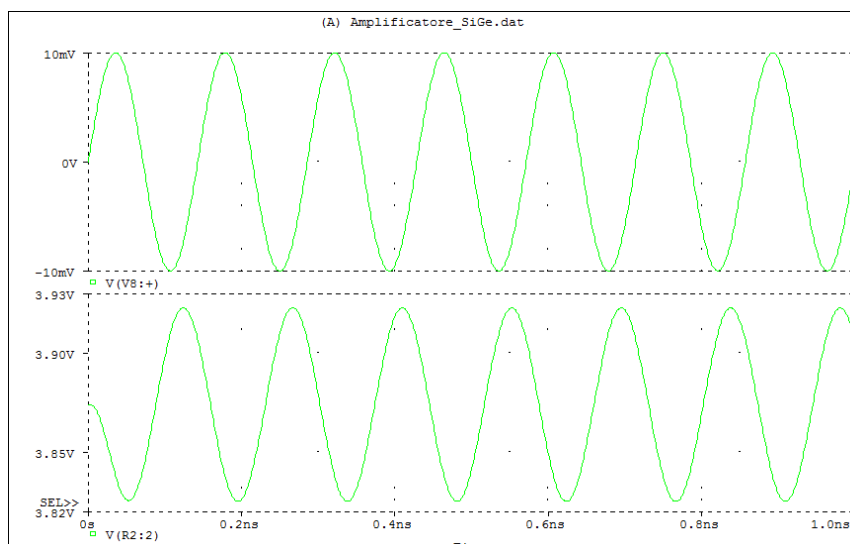
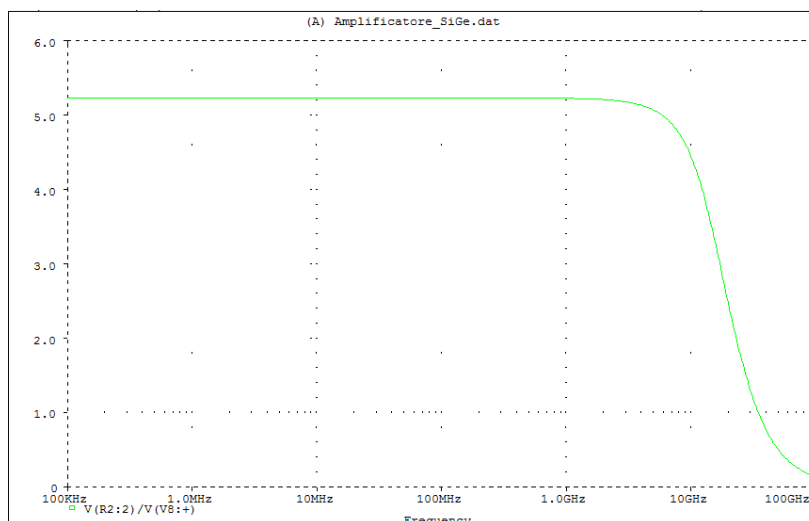


Figura 6 a-b-c. Figura schematica dell'HBT

I risultati della simulazione dell'amplificatore progettato sono riportati nelle Figg. 7 e 8.



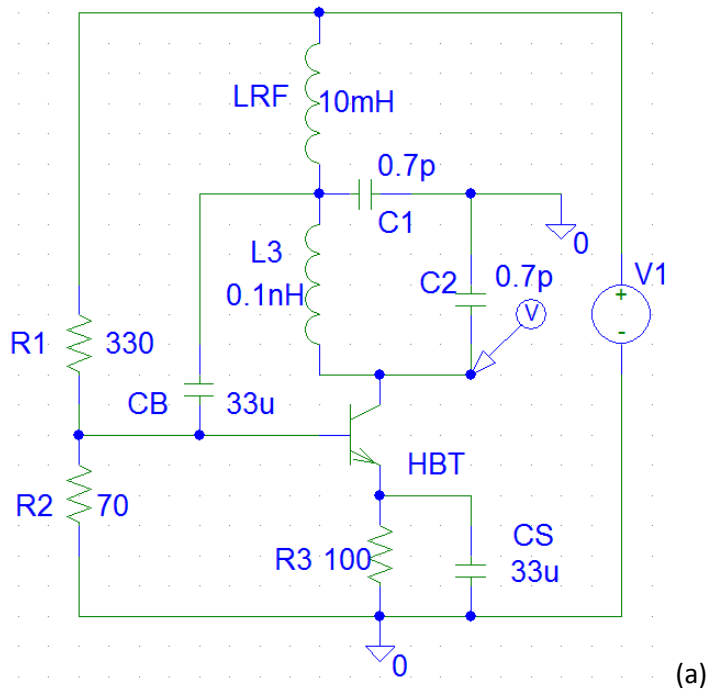
Il secondo esempio proposto è il progetto di un oscillatore Colpitts con *HBT SiGe*.

Come è noto, l'oscillatore Colpitts fa parte della categoria degli oscillatori a 3 punti, che sfruttano un singolo transistor in connessione invertente. La rete di retroazione viene realizzata per mezzo di 3 reattanze: X1 tra ingresso e massa, X2 tra uscita e massa e X3 tra ingresso e uscita.

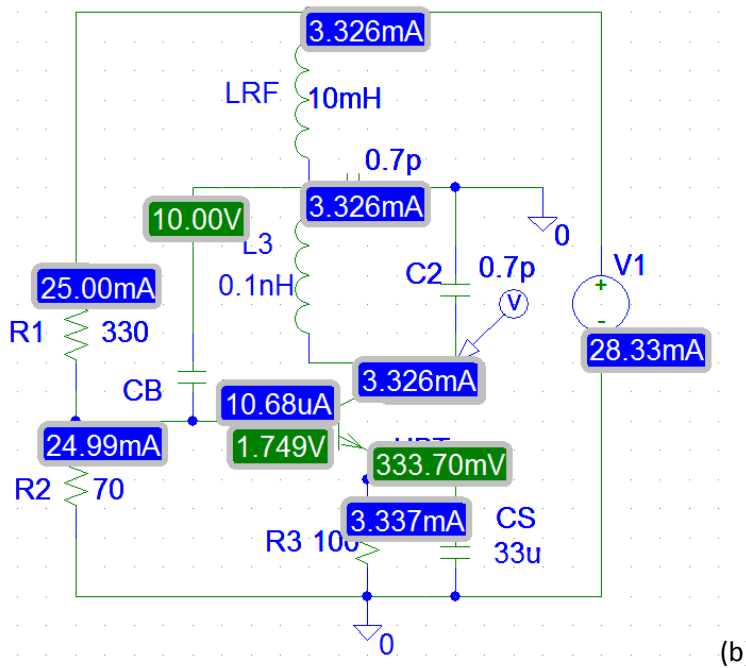
Si può dimostrare che affinché il circuito oscilli le reattanze X1 e X2 devono essere dello stesso tipo, mentre X3 deve essere diverso. In particolare, nella configurazione Colpitts X1 e X2 sono reattanze capacitive, mentre X3 è una reattanza induttiva.

In Fig. 9a) è mostrato lo schema circuitale dell'oscillatore Colpitts progettato, mentre in Fig. 9b) sono indicati i valori di corrente nei vari rami del circuito in condizione di polarizzazione.

Figura 7. Analisi AC.  
 Figura 8. Analisi in transitorio, avendo supposto un segnale d'ingresso avente frequenza di 7 GHz



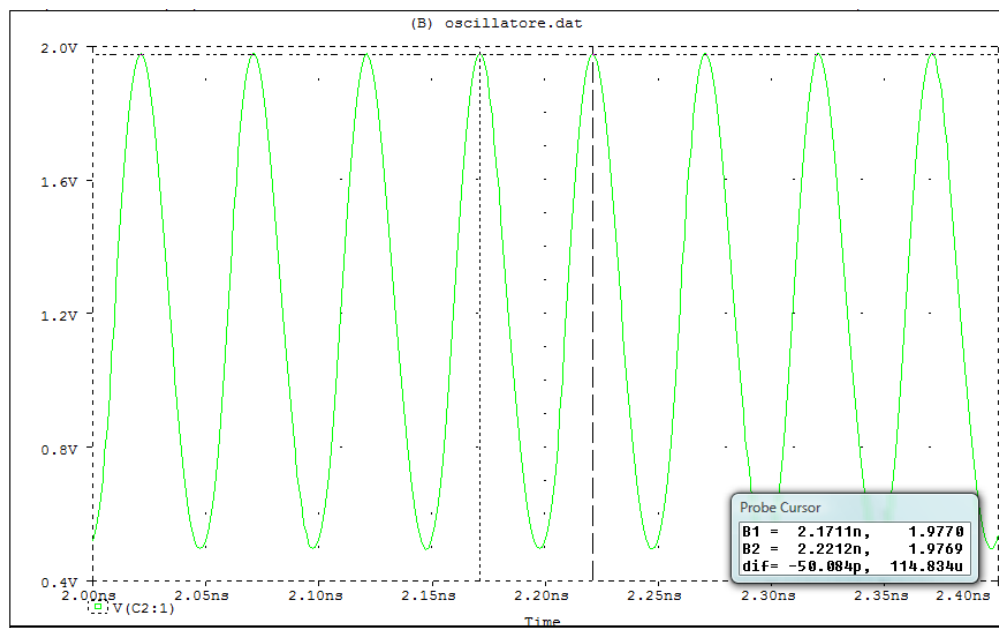
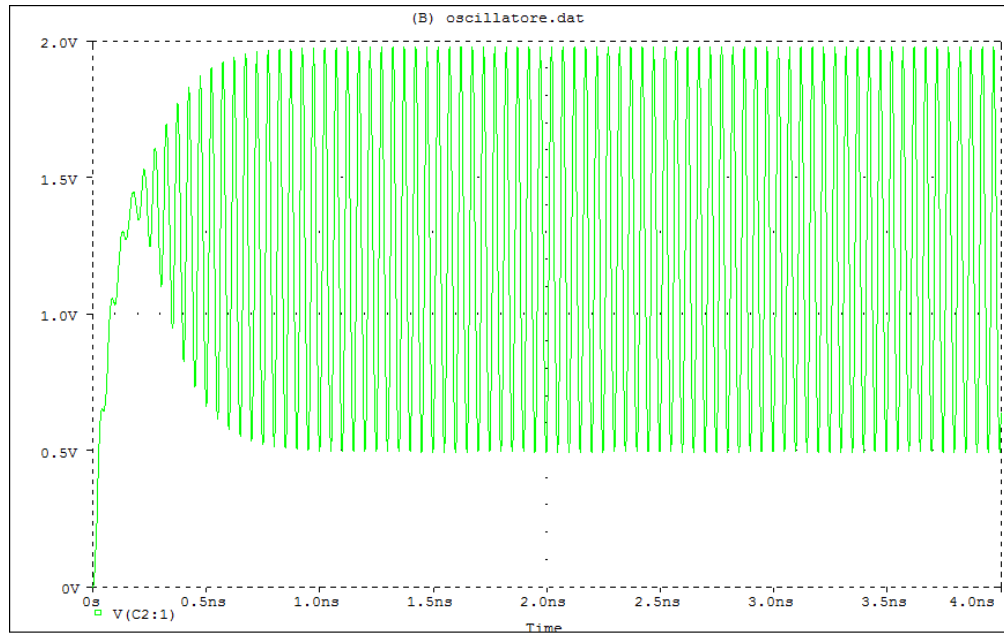
(a)



(b)

I risultati della simulazione dell'amplificatore progettato sono riportati nella Fig. 10. In particolare la Fig. 10a) mostra l'andamento della tensione di uscita in funzione del tempo, mentre nella Fig. 10b) lo stesso ma in un intervallo di tempo compreso tra 2 ns e 2.40 ns.

Figura 9a - b. Progetto di un oscillatore Colpitts con HBT SiGe BFP640.



Inoltre la Fig. 10b) ci permette di valutare facilmente la frequenza di oscillazione, pari a 20 GHz.

*Figura 10 a-b. Andamento della tensione di uscita vs tempo*

## 5. Conclusioni

La spinta sempre più crescente verso l'elettronica per alte frequenze ha reso necessario lo studio e la progettazione di nuovi dispositivi elettronici a semiconduttore, basati su etero strutture.

Pur continuando ad essere il silicio il semiconduttore più largamente utilizzato in elettronica, si stanno affermando nel campo dell'elettronica per alte frequenze, i semiconduttori composti III - V, quali, ad esempio, l'Arseniuro di Gallio o il Fosforo di Indio, e loro leghe.

Attualmente un ulteriore miglioria alle caratteristiche dei dispositivi in Si, è ottenibile attraverso l'impiego di Ge nel Si.

In questo articolo, dopo una rapida descrizione dei principi fisici relativi alle eterostrutture, abbiamo analizzato i principali dispositivi a etero giunzione, quali HBT, MESFET ed HEMT.

Particolare attenzione è stata dedicata agli attuali HBT SiGe, illustrandone i criteri di progetto attraverso esempi di simulazione numerica.

### **Bibliografia e webgrafica di riferimento**

- [1] A. G. Perri: "Fondamenti di Dispositivi Elettronici"; Ed. Progedit, II Edizione, 2016, ISBN 978-88-6194-080-2.
- [2] A. G. Perri: "Dispositivi Elettronici Avanzati"; Ed. Progedit, II edizione, 2016, ISBN 978-88-6194-081-9.
- [3] Shao, Rui-Wen, K. Zheng, B. Wei, Y. Zhang, Y. Li, X. Han, Z. Zhang e J. Zou. "Bandgap Engineering and Manipulating Electronic and Optical Properties of ZnO Nanowires by Uniaxial Strain." *Nanoscale*, n. 9, pp. 4936–941, 2014,  
<http://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2014/nr/c4nr00059e>  
<http://physicsnet.co.uk/a-level-physics-as-a2/materials/stress-strain/www.infineon.com> (2015).
- 4] A. G. Perri: "Fondamenti di Elettronica"; Ed. Progedit, 2009, ISBN 978-88-6194-045-1.

---

**Roberto Marani**, nato a Trani il 27 marzo 1985, ha conseguito la Laurea Specialistica in Ingegneria Elettronica l'8 ottobre 2008, con la votazione di 110/110 e lode, presso il Politecnico di Bari.

Dal 1° gennaio 2009 al 31 dicembre 2011 ha frequentato il corso di Dottorato di Ricerca presso il Dipartimento di Elettrotecnica ed Elettronica del Politecnico di Bari, conseguendo il titolo di Dottore di Ricerca. Nel dicembre 2009 è risultato vincitore della borsa di studio "Piccoli scienziati nel PoliBA" nell'ambito del Progetto Arianna per l'attività di ricerca svolta.

Dal marzo 2010 ad ottobre 2012 ha collaborato con il gruppo di Nanofotonica ed Elettromagnetismo (*nanoPhotonics and Electromagnetics Group, nPEG*), coordinato dalla Prof. A. D'Orazio del Politecnico di Bari, occupandosi di metodi numerici per l'elettromagnetismo e di strutture plasmoniche per applicazioni nei campi della biosensoristica, delle energie rinnovabili e delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT).

Dal Febbraio 2011 ad Ottobre 2011 ha svolto un periodo di formazione nell'ambito del corso di Dottorato di Ricerca presso il Departamento de Física Teórica de la Materia Condensada dell'Universidad Autónoma de Madrid, Spagna, dove ha svolto attività di ricerca relativa all'analisi e al progetto di sistemi risonanti attivi sotto la guida del Prof. Francisco J. García-Vidal.

Attualmente è Ricercatore III livello del CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche), sede di Bari.

Il Dr. Marani è autore e co-autore di oltre 100 articoli, apparsi su Riviste Internazionali e presentati a Congressi Internazionali.

**Anna Gina Perri** è Professore Ordinario di Elettronica presso il Politecnico di Bari, dove insegna Fondamenti di Dispositivi Elettronici e Dispositivi Elettronici Avanzati nell'ambito dei corsi di Laurea in Ingegneria Elettronica e delle Telecomunicazioni e Laurea Magistrale in Ingegneria Elettronica, rispettivamente.

I suoi interessi scientifici hanno riguardato lo studio e progetto di sistemi ottici di telecomunicazioni, il progetto automatico di amplificatori a microonde a basso rumore, il "modelling" dei dispositivi elettronici e la caratterizzazione degli effetti termici, lo studio di dispositivi optoelettronici basati su strutture PBG (Photonic BandGap) ed il progetto di microrisonatori su PBG per acceleratori di particelle in adroterapia dei tumori. Attualmente è impegnata nello studio e caratterizzazione di dispositivi elettronici nanometrici, FET su nanotubi di carbonio, dispositivi quantistici e per il quantum computing. Dal 2000 la Prof. Perri, in qualità di consulente, collabora con l'ALENIA SPAZIO di Roma.

E' Revisore di prestigiose Riviste Internazionali quali IEEE Transaction on Electron Devices, IEEE Transaction on Microwave and Wireless Components Letters, Solid State Electronics, IEEE Electronic Letters e Current Nanoscience.

E' la Responsabile Scientifica del Laboratorio di Ricerca di "Dispositivi Elettronici" presso il Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione del Politecnico di Bari.

E' autrice di 9 libri riguardanti la teoria, le applicazioni, il progetto automatico di dispositivi micro e nanoelettronici e di circuiti integrati per la microelettronica, di 2 libri internazionali e di circa 250 articoli, apparsi su riviste internazionali e presentati a Congressi Internazionali.