



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

Tesi di Laurea Specialistica in Ingegneria Elettronica

**SIMULAZIONI PER LO STUDIO DEGLI EFFETTI DA EVENTO SINGOLO
SU SRAM CON ISE TCAD.**

Relatore: Prof. ALESSANDRO PACCAGNELLA

Correlatore: SIMONE GERARDIN

Laureando: ELISA CAPPELLARI

Anno Accademico 2010 – 2011

A zia Teresa

*- L'universo è come una cassaforte per cui esiste una combinazione...
ma la combinazione è chiusa dentro la cassaforte -*

Peter DeVries

Indice

<i>Sommario</i>	<i>I</i>
CAPITOLO I	1
1.LE RADIAZIONI IONIZZANTI	1
1.1. Un po' di storia.....	1
1.2. I raggi cosmici	2
1.3. L'interazione della radiazione con la materia.....	4
1.3.1. Dislocamento atomico.....	4
1.3.2. Ionizzazione.....	4
CAPITOLO II	7
2.SEE: MECCANISMI E CLASSIFICAZIONE	7
2.1. Meccanismi fisici base di generazione degli SEE.....	7
2.1.1. Deposito di carica.....	8
2.1.2. Trasporto e raccolta di carica.....	9
2.2. SEE: classificazione	11
2.3. SEU in circuiti di memoria.....	12
2.3.1. Meccanismi di SEU in memorie DRAM.....	12
2.3.2. Meccanismi di SEU in memorie SRAM.....	14
2.4. SEE in circuiti logici	16
2.4.1. Soft fault combinatori	16
CAPITOLO III	19
3.MODELLIZZAZIONE DEI DISPOSITIVI MICROELETTRONICI	19
3.1. Approcci sulla modellizzazione del dispositivo.....	20
3.1.1. Modello Drift-Diffusion (DD).....	24
3.1.2. Modello Hydrodynamic (HD).....	25
3.1.3. Soluzione diretta delle Equazioni di Trasporto di Boltzmann (BTE) con il metodo Monte Carlo (MC).....	28
3.1.4. Trasporto quantistico.....	29
3.2. Effetti fisici emergenti.....	30
3.2.1. Confinamento quantico.....	30
3.2.2. Trasporto balistico e quasi-balistico	31
CAPITOLO IV	33
4.METODOLOGIE DI SIMULAZIONE PER SEE	33
4.1. Calibrazione del dispositivo	33
4.2. Simulazioni multidimensionali del dispositivo.....	33
4.3. Modelli di dispositivo/circuito	34
4.3.1. Circuit Level.....	36

4.3.2.	<i>Tecnica Mixed-Mode</i>	36
4.3.3.	<i>Simulazioni completamente numeriche</i>	37
4.4.	Struttura della traccia dello ione impattante	38
4.5.	Gridding	41
4.6.	Validazioni sperimentali	42
4.7.	Recenti sviluppi	43
CAPITOLO V		45
5.TOOLS ISE-TCAD E SIMULAZIONI PER SEE		45
5.1.	DEVISE	47
5.2.	GENESISe	52
5.3.	DESSIS	56
5.3.1.	<i>Sessione File</i>	57
5.3.2.	<i>Sessione Electrode</i>	57
5.3.3.	<i>Sessione Physics</i>	58
5.3.4.	<i>Sessione Plot</i>	58
5.3.5.	<i>Sessione Math</i>	59
5.3.6.	<i>Sessione Solve</i>	59
5.4.	INSPECT	59
5.5.	Tecplot_ISE	59
5.6.	Tecnica Mixed-mode per lo studio degli SEE	60
5.6.1.	<i>Heavy ions</i>	63
5.6.2.	<i>LET di soglia</i>	64
CONCLUSIONI		69
ALLEGATI.....		71
1.ALLEGATO 1		72
2.ALLEGATO 2		85
	<i>Ringraziamenti</i>	87
BIBLIOGRAFIA.....		91

Allegati

- Allegato 1** *nMOSFET e pMOSFET 3D* pag. 72-84
- Allegato 2** *File per Dessis per simulazione della
caratteristica I_d - V_g* pag. 85-88

Sommario

La progressiva riduzione della dimensione dei dispositivi richiede sempre più complessi e lunghi i processi produttivi. Allo stesso tempo, la fabbricazione di dispositivi con architetture alternative, rispetto a quelle finora conosciute, risulta molto costosa e non ancora matura. Questo rende difficile e dispendioso studiare sperimentalmente gli effetti delle radiazioni su questi nuovi dispositivi ultra-scaled.

Al giorno d'oggi i computer sono considerati la risorsa più economica e quindi le simulazioni diventano uno strumento indispensabile per l'ingegnerizzazione dei dispositivi, non solo per la loro ottimizzazione, ma anche per studi specifici come la sensibilità degli stessi alle radiazioni ionizzanti. L'elaborato si propone quindi di illustrare le metodologie con le quali tali analisi vengono affrontate, fornendo l'esempio dello studio svolto su una cella di memoria SRAM.

Il primo capitolo è una panoramica generale sulle radiazioni ionizzanti e sulle interazioni di queste con la materia. Essa è di introduzione alla più approfondita analisi dei meccanismi che generano SEE condotta nel secondo capitolo. Nel terzo capitolo viene invece trattato come vengono modellizzati i dispositivi/circuiti, in fase simulativa, a seconda di come avviene il trasporto dei portatori al loro interno.

Gli ultimi capitoli risultano essere i più interessanti a livello pratico. Infatti il quarto capitolo, fornisce passo passo la metodologia di simulazione per gli SEE, mentre nel quinto questa metodologia viene "applicata" per l'analisi della LET di soglia di una cella SRAM utilizzando il software di simulazione ISE TCAD.

CAPITOLO I

1. LE RADIAZIONI IONIZZANTI

1.1. Un po' di storia

Nei primi anni del secolo scorso alcuni esperimenti hanno messo in evidenza l'esistenza di una forma di radiazione fino ad allora sconosciuta. L'esistenza dei raggi cosmici fu scoperta dal fisico tedesco Victor Hess. Nel 1912, Hess caricò su un pallone aerostatico un dispositivo per misurare le particelle cariche, detto elettroscopio a foglie, e intraprese un viaggio che dimostrò come la quantità di particelle cariche (e quindi di radiazione) aumentasse con l'altitudine. Questo significava che la radiazione sconosciuta non aveva origine terrestre (come la radioattività naturale) ma provenisse dallo spazio esterno, da cui il nome di *Raggi Cosmici*.

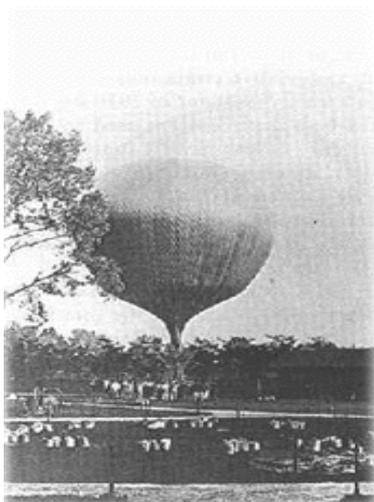


Figura 1.1: Victor Hess e l'esperimento che portò alla scoperta dei raggi cosmici e gli conferì il premio Nobel nel 1936.

Da quel primo esperimento ad oggi i raggi cosmici sono stati intensamente studiati. Da misure fatte su palloni aerostatici a grande altitudine o su satelliti si è a conoscenza che la grandissima maggioranza dei raggi cosmici è costituita da protoni (circa 90%); vi sono poi nuclei atomici (ovvero atomi privi dei loro

elettroni) di svariati elementi, da quelli più leggeri come l'elio (circa 9%) fino ai più pesanti (circa 1%) come ferro e addirittura uranio.

Dal 1920 al 1950, fino all'affermazione delle macchine acceleratrici di particelle, i raggi cosmici furono di estrema importanza per la fisica delle alte energie in quanto costituivano una sorgente naturale di particelle, spesso sconosciute. Lo studio dei raggi cosmici portò infatti alla scoperta del positrone e del muone, quest'ultima ad opera dei fisici italiani Conversi, Pancini e Piccioni.

1.2. I raggi cosmici

I *Raggi Cosmici* sono particelle e nuclei atomici di alta energia che, muovendosi quasi alla velocità della luce, colpiscono la terra da ogni direzione. Come dice il nome stesso, provengono dal Cosmo, cioè dallo spazio che ci circonda. La loro origine è sia galattica che extragalattica.

La maggior parte dei raggi cosmici è prodotta quando una stella, finita la sua normale vita, diventa una *gigante rossa* e quindi esplose dando vita ad una *supernova* producendo così *raggi cosmici*, oltre a disseminare nel cosmo ossigeno, carbonio, ferro. I raggi cosmici, urtando poi contro gli atomi nell'atmosfera terrestre, producono particelle che vengono sia identificate sulla superficie terrestre che sotto terra.

Sia i protoni che i nuclei sono carichi positivamente quindi la quasi totalità dei raggi cosmici ha carica positiva. Essi contengono però anche una piccola percentuale di elettroni, positroni, fotoni e altre particelle subatomiche. Hanno energie che variano in un intervallo molto ampio e tale energia si esprime in *elettronvolt* (eV).

I Raggi Cosmici di energia più bassa sono i più numerosi, mentre il loro numero diminuisce all'aumentare dell'energia. Per questo motivo è molto difficile riuscire ad osservare i raggi cosmici di energia elevatissima. Nonostante questa difficoltà sono stati realizzati molti esperimenti per cercare di rispondere il più esattamente possibile alla domanda ancora senza risposta: da dove vengono e da cosa sono prodotti? Infatti, essendo i raggi cosmici dotati di carica elettrica, essi vengono deviati dai campi magnetici galattici e dal campo magnetico terrestre quando arrivano in prossimità della Terra. La loro direzione originaria viene modificata e per questo motivo è difficile capire da dove essi hanno origine.

Si pensa che i Raggi Cosmici, almeno quelli con energie fino a 10^{15} eV, vengano accelerati in seguito alle esplosioni di Supernovae nella nostra Galassia.

Un'esplosione di Supernova produce una fortissima onda d'urto che si propaga nel gas interstellare ed è in grado di accelerare le particelle e i nuclei anche ad energie molto elevate come quelle che vediamo nei raggi cosmici.

Per quanto riguarda i raggi cosmici di altissima energia, ancora non si è riusciti a scoprire la loro origine, ma sono in corso moltissimi esperimenti.

Quando i Raggi Cosmici entrano nell'atmosfera terrestre collidono con i nuclei di cui essa è composta. In queste collisioni viene prodotto un gran numero di particelle che a loro volta interagiscono o decadono creandone delle altre. Il risultato è quello che viene chiamato "shower", ossia doccia di particelle. Molte di esse, soprattutto elettroni, muoni, fotoni e neutrini arrivano fino alla superficie terrestre e vengono chiamate raggi cosmici secondari per distinguerli da quelli primari che hanno colpito l'atmosfera.

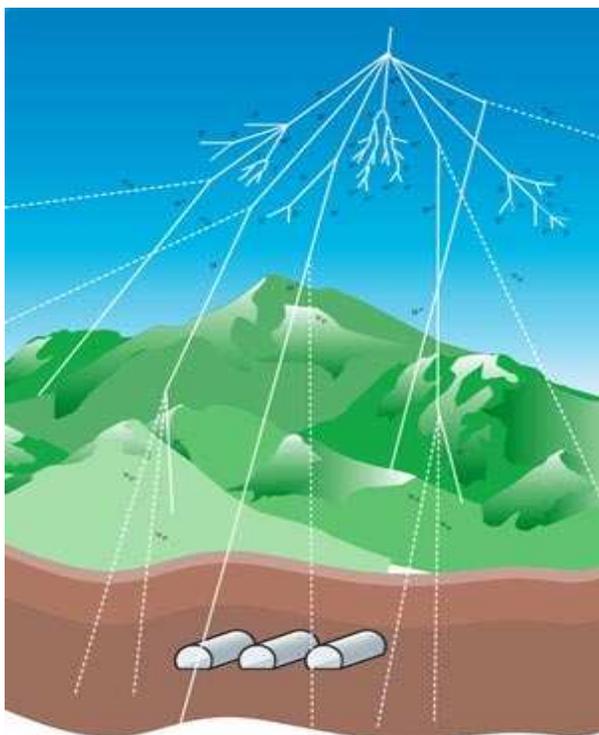


Figura 1.2:

Pioggia di particelle creata dall'interazione di un raggio cosmico con l'atmosfera.

Se si vogliono rilevare i raggi cosmici primari, si devono usare esperimenti posti su satelliti in orbita, che riescono a "catturare" i raggi cosmici prima che essi interagiscano con l'atmosfera. Con questo metodo si riescono a rivelare bene i raggi cosmici fino ad energie non troppo elevate.

Quando l'energia aumenta e il flusso di raggi cosmici diventa molto basso, bisogna avere grandi superfici sperimentali, che, per ovvi motivi, non possono essere montati su satelliti. Per raggi cosmici di energia elevata si usano esperimenti sulla superficie terrestre o in laboratori sotterranei. Questi esperimenti rivelano i

raggi cosmici secondari prodotti nell'interazione del primario con l'atmosfera. Dalle caratteristiche dello "shower" di particelle si può ricavare l'energia e la direzione del raggio cosmico primario.

Gli esperimenti sotterranei possono rivelare solo i muoni e i neutrini secondari, in quanto queste sono le uniche particelle che possono arrivare in profondità sottoterra. La superficie dell'esperimento deve essere tanto più grande quanto più elevata è l'energia dei raggi cosmici che si vogliono rivelare.

1.3. L'interazione della radiazione con la materia

Esistono diverse tipologie di interazione della radiazione con la materia. In questo paragrafo illustreremo brevemente le conseguenze indotte da tale interazione.

1.3.1. Dislocamento atomico

Lo dislocamento atomico, cioè lo spostamento di atomi dalla loro posizione originale, rappresenta il danno maggiore creato da una particella. La traiettoria della particella e il danno prodotto, dipendono dall'energia, dalla massa, dalla carica della particella stessa e dalla natura della materia. Questo fenomeno è ciò che avviene anche durante il drogaggio del silicio per impiantazione ionica.

Materiali esposti ad ambienti di particelle energetiche possono diventare radioattivi. Protoni, neutroni e nuclei sono tutte particelle in grado di trasformare nuclei stabili in radioattivi, ma comunque dipende dal particolare atomo.

E' inoltre importante sottolineare che differenti tipi di solidi subiscono livelli diversi di danni indotti da particelle. I più vulnerabili sono i semiconduttori e gli isolanti.

1.3.2. Ionizzazione

L'interazione tra radiazioni energetiche e strutture elettroniche degli atomi, può causare transizioni in singoli atomi. Questo comporta ad una serie di eventi che inizia quando gli elettroni sono "espulsi" dai livelli orbitali a bassa energia dal fotone energetico entrante o dalla particella. Elettroni provenienti da altri livelli riempiono quelli lasciati vacanti e si ha come risultato delle emissioni di raggi X, caratteristiche dell'eccitazione dell'atomo. Oltre alla locale eccitazione atomica, la

perdita di energia nel semiconduttore viene convertita in produzione di coppie elettrone-lacuna. Sia le particelle energetiche che i fotoni sono in grado di causare danni da ionizzazione. L'eccitazione degli elettroni in banda di valenza in quella di conduzione crea portatori carichi che si muovono nel campo elettrico. Di contro si ha anche un lento movimento di lacune lasciate in banda di valenza.

del

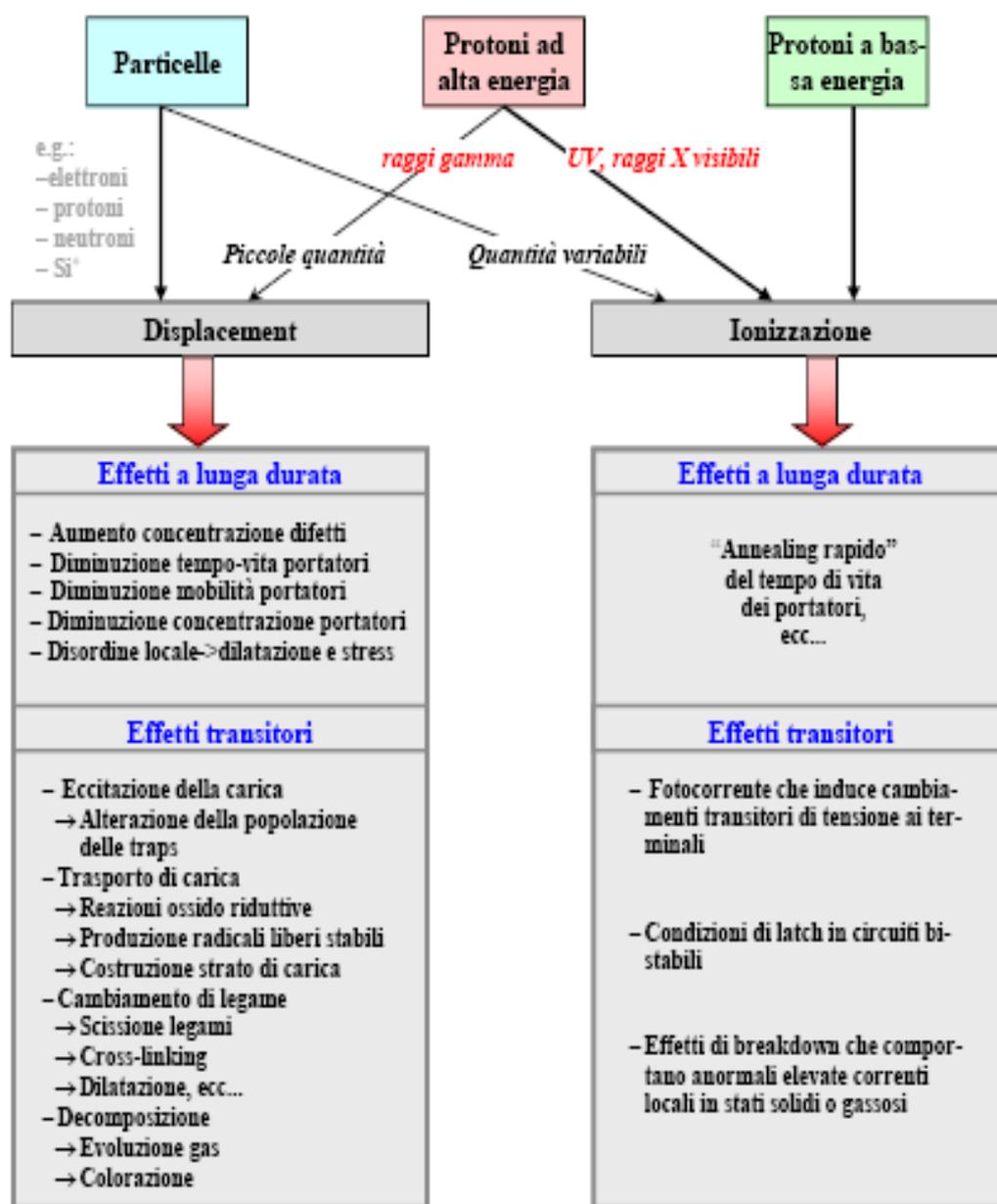


Figura 1.3: Sommario degli effetti di degradazione indotti da radiazione nei materiali a stato solido e nei dispositivi. Adattato da [41] p.394.

Permanente				Temporaneo			
Dispositivi, Circuiti e Componenti	Degr. tempo di vita	Rimozione di portatori	Trapping	Degr. mobilità	Buildup carica	Latchup	Assorbi mento
Transistor Si bipolari e circuiti integrati	P	S			S	P	P
Transistor MOS Si e circuiti integrati				S	P	P	P
JFETs		P	P	S	S		
Diodi a giunzione p-n	P	P	P		S		
LEDs, diodi laser	P						
Dispositivi charge-coupled	P		P		P		
Fotorilevatori	P				P		
Dispositivi microonde e circuiti	P	P		S			
Transistor GaAs e circuiti integrati		P		S	S		
Capacitori					P		P
Resistori		P		S			
Componenti ottici (fibre, finestre, specchi)							P

Figura 1.1: Meccanismi di danno primarie e secondarie in vari dispositivi, circuiti e componenti nell'ambiente delle radiazioni spaziali. P: primario, S:secondario. Adattato da [41] p.396.

CAPITOLO II

2. SEE: MECCANISMI E CLASSIFICAZIONE.

Gli effetti da evento singolo (*Single Event Effect: SEE*) in microelettronica sono causati quando particelle ad alta energia naturalmente presenti nello spazio come protoni, neutroni, particelle alpha, o altri ioni pesanti, impattano in una regione sensibile di un dispositivo. A seconda di diversi fattori, questi SEE possono causare effetti non osservabili, la perturbazione dell'operazione in corso, il cambiamento dello stato logico, fino ad arrivare ad un danno permanente del dispositivo.

La prima pubblicazione che ha trattato il problema degli SEE non era sull'uso dell'elettronica in ambiente spaziale, bensì sul trend di scaling dell'elettronica in ambiente terrestre [1]. In questa pubblicazione, gli autori facevano delle previsioni sul verificarsi di SEE dovuti a raggi cosmici terrestri e prevedettero che il minimo volume dei dispositivi a semiconduttore sarebbe stato attorno ai 10 μ m, limitato appunto dagli upsets che da essi ne derivavano. In questa pubblicazione del 1962, gli autori scrissero: *“Già ad oggi la parte essenziale dei dispositivi a semiconduttore, la regione attiva, è vicina al minimo dimensionamento possibile”* [1].

Il primo report di conferma sugli upsets indotti da raggi cosmici nello spazio si ebbe qualche anno più tardi, nel 1975, presentato da Binder et al. [2], ma, il verificarsi di soft errors nella microelettronica terrestre, si manifestò di lì a poco la prima osservazione di SEU nello spazio [3]. Successivamente, con l'uso di nuovi e diversi materiali per la fabbricazione degli IC e di schermature, il problema di soft error a livello terrestre essenzialmente scomparve per alcuni anni. Solo recentemente sta diventando nuovamente un serio problema.

Risulta quindi fondamentale definire e classificare questo tipo di errori, ma soprattutto comprendere i meccanismi fisico che li generano.

2.1. Meccanismi fisici base di generazione degli SEE

I meccanismi fisici relativi alla produzione di SEE nei dispositivi microelettronici si possono riassumere essenzialmente in tre principali modi:

- 1) deposito di carica da parte della particella che impatta la regione sensibile,

- 2) trasporto della carica depositata nel dispositivo,
- 3) collezione della carica nella regione sensibile del dispositivo.

2.1.1. Deposito di carica

Vi sono due principali metodi per rilascio di carica in dispositivi a semiconduttore da radiazione: per ionizzazione diretta da particella incidente, per ionizzazione indiretta da reazioni nucleari tra la particella e il dispositivo. Entrambi i meccanismi possono portare al malfunzionamento del dispositivo.

- 1) *Ionizzazione diretta*: avviene quando una particella carica energeticamente passa attraverso un materiale semiconduttore liberando coppie elettrone-lacuna lungo la sua traccia perdendo man mano energia. Ci si riferisce alla *lunghezza della traccia* come range della particella quando tutta la sua energia è stata dispersa ed essa è diventata parte del resto del semiconduttore. L'energia persa per unità di lunghezza della traccia della particella, viene definita tramite la sigla LET^1 , *linear energy transfer*. La ionizzazione diretta è il meccanismo primario di upset per deposito di carica causato da ioni pesanti, dove si indica con *ione pesante* uno ione con numero atomico maggiore o uguale a due. Particelle leggere come i protoni, non possono produrre sufficiente carica da ionizzazione diretta per causare upset in circuiti di memoria, anche se, studi più recenti, hanno suggerito che un dispositivo può diventare molto sensibile anche ad upset dovuti a ionizzazione diretta prodotta da protoni [5],[6].
- 2) *Ionizzazione indiretta*: quando particelle leggere non producono sufficiente carica da causare un upset, non significa che possano essere ignorate. Infatti, protoni e neutroni, possono entrambi causare upset significativi dovuti a meccanismi indiretti. Se tali particelle ad alta energia entrano nel reticolo di un semiconduttore, possono verificarsi delle collisioni anelastiche con i

¹ LET: l'unità di misura è MeV-cm²/mg, poiché la perdita di energia per unità di lunghezza (in MeV/cm) viene normalizzata dalla densità del materiale bersaglio (in mg/cm³), in modo tale che la LET possa essere quantificata indipendentemente dal bersaglio. Risulta quindi semplice relazionare la LET di una particella con la carica da essa depositata per unità di lunghezza della traccia. Nel silicio, ad esempio, una LET di 97MeV-cm²/mg corrisponde ad 1pC/μm di carica depositata. Questo fattore 100 permette una rapida conversione tra LET e carica depositata essendo molto semplice da memorizzare. Una semplice regola per indicizzare la LET massima (in MeV-cm²/mg) dello ione è porla uguale al suo numero atomico Z. Una più rigorosa discussione della curva di Bragg e quindi del picco di Bragg si può trovare in [4].

nuclei del bersaglio dando origine a diverse reazioni nucleari. Queste reazioni possono consistere in:

- reazioni elastiche che generano Si,
- emissione di particelle alpha o gamma,
- reazioni spallation, in cui il nucleo bersaglio viene diviso in due frammenti.

Ognuna di queste reazioni prodotte possono a loro volta depositare energia per ionizzazione diretta lungo il loro percorso. Poiché queste particelle sono molto più pesanti rispetto a quelle di origine (protoni e neutroni), esse, lungo il loro percorso depositano un'alta densità di carica e questa può essere in grado di causare un SEU. Tipicamente, però, i prodotti di urti anelastici non percorrono molto spazio dal punto di impatto ed inoltre hanno la tendenza a tornare nella direzione della particella di origine. Questo ha come conseguenza che la sensibilità agli SEU è funzione dell'angolo di incidenza. Una volta che una reazione nucleare si è verificata, la carica depositata da particelle secondarie cariche è pari a quella che si sarebbe depositata per ionizzazione diretta da ione pesante.

La ionizzazione e l'eventuale riscaldamento delle coppie elettrone-lacuna sono i maggiori responsabili per gli SEE nei circuiti integrati. Dato che la ionizzazione può essere il risultato sia dell'interazione diretta tra la particella incidente con il circuito, che indotta da interazione indiretta, la barriera di Coulomb risulta un parametro importante. Infatti, il valore di tale parametro, permette di stabilire il potenziale minimo perché avvengano reazioni nucleari tra lo ione penetrante e gli atomi del bersaglio. L'equazione, nota dalla fisica nucleare come l'energia necessaria per portare due nuclei in collisione, fornisce il valore della barriera di Coulomb come funzione del numero e della massa atomici dello ione incidente (Z_1, A_1) e (Z_2, A_2) del nucleo bersaglio:

$$(2.1) \quad 1.03 \left(\frac{1 + A_1}{A_2} \right) \left(\frac{Z_1 Z_2}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}} \right) MeV$$

2.1.2. *Trasporto e raccolta di carica*

I portatori rilasciati quando una particella ionizzante genera una colonna di carica in un materiale semiconduttore, vengono velocemente trasportati e raccolti nelle strutture elementari, principalmente nelle giunzioni p-n polarizzate

inversamente che risultano essere le regioni più sensibili. L'elevato campo presente in queste regioni risulta molto efficiente nel collezionare le cariche indotte dalla particella impattante attraverso processi di drift, portando ad una corrente transitoria nella giunzione di contatto. Di contro, impatti vicini a regioni di svuotamento possono avere come risultato una corrente transitoria significativa dovuta alla diffusione dei portatori nelle vicinanze del campo della regione di svuotamento, dove vengono raccolti. Il trasporto della carica risulta quindi dovuto a due principali meccanismi: drift di cariche in regioni con campo elettrico e diffusione in zone neutre. Successivamente le cariche depositate possono a loro volta ricombinarsi con altre mobili presenti nel reticolo.

Dopo le prime scoperte di SEU, sono state condotte simulazioni che hanno però rilevato l'esistenza di un disturbo transitorio nel potenziale elettrostatico che è stato denominato "field funnel". L'effetto di funneling può aumentare la raccolta di carica nel nodo colpito tramite estensione del campo elettrico della giunzione anche lontano dalla stessa e arrivare in profondità nel substrato così che la carica si deposita ad una certa distanza dalla giunzione e può esser raccolta attraverso un efficiente processo di drift.

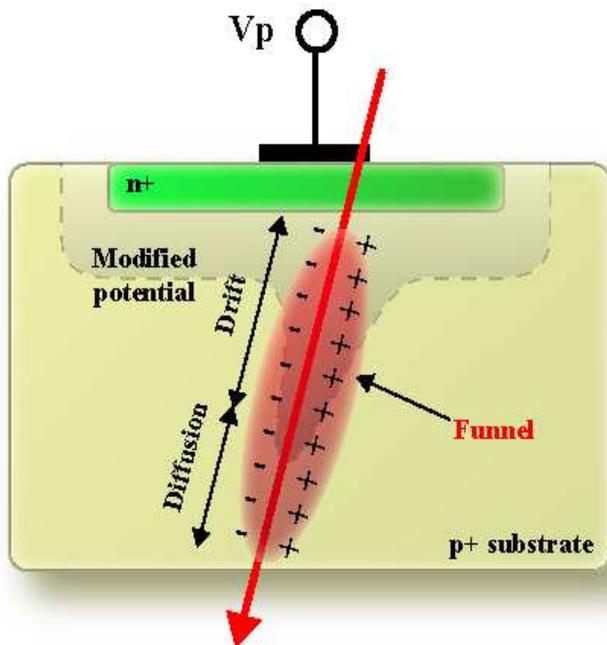


Figura 2.1: Funneling del campo di giunzione dovuto alla carica depositata da una particella ionizzante

Mentre in alcuni casi il ruolo del funnel è importante dal punto di vista della carica immagazzinata, come ad esempio in giunzioni p-n isolate con applicata una tensione costante, nel caso di circuiti statici come SRAM, assume un ruolo meno

significativo, in quanto le giunzioni del transistor polarizzate inversamente sono collegate a circuiti attivi esterni. In questo caso, la tensione applicata al nodo colpito non è costante e molto spesso infatti tale nodo commuta a zero. Questa perdita di potenziale nel nodo colpito tende a far diminuire d'importanza la raccolta tramite il processo di drift man mano che il transitorio procede.

Diversi studi indicano che per MOS di dimensioni sempre inferiori, è presente un nuovo meccanismo di raccolta di carica e che per il suo studio è necessario analizzare l'intero transistor. Esso ha avuto riscontri attraverso simulazioni 3D con particelle alpha e successivamente è stato poi verificato sperimentalmente. In poche parole, immediatamente dopo l'impatto, il potenziale elettrostatico nella regione del canale viene perturbato, conducendo ad una significativa corrente source-drain che simula lo stato "on" del transistor.

2.2. SEE: classificazione

La sigla *Single-event effects* (SEE), indica ogni cambiamento di stato o di performance misurabile o osservabile in un dispositivo, componente, sistema o sottosistema microelettronico, derivante dall'impatto di una singola particella energetica, come definito da JEDEC standard JESD89A.

Per i diversi tipi di SEE si possono identificare tre macro famiglie, a seconda delle conseguenze dell'impatto sul dispositivo. Si hanno quindi:

- 1) *Soft Error*: indica un errore causato da una radiazione o da un impulso elettromagnetico, non imputabile a difetti fisici dovuti al processo di costruzione del dispositivo. Questo tipo di errori avvengono in dispositivi contenenti celle di memoria o latch. Non sono errori permanenti e possono esser cancellati resettando il sistema o riscrivendo il dato nella memoria. Essi possono esser generati da: SEU, SEFI, MBU, SET. Storicamente, il termine "*soft error*" è stato introdotto, per la prima volta, da May e Woods per Intel nella loro pubblicazione nell'Aprile del 1978, mentre "*single event effect*" venne introdotto da Guenzer, Wolieki e Allas di NRS nella loro pubblicazione del 1979.
- 2) *Hard error*: si ha quando si verifica un irreversibile cambiamento nell'operatività del dispositivo associato con ad un danno permanente di uno o più elementi del dispositivo o del circuito. L'errore è definito "hard" in quanto il dato è perso e il bersaglio non può esser rimesso in funzione nemmeno con operazioni di reset o di riinizializzazione.

- 3) *Destructive error*: si verifica quando il SEE causa la distruzione del dispositivo che viene colpito. Sono distruttivi: SEL, SEB, SEGR, ...

2.3. SEU in circuiti di memoria

Le memorie risultano essere molto sensibili agli effetti di evento singolo. Come sappiamo ne esistono di diversi tipi ed esse si possono essenzialmente distinguere in due categorie in base al modo con cui in esse si memorizzano i dati: tramite immagazzinamento di carica elettrica o tramite stato logico. Le prime risultano sensibili a SEE mediante deposizione di carica, mentre le seconde sono vulnerabili agli impulsi di corrente.

La tabella sottostante riassume i principali tipi di memorie presenti in commercio, come in esse vengono mantenuti i dati e l'eventuale possibilità di riscrittura "on line" nel caso si verifichi un SEE.

<i>Tipo di memoria</i>	<i>Metodo immagazzinamento</i>	<i>Riscrittura "on line"</i>
ROM	Layout di programma	No
PROM	Fuse/antifuse	No
REPROM, OTPROM	Carica elettrica	No
EEPROM, FLASH, DRAM	Carica elettrica	Si
SRAM	Stato logico latch	Si
Ferroelectric RAM	Dipolo elettrico	Si

Tabella 2.1: Metodi di immagazzinamento e possibilità di riscrittura on-line dei dati delle principali tipologie di memoria presenti in commercio

2.3.1. Meccanismi di SEU in memorie DRAM

La tecnologia DRAM rappresenta la classe più estesa di dispositivi, solitamente ad un transistor, per la memorizzazione di informazione binaria. In questa tipologia di memoria l'informazione è immagazzinata passivamente, quindi ogni disturbo del dato memorizzato è persistente finché non viene corretto tramite circuito esterno [7]. In esse infatti non è presente né una modalità di refresh della carica, né un feedback attivo. Affinché avvenga un SEU in una cella DRAM, non è necessario che avvenga un bit flip, cioè la transizione da uno stato binario stabile all'altro, ma è invece sufficiente la degradazione del dato memorizzato. Il raggiungimento del livello del margine di rumore in uscita, è sufficiente per portare ad un'erronea interpretazione e quindi ad un errore.

Vi sono due parametri chiave relativi agli upset nelle DRAM: il margine di rumore associato con il segnale di bit e la finestra di tempo critico (perché la vulnerabilità agli upset non è costante con il tempo). Il margine di rumore è strettamente collegato con il concetto di carica critica, Q_{crit} , definita come la quantità minima di carica immagazzinata ad un nodo sensibile necessaria a causare un upset del circuito. Tale definizione non è sempre appropriata per tutti i circuiti, dato che può variare in relazione al tempo di impatto e alla caratteristica dinamica della cella.

La maggiore sorgente di SEE in celle DRAM è causata da un singolo impatto nel condensatore o nel source del transistor di accesso.

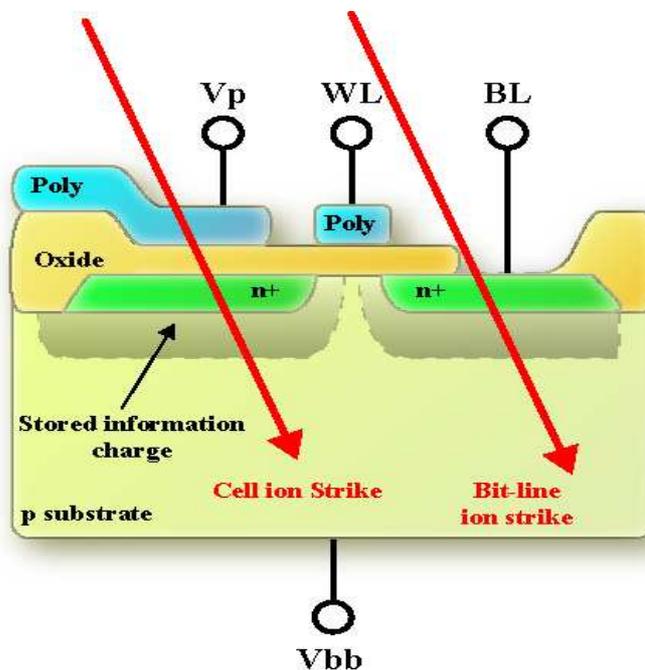


Figura 2.2: Cella DRAM impattata in corrispondenza della cella e della sua bitline.

Un upset della cella dovuto ad immagazzinamento di carica, solitamente si osserva come una transizione $1 \rightarrow 0$ del dato.

SEU nelle celle DRAM possono verificarsi anche mediante un impatto nella bit-line. Quando la bit-line è in uno stato di floating voltage, come ad esempio durante il ciclo di lettura, la memoria risulta sensibile alla raccolta di carica nelle regioni di diffusione che sono elettricamente connesse con le bit-line di accesso. Questa carica può sorgere da un qualsiasi drain dei transistor di accesso lungo la bit-line o per impatto diretto nel sense amplifier. I bit-line strikes sono inoltre possibili durante le operazioni di precarica, dove il soft error rate risulta

inversamente proporzionale con il tempo di ciclo della memoria, mentre invece gli upset di cella ne risultano indipendenti [8].

Nel 1988, Rajeevakumar *et al.* [9] osservarono un nuovo meccanismo che causava errore: la combinazione della raccolta di carica nel condensatore con l'errore sulla bit-line. Infatti per entrambi i processi presi individualmente, la carica raccolta risultava inferiore a Q_{crit} , ma, combinando gli effetti durante l'operazione di lettura, veniva causato un errore.

Un altro fattore molto importante per determinare la sensibilità delle celle DRAM agli SEU è la tecnologia per la memorizzazione del dato. Esistono infatti diverse strutture di immagazzinamento per le memorie DRAM, come ad esempio svariati condensatori a stack.

2.3.2. Meccanismi di SEU in memorie SRAM

I processi di upset per memorie SRAM risultano abbastanza differenti da quelli che li generano nelle DRAM. Ciò è dovuto alla presenza di un feedback attivo nella coppia di invertitori cross-accoppiati che caratterizza la tipica struttura di questa tipologia di cella.

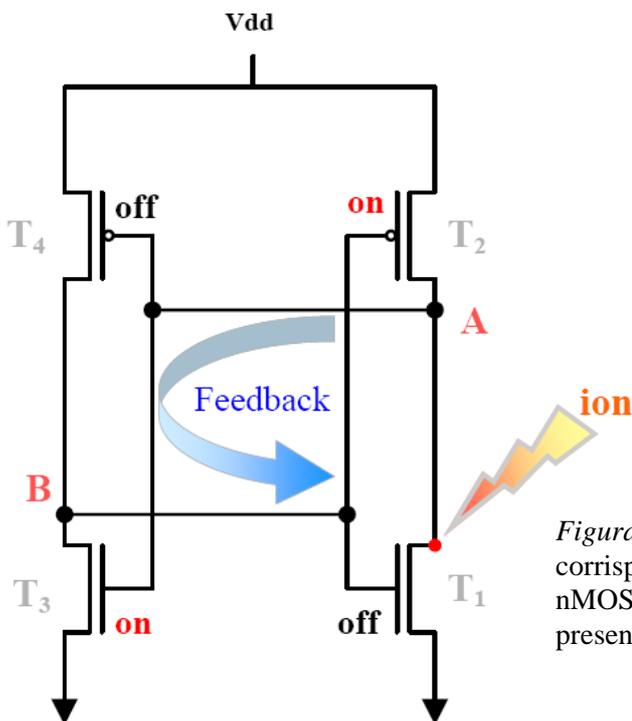


Figura 2.3: Cella SRAM impattata in corrispondenza del drain del transistor nMOSFET off. In evidenza in feedback presente nella cella.

Quando una particella impatta in una regione sensibile della cella, tipicamente la giunzione di drain inversamente polarizzata del transistor in stato “off” (T_1 in figura), la carica immagazzinata dalla giunzione funge da transitorio di corrente nel transistor colpito. Appena questa corrente attraversa tale transistor, la corrente di source del transistor di restore (transistor a canale p “on”, T_2) bilancia tale corrente indotta dalla particella. La corrente che attraversa il transistor di restore, a causa del valore finito di conduttanza del canale del transistor stesso, induce una caduta di tensione al suo drain (punto A in figura). Questo transitorio di tensione in risposta al single-event di corrente è attualmente il meccanismo che causa SEU nelle celle SRAM. Esso infatti risulta essenzialmente simile ad un impulso di scrittura per la cella risultando così possibile l’immagazzinamento di un dato errato in memoria. Osservando la figura che illustra tale situazione, anche il drain del transistor T_2 risulta collegato con i gate dei transistor T_3 e T_4 . Se la corrente indotta è sufficiente a far abbassare la tensione del drain di restore al di sotto della tensione di soglia, lo stato logico di T_3 e T_4 possono venire invertiti. Questo può forzare la tensione del punto B al valore di alimentazione (che era a zero prima dell’impatto), avendo come risultato il cambiamento di stato di T_1 , T_2 e quindi della cella.

Il contrasto tra il processo di feedback e quello di recovery governa la risposta agli SEU della cella. Se la corrente di recovery, originata nel transistor di restore, è più veloce di quella del feedback, allora non si genera un flip nel circuito.

Anche l’impatto di particelle molto lontane dalla soglia di upset sono spesso sufficienti per causare ionizzazione e indurre un momentaneo “flip” di tensione nel nodo colpito della cella.

Ad ogni modo l’avvenimento di SEU osservabili dipende dalla velocità con cui si verificano. La corrente di drift (incluso effetto di funnel) è responsabile per il flip rapido iniziale della cella, mentre la raccolta di carica per diffusione prolunga il processo di recovery; entrambi i meccanismi risultano quindi critici per i processi di upset.

Il processo di recovery di una cella SRAM dopo che è stata colpita da una particella ionizzante dipende da diversi fattori, quali ad esempio: la LET della particella, il punto d’impatto, ecc...

Dal punto di vista tecnologico, invece, il tempo di recovery dipende dalla corrente del transistor di restore e dal tempo di vita della cariche minoritarie nel substrato [10], [11].

Il tempo di feedback della cella è semplicemente il tempo richiesto affinché la tensione al nodo perturbato arrivi, attraverso agli inverter cross-accoppiati e il latch del dispositivo colpito, nel suo stato perturbato. Questo tempo è correlato con quello di scrittura della cella e può essere semplicemente espresso come il ritardo RC della coppia di inverter. Questa costante di tempo RC è quindi un parametro critico per la sensibilità agli SEU nelle SRAM: minore è la costante RC , più velocemente la cella può rispondere ad un transitorio di tensione e quindi più sensibile risulta agli SEU.

2.4. SEE in circuiti logici

La quantizzazione degli effetti di SEU in circuiti di logica combinatoria è molto differente da quella per le memorie. Se il dato errato causato da un particella carica viene o meno immagazzinato, dipende dall'esistenza di un cammino attivo tra il nodo colpito e il latch, dal tempo di raggiungimento del segnale errato al latch e dal profilo temporale dello stesso in ingresso al latch. Quindi se il segnale errato viene catturato da uno o più latch, non necessariamente tale errore verrà propagato in uscita. L'informazione errata può infatti venire bloccata durante il successivo ciclo di clock, ad esempio essendo tale latch non "impegnato" nel successivo stato logico. Nel caso logico, i concetti di "*fault*" e di "*error*" sono distinti e necessitano precise definizioni.

2.4.1. *Soft fault combinatori*

La carica immagazzinata dovuta ad un impatto in un particolare nodo, in un circuito logico, genera una transizione di tensione bassa-alta o alta-bassa o un impulso di rumore. Se questo impulso risulta sufficientemente ampio da superare il margine di rumore, esso verrà riconosciuto come un segnale valido e quindi propagato attraverso il circuito. La possibilità che un impulso di rumore venga propagato non dipende però solo dalla sua ampiezza, ma anche dal cammino logico presente in quell'istante, di cui un esempio è riportato in figura.

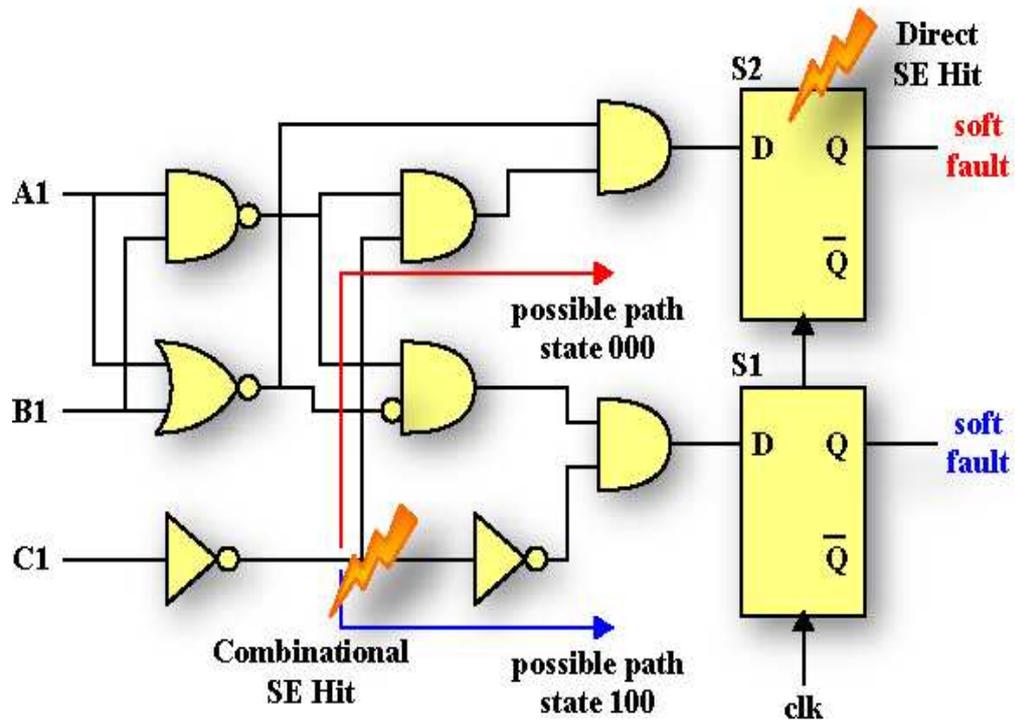


Figura 2.4: Circuito combinatorio con due percorsi logici distinti. Solo in uno si ha la propagazione dell'errore. Nell'altro si ha l'errore direttamente nel latch [12].

L'impatto della particella genera un transitorio di tensione nel nodo F del circuito. La possibile propagazione di questo impulso al latch dipende da diversi fattori. Innanzitutto che sia attivo il cammino combinatorio in quell'istante. In figura sono illustrati due percorsi logici distinti: uno per l'ingresso 000 e l'altro per 100. Il cammino combinatorio attivo dipende dallo stato dinamico in cui si trova la logica che viene determinato dal particolare vettore d'ingresso eseguito in quell'istante. In secondo luogo, assumendo che esista un percorso attivo per la propagazione dell'impulso di rumore, esso dovrà essere sagomato e sfasato in ritardo come se si fosse propagato attraverso la sua strada fino al latch. In terzo luogo, la caratteristica temporale dell'impulso di come arriva al latch risulta molto importante. Esso deve arrivare entro il tempo di setup e hold del latch affinché venga immagazzinato. Le caratteristiche di clock del latch e dello stato logico precedente contribuiscono a questo meccanismo. Se tutte e tre le condizioni appena elencate si verificano contemporaneamente, allora il SEE generato dall'impulso di rumore verrà catturato dal latch come un'informazione errata. Questo viene definito come la generazione di un soft fault (*SF*).

Gli SF possono anche essere generati per impatto diretto nel nodo del latch, dove l'informazione viene alterata mediante bit-flip. Questo effetto è analogo agli SEU che avvengono nei circuiti di memoria e quindi possono essere modellizzati con modalità simili.

Una volta che un SF è stato osservato, o che la probabilità di SF è stata calcolata, si è a conoscenza della vulnerabilità del circuito agli eventi singoli e dei path più critici che possono contribuire alla tolleranza rispetto tali fenomeni.

Comunque, l'attuale frequenza di upset, alla quale ci si riferisce come le operazioni osservabili in un particolare circuito localizzato in un particolare ambiente ostile, non può essere dedotta dalla conoscenza dei SF immediatamente. Infatti SF interni possono non essere osservabili ai pin esterni del circuito. Ad esempio, un particolare latch colpito da soft fault potrebbe prendere parte ad uno stato "don't care" del ciclo logico, quindi il cambiamento di stato non ha conseguenze per l'operazione finale del circuito. Oppure, invece, il latch perturbato potrebbe prendere parte di un registro dati che viene annullato nel successivo ciclo di clock. Quindi non si hanno errori osservabili.

Invece, se il soft fault viene propagato ad una o più porte I/O del circuito, allora è possibile osservarlo esternamente. Questo viene definito come "error event".

Un soft fault può inoltre causare un'informazione errata a più porte I/O e questa informazione può comparire durante più cicli di clock.

CAPITOLO III

3. MODELLIZZAZIONE DEI DISPOSITIVI MICROELETTRONICI

La progressiva riduzione della dimensione dei dispositivi richiede sempre più complessi e lunghi processi produttivi. Allo stesso tempo, la fabbricazione di dispositivi con architetture alternative, rispetto a quelle finora conosciute, come ad esempio il multiple-gate, risulta molto costosa e non ancora matura per essere effettuata su larga scala. Questo rende difficile e dispendioso studiare sperimentalmente gli effetti delle radiazioni su questi nuovi dispositivi ultra-scaled.

Al giorno d'oggi i computer sono considerati la risorsa più economica e quindi le simulazioni diventano uno strumento indispensabile per l'ingegnerizzazione dei dispositivi, non solo per la loro ottimizzazione, ma anche per studi specifici come la sensibilità degli stessi alle radiazioni ionizzanti. Inoltre, come le dimensioni dei MOSFET si sono ridotte raggiungendo la scala dei nanometri, così la complessità dello studio degli stessi aumenta, mentre appaiono nuovi fenomeni fisici specifici dei canali ultra-short. Diventa quindi fondamentale comprendere i meccanismi di questi nuovi fenomeni fisici e il loro impatto sulla sensibilità dei dispositivi alle radiazioni.

Il crescente interesse nella modellizzazione e simulazione degli effetti ad evento singolo nei dispositivi microelettronici, può essere sintetizzato nei seguenti punti:

- ↳ Le simulazioni forniscono un utile strumento per comprendere ciò che avviene all'interno durante l'operatività del dispositivo che non potrebbe essere invece misurata su uno reale. Infatti alcune caratteristiche nei dispositivi reali risultano troppo piccole o troppo veloci e non possono essere misurate.
- ↳ Determinati studi, che non sarebbero fattibili in modo sperimentale, mediante simulazione possono invece essere effettuati.
- ↳ La capacità predittiva delle simulazioni sugli effetti da radiazione possono ridurre notevolmente le prove sperimentali, rendendole più mirate.

- ↳ I fenomeni emergenti dalle nuove tecnologie ultra-scaled possono essere considerati in fase simulativa. L'influenza di tali fenomeni sulla sensibilità alle radiazioni, anche su dispositivi di tecnologia futura, possono essere studiati simulandone i vari aspetti.
- ↳ La simulazione offre la possibilità di test su dispositivi "ipotetici" che non sono ancora stati realizzati fisicamente.

In questo capitolo vedremo quindi diversi approcci per la modellizzazione dei dispositivi per studiare, mediante simulazione, gli effetti causati da evento singolo su di essi. Verranno illustrati i modelli fisici base usati per questa tipologia di simulazioni e quelli invece che stanno emergendo dalle nuove tecnologie.

3.1. Approcci sulla modellizzazione del dispositivo

La modellizzazione del dispositivo, dal punto di vista fisico, viene effettuata a seconda della modalità con cui avviene il trasporto di carica all'interno dello stesso.

Storicamente il primo modello usato nelle simulazioni per il trasporto di portatori descrive il fenomeno fisico che avviene in un dispositivo come funzione del campo elettrico, o ugualmente se dipende dall'energia dei portatori [13]. Questo è possibile se si considera che l'energia dei portatori è sempre in bilancio con il campo elettrico. Il trasporto di portatori in un MOSFET è principalmente dovuto al gradiente potenziale elettrostatico e/o al gradiente di concentrazione dei portatori [13]. La densità di corrente in un dispositivo polarizzato è quindi solitamente modellata come la somma della componente di conduzione (*drift*) e di quella di diffusione (*diffusion*), riassumibile per gli elettroni:

$$(3.1) \quad J_n = q\mu_n nE + qD_n \nabla n$$

dove μ_n è la mobilità dei portatori, D_n è il coefficiente termico di diffusione, E è il campo elettrico e n è la densità dei portatori. D_n e μ_n dipendono dal materiale e dal campo elettrico e sono legati attraverso l'equazione di Einstein:

$$(3.2) \quad D_n = \mu_n \frac{kT_L}{q}$$

con T_L la temperatura del reticolo. Per le lacune si considerano equazioni simili.

Questa tradizionale descrizione di trasporto elettronico costituisce il modello “*Drift Diffusion*” (DD), che risulta essere il modello base usato nelle simulazioni di dispositivi CMOS [13], [14].

Questo livello di modellizzazione generalmente è adatto per dispositivi lunghi, sia nel caso di campi elettrici deboli che forti, ad esclusione della modellizzazione per ionizzazione da impatto. Quando invece le dimensioni del dispositivo iniziano a ridursi, il trasporto elettronico diventa qualitativamente diverso dal modello tradizionale dato che la velocità media dei portatori non dipende dal campo elettrico locale. Essa infatti risulta essere funzione dell’energia dei portatori che, a sua volta, dipende dalla variazione temporale e spaziale del campo elettrico. In dispositivi a canale corto le rapide variazioni del campo elettrico avvengono nella regione attiva. In essi, questi fenomeni non stazionari, giocano un ruolo fondamentale fino a controllare le operazioni del dispositivo stesso. Dato che il modello DD non tiene in considerazione gli effetti non stazionari, diviene necessario definire un nuovo più avanzato modello di trasporto per effettuare simulazioni accurate dei dispositivi ultra-short [15]-[17].

Un secondo importante motivo è legato al fenomeno di ionizzazione da impatto. La ionizzazione da impatto è un fenomeno legato ad una soglia di energia che dipende direttamente da quella dei portatori. Il meccanismo fisico che ha luogo, come descritto nel capitolo precedente, consiste nella generazione di una coppia elettrone-lacuna nella regione del dispositivo dove si ha un elevato campo elettrico. Un elettrone con sufficiente energia in banda di conduzione, la cede ad un altro elettrone in banda di valenza. Questo secondo elettrone può quindi passare in banda di conduzione, lasciando una lacuna in quella di valenza. Da questo si ha come risultato una moltiplicazione di portatori nel dispositivo e l’energia di soglia necessaria perché avvenga tale fenomeno è circa pari a quella di bandgap del semiconduttore.

Nel caso di dispositivi MOSFET, i fenomeni di ionizzazione da impatto diventano importanti per le operazioni in cui il drain è fortemente polarizzato. Gli elettroni generati nell’impatto fluiscono all’interno del canale amplificandone la

corrente di drain. Le lacune sono respinte verso il substrato e quindi rilasciate o meno, a seconda del dispositivo.

Gli approcci di modellizzazione della ionizzazione d'impatto basati sul campo elettrico hanno evidenziato errori quantitativi e qualificativi [18]; come ad esempio la sovrastima del rate nei dispositivi a canale lungo. Per una modellizzazione più accurata risulta quindi necessario un nuovo modello basato sulla dipendenza dall'energia [19].

La maggioranza dei modelli più avanzati utilizzati in campo fisico ed ingegneristico per la descrizione del trasporto dei portatori è basata sulla soluzione, con approccio semi-classico, dell'equazione di trasporto di Boltzman (*Boltzman Transport Equation: BTE*). L'approccio più accurato di soluzione numerica della BTE è mediante l'utilizzo del metodo di Monte Carlo (*MC*) [20], [21]. Nonostante gli accurati risultati ottenibili mediante il suo utilizzo, non viene utilizzato nelle simulazioni di routine dato che richiede un considerevole impiego di tempo. Un livello di modellizzazione intermedio sta nel modello idrodinamico (*HD*) e di trasporto di energia [15]-[17]. Questi modelli sono ottenibili da soluzioni deterministiche della BTE e forniscono una più accurata descrizione del trasporto di carica rispetto al modello DD. Ad ogni modo, il modello idrodinamico genera errori in campo balistico. Risulta allora necessario passare al trasporto di tipo quantistico, per il quale, sono stati sviluppati diversi approcci, come il modello idrodinamico quantico, quello di Monte Carlo, l'approccio di Wigner-Boltzmann e quello alla funzione di Green. L'ultimo è il più esatto, ma allo stesso tempo è il più difficile in termini di comprensione a livello fisico e come carico computazionale.

La figura seguente illustra i vari livelli di approssimazione descrivendo la tipologia di trasporto di carica nel semiconduttore. Questa classificazione gerarchica mette in luce il crescente livello di complessità e precisione dei modelli. In questa figura, i modelli di trasporto vanno dal modello unidimensionale o modellizzazione analitica usati nelle simulazioni a livello di circuito (in alto), all'esatta soluzione numerica quantistica-meccanica data dalla funzione di non equilibrio di Green (in basso) [22].

Nel seguito verranno sinteticamente presentati i diversi approcci di modellizzazione del trasporto di carica.

Approssimato	<i>Modello</i>	<i>Caratteristiche chiave</i>	Veloce
Approcci semi-classici	Modelli compatti	Appropriato a livello circuitale	
	Equazioni Drift-Diffusion	Per dispositivi fino a circa 0,2 μ m. Incluso $\mu(\xi)$.	
	Equazioni Hydrodynamic	Inclusi velocità di overshoot e diffusione dei portatori tramite il gradiente elettronico di temperatura.	
	Equazioni di trasporto Boltzmann (metodo di Monte Carlo)	Accurato fino ai limiti classici.	
Approcci quantistici	Gradiente di Densità	Drift-Diffusion o Hydrodynamic + correzioni quantistiche.	Difficile da implementare. Alto consumo di CPU
	Equazione di Schrödinger	Drift-Diffusion o Hydrodynamic + accurato sconfinamento quantistico.	
	Metodo Wigner	Approccio quantistico cinetico (deterministico/Monte Carlo)	
Accurato	Funzioni di Non Equilibrio di Green (NEGF)	Approcci mode-space, real-space e/o dominio temporale.	

Tabella 3.1: Illustra la gerarchia dei modelli di trasporto [43].

3.1.1. Modello Drift-Diffusion (DD)

Il modello Drift-Diffusion è stato per molti anni il livello standard di modellizzazione dei dispositivi a stato solido soprattutto per la sua semplicità concettuale e il breve tempo simulativo. Questo modello è appropriato per dispositivi con caratteristiche di lunghezza lunghe. Questo modello considera che l'energia dei portatori non supera quella termica e che la mobilità degli stessi sia solamente una funzione locale del campo elettrico (la mobilità non dipende dall'energia dei portatori). Come si è notato precedentemente, tali assunzioni sono accettabili se il campo elettrico varia lentamente, come nel caso di dispositivi lunghi.

Tutti i package software di simulazione per MOSFET [23]-[25] sono basati sulla soluzione delle equazioni base per i semiconduttori, quali l'equazione di Poisson accoppiata con il modello di trasporto DD. L'iter simulativo inizialmente risolve l'equazione di Poisson:

$$(3.3) \quad \nabla(\varepsilon_{Si} \bar{\nabla} \varphi) = -\rho$$

dove ρ è la densità di carica, φ è il potenziale e ε_{Si} è la permissività del silicio. L'equazione di Laplace viene risolta nell'ossido. Il modello DD è descritto attraverso le seguenti equazioni di continuità:

$$(3.4) \quad \text{div} \vec{J}_n = qR + q \frac{\partial n}{\partial t}$$

$$(3.5) \quad \text{div} \vec{J}_p = -qR + q \frac{\partial p}{\partial t}$$

dove R è il coefficiente di generazione-ricombinazione. La densità di corrente di elettroni e lacune è data da:

$$(3.6) \quad J_n = -q\mu_n n \nabla \varphi + qD_n \nabla n$$

$$(3.7) \quad J_p = -q\mu_p p \nabla \varphi - qD_p \nabla p$$

In (3.6) e (3.7) il primo termine nel lato destro dell'equazione è la componente di drift, il secondo rappresenta quella di diffusione (le quali danno il nome a questo modello). Queste equazioni vengono discretizzate e risolte in un numero finito di punti del reticolo del dispositivo.

Il modello DD considera che la massima energia dei portatori viene istantaneamente bilanciata con il campo elettrico [14]. Quindi, gli effetti non stazionari (velocità di overshoot e trasporto di portatori dovuti a processi di diffusione termica associati con i gradienti di temperatura degli elettroni) specifici dei dispositivi corti, non sono considerati nel modello DD, come la dipendenza della ionizzazione da impatto sull'energia dei portatori. Ad ogni modo il modello DD è in grado di assimilare modelli che descrivono gli effetti dello sconfinamento quantistico-meccanico in MOSFET a canale corto.

3.1.2. Modello Hydrodynamic (HD)

Nella realtà, l'energia dei portatori non risponde immediatamente ai cambiamenti nel campo elettrico. I coefficienti di mobilità e diffusione sono vettori quantistici che dipendono anche da altri vari parametri oltre al campo elettrico [26]. Nei nano MOSFET l'elevato campo elettrico interno risulta sostanzialmente come riscaldamento degli elettroni. Il modello HD, ottenuto prendendo il primo dei tre momenti nell'Equazione di Trasporto di Boltzmann (BTE), rappresenta gli effetti del trasporto dei portatori nei dispositivi corti in modo più accurato di quello DD. Il modello Hydrodynamic è un'approssimazione macroscopica della BTE tenendo conto degli effetti relazionali di energia e momento. In questo modello, la propagazione degli elettroni nel semiconduttore è trattata come un flusso di gas carico e termicamente conduttivo soggetto ad un campo elettrico.

Questo modello elimina diverse assunzioni limitanti presenti nel DD: l'energia dei portatori può superare quella termica e tutti i parametri fisici dipendono dall'energia. La densità di corrente e il flusso di energia sono modellati in HD con le seguenti equazioni (per gli elettroni [24])

$$(3.8) \quad \vec{J}_n = q\mu_n \left[-n\vec{\nabla}\varphi + \frac{kT_n}{q}\vec{\nabla}n + \frac{k}{q}(1+\xi_n)n\vec{\nabla}T_n \right]$$

$$(3.9) \quad \text{div}\vec{S}_n = -\vec{J}_n\vec{\nabla}\varphi - \frac{3k}{2}\frac{\partial}{\partial t}(nT_n) - W_n$$

$$(3.10) \quad \vec{S}_n = -K_n\vec{\nabla}T_n - \frac{k\Delta_n}{q}\vec{J}_nT_n$$

dove T_n è la temperatura degli elettroni, ξ_n è un coefficiente di modello, W_n è il rate di perdita della densità di energia, K_n è la conduttività termica e:

$$(3.11) \quad \Delta n = \frac{5}{2} + \xi_n$$

mentre W_n è data da:

$$(3.12) \quad W_n = \frac{3}{2} n \frac{k(T_n - T_L)}{\tau_{rel}} + \frac{3}{2} k T_n R_{SRH} + E_g (G_n - R_n^A)$$

dove τ_{rel} è il rilassamento temporale dell'energia, R_{SRH} è il rate di ricombinazione SRH¹, G_n quello di ionizzazione da impatto, R_n^A quello di ricombinazione Auger², E_g è il bandgap del silicio. Equazioni simili sono usate per le lacune.

Solitamente la mobilità μ_n è modellata come una funzione decrescente dell'energia (poiché lo scattering rate aumenta con l'energia delle particelle). Infine, le equazioni di continuità date da (3.4) e (3.5), completano il sistema di equazioni del modello HD.

Le equazioni (3.8)-(3.12), sono risolte utilizzando le seguenti assunzioni semplificative:

- 1) Il vettore di temperatura viene ridotto ad uno scalare;
- 2) La chiusura della gerarchia dei momenti in BTE è data relazionando il flusso caldo Q del gas di elettroni con la temperatura T_n degli elettroni stessi, attraverso l'equazione $Q = -K_n \nabla T_n$, dove la conduttività termica K_n è data dalla legge di Wiedmann-Franz:

$$(3.13) \quad K_n = q n \mu_n \left(\frac{k}{q} \right)^2 \Delta_n T_n$$

¹ Ricombinazione SRH: Ricombinazione Shockley-Read-Hall. Si ha quando un elettrone in banda di conduzione viene "intrappolato" in un livello energetico all'interno del gap proibito e quindi ha buone probabilità di ricombinarsi con la lacuna in banda di valenza. E' tipica dei semiconduttori a gap indiretto.

² Ricombinazione Auger o non radiativa: un elettrone in banda di conduzione si ricombina con una lacuna in banda di valenza. L'energia viene trasferita ad un altro elettrone in banda di conduzione e quella in eccesso viene dissipata termicamente. E' tipica dei semiconduttori fortemente drogati.

- 3) L'approssimazione della relazione temporale è utilizzata per modellare gli effetti della collisione sul momento e l'energia degli elettroni.

Il vantaggio del modello HD rispetto a quello DD, per le simulazioni di trasporto nei dispositivi corti, può essere compreso analizzando “l'equazione di bilancio energetico” (3.9). Il termine a sinistra di questa equazione rappresenta la variazione del flusso di energia nello spazio. A destra, invece, il primo termine è relativo all'assorbimento di energia da parte degli elettroni dal campo elettrico; il secondo è la derivata temporale della densità di energia; infine, il terzo, fornisce la perdita di energia attraverso i processi di ricombinazione dei portatori. Implica, pertanto, che la variazione spaziale del flusso di energia equivale alla somma totale dell'energia trasportata e del flusso termico. L'applicabilità di questo modello nei MOSFET a canale corto è giustificata dalle aree “hot” (calde) dove la temperatura degli elettroni è alta e predice una maggiore diffusione rispetto al modello DD, dovuto al valore finito di relazione temporale dell'energia [26]. Come risultato, l'energia media e la temperatura degli elettroni sono maggiori nelle regioni con forte campo elettrico equiparati con i loro valori all'equilibrio. Inoltre, l'esistenza di un campo termo-elettrico, espresso in (3.8) dal termine $\nabla(kT_n/q)$, produce una forza guida che rende possibile il flusso degli elettroni dalle zone calde verso quelle fredde (trasporto di portatori per processo di diffusione termica associato con i gradienti di temperatura elettronica).

Il fenomeno della velocità di overshoot è l'immediata conseguenza del tempo finito necessario prima che l'energia dei portatori raggiunga l'equilibrio con il campo elettrico. Questo fenomeno è principalmente dovuto alla non equivalenza del momento degli elettroni e al rilassamento temporale dell'energia. Il modello HD è in grado di prevedere in modo corretto la velocità di overshoot come precedentemente stabilito. Tale fenomeno può facilmente essere messo in evidenza dal modello [26]. Se si considera il caso uni-dimensionale, dove il campo elettrico aumenta in direzione del moto delle particelle, il risultato di bilanciamento dell'equazione di energia è che l'energia media è inferiore del corrispondente valore dovuto ad un campo elettrico locale, sotto le medesime condizioni. Dato che la mobilità è una funzione decrescente dell'energia, questo significa che la velocità data dal modello HD è più precisa di quella ottenuta da DD, che si basa su una mobilità che dipende dal campo elettrico locale.

3.1.3. Soluzione diretta delle Equazioni di Trasporto di Boltzmann (BTE) con il metodo Monte Carlo (MC)

L'approccio più accurato per descrivere, dal punto di vista fisico ed ingegneristico, il trasporto dei portatori è utilizzando il metodo di Monte Carlo (MC). La risoluzione della BTE fornisce risultati più accurati rispetto ai modelli di trasporto dell'energia (Hydrodynamic), poiché non richiede assunzioni semplificative.

Il principio di questo metodo è di simulare il moto di particelle libere dovuto a scattering istantaneo random nel semiconduttore. Nel logaritmo di simulazione, i portatori sono rappresentati come particelle con una massa ed una carica elettrica. Per prima cosa vengono generati dei tempi di traiettoria random per ogni particella. In questa fase tutte le quantità fisiche caratterizzanti la particella vengono calcolate (velocità di drift, energia e posizione). In un secondo momento, nella fase successiva, il meccanismo di scattering viene scelto in modo casuale in accordo con le probabilità di scattering di tutti i possibili meccanismi che lo generano. Lo scattering modifica quindi l'energia finale e il momento della particella. Al termine di questa seconda fase, si conoscono delle nuove quantità relative ad ogni particella. Quindi questa procedura viene ripetuta e le particelle vengono assoggettate alla stessa successione di meccanismi fisici. Campionando il moto delle particelle in vari istanti durante la simulazione, permette di stilare una stima statistica delle quantità fisiche interessate sotto forma di funzione di distribuzione per ogni particella, la media della velocità di drift in presenza di un campo elettrico applicato, l'energia media, ecc... Simulando svariate particelle, rappresentative del sistema fisico d'interesse, è possibile simulare l'evoluzione non stazionaria tempo-dipendente della distribuzioni degli elettroni e lacune sotto l'influenza di una forza guida.

Le simulazioni MC sono state utilizzate in passato per la raccolta di carica indotta da radiazioni e per SEU in SOI MOSFET a canale corto. Nonostante questo metodo fornisca simulazioni molto accurate dei MOSFET a canale corto, il suo uso è stato limitato in quanto richiede un carico computazionale enorme. Questa è la motivazione per la quale tale metodo non viene utilizzato così frequentemente per simulazioni per lo studio di SEE.

3.1.4. *Trasporto quantistico*

Dato che le dimensioni dei dispositivi continuano a ridursi, le lunghezze di canale diventano confrontabili con le caratteristiche di lunghezza d'onda delle particelle (per esempio la lunghezza d'onda di De Broglie³ all'energia di Fermi), ci si aspetta che gli effetti quantistici aumentino d'importanza. Infatti, si era a conoscenza del sconfinamento quantico, come fenomeno del secondo ordine, nei layer invertiti delle passate tecnologie. Ora invece, gli effetti quantistici, relativi sia al sconfinamento dei portatori che al trasporto quantico balistico, possono diventare dominanti nelle operazioni delle attuali tecnologie, ma sicuramente lo diverranno nelle future. Ad esempio, ci si aspetta che il tunneling diretto source-to-drain diventi un fenomeno fisico seriamente limitante per il futuro scaling tecnologico.

I modelli di trasporto presentati precedentemente non possiedono le capacità predittive per simulazioni di trasporti di questo tipo in strutture ultra-small; risultano quindi necessari strumenti che forniscano un'accurata descrizione delle operazioni nei nano-dispositivi.

Dei diversi approcci che sono stati sviluppati, uno dei più esatti risulta essere la soluzione dell'equazioni di Schrödinger con le condizioni di contorno aperte, in aggiunta al formalismo della funzione di non equilibrio di Green. Nonostante l'accuratezza, tale approccio risulta molto complesso sia dal punto di vista fisico che computazionale. Quindi, ne sono stati proposti altri, essenzialmente basati su quelli già esistenti, come DD o MC, apponendo delle correzioni quantistiche. Tali approcci, pur richiedendo un minor utilizzo di tempo di CPU, risultano essere meno accurati.

Utilizzando il formalismo di NEGR [27]-[30] si riesce a trattare il sconfinamento quantistico-meccanico, la riflessione e il tunneling allo stesso tempo.

L'algoritmo generale di un codice base NEGF, sviluppato per simulazioni in dispositivi multiple-gate, risulta sufficientemente accurato per simulazioni anche di trasporto puramente balistico nel canale. E' stato dimostrato che i dispositivi attuali, ma soprattutto quelli ultra-short delle tecnologie future, lavoreranno in regimi quasi-balistici, dove gli effetti di scattering non possono essere ignorati.

³ Lunghezza d'onda di De Broglie: nella sua tesi di dottorato, nel 1924, Louis de Broglie propose l'esistenza di onde associate alle particelle. Il suo postulato si può enunciare come segue: ad ogni particella di impulso p ed energia E è associata una lunghezza d'onda $\lambda = h/p$ ed una frequenza $\nu = E/h$. λ è detta lunghezza d'onda di De Broglie.

Quindi, dovranno esser considerati anche gli effetti di scattering elastico principalmente dovuto ad impurità o alle asprezze all'interfaccia.

NEGF offre la possibilità di considerare lo scattering usando il così chiamato metodo "Bütiker probe". Tale metodo fornisce una descrizione meccanico-quantistica del trasporto dei portatori e un'interazione di fase random per le simulazioni di MOSFET in nanotecnologia. Inoltre recenti sviluppi di NEGF, permettono di considerare la "reale" struttura di banda del silicio nanowire, la quale gioca un ruolo fondamentale nella conduzione di canale. Infine, NEGF è risultato adatto anche a trattare il trasporto dei portatori in dimensioni 2D e 3D.

La trattazione rigorosa del passaggio di una particella ionizzante attraverso un nano dispositivo, rende NEGF a tutt'oggi un problema numerico e teorico aperto però. Queste simulazioni risultano essere il problema chiave per lo studio degli effetti da radiazioni nei circuiti nanoelettronici.

3.2. Effetti fisici emergenti

Come si è ribadito precedentemente, con il continuo scaling tecnologico, stanno emergendo dei nuovi fenomeni fisici che giocheranno un ruolo fondamentale nei futuri dispositivi e quindi risulterà necessario lo sviluppo di nuovi modelli per poterli studiare e simulare. Come già accennato tali fenomeni sono: il confinamento quantico e il trasporto balistico e quasi balistico.

3.2.1. Confinamento quantico

Con il continuo scaling tecnologico, la diretta conseguenza risulta essere un forte incremento del campo elettrico nell'interfaccia Si/SiO₂, tale da indurre la quantizzazione dell'energia dei portatori, che risultano confinati verticalmente nello stato quantico, avente dimensione strettamente legata alla lunghezza d'onda dell'elettrone. Questo spinge i livelli energetici in modo tale che il più basso dei livelli permessi per gli elettroni non coincide con quello inferiore della banda di conduzione. Inoltre, la densità totale degli stati in un sistema 2D è inferiore rispetto a quella di un sistema 3D.

Il confinamento quantistico meccanico modifica in modo considerevole la distribuzione dei portatori nel canale: il massimo dell'inversione di carica non coincide più con l'interfaccia nel film di Silicio. Questo conduce ad un aumento

della tensione di soglia del MOSFET. La capacità di gate e la mobilità dei portatori sono anch'esse modificate dagli effetti quantici. Queste considerazioni indicano che la natura dell'onda degli elettroni e delle lacune dovrà esser presa in considerazione per lo studio dei dispositivi ultra-short e quindi nelle simulazioni degli stessi.

Per modellizzare gli effetti del confinamento quantico sono stati proposti svariati metodi. Alcuni approcci si basano sulla compatibilità con i simulatori di dispositivo classici e quindi basati su drift-diffusion e hydrodynamic, includendo l'equazione di Schrödinger. La soluzione di quest'ultima, però, necessita di un tempo di soluzione abbastanza elevato.

Gli approcci più recenti considerano una quantità aggiuntiva Λ , come un potenziale, addizionata alla formula classica per la densità degli elettroni. Modellando in modo opportuno questa quantità è possibile inserire gli effetti del confinamento quantico sulla densità elettronica. Questa nuova equazione viene poi utilizzata per la soluzione delle classiche equazioni di Poisson e di trasporto.

3.2.2. Trasporto balistico e quasi-balistico

I modelli DD e HD non sono adatti per descrivere il trasporto balistico. Il trasporto di un portatore nel canale è considerato balistico quando viaggia dal source al drain senza che vi sia scattering. Questo può esser possibile se le dimensioni del dispositivo diventano più piccole del percorso del portatore.

L'ampiezza e la larghezza della barriera di canale sono modulate dalle tensioni di gate e di drain. I portatori aventi energia superiore al massimo della barriera, vengono trasportati dal source al drain per emissione termoionica, mentre i portatori con energia inferiore possono attraversare il canale solo mediante meccanismi di tunneling quantistico meccanico attraverso la barriera source-to-drain.

Sono stati proposti numerosi modelli per questo tipo di trasporto. Alcuni di essi consideravano solo l'emissione termoionica, altri in aggiunta consideravano il tunneling. Ad ogni modo, il trasporto balistico non può ancora esser incluso nei modelli dei simulatori commerciali.

Come questo tipo di trasporti influenzeranno i futuri dispositivi circa l'immunità da ionizzazione è ancora una questione aperta.

I

CAPITOLO IV

4. METODOLOGIE DI SIMULAZIONE PER SEE

Vedremo in questo capitolo che vi sono diverse metodologie e diversi livelli di simulazione dei circuiti microelettronici. Cercheremo di seguire passo-passo i vari step mediante i quali vengono condotte tali simulazioni, soffermandoci anche sulle evoluzioni di queste tecnologie nel corso degli anni.

4.1. Calibrazione del dispositivo

Il passo fondamentale per la simulazione a livello di dispositivo è un'attenta calibrazione del simulatore su di esso. Essa viene generalmente condotta rispetto alle caratteristiche di corrente di drain, in funzione della tensione di drain e di gate, $I_D(V_D)$ e $I_D(V_G)$. In questo modo è anche possibile stabilire la tensione di soglia. Tali caratteristiche del dispositivo vengono poi confrontate con quello del dispositivo reale. Per la calibrazione risulta di fondamentale importanza la scelta del modello fisico, con cui verrà poi svolta la simulazione, specialmente quello di mobilità dei portatori. Questa operazione risulta essere delicata e può richiedere diverso tempo.

4.2. Simulazioni multidimensionali del dispositivo

Il fenomeno legato alla radiazione da particella ionizzante è naturalmente legato ad un meccanismo 3D, dovuto alla tridimensionalità sia del dispositivo che dalla traccia lasciata dalla particella stessa. Infatti risulta difficile studiarne gli effetti con programmi di simulazione 2D. Lo sviluppo di strumenti completamente 3D risulta, comunque, recente, ma, con l'avvento delle nuove tecnologie e di dispositivi short, altresì necessario.

Le prime simulazioni condotte utilizzavano modelli drift-diffusion unidimensionali. Successivamente tali modelli 1D si sono evoluti in 2D basati sulle equazioni di drift-diffusion o su modelli più avanzati come l'hydrodynamic e il bilanciamento di energia. Molti studi relativi alla raccolta di carica sugli SEE sono stati condotti utilizzando questi modelli. In una simulazione 2D rettangolare,

si considera che tutte le quantità siano estratte nella terza dimensione, quindi è possibile simulare correttamente o la densità di carica generata o la carica totale, non entrambe. Sono stati sviluppati poi diversi codici 2D modificati per correggere gli effetti geometrici, come ad esempio l'uso di un codice quasi 3D basato su trasformazioni di coordinate e simmetrie cilindriche. Tali codici, però, possono essere usati solo su un numero molto limitato di dispositivi, infatti pochi presentano una simmetria circolare.

I primi codici completamente 3D furono sviluppati nel 1980 [31], dove le prime simulazioni con tali codici furono motivate da problemi di affidabilità alle particelle alpha. Un primo confronto tra simulazioni di raccolta di carica in 2D e in 3D hanno mostrato che, mentre la risposta transitoria fosse qualitativamente simile, dal punto di vista quantitativo, si riscontrarono notevoli differenze, sia nell'ampiezza della corrente sia dal punto di vista temporale. Questo porta ad utilizzare le simulazioni 2D per avere un'idea di base di ciò che avviene, mentre se ciò che si vuole ottenere sono dei dati di previsione, la simulazione 3D risulta indispensabile.

Solo negli anni '90 le tecniche numeriche, combinate con le nuove velocità dei microprocessori, hanno permesso di portare sufficienti strumenti nelle desktop workstation. Negli ultimi anni, sono quindi stati resi disponibili versioni commerciali di simulatori.

4.3. Modelli di dispositivo/circuito

Un importante aspetto da considerare nella modellizzazione della raccolta di carica e nello studio degli SEE è l'accoppiamento che esiste tra il dispositivo e il circuito nel caso di ionizzazione da impatto. Nelle memorie SRAM, ad esempio, il transistor colpito viene modellizzato con le condizioni di confine costanti, dove, da costruzione, il dispositivo tornerà sempre nel suo stato antecedente l'impatto. Il meglio che è possibile ottenere da queste simulazioni è lo studio delle caratteristiche di raccolta di carica nel dispositivo colpito e confrontarle con alcune "cariche di upset critiche". Comunque, l'utilità di questo approccio per le SRAM risulta limitato, in quanto anche la raccolta di carica risulta influenzata dal carico esterno e dai meccanismi di feedback. Inoltre, la stessa carica critica potrebbe essere mal definita, proprio perché dipendente dal carico esterno, oppure essere specifica di una ben determinata geometria. Tuttavia, la simulazione di singoli dispositivi, può risultare molto utile per lo studio di caratteristiche fisiche

base di raccolta di carica, o per lo studio di DRAM, nelle quali gli effetti di carico non risultano essere prevalenti e la carica critica è ben definita.

L'effetto di evento singolo induce una corrente transitoria, che nelle simulazioni circuitali di SEE, come accennato anche nei capitoli precedenti, viene modellato come una sorgente di corrente applicata al nodo colpito e gli effetti vengono calcolati con simulatori di circuito come SPICE. Un punto di forza di questo approccio è che è possibile modellizzare una larga scala di circuiti con una buona efficienza computazionale, mentre si perde a livello di accuratezza dovuto al fatto che si utilizza l'impulso di corrente come stimolo d'ingresso. Ad esempio, se la corrente è basata su simulazioni da impatto effettuate sul dispositivo senza alcun tipo di carico, allora quelle di circuito ereditano la non accuratezza dovuta proprio al carico. Oppure se la raccolta di carica d'ingresso viene approssimata con modelli analitici 1D, le simulazioni risulteranno inaccurate soprattutto nel caso di impatto da ioni pesanti.

Nello studio delle memorie SRAM, ad esempio, si vorrebbe una metodologia simulativa che permetta la modellizzazione dell'intera memoria o la soluzione contemporanea delle equazioni di dispositivo e circuito. Recentemente quest'ultima tecnica ha avuto un incremento di utilizzo. Essa è conosciuta come *mixed-mode* o *mixed-level* e fu sviluppata da Rollins a USC/Aerospace negli ultimi anni '80 [32]. Il termine "*mixed-level*" risulta probabilmente più descrittivo rispetto a "*mixed-mode*". Nelle simulazioni *mixed-level* di SEU, il dispositivo colpito viene definito multidimensionalmente mentre il resto del circuito è rappresentato un modelli SPICE. I due "dominii" sono legati tra loro con le condizioni di confine e la soluzione di entrambi i set di equazioni vengono inserite in una matrice di soluzione. Il vantaggio è che solo il dispositivo colpito viene modellizzato multidimensionalmente, mentre il resto è costituito da modelli SPICE. Questo permette di diminuire il tempo di simulazione.

La possibilità di simulazione *mixed-level* è stata incorporata in molti dei simulatori commerciali disponibili e utilizzata per la prima volta nel 1991 per lo studio di SEU su cella CMOS SRAM. Da allora il suo impiego è sempre in crescita.

Vediamo quindi un po' più nel specifico i diversi approcci di modellizzazione a livello di circuito per lo studio dei single-event-effect nei circuiti integrati.

4.3.1. Circuit Level

Le simulazioni di SEE a livello di circuito possono essere condotte utilizzando dei codici standard “di collegamento” utilizzando dei modelli degli IC forniti, utilizzando tools di simulazione come Berkeley SPICE, Silvano SmartSPICE, Synopsys HSPICE, Orcad PSPICE, Mentor Graphics ELDO, ecc...

I simulatori di circuito, come ad esempio SPICE, risolvono un sistema di equazioni descrittive l'ambiente del circuito elettrico, ad esempio le leggi di Kirchoff. I componenti base, come transistor, diodi, resistenze, sono forniti in “compact model”, i quali descrivono le caratteristiche statiche e dinamiche dell'ambiente elettrico dei vari dispositivi base che costituiscono il circuito. Tali modelli sono generalmente basati su formule analitiche approssimate. Modelli più avanzati forniscono maggiore accuratezza con ridotta complessità computazionale.

Per simulazioni di single-event-effect a livello di circuito, l'evento singolo indotto è solitamente modellato come una sorgente di corrente applicata al nodo impattato. Questo approccio, utile per molte situazioni, presenta però alcune limitazioni. Un esempio tipico è l'utilizzo di una corrente transitoria risultante da una simulazione a livello di dispositivo, con quest'ultimo privo di carico. Si simula poi la risposta di una memoria a livello di circuito utilizzando Spice. Lo stimolo utilizzato a livello di circuito per riprodurre la particella ionizzante è un impulso di corrente ottenuto simulando a livello di dispositivo la risposta transitoria dello stesso privo di carico. Si ottiene così una simulazione non accurata.

4.3.2. Tecnica Mixed-Mode

Le limitazioni descritte per le simulazioni a livello di circuito possono essere superate usando quelle di dispositivo basate su modelli fisici per studiare la risposta all'impatto su di esso. Ci si riferisce a questo approccio con i termini di “mixed-mode” o di “mixed-level”, in quanto il dispositivo colpito è descritto multidimensionalmente, mentre il resto del circuito mediante compact model e le due soluzioni vengono poi messe assieme mediante le condizioni al contorno nelle zone di contatto. Solo il dispositivo colpito, quindi, è modellato tridimensionalmente. Il risultante transitorio di corrente dovuto all'impatto dell'ione viene direttamente computato dal simulatore sul dispositivo, infatti in questo tipo di simulatori non è necessario uno stimolo in ingresso che lo modella.

Questa tecnica mixed-mode viene implementata nella maggioranza dei simulatori di dispositivo commerciali ed utilizzata per lo studio di circuiti con un ridotto numero di componenti. Inoltre presenta numerosi vantaggi. Non vengono introdotti errori di approssimazione dovuti all'introduzione dello stimolo in ingresso. Inoltre è possibile accedere a tutte le quantità interne del dispositivo o di ogni punto del circuito durante la simulazione. In più la tecnica di mixed-mode viene utilizzata per la simulazione degli effetti da radiazioni ionizzanti su nuovi dispositivi o per considerare dei nuovi fenomeni fisici che via via emergono dal continuo scaling tecnologico. Questo studio non è possibile realizzarlo utilizzando i compact model.

Lo svantaggio maggiore dell'utilizzo di questa tecnica è l'incremento di tempo di CPU se viene confrontato con quello necessario per simulazioni completamente circuit-level. Senza contare che tale approccio risulta non utilizzabile per circuiti complessi. Ma, ad esempio, per lo studio degli effetti da radiazioni ionizzanti in celle di memoria SRAM, le simulazioni mixed-mode forniscono una considerevole riduzione dal punto di vista tempistico rispetto ad una simulazione numerica della stessa cella. Infine, è importante notare che la simulazione mixed-mode per una cella SRAM risulta accurata nel caso in cui non vi siano effetti accoppiativi tra dispositivi. Dal momento che, lo spazio tra di essi è in continua diminuzione, ci si aspetta che tali effetti capacitivi diverranno molto importanti.

4.3.3. Simulazioni completamente numeriche

La soluzione più accurata per lo studio degli effetti degli SEU su celle SRAM risulta essere la modellizzazione numerica dell'intera cella. Questo è stato reso possibile solo recentemente, grazie allo sviluppo di metodi numerici di simulazione dei dispositivi commerciali, di nuove metodologie di meshing e dell'incremento delle performance del computer che permettono di ridurre le tempistiche di simulazione. Un esempio di questo ne è il lavoro di Roche et al.[33], [34] e Dodd et al.[35] dove hanno dimostrato la capacità dei codici commerciali di costruire e simulare numericamente una cella SRAM completamente 3D. Sebbene il tempo richiesto per la simulazione si sia notevolmente ridotto, non è ancora lontanamente comparabile con quello necessario per simulare lo stesso circuito utilizzando Spice o la tecnica mixed-mode. La recente emergenza di elaboratori che lavorano in parallelo con centinaia di processori e considerevoli risorse di memoria, costituisce una promettente

strada di sviluppo per future simulazioni completamente 3D sull'intero circuito o su porzioni.

4.4. Struttura della traccia dello ione impattante

Uno degli aspetti di maggiore importanza nelle simulazioni di SEU di un dispositivo risulta essere proprio la traccia di carica generata all'interno di esso. Infatti, recentemente, tale traccia, per lo studio mediante simulazione degli effetti alle radiazioni ionizzanti su dispositivi microelettronici, ha suscitato notevole attenzione. Molti dei lavori sviluppati prima degli anni '90, impiegavano una semplice generazione uniforme e cilindrica di carica per rappresentarla. Successivamente sono stati sviluppati calcoli dettagliati della struttura di tale traccia utilizzando il metodo di Monte Carlo. Infatti, la struttura reale, è radiale e varia a seconda di come la particella attraversa la materia. Quando la particella colpisce la materia, vengono rilasciati gli elettroni primari ad alta energia, chiamati raggi delta. A loro volta generano coppie elettrone-lacuna in un brevissimo tempo e in un piccolissimo volume lungo la traiettoria della traccia, alla quale ci si riferisce appunto come "traccia dello ione". Questi portatori vengono raccolti mediante i meccanismi di drift e diffusion e quindi ricombinanti mediante meccanismi diversi di ricombinazione diretta (Auger, radiativa) nel cuore della traccia. Questo meccanismo di ricombinazione riduce altamente il picco di concentrazione dei portatori. Ovviamente tutti questi meccanismi modificano la distribuzione della traccia sia nello spazio che nel tempo.

Quando la particella attraversa la materia e viaggia all'interno di essa, subisce una perdita di energia e quindi i raggi delta diventano meno energetici e le coppie elettrone-lacuna vengono generate vicino al cammino dello ione. Quindi, la particella incidente genera un plasma carico a forma di cono.

Sono state riscontrate delle differenze tra gli esperimenti condotti per lo studio degli SEU utilizzando la struttura tipica per le particelle e le particelle ad alta energia che si possono trovare in ambiente spaziale, circa l'affidabilità delle operazioni condotte attraverso test accelerati. In alcuni casi, i risultati sperimentali mostrano differenze nella LET di soglia e nella cross-section di upset di saturazione tra particelle a bassa o ad alta energia con LET incidente simile, mentre in altri casi non sono state riscontrate differenze. Questi risultati hanno messo in luce la necessità quindi di includere profili realistici di generazione di carica nelle simulazioni di SEU.

Le particelle ad alta energia sono rappresentative degli ioni presenti nell'ambiente spaziale reale, ma, tipicamente, non sono disponibili in laboratorio. Quindi lo studio mediante simulazione degli effetti da loro provocati, presenta un'interessante opportunità di analisi che non potrebbe esser condotta altrimenti.

Negli anni sono stati sviluppati diversi modelli analitici per la struttura della traccia delle particelle. Questi modelli risultano semplici da implementare e, nonostante la loro natura analitica, veloci. I metodi analitici di calcolo della struttura della traccia dividono il materiale bersaglio in sottili "strati" perpendicolari al percorso dello ione. Lo ione incidente e la sua energia sono specificate, così, la distribuzione dei raggi delta e il deposito radiale di carica vengono calcolati analiticamente nel primo strato. L'energia della particella viene memorizzata basandosi sulla deposizione di energia nello strato e si procede quindi al calcolo in quello successivo.

Inoltre, in letteratura, sono stati proposti e implementati molti codici di simulazione per la struttura della traccia. Uno dei più interessanti è il modello di traccia basato su una "legge di potenza non uniforme", teorizzato da Katz [36] e sviluppato ad Stapor [37]. In questo modello, la traccia dello ione presenta una distribuzione di portatori in eccesso radiale espressa dalla legge di distribuzione di potenza e permette alla densità di carica di variare lungo il percorso (ad esempio la LET non è costante). Un altro modello analitico propone, invece, una distribuzione gaussiana per la traccia.

Nei codici di simulazione commerciali, gli effetti della particella impattante sono presi in considerazione come una sorgente esterna generatrice di portatori. Le coppie elettrone-lacuna generate dalla particella vengono incluse nelle equazioni di continuità attraverso un aggiuntivo *generation rate*. Quest'ultimo può esser relazionato ai parametri di irradiazione, come la LET delle particelle che può esser convertita in un numero equivalente di coppie elettrone-lacuna per unità di lunghezza utilizzando l'energia media necessaria per la creazione di una coppia E_{ehp} :

$$(4.1) \quad \frac{dN_{ehp}}{dl} = \frac{1}{E_{ehp}} \frac{dE}{dl}$$

dove N_{ep} è il numero di coppie generate dalla particella. Associando le due equazioni che descrivono la distribuzione spaziale e temporale della creazione di coppie elettrone-lacuna, il numero di coppie viene utilizzato nelle equazioni di continuità attraverso il seguente *generation rate* indotto dalla radiazione:

$$(4.2) \quad G(\omega, l, t) = \frac{dN_{ehp}}{dl}(l) \cdot R(\omega) \cdot T(t)$$

dove $R(\omega)$ e $T(t)$ sono funzioni delle distribuzioni radiali e temporali delle coppie indotte dalla radiazione, rispettivamente. Nell'equazione (4.2) sono state assunte le ipotesi che la funzione di distribuzione radiale dipenda unicamente dalla distanza percorsa dalla particella nel materiale e che la generazione di coppie lungo la traccia abbia la stessa distribuzione temporale in ogni punto. Dato che la funzione G deve soddisfare la condizione:

$$(4.3) \quad \int_{\omega=0}^{\infty} \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{t=-\infty}^{\infty} G \omega d\omega d\theta dt = \frac{dN_{ehp}}{dl}$$

dove le funzioni $R(\omega)$ e $T(t)$ sono state sottoposte alle seguenti normalizzazioni:

$$(4.4) \quad 2\pi \int_{\omega=0}^{\infty} R(\omega) \omega d\omega = 1$$

$$(4.5) \quad \int_{t=-\infty}^{\infty} T(t) dt = 1$$

I modelli di traccia dello ione solitamente disponibili nei codici di simulazione commerciali propongono una funzione Gaussiana come distribuzione della funzione temporale $T(t)$:

$$(4.6) \quad T(t) = \frac{e^{-(t/t_c)^2}}{t_c \sqrt{\pi}}$$

dove t_c è il tempo caratteristico della funzione Gaussiana che permette di aggiustare la durata dell'impulso. La funzione di distribuzione radiale, invece, viene solitamente modellata con una funzione esponenziale, o, a volte, anch'essa con una Gaussiana:

$$(4.7) \quad R(\omega) = \frac{e^{-(\omega/r_c)^2}}{\pi r_c^2}$$

dove r_C è la caratteristica radiale della funzione Gaussiana utilizzata per aggiustare la larghezza della traccia.

Diversi studi hanno dimostrato che differenti distribuzioni di generazione di carica usati per la traccia dello ione, producono effetti diversi nella risposta transitoria del dispositivo. Tale differenza è limitata al 5% per impatti sul bulk di diodi p-n. Considerando una LET non costante in funzione della profondità lungo il cammino, ha maggior impatto sulla risposta transitoria nel bulk. I parametri chiave nei transistori da single-event hanno una variazione superiore al 20% se la LET varia in funzione della profondità, confrontata a con quella a LET costante. Di contro però, questo fenomeno non si verifica sugli attuali dispositivi SOI.

4.5. Gridding

In ogni simulazione su dispositivi il problema centrale è dato dal *gridding* o *generazione di mesh*. Esso è di particolare interesse per lo studio e la modellizzazione degli SEU legato alla necessità di simulazioni 3D necessarie per risolvere le densità dei portatori generati dallo ione che si muove come una funzione temporale.

Diversi degli attuali codici 3D sono stati sviluppati basandosi sui precedenti 2D. Questi codici, attualmente, trattano la terza dimensione z , come una dimensione “inferiore”. In poche parole, la terza dimensione consiste in una serie di piani x - y , dove ognuno di questi piani ha un’equivalente griglia tale che gli elementi di mesh risultano a forma di prisma. Una struttura di griglia prismatica richiede molti più punti che una equivalente tetraedrica, dovuto al fatto che le linee di mesh in direzione z non hanno una fine e quindi si potrebbero creare una griglia ad alta intensità in una zona non di interesse. Poiché il tempo di soluzione è proporzionale a N^α , dove N è il numero di nodi e α è compreso da 1.5 e 2.2, la riduzione dei nodi non necessari risulta di grande importanza.

Recentemente sono stati introdotti simulatori di dispositivi 3D che permettono la riduzione del numero di nodi descrivendo comunque in modo accurato il dispositivo e vengono utilizzati specialmente per lo studio di SEU. Il movimento dei portatori dovuti all’impatto di una particella ionizzante sotto l’influenza di meccanismi di drift e/o diffusion, presenta diverse necessità di meshing. Immediatamente dopo l’impatto, è richiesta una griglia ad alta densità in quella zona per risolvere le equazioni dovute alle generazione di portatori. Dopo qualche

nanosecondo, però, i portatori si sono diffusi nel dispositivo e quindi una griglia ad alta densità nella sola regione d'impatto non risulta più ottimale per i calcoli successivi. Risulta utile quindi un modellatore di SEU che cerchi un algoritmo di griglia in grado di adattarsi dinamicamente al progredire del single-event-effect. L'algoritmo implementato è basato sul rate di fotogenerazione della concentrazione dei portatori in eccesso, ma spesso conduceva alla generazione di mesh in eccesso a causa della difficoltà numerica di rimozione dei punti non necessari. In alcuni casi, però, rimane comunque molto efficiente disegnare a mano la griglia per risolvere in modo accurato le regioni d'interesse.

Una considerazione finale che deve essere fatta quando si sceglie una griglia per le simulazioni SEU è di includere in modo appropriato i margini del dispositivo.

Sfortunatamente nelle simulazioni standard tensione-corrente dei dispositivi, è molto importante eseguire un numero adeguato di simulazioni nella regione d'impatto per evitare risultati privi di significato fisico. Con l'eccezione delle regioni di contatto, molti dispositivi vengono definiti usando le condizioni di confine riflessive. Questo causa una riflessione della carica e quindi come se, fisicamente, vi fosse l'impatto di un'altra particella nell'altro lato del confine. Solitamente, garantire che lo ione non impatti in una zona a pochi micron dal confine è sufficiente a prevenire questo problema.

4.6. Validazioni sperimentali

I risultati ottenuti mediante simulazione al computer richiedono un riscontro con dati sperimentali. Questo non è sempre facile da ottenere. Nel caso di simulazioni di raccolta di carica, ad esempio, risulta molto difficile la misura del fenomeno sperimentalmente, in quanto il transitorio di raccolta è molto veloce. I transienti di raccolta di carica, ottenuti utilizzando un microfascio di ioni ad alta velocità campionato da un oscilloscopio, risultano essere i dati migliori a disposizione per questo fenomeno, dove la risoluzione temporale è considerata come un errore in ingresso.

Probabilmente il confronto maggiormente comprensibile sugli esperimenti di raccolta di carica, è dato comparando i risultati di simulazioni quasi 3D PSISCES a simmetria cilindrica con i dati di Wagner [38],[39]. Da tale confronto si è osservato che le simulazioni avevano un scarso valore predittivo sull'andamento della variazione di raccolta di carica in funzione della tensione, del doping di substrato e del tipo di ione. Nella maggior parte dei casi, infatti, le simulazioni

prevedevano un transitorio molto più rapido con un alto picco di corrente. Si è quindi ipotizzato che tale discrepanza dipendesse dalla struttura della traccia dello ione, ma si è trovato che questo, invece, ha solo un piccolo effetto sulla corrente di transitorio. Le differenze, inoltre, possono esser complicate dall'inclusione dei modelli di mobilità dei portatori e dall'incertezza sul tempo di vita degli stessi e sul profilo del drogaggio.

Risultati ottenuti da simulazioni per LET di soglia per SEU su cella CMOS SRAM, si sono dimostrati dal confronto con dati sperimentali, altamente precisi. In queste simulazioni, sono stati compiuti degli aggiustamenti dei parametri solo per rendere le caratteristiche tensione-corrente il più simili possibile. Problemi sorgono quando si confrontano simulazioni deterministiche con risultati probabilistici. Le simulazioni infatti prevedono una LET di soglia assoluta per un dato ione, una data locazione d'impatto e un dato angolo d'incidenza. Quindi, secondo questi risultati ottenuti mediante simulazione, tutti gli impatti sopra la soglia dovrebbero indurre un upset, tutti quelli sotto la soglia non dovrebbero indurlo. Sperimentalmente, però, si ottengono dati relativi a ioni che impattano in varie locazioni con diversi angoli d'incidenza senza contare che la sensibilità agli SEU varia di cella in cella e quindi non tutte le celle presentano la stessa LET di soglia. Con la recente tecnologia avanzata, è però possibile calcolare la curva di cross-section in funzione della LET della particella incidente. Questo fornisce una maggior validità ai risultati ottenuti delle simulazioni.

Questi ed altri esperimenti, indicano che gli strumenti di simulazione di dispositivo/circuito full-cell e mixed-level soddisfano in modo adeguato le necessità di modellizzazione di SEU per SRAM CMOS.

4.7. Recenti sviluppi

Un inconveniente del metodo mixed-level sono gli effetti di accoppiamento tra transistor vicini, dei quali si è dimostrata l'esistenza anche mediante simulazioni 2D a livello di dispositivo. Per ovviare a tale problema è necessario simulare l'intera SRAM in 3D. Confrontando i risultati di simulazioni mixed-level standard, si è verificato che nei casi in cui non vi è effetto di accoppiamento tra transistor vicini, tale tecnica risulta adeguata a riprodurre gli effetti sull'intera cella, anche se comunque sono stati osservati fenomeni di accoppiamento se l'impatto avviene in certe zone. Con la tecnica mixed-mode, non si è in grado, però, di prevedere tali effetti. Con l'incremento di integrazione dei dispositivi,

diminuisce anche l'interspazio tra transistor e quindi tali effetti capacitivi sono destinati ad aumentare e a diventare un fenomeno importante nelle future tecnologie, quindi, la simulazione dell'intera cella in 3D diventerà necessaria.

Ad oggi le simulazioni mixed-mode per un singolo ione impattante forniscono buoni riscontri per quanto riguarda la LET di soglia, confrontata con dati ottenuti in modo sperimentale. Ad ogni modo, gli error rate dei circuiti microelettronici, non dipendono solo dalla LET di soglia, ma anche dall'area sensibile, che però non può essere ottenuta da queste simulazioni. Vari ricercatori hanno sviluppato delle curve semplificate di cross-section ottenute da risultati teorici e simulativi precedenti. Da un set di simulazioni viene quindi fornita una mappa dell'area sensibile agli SEU per un dato ione ad una data energia. Ripetendo tali simulazioni per ioni diversi e per diverse energie, gli autori hanno generato l'evoluzione dell'area sensibile come funzione della LET dello ione. Combinando queste informazioni in una singola mappa di upset, è possibile descrivere una curva di cross-section che ottenendo un buon riscontro con i dati sperimentali. Ovviamente l'ottenimento di una mappa completa richiede numerose simulazioni e quindi anche una certa tempistica.

CAPITOLO V

5. TOOLS ISE-TCAD E SIMULAZIONI PER SEE

ISE-TCAD è un software prodotto a Zurigo dalla Integrating Systems Engineering [41]. Si tratta di un simulatore in grado di valutare strutture da una a tre dimensioni per dispositivi e circuiti a semiconduttore. Esso fornisce la definizione di modelli fisici avanzati e diversi metodi numerici di risoluzione che consentono di simulare un vasto campo di strutture: dalle tecnologie submicrometriche MOS fino a quelle bipolari di potenza.

Questo software fornisce vari tool dedicati interagenti tra di loro. In sintesi, i punti chiave di questo strumento risultano essere:

- ↳ insieme di modelli fisici per la definizione dei dispositivi a semiconduttore;
- ↳ supporto generale per l'analisi di strutture con diverse geometrie;
- ↳ possibilità di analisi DC, AC, di rumore e tempo-varianti;
- ↳ algoritmi risolutivi non lineari;
- ↳ supporto per simulazioni in modalità mista (dispositivo e circuito).

ISE TCAD è stato scelto per questo studio per l'ultimo punto evidenziato, poiché permette l'analisi del dispositivo insieme al circuito che lo contiene che, come evidenziato anche nei capitoli precedenti, è risultato essere un metodo accurato per l'analisi degli effetti da evento singolo.

Il calcolo delle correnti, delle tensioni e della carica, avviene grazie ad un insieme di equazioni che descrivono la distribuzione dei portatori ed i meccanismi conduttivi. Il dispositivo reale viene rappresentato come un'entità virtuale, le cui proprietà fisiche vengono discretizzate mediante meshing.

Il front page di ISE TCAD si presenta come nella figura seguente.

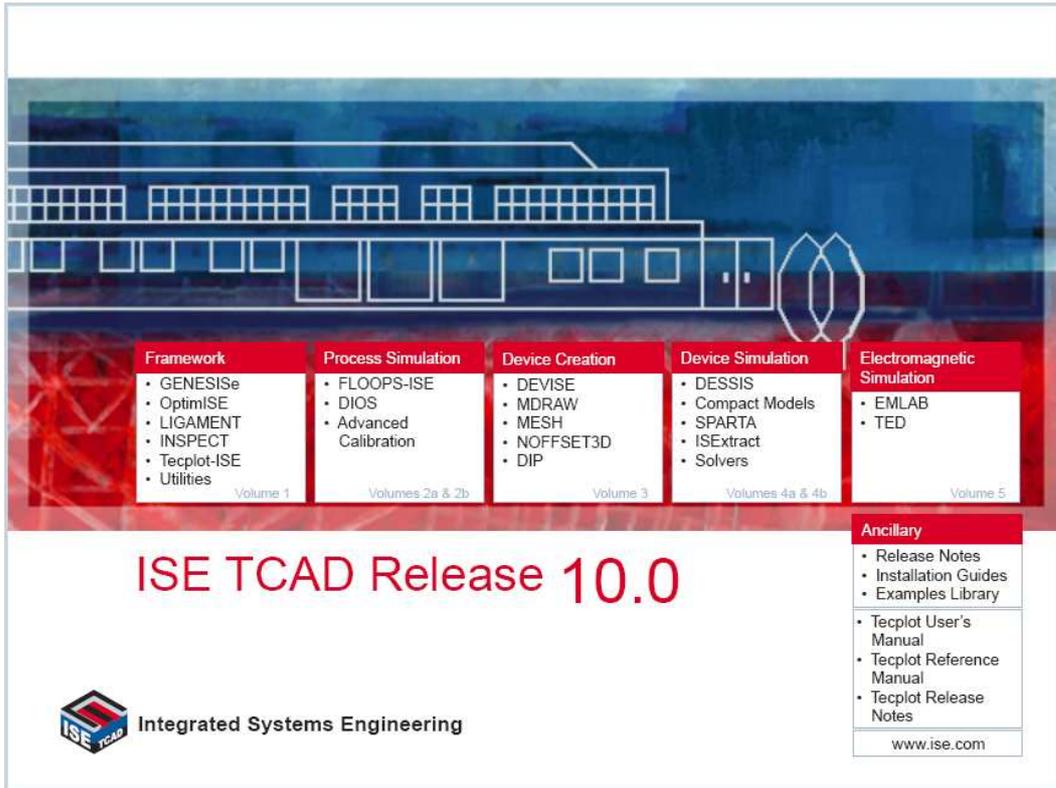


Figura 5.1: front page di ISE TCAD [40]

Come si può notare, l'utente ha a disposizione diversi tools, a seconda delle sue necessità. Vi sono tools specifici per i framework, per la creazione del dispositivo, per la sua simulazione ed altri per le simulazioni di processo o elettromagnetiche. La figura di seguito riportata raffigura i vari tools riportando la loro specificità e l'interazione con gli altri tool di ISE TCAD.

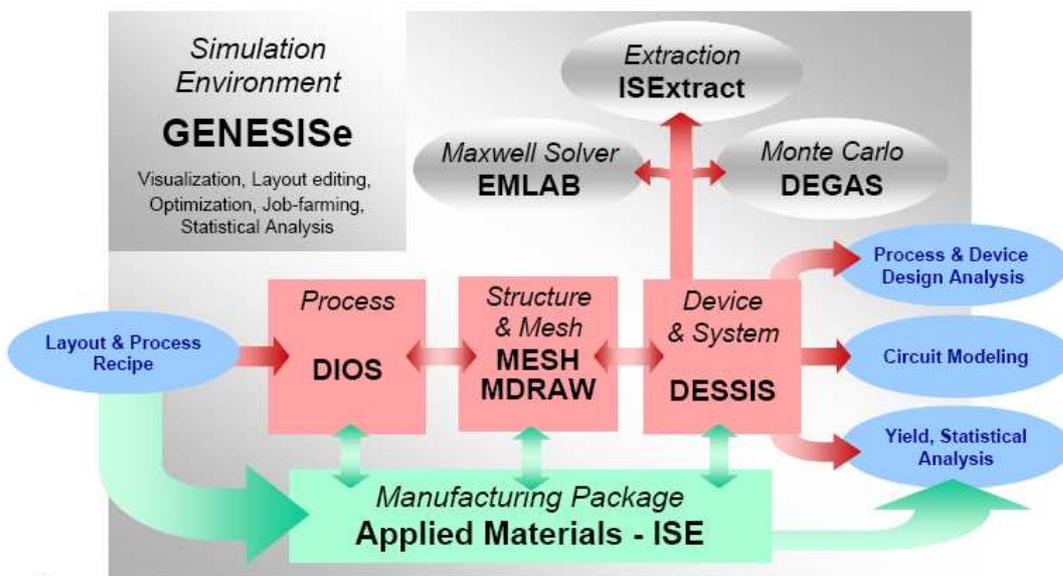


Figura 5.2: Tools di ISE TCAD [40]

Inoltre l'utente ha a disposizione un tutorial, per prendere confidenza con i vari tools e un dettagliato manuale per ognuno di essi.

Per realizzare lo studio degli effetti ad evento singolo su una cella di memoria SRAM sono stati utilizzati solo alcuni di questi tools. La scelta di una cella di memoria di questo tipo non è casuale, infatti esse risultano essere il tipo di memorie a stato solido maggiormente sensibili alle radiazioni e per questo, molto spesso, vengono utilizzate in questa tipologia di studi.

L'iter operativo per realizzare questa tipologia di studi è schematicamente riportato di seguito.

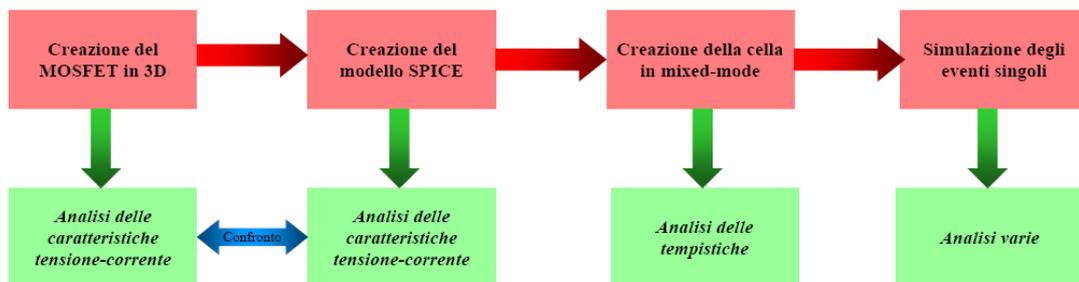


Figura 5.3: Diagramma rappresentativo dell'iter operativo per realizzare una simulazione di SEE su cella di memoria SRAM

Vedremo ora nei paragrafi successivi quali tools di ISE sono stati utilizzati per ogni operazione, dandone una descrizione in generale, per poi passare allo specifico e quindi al loro utilizzo per il lavoro svolto.

5.1. DEVISE

Il manuale di ISE-TCAD definisce il tool *DEVISE* come uno strumento che fornisce tre modalità operative: editing di strutture 2D, editing di strutture 3D e emulatore di processi 3D. L'editing di strutture 2D e 3D include la generazione di modelli geometrici, definizione del doping e l'inclusione della mesh.

In *DEVISE* le strutture vengono generate o create in modo interattivo tramite interfaccia grafica con l'utente, come i profili di drogaggio e le strategie di meshing. Infatti questo tool fornisce un'interfaccia per configurare la modalità di

mesh. Inoltre, esso genera dei file di input necessari alla strategia di meshing, i quali generano dei file grid e data (DF-ISE .grd e .dat file) per la struttura del dispositivo.

Per questo lavoro *DEVISE* è stato utilizzato come editor di dispositivo, per creare i MOSFET in 3D. Per far ciò il tool provvede tramite l'interfaccia e un supporto per la scrittura a:

- generare la geometria del modello,
- definire le regioni di contatto,
- aggiungere al modello profili di drogaggio costanti, analitici e generabili all'esterno,
- definire l'accuratezza locale,
- interfacciarsi con ISE meshing.

Nel caso in esame il modello del MOSFET 3D è di un nmos IBM 8RF in tecnologia 130nm. Tutti gli strati, i contatti, le regioni, i drogaggi sono disponibili, questo giustifica la sua scelta. Essi e la mesh sono stati definiti utilizzando un supporto di scrittura. Il listato completo è consultabile in Allegato 1. Si crea in questo modo un file di tipo scheme script (.scm) il quale contiene i comandi che descrivono passo passo ciò che *DEVISE* deve eseguire per creare la struttura del MOSFET. L'utilizzo di un supporto di scrittura facilita le eventuali operazioni di correzione del file.

Aperto l'interfaccia di *DEVISE* e caricando direttamente il file .scm, completo delle strategie di mesh nelle varie regioni, è possibile accedere al Meshing Engine scegliendo di realizzare la mesh 3D. Vengono così forniti in uscita due file uno .grd e uno .dat che contengono le informazioni relative al dispositivo e che saranno poi i file di ingresso per simulazione dello stesso.

Di seguito vengono riportate le immagini 3D del MOSFET realizzato, come appaiono direttamente dall'interfaccia grafica di *DEVISE*, e più accurate, utilizzando un altro tool grafico a disposizione in ISE-TCAD che è *Tecplot_ISE*.

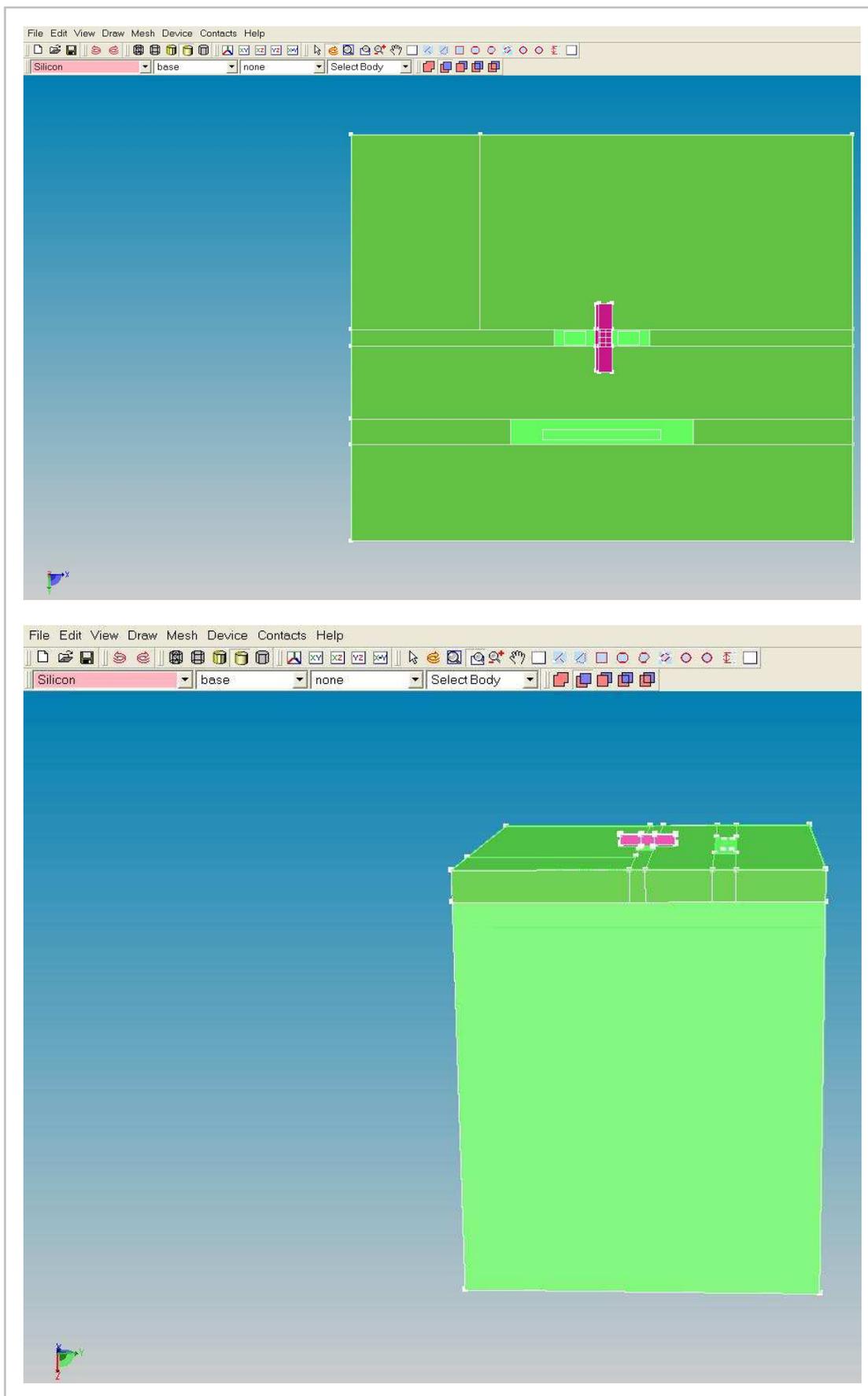


Figura 5.3: Vista dall'alto (sopra) e tridimensionale (sotto) dell'nMOSFET 3D da Device.

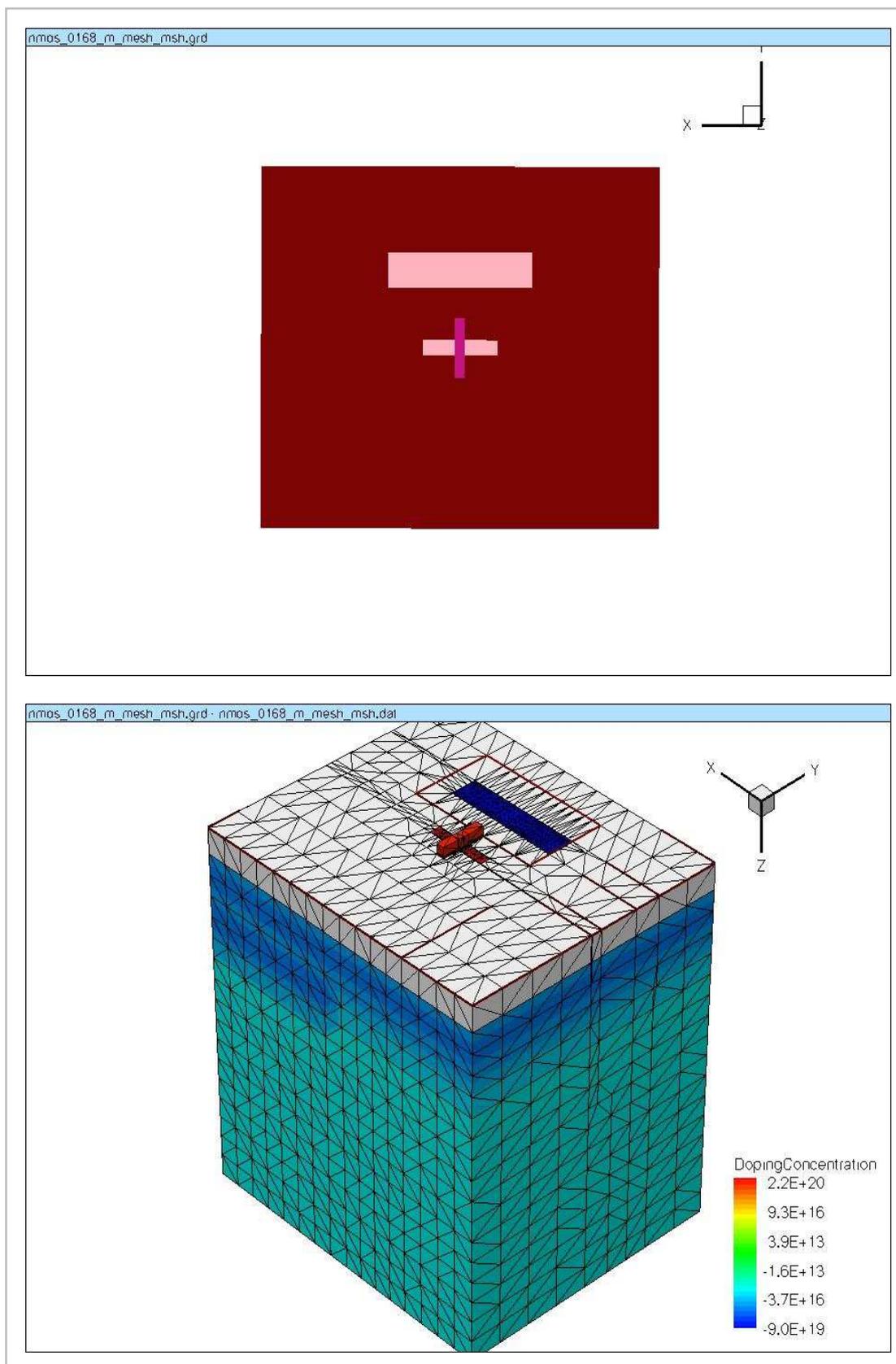


Figura 5.3: Vista dall'alto (sopra) e tridimensionale con evidenziate le linee di mesh (sotto) dell'nMOSFET 3D da Tecplot_ISE. Come riportato in legenda è visualizzato il profilo della concentrazione di drogaggio.

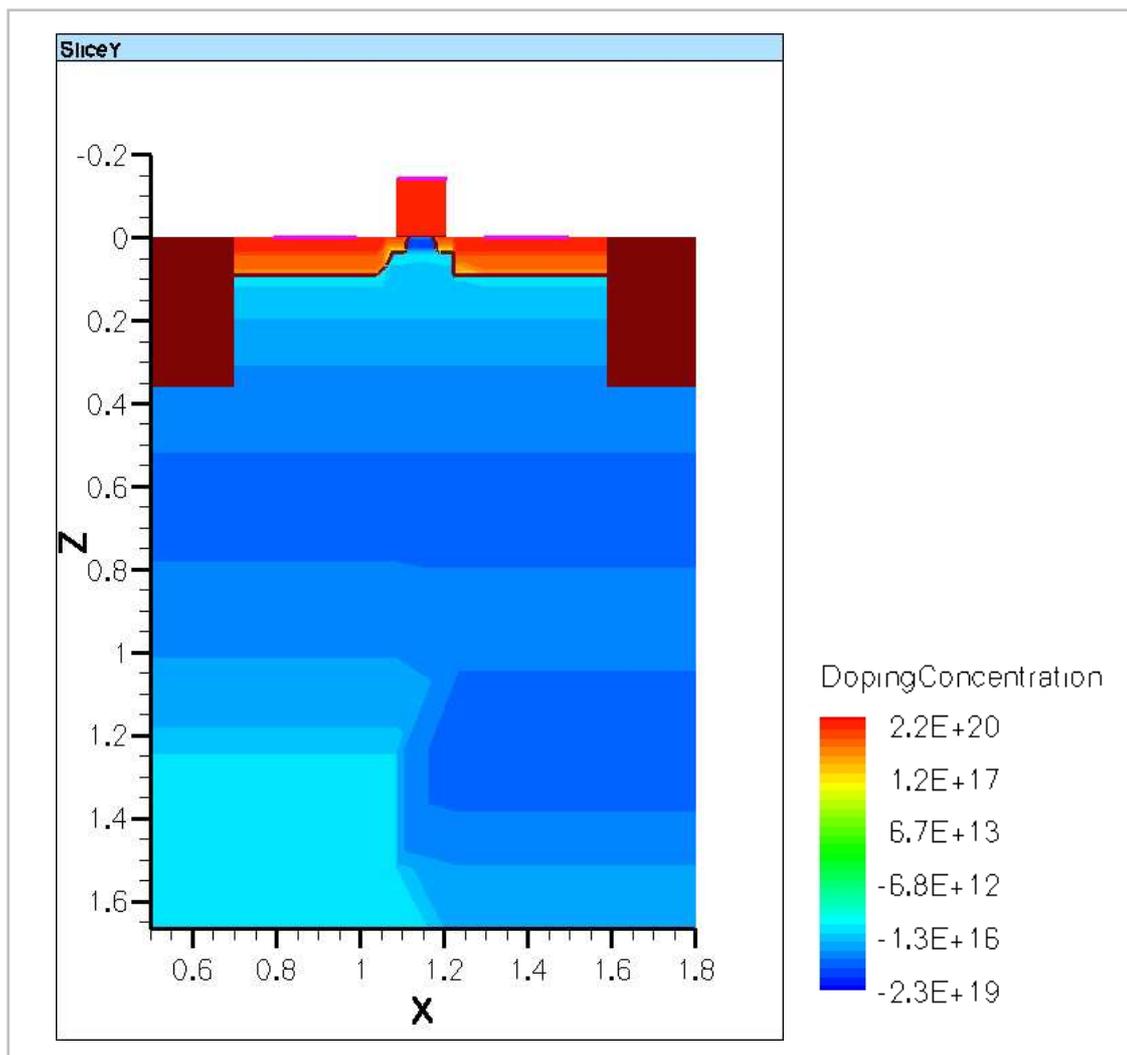


Figura 5.4: Vista dell'nMOSFET 3D “tagliato” in direzione y da Tecplot_ISE. Come riportato in legenda è visualizzato il profilo della concentrazione di drogaggio. Si nota che si possono identificare facilmente i terminali del MOSFET.

Ora si dispone quindi del MOSFET di tipo n realizzato in 3D. Come si è visto nelle trattazioni dei capitoli precedenti, lo studio dell'intera cella di memoria realizzata con MOSFET tridimensionali, richiederebbe un tempo di simulazione notevolmente elevato. Per ovviare a ciò si è visto che l'utilizzo della tecnica di mixed-mode risulta essere un buon compromesso se si studiano gli effetti agli eventi singoli.

La cella che si va a studiare risulta in definitiva definita come in figura:

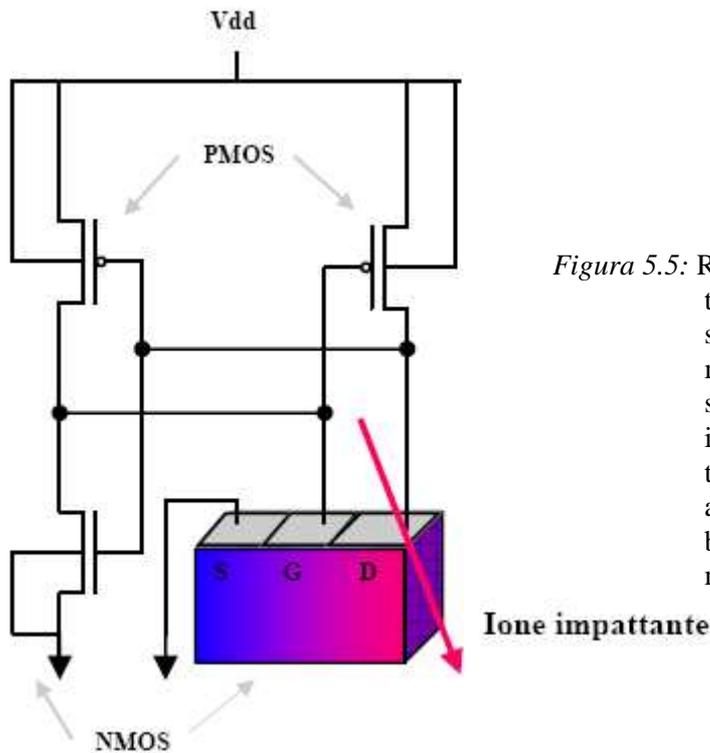


Figura 5.5: Rappresentazione grafica della tecnica mixed-mode per lo studio di SEE su cella di memoria SRAM. Si nota che solo il MOSFET di tipo n impattato viene realizzato tridimensionalmente, mentre gli altri MOSFET sono bidimensionali definiti mediante compact model Spice.

A questo punto risulta quindi necessario “estrapolare” il modello 2D del MOSFET tridimensionale di cui si dispone.

5.2. GENESISe

GENESISe è un pacchetto software che fornisce framework per la definizione, l'organizzazione e l'automatico run di progetti TCAD di simulazione. Fornisce all'utilizzatore interfacce grafiche per guidare le varie simulazioni, per la visualizzazione dei vari tools e per l'automatizzazione dell'esecuzione dei progetti. Esso rappresenta il front end grafico primario che integra in un unico ambiente tutti i tools di ISE TCAD. Si presenta come un'interfaccia grafica di utilizzo intuitivo utilizzabile per simulazioni sui semiconduttori industriali, dalle ricerche per la costruzione, il design e l'organizzazione.

Le simulazioni sono organizzate all'interno di un progetto e *GENESISe* automaticamente gestisce il flusso delle informazioni che include: il preprocessing dei file di input dell'utilizzatore, la parametrizzazione del progetto, il setting e l'esecuzione dei tool d'istanza, la visualizzazione dei risultati su appropriati

supporti. Tutto questo permettendo all'utilizzatore di definire i parametri e le variabili per poter eseguire un'analisi parametrica appropriata.

GENESIS fornisce dei progetti "standard", come ad esempio l'estrazione del corrispondente modello *SPICE* da un dispositivo realizzato, utilizzando *DEVISE*, in 2D o 3D.

Operativamente, quindi, è stato fornito in ingresso il modello nMOSFET, realizzato in precedenza, ad un progetto già esistente, modificandone solo alcuni parametri. Tale progetto è essenzialmente diviso in tre parti: nella prima, utilizzando *Dessis*, vengono svolte tutte le simulazioni relative alle caratteristiche di tensione-corrente (I_d - V_g e I_d - V_d) del MOSFET; ottenute passa automaticamente al secondo step e quindi all'utilizzo di *ISExtract* per l'estrazione dei parametri del modello *SPICE*, per utilizzare nuovamente *Dessis* e simulare quindi le caratteristiche tensione-corrente del modello estratto.

L'interfaccia grafica che si presenta all'avvio del progetto è riportata in figura 5.5.

Le caratteristiche di tensione-corrente sono poi visualizzabili graficamente tramite *Inspect*, come il modello *SPICE* estratto è disponibile nella cartella nella quale si è salvato il progetto (figura 5.6).

A questo punto si hanno a disposizione tutti i "componenti" per la realizzazione dell'intera cella, dall'nMOSFET in 3D ai corrispondenti pMOSFET e nMOSFET *SPICE*.

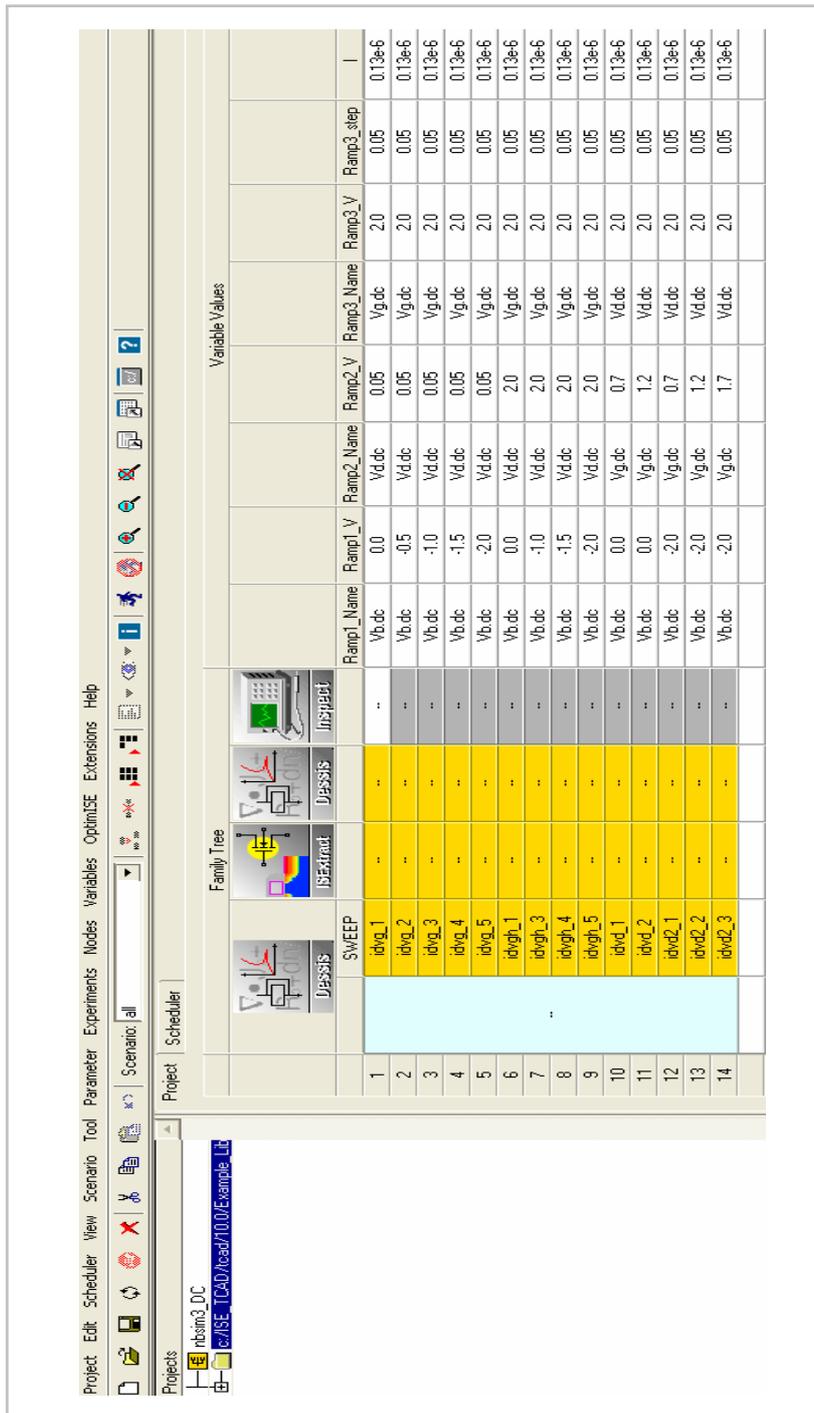


Figura 5.5: Interfaccia grafica di GENESISe per la creazione del progetto per l'estrazione dei parametri per realizzare il modello Spice dell'nMOSFET 3D.

Rispetto al progetto fornito dal tool, la simulazione di alcune curve caratteristiche è stata eliminata per un motivo di tipo tempistico. Si distinguono: la prima colonna Dessimis, la seconda colonna, ISExtract, poi con Dessimis. Poi con Inspect si confrontano in modo grafico le caratteristiche.

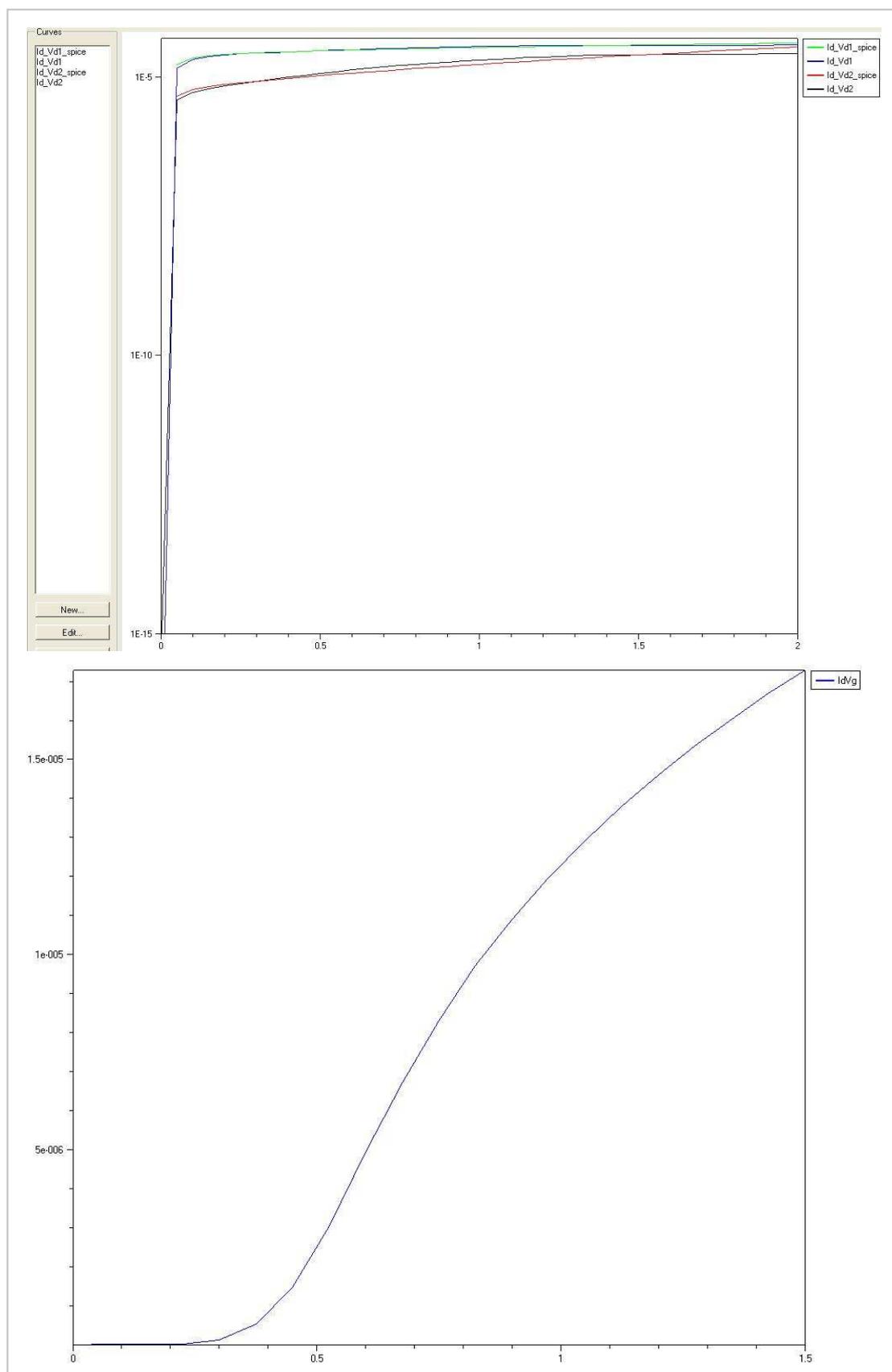


Figura 5.6: Caratteristiche I_d - V_d sopra e I_d - V_g sotto, ottenute utilizzando Inspect.

5.3. DESSIS

DESSIS è un tool di simulazione multidimensionale, elettrotermica e mixed-mode di dispositivo e circuito per dispositivi uni-, bi- e tri-dimensionali. Fornisce modelli fisici avanzati e metodi di risoluzione numerica per la simulazione di svariate tipologie di dispositivo, dai MOSFET di nuova generazione alle strutture di potenza.

Un dispositivo reale, come un MOSFET, viene rappresentato nel simulatore mediante un dispositivo “virtuale”, nel quale le proprietà fisiche sono discretizzate in un numero finito di nodi mediante una griglia. Esso quindi risulta un’ approssimazione del dispositivo reale. La struttura del dispositivo virtuale è descritta nel file di output ottenuti da *DEVISE*:

- I file *grid* contengono una descrizione delle varie regioni del dispositivo, dei materiali e della locazione di ogni contatto elettrico. Esso contiene inoltre la griglia, cioè la collocazione di tutti i nodi e le interconnessioni tra di essi.
- I file *data* contengono invece informazioni riguardanti le proprietà del dispositivo, quali i profili di drogaggio relativi ad ogni nodo.

Oltre a questa tipologia di file, solitamente, per realizzare una simulazione con *Dessis*, si pone in ingresso anche un file *.par*, il quale contiene i coefficienti dei modelli utilizzati. Anche tali parametri possono ovviamente esser modificati.

Un generico flusso simulativo utilizzando *Dessis* si può così schematizzare:

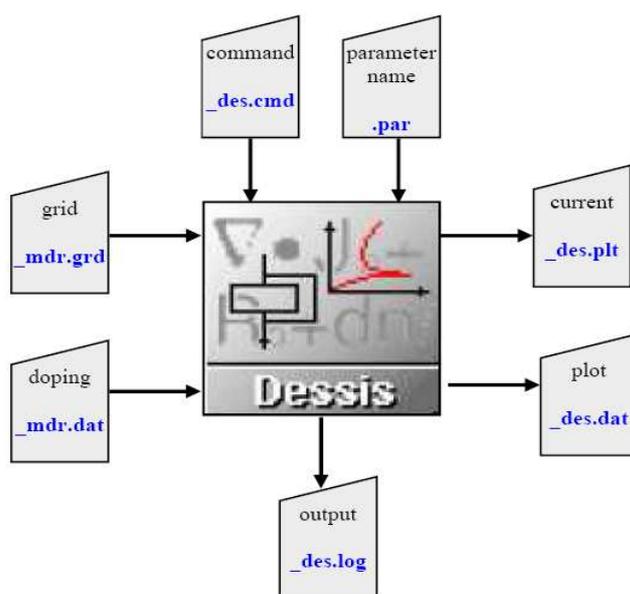


Figura 5.7: Diagramma rappresentativo delle tipologie di file ingresso e in uscita a Dessis.

In uscita vengono forniti due tipologie di file:

- file **_des.plt**: vi sono memorizzati gli andamenti temporali, ottenuti ad esempio attraverso simulazioni di transitori, di grandezze elettriche come tensioni e correnti sui contatti o in alcuni punti specifici della griglia.
- file **_des.dat**: vi sono invece memorizzate, per ogni punto della griglia, informazioni riguardanti la distribuzione spaziale di intensità del campo elettrico del potenziale elettrostatico, la concentrazione di elettroni e lacune, ecc...

Il file di *Dessis* contenente i comandi è organizzato in varie sezioni, le quali, non necessariamente, devono essere in ordine, tranne nel caso di simulazione mixed-mode. Inoltre questo tool non è sensibile alle parole chiave, che possono esser abbreviate, ma però lo è alla sintassi. Il file che contiene tutte queste direttive è un file .cmd e di seguito si riportano le sessioni presenti al suo interno, nell'ordine corretto per il buon esito delle simulazione.

5.3.1. *Sessione File*

In questa prima sessione devono esser specificati i file d'ingresso, contenenti le informazioni riguardanti il dispositivo, come ad esempio la griglia e il drogaggio, e i file d'uscita per i risultati della simulazione. In alcuni casi viene aggiunto un altro file (.par) contenente parametri necessari in fase simulativa. I risultati, invece, vengono memorizzati in altri due file definiti dalle righe Plot e Current che permettono di visualizzare, rispettivamente, lo stato fisico del dispositivo e gli andamenti dei segnali elettrici. Un altro file che viene generato in uscita automaticamente quando *Dessis* viene avviato, quindi anche se non richiesto dall'utilizzatore (il nome di default è output _des.log), contiene le uscite standard ridirezionate.

5.3.2. *Sessione Electrode*

Caricata la struttura del dispositivo in *Dessis*, è necessario definire i contatti, richiamandoli in questa sessione, con lo stesso nome che gli è stato assegnato durante la creazione della struttura fisica, e specificando la loro tensione iniziale.

Ogni contatto che non viene definito in questa sessione come “electrode” viene poi ignorato in fase simulativa. E’ anche possibile in questa parte definire altri parametri, come ad esempio barrier, o altre specifiche per caratterizzare al meglio il contatto (resistivo, Schottky, ecc...).

5.3.3. *Sessione Physics*

In questa sessione si dichiarano i modelli fisici che devono esser applicati durante la simulazione del dispositivo. I modelli di trasporto in *Dessis* includono:

- Trasporto Drift-Diffusion
- Trasporto Thermodynamic: aggiunge effetti elettro-termici al modello precedente
- Trasporto Hydrodynamic
- Metodo di Monte Carlo

Le specifiche e le caratteristiche di questi modelli sono già state illustrate nei capitoli precedenti. Inoltre, oltre ai modelli di trasporto, include i modelli di generazione-rigenerazione dei portatori, della particella impattante, ecc...

Inoltre *Dessis* fornisce modelli anche per includere gli effetti quantistici:

- Correzione Van Dort
- Gradiente di Densità
- Soluzione delle equazioni di Poisson Schrödinger
- Tunneling

Per ogni modello si possono poi specificare dei parametri dei quali tener conto durante la simulazione (es: doping) i quali variano a seconda del modello che si sta definendo.

In poche parole in questa sessione vengono dichiarati i vari modelli ai quali la simulazione deve far riferimento e le opzioni a disposizione sono numerose.

5.3.4. *Sessione Plot*

Nella sessione Plot vengono specificate le variabili di soluzione da salvare nel file Plot dichiarato e nominato nella sessione File. Esse possono essere, ad esempio: il drogaggio, la concentrazione dei portatori, la distribuzione del campo elettrico, ecc.... Il valore di queste variabili può esser salvato alla fine della simulazione, oppure in ogni punto specificato dall’utente.

5.3.5. Sessione **Math**

Dessis risolve le equazioni di dispositivo in modo iterativo. In ogni iterazione viene calcolato un errore. Questo meccanismo viene ripetuto fino a quando il sistema converge ad una soluzione e quindi l'errore è sufficientemente piccolo.

Il compito di questa sezione è quello di specificare i valori predefiniti dei comandi di risoluzione. Possono essere introdotti due tipi di parametri: specifici per un dispositivo oppure globali.

5.3.6. Sessione **Solve**

A differenza delle altre, questa parte deve essere scritta rispettando un ordine preciso, in quanto costituita da una serie di comandi che verranno eseguiti in sequenza. Tali comandi sono in gran parte di alto livello e al loro interno fanno riferimenti livelli gerarchici inferiori.

In allegato 2 si riporta il listato dei comandi contenuti nel file `.cmd` per la simulazione dell'nMOSFET 3D creato per ottenerne la caratteristica `Id_Vg`. Questo a titolo d'esempio perché tutte le curve delle caratteristiche le si era ottenute dal progetto in *GENESISe*, illustrato nel paragrafo precedente.

5.4. INSPECT

E' un tool utilizzato per la visualizzazione e l'analisi di curve, come ad esempio le caratteristiche `I_V`. Risulta molto semplice da utilizzare e permette l'estrazione di alcuni parametri quali la tensione di soglia, la corrente di saturazione. Le curve sono date da un sequenza di punti definiti in array X e Y. Viene utilizzato per l'analisi dei file tipo `.plt`.

5.5. Tecplot_ISE

Tecplot_ISE è un software dedicato alla visualizzazione 2D e 3D del dispositivo, dei livelli di drogaggio, ecc.... In ingresso si forniscono i file di tipo `.grid` e `.dat`, permettendo l'analisi del campo elettrico, della densità dei portatori e tutti gli altri parametri richiesti nel file `.cmd` negli istanti specificati nel file di comando.

5.6. Tecnica Mixed-mode per lo studio degli SEE

ISE TCAD viene utilizzato per lo studio degli effetti ad evento singolo perchè permette simulazioni mixed-mode, come specificato ad inizio capitolo. Infatti, *Dessis*, oltre ad essere un simulatore per dispositivi singoli, supporta anche le simulazioni mixed-mode su piccoli circuiti con più componenti quali dispositivi fisici e compact model.

Per le simulazioni mixed-mode, il file .cmd deve includere non solo la definizione di ogni singolo elemento del circuito, ma anche la netlist dei collegamenti tra di essi. Per far questo viene aggiunta un'ulteriore sessione **System**. Inoltre nella sessione **Solve**, per questo tipologia di simulazioni, dovrà esser specificato quale parte del sistema deve esser simulato. Ma andiamo per ordine.

Una simulazione di tipo mixed-mode, contiene uno o più dispositivi realizzati tridimensionalmente, mentre per gli altri elementi componenti il circuito vengono utilizzati i compact model. Nel caso che stiamo studiando, il circuito che si vuole realizzare è quello rappresentato in figura 5.5. Il dispositivo tridimensionale è l'nMOSFET. Nel file contenente i comandi simulativi deve quindi contenere una nuova sessione. La sessione **Device** viene introdotta solo nel caso di simulazioni di questo tipo e in essa viene definito il dispositivo fisico, utilizzato per definire il circuito. Di seguito riportiamo la parte **Device** inserita per simulare la cella SRAM in mixed-mode relativa all'nMOSFET:

```
Device NMOS {
  Electrode{
    { Name="Source"    Voltage=0.0 }
    { Name="Drain"     Voltage=0.0 }
    { Name="Gate"      Voltage=0.0 }
    { Name="Substrate" Voltage=0.0 }
    { Name="Pwell"     Voltage=0.0 }
  }

  File {
    Grid=    "nmos_0168_msh.grd"
    Doping=  "nmos_0168_msh.dat"
    Plot=    "SRAM300_LET001_Wt01_vdd14_des.dat"
    Parameter = "dessis.par"
```

```
Current = "SRAM300_LET001_Wt01_vdd14_des.plt"  
}
```

```
Physics {  
    Temperature=300  
    Hydrodynamic (eTemperature)  
    Recombination(SRH Auger)  
    Mobility( CarrierCarrierScattering  
        DopingDependence  
        Enormal)  
    EffectiveIntrinsicDensity( OldSlotboom )  
  
}
```

```
Plot {  
    Potential Electricfield  
    eDensity hDensity  
    eCurrent/Vector hCurrent/Vector  
    TotalCurrent/Vector  
    SRH Auger Avalanche  
    eMobility hMobility  
    eQuasiFermi hQuasiFermi  
    eGradQuasiFermi hGradQuasiFermi  
    eEparallel hEparallel  
    eMobility hMobility  
    eVelocity hVelocity  
    DonorConcentration Acceptorconcentration  
    Doping SpaceCharge  
    ConductionBand ValenceBand  
    BandGap Affinity  
    xMoleFraction  
    eTemperature hTemperature  
    HeavylonChargeDensity  
    HeavylonCharge  
  
}  
}
```

Come si può notare, dopo Device si riporta il nome che è stato dato al modello tridimensionale, che poi viene definito, tramite le sessioni già approfondite in precedenza. Quindi ogni sessione Device contiene le sessioni Electrode, File e Physics. Una particolare nota per la sessione File: in essa vengono specificati i nomi dei file che conterranno i dati del dispositivo, non del circuito globale. La sessione File globale conterrà invece i dati relativi all'intero circuito.

La sessione System è un'altra nuova sessione introdotta per le simulazioni mixed-mode. Questa sessione è necessaria solo per le simulazioni mixed-mode con più elementi. Contiene tutti gli elementi circuitali e le connessioni tra di essi. Le definizioni del dispositivo fisico in Device, vengono in questa sessione utilizzate per definire l'elemento circuitale. I contatti definiti in Electrode, vengono qui connessi ai vari nodi del circuito. Il file di Plot definito all'interno di questa sessione, conterrà le tensioni e le correnti ai nodi richiesti.

```

System {
  Vsource_pset vdd (vdd 0) { dc = 1.5 }
  Vsource_pset WL (WL 0) { dc = 0.0 }
  Vsource_pset BL (BL 0) { dc = 0.0 }
  Vsource_pset nBL (nBL 0) { dc = 1.5 }

  NMOS nmos1 ( "Drain"=Q "Gate"=nQ "Source"=0 "Substrate"=0 "Pwell"=0 )
  pMOS130_pset pmos2 ( nQ Q vdd vdd) { w = ...l = ... pd = ... ps= ...ad = ...as = ...}

  nMOS130_pset nmos3 ( nQ Q 0 0 )      { w = ...l = ... pd = ... ps= ...ad = ...as = ...}

  pMOS130_pset pmos4 ( Q nQ vdd vdd) { w = ...l = ... pd = ... ps= ...ad = ...as = ...}

  nMOS130_pset pass5 ( nQ WL nBL 0 ) { w = ...l = ... pd = ... ps= ...ad = ...as = ...}

  nMOS130_pset pass6 ( Q WL BL 0 )    { w = ...l = ... pd = ... ps= ...ad = ...as = ...}

  Set (Q = 1.5)
  Set (nQ = 0.0)
  Plot "SRAM300_sys_des" (time() v(vdd) v(Q) v(nQ) v(BL) v(nBL) v(WL) i(nmos1,out)
)
}

```

Come si è detto, si vogliono studiare gli effetti prodotti da particelle ionizzanti sulla cella di memoria SRAM. Nell'ambiente fisico reale, poi, i dispositivi sono esposti alle particelle, che impattano quindi su di essi con angoli, direzione e verso causali e su tutta la loro superficie.

5.6.1. Heavy ions

Quando uno ione pesante penetra nella struttura di un dispositivo, esso perde energia e genera lungo la sua traccia coppie elettrone-lacuna. Questi elettroni e lacune possono causare una corrente sufficientemente elevata che faccia cambiare lo stato logico della cella di memoria. Fattori importanti affinché avvenga o meno lo switch sono:

- l'energia e il tipo di ione,
- l'angolo di penetrazione,
- la relazione tra la LET e il numero di coppie create

Per realizzare simulazioni di SEE per impatto di ioni pesanti è necessario quindi attivare tale processo e definire tutti i parametri relativi alla particella. La riga di codice va inserita all'interno della sessione Physics:

```
Physics {
  HeavyIon (<keyword_options> )
```

In tabella vengono riportate tutte le parole chiave relative alle varie opzioni per HeavyIon.

Keyword	Descrizione
Time = <float>	Definisce l'istante in [s] nel quale lo ione penetra il dispositivo.
Location = <x,y,z>	Definisce il punto in [μm] dove lo ione entra nel dispositivo.
Direction = <vector>	Vettore (x,y,z) che definisce la direzione dello ione.
Gaussian	Definisce la distribuzione Gaussiana per R(w).
Exponential	Definisce la distribuzione Esponenziale per R(w), impostata per default.

LET_f = [float1, float2,...]	Definisce la funzione Linear Energy Transfer dello ione pesante, in coppie/cm ³ per default. Oppure in pC/ μm se definita l'opzione <i>PicoCoulmb</i> .
Wt_hi = [float1, float2,...]	Definisce la distanza caratteristica <i>wt(l)</i> , in cm per default. Oppure in μm se definita l'opzione <i>PicoCoulmb</i> .
Lenght = [float1, float2,...]	Definisce la lunghezza <i>l</i> , dove <i>LET_f</i> e <i>Wt_hi</i> sono specificati, in cm per default. Oppure in μm se definita l'opzione <i>PicoCoulmb</i> .
PicoCoulomb	Forza l'unità di misura della LET a pC/ μm.

Tabella 5.1: Descrizione delle parole chiave riguardanti le opzioni per simulazioni con ioni pesanti.

La densità totale di carica può poi esser plottata inserendo la parola chiave *HeavyIonCharge* nella sessione *Plot*.

5.6.2. LET di soglia

Le prove condotte sono state quindi condotte su una SRAM CMOS in tecnologia 130nm con tecnica mixed-mode. Lo studio condotto, eseguite tutte le fasi operative descritte in precedenza, aveva come obiettivo definire la sensibilità agli SEE della cella in funzione dell'angolo d'impatto dello ione. Per questo motivo, durante le varie simulazioni, la LET dello ione e la sua direzione venivano modificate, mantenendone però costanti la Location, corrispondente al centro del drain, *Wt_hi* e la *Lenght*. Quest'ultima è stata scelta in modo tale che lo ione attraversasse tutto l'nMOSFET.

Gli angoli d'incidenza studiati sono riportati in figura.

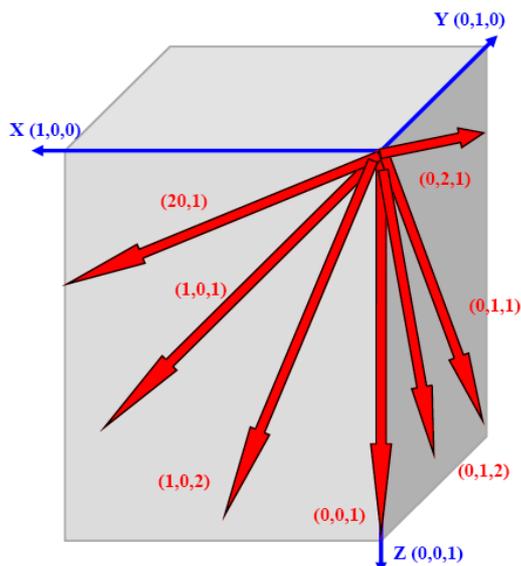


Figura 5.8: Orientazione(X,Y,Z) dell'nMOSFET e direzioni degli ioni impattanti utilizzati nelle simulazioni.

Per ogni diversa angolazione sono state eseguite numerose simulazioni, studiandone, al termine di ognuna, il valore che la tensione assumeva ai nodi Q e nQ, verificando quindi se tale valore rimaneva perturbato o meno al termine del feedback. Un esempio viene riportato di seguito.

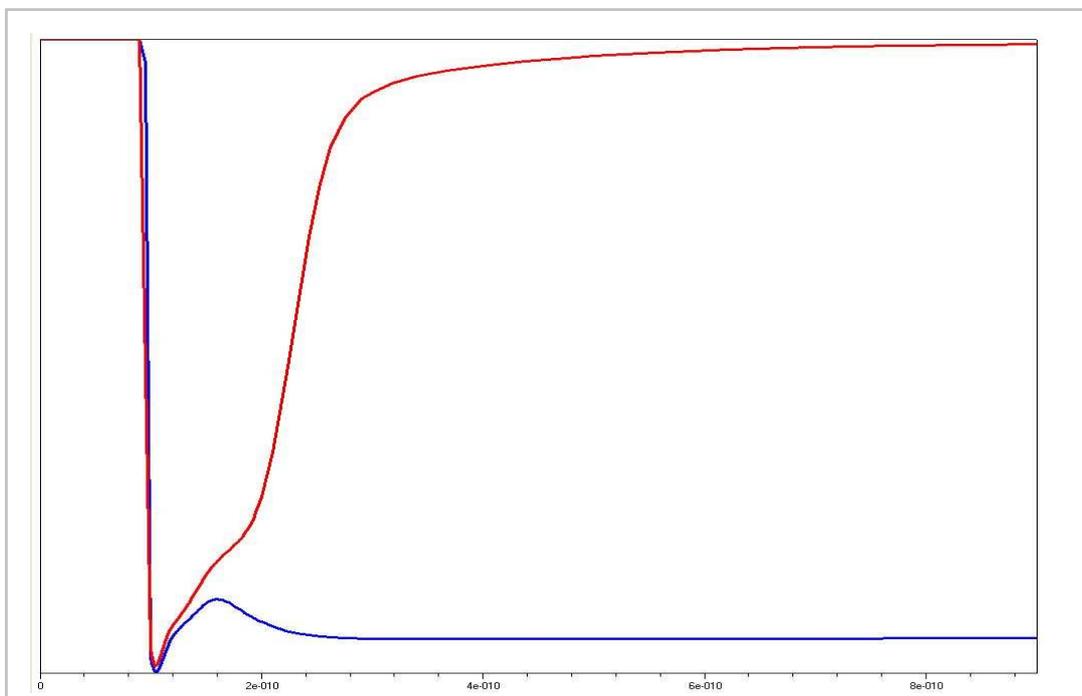


Figura 5.9: Andamento della tensione al nodo Q. Si distingue il momento dell'impatto in cui la tensione precipita al valore minimo. L'andamento descritto dalla curva blu indica che lo ione ha prodotto il cambiamento del dato memorizzato, mentre in quello descritto dalla curva rossa non vi è alterazione.

Eseguendo l'analisi della tensione al nodo Q utilizzando Inspect, attraverso simulazioni successive, si è trovata la LET di soglia relativa ad ogni angolazione.

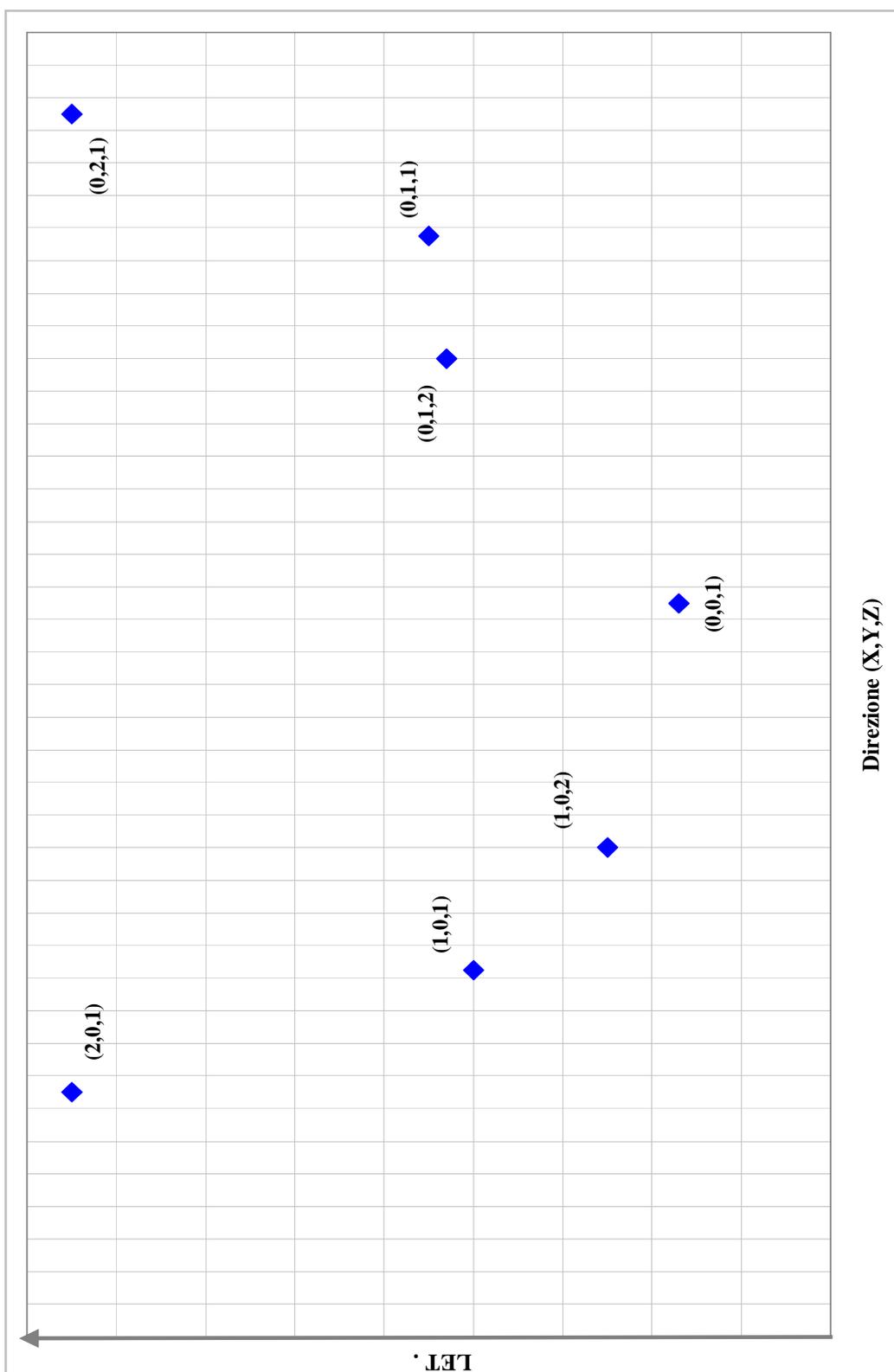


Figura 5.10: Andamento della LET di soglia in funzione dell'angolo d'incidenza. Si nota che il valore minimo si ha in corrispondenza della direzione perpendicolare al drain.

Il grafico riportato evidenzia come la LET di soglia minima si ha in corrispondenza dell'angolo d'incidenza verticale. Mano a mano che ci si allontana da questa angolazione essa aumenta, fino a diventare molto elevata in corrispondenza di una direzione quasi parallela al drain stesso. Questo conferma la diversa sensibilità agli SEE in funzione dell'angolazione con cui avviene l'impatto, nonostante il punto in cui avviene sia lo stesso.

Nella pagina vengono riportate delle immagini significative dell'evolversi temporale della densità di elettroni all'interno dell'nMOSFET impattato in direzione (1,0,1), presa come esempio. Per estrapolare queste immagini è stato utilizzato Tecplot_ISE ed operando un "taglio in direzione Y" al MOSFET.

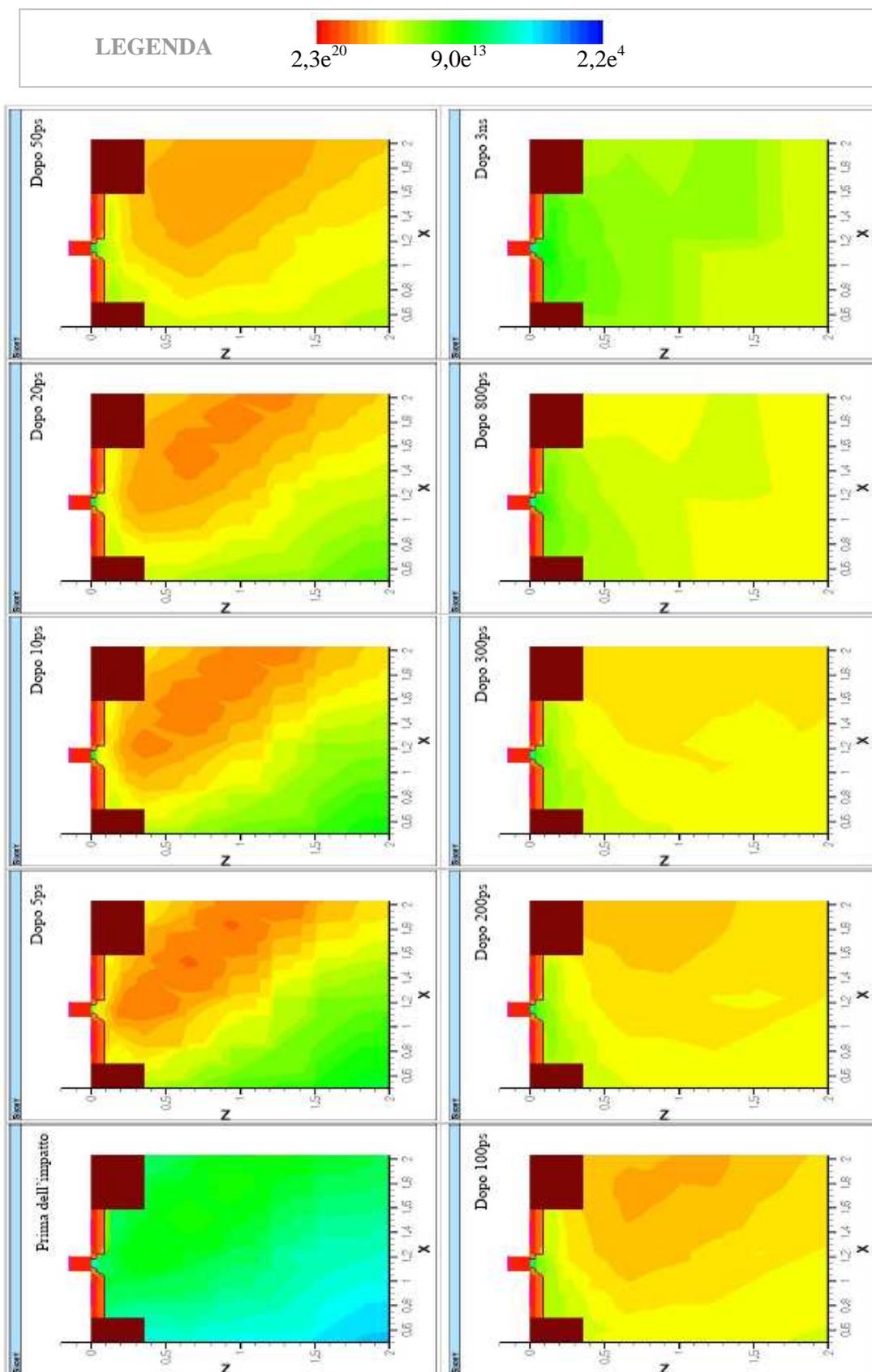


Figura 5.11: Evolversi temporale della densità di elettroni al passaggio di uno ione in direzione (1,0,1).

CONCLUSIONI

Come si è visto, gli effetti da evento singolo influenzeranno in modo pesante le nuove e future tecnologie CMOS e più in generale dei dispositivi microelettronici. Dato che le fasi di analisi e progettazione risultano comunque lunghe e dispendiose, risulta necessario “testare”, anche prima della realizzazione fisica, i nuovi dispositivi circa gli effetti da radiazione ionizzante. Le simulazioni, in questo, risultano essere un valido strumento.

Con i tools a disposizione in ISE TCAD è possibile realizzare l'elemento microelettronico tridimensionalmente, per poi sottoporlo a svariati test sugli effetti da evento singolo, scegliendo ione, punto d'impatto, la traccia, ecc.... In questo modo si riescono ad ottenere dei risultati sufficientemente accurati, che, se non possono del tutto sostituire quelli sperimentali, possono almeno ridurre le prove definendone il range. Questo, comunque, riduce notevolmente le tempistiche sperimentali.

Le prove realizzate, utilizzando ISE TCAD, su una cella di memoria SRAM, utilizzando il metodo mixed-mode, hanno seguito l'iter metodologico generale, sfruttando appieno buona parte dei tools a disposizione. Come emerso anche da questi studi, sia nella fase finale, che in quella realizzativa, la definizione dei modelli fisici, l'estrazione del modello Spice, la struttura della traccia, solo per citarne alcuni, non risultano banali. Per poter ricalcare nel migliori dei modi i risultati ottenuti sperimentalmente, tali procedure sono risultate lunghe e non sempre di semplice soluzione. Infatti, i risultati finali ottenuti, riproducono in modo abbastanza accurato il trend ottenuto da quelli sperimentali, ma non a livello numerico.

ALLEGATI

1. ALLEGATO 1

Si riporta il listato per la creazione dell'nMOSFET e del pMOSFET in 3D utilizzati per ricavarne i modelli *SPICE*. [44]

nMOSFET IBM 8RF NMOS device

```
(isegeo:set-default-boolean "ABA")
```

```
;Bulk
```

```
(isegeo:create-cuboid (position -1.21 2 5) (position 3.5 -2 0) "Silicon"  
"R.Bulk")
```

```
;Gate poly and oxide
```

```
(isegeo:create-cuboid (position 1.205 0.4 0) (position 1.085 -0.6 -0.0025)  
"SiO2" "R.GateOxide")  
(isegeo:create-cuboid (position 1.205 0.4 -0.0025) (position 1.085 -0.6 -0.1425)  
"PolySi" "R.PolyGate")
```

```
;Field oxide extensions
```

```
(isegeo:create-cuboid (position 1.205 0.4 -0.0) (position 1.085 0.63 -0.025)  
"SiO2" "R.FieldOxideA")  
(isegeo:create-cuboid (position 1.205 -0.6 -0.0) (position 1.085 -0.83 -0.025)  
"SiO2" "R.FieldOxideB")
```

```
;Gate poly extensions
```

```
(isegeo:create-cuboid (position 1.205 0.4 -0.025) (position 1.085 0.63 -0.1425)  
"PolySi" "R.PolyGateA")  
(isegeo:create-cuboid (position 1.205 -0.6 -0.025) (position 1.085 -0.83 -  
0.1425) "PolySi" "R.PolyGateB")
```

```
;STI
```

```
(isegeo:create-cuboid (position 3.5 0.4 0) (position 1.59 -0.6 0.36) "SiO2"  
"R.STI2")
```

```

(isegeo:create-cuboid (position -1.21 0.77 0) (position 3.5 0.4 0.36) "SiO2"
"R.STI3")
(isegeo:create-cuboid (position -1.21 1.05 0) (position 3.5 2 0.36) "SiO2"
"R.STI4")
(isegeo:create-cuboid (position 0.7 0.4 0) (position -1.21 -0.6 0.36) "SiO2"
"R.STI6")
(isegeo:create-cuboid (position -1.21 -0.4 0) (position 0 -2 0.36) "SiO2"
"R.STI7")
(isegeo:create-cuboid (position 3.5 -0.6 0) (position 0 -2 0.36) "SiO2"
"R.STI8")
(isegeo:create-cuboid (position -1.21 0.77 0) (position 0.29 1.05 0.36) "SiO2"
"R.STI9")
(isegeo:create-cuboid (position 3.5 0.77 0) (position 2 1.05 0.36) "SiO2"
"R.STI10")

;;Contacts
(isegeo:define-contact-set "Drain" 4.0 (color:rgb 1.0 1.0 0.0) "###")
(isegeo:define-contact-set "Gate" 4.0 (color:rgb 1.0 0.0 1.0) "###")
(isegeo:define-contact-set "Source" 4.0 (color:rgb 1.0 1.0 1.0) "###")
(isegeo:define-contact-set "Substrate" 4.0 (color:rgb 0.0 1.0 1.0) "###")
(isegeo:define-contact-set "Pwell" 4.0 (color:rgb 0.0 1.0 1.0) "###")
(isegeo:create-cuboid (position 1.205 0.4 -0.1425) (position 1.085 -0.6 -2)
"Metal" "Gatmetal")
(isegeo:define-3d-contact (find-face-id (position 1.145 0 -0.1425)) "Gate")
(isegeo:delete-region (find-body-id (position 1.145 0 -1)))
(isegeo:create-cuboid (position 0.59 1 0) (position 1.7 0.82 -2) "Metal"
"Pwellmetal")
(isegeo:define-3d-contact (find-face-id (position 0.8 0.92 0)) "Pwell")
(isegeo:delete-region (find-body-id (position 0.8 0.92 -1)))
(isegeo:define-3d-contact (find-face-id (position 0 0 5)) "Substrate")
(isegeo:create-cuboid (position 1.4975 0.3 0) (position 1.2975 -0.5 -2) "Metal"
"Sourcemetal")
(isegeo:define-3d-contact (find-face-id (position 1.3975 0 0)) "Source")
(isegeo:delete-region (find-body-id (position 1.3975 0 -1)))

```

```

(isegeo:create-cuboid (position 0.9925 0.3 0) (position 0.7925 -0.5 -2) "Metal"
"Drainmetal")
(isegeo:define-3d-contact (find-face-id (position 0.8925 0 0)) "Drain")
(isegeo:delete-region (find-body-id (position 0.8925 0 -1)))
;-----Lets add in some dopings for the device -----
-----;-----
;First, lets begin with all the constant doping profiles

;Constant Doping in the poly
(isedr:define-constant-profile "Profile.Polyconst.Phos"
ArsenicActiveConcentration" 1e20)
(isedr:define-constant-profile-material "Place.Polyconst.Phos1"
"Profile.Polyconst.Phos" "PolySi")

;--Constant Doping in the silicon substrate region
(isedr:define-refinement-window "Window.Silconst.Bor" "Cuboid" (position -
1.21 2 0) (position 3.5 -2 5))
(isedr:define-constant-profile "Profile.Silconst.Bor"
"BoronActiveConcentration" 1e16)
(isedr:define-constant-profile-placement "Place.Silconst.Bor"
"Profile.Silconst.Bor" "Window.Silconst.Bor")

;--Boron doping in the silicon
;--Assumes deep pwell implant goes through whole die
(isedr:define-refinement-window "Window.DeepPWell.Bor.1" "Rectangle"
(position 1.21 2 1.25) (position 3.5 -2 1.25))
(isedr:define-gaussian-profile "Profile.DeepPWell.Bor.1"
"BoronActiveConcentration" "PeakPos" 0 "PeakVal" 1e18 "ValueAtDepth" 1e16
"Depth" 0.4 "Gauss" "Factor" 0.0001)
(isedr:define-analytical-profile-placement "Place.DeepPWell.Bor.1"
"Profile.DeepPWell.Bor.1" "Window.DeepPWell.Bor.1" "Symm" "NoReplace"
"Eval")

; Regular pwell
(isedr:define-refinement-window "Window.PWell.Bor.2" "Rectangle" (position
-1.21 2 0.65) (position 3.5 -2 0.65))

```

```
(isedr:define-gaussian-profile "Profile.PWell.Bor.2"
"BoronActiveConcentration" "PeakPos" 0 "PeakVal" 8e17 "ValueAtDepth" 1e17
"Depth" 0.35 "Gauss" "Factor" 0.01)
(isedr:define-analytical-profile-placement "Place.PWell.Bor.2"
"Profile.PWell.Bor.2" "Window.PWell.Bor.2" "Symm" "NoReplace" "Eval")

;pwell contact doping
(isedr:define-refinement-window "Window.PWellCon.Bor.3A" "Rectangle"
(position 0.29 1.05 0) (position 2 0.77 0))
(isedr:define-gaussian-profile "Profile.PWellCon.Bor.3A"
"BoronActiveConcentration" "PeakPos" 0 "PeakVal" 9e19 "ValueAtDepth" 1e17
"Depth" 0.08 "Gauss" "Factor" 0.01)
(isedr:define-analytical-profile-placement "Place.PWellCon.Bor.3A"
"Profile.PWellCon.Bor.3A" "Window.PWellCon.Bor.3A" "Symm" "NoReplace"
"Eval")

; STI Implant -Front & Back Extensions (Added 4/06/06)
(isedr:define-refinement-window "Window.FrontB" "Cuboid" (position 1.205
0.4 0) (position 1.085 0.385 0.36))
(isedr:define-refinement-window "Window.BackB" "Cuboid" (position 1.205 -
0.6 0) (position 1.085 -0.585 0.36))
(isedr:define-constant-profile "Profile.ImplantB" "BoronActiveConcentration"
5e19)
(isedr:define-constant-profile-placement "Place.Implant.FrontB"
"Profile.ImplantB" "Window.FrontB")
(isedr:define-constant-profile-placement "Place.Implant.BackB"
"Profile.ImplantB" "Window.BackB")

;--Arsenic doping in the silicon
; -DRAIN SIDE
(isedr:define-refinement-window "drain.Profile.Region" "Rectangle" (position
1.056 0.4 0) (position 0.7 -0.6 0))
(isedr:define-gaussian-profile "drain.Profile" "ArsenicActiveConcentration"
"PeakPos" 0 "PeakVal" 2e20 "ValueAtDepth" 1e17 "Depth" 0.08 "Gauss"
"Factor" 0.1)
```

```
(isedr:define-analytical-profile-placement "drain.Profile.Place" "drain.Profile"
"drain.Profile.Region" "Symm" "NoReplace" "Eval")

; -SOURCE SIDE
(isedr:define-refinement-window "source.Profile.Region" "Rectangle" (position
1.234 0.4 0) (position 1.59 -0.6 0))
(isedr:define-gaussian-profile "source.Profile" "ArsenicActiveConcentration"
"PeakPos" 0 "PeakVal" 2e20 "ValueAtDepth" 1e17 "Depth" 0.08 "Gauss"
"Factor" 0.1)
(isedr:define-analytical-profile-placement "source.Profile.Place"
"source.Profile" "source.Profile.Region" "Symm" "NoReplace" "Eval")

; Lightly Doped Drain
;ORIGINAL (isedr:define-refinement-window "drainldd.Profile.Region"
"Rectangle" (position (1.106 0.0) 0.4 0) (position 0.7 -0.6 0))
(isedr:define-refinement-window "drainldd.Profile.Region" "Rectangle"
(position (+ 1.106 0.0) 0.4 0) (position 0.7 -0.6 0))
(isedr:define-gaussian-profile "drainldd.Profile" "ArsenicActiveConcentration"
"PeakPos" 0 "PeakVal" 2.5e19 "ValueAtDepth" 1e17 "Depth" 0.03 "Gauss"
"Factor" 0.1)
(isedr:define-analytical-profile-placement "drainldd.Profile.Place"
"drainldd.Profile" "drainldd.Profile.Region" "Symm" "NoReplace" "Eval")

; Lightly Doped Source
;ORIGINAL (isedr:define-refinement-window "sourceldd.Profile.Region"
"Rectangle" (position (+1.184 0.0) 0.4 0) (position 1.59 -0.6 0))
(isedr:define-refinement-window "sourceldd.Profile.Region" "Rectangle"
(position (+ 1.184 0.0) 0.4 0) (position 1.59 -0.6 0))
(isedr:define-gaussian-profile "sourceldd.Profile"
"ArsenicActiveConcentration" "PeakPos" 0 "PeakVal" 2.5e19 "ValueAtDepth"
1e17 "Depth" 0.03 "Gauss" "Factor" 0.1)
(isedr:define-analytical-profile-placement "sourceldd.Profile.Place"
"sourceldd.Profile" "sourceldd.Profile.Region" "Symm" "NoReplace" "Eval")

; Vt IMPLANT
```

```
(isedr:define-refinement-window "implant.Profile.Region" "Rectangle"
(position 1.175 0.4 0.0165) (position 1.115 -0.6 0.0165))
(isedr:define-gaussian-profile "implant.Profile" "BoronActiveConcentration"
"PeakPos" 0 "PeakVal" 6e18 "ValueAtDepth" 1e17 "Depth" 0.0165 "Gauss"
"Factor" 0.0001)
(isedr:define-analytical-profile-placement "implant.Profile.Place"
"implant.Profile" "implant.Profile.Region" "Symm" "NoReplace" "Eval")

;;bulk meshing
; Meshing Strategy:
(isedr:define-refinement-size "size.whole" 0.75 0.9 0.75 0.3 0.3 0.15)
(isedr:define-refinement-window "window.whole" "Cuboid" (position -1.21 2
0) (position 3.5 -2 5))
(isedr:define-refinement-placement "placement.whole" "size.whole"
"window.whole" )
(isedr:define-refinement-size "size.well" 0.1 0.1 0.05 0.05 0.05 0.05)
(isedr:define-refinement-function "size.well" "DopingConcentration"
"MaxTransDiff" 1)
(isedr:define-refinement-window "window.well" "Cuboid" (position 0.29 0.77
0) (position 2 1.05 0.1))
(isedr:define-refinement-placement "placement.well" "size.well"
"window.well" )
(isedr:define-refinement-size "size.dopingmesh1" 0.1 0.1 0.05 0.025 0.025
0.025)
(isedr:define-refinement-function "size.dopingmesh1" "DopingConcentration"
"MaxTransDiff" 1)
(isedr:define-refinement-window "window.dopingmesh1" "Cuboid" (position
0.7 0.4 0) (position 1.59 -0.6 0.1))
(isedr:define-refinement-placement "placement.dopingmesh1"
"size.dopingmesh1" "window.dopingmesh1" )
(isedr:define-refinement-size "size.dopingmesh2" 0.075 0.075 0.05 0.005 0.01
0.005)
(isedr:define-refinement-function "size.dopingmesh2" "DopingConcentration"
"MaxTransDiff" 1)
```

```
(isedr:define-refinement-window "window.dopingmesh2" "Cuboid" (position
1.215 0.4 0) (position 1.075 -0.6 0.1))
(isedr:define-refinement-placement "placement.dopingmesh2"
"size.dopingmesh2" "window.dopingmesh2" )
(ise:save-model "NMOS")
pMOSFET IBM 8RF NMOS device

(isegeo:set-default-boolean "ABA")

;Bulk
(isegeo:create-cuboid (position -1.21 2 5) (position 3.5 -2 0) "Silicon"
"R.Bulk")

;Gate poly and oxide
(isegeo:create-cuboid (position 1.205 0.4 0) (position 1.085 -0.6 -0.0025)
"SiO2" "R.GateOxide")
(isegeo:create-cuboid (position 1.205 0.4 -0.0025) (position 1.085 -0.6 -0.1425)
"PolySi" "R.PolyGate")

;Field oxide extensions
(isegeo:create-cuboid (position 1.205 0.4 0.0) (position 1.085 0.63 -0.025)
"SiO2" "R.FieldOxideA")
(isegeo:create-cuboid (position 1.205 -0.6 0.0) (position 1.085 -0.83 -0.025)
"SiO2" "R.FieldOxideB")

;Gate poly extensions
(isegeo:create-cuboid (position 1.205 0.4 -0.025) (position 1.085 0.63 -0.1425)
"PolySi" "R.PolyGateA")
(isegeo:create-cuboid (position 1.205 -0.6 -0.025) (position 1.085 -0.83 -
0.1425) "PolySi" "R.PolyGateB")
(isegeo:create-cuboid (position 3.5 0.4 0) (position 1.59 -0.6 0.36) "SiO2"
"R.STI2")
(isegeo:create-cuboid (position -1.21 0.77 0) (position 3.5 0.4 0.36) "SiO2"
"R.STI3")
(isegeo:create-cuboid (position -1.21 1.05 0) (position 3.5 2 0.36) "SiO2"
"R.STI4")
```

```

    (isegeo:create-cuboid (position 0.7 0.4 0) (position -1.21 -0.6 0.36) "SiO2"
"R.STI6")
    (isegeo:create-cuboid (position -1.21 -0.4 0) (position 0 -2 0.36) "SiO2"
"R.STI7")
    (isegeo:create-cuboid (position 3.5 -0.6 0) (position 0 -2 0.36) "SiO2"
"R.STI8")
    (isegeo:create-cuboid (position -1.21 0.77 0) (position 0.29 1.05 0.36) "SiO2"
"R.STI9")
    (isegeo:create-cuboid (position 3.5 0.77 0) (position 2 1.05 0.36) "SiO2"
"R.STI10")

;Contacts
(isegeo:define-contact-set "Drain" 4.0 (color:rgb 1.0 1.0 0.0) "###")
(isegeo:define-contact-set "Gate" 4.0 (color:rgb 1.0 0.0 1.0) "###")
(isegeo:define-contact-set "Source" 4.0 (color:rgb 1.0 1.0 1.0) "###")
(isegeo:define-contact-set "Substrate" 4.0 (color:rgb 0.0 1.0 1.0) "###")
(isegeo:define-contact-set "Nwell" 4.0 (color:rgb 0.0 1.0 1.0) "###")
(isegeo:create-cuboid (position 1.205 0.4 -0.1425) (position 1.085 -0.6 -2)
"Metal" "Gatmetal")
(isegeo:define-3d-contact (find-face-id (position 1.145 0 -0.1425)) "Gate")
(isegeo:delete-region (find-body-id (position 1.145 0 -1)))
(isegeo:create-cuboid (position 0.59 1 0) (position 1.7 0.82 -2) "Metal"
"Nwellmetal")
(isegeo:define-3d-contact (find-face-id (position 0.8 0.92 0)) "Nwell")
(isegeo:delete-region (find-body-id (position 0.8 0.92 -1)))
(isegeo:define-3d-contact (find-face-id (position 0 0 5)) "Substrate")
(isegeo:create-cuboid (position 1.4975 0.3 0) (position 1.2975 -0.5 -2) "Metal"
"Sourcemetal")
(isegeo:define-3d-contact (find-face-id (position 1.3975 0 0)) "Source")
(isegeo:delete-region (find-body-id (position 1.3975 0 -1)))
(isegeo:create-cuboid (position 0.9925 0.3 0) (position 0.7925 -0.5 -2) "Metal"
"Drainmetal")
(isegeo:define-3d-contact (find-face-id (position 0.8925 0 0)) "Drain")
(isegeo:delete-region (find-body-id (position 0.8925 0 -1)))

```

```

;-----Lets add in some dopings for the device -----
-----;-----
;Constant Doping in the poly
(isedr:define-constant-profile "Profile.Polyconst.Phos"
"BoronActiveConcentration" 1e20)
(isedr:define-constant-profile-material "Place.Polyconst.Phos1"
"Profile.Polyconst.Phos" "PolySi")

;--Constant Doping in the silicon substrate region
(isedr:define-refinement-window "Window.Silconst.Bor" "Cuboid" (position -
1.21 2 0) (position 3.5 -2 5))
(isedr:define-constant-profile "Profile.Silconst.Bor"
"BoronActiveConcentration" 1e16)
(isedr:define-constant-profile-placement "Place.Silconst.Bor"
"Profile.Silconst.Bor" "Window.Silconst.Bor")

;--Boron doping in the silicon
;--Assumes deep pwell implant goes through whole die
;ORIGINAL (isedr:define-refinement-window "Window.DeepPWell.Bor.1"
"Rectangle" (position - 1.21 2 1.25) (position 3.5 -2 1.25))
(isedr:define-refinement-window "Window.DeepPWell.Bor.1" "Rectangle"
(position -1.21 2 1.25) (position 3.5 -2 1.25))
(isedr:define-gaussian-profile "Profile.DeepPWell.Bor.1"
"BoronActiveConcentration" "PeakPos" 0 "PeakVal" 1e18 "ValueAtDepth" 1e16
"Depth" 0.4 "Gauss" "Factor" 0.0001)
(isedr:define-analytical-profile-placement "Place.DeepPWell.Bor.1"
"Profile.DeepPWell.Bor.1" "Window.DeepPWell.Bor.1" "Symm" "NoReplace"
"Eval")

; Regular nwell
(isedr:define-refinement-window "Window.NWell.Bor.2" "Rectangle"
(position -1.21 2 0.45) (position 3.5 -2 0.45))
(isedr:define-gaussian-profile "Profile.NWell.Bor.2"
"ArsenicActiveConcentration" "PeakPos" 0 "PeakVal" 1e17 "ValueAtDepth"
1e16 "Depth" 0.45 "Gauss" "Factor" 0.01)

```

```
(isedr:define-analytical-profile-placement "Place.NWell.Bor.2"
"Profile.NWell.Bor.2" "Window.NWell.Bor.2" "Symm" "NoReplace" "Eval")

;nwell contact doping
(isedr:define-refinement-window "Window.NWellCon.Bor.3A" "Rectangle"
(position 0.29 1.05 0) (position 2 0.77 0))
(isedr:define-gaussian-profile "Profile.NWellCon.Bor.3A"
"ArsenicActiveConcentration" "PeakPos" 0 "PeakVal" 9e19 "ValueAtDepth"
3e17 "Depth" 0.08 "Gauss" "Factor" 0.01)
(isedr:define-analytical-profile-placement "Place.NWellCon.Bor.3A"
"Profile.NWellCon.Bor.3A" "Window.NWellCon.Bor.3A" "Symm" "NoReplace"
"Eval")

; STI Implant -Front & Back Extensions (Added 4/06/06)
(isedr:define-refinement-window "Window.FrontB" "Cuboid" (position 1.205
0.4 0) (position 1.085 0.385 0.36))
(isedr:define-refinement-window "Window.BackB" "Cuboid" (position 1.205 -
0.6 0) (position 1.085 -0.585 0.36))
(isedr:define-constant-profile "Profile.ImplantB"
"ArsenicActiveConcentration" 5e19)
(isedr:define-constant-profile-placement "Place.Implant.FrontB"
"Profile.ImplantB" "Window.FrontB")
(isedr:define-constant-profile-placement "Place.Implant.BackB"
"Profile.ImplantB" "Window.BackB")

;--Boron doping in the silicon

;-DRAIN SIDE
(isedr:define-refinement-window "drain.Profile.Region" "Rectangle" (position
1.056 0.4 0) (position 0.7 -0.6 0))
(isedr:define-gaussian-profile "drain.Profile" "BoronActiveConcentration"
"PeakPos" 0 "PeakVal" 2e20 "ValueAtDepth" 1e17 "Depth" 0.08 "Gauss"
"Factor" 0.1)
(isedr:define-analytical-profile-placement "drain.Profile.Place" "drain.Profile"
"drain.Profile.Region" "Symm" "NoReplace" "Eval")
```

```
; -SOURCE SIDE
(isedr:define-refinement-window "source.Profile.Region" "Rectangle" (position
1.234 0.4 0) (position 1.59 -0.6 0))
(isedr:define-gaussian-profile "source.Profile" "BoronActiveConcentration"
"PeakPos" 0 "PeakVal" 2e20 "ValueAtDepth" 1e17 "Depth" 0.08 "Gauss"
"Factor" 0.1)
(isedr:define-analytical-profile-placement "source.Profile.Place"
"source.Profile" "source.Profile.Region" "Symm" "NoReplace" "Eval")

; Lightly Doped Drain
; ORIGINAL (isedr:define-refinement-window "drainldd.Profile.Region"
"Rectangle" (position (1.106 0.01685) 0.4 0) (position 0.7 -0.6 0))
(isedr:define-refinement-window "drainldd.Profile.Region" "Rectangle"
(position (+ 1.106 0.01685) 0.4 0) (position 0.7 -0.6 0))
(isedr:define-gaussian-profile "drainldd.Profile" "BoronActiveConcentration"
"PeakPos" 0 "PeakVal" 2.15e18 "ValueAtDepth" 1e17 "Depth" 0.03 "Gauss"
"Factor" 0.1)
(isedr:define-analytical-profile-placement "drainldd.Profile.Place"
"drainldd.Profile" "drainldd.Profile.Region" "Symm" "NoReplace" "Eval")

; Lightly Doped Source
(isedr:define-refinement-window "sourceldd.Profile.Region" "Rectangle"
(position (+ 1.184 0.01685) 0.4 0) (position 1.59 -0.6 0))
(isedr:define-gaussian-profile "sourceldd.Profile" "BoronActiveConcentration"
"PeakPos" 0 "PeakVal" 2.15e18 "ValueAtDepth" 1e17 "Depth" 0.03 "Gauss"
"Factor" 0.1)
(isedr:define-analytical-profile-placement "sourceldd.Profile.Place"
"sourceldd.Profile" "sourceldd.Profile.Region" "Symm" "NoReplace" "Eval")

; Vt IMPLANT
(isedr:define-refinement-window "implant.Profile.Region" "Rectangle"
(position 1.175 0.4 0.0165) (position 1.115 -0.6 0.0165))
(isedr:define-gaussian-profile "implant.Profile" "ArsenicActiveConcentration"
"PeakPos" 0 "PeakVal" 5e18 "ValueAtDepth" 1e17 "Depth" 0.0165 "Gauss"
"Factor" 0.0001)
```

```

(isedr:define-analytical-profile-placement "implant.Profile.Place"
"implant.Profile" "implant.Profile.Region" "Symm" "NoReplace" "Eval")

;bulk meshing
; Meshing Strategy:
(isedr:define-refinement-size "size.whole" 0.25 0.3 0.25 0.1 0.1 0.05)
(isedr:define-refinement-window "window.whole" "Cuboid" (position -1.21 2
0) (position 3.5 -2 5))
(isedr:define-refinement-placement "placement.whole" "size.whole"
"window.whole" )
(isedr:define-refinement-size "size.well" 0.1 0.1 0.05 0.05 0.05 0.05)
(isedr:define-refinement-function "size.well" "DopingConcentration"
"MaxTransDiff" 1)
(isedr:define-refinement-window "window.well" "Cuboid" (position 0.29 0.77
0) (position 2 1.05 0.1))
(isedr:define-refinement-placement "placement.well" "size.well"
"window.well" )
(isedr:define-refinement-size "size.dopingmesh1" 0.1 0.1 0.05 0.025 0.025
0.025)
(isedr:define-refinement-function "size.dopingmesh1" "DopingConcentration"
"MaxTransDiff" 1)
(isedr:define-refinement-window "window.dopingmesh1" "Cuboid" (position
0.7 0.4 0) (position 1.59 -0.6 0.1))
(isedr:define-refinement-placement "placement.dopingmesh1"
"size.dopingmesh1" "window.dopingmesh1" )
(isedr:define-refinement-size "size.dopingmesh2" 0.075 0.075 0.05 0.005 0.01
0.005)
(isedr:define-refinement-function "size.dopingmesh2" "DopingConcentration"
"MaxTransDiff" 1)
(isedr:define-refinement-window "window.dopingmesh2" "Cuboid" (position
1.215 0.4 0) (position 1.075 -0.6 0.1))
(isedr:define-refinement-placement "placement.dopingmesh2"
"size.dopingmesh2" "window.dopingmesh2" )
(ise:save-model "PMOS")

```


2. ALLEGATO 2

Le dimensioni dell'nMOSFET 3D sono state modificate per soddisfare I criteri di minimizzazione della cella.

```
File{  
  SPICEPath = "."  
  Parameter = "dassis.par"  
  Current = "IdVg_0168_t300_spice_des.plt"  
  Output = "IdVg_0168_t300_spice_des.log"  
}
```

```
Plot{  
  *--Density and Currents, etc  
    eDensity hDensity  
    TotalCurrent/Vector eCurrent/Vector hCurrent/Vector  
    eMobility hMobility  
    eVelocity hVelocity  
    eQuasiFermi hQuasiFermi  
  
  *--Temperature  
    eTemperature Temperature * hTemperature  
  
  *--Fields and charges  
    ElectricField/Vector Potential SpaceCharge  
  
  *--Doping Profiles  
    Doping DonorConcentration AcceptorConcentration  
  
  *--Generation/Recombination  
    SRH Band2Band * Auger  
    AvalancheGeneration eAvalancheGeneration hAvalancheGeneration
```

*--Driving forces

eGradQuasiFermi/Vector hGradQuasiFermi/Vector

eEparallel hEparallel eENormal hENormal

*--Band structure/Composition

BandGap

BandGapNarrowing

Affinity

ConductionBand ValenceBand

eQuantumPotential

}

Math {

Extrapolate

Iterations=20

Notdamped =30

RelErrControl

ErRef(Electron)=1.e10

ErRef(Hole)=1.e10

}

System{

Vsource_pset vg (g 0) { dc = 0.0 }

Vsource_pset vd (d 0) { dc = 0.0 }

nMOS130_pset nmos1 (g d 0 0) { w = 0.168e-6 l = 0.13e-6 pd = 5.96e-7
ps = 5.96e-7 ad = 3.14e-14 as = 3.14e-14 }

Plot "IdVg_0168_t300_spice_des.plt" (time() v(d) v(g) i(nmos1,d))

}

Solve {

*- Build-up of initial solution:

NewCurrentFile="init"

Coupled(Iterations=100){ Poisson }

Coupled{ Poisson Electron }

*- Bias drain to target bias

```
Quasistationary(  
  InitialStep=0.01 Increment=2  
  MinStep=1e-2 MaxStep=0.25  
  Goal{Parameter=vd.dc Voltage= 0.05 }  
) { Coupled{ Poisson Electron } }
```

*- Gate voltage sweep

```
NewCurrentFile=""  
Quasistationary(  
  InitialStep=0.01 Increment=2  
  MinStep=1e-2 MaxStep=0.1  
  Goal{ Parameter=vg.dc Voltage= 1.5 }  
) { Coupled{ Poisson Electron }  
  CurrentPlot(Time=(Range=(0 1) Intervals=20))  
}  
}
```


Ringraziamenti

Il termine di questo lavoro e quindi del mio percorso universitario non può concludersi senza ringraziare chi in qualsiasi modo vi abbia contribuito.

Desidero subito esprimere un particolare ringraziamento ai miei genitori e alle mie due sorelline, che mi hanno sempre sostenuta ed aiutata.

Ringrazio Davide per essermi vicino.

Ringrazio inoltre:

- *tutti i miei familiari ed in particolare i miei cugini: Paola, Stefano, Valerio, Claudia ed Enrica;*
- *Alice ed Erika che nonostante la distanza fisica sono sempre state presenti e vicine: due amiche davvero speciali;*
- *gli amici di più lunga data Daniela, Rosita, Alberto, Alexandra con i quali, nel corso degli anni, ho condiviso molto;*
- *Anna, Angelo, Nicolò, Pippo, Matteo, Conte, Inno, Luca, Kiki, Cesca, Arianna, Fuzzu, che mi hanno accolta nel loro gruppo in un momento per me molto particolare;*
- *gli amici-colleghi conosciuti sui banchi universitari ed in particolare Damiano, Arianna, Michele, Diego, Christian con cui ho condiviso momenti di studio, ansie, ma soprattutto momenti di allegria;*
- *agli amici di "Arcadia", in particolare a Veronica, ai quali penso sempre con nostalgia;*
- *il gruppo del coro;*
- *Alessandra per aver sempre cercato di assecondare le mie infinite richieste e cambi all'ultimo minuto, soprattutto in quest'ultimo periodo;*

Ringrazio soprattutto zia Teresa che, come una seconda mamma, è stata per me maestra di vita insegnandomi quelle cose che non si possono né leggere né studiare perché non si trovano in nessun libro. Le porterò e ti riporterò sempre con me.

Elisa Cappellari

Padova, 6 Dicembre 2010

BIBLIOGRAFIA

- [1] J.T. Wallmark and S.M.Marcus, "Minimum size and maximum packing density of nonredundant semiconductor devices", *Proc. IRE*, vol. 50, pp. 286-298, 1962.
- [2] D. Binder, E.C. Smith, and A.B. Holman, "Satellite anomalies from galactic cosmic rays", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 22, pp. 2675-2680, Dec. 1975.
- [3] T.C. May and M.H. Woods, "Alpha-particle-induced soft errors in dynamic memories", *IEEE Trans. Electron. Devices*, vol. 26, pp. 2-9, Feb. 1979.
- [4] E.L.Petersen, "Single event analysis and prediction", in *1997 IEEE NSREC SHORT COURSE*, Snowmass, CO.
- [5] J. Barak, J. Levinson, M. Victoria, and W.Hajadas, "Direct processes in the energy deposition of protons in silicon", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 43, pp. 2820-2826, Dec. 1996.
- [6] S. Duzellier, R. Ecoffet, D. Falguère, T. Nuns, L. Guibert, W. Hajdas, and M.c. Calvet, "Low energy proton induced SEE in memories", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 44, pp. 2306-2310, Dec. 1997.
- [7] L. W. Massengill, "Cosmic and terrestrial single-event radiation effects in dynamic random access memories", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 43, pp. 576-593, Apr. 1996.
- [8] T. Toyabe, T. Shinoda, M. Aoki, H. Kawamoto, K. Mitsusada, T. Masuhara, and S. Asai, "A soft error rate model for MOS dynamic RAM's", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 17, pp. 362-367, Feb. 1982.
- [9] T. V. Rajeevakumar, N. Lu, W. Henkels, W. Hwang, and R. Franch, "A new failure mode of radiation-induced soft errors in dynamic memories," *IEEE Electron. Device Lett.*, vol. 9, pp. 644-646, Dec. 1988.

- [10] C. L. Axness, H. T. Weaver, J. S. Fu, R. Koga, and W. A. Kolasinski, "Mechanisms leading to single event upset", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 33, pp. 1577-1580, Dec. 1986.
- [11] H. T. Weaver, C. L. Axness, J. S. Fu, J. S. Binkley, and J. Mansfield, "RAM cell recovery mechanisms following high-energy ion strikes", *IEEE Electron. Device Lett.*, vol. 8, pp. 7-9, Jan. 1987.
- [12] L. W. Massengill, M. S. Reza, B. L. Bhuvra, and T.L. Turflinger, "Single-event upset cross-section modelling in combitional CMOS logic circuits", *J. Radiation Effects, Res. Eng.*, vol.16, no. 1, 1998.
- [13] S. Selberrer, *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices*. Vienna, New York: Springer-Verlag, 1984.
- [14] M. Lundstrom, *Fundamentals of Carrier Transport, Modularn Series on Solid State Devices*, G. Neudeck, R. Pierret, and Editors, Eds. Reading, MA: Addison-Wesley, 1990, vol. X.
- [15] Y. Apanovich, E. Lyumkis, B. Polski, A. Shur, and P. Blakey, "Steady-State and transient analysis of submicron devices using energy balance and simplified hydrodynamic models," *IEEE Trans. Comput.-Aided Integr.Circuits Syst.*, vol. 13, no. 6, pp. 702–711, Jun. 1994.
- [16] R. Stratton, "Diffusion of hot and cold electrons in semiconductor barriers," *Phys. Rev.*, vol. 126, no. 6, pp. 2002–2013, 1962.
- [17] K. Blotekjaer, "Transport equations for electron in two-valley semiconductors," *IEEE Trans. Electron Dev.*, vol. ED-17, pp. 38–47, 1970.
- [18] W. Quade, M. Rudan, and E. Scholl, "Hydrodynamic simulation of impact- ionisation effects in P-N junctions," *IEEE Trans. Comput.-Aided Design*, vol. 10, pp. 1287–1294, 1991.
- [19] J. R. F. McMacken and S. G. Chamberlain, "An impact ionization model for two-carrier energy-momentum simulation," *Simulation of*

- Semiconductor Devices and Processes*, vol. 4, pp. 499–499, 1991.
- [20] C. Jacoboni and L. Reggiani, “The Monte Carlo method for the solution of charge transport in semiconductors with applications to covalent materials,” *Rev. Mod. Phys.*, vol. 55, no. 3, pp. 645–705, Jul. 1983.
- [21] U. Ravaioli, B. Winstead, C. Wordelman, and A. Kepkep, “Monte-Carlo simulation for ultra-small MOS devices,” *Superlattices and Microstructures*, vol. 27, no. 2/3, pp. 137–145, 2000.
- [22] D. Vasileska and S. M. Goodnick, “Computational electronics,” *Materials Science and Engineering Reports*, vol. 38, no. 5, pp. 181–236, 2002.
- [23] “Synopsys Sentaurus TCAD Tools.” [Online]. Available: <http://www.synopsys.com/products/tcad/tcad.html>
- [24] *Athena/Atlas User’s Manual*. Santa Clara, CA: Silvaco Int., 2004.
- [25] Davinci “Three-dimensional device simulation program manual,” Mountain View, CA, Synopsys, Inc., 2003.
- [26] V. K. Khanna, “Physics of carrier-transport mechanisms and ultrasmall scale phenomena for theoretical modelling of nanometer MOS transistors from diffusive to ballistic regimes of operation,” *Physics Reports*, vol. 398, pp. 67–131, 2004.
- [27] S. Datta, “Nanoscale device modeling: The Green’s function method,” *Superlattices and Microstructures*, vol. 28, pp. 253–278, 2000.
- [28] Z. Ren, R. Venugopal, S. Goasguen, S. Datta, and M. S. Lundstrom, “nanoMOS2.5: A two-dimensional simulator for quantum transport in double-gate MOSFETs,” *IEEE Trans. Electron Dev.*, vol. 50, pp. 1914–1925, 2003.
- [29] M. Bescond, J. L. Autran, D. Munteanu, and M. Lannoo, “Atomic-scale modeling of double-gate MOSFETs using a tight-binding Green’s function formalism,” *Solid State Electron.*, vol. 48, pp. 567–574, 2004.

- [30] J. L. Autran and D. Munteanu, "Simulation of electron transport in nanoscale independent-gate DG devices using a full 2D Green's function approach," *J. Comput. Theoretical Nanosci.*, vol. 5, pp. 1120–1127, 2008.
- [31] E. M. Buturla, P. E. Cottrell, B. M. Grossman, and K. A. Salsburg, "Finite- element analysis of semiconductor devices: The fielday program," *IBM J. Res. Develop.*, vol. 25, no. 4, pp. 218–231, 1981.
- [32] J.G. Rollins and J. Choma, Jr., "Mixed-mode PISCES-SPICE coupled circuit and device solver," *IEEE Trans. Comput. Aided Des. Integr. Circuits Syst.*, vol. 7, no8, pp. 862-867, Aug. 1988.
- [33] P. Roche, J. M. Palau, K. Belhaddad, G. Bruguier, R. Ecoffet, and J. Gasiot, "SEU response of an entire SRAM cell simulated as one contiguous three dimensional device domain," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 45, no. 6, pp. 2534–2543, Dec. 1998.
- [34] P. Roche, J.-M. Palau, C. Tavernier, G. Bruguier, R. Ecoffet, and J.Gasiot, "Determination of key parameters for SEU using full cell 3-D SRAM simulations," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 46, no. 6, pp. 1354–1362, Dec. 1999.
- [35] P. E. Dodd, M. R. Shaneyfelt, K. M. Horn, D. S. Walsh, G. L. Hash, T. A. Hill, B. L. Draper, J. R. Schwank, F. W. Sexton, and P. S. Winokur, "SEU-sensitive volumes in bulk and SOI SRAMs from first-principles calculations and experiments," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 48, no. 6, pp. 1893–1903, Dec. 2001.
- [36] E. J. Kobetich and R. Katz, "Energy deposition by electron beams and δ rays," *Phys. Rev.*, vol. 170, no. 2, pp. 391–396, 1968.
- [37] W. J. Stapor and P. T. McDonald, "Practical approach to ion track energy distribution," *J. Appl. Phys.*, vol. 64, no. 9, pp. 4430–4434, 1988.
- [38] A. R. Knudson and A. B. Campbell, "Comparison of experimental charge

- collection waveforms with PISCES calculations”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 38, no. 6, pp. 1540-1545, Dec. 1991.
- [39] R. S. Wagner, N. Bordes, J. M. Bradley, C. J. Maggiore, A. R. Knudson, and A. B. Campbell, “Alpha-, boron-, silicon-, and iron-ion-induced current transient in low-capitance silicon and GaAs diodes,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 35, no.6, pp.1578-1584, Dec. 1988.
- [40] ISE-TCAD, ISE Integrated Systems Engineering AG, Zurich/CH, Software Release 7.0 User’s Manuals
- [41] M. Ohring, Reliability and Failure of Electronic Materials and Devices, United States of America: Academic Press, 1998.
- [42] http://www.lngs.infn.it/lngs_infn/index.htm?mainRecord=http://www.lngs.infn.it/lngs_infn/contents/lngs_it/public/educational/physics/cosmic_rays/
- [43] D. Munteanu, J. L. Autran, “Modeling and Simulation of Single-Event Effect in Digital Devices and ICs”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 55, no. 4, pp. 1854-1878, August 2008.
- [44] O. A. Amusan, Analysis of single event vulnerabilities in a 130nm CMOS technology, Nashville- Tennessee, December 2006.
- [45] Paul E. Dodd, “Physics-Based Simulation of Single-Event Effects”, *IEEE Trans. On Device and Materials Reliability*, vol. 5, no. 3, September 2005.
- [46] M. Bagatin, S. Gerardin, A. Paccagnella, C. Andreani, G. Gorini, A. Pietropaolo, S.P. Platt, C.D. Frost, “ Factors Impacting the Temperature Dependence of Soft Errors in Commercial SRAMs”, September 2008.
- [47] Paul E. Dodd, Lloyd W. Massengill, “Basic Mechanisms and Modeling of Single-Event Upset in Digital Microelectronics”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 50, no. 3, pp. 583-602, June 2003.