

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

Laurea Triennale
in Ingegneria Informatica e dell'Automazione

Transistor basati su Nanotubi di Carbonio: prospettive per l'innovazione tecnologica

Transistors based on Carbon Nanotubes: perspectives on technological innovation

Relatore:

Prof: Mencarelli Davide

Candidato:

Sasu Riccardo Gabriele

ANNO ACCADEMICO 2022/2023

Indice

Introduzione **5**

1 Teoria **7**
1.1 Grafene 7
1.2 Nanotubi di carbonio 8
1.3 Transistor a nanotubi 9
1.4 Tecnologia e Materiali 10

2 Software di simulazione **11**
2.1 COMSOL Multiphysics® 11
2.2 MATLAB® 13
2.3 Ciclo di funzionamento 13

3 Modelli Matematici **17**
3.1 Equazione di Schrödinger 17
3.2 Poisson - Equazione dell'Elettrostatica 20

4 Risultati **23**
4.1 Modello 23
4.2 Geometria costante con Vg a 0.2V - 0.4V - 0.6V 26
4.3 Vgs e CNT costanti, varia lughezza Gate 30
4.4 Lunghezza Gate costante, varia CNT e Vgs 32

Conclusioni **35**

Bibliografia **37**

Introduzione

I transistor sono componenti fondamentali nell'elettronica moderna, utilizzati per amplificare o commutare segnali elettronici, sono dispositivi a semiconduttore pilotati dalla tensione che possono controllare un flusso di corrente elettrica [1]. Nel corso degli anni, essi hanno subito numerosi sviluppi, tra cui la miniaturizzazione e l'aumento del loro numero integrati in un singolo chip. Questo progresso è stato guidato dalla *legge di Moore*, che prevede che il numero di transistor in un circuito integrato raddoppierà ogni due anni.[2] L'introduzione del transistor è comunemente considerata una delle invenzioni più importanti nella storia dell'uomo.

Oggi, sono alla base di una vasta gamma di dispositivi, con l'avanzare della tecnologia e l'aumento della domanda di dispositivi più piccoli e più efficienti dal punto di vista energetico, c'è un crescente interesse per lo sviluppo dei transistor a nanotubo di carbonio (CNTFET). Questi dispositivi utilizzano un singolo nanotubo di carbonio o un array di nanotubi di carbonio come materiale del canale, invece del silicio utilizzato nella struttura tradizionale dei MOSFET[3]. I CNTFET sono più efficienti rispetto ai transistor al silicio e potrebbero essere utilizzati per costruire nuovi tipi di microprocessori tridimensionali [4].

Questa tesi si concentra sulla simulazione di un transistor utilizzando COMSOL Multiphysics e MATLAB in simultanea. L'obiettivo è progettare un transistor che possa essere integrato in un generico dispositivo elettronico. La simulazione consente di esplorare più scenari al variare di parametri del transistor. L'utilizzo dei due software in simultanea permette di sfruttare i punti di forza di entrambi gli strumenti. COMSOL è un potente strumento per la simulazione multiphysics che può modellare accuratamente il comportamento dei transistor, in particolare risolvere anche l'equazione di Poisson per il calcolo del potenziale e di Schrödinger, necessaria per tenere conto degli effetti della meccanica quantistica.[5].

Il tutto sotto l'ipotesi che il mezzo sia senza perdite; i risultati della simulazione possono fornire preziose intuizioni sul comportamento del transistor con un nanotubo in fibra di carbonio, che possono poi essere utilizzate per ottimizzare ulteriormente una eventuale realizzazione. Attraverso questo lavoro, ci si augura di contribuire alla continua evoluzione della tecnologia dei semiconduttori.

Capitolo 1

Teoria

In questo capitolo, esamineremo attentamente le caratteristiche e le proprietà dei nanotubi in carbonio (CNT) dal punto di vista dell'utilizzo e della chiralità (del nanotubo). Tuttavia, non ci limiteremo solamente all'analisi dei nanotubi stessi: esploreremo anche i materiali che compongono il transistor, semiconduttori a bassa conducibilità elettrica. Questo è cruciale nella progettazione dei transistor a nanotubi di carbonio (CNTFET) e influisce direttamente sulle loro prestazioni e sulle applicazioni in cui possono essere impiegati.

1.1 Grafene

Il grafene è una forma allotropica del carbonio, nello specifico, i suoi atomi assumono una particolare conformazione esagonale disposti su un unico strato dando vita ad un tessuto bidimensionale; tra le prime proprietà che discendono da quanto sopra sono la sottiliezza del materiale. Nella Figura 1.1, a sinistra vi è un'immagine che lo raffigura. Nonostante il suo spessore infinitesimo, recenti studi hanno dimostrato una incredibile *resistenza meccanica* del grafene [6]; è in grado di sopportare elevate tensioni senza scindersi.

La caratteristica ancor più interessante, sulla quale verte l'interesse del mondo industriale e in particolare la trattazione di tutta la tesi è la sua l'elevata *conducibilità elettrica*, ad oggi è fra i migliori conduttori conosciuti.

È interessante sottolineare che questa straordinaria conduttività sfida il principio di linearità della *legge di Ohm*, richiedendo l'adozione di ulteriori teorie per comprendere a pieno quale quella di *Schrödinger* sulla probabilità in un dato istante di tempo di trovare o meno una particella in una posizione, questa osservazione è alla base degli strumenti di calcolo che saranno utilizzati.

Attraverso il processo di arrotolamento dei fogli di grafene, si creano strutture tubolari note come nanotubi di carbonio.

1.2 Nanotubi di carbonio

I nanotubi di carbonio sono strutture tubolari con un diametro nell'ordine dei nanometri. Sono uno degli allotropi del carbonio. Esistono diversi tipi di nanotubi di carbonio, che possono essere suddivisi in due categorie principali:

- Nanotubi a parete singola (SWCNT - Single-Walled Carbon NanoTube):
  sono costituiti da un unico foglio di grafene avvolto su se stesso. La loro struttura cilindrica è composta interamente da esagoni. Gli SWCNTs hanno diametri intorno a 0,5-2,0 nanometri. Nella Figura 1.1 sottostante, a destra vi è una sua raffigurazione. A causa della loro struttura, possono presentare difetti strutturali o imperfezioni che possono deformare il cilindro. La straordinaria proporzione tra lunghezza e diametro (nell'ordine di 10^4) li rende virtualmente monodimensionali, conferendo loro proprietà uniche.[7]

- Nanotubi a parete multipla (MWCNT - Multi-Walled Carbon NanoTube):
  questa categoria comprende nanotubi costituiti da più fogli di grafene avvolti coassialmente uno sull'altro. Anche in questo caso, la struttura è composta principalmente da esagoni e, talvolta, pentagoni. Anche i nanotubi a parete multipla possono presentare difetti strutturali che alterano la loro forma.

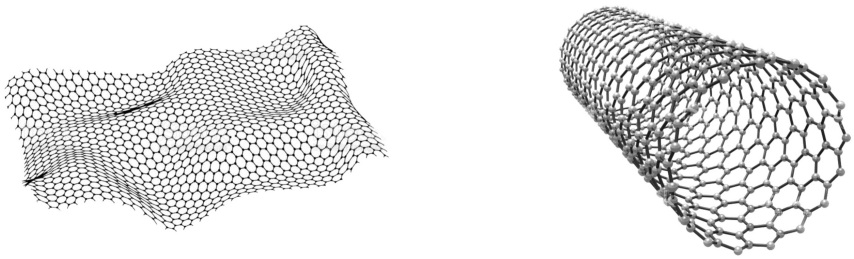


Figura 1.1: a sinistra un foglio di grafene, a destra un nanotubo

La *chiralità* è un concetto chiave nella classificazione dei nanotubi di carbonio, essa determina come gli atomi di carbonio sono disposti nella struttura cristallina del nanotubo e influisce sulle sue proprietà fisiche e chimiche. Questa disposizione può variare notevolmente, influenzando il comportamento e le applicazioni dei nanotubi.[8]

Nanotubi con chiralità diversa possono mostrare comportamenti molto diversi, ad esempio, i nanotubi con chiralità (n,0), che non presentano avvolgimenti lungo la direzione del nanotubo, sono ottimi semiconduttori, il che li rende utili in applicazioni elettroniche. Inoltre, quest'ultimi possono essere più reattivi chimicamente rispetto ad altri tipi di nanotubi a causa della loro terminazione a bordo serrato. Una proprietà generale che accomuna i nanotubi di carbonio è la loro stabilità meccanica e resistenza, che li rendono utili per migliorare la resistenza dei materiali compositi.

1.3 Transistor a nanotubi

Transistor a nanotubi di carbonio sono in grado di fornire prestazioni superiori rispetto ai transistor in silicio o, alternativamente, consumare un quinto della loro energia.[9] I nanotubi di carbonio, per via delle loro proprietà materiali, possono fungere da semiconduttori o conduttore, a seconda della loro struttura e configurazione specifiche. Essendo un mezzo avente un trasporto di tipo balistico, gli elettroni si muovono in linea retta senza subire scattering dagli atomi del reticolo. Questo implica una alta velocità di *drift* e quindi alta conducibilità. Questo pertanto, introduce sostanziali miglioramenti quali una migliore conduzione elettrica (o termica): possono condurre correnti con una maggiore efficienza rispetto a molti semiconduttori tradizionali, i transistor pertanto saranno più efficienti in termini di potenza e velocità.[10]

Un altro aspetto fondamentale sono le *dimensioni nanometriche*: i CNT sono estremamente sottili, con diametri nell'ordine dei nanometri, dimensioni allettanti nell'industria dei semiconduttori moderni, inquanto la miniaturizzazione è una priorità. Questo primo fondamentale aspetto implica una elevata velocità di commutazione, molto più rapida rispetto ai transistor tradizionali, rendendoli ideali per applicazioni ad alta frequenza con un notevole vantaggio anche energetico; il commutare rapidamente tra gli stati "on" e "off" riduce significativamente il consumo energetico complessivo dei dispositivi elettronici in cui vengono inseriti questi transistor a nanotubi.

Nella Figura 1.2 vi è la struttura del transistor realizzata per i test con COMSOL Multiphysics nella quale è evidenziato il nanotubo al fine di chiarire meglio la struttura del dispositivo e dove si colloca un nanotubo all'interno di esso.

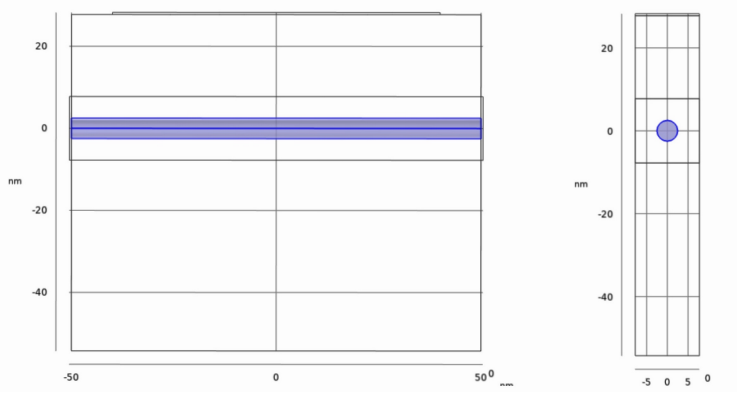


Figura 1.2: vista frontale e laterale del transistor

Nello specifico, il transistor realizzato ha dimensioni di circa 80nm di altezza, 100nm di lunghezza, 12nm di spessore mentre il nanotubo ha raggio di 2nm e 100nm di lunghezza. Al suo interno, per una corretta simulazione cui è stata inserita una *densità di carica* ρ.

Date le dimensioni nanometriche e il CNT, la scelta dei materiali è stata accurata. Si è riscontrato infatti un comportamento instabile del dispositivo dal momento in cui tra il Gate e il nanotubo si adoperavano dei materiale che avessero una costante dielettrica bassa, stesso discorso per quanto riguarda lo strato di semiconduttore che avvolge il nanotubo connettendo Drain al Source.

L' idea iniziale, per la quale è stata pensata la tesi, è quella dell'inserimento del dispositivo all'interno di un complesso più ampio. In Figura 1.3 vi è una schematizzazione del circuito. Nello schema iniziale del transistor, per tale ragione, il Gate, Drain e Source non hanno uno spessore rilevante, sono pertanto ripresentati in maniera quasi bidimensionale.

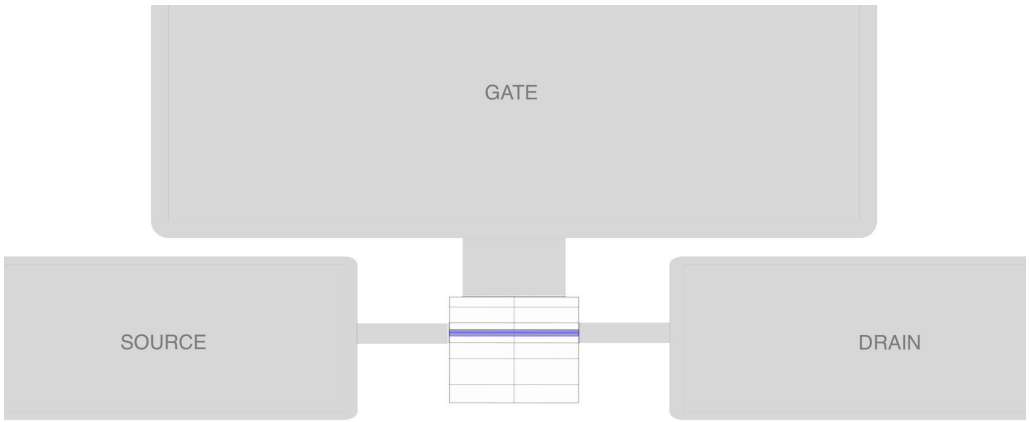


Figura 1.3: schema del transistor all'interno di un dispositivo

1.4 Tecnologia e Materiali

Come anticipato precedentemente, la scelta dei materiali è stata dettata principalmente dalla necessità di avere un comportamento stabile del transistor. Si è riscontrato durante le simulazioni che la densità carica presente all'interno del singolo CNT turbava l'andamento della corrente.

Infatti, da *Poisson*: $\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\varepsilon}$ la *permittività dielettrica* ε gioca un ruolo fondamentale per il campo elettrico da cui ne discende il potenziale e la corrente.[11] Si è osservato che maggiore è la costante dielettrica del materiale, la densità di carica ρ presente nel nanotubo turberà in maniera meno considerevole l'andamento sia della tensione che del potenziale.

In particolare, sono stati scelti come materiali:

- Ossido di Zirconio (ZrO2) : ε = 20-30 che riveste il nanotubo (canale)
- Silicio (Si) : ε = 11 parte sottostante il canale
- Ossido di Hafnio (HfO2) : ε = 20-30 posto tra canale e Gate

Capitolo 2

Software di simulazione

In questo capitolo si andranno ad analizzare gli aspetti più *tecnici* della tesi, quelli riguardanti i software utilizzati per le simulazioni quali *MATLAB* e *COMSOL Multiphysics*, analizzando come questi due programmi collaborino mediante un'interfaccia e sul perchè è stato necessario l'utilizzo di entrambi.

2.1 COMSOL Multiphysics®

COMSOL Multiphysics è un software di simulazione che utilizza l'analisi agli elementi finiti. Il processo di creazione di un modello di simulazione in Comsol Multiphysics può essere suddiviso in diverse fasi:

- Definizione della fisica da studiare: per il transistor, è stata scelta la sezione elettrostatica (modulo AC/DC). Una volta definita la fisica, il software fornisce tutti gli strumenti analitici necessari per modellare il sistema fisico nel modo più appropriato.
- Selezione dello spazio dimensionale e realizzazione della geometria: è necessario disegnare il sistema fisico da simulare e decidere la dimensione del dominio di simulazione. Le opzioni includono 1D, 2D, 2D assialsimmetrico e 3D. In questo caso, sono stati progettati modelli sia 2D che 3D.
- Assegnazione delle proprietà dei materiali: questo passaggio implica la definizione delle proprietà dei materiali utilizzati
- Definizione delle condizioni al contorno: questo passaggio riguarda la definizione delle condizioni al contorno per il modello.
- Creazione della mesh: questo passaggio riguarda la creazione della mesh per il modello.
- Scelta dello studio da effettuare: infine, è necessario scegliere il tipo di studio da effettuare sul modello.

Per il transistor, è stato fondamentale introdurre una densità di carica lungo il nanotubo di carbonio (CNT) che funge da canale. La densità di carica è stata introdotta tramite un file di testo generato da MATLAB che prevede *1200* punti, ognuno dei quali ha un valore della carica. Questi punti sono stati distribuiti lungo il nanotubo. COMSOL permette di visualizzare la densità di carica presente riportata tramite un plot in Figura 2.1:

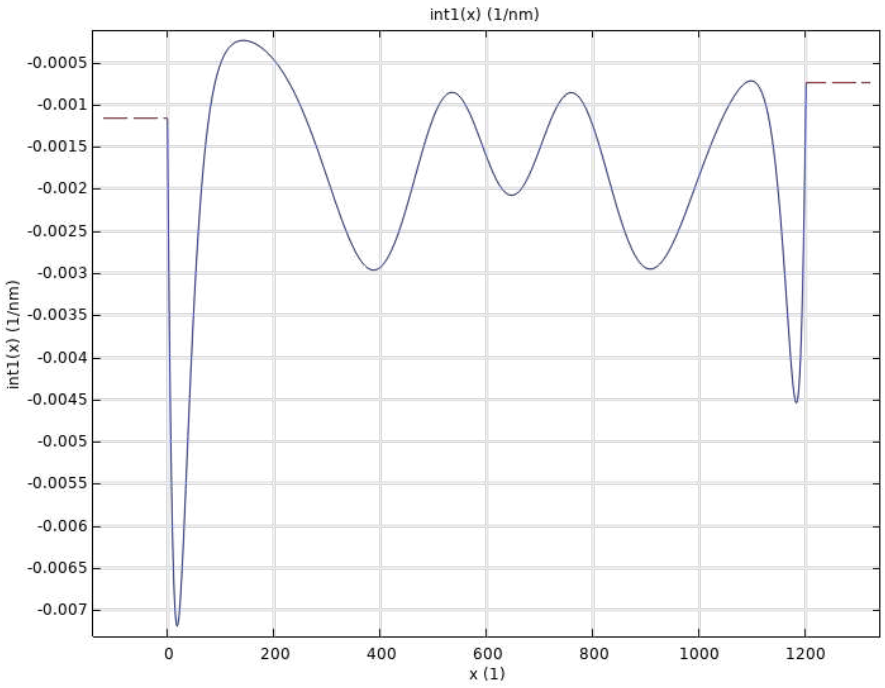


Figura 2.1: plot della densità di carica

Nella progettazione di dispositivi su scala nanometrica, l'adeguamento delle caratteristiche fondamentali, come la densità di carica, alle dimensioni specifiche del dispositivo è importante per assicurare un comportamento coerente. Occorre esprimere la densità di carica in nanometri (nm) per riflettere le dimensioni tipiche dei dispositivi nanometrici. Questa correzione è importante per evitare risultati errati o imprevedibili e garantire il corretto funzionamento dei dispositivi nanotecnologici.

Una volta definita la struttura, assegnati i materiali scelti e specificati nel capitolo precedente, applicando ai terminali una opportuna tensione è possibile simulare il comportamento del transistor. E' importante ricordare che COMSOL risolve solo l'equazione di Poisson pertanto calcola il potenziale nel *caso statico*, è una delle parti della simulazione. Il risultato è il seguente e mostra il potenziale generato dalla tensione applicata, con la densità di carica e influenzato dai materiali scelti.

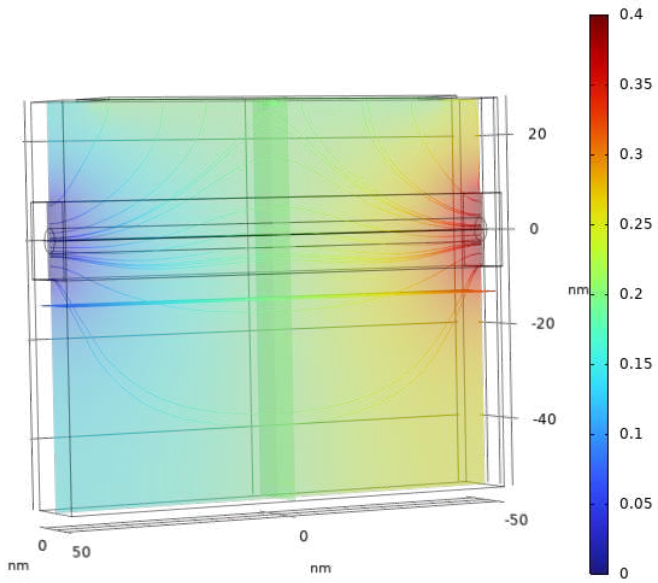


Figura 2.2: istantanea di come apparte un simulazione

2.2 MATLAB®

Un altro software necessario per la simulazione del modello è stato MATLAB. In particolare il suo ruolo è stato quello di, tramite una funzione alla quale sono state associate delle librerie, permettere il dialogo tra un programma che risolveva l'equazione di Schrödinger e i risultati del COMSOL. Sempre su MATLAB è stato implementata l'interfaccia che permette tutto ciò.

2.3 Ciclo di funzionamento

Al fine di avere una corretta simulazione del modello è stato necessario, come accennato in precedenza, permettere il *diagolo* tra COMSOL e MATLAB, le funzioni e le librerie adoperate mi sono state fornite dal professor Mencarelli Davide.

Una volta definito il modello sul COMSOL, calcolato il potenziale che deriva dalla densità di carica all'interno del nanotubo è necessario salvare il modello in formato MATLAB al fine della connessione fra i due software. Il file avrà estensione .m, conterrà al suo interno tutti i parametri del modello codificati in linguaggio MATLAB.

Una volta in MATLAB, è necessario lanciare l'interfaccia, appositamente studiata cui istantanea è riportata nella Figura 2.3. Al fine di una corretta simulazione è necessario che le specifiche (V_{gs}, V_{ds}, lunghezza CNT, raggio CNT) siano coerenti con quelle del modello sul COMSOL, per far ciò si settano queste grandezze manualmente di volta il volta a seconda della necessità. Dalla schermata in figura, in particolare, mostra come settare la *lunghezza* del nanotubo, il *raggio* e la *chiralità*.

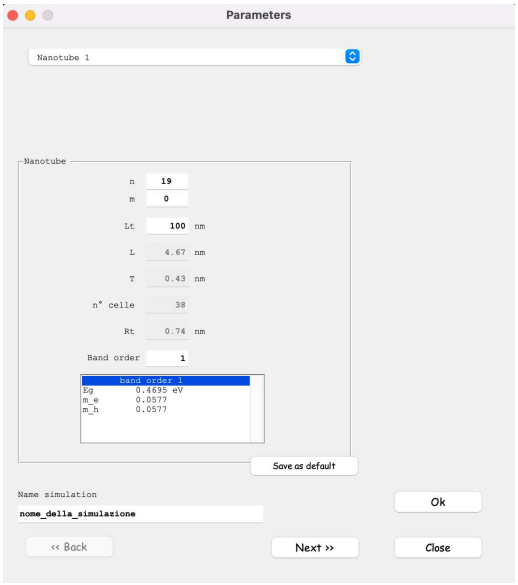


Figura 2.3: interfaccia del programma

Successivamente occorre definire il numero di *step*, a multipli del numero di nanotubi, che si desidera fare la simulazione. Fatto ciò si avvia la simulazione e ad ogni iterazione viene risolta l'equazione di Schrödinger al fine di calcolare ρ, dal punto di vista probabilistico, dato in input il potenziale calcolato sul COMSOL. Compare una schermata (Figura 2.4) che presenta i picchi di energia dovuti alla carica:

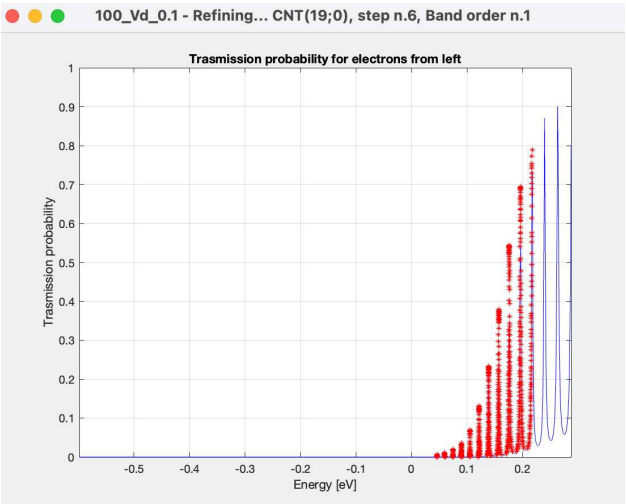


Figura 2.4: schermata con picchi di energia

all'interno del software inizia un *ciclo* di n arbitrarie iterazioni al fine di calcolare l'output desiderato di cui, in Figura 2.5 vi è lo schema esemplificativo:

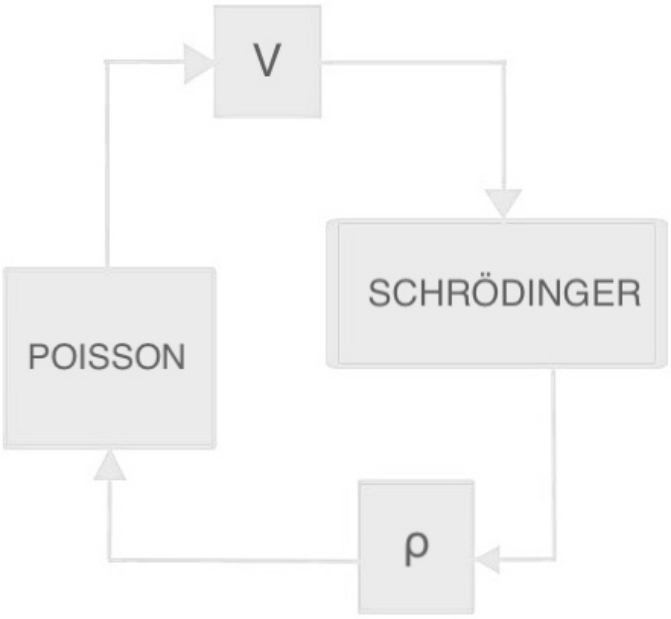


Figura 2.5: schema del programma

Partendo dal primo potenziale fornito da COMSOL, con una densità di carica iniziale data e le tensioni fornite al Gate, Drain e Source. Il potenziale calcolato mediante l'equazione di Poisson da COMSOL per questa prima iterazione verrà trasmesso a MATLAB tramite un file appropriato. Successivamente, utilizzando una funzione definita su MATLAB, da quel potenziale verrà calcolata la distribuzione di carica di quell'iterazione risolvendo l'equazione di Schrödinger. Questa distribuzione di carica (diversa da quella dello step precedente) verrà salvata su un file di testo specifico al quale COMSOL avrà accesso.

A questo punto, ci ritroviamo al punto di partenza con una nuova distribuzione di carica necessaria per calcolare il potenziale per una seconda iterazione all'interno del COMSOL tramite l'equazione di Poisson. Questo genererà una tensione diversa che sarà necessaria a MATLAB per calcolare una nuova densità di carica. Questo ciclo verrà ripetuto più volte e, se il numero di passaggi (iterazioni) non sarà sufficiente, ne saranno necessari ulteriori.

La soluzione si considera *convergente* se la variazione di potenziale tra i due step è minore di un valore prefissato piccolo a piacere. È importante sottolineare che la scelta dei materiali e le dimensioni del nanotubo, in particolare il suo raggio, influenzano fortemente la convergenza o meno della soluzione.

Capitolo 3

Modelli Matematici

3.1 Equazione di Schrödinger

Nella teoria della *meccanica quantistica* [12] , l'equazione di Schrödinger in forma generale assume un ruolo centrale. Essa governa l'evoluzione temporale delle funzioni d'onda che descrivono lo stato di una particella o di un sistema di particelle. L'espressione generale dell'equazione di Schrödinger è la seguente:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \bigtriangledown^2 \psi(r,t) + V(r,t)\psi(r,t) = i\hbar\frac{\partial\psi(r,t)}{\partial t} \tag{3.1}$$

Dove:
- $\psi((r,t))$ è la funzione d'onda, che rappresenta la probabilità di trovare una particella in una posizione re al tempo t.
- $\hbar$ è la costante di Planck ridotta ($\hbar = \frac{h}{2\pi}$), dove h è la costante di Planck.
- m è la massa della particella.
- ∇^2 è l'operatore Laplaciano, misura la variazione spaziale della funzione d'onda.
- $V(r,t)$ è il potenziale, che può dipendere dalla posizione $\mathbf{r}$ e dal tempo t.
- $\frac{\partial\psi(\mathbf{r},t)}{\partial t}$ rappresenta la derivata parziale della funzione d'onda rispetto al tempo t.

Nel contesto della meccanica quantistica, l'equazione di Schrödinger assume il compito di descrivere l'evoluzione temporale della funzione d'onda ψ, tenendo attentamente in considerazione sia il contributo del potenziale V sia la quantizzazione dell'energia, governata dalla costante di *Planck* $\hbar$.

La densità di carica ρ svolge un ruolo cruciale nell'equazione di Schrödinger, influenzando significativamente il potenziale V. Questa densità di carica genera un campo elettrico nell'area occupata dal nanotubo. Di conseguenza, il potenziale V incorpora il contributo del campo elettrico creato dalla densità di carica. Risolvendo l'equazione di Schrödinger, possiamo determinare la funzione d'onda ψ, che descrive il comportamento delle particelle all'interno del nanotubo, influenzate dalla presenza di questa densità di carica. In altre parole, la densità di carica ρ è un fattore determinante nel modellare il comportamento delle particelle nel nanotubo.

In effetti, dalle simulazioni condotte, è possibile confermare questa affermazione attraverso la rappresentazione grafica della variazione della distribuzione spaziale della carica. È evidente che all'aumentare del potenziale applicato al Drain tramite V_{ds} rispetto a V_{gs}, la distribuzione della carica diventa più lineare partendo da un andamento più oscillatorio, un esempio è riportato nella Figura 3.1. Ciò influisce direttamente sull'andamento complessivo del sistema, rendendolo più evidente nelle analisi:

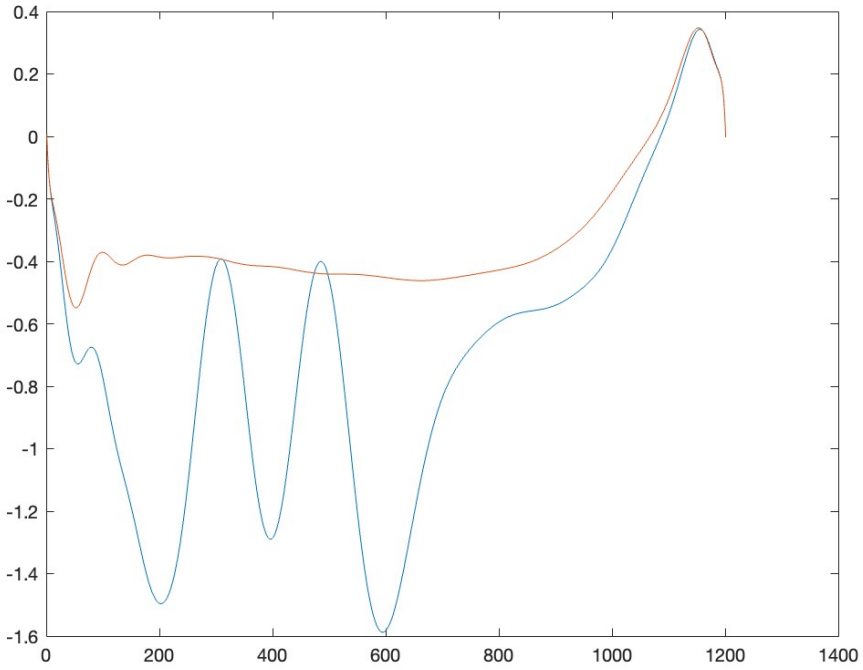


Figura 3.1: distribuzione spaziale della carica: prima (blu) e ultima iterazione (rosso)

Per comprendere l'influenza della densità di carica sul potenziale all'interno di un nanotubo, un particolare tipo di struttura cilindrica composta da fogli di grafene arrotolati, è necessario considerare l'applicazione dell'equazione di Schrödinger. Tale equazione è fondamentale nella meccanica quantistica poiché governa l'evoluzione delle funzioni d'onda di particelle o sistemi di particelle nel tempo. Tuttavia, applicarla a un nanotubo richiede una conoscenza dettagliata dei parametri specifici, inclusi il potenziale, la geometria del nanotubo e la distribuzione della densità di carica. È importante sottolineare che le soluzioni esatte possono variare notevolmente in base a questi fattori.

Un modo per semplificare l'argomento è prendere in considerazione un nanotubo di carbonio (CNT) come esempio. All'interno del nanotubo, supponiamo che ci sia una densità di carica uniforme, che potrebbe rappresentare elettroni o lacune, a seconda del contesto specifico. Questa densità di carica crea un potenziale elettrico, descritto dalla funzione $V(r)$, che cambia all'interno del nanotubo in base alla posizione.

Per applicare l'equazione di Schrödinger a questo *scenario semplificato*[13], possiamo focalizzarci sulla componente spaziale dell'equazione. Questo perché stiamo analizzando la distribuzione della carica all'interno del nanotubo e non stiamo considerando l'evoluzione nel tempo. Di conseguenza, l'equazione di Schrödinger spaziale diventa:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \bigtriangledown^2 \psi(r) = (E - V)|\psi(r)|^2 \tag{3.2}$$

Dove:
- $\bigtriangledown^2$ è l'operatore laplaciano, misura la variazione spaziale della funzione $\psi(r, t)$
- E è l'energia totale del sistema.

L'equazione presentata è fondamentale per l'analisi della dinamica all'interno di un nanotubo, considerando l'influenza della densità di carica. Qui, il termine $V(r)$ incarna il potenziale elettrico risultante dalla distribuzione di carica all'interno del nanotubo, una grandezza calcolabile in base alla specifica distribuzione della densità di carica.

Il nostro principale obiettivo è quello di identificare le soluzioni per la funzione d'onda $\psi(r, t)$ all'interno del nanotubo, tenendo conto attentamente dell'impatto del potenziale $V(r)$ generato dalla densità di carica. Tali soluzioni, una volta ottenute, offriranno preziose informazioni riguardo alla struttura interna e alle caratteristiche energetiche del nanotubo, considerando la presenza della densità di carica.

3.2 Poisson - Equazione dell'Elettrostatica

L'equazione di Poisson generale è un'equazione *differenziale alle derivate parziali* [12] fondamentale che trova ampio utilizzo nell'analisi della distribuzione del potenziale elettrico in un campo elettrico soggetto a una specifica distribuzione di carica elettrica. La sua formulazione universale, che ne descrive in modo completo la dinamica, è la seguente:

$$\nabla^2\Phi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \tag{3.3}$$

Dove:

- ∇^2 è l'operatore laplaciano, misura la variazione spaziale di Φ.
- Φ rappresenta il potenziale elettrico in un punto nello spazio.
- ρ è la densità di carica elettrica, che rappresenta la quantità di carica per unità di volume in un punto nello spazio.
- ε è la costante dielettrica del materiale.

Un aspetto affascinante dell'equazione di Poisson è la sua capacità di rivelare come il potenziale elettrico possa oscillare tra diversi livelli o stadi in risposta a variazioni nella distribuzione di carica, visibile in Figura 3.2. Queste oscillazioni possono essere più pronunciate quando ρ varia significativamente nello spazio.

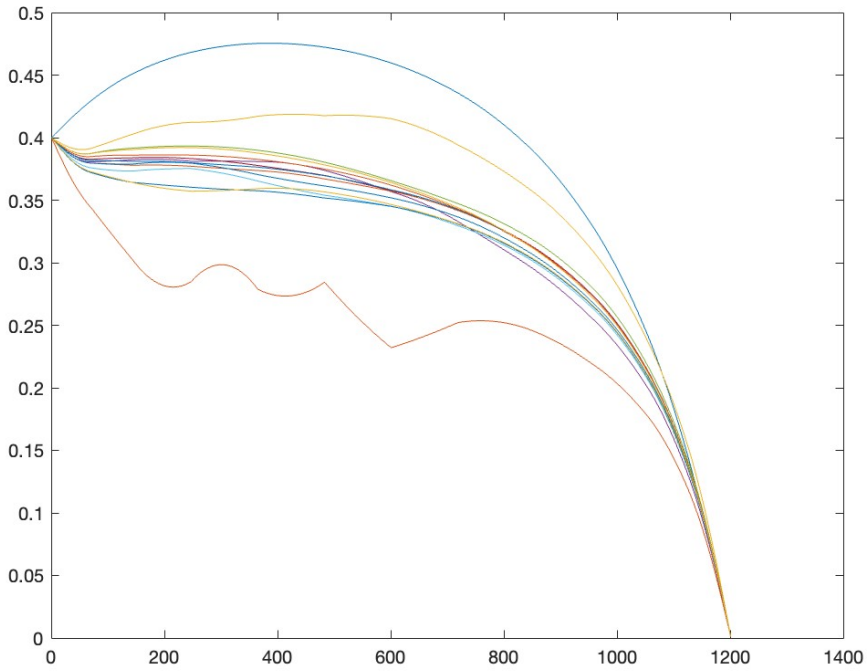


Figura 3.2: plot di ogni potenziale ottenuto dalla simulazione

Tuttavia, con il passare del tempo o con il raggiungimento di un equilibrio, il potenziale elettrico tende a stabilizzarsi convergendo ad una configurazione definita.

Questo processo di convergenza è fondamentale per la comprensione di come i sistemi fisici raggiungano stati di equilibrio sotto l'influenza delle cariche elettriche.

Nella Figura 3.3 è stato fatto invece un plot dei primi due potenziali della simulazione, i 2 intermedi e gli ultimi due. E' possibile apprezzare meglio senza gli altri valori l'alternanza e la convergenza espressa precedentemente.

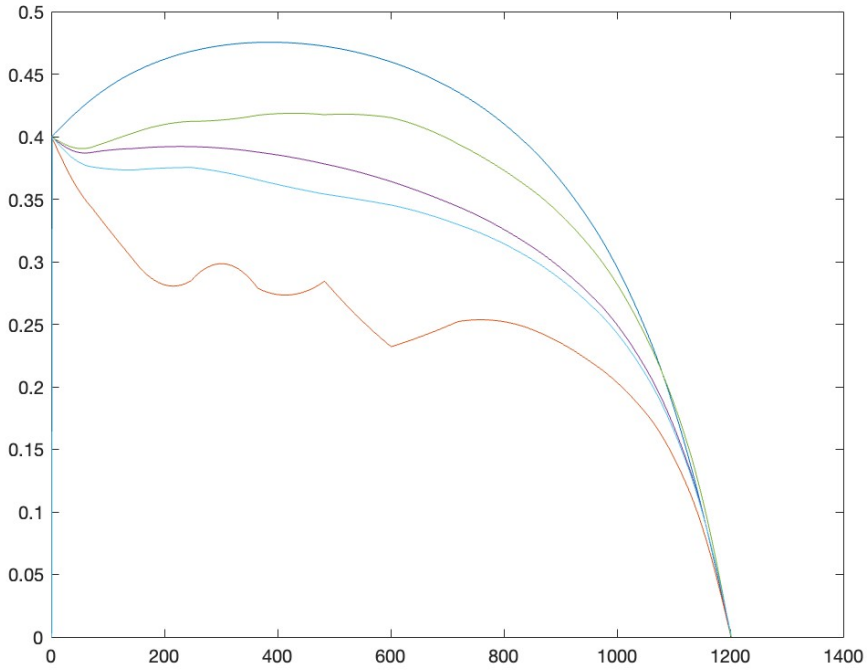


Figura 3.3: plot del potenziale all'iterazione 1,2,7,8,15,16

La *soluzione* dell'equazione di Poisson in una situazione specifica richiede una profonda comprensione della distribuzione di carica ρ e delle condizioni al contorno del problema. Queste soluzioni permettono di calcolare il potenziale elettrico in tutto lo spazio. L'equazione è un pilastro fondamentale della teoria elettrostatica, ed è di cruciale importanza in numerose discipline, spaziando dalla fisica delle particelle all'elettronica, dall'elettrochimica all'ingegneria elettrica.

Nel contesto dei transistor a nanotubi di carbonio (CNTFET) utilizzati in dispositivi elettronici, l'applicazione dell'equazione di Poisson risulta di particolare rilevanza. Questa equazione consente una precisa descrizione del comportamento del potenziale elettrico all'interno del nanotubo in risposta a specifiche distribuzioni di carica. Questa comprensione è di importanza cruciale per la progettazione e il corretto funzionamento dei transistor, dove il nanotubo funge da canale conduttivo.

Supponendo di avere un CNTFET con una distribuzione di carica di portatori (ad esempio, elettroni o lacune) all'interno del nanotubo[2]. L'equazione di Poisson per questa situazione potrebbe essere espressa come:

$$\nabla^2\Phi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \tag{3.4}$$

Dove:
- Φ rappresenta il potenziale elettrico all'interno del nanotubo.
- ρ è la densità di carica all'interno del nanotubo.
- ε è la costante dielettrica del dielettrico utilizzato nel dispositivo.

L'obiettivo di questa equazione è determinare il potenziale elettrico Φ all'interno del nanotubo, il quale influenzerà il *flusso di carica* attraverso il nanotubo stesso. La distribuzione di carica ρ all'interno del nanotubo può essere dovuta, ad esempio, a elettroni intrinseci o estrinseci o a cariche applicate esternamente.

La soluzione dell'equazione di Poisson consentirà di comprendere come il potenziale elettrico nel canale del nanotubo varia in risposta alla distribuzione di carica, alle tensioni applicate e alle condizioni al contorno. Questo, a sua volta, influenzerà il comportamento del transistor a nanotubo di carbonio e la sua capacità di amplificare o controllare il flusso di corrente attraverso il canale del nanotubo.

È importante notare che, nella pratica, risolvere l'equazione di Poisson in un CNTFET può essere una *sfida complessa*, poiché richiede la modellizzazione dettagliata delle geometrie e delle proprietà del nanotubo e delle interfacce dielettriche. Tuttavia, questa è una parte fondamentale della progettazione e dell'ottimizzazione dei dispositivi a nanotubi di carbonio.

Capitolo 4

Risultati

In questo capitolo saranno riportati i vari test svolti tramite il programma citato nel capitolo precedente. Sono stati tutti effettuati sotto l'ipotesi he *non ci siano perdite nel mezzo*, per una tensione di Drain V_{ds} dai 0.1V a 0.6V al variare a seconda della simulazione della *tensione di Gate* V_{gs}, *lunghezza del canale* (del CNT), *estensione del Gate*.

4.1 Modello

La figura che segue è una istantanea del transistor posto in obbliquo realizzato mediante *COMSOL Multiphysics* in 3D. Nel modello in Figura 4.1 vi è evidenziato in blu il nano tubo, in alto il Gate; saranno gli unici due parametri fisici che varieranno.

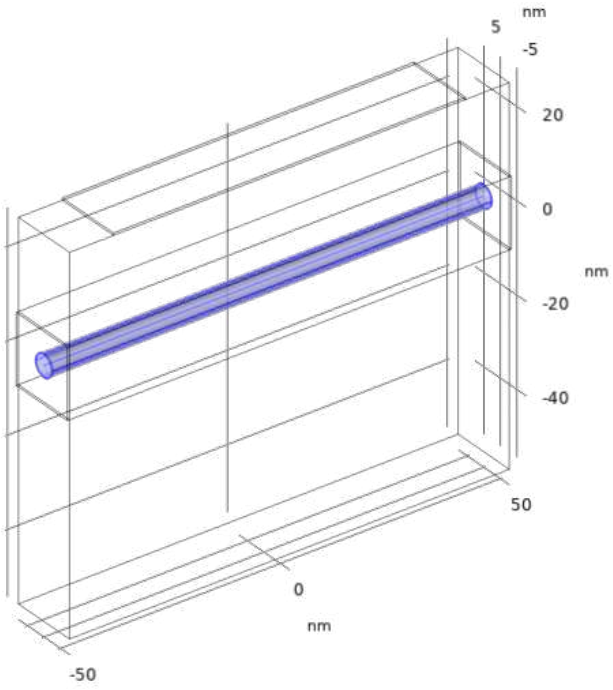


Figura 4.1

Ad ogni test è stato appositamente *aggiornato* il modello del transistor da COMSOL tramite la sezione cui istantanea è a sinistra. Successivamente è salvato in formato MATLAB in maniera automatica dal software stesso.

Nome	Espressione	Valore	Descrizione
lcnt	100[nm]	1E-7 m	lunghezza CNT
rcnt	2.5[nm]	2.5E-9 m	raggio CNT
dZrO2	8[nm]+3*rcnt	1.55E-8 m	spessore ZrO2
wZrO2	lcnt	1E-7 m	lunghezza ZrO2
dHfO2	dZrO2	1.55E-8 m	spessore HfO2
wHfO2	wZrO2	1E-7 m	lunghezza HfO2
hHfO2	20[nm]	20E-8 m	altezza HfO2
wHfO2	wZrO2	1E-7 m	lunghezza HfO2
dSi	dZrO2	1.55E-8 m	spessore Si
wSi	wZrO2	1E-7 m	lunghezza Si
hSi	3*dZrO2	4.65E-8 m	lunghezza Si
dDrain	dZrO2	1.55E-8 m	spessore Drain
wDrain	0.5[nm]	5E-10 m	lunghezza Drain
dGate	dZrO2	1.55E-8 m	spessore Gate
wGate	90[nm]	9E-8 m	lunghezza Gate

Tabella 4.1: parametri del modello

E' fondamentale al fine della realizzazione di un buon modello per le simulazioni fare un'attenta definizione *parametrica* delle grandezze che caratterizzeranno il modello. Nella Tabella 4.1 è possibile visualizzare i parametri dove:

- Nome: nome assegnato al parametro per distinguerlo
- Espressione: valore numerico o equazione che definisce il parametro
- Valore: scalare calcolato da COMSOL, risultato dell'espressione
- Descrizione: note per rendere portabile il tutto nel caso in cui si lavori in gruppo

Si osserva che alcuni parametri sono indipendenti, cioè definiti direttamente con un valore fisso. Questo è necessario affinché il modello possa essere modificato automaticamente da COMSOL: al variare degli indipendenti in modo coerente, il modello verrà modificato automaticamente da Comsol. In particolare, lcnt, rcnt e wGate sono stati resi indipendenti perché sono i parametri su cui si baseranno le simulazioni per valutare il comportamento del transistor al variare di tali parametri.

Nello stesso modo, questa procedura dovrebbe essere applicata a tutti i parametri del modello, compresa la definizione delle tensioni che saranno applicate ai terminali elencati nella Tabella 4.2. La definizione delle tensioni è fondamentale, proprio come per qualsiasi altra variabile, poiché permette di richiamarle utilizzando il loro nome, ad esempio, durante la risoluzione delle equazioni del modello. Questo approccio evita la necessità di modificare direttamente un'equazione, riducendo così il rischio di errori e semplificando la gestione dei parametri del modello.

Nome	Espressione	Valore	Descrizione
Vgs	0.4[V]	0.4 V	tensione di Gate
Vds	0.2[V]	0.2 V	tensione di Drain
Vs	0[V]	0 V	tensione di Source

Tabella 4.2: valori delle tensioni

Infine, la Tabella 4.3 elenca le costanti dielettriche dei materiali, e lo stesso principio si applica anche a queste costanti. La necessità di questa tabella è analoga a quella della Tabella 4.2; poiché è possibile che queste costanti debbano essere inserite in espressioni diverse, è conveniente variarne il valore nella sezione dei parametri anziché modificarle direttamente nelle eventuali equazioni.

Nome	Espressione	Valore	Descrizione
epsZrO2	21	21	epsilon ZrO2
epsHfO2	30	30	epsilon HfO2
epsSi	11	11	epsilon Si

Tabella 4.3: costanti dielettriche dei materiali usati

Si noti che è fondamentale definire l'unità di misura della grandezza a cui ci si riferisce nel parametro. Ad esempio, le costanti dielettriche sono adimensionali, quindi non è necessario specificare un'unità di misura, mentre per le tensioni è essenziale indicare l'unità di misura in Volt.

Seguirà ora un capitolo dedicato alle simulazioni, si ricorda che si è sotto l'ipotesi che il mezzo sia senza perdite, il che significa che non sono state considerate dispersioni o assorbimenti energetici.

4.2 Geometria costante con Vg a 0.2V - 0.4V - 0.6V

Questa sezione illustra i risultati del primo test condotto sul transistor. Durante queste simulazioni, il transistor ha una lunghezza del Gate di 80nm e una lunghezza del canale di 100nm (CNT). La tensione V_{ds} è stata variata nell'intervallo da 0.1V a 0.6V, mantenendo costante il valore di V_{gs} per ciascuna delle tre fasi a 0.2V, 0.4V e 0.6V.

La Tabella 4.4 fornisce i valori della corrente sotto la colonna I_d in funzione della tensione V_{ds}, variando da 0.1V a 0.6V, fissando il valore di V_{gs} a 0.2V. Il canale è lo stesso per tutte le simulazioni come lo è anche la lunghezza del Gate.

Vds	Vgs	Gate	Canale	Id
0,1	0,2	80	100	2,41E+04
0,2	0,2	80	100	3,48E+04
0,3	0,2	80	100	4,28E+04
0,4	0,2	80	100	5,78E+04
0,5	0,2	80	100	7.61E+04
0,6	0,2	80	100	1,10E+05

Tabella 4.4: valori correnti per V_{gs}=0.2V, Gate=80nm, canale=100nm

Nella Figura 4.2 sono presentati gli andamenti della corrente per ciascuna iterazione. La risposta della corrente è regolare in questa configurazione, a parte delle lievi oscillazioni per V_{ds}= 0.4V, 0.5V e 0.6V.

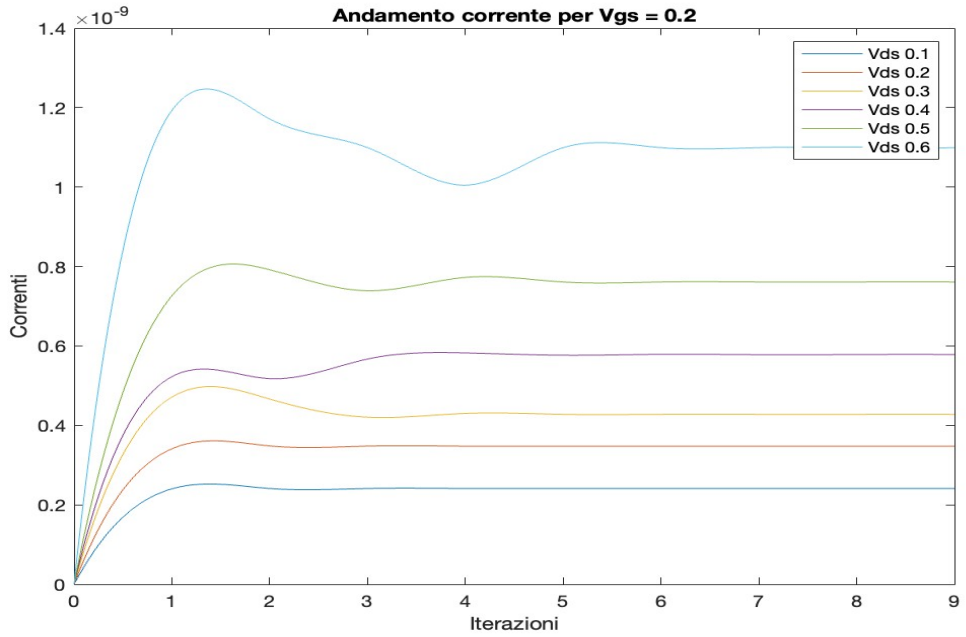


Figura 4.2: andamento correnti della simulazione riportata in Tabella 4.4

La Tabella 4.5 riporta i dati relativi alla corrente in funzione della tensione V_{ds}, che varia da 0.1V a 0.6V, mantenendo, in questo caso, un valore costante di V_{gs} pari a 0.4V. Il canale è lo stesso per tutte le simulazioni come lo è anche la lunghezza del Gate.

Vds	Vgs	Gate	Canale	Id
0,1	0,4	80	100	1,04E+05
0,2	0,4	80	100	1,16E+05
0,3	0,4	80	100	1,30E+05
0,4	0,4	80	100	1,56E+05
0,5	0,4	80	100	2,40E+05
0,6	0,4	80	100	3,41E+05

Tabella 4.5: valori correnti per V_{gs}=0.4V, Gate=80nm, canale=100nm

Nella figura 4.3, sono evidenziati gli andamenti della corrente in ciascuna delle iterazioni. In questa configurazione, la risposta della corrente appare costante, ad eccezione di leggere oscillazioni riscontrate a tensioni V_{ds} pari a 0.1V, 0.2V, e 0.3V, con altrettanto lievi picchi iniziali a 0.5V, e 0.6V.

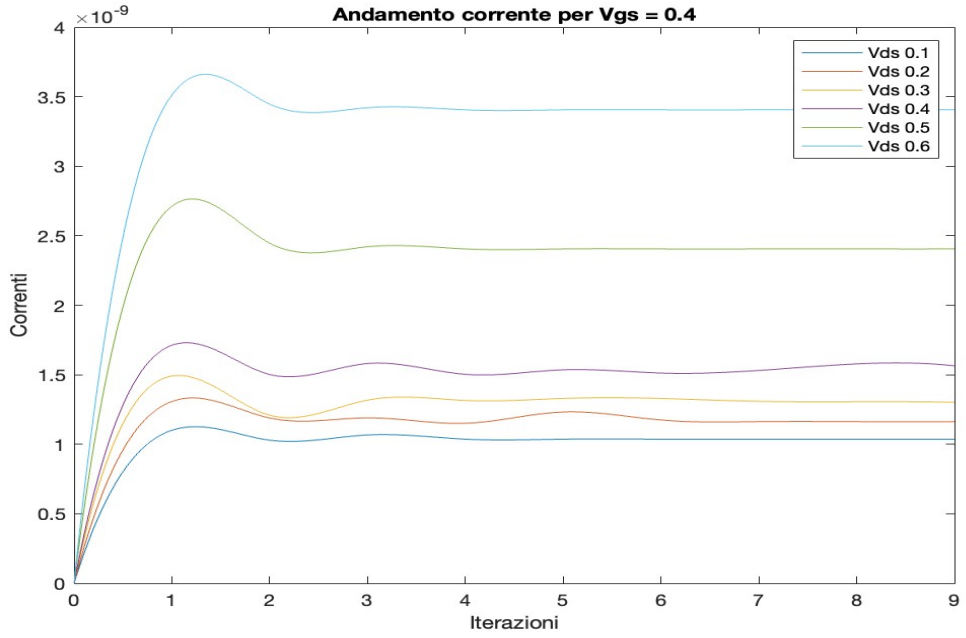


Figura 4.3: andamento correnti della simulazione riportata in Tabella 4.5

Nella Tabella 4.6 sono rappresentati i dati relativi alla corrente in relazione alla tensione V_{ds}, con una gamma di variazione compresa tra 0.1V e 0.6V. Questa simulazione ha come per V_{gs} fissata a 0.6V. Questa costituisce l'ultima simulazione di questo gruppo.

Vds	Vgs	Gate	Canale	Id
0,1	0,6	80	100	3,99E+05
0,2	0,6	80	100	4,50E+05
0,3	0,6	80	100	4,61E+05
0,4	0,6	80	100	5,19E+05
0,5	0,6	80	100	8,45E+05
0,6	0,6	80	100	1,23E+06

Tabella 4.6: valori correnti per V_{gs}=0.6V, Gate=80nm, canale=100nm

Nella Figura 4.4 sono rappresentati i dati di corrente relativa all'ultimo gruppo di queste simulazioni con V_{gs}=0.6V. In questa configurazione, emergono delle oscillazioni più pronunciate rispetto agli altri valori di V_{gs}. Queste oscillazioni sono presenti per tutti i valori di V_{gs}, lievi per la tensione da 0.1V a 0.3V e picchi più evidenti per valori 0.4V, 0.5V e 0.6V.

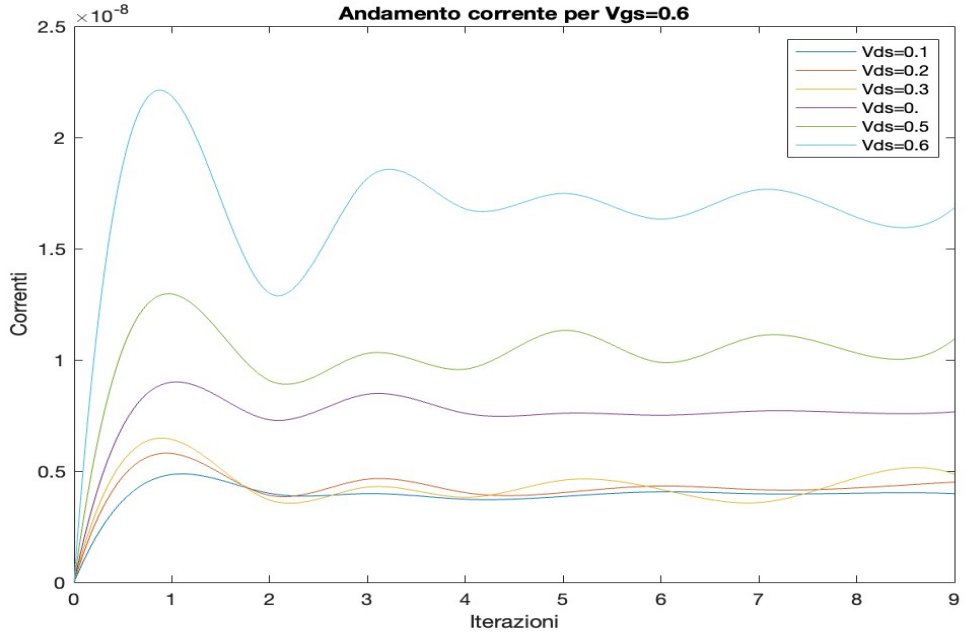


Figura 4.4: andamento correnti della simulazione riportata in Tabella 4.6

E' opportuno fare un confronto, andando a vedere i valori specifici dalla corrente riportata in Figura 4.2 e quelli della simulazione in Figura 4.4 perché sono alquanto diverse ed' è interessante andare a vedere i singoli valori che la corrente assume.

I valori della corrente della simulazione con Gate 60nm, CNT di 100nm e V_{gs} a 0.4V sono riportati nella Tabella 4.7.

Vds= 0.1V	Vds= 0.2V	Vds= 0.3V	Vds= 0.4V	Vds= 0.5V	Vds= 0.6V
0	0	0	0	0	0
1,10E+05	1,31E+05	1,49E+05	1,71E+05	2,71E+05	3,51E+05
1,03E+05	1,19E+05	1,21E+05	1,50E+05	2,45E+05	3,45E+05
1,07E+05	1,19E+05	1,32E+05	1,58E+05	2,42E+05	3,42E+05
1,04E+05	1,15E+05	1,32E+05	1,50E+05	2,41E+05	3,41E+05
1,04E+05	1,23E+05	1,33E+05	1,54E+05	2,41E+05	3,41E+05
1,04E+05	1,17E+05	1,33E+05	1,51E+05	2,41E+05	3,41E+05
1,04E+05	1,16E+05	1,31E+05	1,53E+05	2,41E+05	3,41E+05
1,04E+05	1,16E+05	1,31E+05	1,58E+05	2,41E+05	3,41E+05
1,04E+05	1,16E+05	1,30E+05	1,56E+05	2,41E+05	3,41E+05

Tabella 4.7: valori quantitativi di Id per V_{gs}=0.2V, Gate=80nm, canale=100nm

mentre quelli della corrente assunti nella simulazione stessa geometria ma con V_{gs} a 0.6V sono riportati nella Tabella 4.8.

Vds= 0.1V	Vds= 0.2V	Vds= 0.3V	Vds= 0.4V	Vds= 0.5V	Vds= 0.6V
0	0	0	0	0	0
4,85E+05	5,79E+05	6,42E+05	8,99E+06	1,30E+06	2,18E+06
4,00E+05	3,91E+05	3,70E+05	7,31E+06	9,07E+05	1,30E+06
3,99E+05	4,64E+05	4,28E+05	8,46E+06	1,03E+06	1,82E+06
3,73E+05	4,03E+05	3,82E+05	7,60E+06	9,58E+05	1,68E+06
3,86E+05	4,03E+05	4,59E+05	7,60E+06	1,13E+06	1,75E+06
4,07E+05	4,33E+05	4,18E+05	7,51E+06	9,88E+05	1,63E+06
3,98E+05	4,16E+05	3,58E+05	7,70E+06	1,11E+06	1,76E+06
4,01E+05	4,24E+05	4,70E+05	7,62E+06	1,03E+06	1,64E+06
3,99E+05	4,50E+05	4,86E+05	7,66E+06	1,09E+06	1,69E+06

Tabella 4.8: valori quantitativi di Id per V_{gs}=0.6V, Gate=80nm, canale=100nm

Facendo un confronto tra le due tabelle, emerge una differenza significativa nel comportamento della corrente. Nella prima tabella, la corrente raggiunge un valore costante dopo un certo punto, è visibile anche solo guardando i valori, indicando una convergenza del comportamento del transistor. Tuttavia, nella seconda tabella, i valori della corrente non seguono la stessa tendenza fino a una determinata iterazione, suggerendo una maggiore variabilità e oscillazioni nel funzionamento del dispositivo. Questa discrepanza nei risultati tra le due configurazioni può fornire preziose informazioni per comprendere meglio il comportamento del transistor e ottimizzarne le prestazioni.

4.3 Vgs e CNT costanti, varia lughezza Gate

Nella presente sezione, vengono esposte le simulazioni nelle quali la lunghezza del nanotubo (CNT) e di conseguenza anche quella del canale è stata mantenuta costante a 100nm, mentre la tensione applicata al Gate V_{gs} è stata fissata a 0.4V. L'obiettivo di queste simulazioni è valutare la corrente generata per ciascun valore di tensione V_{ds} applicato, che varia da 0.1V a 0.6V.

Procediamo ora con un nuovo gruppo di simulazioni riportate nella Tabella 4.9, in cui manteniamo la lunghezza del Gate costante a 60nm per tutte le tensioni Vds da 0.1V a 0.6V per esaminare il comportamento del transistor in diverse condizioni.

Vds	Vgs	Gate	Canale	Id
0,1	0,4	60	100	7,49E+04
0,2	0,4	60	100	8,44E+04
0,3	0,4	60	100	1,07E+05
0,4	0,4	60	100	1,44E+05
0,5	0,4	60	100	2,38E+05
0,6	0,4	60	100	3,38E+05

Tabella 4.9: valori quantitativi di Id per V_{gs}=0.4V, Gate=60nm, canale=100nm

Sono riportati nella Figura 4.5 gli andamenti della corrente per ciascuna iterazione. La risposta della corrente è regolare per valori fino a 0.5V, in particolare per V_{ds}=0.6V si ha un picco alquanto pronunciato.

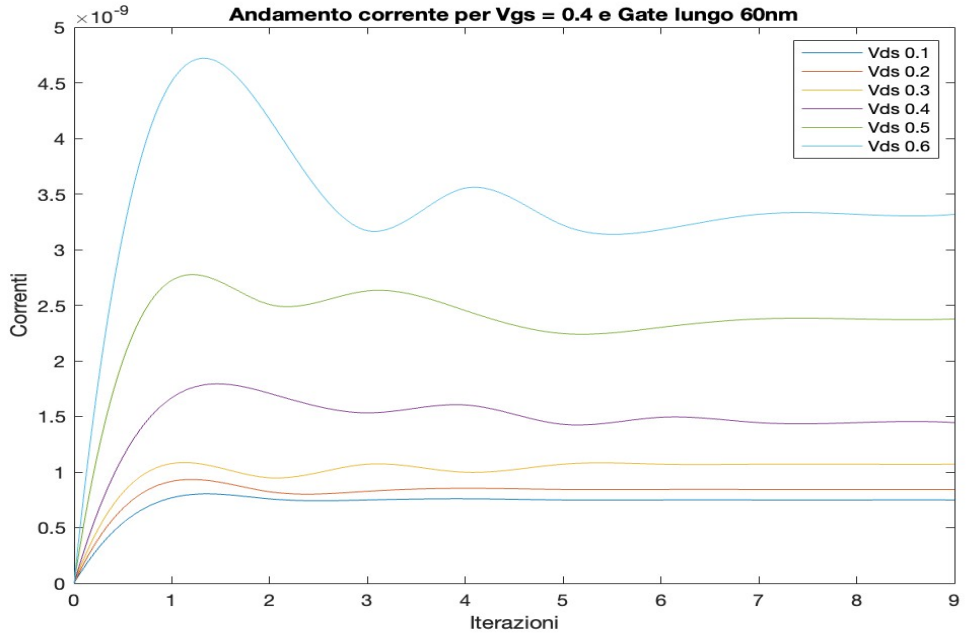


Figura 4.5: andamento correnti della simulazione riportata in Tabella 4.9

Nella Tabella 4.10, sono riportati i valori di convergenza della simulazione in questione. Anche in quest'ultima simulazione, i criteri sono gli stessi delle altre 2 precedenti: V_{gs} costante a 0,4V in questo caso, lunghezza canale 100nm con V_{ds} che varia da 0.1V a 0.6V.

Vds	Vgs	Gate	Canale	Id
0,1	0,4	90	100	1,17E+05
0,2	0,4	90	100	1,33E+05
0,3	0,4	90	100	1,46E+05
0,4	0,4	90	100	2,14E+05
0,5	0,4	90	100	2,85E+05
0,6	0,4	90	100	4,12E+05

Tabella 4.10: valori quantitativi di Id per V_{gs}=0.4V, Gate=90nm, canale=100nm

Nel caso di un Gate più esteso, rispetto agli altri scenari, è evidente che la corrente ha un transitorio alquanto oscillante prima di convergere ad un valore, in particolare per valori di tensione V_{ds} da 0.4V a 0.6V. Questo è visibile nella Figura 4.6 e fa ipotizzare che tanto più si estende il Gate, maggiore sarà l'influenza della densità di carica date queste condizioni.

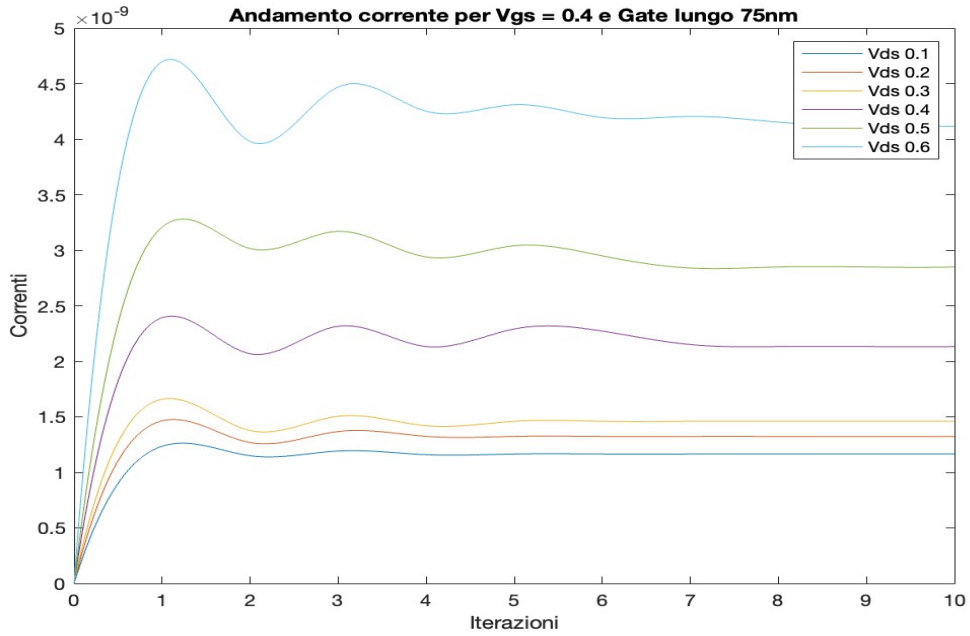


Figura 4.6: andamento correnti della simulazione riportata in Tabella 4.10

4.4 Lunghezza Gate costante, varia CNT e Vgs

Nella sezione conclusiva delle simulazioni, sono state condotte delle analisi in cui la lunghezza del Gate è mantenuta costante a 75nm, mentre la tensione applicata al Gate e la lunghezza del CNT varieranno entrambi nelle 3 simulazioni. L'obiettivo primario, anche in questo scenario è quello di valutare la corrente generata per ciascun valore di tensione V_{ds}, da 0.1V a 0.6V.

Nella Tabella 4.11 è riportata la tabella che riassume i parametri su cui verteranno le simulazioni, in questo caso V_{gs} è fissata a 0.2V, la lunghezza del Gate a 75nm e il parametro caratteristico della simulazione è la lunghezza del CNT a 80nm.

Vds	Vgs	Gate	Canale	Id
0,1	0,2	75	80	2,53E+04
0,2	0,2	75	80	3,75E+04
0,3	0,2	75	80	6,85E+04
0,4	0,2	75	80	9,40E+04
0,5	0,2	75	80	1,58E+05
0,6	0,2	75	80	2,08E+05

Tabella 4.11: valori quantitativi di Id per V_{gs}=0.2V, Gate=75nm, canale=80nm

Con questa configurazione, come evince dalla Figura 4.7 è evidente un comportamento regolare della corrente per valori di V_{ds} inferiori o uguali a 0.3V, per tensioni maggiori o uguali a 0.4V il transitorio è piuttosto oscillante in particolare con accentuati picchi iniziali.

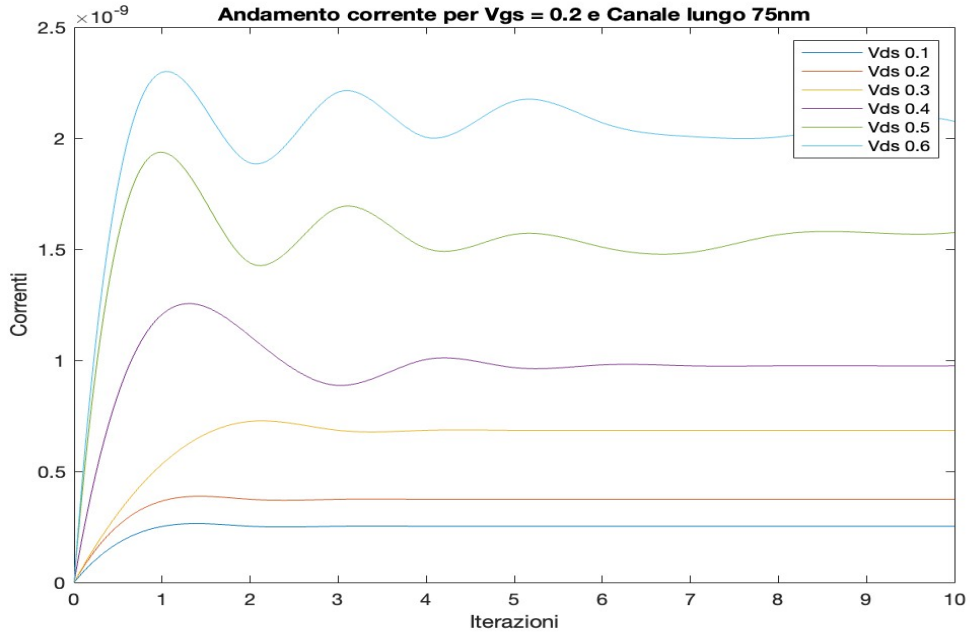


Figura 4.7: andamento correnti della simulazione riportata in Tabella 4.11

Nella Tabella 4.12 è presente la relativa tabella della simulazione che fornisce i valori della corrente sotto la colonna I_d in funzione della tensione V_{gs} costante a 0.4V, variando V_{ds} da 0.1V a 0.6V. La geometria in questo caso prevede una lunghezza del canale di 90nm.

Vds	Vgs	Gate	Canale	Id
0,1	0,4	75	90	1,04E+05
0,2	0,4	75	90	1,18E+05
0,3	0,4	75	90	1,26E+05
0,4	0,4	75	90	2,77E+05
0,5	0,4	75	90	5,63E+05
0,6	0,4	75	90	1,10E+06

Tabella 4.12: valori quantitativi di Id per V_{gs}=0.4V, Gate=75nm, canale=90nm

Sono rappresentati nella figura 4.8 gli andamenti di corrente relativi al gruppo di simulazioni. In questa configurazione, la risposta della corrente mantiene un andamento regolare per V_{ds} pari a 0.1V, 0.2V e 0.3V. Per valori di tensione più elevati la corrente cresce significamente in modulo e presenta anche delle oscillazioni fino alla iterazione numero 5 per V_{ds} di 0.5V e 0.6V.

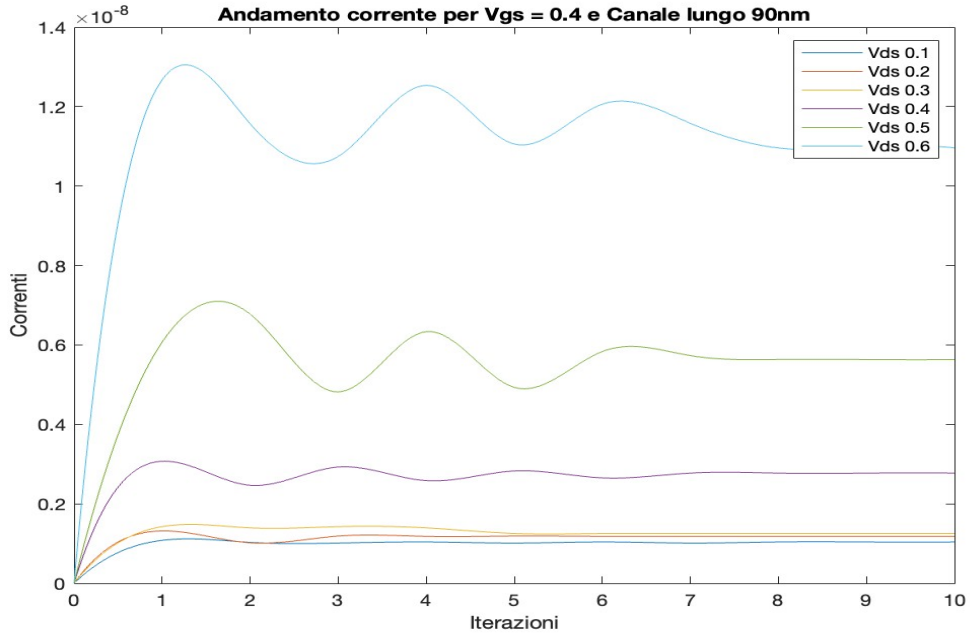


Figura 4.8: andamento correnti della simulazione riportata in Tabella 4.12

Come ultima simulazione è la seguente di cui dati sono riportati in Tabella 4.13. La lunghezza del CNT in questo caso è di 100nm mentre il valore di V_{gs} è fissato a 0.6V per tutte le iterazioni.

Vds	Vgs	Gate	Canale	Id
0,1	0,6	75	100	9,84E+04
0,2	0,6	75	100	1,07E+05
0,3	0,6	75	100	1,27E+05
0,4	0,6	75	100	1,60E+05
0,5	0,6	75	100	2,51E+05
0,6	0,6	75	100	3,32E+05

Tabella 4.13: valori quantitativi di Id per V_{gs}=0.6V, Gate=75nm, canale=100nm

In questo scenario, come ripotato in Figura 4.9 si hanno oscillazioni di corrente nelle iterazioni iniziali in quasi tutte le simulazioni eccetto per quella a V_{ds}=0.1V. Vi è un picco alquanto pronunciato per V_{ds}=0.6, ben più elevato rispetto al valore per V_{ds}=0.1V.

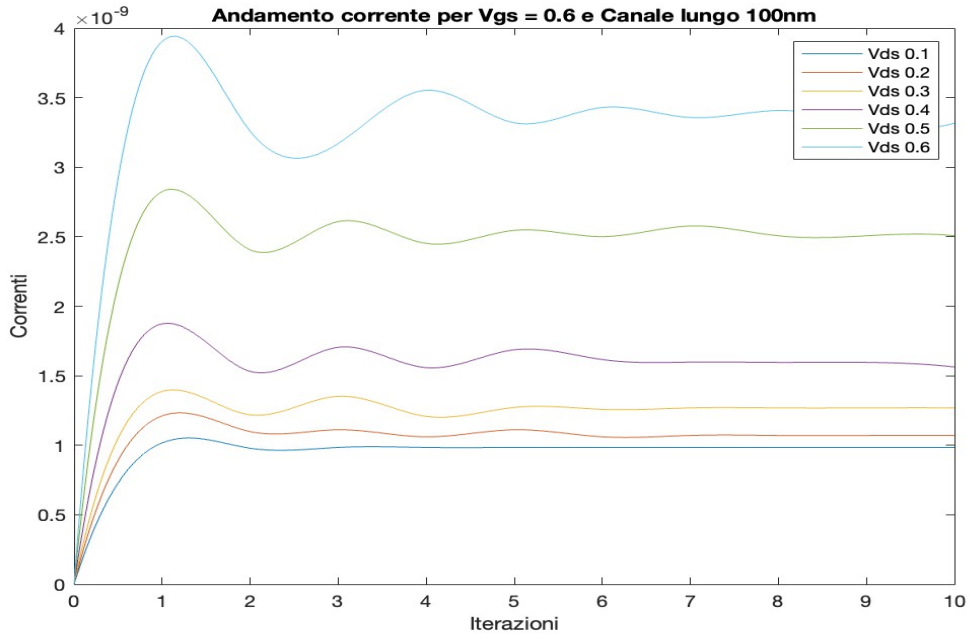


Figura 4.9: andamento correnti della simulazione riportata in Tabella 4.13

Conclusioni

Questo studio è stato ispirato dalla continua evoluzione della tecnologia dei semiconduttori e dalla crescente necessità di dispositivi più piccoli ed efficienti. In questa tesi, l'attenzione si è concentrata sulla simulazione di un transistor con un nanotubo in fibra di carbonio (CNTFET), un'alternativa promettente ai tradizionali transistor al silicio. L'obiettivo principale era progettare un transistor che potesse essere integrato in dispositivi elettronici generici e comprendere il suo comportamento attraverso simulazioni dettagliate.

Durante le simulazioni condotte utilizzando COMSOL Multiphysics e MATLAB, sono state esplorate varie configurazioni e parametri del transistor. Questo approccio ha permesso di ottenere una visione approfondita del comportamento del dispositivo. In particolare, l'uso simultaneo di COMSOL e MATLAB ha fornito una risoluzione elevata nell'equazione di Poisson, consentendo una modellazione precisa del potenziale e l'integrazione della meccanica quantistica. È importante sottolineare che si è operato sotto l'ipotesi di un mezzo senza perdite, il che significa che non sono state considerate dispersioni o assorbimenti energetici.

Un risultato notevole emerso dalle simulazioni riguarda il comportamento della corrente in funzione della tensione Vds. In generale, all'aumentare della tensione Vds, la corrente attraverso il dispositivo mostra oscillazioni. Queste oscillazioni sono più evidenti in alcune configurazioni e possono fornire informazioni importanti per ottimizzare ulteriormente la progettazione del transistor.

Per quanto riguarda i lavori futuri, ci sono diverse direzioni possibili. Una potrebbe essere l'ottimizzazione dei parametri del transistor per minimizzare o sfruttare al meglio le oscillazioni di corrente. Un'altra potrebbe essere l'analisi dei materiali dielettrici circostanti per tenere conto di eventuali perdite. Inoltre, potrebbe essere interessante sperimentare la realizzazione pratica di dispositivi funzionanti. Infine, esplorare ulteriormente il potenziale dei CNTFETs in applicazioni di semiconduttori avanzati e microprocessori tridimensionali potrebbe contribuire alla continua evoluzione della tecnologia elettronica.

Bibliografia

[1] R. Martel, T. Schmidt, H. R. Shea, T. Hertel, and Ph. Avourisa. Single and multi-wall carbon nanotube field-effect transistors, *T. J. Watson Research Center*, August 1998.

[2] D. Mencarelli, T. Rozzi, C. Camilloni, L. Maccari, A. di Donato and L. Pierantoni. Modelling of multi-wall CNT devices by self-consistent analysis of multichannel transport, *Nanotechnology*, March 2008.Michael Riordan. Transistor, *Encyclopaedia Britannica*, August 2023.

[3] Sharon Gaudin. The transistor: The most important invention of the 20th century?, *COMPUTERWORLD*, December 2017.

[4] Cao Q. Carbon nanotube transistor technology for More-Moore scaling, *Nano Research*, 2021, 14(9): 3051-3069.

[5] Michael Riordan. Transistor, *Encyclopaedia Britannica*, August 2023.

[6] John H. Davies. The Physics of Low-dimensional Semiconductors: An Introduction, *Cambridge University Press*, 1997.

[7] Malecek, Adam. For first time, carbon nanotube transistors outperform silicon, *University of Wisconsin-Madison*, September 2021.

[8] Yu-Ming Lin; J. Appenzeller; J. Knoch; P. Avouris.High-performance carbon nanotube field-effect transistor with tunable polarities, *IEE Transactions on Nanotechnology*, September 2016, 481-489.

[9] Jinbo Pang, Alicja Bachmatiuk, Feng Yang, Hong Liu, Weijia Zhou, Mark H. Rümmeli and Gianaurelio Cuniberti. Applications of Carbon Nanotubes in the Internet of Things Era, *Springer Nature Switzerland AG*, September 2021.

[7] Cao Q. Carbon nanotube transistor technology for More-Moore scaling, *Nano Research*, 2021, 14(9): 3051-3069.

[8] Rizwan Shoukat and Muhammad Imran Khan . Carbon nanotubes/nanofibers (CNTs/CNFs): a review on state of the art synthesis methods, *Microsystem Technologies* 2022, 28: 885–901.

[9] A. Raychowdhury; A. Keshavarzi; J. Kurtin; V. De; K. Roy. Carbon Nanotube Field-Effect Transistors for High-Performance Digital Circuits—DC Analysis and Modeling Toward Optimum Transistor Structure, *IEEE Transactions on Electron Devices*, November 2006.

[10] Lu-Chang Qina. Determination of the chiral indices (n,m) of carbon nanotubes by electron diffraction, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2007.

[11] Mike Williams. Two-faced edge makes nanotubes obey, *New Relases*, July 2018.

[12] R. Zhang, Y. Feng, H. Li, A. Kumamoto, S. Wang, Y. Zheng, W. Dai, N. Fang, M. Liu, T. Tanaka, Y. K. Kato, H. Kataura, Y. Ikuhara, S. Maruyama, R. Xiang. Fabricating one-dimensional van der Waals heterostructures on chirality-sorted single-walled carbon nanotubes, *Carbon*, 2022, 407.

[13] Riccardo Norizzano and Fulvia Risso. I Nanotubi al Carbonio: topologia e proprietà elettroniche, *Il chimico Italiano*, June 2008.

[14] Daniel Fleisch (Autore), Domenico Di Mauro (Traduttore). Guida allo studio dell equazione di Schrödinger, *Editori Riuniti Univ. Press*, 2021.

[15] Robert C. McOwen. Partial Differential Equations: Methods and Applications, *PERSON*, 1996.